COMUNE DI CERVIA

PROGRAMMA INTEGRATO DI INTERVENTO AI SENSI DELLA L. 179/1992 E ART. 20 L.R.6/1995 DENOMINATO ARTUSI

PIAZZALE ARTUSI - CERVIA

FASE 2

PROGETTO GENERALE:

ARCH. MARCO GAUDENZI

ARCH. GIOVANNI SENNI

PROPRIETA':

Diana Maria
Belletti Gianluca
Belletti Giampiero

Piraccini Lidia
Poletti Flavia

Cigolini Gulesu Leonardo
Benvenuti Elena
Cigolini Gulesu Laura

CONSULENZE SPECIALISTICHE:

ARREDO URBANO
DESIGNER
PIETRO MANUZZI

RETI TECNOLOGICHE E VIABILITA'
ING. CLAUDIO SARDELLA

PROGETTAZIONE DEL VERDE
STUDIO ARCLAB
ARCH. AIDA MORELLI

PUBBLICA ILLUMINAZIONE
STUDIO TECNICO CORTESI
PER. IND. FABIO SAVIOLI

SERIE: R

TAV. 10quadris

DATA: 31/10/2017

REVISIONI:

OGGETTO:

Allegato 3 alla Relazione Geologica

prot. 77261 del 30/11/2017

REDATTO DA:

BOLOGNESI ALBERTO - Geologo

A TERMINI DI LEGGE CI RISERVIAMO LA PROPRIETA' DI QUESTO DISEGNO, CON DIVIETO O RENDERLO COMUNQUE NOTO A TERZI O A DITTE CONCORRENTI SENZA NOSTRA AUTORIZZAZIONE SCRITTA

architettura & interior design
STUDIO 52
pietro manuzzi designer
giovanni senni architetto
via Montalti 52
47023 Cesena FC Italy
tel./fax 0547.611396
e-mail: info@studio-52.com
www.studio-52.com

MARCO GAUDENZI & ASSOCIATI
ARCHITETTURA E DESIGN
via della Sanità 44 - 61100 Pesaro, Italy
tel.+39.0721.402105 - fax+39.0721.23206
www.marcogaudenzi.it
studio@marcogaudenzi.it

elaborato
geologico-sismico-geotecnico

Alberto Bolognesi
Geologo

Allegato n° 3

ANALISI PUNTUALE DI 3° LIVELLO

COOP ADRIATICA

Via Villanova, 27/7
40138 Villanova di Castenaso (BO)

COMUNE DI CERVIA

AREA E5 PRG

INDAGINE GEOLOGICO - GEOTECNICA PER CARATTERIZZAZIONE SISMICA DI SITO ANALISI PUNTUALE DI 3° LIVELLO

RELAZIONE TECNICA

Data: Settembre 2011	Archivio 1113/2011	1113 - Relazione RSL - Area E5.doc

Impresa esecutrice:

PROGEO S.r.L.
Via Talete 10/8
47100 Forlì
tel. 0543 723580
fax. 0543 721486
mail.progeo@gmail.com

CERMET SISTEMA DI GESTIONE CERTIFICATO
REG. N. 2619 - A
UNI EN ISO 9001 - 2008

Società certificata con sistema di Qualità UNI EN ISO 9001 - 2008 n° 2619-A

Il Direttore Tecnico per l'impresa:

INDICE

1. INTRODUZIONE 3
1.1. Premessa 3
1.2. Normativa di riferimento vigente 4
1.3. Finalità 5
1.4. Valutazioni Risposta Sismica Locale e Microzonazione Sismica 5
2. AZIONE SISMICA 7
2.1. Sismicità Locale di Base 7
2.2. Risposta Sismica Locale 7
2.3 Vulnerabilità sismica degli edifici 8
2.4. Categorie di suolo 8
3. ANALISI GEOLITOLOGICA E MORFOLOGICA LOCALE 10
4. CAMPAGNA GEOGNOSTICA 13
4.1. Indagini geotecniche 13
4.2. Indagini geofisiche 13
5. PARAMETRIZZAZIONE GEOTECNICA E GEOFISICA DI SITO 16
6. ANALISI MICROSISMICA 18
6.1. Risposta sismica locale 18
6.2. Analisi sismica puntuale 19
7. VALUTAZIONE DEL RISCHIO DI LIQUEFAZIONE 34
7.1 Valutazione della possibilità di occorrenza dei fenomeni di liquefazione 34
7.2 Metodi per la stima dell'analisi alla liquefazione e dei cedimenti 34
7.3 Analisi della suscettibilità alla liquefazione 37
7.4 Stima dei cedimenti permanenti 38

APPENDICI:

- DOWN HOLE
- PROVA PENETROMETRICA SISMICA ("CONO SISMICO")
- INDAGINI DI SISMICA PASSIVA - METODOLOGIA HVSR

ELABORATI GRAFICI

- Fig. 1 Planimetria indagini
- Fig. 2÷5 Elaborati Prova Down Hole
- Fig. 6-7 Elaborati Prova Cono Sismico
- Fig. 8÷17 Certificati prove HVSR
- A seguire Report principale dell'analisi della liquefazione sulle CPT

Coop Adriatica

Via Villavona, 29/7
40138 Villanova di Castenaso (BO)

COMUNE DI CERVIA

AREA E5 PRG Comune di Cervia

**INDAGINE GEOLOGICO - GEOTECNICA
PER CARATTERIZZAZIONE SISMICA DI SITO
ANALISI PUNTUALE DI 3° LIVELLO**

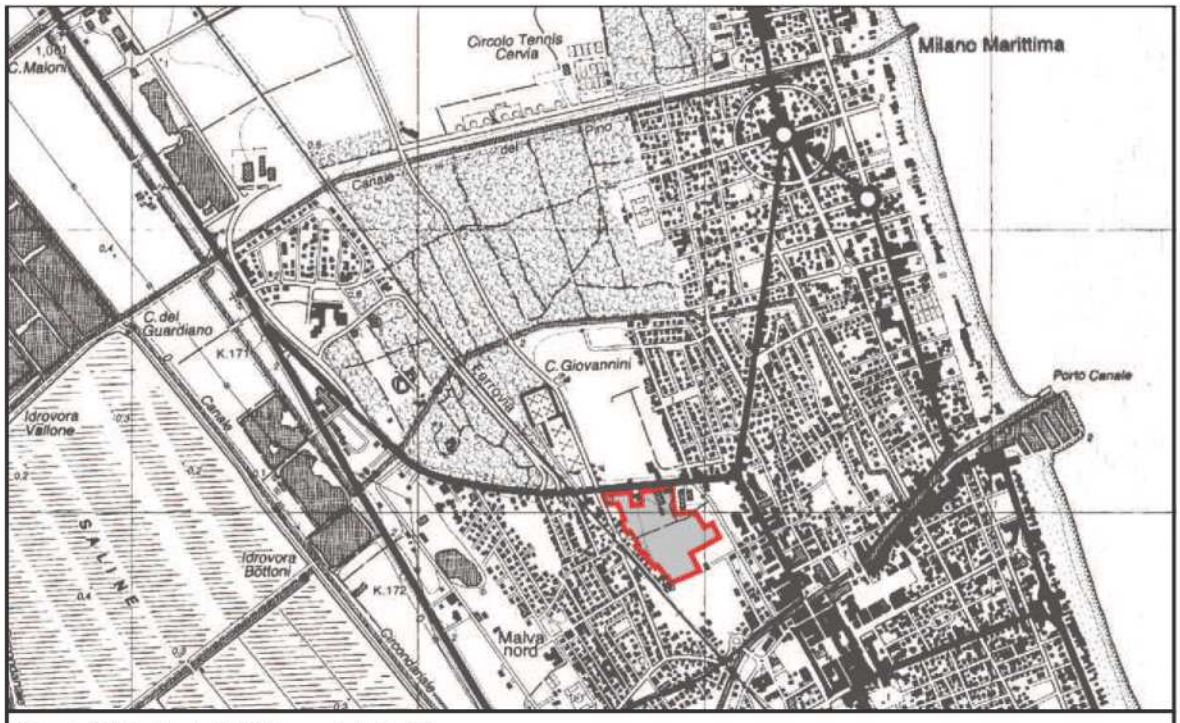
1. INTRODUZIONE

1.1. Premessa

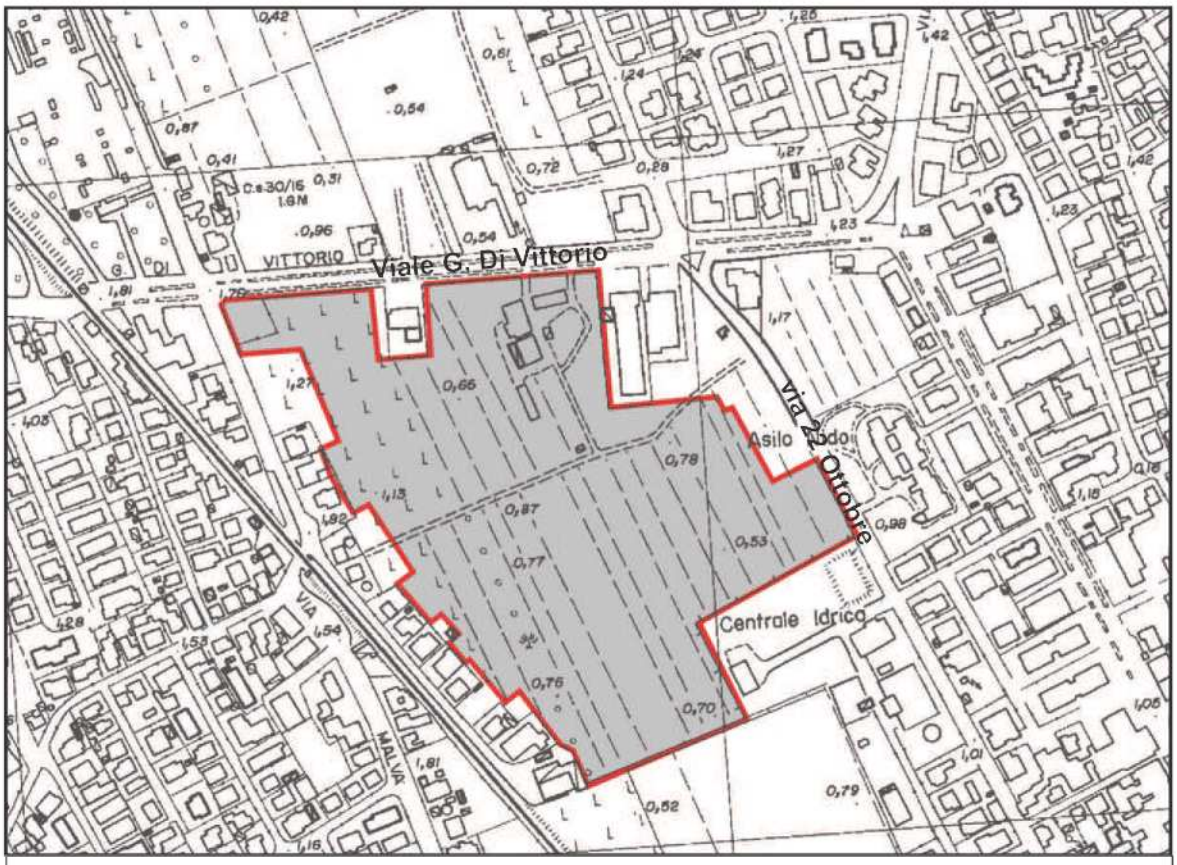
Il presente studio di caratterizzazione sismica è stato eseguito nell'area interessata dal piano urbanistico attuativo localizzato nell'area indicata dal P.R.G. del Comune di Cervia "Area E5", in attuazione della recente normativa in materia di riduzione del rischio sismico emessa dalla Regione Emilia-Romagna.

Sull'area in oggetto sono già state realizzate perizie geologiche e prove in sito per la caratterizzazione dei materiali alle quali si è fatto riferimento per lo studio degli effetti locali delle azioni sismiche.

Il sito è localizzato a Cervia (RA) tra viale G Di Vittorio e via 22 Ottobre.



Stralcio C.T.R. Tavola 240SE - scala 1:25 000



Stralcio C.T.R. Elemento 241093 - scala 1:5 000

1.2. Normativa di riferimento vigente

L.R. 20/2000 "*Disciplina generale sulla tutela e uso del Territorio*" all'art. A-2 comma 4 dell'allegato stabilisce che: "nei territori individuati come sismici gli strumenti di pianificazione territoriale e urbanistica concorrono alla riduzione del rischio sismico, sulla base di analisi di pericolosità, vulnerabilità ed esposizione".

Con l'obiettivo di riduzione del rischio sismico, la Regione Emilia-Romagna *con Delibera di Assemblea Legislativa n.112 del 02/05/07* ha approvato il documento: *"Atto di indirizzo e coordinamento tecnico ai sensi dell'art. 16, comma 1, della L.R. 20/2000 – Disciplina generale sulla tutela e l'uso del territorio", in merito a "Indirizzi per gli studi di microzonazione sismica in Emilia Romagna per la pianificazione territoriale e urbanistica",*

Tale deliberazione è stata seguita da una *nota esplicativa redatta dai Servizi della Regione Emilia-Romagna con prot. n. 2007.0166430 del 22/06/07*, dove viene chiarita la necessità di adeguare i nuovi strumenti di pianificazione territoriale e urbanistica e varianti in particolare PTCP e PSC. Tali nuovi strumenti sono tenuti ad adeguati ai contenuti dei punti 3 e 4.1 (1° e 2° livello) dell'atto di indirizzo. Nella stessa nota esplicativa viene inoltre specificato, come indicato al punto 5 dell'atto di indirizzo, che i piani operativi e attuativi (in particolare POC , PUA, e PP) dovranno contenere analisi e approfondimenti di cui al punto 4.2 (3° livello) qualora:

1) sussistano, secondo quanto evidenziato nella relazione geologica di accompagnamento, situazioni di particolare pericolosità elencate nel medesimo paragrafo 4.2 lettere :
   a) aree soggette a liquefazione e densificazione;

b) aree instabili e potenzialmente instabili;
c) aree in cui le coperture hanno spessori fortemente variabili, come ad esempio nelle aree pedemontane e di fondovalle a ridosso dei versanti;

2) nelle aree è prevista la realizzazione di opere di rilevante interesse pubblico (punto 4.2 lettera d);

A riguardo la stessa nota esplicativa riporta una *"Norma Transitoria"* che stabilisce che qualora le valutazioni riportate nella relazione geologica non evidenziano situazioni di particolare pericolosità, di cui al punto 4.2 dell'atto di indirizzo, è possibile approvare lo strumento urbanistico senza approfondimenti di 3° livello.

O.P.C.M. 3274/2003 e D.M. 14/1/2008 "approvazione nuove Norme Tecniche per le Costruzioni" stabilisce che "per i comuni classificati sismici sono richiesti specifici studi per la valutazione del RSL ai fini della definizione della Azione Sismica di Progetto".

1.3. Finalità

Nell'area in oggetto, è prevista la realizzazione di un'opera di rilevante interesse pubblico costituita da un punto vendita al dettaglio a libero servizio di prodotti di largo consumo (supermercato Coop Adriatica) posizionato nella parte più a sud della lottizzazione.
Sulla base delle valutazioni evidenziate nella relazione geologica di accompagnamento al Piano relativo all'area in oggetto, redatta dal dott. Geol. Alberto Bolognesi, si è inoltre rilevata la presenza entro i primi 15 m di profondità dal p.c. di terreni in falda con caratteristiche granulometriche predisponenti alla liquefazione e densificazione.

Tale tipologia di intervento e di terreno ricadono rispettivamente al **punto 4.2 – lettere d) ed a)** dell'allegato "A", della Delibera di Assemblea Legislativa n.112 del 02/05/07, si procederà pertanto all'analisi di Risposta Sismica Locale (RSL) approfondita (3° livello) con riferimento al punto 4.2 dell'allegato "A", della Delibera n.112, che a sua volta rimanda all'Allegato A3 della medesima Delibera.

Si procederà inoltre alle verifiche, ai sensi del D.M. del 14 gennaio 2008 "Norme Tecniche per le Costruzioni", riguardanti:

1) determinazione categorie di suolo (cap. 3.2.2);
2) risposta sismica (cap. 7.11.3.);
3) stabilità nei confronti della liquefazione (paragrafo 7.11.3.4)

1.4. Valutazioni Risposta Sismica Locale e Microzonazione Sismica

Al fine di orientare le scelte della pianificazione verso aree caratterizzate da minore pericolosità sismica (PS) la Delibera n.112/2007 fornisce criteri uniformi per la valutazione della Risposta Sismica Locale (RSL) e Microzonazione Sismica del territorio (MZS), criteri che devono essere osservati dalle Amministrazioni provinciali e comunali nell'elaborazione della propria strumentazione territoriale e urbanistica.

La Delibera n.112/2007 predispone per la MZS analisi sempre di maggiore dettaglio, dall'individuazione del grado di PS alla determinazione della RSL, organizzate in 3 livelli di approfondimento con grado di dettaglio in ordine crescente:

1° Livello: richiesta nella predisposizione del PTCP e PSC con l'elaborazione della "*carta delle aree soggette ad effetti locali*" rispettivamente estesa a tutto il territorio o solo ad aree urbane e urbanizzabili. Le indicazioni per l'elaborazione di tale carta sono indicate all'**Allegato 1** della Delibera n.112/2007.
Questa prima fase di analisi di tipo qualitativo è diretta a definire gli scenari di PS, cioè individuare parti di territorio suscettibili di effetti locali (amplificazioni del segnale sismico, cedimenti, instabilità dei versanti, fenomeni di liquefazione, rotture del terreno, ecc.). L'identificazione di tali aree si basa su rilievi, osservazioni e valutazioni di tipo geologico e geomorfologico ed elaborazione di dati disponibili.
Tale studio concorre alla definizione delle scelte di piano e fornisce le prime indicazioni sui limiti e condizioni di pianificazione.

2° livello: è una analisi di RSL semplificata richiesta per gli strumenti di pianificazione urbanistica comunale (PSC) da effettuare sulle aree urbanizzate o urbanizzabili e individuate dal precedente livello come potenzialmente soggette ad effetti locali.
Sono esclusi da questo livello e dal successivo i comuni classificati in zona 4.
E' una analisi di PS semiquantitativa per aree pianeggianti o sui versanti stabili con acclività ≤ 15°, basata anche su prove geofisiche in sito e geotecniche standard.
Tale analisi ha lo scopo di valutare l'effettivo grado di PS locale per l'elaborazione della carta di MZS e individuare gli ambiti subordinati allo svolgimento di ulteriori indagini e analisi approfondita do 3° livello.
I dati da acquisire ed elaborati da produrre sono elencati al **paragrafo 4.1** dell'allegato "A" della Delibera n.112/2007 che a sua volta rimanda alle tabelle per la valutazione dei fattori di amplificazione sismica (F.A.) e alla valutazione degli effetti topografici riportate nell'**Allegato A2** della medesima Delibera.

3° livello: è una analisi di RSL approfondita richiesta per gli ambiti localizzati in una delle seguenti situazioni **paragrafo 4.2** della Delibera n.112/2007 lettere:

a) aree soggette a liquefazione e densificazione;
b) aree instabili e potenzialmente instabili;
c) aree in cui le coperture hanno spessori fortemente variabili, come ad esempio nelle aree pedemontane e di fondovalle a ridosso dei versanti;
d) nelle aree è prevista la realizzazione di opere di rilevante interesse pubblico (individuate nella *nota esplicativa redatta dai Servizi della Regione Emilia-Romagna con prot. n. 2007.0166430 del 22/06/07)*;

Questo livello è finalizzato a valutare l'effettivo grado di PS locale nelle aree di cui ai punti a), b), c), d) sempre ai fini della carta di MZS.
Il metodo permette una caratterizzazione quantitativa degli effetti di amplificazione sismica attesi al sito (RSL) indipendentemente dalla geometria superficiale e profonda presente.
Tale valutazione puntuale degli effetti di sito richiede specifiche indagini geofisiche e geotecniche in sito e laboratorio.
Tale analisi sarà contenuta nel POC o prescritta dallo stesso per i piani urbanistici attuativi (PUA, PP)
I dati da acquisire ed elaborati da produrre sono elencati al **paragrafo 4.2** dell'allegato "A" della Delibera n.112/2007 che a sua volta rimanda alle procedure dell'**Allegato A3** (liquefazione, pendii instabili, cedimenti postsismici),e **Allegato A4** (spettri di risposta, segnali di riferimento per il calcolo RSL) della medesima Delibera.

2. AZIONE SISMICA

2.1. Sismicità Locale di Base

L'area in esame è posta all'interno del territorio Comunale di Cervia che ai sensi dell'Ordinanza P.C.M. n. 3274 del 23.03.2003 ricade in **Zona Sismica 3** e **Zona sismogenetica 917** proposta dal **"Gruppo di lavoro per la redazione della mappa di pericolosità sismica [2004]".**

Con l'entrata in vigore del D.M. 14 gennaio 2008 l'azione sismica al sito viene determinata facendo riferimento ad un suolo rigido con superficie topografica orizzontale. Tale azioni sismica è definita "pericolosità sismica di base" in assenza cioè di eventuali effetti locali di sito che eventualmente amplificano il segnale sismico per effetto di eventuali amplificazioni stratigrafica e topografica.

La Delibera n.112/2007 determina tale risposta sismica locale RSL in modo differente rispetto alle NTC in quanto non finalizzata alla progettazione.

Negli studi di microzonazione sismica di **secondo livello** la pericolosità sismica del sito viene determinata a partire da una azione sismica di base (a_{refg} = accelerazione massima orizzontale di picco al suolo per T=0 riferito ad un bedrock sismico con Vs ≥ 800m/s, superficie topografica orizzontale e suddivisi per diversi scenari morfologici – Tabella 2 Allegato A4). Tale accelerazione di base andrà incrementata a seconda di fattori di amplificazione (F.A. Tabellati nell'Allegato A2) determinati sulla base di Vs_H e spessori del bedrock ottenuti con opportune indagini. Tale analisi porta alla determinazione di una pericolosità sismica locale da inserire nella MZS.

Nelle condizioni di particolare pericolosità di cui al **paragrafo 4.2** della Delibera n.112/2007 lettere a,b,c,d la stessa delibera prevede una analisi numerica puntuale di terzo livello finalizzata all'ottenimento degli spettri reali di risposta del sito.

La procedura messa a punto dalla normativa fa riferimento ad una sismicità di base caratterizzata da un periodo di ritorno di 475 anni (probabilità di eccedenza del 10% in 50 anni) e può essere implementata considerando altri periodi di ritorno.

2.2. Risposta Sismica Locale

Con il termine di **risposta sismica locale (RSL)** si intende quell'insieme di modifiche che un moto sismico generato ad una determinata profondità subisce attraversando gli strati sovrastanti fino alla superficie (Fig. 1).

Per giungere alla determinazione della risposta sismica locale (2° -3° livello) un sito deve essere sottoposto a specifiche indagini di dettaglio finalizzate alla definizione di tutte le proprietà puntuali che la caratterizzano e in modo particolare i seguente aspetti:

1. Stratigrafia delle formazioni superficiali con definizione dei contatti tra di esse;
2. Profili di velocità delle onde sismiche;
3. Caratteristiche meccaniche dei terreni delle formazioni superficiali con particolare riferimento al loro comportamento sotto l'azione di cariche ciclici e dinamici
4. Morfologia dell'area.

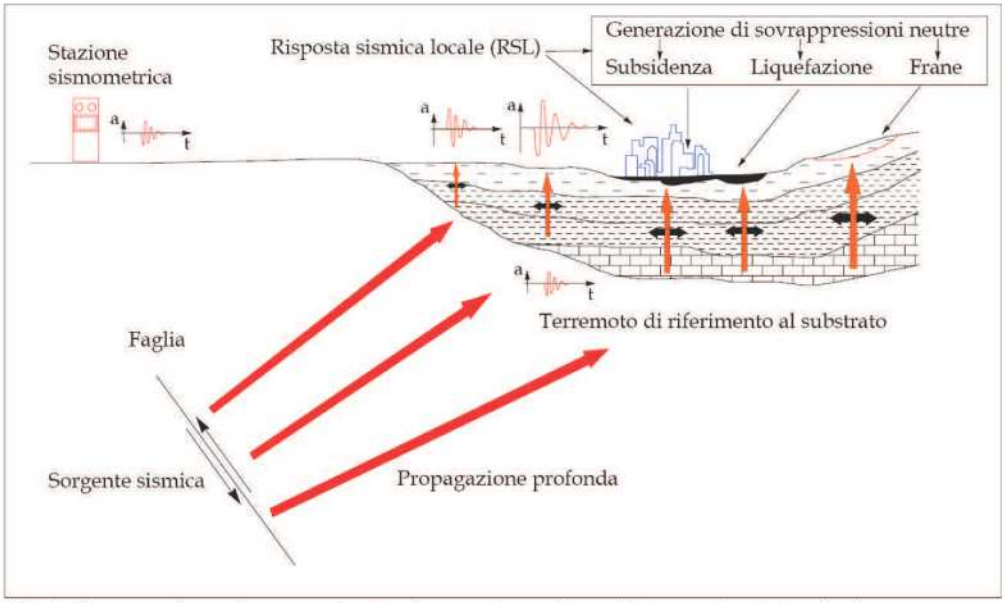


Fig. 1 Propagazione di un evento sismico con le problematiche geotecniche di sito.

2.3 Vulnerabilità sismica degli edifici

La frequenza di risonanza di un edificio è governata principalmente dall'altezza e può essere calcolata, in prima approssimazione, secondo la formula:

$f_{r\ struttura} = 10\ Hz / n°\ piani$

Affinché si possano instaurare fenomeni di doppia risonanza tra suolo e struttura, si dovrebbe avere:

$f_{r\ suolo} \approx f_{r\ struttura} = 10\ Hz / n°\ piani$

$n°\ di\ piani \approx 10\ Hz / f_{r\ suolo}$

Le strutture con tali altezze (n° piani), in caso di terremoto sono propense a sviluppare fenomeni di doppia risonanza con gli spettri di amplificazione sismica misurati in questo sito.

2.4. Categorie di suolo

A seguito dell'entrata in vigore della nuova normativa antisismica occorre caratterizzare e classificare i terreni locali, qualora esse ricadano in zone a rischio sismico.

Nel particolare, l'oggetto della norma qui di seguito riportata, disciplina la progettazione e la costruzione di opere soggette ad azioni sismiche, nonché la valutazione della sicurezza e gli interventi di adeguamento su opere esistenti soggette al medesimo tipo di azioni sismiche.

Al § "Categorie di suolo di fondazione" si fa espresso riferimento ad indagini sismiche allo scopo di classificare il suolo di fondazione sulla base del valore di Vs_{30} cioè del valore medio della velocità delle onde di taglio fino a 30 metri di profondità e comunque fino alla profondità significativa.

Riportiamo di seguito le categorie del suolo di fondazione estratto dalle norme tecniche.

Categorie suolo di fondazione

Ai fini della definizione della azione sismica di progetto si definiscono le seguenti categorie di profilo stratigrafico del suolo di fondazione (le profondità si riferiscono al piano di posa delle fondazioni):

***A** - Formazioni litoidi o suoli omogenei molto rigidi caratterizzati da valori di Vs_{30} superiori a 800 m/s, comprendenti eventuali strati di alterazione superficiale di spessore massimo pari a 5 m.*

***B** - Depositi di sabbie o ghiaie molto addensate o argille molto consistenti, con spessori di diverse decine di metri, caratterizzati da un graduale miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di Vs_{30} compresi tra 360 m/s e 800 m/s (ovvero resistenza penetrometrica N SPT > 50, o coesione non drenata c_u>250 kPa).*

***C** - Depositi di sabbie e ghiaie mediamente addensate, o di argille di media consistenza, con spessori variabili da diverse decine fino a centinaia di metri, caratterizzati da valori di Vs_{30} compresi tra 180 e 360 m/s (15 < N SPT < 50, 70 < c_u < 250 kPa).*

***D** - Depositi di terreni granulari da sciolti a poco addensati oppure coesivi da poco a mediamente consistenti, caratterizzati da valori di Vs_{30} < 180 m/s (N SPT < 15, c_u < 70 kPa).*

***E** - Profili di terreno costituiti da strati superficiali alluvionali, con valori di Vs_{30} simili a quelli dei tipi C o D e spessore compreso tra 5 e 20 m, giacenti su di un substrato di materiale più rigido con Vs_{30} > 800 m/s.*

***S1** - Depositi costituiti da, o che includono, uno strato spesso almeno 10 m di argille/limi di bassa consistenza, con elevato indice di plasticità (PI > 40) e contenuto di acqua, caratterizzati da valori di Vs_{30} < 100 m/s (10 < c_u < 20 kPa)*

***S2** - Depositi di terreni soggetti a liquefazione, di argille sensitive, o qualsiasi altra categoria di terreno non classificabile nei tipi precedenti*

Nelle definizioni precedenti Vs_{30} è la velocità media di propagazione entro 30 m di profondità delle onde di taglio e viene calcolata con la seguente espressione:

$$Vs_{30} = \frac{30}{\sum_{i=1,N} \frac{h_i}{V_i}}$$

dove h_i e V_i indicano lo spessore (in m) e la velocità delle onde di ***taglio (per deformazioni di taglio □□< 10^{-6})*** *dello strato i-esimo, per un totale di N strati presenti nei 30 m superiori.*

Il sito verrà classificato sulla base del valore di Vs_{30}, se disponibile, altrimenti sulla base del valore di NSPT.

$$Vs_h = \frac{\sum h_i}{\sum_{i=1,N} \frac{h_i}{Vi}}$$

In questa relazione il valore Σh_i corrisponde allo spessore del terreno sopra al Bedrock mentre gli altri termini rimangono gli stessi della formula per calcolare la Vs_{30}.

3. ANALISI GEOLITOLOGICA E MORFOLOGICA LOCALE

L'area oggetto di studio è situata all'interno dell'abitato di Cervia (RA) tra viale G Di Vittorio e via 22 Ottobre.

L'aspetto morfologico dell'area è pianeggiante tipico della fascia costiera e non denota pertanto una propensione al dissesto.

L'aspetto geolitologico dell'are di indagine è stata desunta da informazioni cartografiche pubblicate nella banca dati della Regione Emilia-Romagna (http://geo.regione.emilia-romagna.it) e dalla quale è anche possibile estrarre indagini geotecniche e stratigrafiche puntuali.

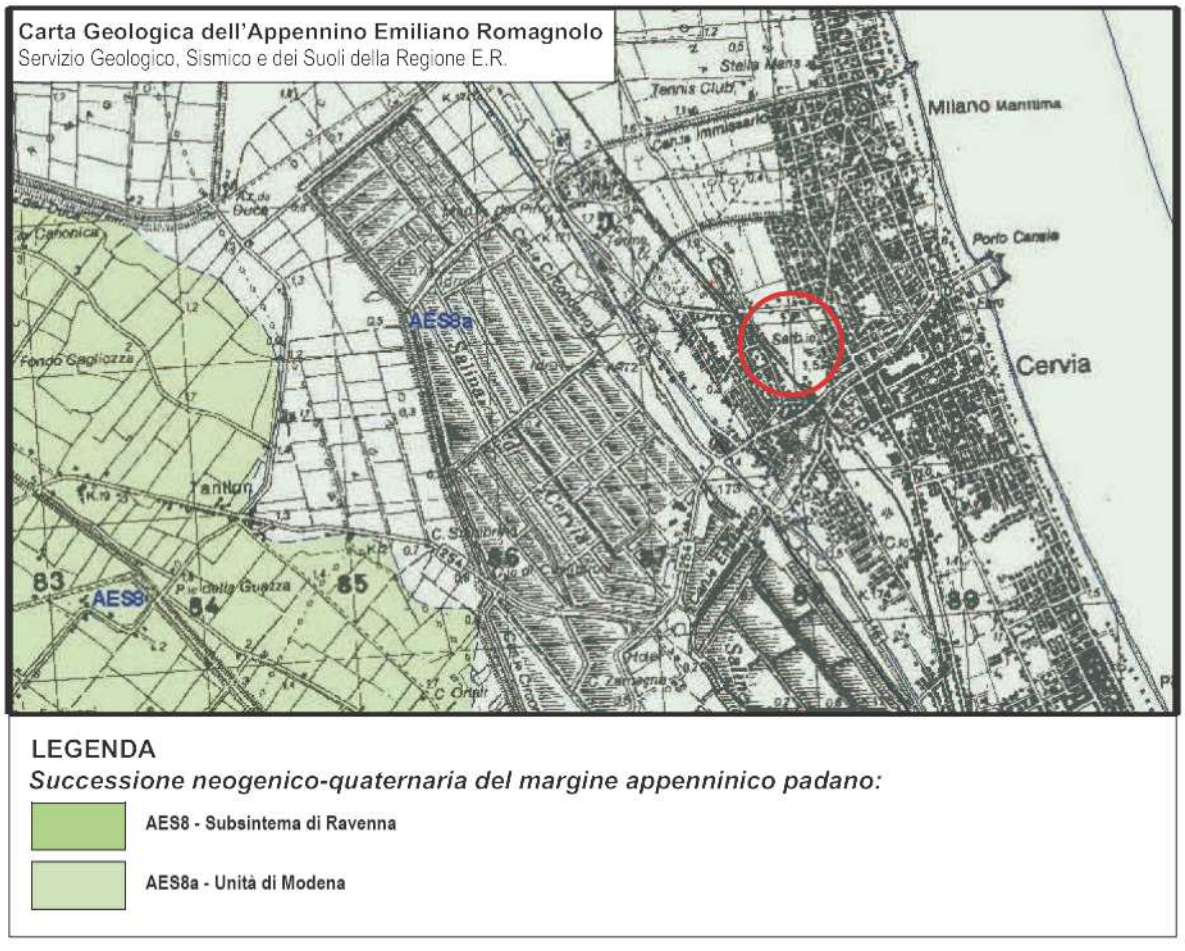
Indagini di maggiore dettaglio sono state anche desunte dalla campagna realizzata ad hoc per l'urbanizzazione dell'area dal dott. Geol. Alberto Bolognesi e alla cui relazione geologica-geotecnica il presente studio risulta allegato.

Dal punto di vista geologico la zona indagata è costituita da depositi litorali costituiti da unità sedimentarie di transizione continentale-marine a seconda delle varie fasi trasgressive-regressive marine.

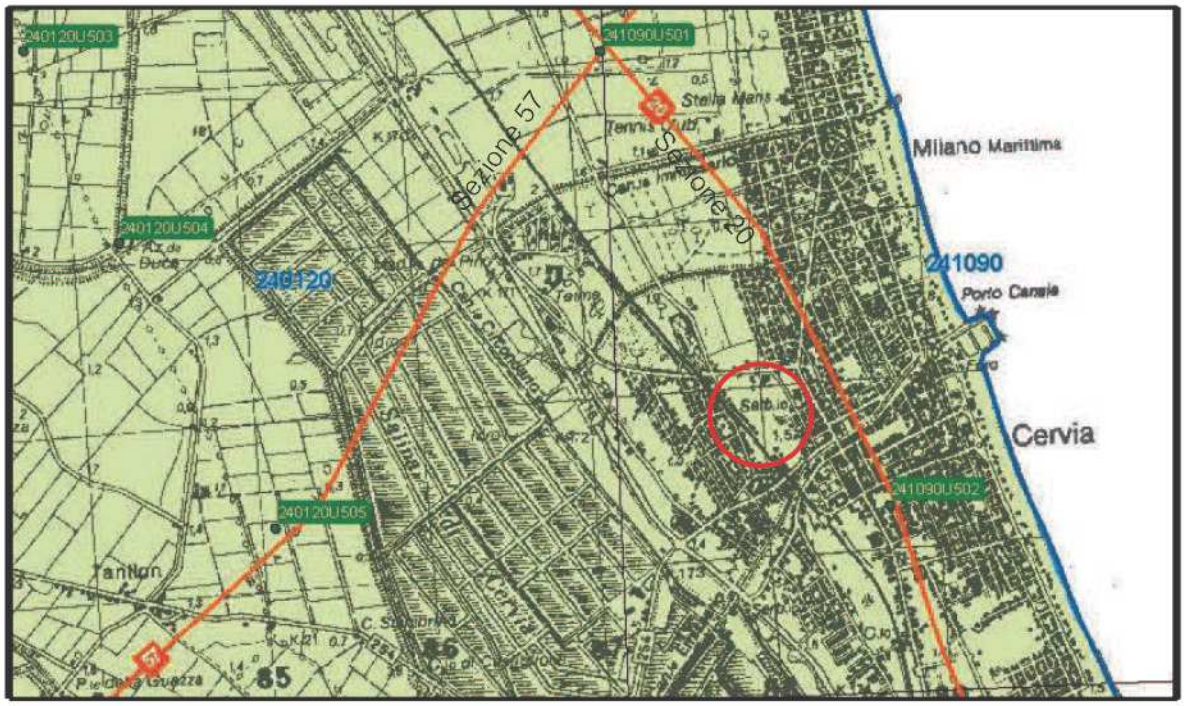
L'area è rappresentata da depositi alluvionali-marini costituiti in copertura da depositi di spiaggia recente (sabbie e sabbie limose di cordone litorale) a cui seguono depositi alluvionali (argille limose e limi argillosi di tracimazione fluviale), localmente possono rilevarsi depositi di palude-laguna costituiti da argille e limi con sostanza organica.

E' possibile distinguere questi sedimenti in varie unità a seconda di discordanze nelle sequenza deposizionale di origine.

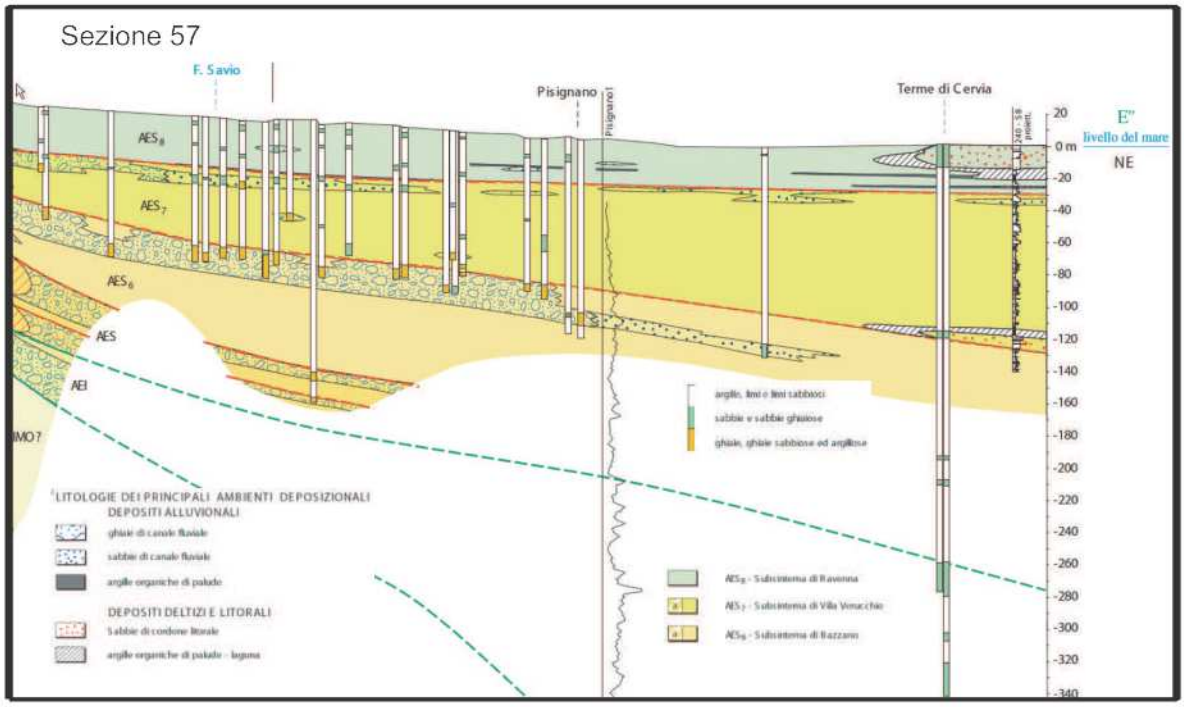
La litofacies presente in superficie nell'area di indagine è classificata dalla Regione Emilia-Romagna (R.E.R.) AES8 (Subsistema di Ravenna di cui si riporta l'estratto nella figura sottostante 6).

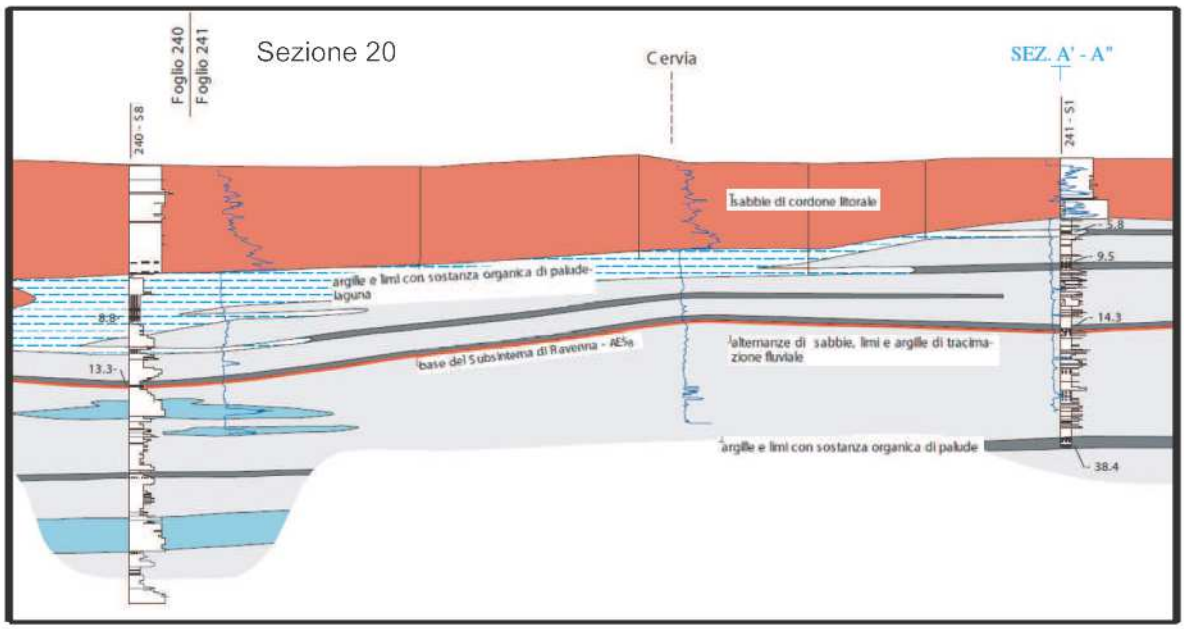


Per quanto attiene alla caratterizzazione geolitologica degli orizzonti più profondi si è fatto riferimento alle sezione *geologiche profonde* n° 20 e 57 ricostruita dal Servizio Geologico della Regione Emilia Romagna nell'ambito del progetto CARG e degli studi di geologia del sottosuolo della costa emiliana-romagnola; l'ubicazione delle sezioni indicate è riportata nell'immagine seguente.



Viene di seguito riportata uno stralcio delle sezioni 57 e 20.





La successione neogenico-quaternaria è rappresentata da una successione di unità costituita da AES8 per circa 15 m di profondità dal p.c., a cui segue AES7 fino a circa 120 m per proseguire con l'unità AES6 e AES.

Segue l'unità AEI per passare a profondità superiori a 250 m alle Sabbie di Imola come formazione basale.

Dal punto di vista geotecnico la discontinuità verticale più rilevante è costituita dalla base dei depositi sabbiosi di cordone litorale all'interno dell'unità AES8 e in profondità (oltre i 300-400 m) dal tetto della formazione basale IMO. All'interno dei depositi AES8, AES7, AES6 sono inoltre presenti limitate intercalazioni di argille organiche con consistenza molle. Arealmente, dalla sezione stratigrafica RER, non si evidenziano particolare disomogeneità tranne che per la prima coltre superficiale.

Nel sito in esame non è presente una rete di drenaggio superficiale per cui le acque di precipitazione vengono drenate dalle sabbie sottostanti.

Alla data di esecuzione della campagna geognostica (luglio 2011), si è riscontrata **la presenza di acqua alla quota di ml -1.3 dal piano di campagna.** Tale livello piezometrico di prima falda sarà soggetto a consistenti variazioni stagionali che possono divenire notevoli in caso di intensi e prolungati periodi piovosi.

Si può ipotizzare un massimo innalzamento piezometrico fino a ml -0.5 dal piano campagna.

4. CAMPAGNA GEOGNOSTICA

4.1. Indagini geotecniche

Sul sito sono state reperite le seguenti indagini:

- n° 1 sondaggio stratigrafico a carotaggio continuo sino alla profondità di 40 m dal piano campagna (p.c.);
- n° 3 campioni indisturbati e n° 7 campioni rimaneggiati sui quali sono stati eseguite prove per la determinazione delle caratteristiche fisico-meccaniche, granulometria, prove triassiali e prove edometriche;
- n° 10 penetrometrie statiche a punta meccanica Begemann sino alla profondità di 20 m dal p.c.;
- n° 3 prove di carico su piastra;

Tale indagini sono state eseguite in occasione della relazione geologica relativa all'urbanizzazione dell'area in oggetto dal dott. Geol Alberto Bolognesi ed in questa sono riportate le indagini effettuate.

4.2. Indagini geofisiche

L'analisi di RSL richiede la ricostruzione del log Vs (Velocità onde sismiche di taglio), a tale scopo è stata eseguita la seguente campagna di indagini geofisiche consistenti in:

- n° 1 prospezione sismica Down Hole a 40 m di prof. dal p.c. realizzato nel sondaggio meccanico indicato;
- n° 1 cono sismico a 30 m di prof. dal p.c.;
- n° 11 misure di rumore sismico (tecnologia HVSR).

Le prime due prove consentono la ricostruzione del log di velocità Vs ad alta risoluzione nella verticale della prova affidabile per l'analisi numerica di 3° livello sia per qualificare il sito come parametrizzazione geofisica che come classe dei suoli

Le prove HVSR permettono di analizzare il sito sotto l'aspetto delle frequenze di risonanza, valutarne l'anisotropia aerale e verticale oltre a definire, con sufficiente approssimazione, la profondità del bedrock geofisico la cui conoscenza è importante per l'analisi numerica puntuale.

L'ubicazione dei punti di indagine sono riportati nella planimetria di Fig. 1.

L'elenco degli allegati grafici relativi alle indagini geofisiche è il seguente:

Fig. 2÷5	Elaborati Prova Down Hole
Fig. 6-7	Elaborati Prova Cono Sismico
Fig. 8÷17	Certificati prove HVSR

Dalle indagini realizzate è stato possibile ottenere una caratterizzazione sismica del sito consistente in una valutazione aerale degli spessori degli orizzonti litologico/geofisico presenti, della loro parametrizzazione dinamica oltre alla determinazione delle frequenze naturali dei terreni.

Sulla base di tali dati è stato poi possibile applicare le metodiche relative agli studi di microzonazione sismica di 2° e 3° livello pertinenti alla realizzazione dell'opera in oggetto sviluppando una analisi numerica puntuale per l'ottenimento dello spettro di risposta del sito e del Fattore di Amplificazione.

Vista l'acquisizione e l'elaborazione di misure delle onde di taglio S, si procede anche alla classificazione dei depositi del sito in esame in relazione alle "**Norme tecniche per le costruzioni**".

DOWN HOLE

L'indagine Down Hole è stata realizzata nel sondaggio S1 fino alla profondità di 40 m.

I certificati di prova sono riportati al termine della presente relazione dalla fig 2 alla fig. 5. La stratigrafia del sondaggio S1 è stata associata ai parametri desunti alla prova Down Hole.

In base al log della velocità delle onde di taglio si ricavano i seguenti parametri:

V_{s30} = 165 m/sec

categoria D

Così definita dalla tabella 3.2.III delle NTC 08:

D *- Depositi di terreni granulari da sciolti a poco addensati oppure coesivi da poco a mediamente consistenti, caratterizzati da valori di* $Vs_{30} < 180$ *m/s (N SPT < 15,* $c_u < 70$ *kPa).*

CONO SISMICO

Le risultanze del cono sismico sono espresse in fig 6 e 7 dove a lato della tabella numerica (parametri elastici fino a 30 m) sono presenti i due log della velocità delle onde di compressione e di taglio.

In base al log della velocità delle onde di taglio si ricavano i seguenti parametri:

V_{s30} = 178 m/sec

categoria D

Dai log si ricava una partizione costituita da un primo livello da 0 a circa 4 m di profondità dal p.c. con Vp crescente che si stabilizza a circa 13 m di profondità nell'intorno di 1.5 km/sec a meno di alcune limitate oscillazioni evidenti prevalentemente dal log di Vp desunto dal cono sismico. Il down hole, per le sue modalità operative, tende in maggior misura a omogeneizzare il profilo di velocità.

Il log di Vs si presenta più omogeneo di quello in Vp con graduale incremento della velocità in profondità. Si evidenziano parziali decrementi della velocità in corrispondenza dei livelli più "molli", in modo particolare tra 11 e 14 m dove sono presenti le argille organiche.

MISURE HVSR

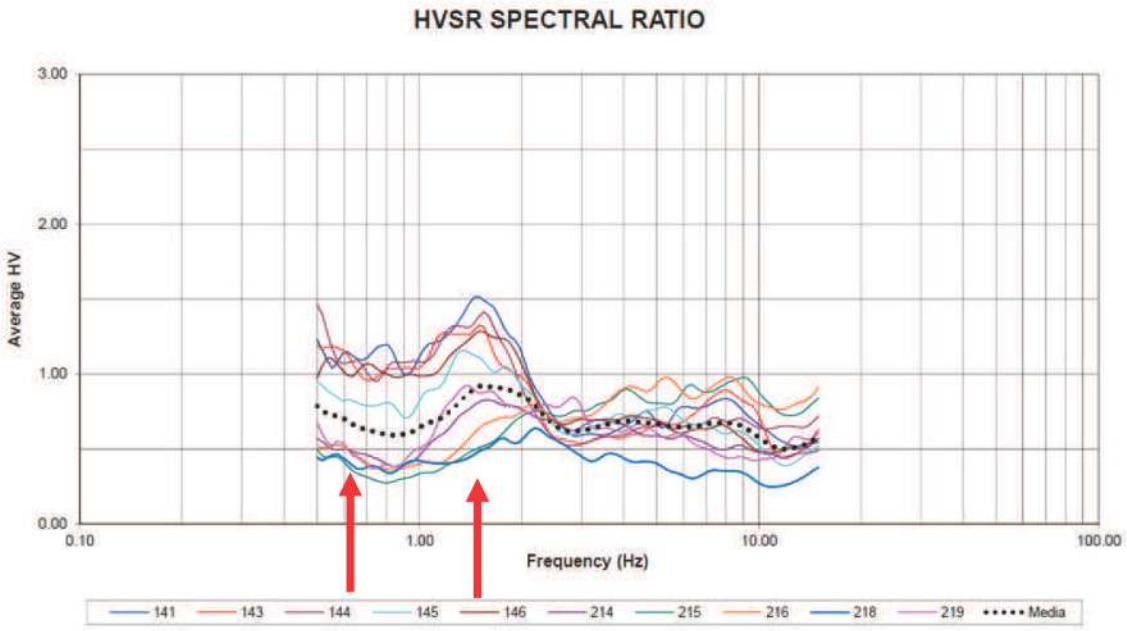
Nel sito in esame sono state realizzate n° 10 misure di noise ambientale con tecnica HVSR (Horizontal to Vertical Spectral Ratio) su stazione singola allo scopo di valutare la frequenza di sito.

Le misure si sono distribuite nell'area cercando di mantenere una coerente densità nella raccolta dei dati allo scopo di mappatura areale.

I certificati di prova sono riportati al termine della presente relazione dalla fig 8 alla fig. 17.

Tutte le prove eseguite mostrano una alta attendibilità della misura della frequenza di risonanza (i primi tre check dei certificati sempre sono tutti attivi ☑) mentre risultano medi i criteri di chiarezza per picco HVSR; questo ad indicare che l'inversione della misura del rumore sismico porta ad un sistema geofisico multistrato e non ad una sola interfaccia come confermato dalle prove dirette in sito e dalle stratigrafie profonde.

Nel grafico cumulativo di seguito è mostrato l'andamento delle frequenze di risonanza naturali di sito per le varie misure effettuate e l'andamento del relativo valore medio.



Dai vari spettri HVSR si rileva, come già mostrato dai certificati di prova, che tutte le misure presentano una bassa impedenza (ossia un rapporto H/V ≤ 1) indice di un ridotto contrasto di impedenza tra i vari orizzonti profondi.

Dall'analisi dei picchi di frequenza è possibile distinguere due range primari:

1) un primo picco ben evidente a circa 1.5 Hz attribuibile, sulla base della Vs stimata, ad un primo livello di sedimenti con interfaccia a circa 30-35 come anche rilevato dalle stratigrafie a disposizione;

2) un secondo picco delle frequenze di risonanza del terreno corrispondente ad una interfaccia più profonda è riscontrabile attorno ai 0.55-0.65 Hz prodotto da un orizzonte

geofisico non ben definito, ma approssimabile attorno ai 120-130 m di profondità (125 media), dove, sulla base delle sezioni geologiche RER è identificabile il passaggio tra AES7 e AES6 con la presenza di livelli sabbio-ghiaiosi (sezione geologica 057 alle pagine precedenti).

A questa interfaccia geologica viene fatto corrispondere il tetto del bedrock geofisico locale da cui la scelta del Log di Vs utilizzato nell'analisi numerica.

La definizione delle profondità delle varie interfacce di impedenza riscontrate è stata definita procedendo all'inversione degli spettri H/V applicando una procedura su base stocastica sulla base dell'input geofisico definito parzialmente nel log Vs definiti dal Down Hole e su base estrapolativa per profondità maggiori di 40 m del Down Hole.

Tale procedura di inversione degli spettri HVSR è indispensabile per disporre della profondità del bedrock geofisico locale da utilizzare per il calcolo della risposta sismica locale

Le frequenze fondamentali di risonanza del terreno riscontrate dall'analisi degli spettri H/V (da considerare anche per eventuali effetti di doppia risonanza di eventuali strutture) sono le seguenti:

Frequenza di risonanza del I° orizzonte compresa tra 1.3-1.8 Hz (Fm = 1.5 Hz)
Frequenza di risonanza dell'orizzonte profondo tra 0.55-0.65 Hz (Fm = 0. 6 Hz)

5. PARAMETRIZZAZIONE GEOTECNICA E GEOFISICA DI SITO

Per la parametrizzazione geotecnica dei terreni vengono utilizzate le indagini eseguite per la stesura della relazione geologica di accompagnamento al Piano relativo all'area in oggetto, redatta dal dott. Geol. Alberto Bolognesi.

I dati raccolti dalle prove in sito e laboratorio sono stati schematizzati nelle tabelle di seguito suddivisi per intervalli di profondità corrispondenti alle unità litostratigrafiche definite nella analisi geologica del sito.

Unità geologiche - Parametri geotecnici rilevati dalle prove in sito (min - max)

Successione stratigrafica			CPT				Sondaggio		
UNITA'	prof.	Tipo di terreno	Rp kg/cm²	Cu kg/cm²	ϕ°	Dr %	Pocket penetrometer kg/cm²	Vane Test kPa	consistenza
A	0.0 - 4.0	sabbie cordone litorale AES8	20 - 40	-	28° - 30	35 - 40	-	-	molle
B	4.0 - 11.0	sabbie cordone litorale AES8	30 - 60	-	30° - 35°	35 - 45	-	-	compatte
C	11.0 - 14.0	argille e limi con sostanza organica di palude-laguna AES8	8 - 10	0.2 - 0.3	-	-	0.3 - 0.5	0.15 - 0.2	molto molle
D	14.0 - 34.0	limi e argille alternati a livelli con sostanza organica AES8 / AES7	10 - 20	0.5 - 0.6	-	-	0.7 - 1.5	0.3 - 0.5	molle
E	34.0 - 40.0	sabbia alternata a livelli limoso argillosi AES7	-	-	-	-	1.0 - 1.5	0.2 - 0.5	-

Unità geologiche - Parametri geotecnici rilevati dalle prove laboratorio (media)

Successione stratigrafica			caratteristiche fisico meccaniche					Triassiale	Edometria
UNITA'	prof. Camp.	Tipo di terreno	γ_{nat} kg/cm³	γ_d kg/cm³	W %	Ip	granulometria	U.U.	Eed Modulo Edometrico Ked Coeff. Permeabilità
A	A 2.0-2.2	sabbie cordone litorale AES8	-	-	-	-	sabbia 81,7% limo 18.3% argilla10,6%	-	-
B	S1 6.0 - 6.7	sabbie cordone litorale AES8	1,68	1,28	31,4	18,5	sabbia 43,4% limo 46.0% argilla10,6%	$\phi_{U.U.}$ = 0 c = 0,503	81.4 6.97 E-7
	B - C 4.0 - 4.2 8.0 - 8.2		-	-	-	-	ghiaia 0.0 / 2.2 sabbia 81,8 / 87,2% limo 18.2 / 10,6% argilla 0.0 / 0.0%	-	-
C	-	argille e limi con sostanza organica di palude-laguna AES8	-	-	-	-	-	-	-
D	S2 - S3 15.0 - 15,6 25.5 - 26.1	limi e argille alternati a livelli con sostanza organica AES7	1,94	1,44	34,5	38,6	sabbia 1,3-1.5% limo 49.1-42.8% argilla49,6-55,8%	$\phi_{U.U.}$ = 0 c = 0,585-0,807	60.4 6.22 E-9
E	F - G 35.0 - 35,2 38.5 - 38,8	sabbia alternata a livelli limoso argillosi AES7	-	-	-	-	sabbia 67,4-57,4% limo 32.6-31.3% argilla 0,0-11.3%	-	-

Si evidenzia la presenza di una forte percentuale di sabbia e limo in falda entro i primi 15 m di profondità e con potenza maggiore di 1 metro, sarà pertanto necessario verificare il potenziale di liquefazione di tali sedimenti in seguito ad un evento sismico.

La caratterizzazione geofisica è stata desunta dalle prove geofisiche eseguite e sintetizzata nella tabella di seguito:

Unità geologiche - Parametri geofisici (media down hole e media cono sismico)

Successione stratigrafica			caratteristiche geofisiche			
UNITA'	prof.	Tipo di terreno	Vp m/s	Vs m/s	Poisson v	G_{din} kg/cm²
A	0.0 - 4,0	sabbie cordone litorale AES8	413 / 422	129 / 150	0.39 / 0.42	265 / 382
B	4.0 - 11,0	sabbie cordone litorale AES8	1276 / 1338	160 / 166	0.49 / 0.49	524 / 581
C	11.0 - 14.0	argille e limi con sostanza organica di palude-laguna AES7	1487 / 1388	140 / 124	0.49 / 0.49	413 / 324
D	14.0 - 34,0	limi e argille alternati a livelli con sostanza organica AES8 / AES7	1523 / 1729	207 / 225	0.49 / 0.49	923 / 1115
E	34.0 - 40.0	sabbia alternata a livelli limoso argillosi AES7	1608	271	0.49	1569

6. ANALISI MICROSISMICA

6.1. Risposta sismica locale

La scelta dei dati stratigrafici, geotecnici e geofisici, in termini di valori di Vs, utilizzati nella procedura di 2° livello si ritiene siano qualificabili con una media attendibilità.

Di seguito si rappresenta schematicamente ciascun parametro utilizzato per l'analisi a cui è stato assegnato un grado di giudizio di attendibilità.

Dati	Attendibilità	Tipologia
Litologici	Bassa	Da bibliografia e/o dati di zone limitrofe.
	Media	Sondaggi profondi prossimi al sito.
	Alta	Da prove in sito (sondaggi in sito) di limitata profondità
Stratigrafici	Bassa	Da bibliografia e/o dati di zone limitrofe
	Media	Da prove indirette (penetrometrie statiche in sito e dinamiche laterali prossime)
	Alta	Da indagini dirette (sondaggi a carotaggio continuo)
Geofisici (Vs)	Bassa	Da bibliografia e/o dati di zone limitrofe
	Media	Da prove di sismica passiva HVSR
	Alta	Da prove dirette (Down Hole, Cono sismico in sito)
Geotecnici	Bassa	Da bibliografia e/o dati di zone limitrofe.
	Media	Da valutazioni correlative di prove prossime al sito
	Alta	Da campioni prelevati in sito

La caratterizzazione geofisica dei materiali in oggetto è stata affidata a n° 1 prova Down Hole, n° 1 Cono Sismico e n° 10 misure HVSR (vedasi localizzazione delle indagini sulle planimetria allegata in Fig. 1).

L'elaborazione dei dati, la cui misura di attendibilità è **alta per il fatto che la misura di Vs è stata effettuata in sito mediante una metodologia di risoluzione adeguata (Down Hole e Cono Sismico)** e può soddisfare i requisiti relativi alla nuova normativa antisismica come classificazione dei terreni locali.

6.2. Analisi sismica puntuale

E' noto che le caratteristiche del moto sismico in corrispondenza di un substrato roccioso o "geofisico base" come per la pianura padana con Vs>800 m/sec, sono differenti da quelle in corrispondenza dell'interfaccia substrato-copertura, proprio a causa della presenza della copertura che modifica il moto sismico esercitato dal terreno.

Questa variazione è rappresentata dalla "Funzione di Amplificazione la quale fornisce una chiara ed efficace rappresentazione dell'effetto filtrante del terreno sulle onde sismiche, ma la sua conoscenza non è comunque sufficiente per determinare le caratteristiche del moto sismico alla superficie del terreno.

E' possibile caratterizzare la risposta sismica locale (RSL) di un sito disponendo di uno spettro di risposta di accelerazione, che è il tipo di rappresentazione più utile per le applicazioni di ingegneria, associato ad un dato terremoto a ad un dato fattore di smorzamento superficiale che includa l'effetto di amplificazione del terreno.

Il moto sismico alla superficie del terreno è infatti fortemente condizionato dai parametri del moto atteso al substrato roccioso o bedrock geofisico, cioè del terremoto di riferimento (RIM) che viene determinato considerando la sismicità storica di un sito.

Inoltre una corretta valutazione del RSL non può prescindere da una modellazione realistica del sottosuolo in quanto le caratteristiche locali del sito condizionano, a parità di evento e di caratteristiche di propagazione, il moto sismico in output.

Sulla base di queste indicazioni è stato effettuata una valutazione di RSL per via analitica utilizzando sia le informazioni dedotte dalle indagini sismiche di caratterizzazione sia i moto sismici indicati dalla Regione Emilia Romagna per il sito di Forlì scaricabili dal link "segnali di riferimento".

Per l'analisi è stato utilizzato un modello di rappresentazione del sottosuolo a strati continui: in questo modello il terreno è schematizzabile come un mezzo continuo multistrato, in cui ogni strato è assunto omogeneo ed a comportamento visco-elastico lineare.

Il software utilizzato è "**Proshake**" della Edupro Civil Systems Inc.(Washington) di cui si possiede licenza d'uso.

Le ipotesi geometriche di queste analisi (modello monodimensionale) sono state le seguenti:

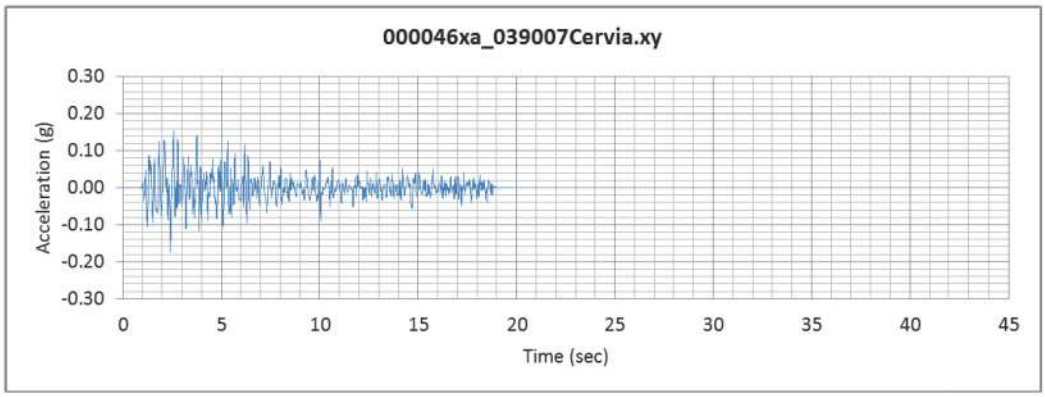
1 Stratificazione delle unità litologiche e superficie del substrato sismico orizzontali;
2 Volume di terreno considerato sufficientemente lontano dai fianchi di unità la pendenza dei quali deve risultare modesta in modo da rendere minimi gli effetti monodimensionali;
3 Dimensioni orizzontali delle unità elevate rispetto allo spessore.

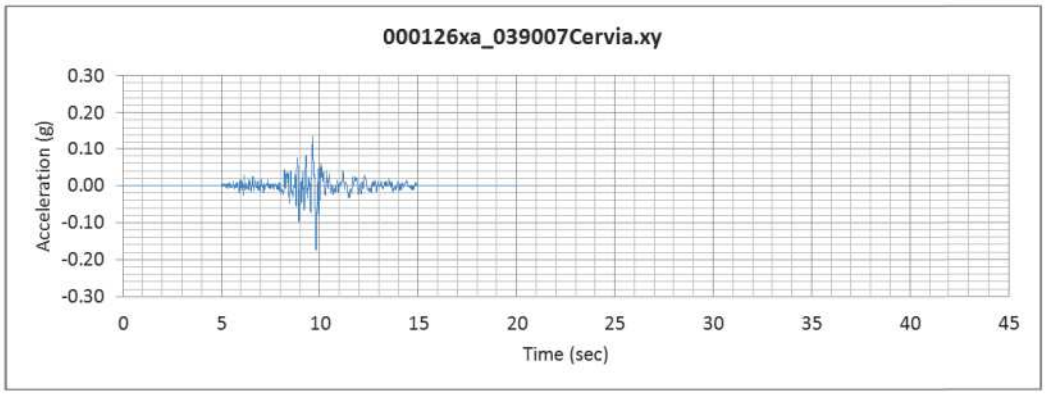
In seguito verranno descritti i risultati ottenuti utilizzando il software indicato, rappresentati da spettri di risposta elastici per smorzamento strutturale del 5% e fattori di amplificazione ricavati sulla base dei dati in precedenza indicati per l'analisi sismica di sito.

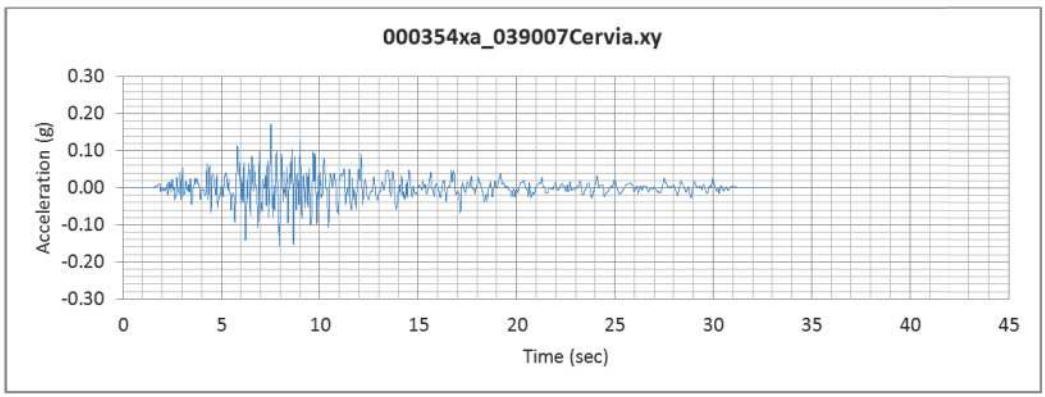
Accelerogrammi al bedrock

I tre accelerogrammi forniti dalla regione sono i seguenti:

000046xa_039007Cervia.xy
000126xa_039007Cervia.xy
000354xa_039007Cervia.xy



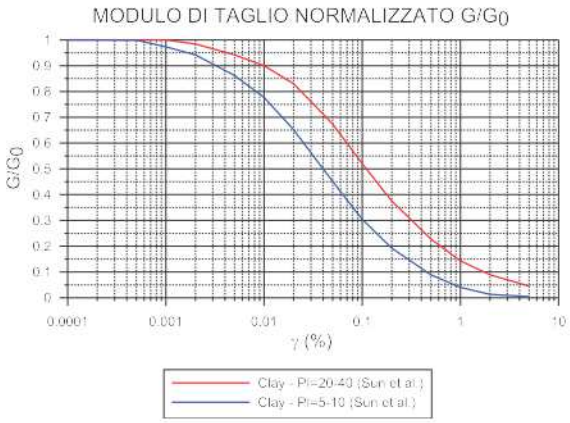


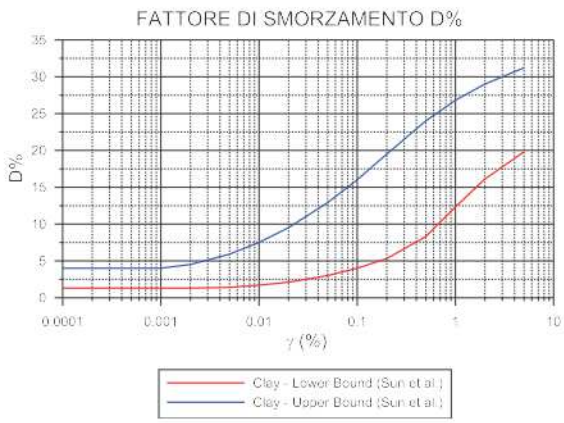


Per quanto riguarda la caratterizzazione geotecnica dei terreni si sono valutate le curve, presenti nel database della Regione Lombardia (curve_lombardia.xls) relative alle curve di decadimento del Modulo di taglio normalizzato (G/Go) e del rapporto di smorzamento (D%) per i materiali di sito, cioè limi e sabbie prevalenti, ed in funzione della deformazione si sono estratte le seguenti curve confrontandole a quelle fornite da "Sun" a corredo di Proshake.

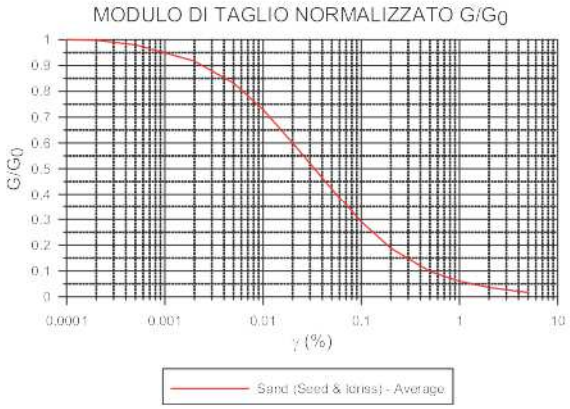
Le curve di Modulo e Dumping utilizzate sono le seguenti:

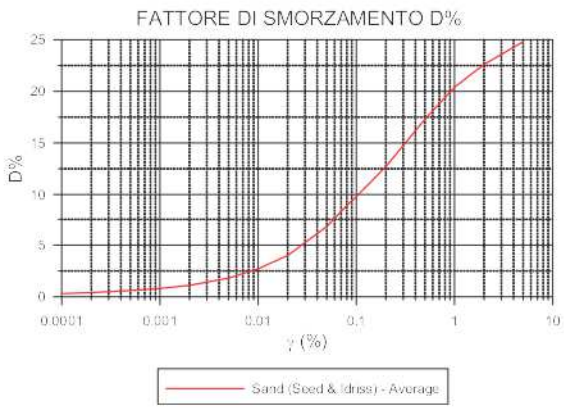
Per i *limi e argille*:



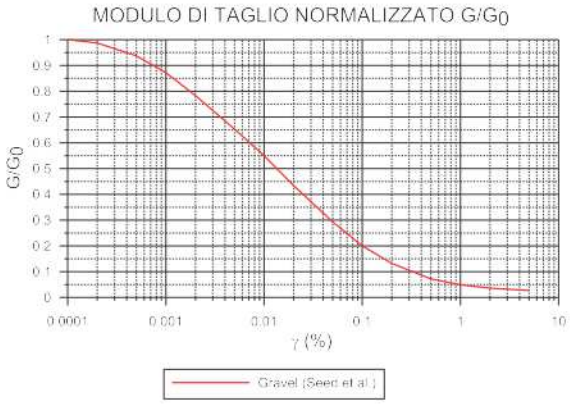


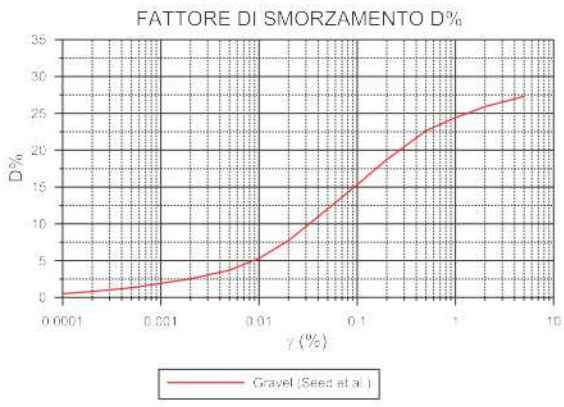
Per le *sabbie*:





Per le *ghiaie*:



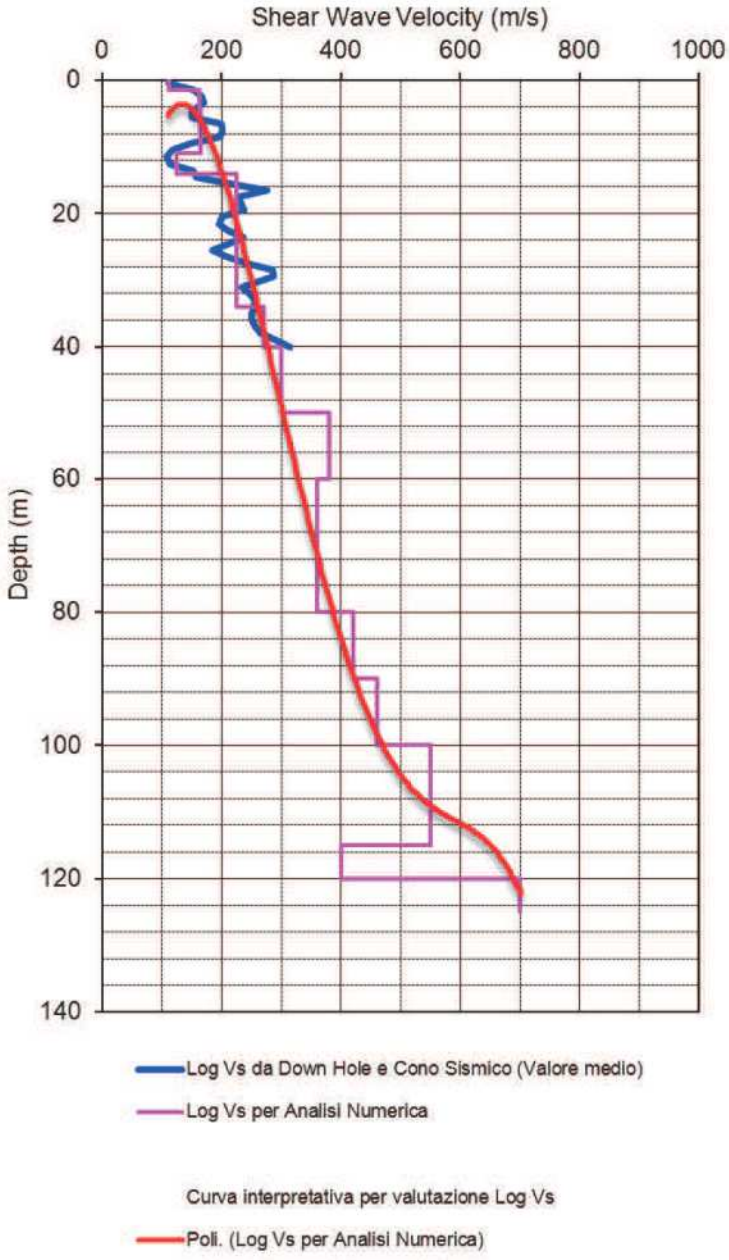


Per l'analisi puntuale viene utilizzata la seguente parametrizzazione sismica relativa a vari orizzonti su una interfaccia basale (bedrock geofisico) posta a 125 m e Vs=variabile.

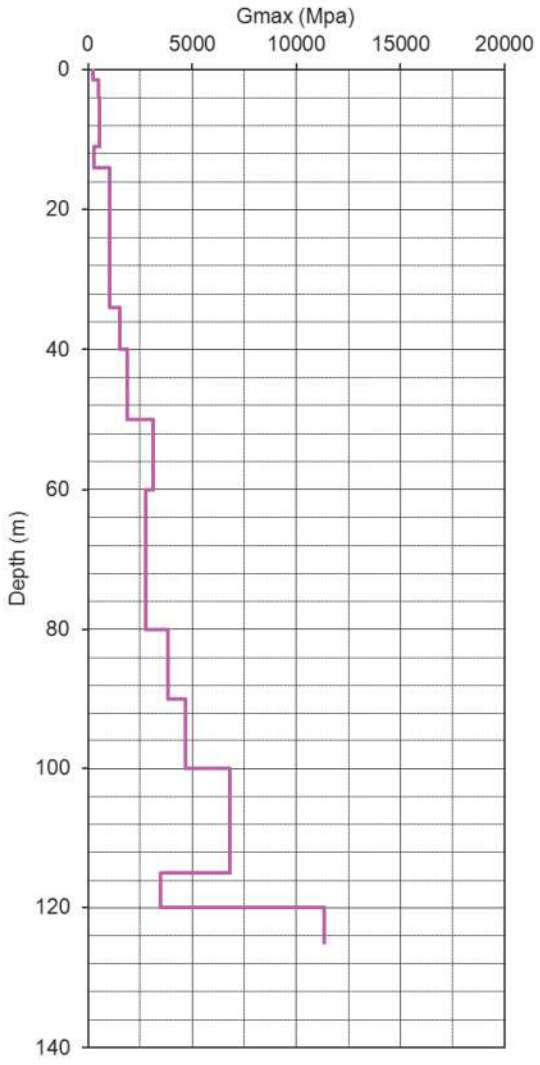
La curva del Log Vs è stata calcolata tenendo in considerazione i valori ottenuti dalla prova Down Hole (in grassetto blu nel grafico sottostante) a cui è seguita una curva polinomiale di gradiente (tratteggio rosso) tale da far convergere il tratto terminale dei valori della sezione sismica con l'interfaccia a **125 m** ottenuta dalle prove HVSR.

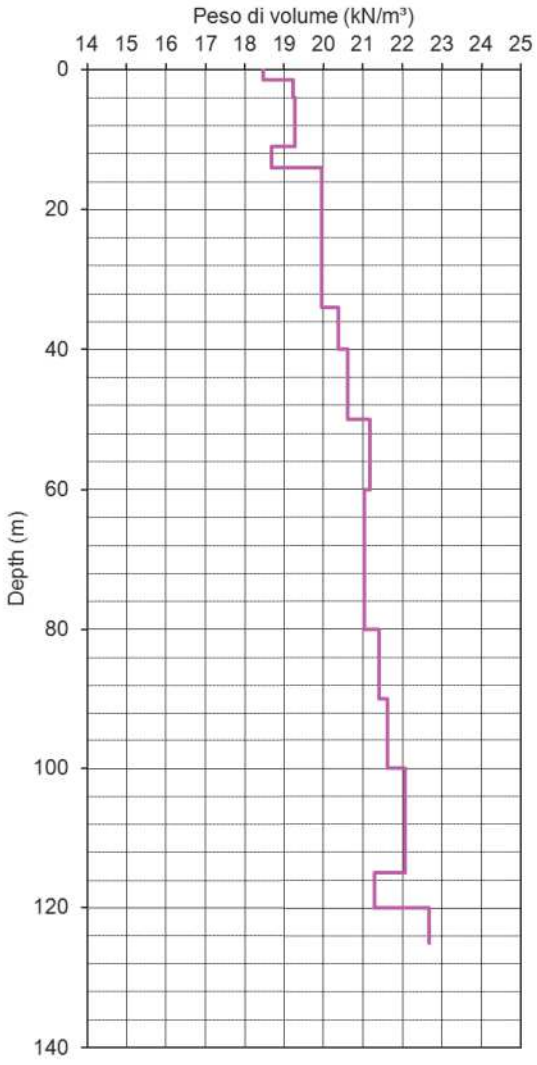
La partizione per tratti di isovalore (spezzata in magenta) è stata realizzata sulla base della colonna stratigrafica ottenuta da pozzi profondi attribuendo parametri congruenti con la litologia ed il carico litostatico.

Il valore di Vs relativo al bedrock geofisico viene assunto alla velocità di 700 m/sec in quanto più congruente alla litostratigrafia locale ed al carico litostatico.



Associata alla curva del Log Vs vengono fornite le partizioni in Gmax e pesi di volume.





L'analisi puntuale mediante **PROSHAKE** è stata prodotta per ottenere una risposta al piano campagna e a -1,5 m dal p.c.

L'input formazionale per Proshake è il seguente:

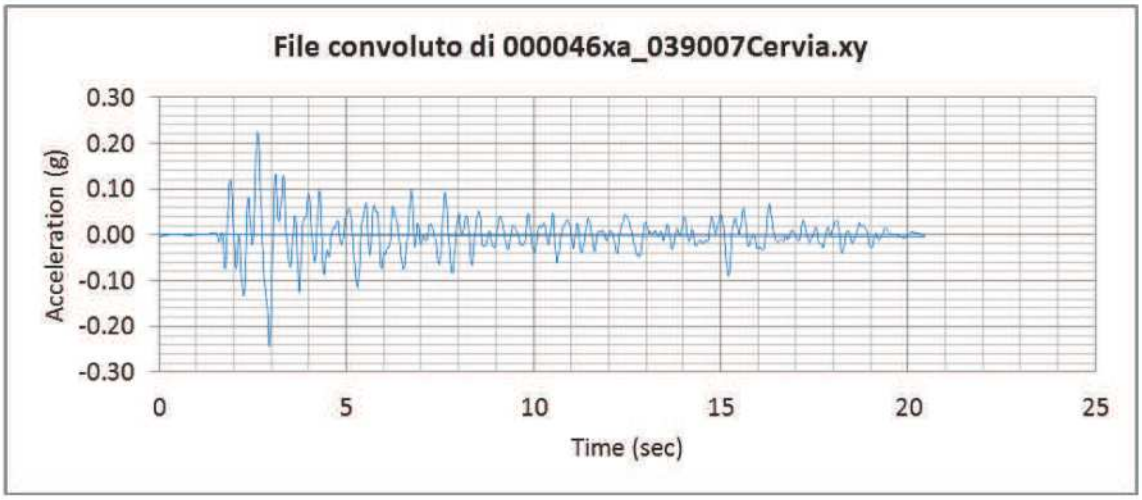
Summary Data | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 |

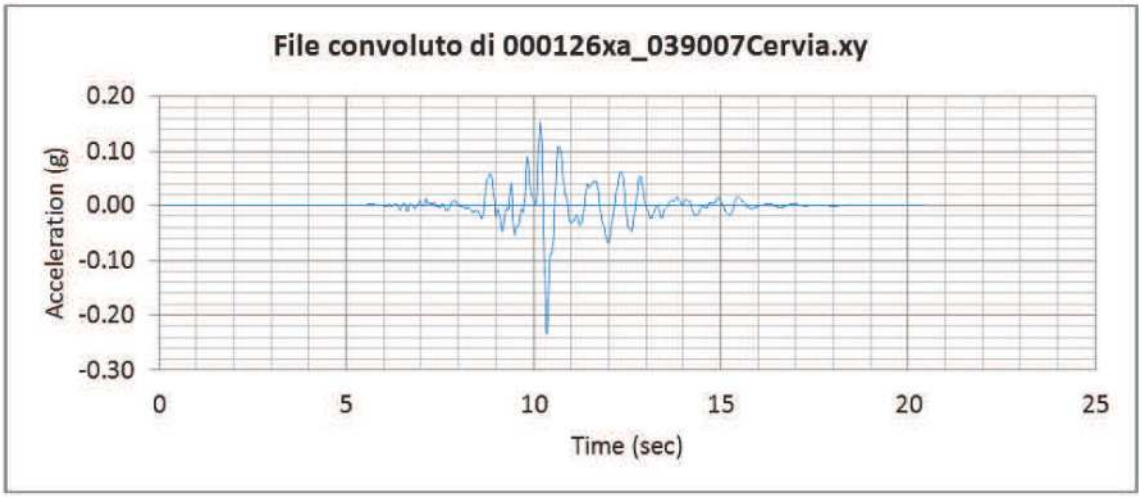
Layer No	Material Name	Thickness (m)	Unit Weight (kN/m^3)	Gmax (MPa)	Vs (m/s)	Mod. Reduction Curve	Mod. Parameter	Damping Curve
1	Sabbie	0.1	18.4	23.5	112.0	Sand (Seed & Idriss) - Upper		Sand (Seed & Idriss) - Upper
2	Sabbie	1.5	18.1	23.2	112.0	Sand (Seed & Idriss) - Upper		Sand (Seed & Idriss) - Upper
3	Sabbie	2.5	19.2	51.5	162.0	Sand (Seed & Idriss) - Average		Sand (Seed & Idriss) - Average
4	Sabbie	7.0	19.3	53.5	165.0	Sand (Seed & Idriss) - Average		Sand (Seed & Idriss) - Average
5	Argille e Limi	3.0	18.7	29.3	124.0	Clay - PI=20-40 (Sun et al.)		Clay - Upper Bound (Sun et
6	Alternanze Limi-argille	20.0	20.0	102.1	224.0	Clay - PI=20-40 (Sun et al.)		Clay - Lower Bound (Sun et
7	Sabbie alternata a livelli limo-argillosi	6.0	20.4	152.6	271.0	Sand (Seed & Idriss) - Average		Sand (Seed & Idriss) - Average
8	Alternanze di sabbie-limi	10.0	20.6	189.1	300.0	Sand (Seed & Idriss) - Average		Sand (Seed & Idriss) - Average
9	Alternanze di sabbie-limi e ghiaie	10.0	21.1	310.7	380.0	Sand (Seed & Idriss) - Average		Sand (Seed & Idriss) - Average
10	Limi e e sabbie	20.0	21.0	277.5	360.0	Clay - PI=5-10 (Sun et al.)		Clay - Upper Bound (Sun et
11	Limi e sabbie	10.0	21.4	384.9	420.0	Clay - PI=5-10 (Sun et al.)		Clay - Upper Bound (Sun et
12	Limi e sabbie	10.0	21.6	466.1	460.0	Clay - PI=5-10 (Sun et al.)		Clay - Upper Bound (Sun et
13	Limi e sabbie	15.0	22.0	678.6	550.0	Clay - PI=5-10 (Sun et al.)		Clay - Upper Bound (Sun et
14	Livello di limi-argille organiche	5.0	21.3	347.4	400.0	Clay - PI=20-40 (Sun et al.)		Clay - Lower Bound (Sun et
15	Bedrock geofisico	Infinite	22.0	1099.2	700.0	Rock		Rock

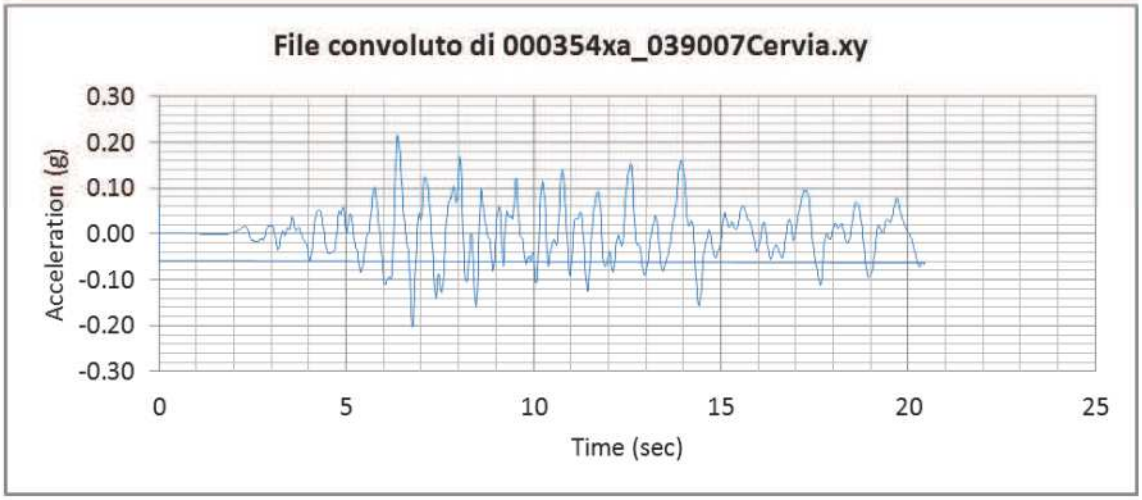
Il log di input con indicati i punti di elaborazione (cerchietti sulle interfacce):

Gli accelerogrammi convoluti al piano campagna risultano essere i seguenti in funzione dell'accelerazione (g), della velocità (cm/sec) e dello spostamento (cm):

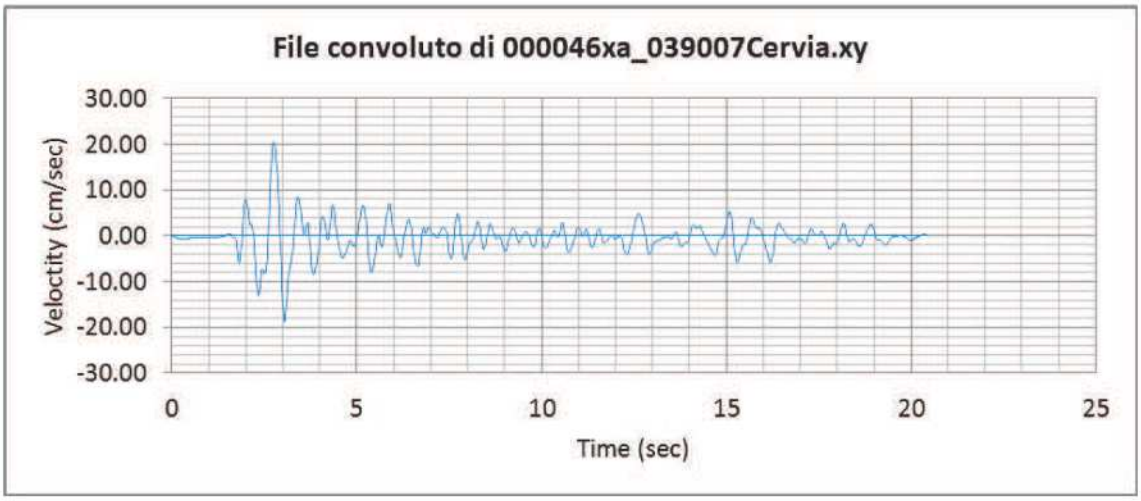
Serie temporali convolute Tempo/Accelerazione

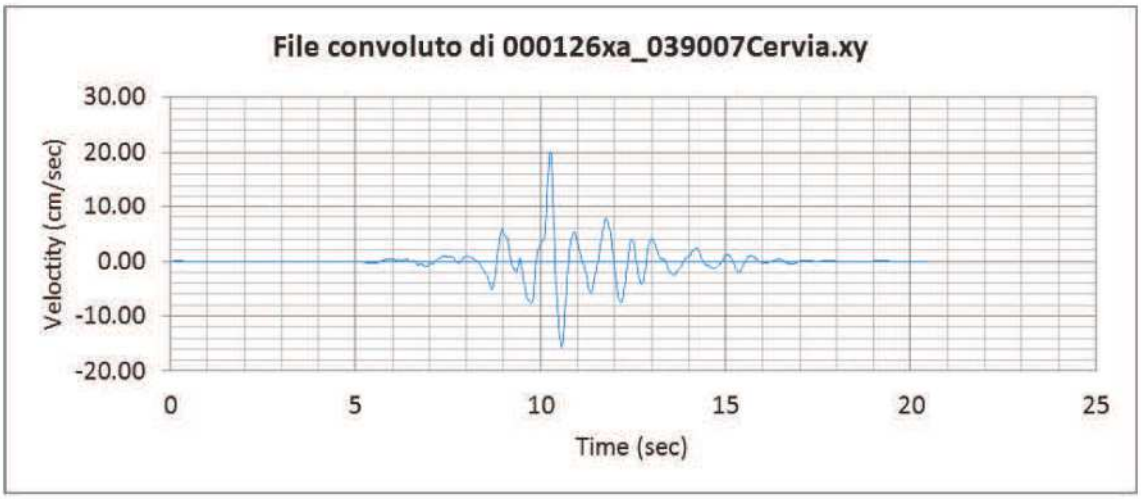


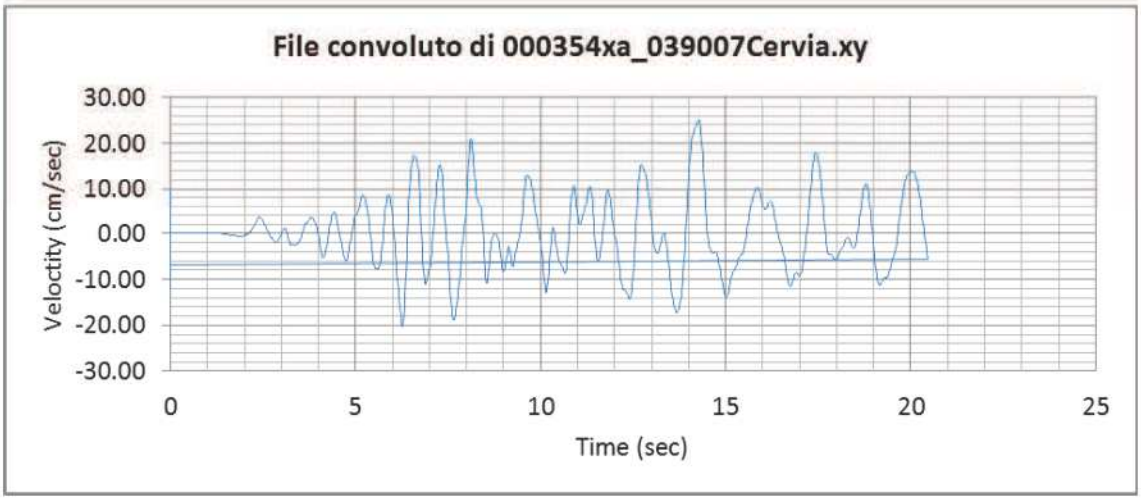




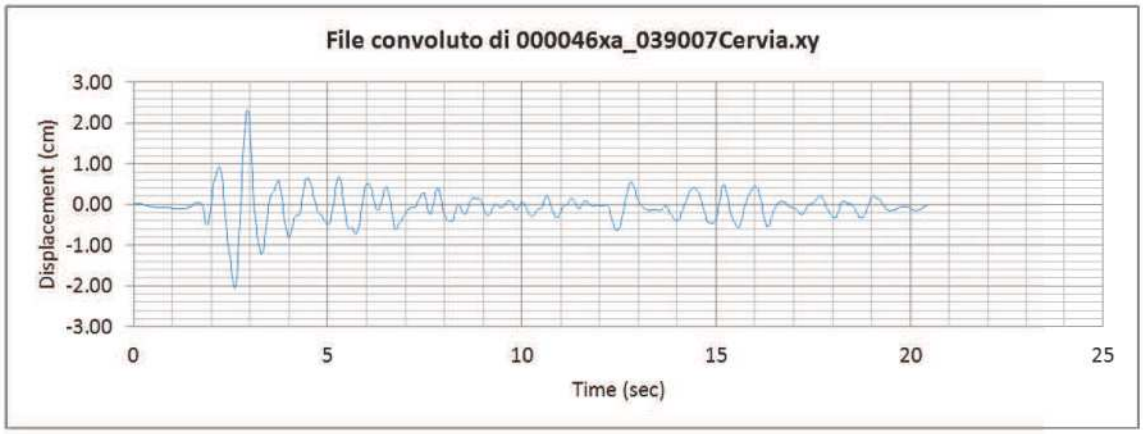
Serie temporali convolute Tempo/Velocità

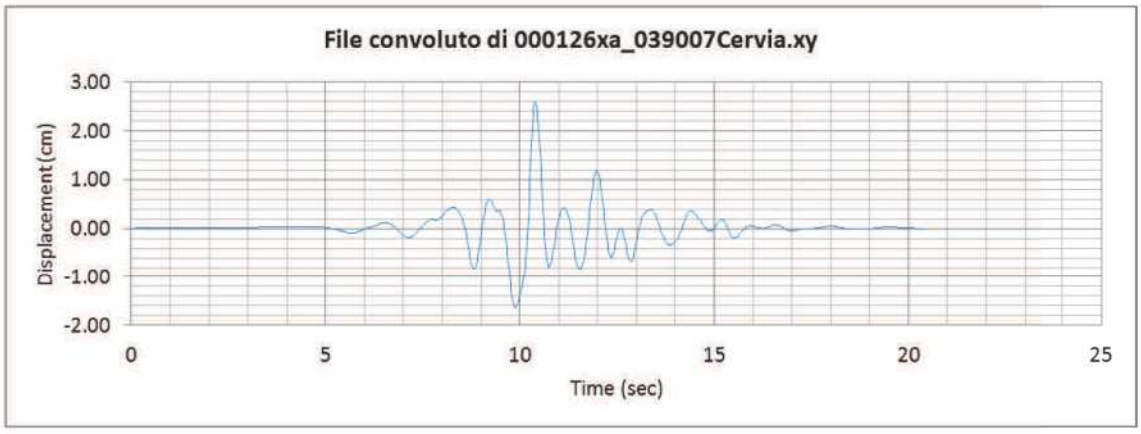


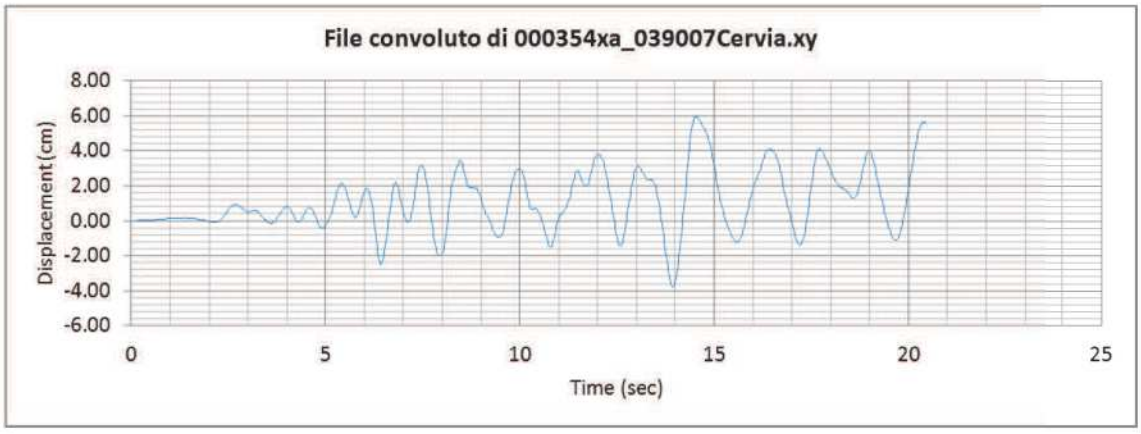




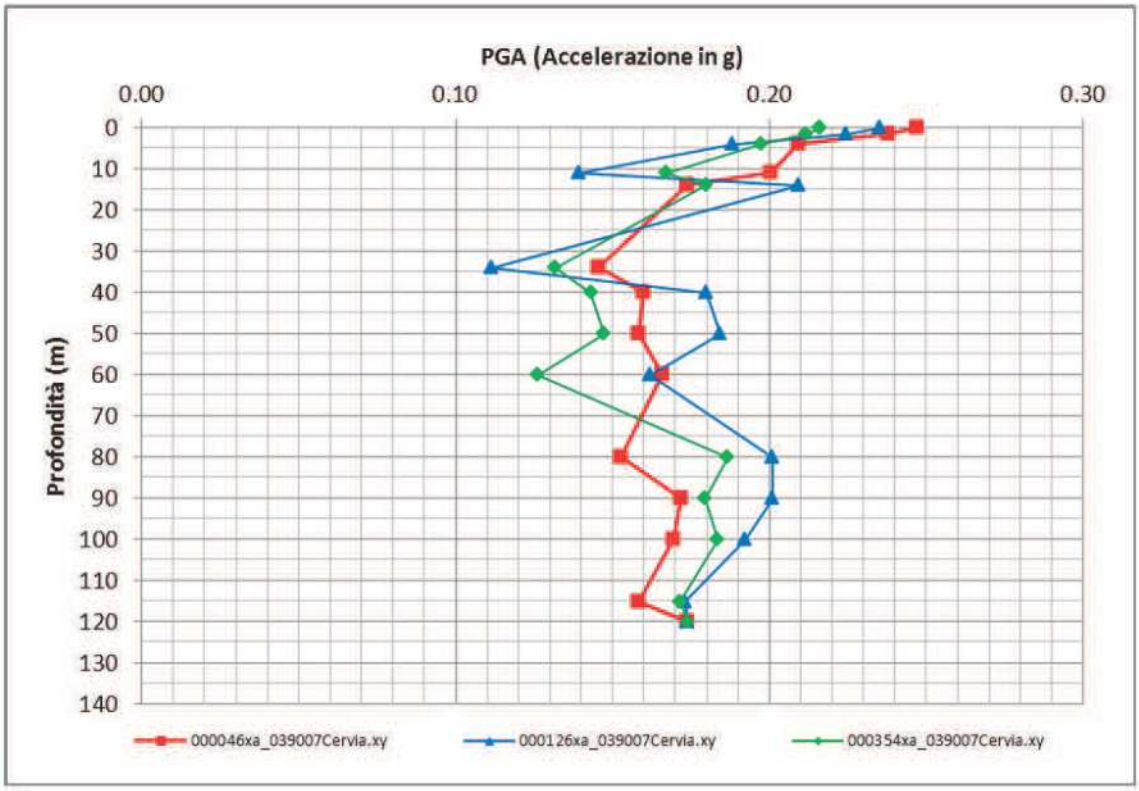
Serie temporali convolute Tempo/Spostamento

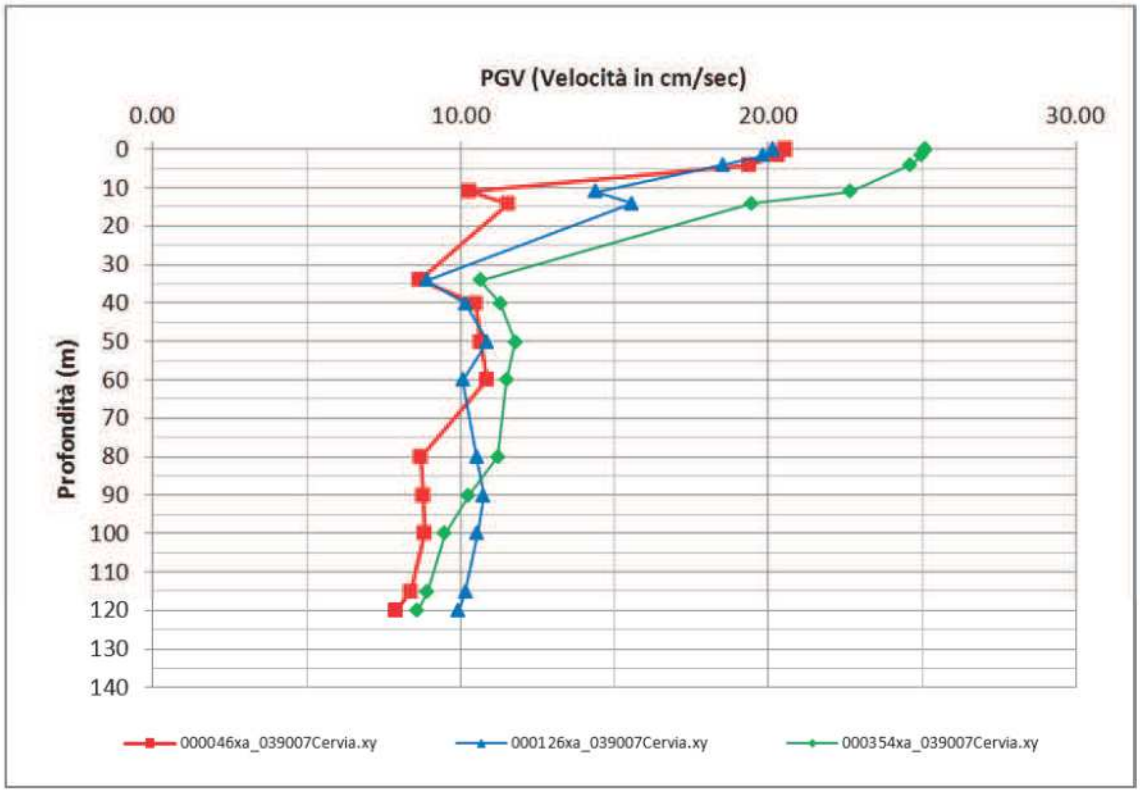


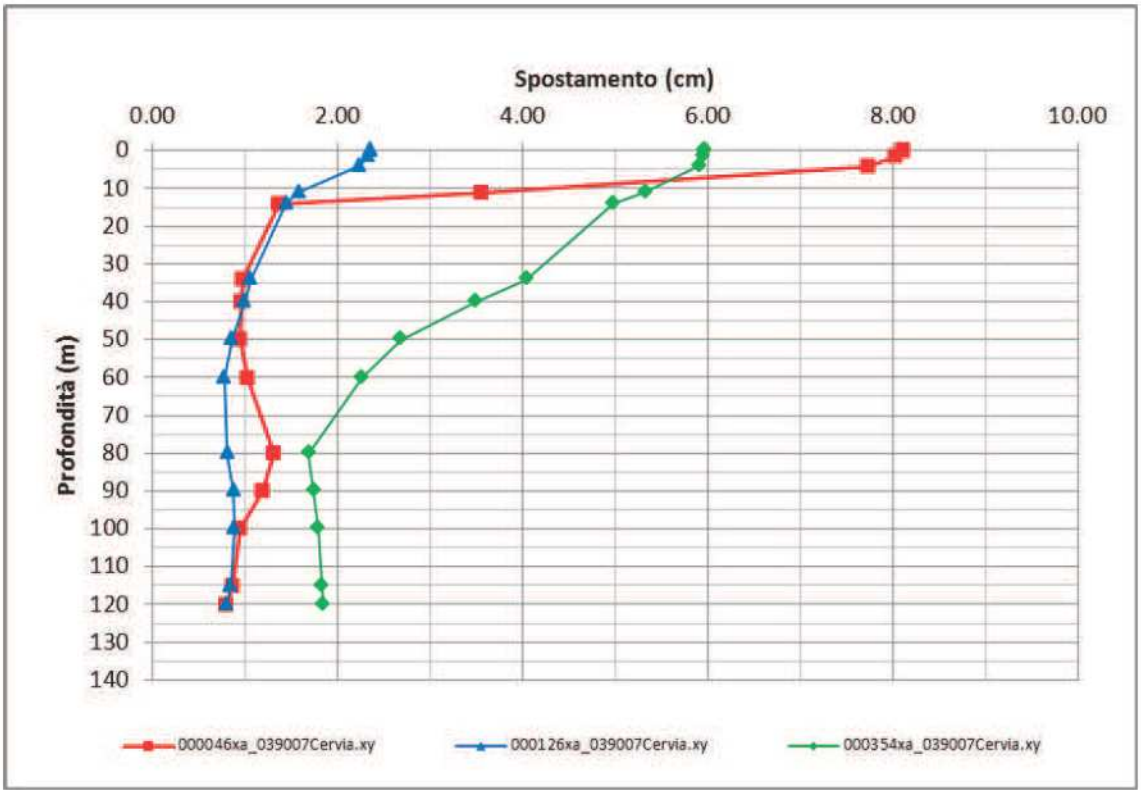




I logs della PGA/profondità, PGV/profondità e Spostamento/Profondità dei tre sismi sono rappresentati nei grafici seguenti dove in ordinata c'è la profondità (m) ed in ascissa rispettivamente l'accelerazione (g), la velocità (cm/sec) e lo spostamento (cm).







I valori di accelerazione massime (**PGA**) e di velocità massima (**PGV**) e di Intensità di ARIAS relativi agli accelerogrammi convoluti per PROSHAKE alle quote di riferimento per esigenze progettuali e cioè al piano campagna ed a -1.5 m sono i seguenti:

Superficie di riferimento **Piano campagna**

Accelerogramma	PGA	PGV	Spostamento	ARIAS
	g	m/sec	m	m/sec
Sisma 1	0.247	0.205	0.081	0.564
Sisma 2	0.235	0.202	0.023	0.226
Sisma 3	0.216	0.251	0.060	1.250
Media	**0.233**	**0.219**	**0.055**	**0.680**

Superficie di riferimento **-1.5 m**

Accelerogramma	PGA	PGV	Spostamento	ARIAS
	g	m/sec	m	m/sec
Sisma 1	0.247	0.205	0.080	0.563
Sisma 2	0.234	0.201	0.023	0.224
Sisma 3	0.216	0.249	0.058	1.240
Media	**0.232**	**0.218**	**0.054**	**0.676**

Per i vari sismi i valori della PGA_0 al bedrock sono i seguenti.

Riferimento	Sisma 1	Sisma 2	Sisma 3
Bedrock	0.174	0.174	0.174

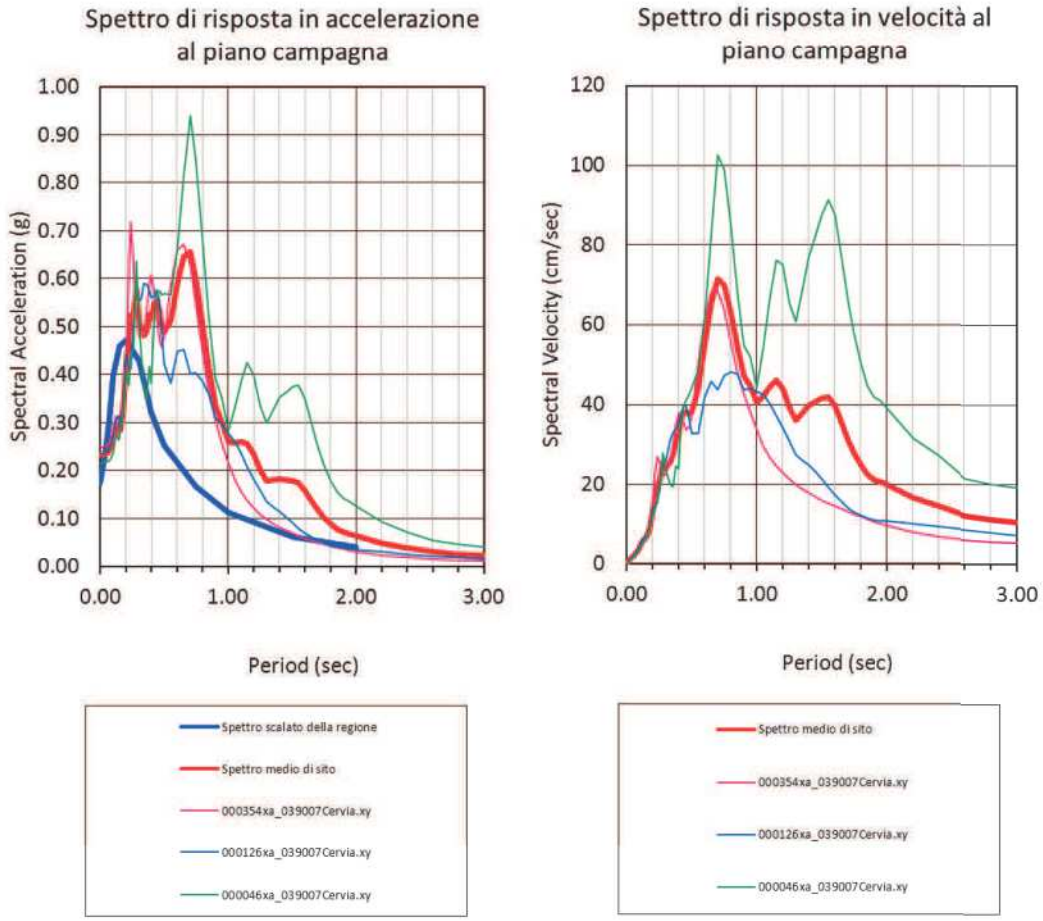
I rapporti **PGA/PGA_0** sono i seguenti.

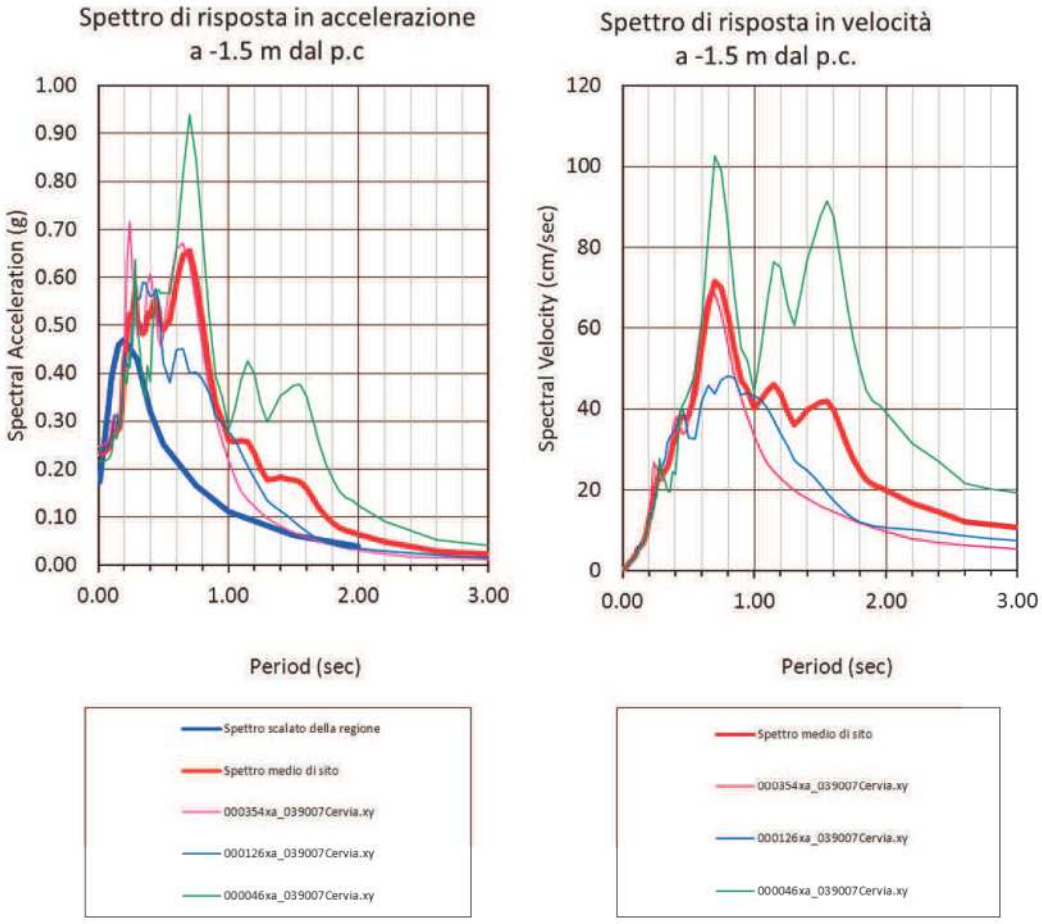
Riferimento	Sisma 1	Sisma 2	Sisma 3
Piano campagna	1.420	1.351	1.241
-1.5 m	1.420	1.345	1.241

Lo **spettro di risposta di sito** viene sintetizzato nei seguenti grafici per i tre sismi relativamente alla accelerazione spettrale **PSA** ed alla velocità spettrale **PSV** per uno **smorzamento** ξ **= 5.0 %**, in rosso è riportata la curva media di sintesi mentre il blu è riportato lo spettro normalizzato della regione.

Nel primo 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.

Il secondo grafico riguarda la PSV, ossia la pseudovelocità spettrale, dove ne viene mostrata la variabilità il funzione del periodo.





I risultati di questa analisi sono utilizzabili per il calcolo del fattore SI, Intensità di Housner, come richiesto nel terzo livello di approfondimento, definito dalla relazione:

$$SI = \int_{T1}^{T2} PSV_{(\xi=5\%)}\, dt$$ dove PSV è lo spettro di risposta in velocità

L'Intensità di Housner (**SI**) è un indicatore della pericolosità sismica ed è definito come l'area sottesa dello spettro di risposta di pseudo velocità in un intervallo prefissato di frequenze ed è direttamente correlabile all'energia che viene dissipata nelle strutture durante un terremoto, e quindi espressione del possibile grado di danneggiamento subito dagli edifici.

Proshake fornisce il valore dell'Intensità di Housner nell'intervallo tra 0.1 e 2.5 sec (tra 0.4 Hz e 10 Hz) con smorzamento ξ del 5% integrando lo spettro in pseudovelocità PSV, riportato nei grafici precedenti, in quel range di primaria importanza per le strutture.

Per i vari sismi i valori dell'**Intensità di Housner SI** sono i seguenti:

Riferimento	Sisma 1	Sisma 2	Sisma 3
Piano campagna	1.761	1.778	3.575
-1.5 m	1.760	1.777	3.573

Per i vari sismi i valori dell'**Intensità di Housner SI_0** al bedrock sono i seguenti.

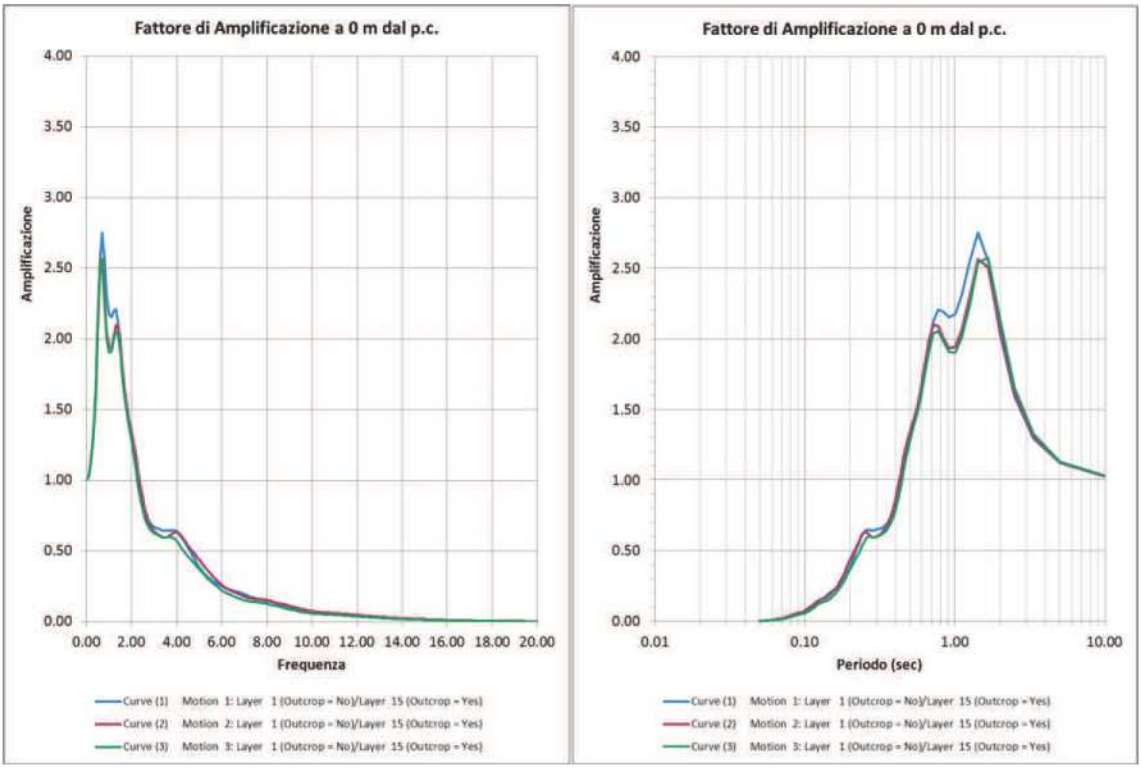
Riferimento	Sisma 1	Sisma 2	Sisma 3
Bedrock	0.683	0.683	0.683

I rapporti **SI/SI_0** sono i seguenti.

Riferimento	Sisma 1	Sisma 2	Sisma 3
Piano campagna	2.578	2.603	5.234
-1.5 m	2.577	2.602	5.231

Nei grafici seguenti viene presentato il **Fattore di Amplificazione**

Superficie di riferimento = piano campagna



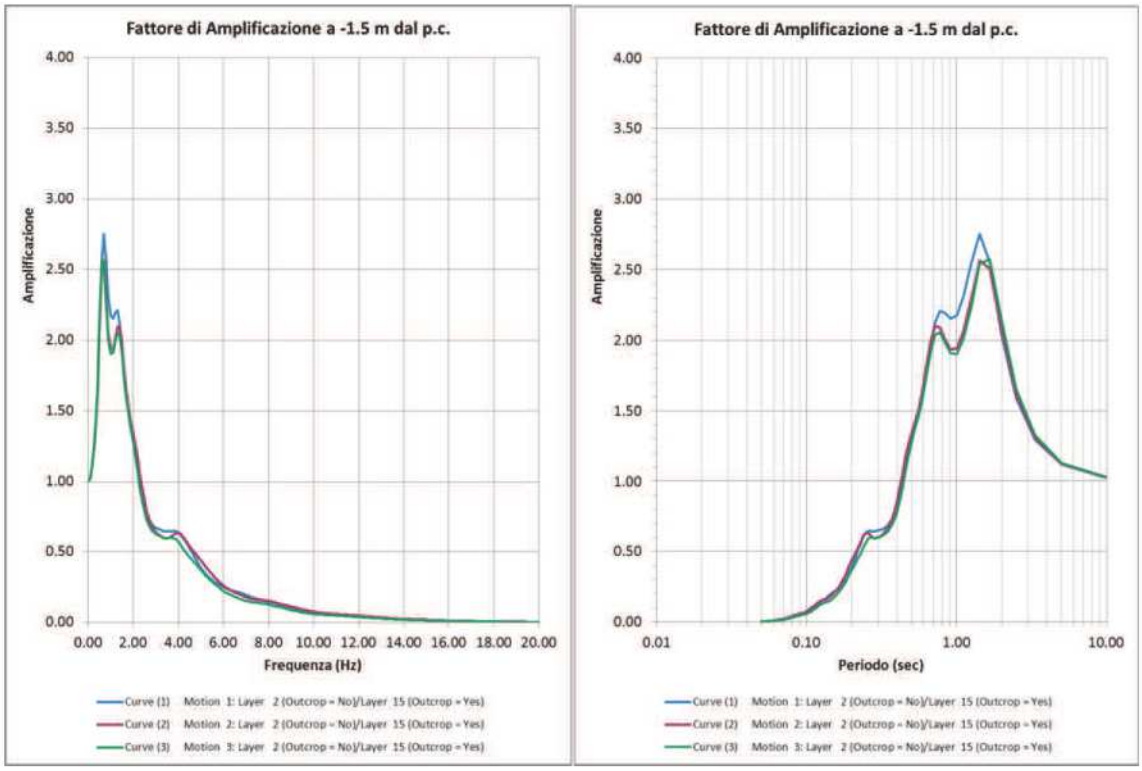
Per le seguenti frequenze si rilevano picchi di Fa

f = 0.72 hz **Fa = 2,68**
f = 1.37 hz Fa = 2,12

mentre i valori del Fattore di Amplificazione nei segmenti previsti dalle norme tecniche sono i seguenti:

Fa $_{0.1\ s\ -\ To\ -\ 0.5\ s}$ = 2.12
Fa $_{0.5\ s\ -\ To\ -\ 1.0\ s}$ = 2,68

Superficie di riferimento = – 1.5 m dal piano campagna



Per le seguenti frequenze si rilevano picchi di Fa

***f* = 0.70 hz** **Fa = 2,67**
f = 1.35 hz Fa = 2,09

mentre i valori del Fattore di Amplificazione nei segmenti previsti dalle norme tecniche sono i seguenti:

Fa $_{0.1\ s\ -\ To\ -\ 0.5\ s}$ = 2.11
Fa $_{0.5\ s\ -\ To\ -\ 1.0\ s}$ = 2,67

7. VALUTAZIONE DEL RISCHIO DI LIQUEFAZIONE

Dalle analisi effettuate sia in sito che in laboratorio risulta che i materiali costituenti la colonna stratigrafica per i primi 15 m possono rispondere alle caratteristiche di suolo liquefacibile per cui si procede all'analisi sismica numerica puntuale ed alla valutazione della liquefacibilità.

Le procedure di riferimento sono riportate nell'Allegato A3 della delibera indicata.

7.1 Valutazione della possibilità di occorrenza dei fenomeni di liquefazione

In relazione alla normativa vigente la probabilità che i terreni del sito possano essere soggetti a fenomeni di liquefazione, da cui sviluppare un'analisi numerica, è qualitativamente condizionata dal superamento dei seguenti parametri:

1. Magnitudo attesa > 5	nel sito per ZS9 -> Mw=5.94
2. Accelerazione massima free-filed a_{max}>0.1 g	nel sito a_{max} = 0.233g
3. Accelerazione massima free-field a_{max}>0.15 g e	
Indice di plasticità IP>10	vero
FC (frazione di fine)	vero
$(N_1)_{60}$ (valore normalizzato della resistenza Penetrometrica delle prova SPT)	non disponibile
4. Analisi granulometriche	prove disponibili ed affermative
5. Profondità della falda	1.3 m

Essendo affermativi i seguenti punti 4 punti su 5 si procede alla analisi alla liquefazione.

7.2 Metodi per la stima dell'analisi alla liquefazione e dei cedimenti

Per valutare la suscettibilità alla liquefazione durante un terremoto possono essere utilizzate prove in situ e in laboratorio che richiedono fattori di correzione non sempre definiti.

Numerose sono le procedure per valutare la resistenza alla liquefazione. Si passa da procedure semplificate (Seed e Idriss del 1971) basata sulla prova SPT a procedure più attuali (SPT, CPT, Vs) e sofisticate.

In ogni caso, qualunque sia il codice di calcolo impiegato la procedura nel suo insieme contiene i seguenti passi:

1. Valutazione della resistenza ciclica alla liquefazione CSR;

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

dove:

a_{max}	accelerazione massima alla superficie del suolo;
g	accelerazione di gravità (9.81 m/sec²);
σ_{vo} e σ'_{vo}	tensione verticale litostatica totale e effettiva;
r_d	fattore di riduzione delle tensioni alla profondità di interesse;
0.65	fattore peso (da Seed 1975) per calcolare il numero di cicli uniformi richiesti per produrre lo stesso aumento della pressione dei pori dovuto a un irregolare movimento del suolo durante il terremoto.

2. Determinazione della capacità di resistenza del terreno alla liquefazione CRR;

Varie sono le metodiche per determinare il CRR: nel caso attuale si utilizzerà la prova CPT applicando le procedure di Roberston e Wride (1998) e Roberston (2009 - 2010), la relazione di base è la seguente:

$$CRR_{7.5} = 0.833 \cdot \left(\frac{(q_{c1N})_{CS}}{1000} \right) + 0.05 \qquad se\ (q_{c1N})_{CS} < 50$$

$$CRR_{7.5} = 93 \cdot \left(\frac{(q_{c1N})_{CS}}{1000} \right)^3 + 0.08 \qquad se\ 50 \le (q_{c1N})_{CS} < 160$$

dove:
$(q_{c1N})_{CS}$ resistenza alla punta normalizzata a circa 100 kPa (1 atm);

3. Determinazione del fattore di correzione della magnitudo MSF

Secondo le raccomandazioni NCEER per terremoti di magnitudo inferiore a 7.5 si indica la relazione di Youd ed al, 2001.

$$MSF = 10^{2.84} / M_w^{3.24}$$

dove:
Mw Magnitudo momento del sito;

4. Valutazione del potenziale di liquefazione eseguendo il calcolo del fattore di sicurezza FS;

$$FS_L = \frac{CRR}{CSR} \cdot MSF$$

5. Stima dell'indice di potenziale liquefazione;

La valutazione del potenziale di liquefazione del terreno e i parametri del sisma atteso consentono una stima della pericolosità di liquefazione del sito. L'indice di potenziale liquefazione IPL è una misura degli effetti della liquefazione basata sulla larghezza e profondità delle zone liquefacibili. L'IPL normalmente viene valutato fino a 20 m dal profilo del suolo.
La metodica di Iwasaki et. Al (1982) è quella che attualmente viene più ampiamente utilizzata e si basa sullo spessore dello strato superficiale, sula fattore di sicurezza e sulla prossimità dello strato liquefacibile alla superfice:
La relazione è la seguente:

$$IP_L = \int_0^{20} F(z) \cdot w(z) \cdot dz$$

dove:
F(z) è una funzione del fattore di sicurezza che per:
$FS_L > 1$ F(z) = 0
$FS_L < 1$ F(z) = 1 – Fs
w(z) 10 – 0.5 * z (z = profondità in metri)
dz incremento differenziale della profondità

Che sia questa metodica oppure quella più recente di Sommez (2003) il rischio di Liquefazione sulla base di IP_L viene definito:

$IP_L = 0$	Suolo Non liquefacibile
$0 < IP_L < 2$	Basso
$2 < IP_L < 5$	Moderato
$5 < IP_L < 15$	Alto
$15 < IP_L > 15$	Molto alto

6. Calcolo dei cedimenti indotti dal terremoto.

Il cedimento permanente post sismico ΔH dei terreni liquefacibili (FS_L<1) può essere stimato utilizzando la relazione:

$$\Delta H = \varepsilon_v \; H$$

dove:
H = altezza dello strato liquefacibile
ε_v (%) = deformazione volumetrica data da:

$$\varepsilon_v = \frac{\alpha \; C_r}{1 + e_0} \log \left(\frac{1}{1 - \frac{\Delta u}{\sigma'_o}} \right)$$

in cui

α	è una costante sperimentale
e_0	indice dei vuoti iniziale
Cr	indice di riconsolidazione post ciclica
$\Delta u/\sigma'_o$	rapporto di pressione interstiziale.

Cr può essere posto uguale a Cr=0.225 Cc dove Cc è l'indice di compressione da prove edometriche.
Tutti i parametri possono comunque essere stimati, se non in possesso di prove di laboratorio, impiegando correlazioni empiriche).

L'ampiezza di deformazione di taglio massima γ_{max} può essere valutata tramite la relazione:

$$\gamma_{max} = 0.65 \; \frac{a_{max\,s}}{g} \; \sigma_v \; r_d \; \frac{1}{G}$$

dove:

$a_{max\,s}$	picco di accelerazione al piano campagna da analisi numerica;
g	accelerazione di gravità
σ_v	tensione totale verticale
r_d	coefficiente riduttivo dell'azione sismica
G	Modulo di Taglio

Per la realizzazione di questa analisi (cedimenti post-sismici) è stata utilizzata la procedura di Robertson (2010) codificata nel software CLiq utilizzato.

La stima dello spostamento laterale (Lateral Spreading) viene valutata sulla base della relazione (per superfici piane) proposta da Zhange e Robertson (2002):

$$LD = (S + 0.20) \cdot LDI$$

$$LDI = \int_0^{20} \gamma_{max} \cdot dz$$

dove:

S	pendenza della superficie libera tra 0.2% e 3.5%
LD	Lateral DIsplacement
LDI	Lateral DIsplacement Index
dz	incremento differenziale della profondità

7.3 Analisi della suscettibilità alla liquefazione

La valutazione del rischio di liquefazione durante i terremoti per la zona in esame è stata effettuata utilizzando i parametri sismici locali, precedentemente determinati dall'analisi di 3° livello e desunti da n° 10 prova CPT effettuata anch'esse dalla società Geoemme2 nel 2011.

Nel sito non sono note altre prove penetrometriche.

Tutte le prove penetrometriche sono state realizzate all'interno dell'area in oggetto o nelle prime prossimità di questa.

Il calcolo del potenziale di liquefazione è stato eseguito in accordo alla procedura di Robertson & Wride (1998).

Questa procedura è sviluppata in un codice di calcolo del 2009 il quale differisce in piccola misura dall'originale pubblicato in NCERR-97-0022 (Proceeding of the NCERR Workshop on Evaluation of Liquefaction Resistance of Solis).

Il diagramma di flusso del codice è riportato in coda al rapporto di calcolo nella relazione.

Le risultanze delle elaborazioni ed i risultati ottenuti sono estesamente esposti nel rapporto di calcolo e sinteticamente espressi nella tabella seguente.

Le indagini eseguite hanno infatti evidenziato la presenza di uno strato sabbioso di consistenza da molle a poco addensato, sovrastanti terreni limo argillosi presenti fino ai 25 metri circa.

Il livello di falda, rilevato contestualmente alle indagini a quote prossime ai -1.50 m di profondità dal p.c., è passibile di innalzamenti verso quote più superficiali. Nella verifica numerica alla liquefazione il livello di acqua nel sottosuolo è stato considerato alla quota di 0.50 m dal p.c., ponendosi quindi nella situazione meno cautelativa, come peraltro espressamente indicato dai contenuti della L.R. 20/2000 (all.3 - punto A).

Nella verticale esplorata, e quindi considerata nella stima del potenziale di liquefazione, le verifiche sono state condotte considerando, alla superficie dei depositi in studio, il valore di a_{max} = **0.233 g**, come dedotto dallo studio di risposta sismica locale eseguito al capitolo 6.

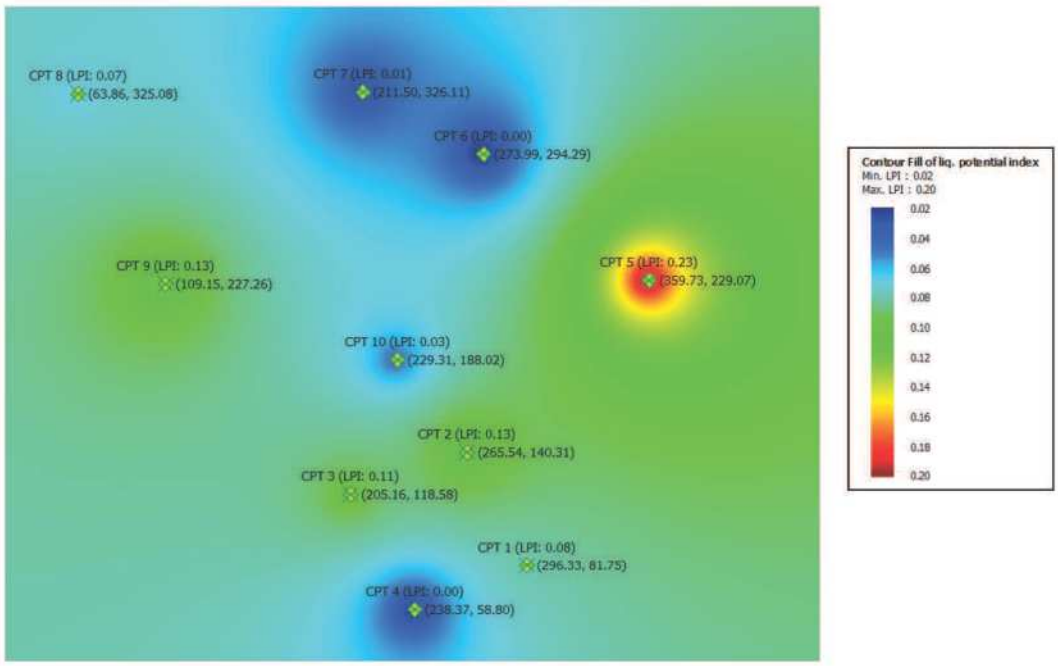
Dall'allegato A relativo alla classificazione sismica dei comuni dell'Emilia Romagna si ricava che il Comune di Cesenatico è in inserito (zonazione sismogenetica ZS9) in zona 917 da cui la Magnitudo Momento M_w = **5.94** (tab. 6 INGV).

La valutazione della Liquefazione è stata sviluppata impiegando il software CLiq (CPT Liquefaction Assessment Software) codificato dalla GeoLogismiki (http://www.geologismiki.gr) nell'ultima release al quale ha collaborato il prof. Peter K. Robertson (http://www.cpt-robertson.com).

Le elaborazioni ed i risultati ottenuti sono esposti dettagliatamente nel report del processing come allegato alla relazione su file mentre nei grafici di stima sono riportati alle pagine successive.

Sinteticamente vengono espresse le risultanze attraverso la mappa seguente del valore di LPI (o IP_L) cioè del Rischio di Liquefazione (§7.2.5) la cui parametrizzazione è indicata nella seguente tabella:

$IP_L = 0$	Suolo Non liquefacibile
$0 < IP_L < 2$	Basso
$2 < IP_L < 5$	Moderato
$5 < IP_L < 15$	Alto
$15 < IP_L > 15$	Molto alto



Come si può notare dalla mappa il valore di LPI rientra per tutti i punti di prova CPT nel range compreso tra 0 e 2 indicativo di un **rischio basso** essendo il valore massimo rilevato di LPI=0.23 in corrispondenza della CPT5.

Medesima indicazione la si ottiene dai grafici del valore QTn,cs – CSR* nel quale è presente una curva che separa i luoghi potenzialmente liquefacibili da quelli non liquefacibili.

Analizzando tutti i grafici, riportati successivamente, si rileva che sono pochissimi i punti parametrici che ricadono nel settore indice di liquefazione (punti in rosso).

Valutando il Fattore di sicurezza FS_L di tutte le prove si rileva che è quasi ovunque superiore al valore di 1 tranne in qualche punto sulle verticali delle CPT che si approssima a questo (si rimanda ai log al termine della relazione).

7.4 Stima dei cedimenti permanenti

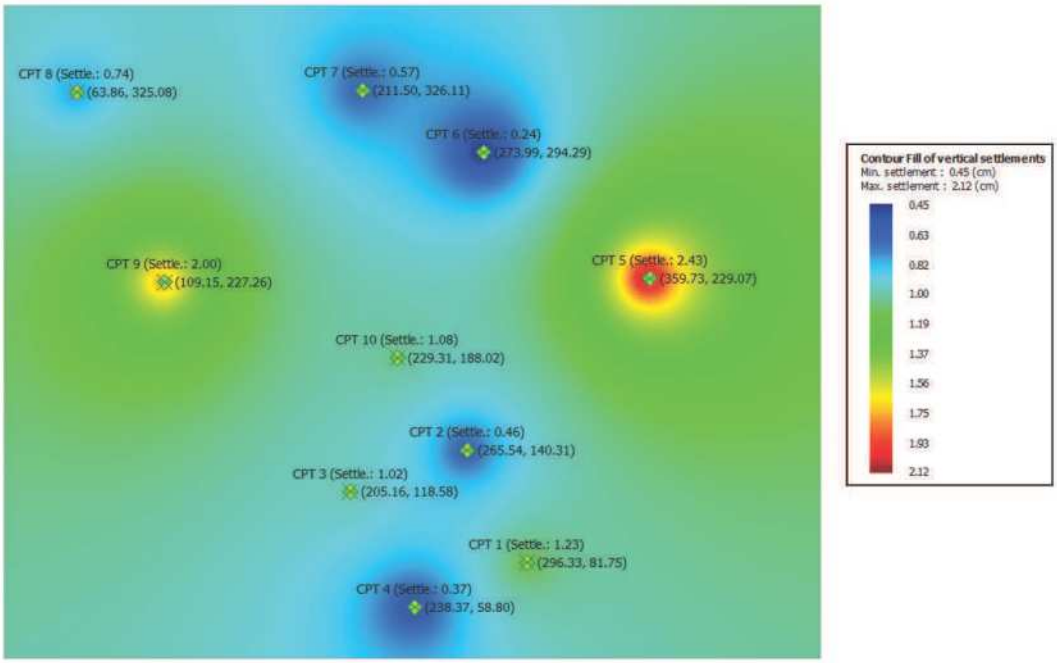
Questa stima viene realizzata automaticamente dal software applicando le procedure di Robertson 2010, il cui diagramma di flusso è presente nel report ed utilizza la procedura standard codifica nell'Allegato A delle norme regionali alle voci B, D ed E, seppur impiegando codici di calcolo più recenti.

E' da far presente, comunque, che questa stima avviene utilizzando formule correlative per la definizione di e_0 (indice dei vuoti), C_r (indice di riconsolidazione

postciclica, C_c (indice di compressione) come anche per il rapporto interstiziale da cui determinare le determinazioni di taglio γ_{max}, la deformazione volumetrica ε_v%.

Dalla mappa seguente si può osservare che nell'area considerata, a titolo indicativo e di stima, si possono verificare **cedimenti verticali permanenti post-sismici cumulativi massimi di 2.43 cm e spostamenti laterali cumulativi di 13 cm sulla prova CPT5.**

Tutte le rimanenti prove presentano deformazioni permanenti post-sismiche in misura decisamente inferiore (vedasi planimetria nell'immagine seguente) in particolare nell'area dove è prevista la realizzazione della struttura scolastica (prove CPT 1-2-3-4).



Per una valutazione più di dettaglio si rimanda alle figure presenti alle pagine seguenti ed al report di calcolo della liquefazione su file allegato.

PROGEO
Dott. Maurizio Furani

Hanno collaborato:

Dott. Gabriele Pulelli
Dott. Stefano Tomidei

APPENDICI

DOWN HOLE

Modalità operative

La tecnica down-hole prevede la misura dei tempi di propagazione delle onde di compressione (P) e di taglio (S) tra il punto di energizzazione in superficie (shot) ed il punto di ricezione mobile in profondità entro il foro di sondaggio.

Per effettuare tali operazioni è necessario utilizzare una sorgente di energia a polarizzazione verticale ed orizzontale: con la prima si generano onde di compressione P mentre con la seconda onde di taglio Sh.

Nel caso in esame si è scelta una sorgente di energia che potesse garantire una buona risposta sismica in alta frequenza oltre a caratteristiche dinamiche ripetitive similari; il generatore usato e denominato "Hammer Blow" è rappresentato da un maglio di 8 Kg usato da un operatore lasciato cadere con forza da circa 2 m su una piastra di acciaio per la generazione delle onde di compressione ed orizzontalmente, colpendo un supporto solidale per attrito radente al terreno, (trave in legno con sopra un autocarro) per quelle di taglio.

L'apparato di ricezione è provvisto di un apposito meccanismo di ancoraggio alle pareti del foro durante la registrazione dell'impulso e di disancoraggio per essere mobilizzato lungo la verticale del sondaggio stesso; tale apparato ha la possibilità di essere orientato sul piano orizzontale mediante l'utilizzo di "aste in alluminio" (vedasi foto allegata a fianco).

Tale apparato (sonda 3D) è formato da due gruppi di sensori composti ciascuno da tre geofoni da 14 Hz smorzati del 70%, dei quali uno con l'asse funzionale verticale (V) e due orizzontali (H1 e H2) fra loro ortogonali; l'interdistanza fra i due gruppi è di 1 m. (vedasi foto a lato).

Oltre alla sonda calata entro il foro si utilizza in superficie un interruttore piezoelettrico applicato all'apparato energizzatore, il quale costituisce il dispositivo di trigger per l'inizio della registrazione ed alcuni geofoni di riferimento posizionati nelle vicinanze della bocca del foro che rimangono fissi per tutte le misure effettuate nel sondaggio e che costituiscono il dispositivo di controllo affinché tutti gli impulsi sismici siano in fase ed utilizzabili per le correzioni nella fase di preprocessing nel caso in cui si opti per una elaborazione di tipo tomografico.

Tali geofoni risultano superflui nel caso in cui si intraprenda l'iter elaborativo di tipo differenziale, cioè per ogni ordinata o step di misura, in quanto è sufficiente determinare, per differenza tra i tempi sismici di propagazione (Δt) fra i due ricevitori posti alle estremità opposte della sonda, i singoli valori di velocità sia dell'onda di compressione (per i ricevitori verticali) sia dell'onda di taglio (per i ricevitori orizzontali).

Dopo aver eseguito il collegamento al sismografo del cavo elettrico per i 6 canali della sonda 3D, dell'interruttore piezoelettrico solidale all'apparato di energizzazione e dei geofoni di riferimento

si è effettuato il posizionamento della sonda 3D a fondo foro e si sono realizzati alcuni shot di prova allo scopo di tarare i parametri di acquisizione dello strumento di registrazione dati.

Acquisizione dati

Gli impulsi sismici ricevuti dalla sonda in foro sono stati acquisiti utilizzando l'apparecchiatura EG&G Geometrics Geode dotata di estremo dettaglio di campionatura (0.02 millisec) tramite la quale, dopo amplificazione, conversione analogico/digitale e filtraggio, sono trasferiti e registrati su P.C.

I file dei dati sono così realizzati:

canale 1	-	segnale del geofono orizzontale superiore direzione ortogonale	(H2)
canale 2	-	segnale del geofono orizzontale inferiore direzione ortogonale	(H2)
canale 3	-	segnale del geofono orizzontale superiore direzione parallela	(H1)
canale 4	-	segnale del geofono orizzontale inferiore direzione parallela	(H1)
canale 5	-	segnale del geofono verticale superiore	(V)
canale 6	-	segnale del geofono verticale inferiore	(V)

In tal modo, per ogni step di misura di un metro in profondità, si possono analizzare i first break imputabili all'arrivo dell'onda di compressione (P) sia sul geofono del canale 5 sia sul geofono del canale 6 e per differenza si ottiene il valore della differenza di tempo di percorrenza relativa all'intervallo in oggetto.

Analogamente per ogni step di misura di un metro di profondità, si possono analizzare i first break imputabili all'arrivo dell'onda di taglio (S) sia sul geofono del canale 3 sia sul geofono del canale 4 e per differenza si ottiene il valore della differenza di tempo di percorrenza relativa all'intervallo in oggetto.

Elaborazione dati

Il procedimento elaborativo dei dati down hole può essere sviluppato secondo due differenti modalità:

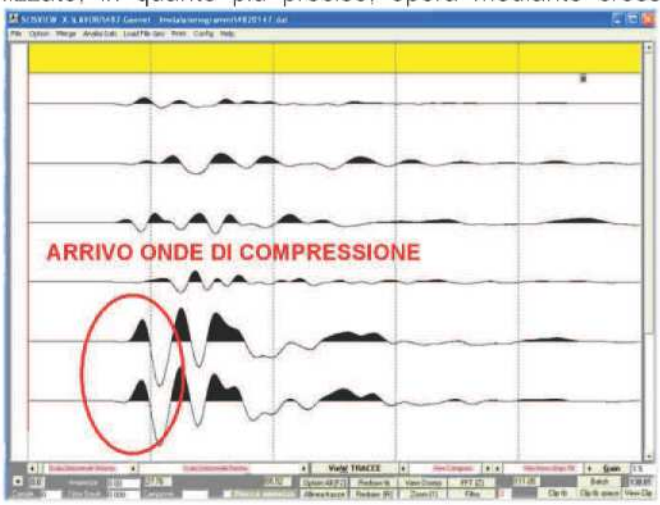
- down hole tomografico,
- down hole differenziale.

Il primo utilizza procedure di ray tracing e backanalisys sulla base di un modello matematico anisotropo del terreno ottimizzando questo rispetto ai tempi sperimentali misurati sulle tracce sismiche.

Il secondo è normalmente quello utilizzato, in quanto più preciso, opera mediante cross correlazione, tra le tracce relative alle onde di compressione e taglio misurate nei sensori reciproci posti nella sonda a distanza di 1 m.

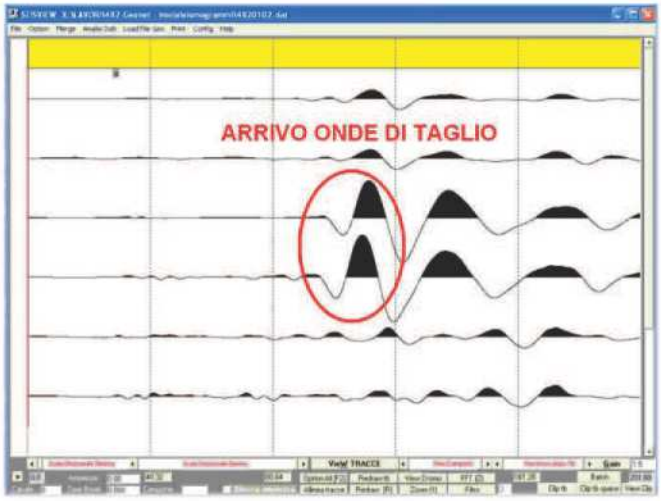
Tale tecnica viene normalmente impiegata allo scopo di aumentare il grado di affidabilità dei tempi.

Questa metodologia è indicata e sufficientemente precisa per la valutazione dei tempi di arrivo delle onde di compressione P; nell'immagine a lato si ha un esempio di quanto indicato.



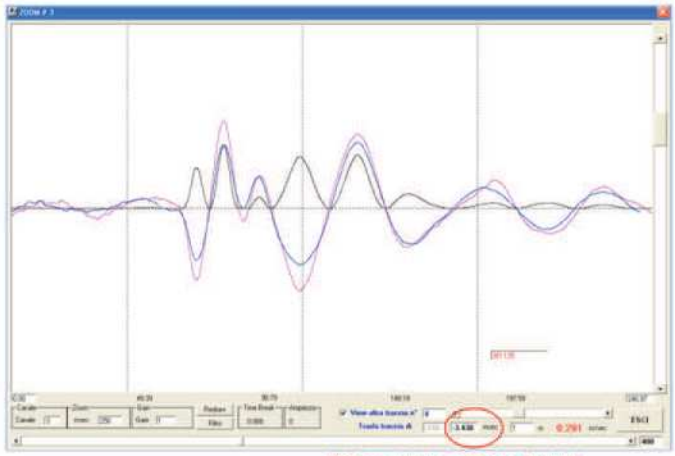
Per le onde di taglio S si procede all'analisi dell'inversione delle tracce sismografiche individuando quale sia il primo arrivo dell'onda di taglio (inversione di polarità), poi si affina la ricerca mediante Cross Correlazione (applicando la metodologia proposta da Willis e Toksoz -1983-) e si determina così il valore del tempo differenziale fra le due tracce omologhe.

Nell'immagine a lato si evidenzia il primo arrivo delle onde di taglio fra le tracce sismografiche relative ai geofoni dei canali 3 e 4.



Una volta individuato il primo arrivo dell'onda di taglio (con procedura analoga per le onde di compressione) si procede con una serie di passaggi di Cross Correlazione a finestre variabili tra le varie tracce allo scopo di individuare la massima rassomiglianza tra gli arrivi omologhi e determinare la massima verosimiglianza tra le tracce dei canali indicati nelle tabelle dei down hole riportate alle pagine precedenti.

Tale tecnica in pratica consiste nel valutare il "ritardo" di arrivo dell'onda di compressione e/o di taglio fra il geofono inferiore e quello superiore valutando unicamente su base sismografica il valore di tempo che intercorre fra i due arrivi; qui di seguito è riportato un esempio di tale tecnica elaborativa.



Differenziale tempi onde di taglio fra canale 3 e canale 4

Elaborazione dei log di Vs, Vp e dei Moduli Elastici Dinamici

Dopo aver inserito nel programma elaborativo le geometrie di ricerca (distanza punto di energizzazione in superficie, coordinate della sonda in profondità) ed elaborato per ciascun canale di ricezione i tempi di arrivo dell'energia sismica prodotta dalla superficie topografica e registrata sulla verticale del punto di indagine secondo la tecnica down hole differenziale (cross correlazione), sono state realizzate tabelle e diagrafie (per step di misura di metro) relative ai parametri sismici cinematici Vp e Vs ed ai corrispondenti moduli elastici dinamici che si possono ottenere dalle interrelazioni che collegano le velocità delle onde di compressione e quelle di taglio.

Infatti, per la caratterizzazione del sito e del terreno in esame, specialmente in termini di deformabilità dei materiali in associazione ai dati geotecnici e/o di prove di laboratorio su campioni prelevati nei sondaggi geognostici, può essere opportuno fornire al Committente altri parametri (oltre ai singoli valori di velocità sismica) che la prova down hole è in grado di fornire contemporaneamente alla rilevazione delle velocità di propagazione delle onde sismiche (Vp e Vs) nel sottosuolo.

Si tratta dei Moduli elastici dinamici del terreno i quali possono contribuire ad una migliore definizione dei carichi e delle spinte da parte del manufatto sul terreno di fondazione.

Attraverso la determinazione sia delle velocità delle onde di compressione sia delle velocità delle onde di taglio è possibile ricavare i seguenti parametri (per ulteriori dettagli si veda, tra i più

recenti, "The rock physics handbook – tools for seismic analysis in porous media" di G. Mavko, T. Mukerji e J. Dvorkin, Cambridge University Press, UK, pp. 1-329, 1998):

- Coefficiente di Poisson	(ν)	
- Peso di volume	(γ_{din})	in t/m³
- Modulo di Elasticità dinamico	(E_{din})	in Kg/cm²
- Modulo di Taglio dinamico	(G_{din})	in Kgcm²
- Modulo di Compressibilità dinamico	(K_{din})	in Kgcm²

Il *Coefficiente di Poisson (v)*, noto come la costante che lega le deformazioni in un corpo, può essere collegato, da un punto di vista bidimensionale, ad uno sforzo di trazione, che causa nel corpo stesso un allungamento in una direzione e un raccorciamento nell'altra, o ad uno sforzo di compressione che, analogamente, determina una contrazione in una direzione e una dilatazione nella direzione opposta.

Tale parametro può presentare un range di variazione compreso tra un massimo di 0.5 ed un minimo di 0; il valore di 0.5 è caratteristico di materiali che si deformano senza cambiamenti di volume (es. acqua), valori leggermente inferiori (0.47 - 0.49) sono tipici di argille o materiali molto saturi; valori inferiori sono indicativi di materiali da poco consolidati a sovraconsolidati.

Per le rocce si presentano range di variazioni molto ampi collegati in particolare sia al grado di fratturazione sia alla presenza di cavità, stratificazioni e litologie e comunque tra (0.46 e 0.20).

In funzione di Vp e di Vs il parametro è definito dalla seguente relazione:

Coefficiente di Poisson $$v = \frac{Vp^2 - 2 \cdot Vs^2}{2 \cdot (Vp^2 - Vs^2)}.$$

Il *Peso di volume* (γ_{din}) del terreno può essere indicativamente ricavato, in via empirica, anche dalla velocità delle onde di compressione sulla base della seguente relazione:

Peso di volume $$\gamma_{din} = 0.51 \cdot Vp_{m/sec}^{0.19}$$ (γ_{din} in T/m³).

Da tale relazione si può ottenere anche la densità geofisica, intesa come:

Densità geofisica $$\delta_{din} = \frac{\gamma}{g}$$ (g = 9.8 – accelerazione di gravità m/sec),

la quale viene utilizzata come parametro nelle formule per ricavare i moduli di elasticità e di taglio.

Il *Modulo di Young* o di *Elasticità normale* E_{din}. definisce la *deformazione longitudinale* di un corpo, intesa come il rapporto tra l'allungamento (o l'accorciamento) e la lunghezza originale del corpo stesso; in funzione dei valori della velocità delle onde di compressione Vp, della densità geofisica e del coefficiente di Poisson il parametro è definito dalla seguente relazione:

Modulo di Elasticità $$E_{din} = Vp^2 \cdot \delta_{din} \cdot \frac{(1+v) \cdot (1-2v)}{(1-v)}$$ (E_{din} in Kg/cm²).

Il *Modulo di Taglio* o di *Rigidità* G_{din} definisce invece la *deformazione tangenziale* di un corpo, intesa come l'angolo di cui ruota il corpo stesso in seguito ad uno sforzo di taglio; in funzione dei valori della velocità delle onde di taglio Vs e della densità geofisica il parametro è definito dalla seguente relazione:

Modulo di Taglio $$G_{din} = \delta_{din} \cdot Vs^2$$ (G_{din} in Kg/cm²).

Infine, il *Modulo di Compressibilità* o *Modulo di Volume* è quel parametro ottenibile se lo sforzo viene applicato tridimensionalmente (lungo tutti i tre assi cartesiani) generando una pressione idrostatica uniforme con la quale si avranno componenti dello sforzo uguali e con deformazione rappresentata da una variazione di volume la quale può essere indicata numericamente dall'inverso del coefficiente di compressibilità; utilizzando i valori del modulo di elasticità e del coefficiente di Poisson il parametro è definito dalla seguente relazione:

Modulo di Compressibilità $$K_{din} = \frac{E_{din}}{3 \cdot (1 - 2 \cdot \nu)}$$ (K_{din} in Kg/cm²).

I moduli dinamici così calcolati risultano comunque sempre più elevati di quelli statici forniti da prove di carico in situ in quanto gli impulsi sismici sono di breve durata e le sollecitazioni ad essi associate sono relativamente modeste e rientrano nel campo delle deformazioni istantanee.

Presentazione dati prove Down Hole

Nella documentazione down hole riportata al termine della presente relazione sono presentate in 3 tavole distinte le tabelle numeriche e i grafici (log) relativi ai sismogrammi acquisiti, ai parametri geosismici e moduli elastici dinamici analizzati ed ai log delle velocità.
Nella tabella sono riportati:

1. Profondità (m);
2. Tempi di percorrenza onde di compressione (msec)
3. Tempi di percorrenza delle onde di taglio (msec)
4. V_p velocità onde di compressione (m/sec);
5. V_s velocità onde di taglio (m/sec);
6. μ coefficiente di Poisson;
7. γ peso di volume (t/m³);
8. E_{din} modulo di elasticità dinamico -Young- (kg/cm²);
9. G_{din} modulo di taglio dinamico (kg/cm²);
10. K_{din} modulo di compressibilità dinamico (kg/cm²)

A lato della tabella numerica è riportata la stratigrafia sintetica ed i parametri medi ricavati per intervalli litologici o geofisici significativi.

PROVA PENETROMETRICA SISMICA ("CONO SISMICO")

Modalità operative

Il sistema in oggetto permette di realizzare un'indagine di tipo sismico (tecnica "down hole") complementare alla realizzazione di una prova penetrometrica statica.

Come per la tecnica in foro di sondaggio di tipo down-hole si prevede la misura dei tempi di propagazione delle onde di compressione (P) e di taglio (S) tra il punto di energizzazione in superficie (shot) ed il punto di ricezione mobile in profondità anche se, nel caso del "cono sismico", i singoli valori di velocità sia dell'onda di compressione (per i ricevitori verticali) sia dell'onda di taglio (per i ricevitori orizzontali) vengono determinati, con più dettaglio e solo nel tratto interessato, (ad ogni step di misura e tipologia di energizzazione) per differenza tra i tempi sismici di propagazione fra i due ricevitori posti alle estremità opposte della sonda e non dall'elaborazione (per ogni shot e posizione in foro della sonda ricevente) dell'intero tragitto dalla superficie al ricevitore.

Sorgente di energia

Nei pressi della verticale di misura, mediante l'utilizzo di un piccolo pendolo d'acciaio che sollecita un incudine reso solidale al terreno, è stato generato ad ogni step di misura (ogni metro) un treno d'onda polarizzato sia orizzontalmente sia verticalmente.

Infatti, per effettuare le operazioni di acquisizione dati, è necessario utilizzare una sorgente di energia a polarizzazione verticale ed orizzontale: con la prima si generano onde di compressione P mentre con la seconda onde di taglio Sh.

Nel caso in esame si è scelta una sorgente di energia che potesse garantire una buona risposta sismica in alta frequenza oltre a caratteristiche dinamiche ripetitive similari; il generatore usato e denominato "Hammer Blow" è rappresentato da un maglio di 8 Kg usato da un operatore e lasciato cadere con forza da circa 2 m su una piastra di acciaio per la generazione delle onde di compressione ed orizzontalmente, colpendo un supporto solidale per attrito radente al terreno, (trave in legno con sopra un autocarro) per quelle di taglio.

Apparato di ricezione

E' stata utilizzata una sonda originale Progeo realizzata in acciaio temprato nella quale sono inseriti, ed opportunamente isolati dal corpo della sonda stessa, due coppie di ricevitori (orizzontali e verticali) interspaziate di 1 metro l'una dall'altra (totale 4 ricevitori).

Importante notare che i ricevitori, essendo montati in appositi alloggiamenti isolati acusticamente dal resto della sonda (vedasi dettaglio nell'immagine alla pagina seguente), permettono di ricevere l'energia proveniente dal terreno sollecitato e non quella che si propaga lungo l'asta penetrometrica di infissione.

È possibile perciò, per ogni ordinata di penetrazione (step di misura), determinare per differenza tra i tempi sismici di propagazione (Δt) fra i due ricevitori posti alle estremità opposte della sonda, i singoli valori di velocità sia dell'onda di compressione (per i ricevitori verticali) sia dell'onda di taglio (per i ricevitori orizzontali).

Operazioni di campagna

E' stata realizzata dapprima la prova penetrometrica statica in modo normale come da consuetudine, ultimata la quale sono state estratte tutte le aste, dopodichè è stata ripetuta la prova infiggendo la "punta sismica" originale Progeo di nuovo nel terreno nella stessa verticale e fino alla profondità raggiunta in precedenza.

Ad ogni stop di infissione (metro) è stata eseguita una misura geofisica di energizzazione e ricezione dell'energia sismica delle onde di compressione e di taglio terminata la quale è stata montata una nuova asta penetrometrica ripetendo le operazioni di emissione e ricezione dell'energia con le stesse modalità fino al termine della prova.

Acquisizione dati

I tempi di arrivo dell'energia polarizzata sono stati opportunamente registrati mediante l'utilizzo di un P.C. e di un sismografo EG&G Geometrics Geode dotato di estremo dettaglio di campionatura (0.018 millisec) collegato tramite cavo sismico con la punta di infissione.

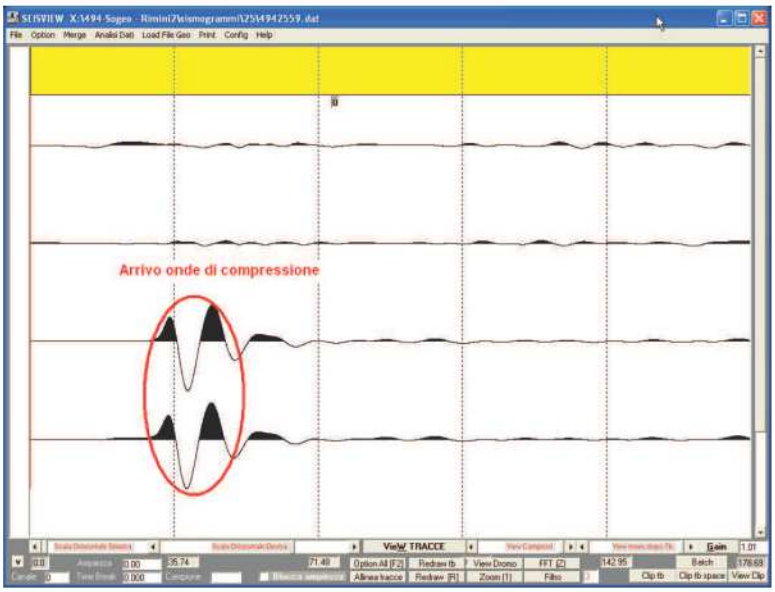
Gli impulsi sismici ricevuti dalla sonda in profondità nel foro sono stati acquisiti ad ogni metro di profondità e, dopo amplificazione, conversione analogico/digitale e filtraggio, trasferiti e registrati su P.C.

I files dei dati sono così realizzati:

canale 1 (H2)	-	segnale del geofono orizzontale inferiore	
canale 2 (H1)	-	segnale del geofono orizzontale superiore	
canale 3	-	segnale del geofono verticale inferiore	(V2)
canale 4	-	segnale del geofono verticale superiore	(V1)

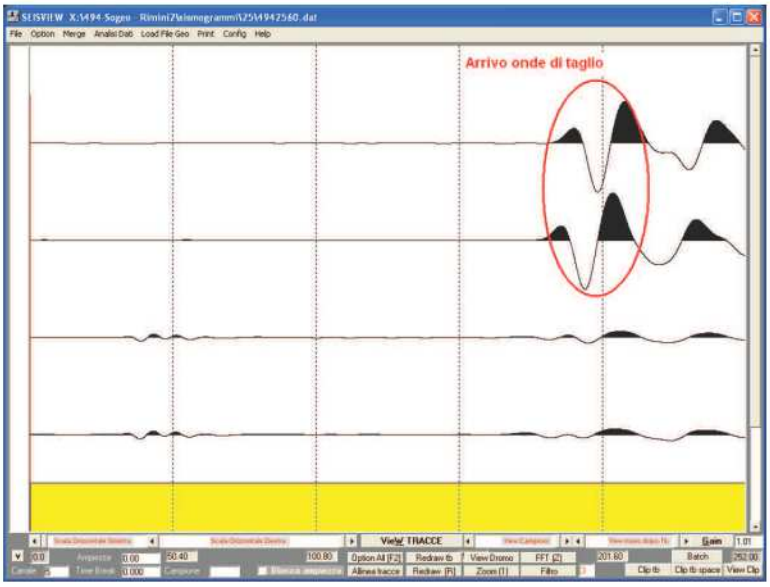
Ad ogni step di misura si sono effettuate due energizzazioni: una ortogonale rispetto alla superficie del piano campagna che ha generato un treno di onde di compressione (P) ed una parallela al piano campagna che ha generato un treno di onde di taglio polarizzate sul piano orizzontale (Sh).

Per ogni energizzazione si è registrato un sismogramma; quindi ci saranno sismogrammi sui quali sarà possibile determinare gli arrivi dell'onda di compressione (P) ed altri sui quali sarà possibile determinare gli arrivi dell'onda di taglio (Sh).



Un sismogramma tipico è rappresentato nell'immagine a lato nella quale si sono evidenziati gli arrivi dell'onda di compressione sui due geofoni verticali.

In tal modo, per ogni step di misura di un metro in profondità, si possono analizzare i first break imputabili all'arrivo dell'onda di compressione (P) sia sul geofono del canale 3 sia sul geofono del canale 4 e per differenza si ottiene il valore della differenza di tempo di percorrenza relativa all'intervallo in oggetto.



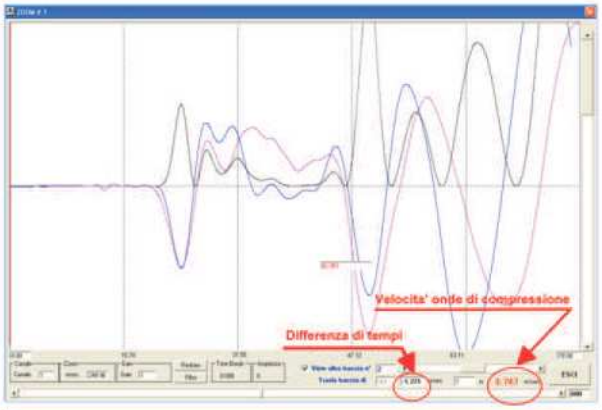
Nell'immagine a lato è rappresentato invece un sismogramma tipico in cui si sono evidenziati gli arrivi delle onde di taglio sui geofoni orizzontali.

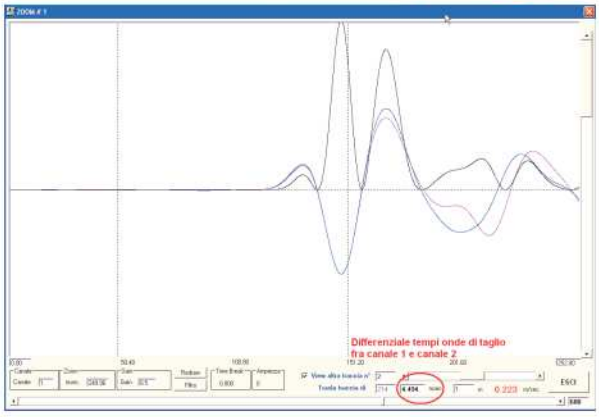
Analogamente a quanto esposto sopra, per ogni step di misura di un metro di profondità, si possono analizzare i first break imputabili all'arrivo dell'onda di taglio (S) sia sul geofono del canale 1 sia sul geofono del canale 2 e per differenza si ottiene il valore della differenza di tempo di percorrenza relativa all'intervallo in oggetto.

Elaborazione dati

Il procedimento elaborativo dei dati viene sviluppato secondo la tecnica differenziale (cross correlazione).

Infatti, avendo a disposizione una sonda ricevente ("cono sismico") con spaziatura intergeofonica di 1 metro e un ridotto intervallo di campionamento (0.018 millisecondi) consentito dal sismografo EG&G GEOMETRICS GEODE è possibile determinare per partizioni discrete direttamente nel tratto interessato i valori cinematici differenziali.





La valutazione dei tempi di arrivo delle onde di compressione e di taglio è stata effettuata mediante Cross Correlazione di cui si riporta un esempio nell'immagine qui di lato.

Tale tecnica viene normalmente impiegata allo scopo di aumentare il grado di affidabilità dei tempi.

Questa metodologia è indicata e sufficientemente precisa per la valutazione dei tempi di arrivo delle onde di compressione P.

Per le onde di taglio S si procede all'analisi dell'inversione delle tracce sismografiche individuando quale sia il primo arrivo dell'onda di taglio (inversione di polarità), poi si affina la ricerca mediante Cross Correlazione (applicando la metodologia proposta da Willis e Toksoz - 1983-) e si determina così il valore del tempo differenziale fra le due tracce omologhe.

Una volta individuato il primo arrivo dell'onda di taglio (con procedura analoga per le onde di compressione) si procede con una serie di passaggi di Cross Correlazione a finestre variabili tra le varie tracce allo scopo di individuare la massima rassomiglianza tra gli arrivi omologhi e determinare la massima verosimiglianza tra le tracce.

Tale tecnica in pratica consiste nel valutare il "ritardo" di arrivo dell'onda di compressione e/o di taglio fra il geofono inferiore e quello superiore valutando unicamente su base sismografica il valore di tempo che intercorre fra i due arrivi; nell'immagine qui sopra è riportato un esempio di tale tecnica elaborativa.

Elaborazione dei log di Vp, Vs e dei Moduli Elastici Dinamici

L'elaborazione dei log di Vp, Vs e dei principali moduli elastici dinamici è sostanzialmente analoga a quella dell'indagine Down Hole appena sopra descritta perciò non si riportano i dettagli elaborativi.

INDAGINI DI SISMICA PASSIVA - METODOLOGIA HVSR

La metodologia, chiamata anche tecnica di Nakamura (1989), è stata introdotta da Nogoshi e Igarashi (1971) sulla base degli studi di Kanai e Tanaka (1961).

Questa tecnica si basa essenzialmente sul rapporto spettrale H/V di rumore ambientale (seismic noise) e permette di valutare gli effetti locali di sito.

La tecnica proposta da Nakamura assume che i microtremori (il cosiddetto rumore di fondo registrabile in qualunque momento posizionando un sensore sismico sul terreno) consistano principalmente di un tipo di onde superficiali, le onde di Rayleigh, che si propagano in un singolo strato soffice su semispazio e che la presenza di questo strato sia la causa dell'amplificazione al sito.

Per l'applicazione e l'interpretazione di questa tecnica è fondamentale una buona conoscenza dell'ingegneria sismologica combinata con un background di informazioni relative alle caratteristiche geologiche, geofisiche e geotecniche del sito.

Questa tecnica presenta il vantaggio di poter essere adoperata pressoché ovunque, purché siano garantite l'assenza di forti vibrazioni indotte da attività umane nelle vicinanze del punto di misura.

Il metodo è generalmente applicato per studi di microzonazione e per valutare la risposta sismica locale.

Questa tecnologia è stata oggetto del progetto di ricerca SESAME (**S**ite **E**ffect**S** assessment using **AM**bient **E**xcitations) ed a questo si rimanda per le linee guida della tecnica H/V spectral ratio (http://sesame-fp5.obs.ujf-grenoble.fr/index.htm).

La sismica passiva a stazione singola fornisce informazioni sui terreni di indagine relativamente alle frequenze naturali e di risonanza.

Basi teoriche

Le basi teoriche dell'HVSR (Horizontal to Vertical Spectral Ratio) in un sistema stratificato in cui i parametri variano solo con la profondità (1-D) è abbastanza semplice.

Si consideri un sistema in cui gli strati 1 e 2 si distinguono per le diverse densità (ρ_1 e ρ_2) e le diverse velocità delle onde sismiche (V_1 e V_2).

Un'onda che viaggia nel mezzo 1 viene parzialmente riflessa dall'orizzonte che separa i due strati, e questa una volta riflessa interferisce con quelle incidenti, sommandosi e raggiungendo le ampiezze massime (condizione di risonanza) quando la lunghezza dell'onda incidente (λ) è 4 volte (o suoi multipli dispari) lo spessore *h* del primo strato.

In altre parole la frequenza fondamentale di risonanza (f_r) dello strato 1 relativa alle onde P è pari a:

$$f_r = V_{p1}/(4h)$$

mentre quella relativa alle onde S è:

$$f_r = V_{s1}/(4h)$$

Teoricamente questo effetto è sommabile cosicché la curva HVSR mostra come massimi relativi le frequenze di risonanza dei vari strati.

Questo, insieme ad una stima della velocità, è in grado di fornire previsioni sullo spessore *h* degli strati.

Questa informazione è per lo più contenuta nella componente verticale del moto, ma la prassi di usare il rapporto degli spettri orizzontali e quello verticale, piuttosto che il solo spettro verticale, deriva dal fatto che il rapporto fornisce un'importante normalizzazione del segnale per *a)* il contenuto in frequenza, *b)* la risposta strumentale e *c)* l'ampiezza del segnale quando le registrazioni vengono effettuate in momenti con rumore di fondo più o meno alto.

La normalizzazione, che rende più semplice l'interpretazione del segnale, è alla base della popolarità del metodo.

Si rileva inoltre come i microtremori siano solo in parte costituiti da onde di volume, P o S, e in misura molto maggiore da onde superficiali, in particolare da onde di Rayleigh (Lachet e Bard, 1994).
Tuttavia ci si può ricondurre a risonanza delle onde di volume poiché le onde di superficie sono prodotte da interferenza costruttiva di queste ultime e poiché la velocità dell'onda di Rayleigh è molto prossima a quella delle onde S.

L'applicabilità pratica della semplice formula sopra riportata relativa alle onde S è stata già dimostrata in molti studi sia nell'ambito della prospezione geofisica sia nell'ambito ingegneristico.

Poiché la situazione illustrata è tipica delle coltri sedimentarie sovrastanti basamenti rocciosi, il metodo HVSR è parso immediatamente applicabile alla determinazione dello spessore delle coltri sedimentarie (Ibs-Von Seht e Wohlemberg, 1999).

Attrezzature e modalità esecutive

La misura prevede la registrazione, senza utilizzo di alcun strumento di energizzazione del terreno, del microtremore sismico ambientale nel dominio del tempo, sulle tre componenti dello spazio attraverso il posizionamento di adeguati strumenti sismometrici costituiti da sensori tridimensionali.
Per queste misure è sconsigliato l'impiego di accelerometri, non sufficientemente sensibili a frequenze inferiori a 1 Hz, né di accelerometri sismologici.
Essendo la stabilità una caratteristica fondamentale non sono impiegabili sismometri broadband con periodo naturale > 20 sec. in quanto richiedono lunghi tempi di stabilizzazione, come non sono raccomandabili sensori con frequenza naturale inferiore alla più bassa frequenza di interesse.
Indicativamente, la frequenza di sito è funzione diretta della vicinanza del bedrock dalla superficie topografica e della rigidità dei materiali.

Per l'installazione lo strumento di misura dovrà essere orientato secondo le direzioni geografiche (E e W) e dovrà essere dotato di bolla sferica per il posizionamento mentre l'accoppiamento con la superficie dovrà essere diretto o assicurato con piedini o puntazze in terreni morbidi.

Bisognerà altresì fare attenzione alla presenza di radici, sottoservizi, vicinanza edifici, vento ecc., in quanto creano disturbo nel segnale H/V inducendo una forte perturbazione a bassa frequenza.

Per uno studio di risposta di sito è consigliabile effettuare almeno tre misure per punto, possibilmente in tempi diversi durante la giornata, da cui derivare il valore di frequenza di risonanza.

La strumentazione di acquisizione presenta le seguenti specifiche:

1. trasduttori tricomponenti (N-S, E-W, verticale) a bassa frequenza (< 1-2 Hz);

2. amplificatori;
3. digitalizzatore;
4. frequenza di campionamento: > 50 Hz;
5. convertitore A/D (analogico digitale) a 24 bit;
6. durata registrazione: >10 minuti;
7. collegamento al tempo GPS per la referenziazione temporale.

Elaborazione dati

L'elaborazione dei dati raccolti impiega un software (**Geopsy**) in grado di consentire la determinazione delle frequenze di risonanza del sottosuolo mediante la tecnica dei rapporti spettrali secondo le linee guida del progetto europeo SESAME (Site EffectS assessment using Ambient Excitations, 2005).

Il processing dei dati verte sul rapporto spettrale tra il segnale del sensore verticale e quelli orizzontali operando su finestre di selezione del segnale che dovranno essere non meno di 10 per un segnale complessivo utile non inferiore a 200-400 secondi.

I principali passi del processing sono i seguenti:

1. FFT (incluso il tapering);
2. operatore di smoothing (Konno & Ohmachi);
3. merging dei componenti orizzontali;
4. H/V Spectral Ratio per ogni finestra utilizzata (>10);
5. media degli spettri H/V;
6. valutazione della deviazione standard.

Le risultanze dell'elaborazione sono presentate mediante graficazione dei rapporti spettrali H/V delle varie componenti indicando il massimo del rapporto HVSR nel valore di f_0 – Frequenza/e di risonanza e la sua deviazione standard.

Il certificato finale della prova presenta:
(http://www.geo.uib.no/seismo/REPORTS/SESAME/USER-GUIDELINES/SESAME-HV-User-Guidelines.doc):

2. i criteri di attendibilità della misura;
3. i criteri di validità del picco di f_0;
4. i valori di soglia delle condizioni di stabilità;
5. l'analisi dei criteri in particolare con verifica rispetto alla frequenza del sensore ed alla presenza di rumore di origine industriale;
6. l'interpretazione di f_0 e dello spettro H/V nei termini di caratteristiche del sito.

Per gli scopi e finalità dell'indagine le misure HVSR offrono la possibilità di determinare:

1. valutazione dell'omogeneità del sito rispetto alle frequenze di risonanza;
2. spessori della coltre di copertura.

Frequenze

Per quanto riguarda la mappatura delle frequenze principali di risonanza, tale elaborazione permette di valutare il grado di omogeneità sulla risposta di sito relativamente alle frequenze dei materiali.
L'analisi di queste permette di definire il campo delle frequenze significative di risonanza da utilizzare direttamente nella progettazione degli edifici.

Spessorii

L'assunzione di base è che, per un modello di sottosuolo monodimensionale (stratificazione piana e parallela) costituito da sedimenti soffici sovrastanti il substrato, la frequenza di risonanza f_r dovuta alla propagazione di onde S incidenti perpendicolarmente la base del substrato è data dalla relazione:

$$T = \frac{4 \times \sum_{i=1}^{n} h_i}{\left(\frac{\sum_{i=1}^{n} Vs_i \times h_i}{\sum_{i=1}^{n} h_i} \right)} \quad da\ cui\ la\ frequenza\ di\ risonanza \quad f_r = \frac{1}{T}$$

dove h è lo spessore dello strato di sedimenti e V_s dipende dalla velocità delle onde di taglio al suo interno.

In base a tale relazione, quindi, a partire da valori misurati di f_r e V_s ricavati è possibile stimare lo spessore della coltre sedimentaria di un bacino.

Tuttavia, non essendo sempre presente la misura di Vs come profilo sismico fino al bedrock geofisico, allora si può far riferimento alla relazione di Ibs-von Seht e Wohlenberg (1999).

Poiché l'andamento del log in Vs in terreni sedimentari è principalmente regolato dall'incremento del modulo di rigidezza al crescere della pressione di confinamento e quindi della profondità, a partire dai valori di V_s per la porzione più superficiale del terreno, è possibile estrapolare l'andamento delle V_s a profondità più elevate tramite l'impiego di relazioni empiriche.

A questo scopo, **Ibs-von Seht** e **Wohlenberg** (1999) suggeriscono la seguente funzione:

$V_s = V_0 (1 + Z)^a$

dove V_0 è la velocità al tetto dello strato ed *a* un fattore che dipende dalle caratteristiche del sedimento (granulometria, coesione ecc.).

Questa relazione, combinata con la precedente, consente infatti la stima dello spessore della coltre di sedimenti soffici:

$$Z = \left[\frac{V_0 (1 - a)}{4 f_r} + 1 \right]^{1/(1-a)} - 1$$

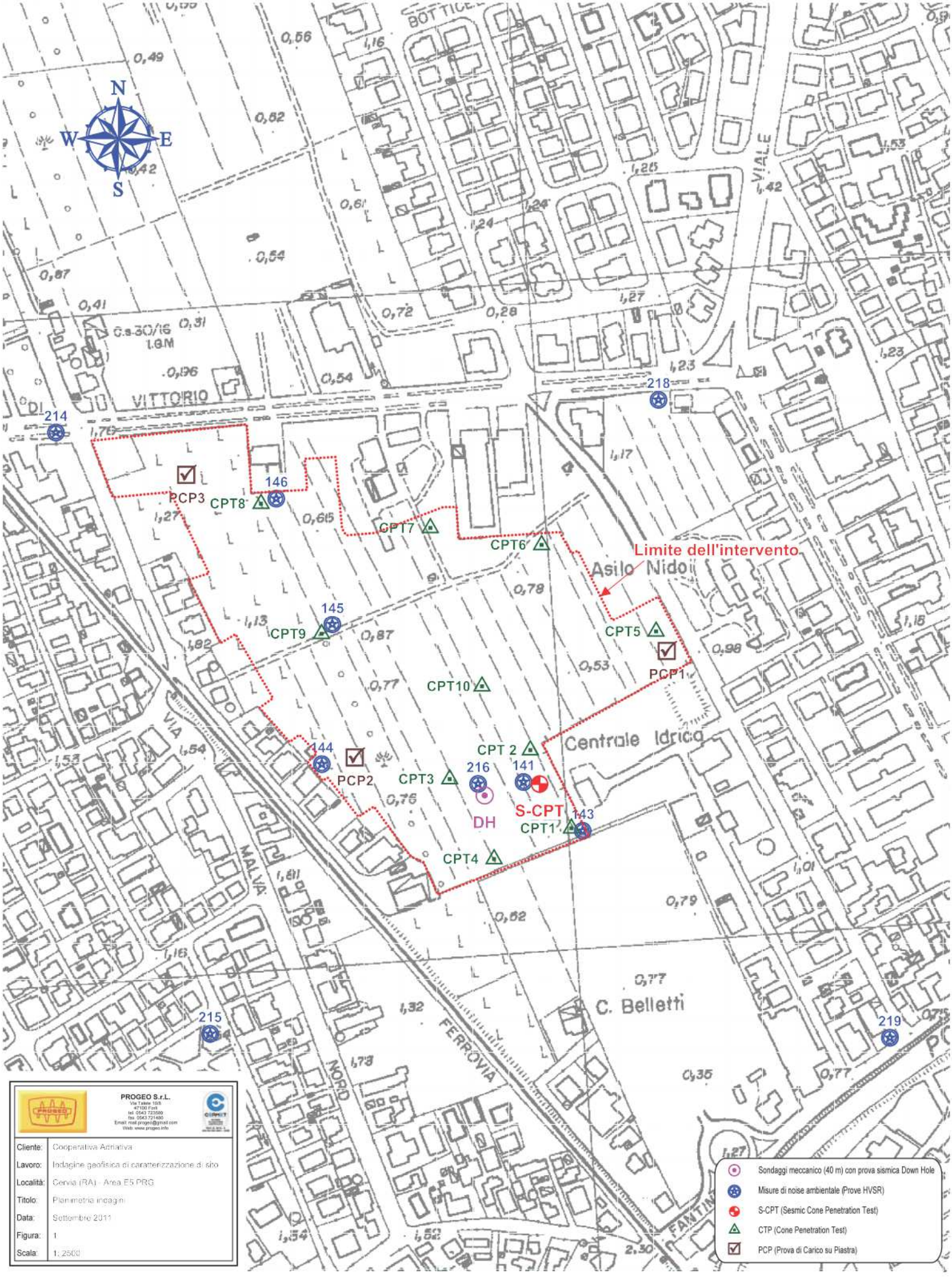
Nei casi più complessi è possibile invertire le curve HVSR creando una serie di modelli teorici da confrontare con quello sperimentale fino a considerare ottimale il modello teorico più prossimo alle curve sperimentali.

Per l'inversione delle curve si può far riferimento alle procedure descritte in Arai e Tokimatsu (2004)[ii] usando il modo fondamentale delle onde di Rayleigh e Love.

---

[i] Ibs-von Seht M. and Wohlenberg J. (1999). Microtremor measurements used to map thickness of soft sediments. Bull. Seism. Soc. Am., 89 (1): 250-259.
Nakamura Y. (1989). A method for dynamic characteristics estimation of subsurface using microtremor on the ground surface, QR Railway Tech. Res. Inst., 30: 25-33.

[ii] Arai H. e Tokimatsu, 2004. S-Wave Velocità Profilino by Inversion of Microtremor H/V Spectrum. Bull. Seismol. Soc. Am.., 94, p. 53-63



PROGEO S.r.L.
Via Talete 10/5
47100 Forlì
tel. 0543 723589
fax. 0543 721480
Email: mail.progeo@gmail.com
Web: www.progeo.info

Cliente:	Cooperativa Adriatica
Lavoro:	Indagine geofisica di caratterizzazione di sito
Località:	Cervia (RA) - Area E5 PRG
Titolo:	Planimetria indagini
Data:	Settembre 2011
Figura:	1
Scala:	1: 2500

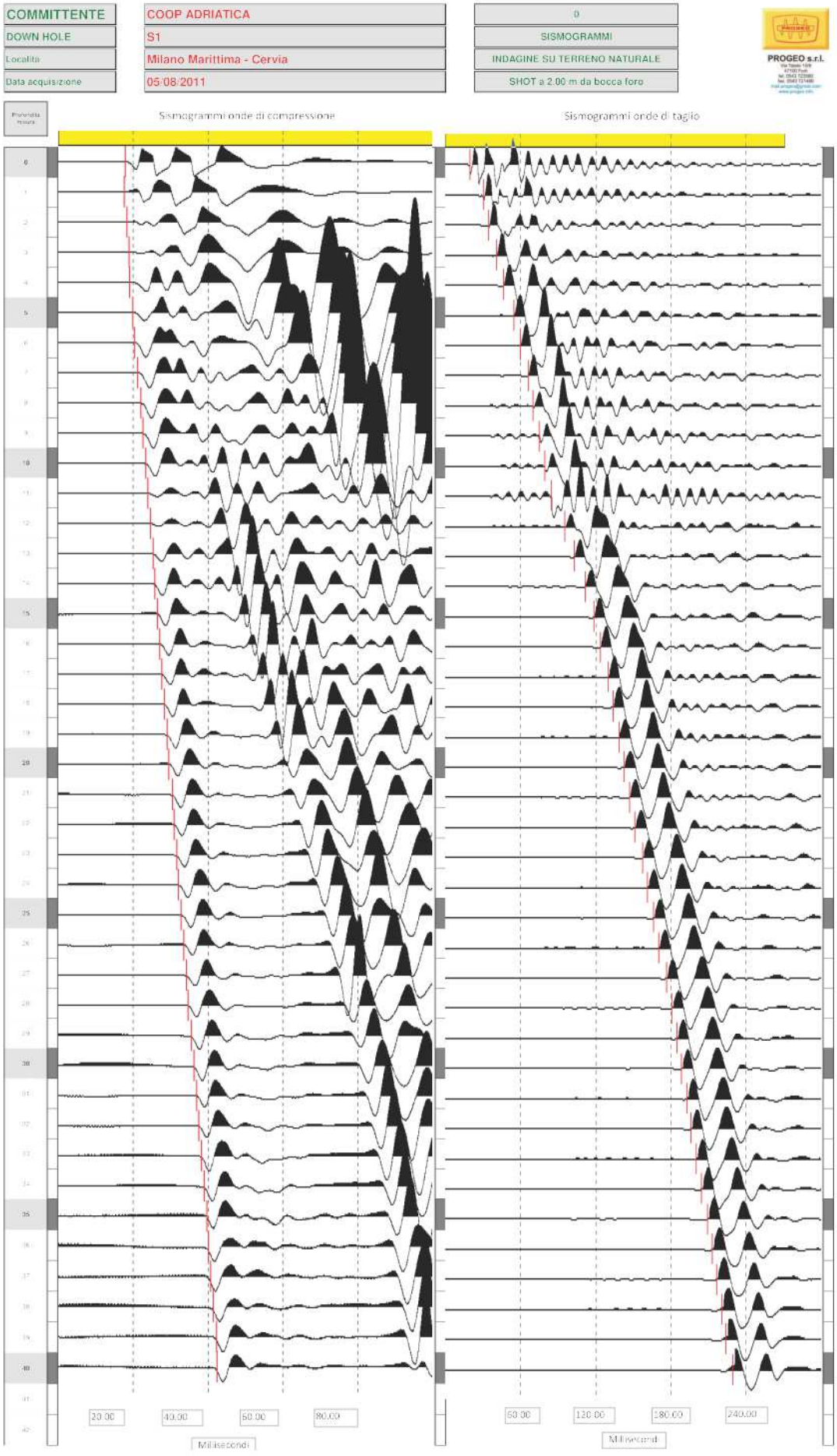

COMMITTENTE
COOP ADRIATICA
DOWN HOLE
S1
Località
Milano Marittima - Cervia
Data acquisizione
05/08/2011
0
SISMOGRAMMI
INDAGINE SU TERRENO NATURALE
SHOT a 2.00 m da bocca foro
PROGEO s.r.l.
Sismogrammi onde di compressione
Sismogrammi onde di taglio
20.00
40.00
60.00
80.00
Millisecondi
60.00
120.00
180.00
240.00
Millisecondi

Fig. 2

COMMITTENTE	COOP ADRIATICA	CODICE LAVORO: 1113/2011	
DOWN HOLE	S1	TABELLA DATI	
Località	Milano Marittima - Cervia	INDAGINE SU TERRENO NATURALE	
Data acquisizione	05/08/2011	SHOT a 2,00 m da bocca foro	

PROGEO s.r.l.

n.	Tempi Tp	Tempi Ts	Vp	Vs	v	γ	Edin	Gdin	Kdin	STRATIGRAFIA SINTETICA	PARAMETRI INTERVALLARI PER LIVELLI OMOGENEI Vp	Vs	v	γ	Edin	Gdin	Kdin	STIMA DEGLI ERRORI Vp	Vs
	msec	msec	m/sec	m/sec		kN/m³	kg/cm²	kg/cm²	kg/cm²		m/sec	m/sec		kN/m³	kg/cm²	kg/cm²	kg/cm²	m/sec	m/sec
0	7.4	18.0	0.24	0.14	0.22	1.44	734	301	464	SABBIA MEDIA-FINE nocciola								0.24	0.14
1	8.0	19.4	0.25	0.15	0.22	1.45	742	305	464									0.25	0.15
2	7.7	19.7	0.26	0.15	0.21	1.45	781	320	489	SABBIA MEDIO-FINE grigia, talora debolmente limosa	0.412	0.208	0.980	1.574	1281	265	3216	0.26	0.15
3	8.2	20.3	0.45	0.12	0.46	1.63	894	257	3996	SABBIA medio-grossolana da beige ad ocracea								0.45	0.12
4	8.4	21.1	0.76	0.12	0.49	1.93	1761	359	10187	SABBIA FINE grigia DEBOLMENTE LIMOSA								0.76	0.12
5	9.2	43.9	1.05	0.12	0.49	1.91	985	303	21939									1.05	0.12
6	9.7	48.0	1.10	0.14	0.49	1.96	1130	374	27139									1.10	0.14
7	10.0	50.1	1.22	0.15	0.49	1.97	1407	469	29248									1.22	0.15
8	11.3	54.2	1.25	0.17	0.49	1.98	1291	431	30909		1.275	0.169	0.497	1.916	1663	554	29648	1.25	0.17
9	12.0	63.7	1.39	0.19	0.49	1.94	2097	704	33123	SABBIA grossolana grigia con GHIAIETTO								1.39	0.19
10	12.6	69.4	1.35	0.19	0.49	2.01	2130	714	36548	SABBIA grigia fine talora debolmente limosa								1.35	0.19
11	13.2	74.8	1.41	0.17	0.49	2.02	1838	616	40226	LIMO ARGILLOSO grigio chiaro con abbondanti inclusi mm di materiale organico nerastro e torbosi. Da mediamente consistente a consistente								1.41	0.17
12	13.9	79.7	1.45	0.16	0.49	2.03	1964	657	43513									1.45	0.16
13	14.4	81.9	1.46	0.14	0.49	2.04	2147	718	44751	LIMO ARGILLOSO grigio chiaro mediamente consistente	1.507	0.188	0.496	1.943	2014	675	45513	1.46	0.14
14	15.1	103.6	1.52	0.13	0.50	2.05	3042	1017	49649									1.52	0.13
15	15.8	107.9	1.56	0.13	0.50	2.06	3268	1093	50905									1.56	0.13
16	16.4	112.9	1.57	0.14	0.50	2.06	3286	1100	51103	LIMO ARGILLOSO grigio scuro con resti inclusi mm di materiale organico nerastro. Consistente								1.57	0.14
17	17.0	113.8	1.54	0.15	0.49	2.04	3192	1069	49274	LIMO SABBIOSO grigio mediamente consistente								1.54	0.15
18	17.7	120.4	1.53	0.17	0.49	2.04	3111	1041	49044	LIMO ARGILLOSO nocciola alternato a LIMO SABBIOSO nocciola e a livelli di SABBIA MEDIA LIMOSA nocciola, mediamente addensata, talora consistente.								1.53	0.17
19	18.4	125.7	1.54	0.16	0.49	2.04	3130	1048	49549									1.54	0.16
20	18.9	132.9	1.54	0.20	0.49	2.04	3469	1161	48763									1.54	0.20
21	19.6	137.6	1.56	0.21	0.49	2.04	3567	1201	50109	LIMO ARGILLOSO nocciola alternato a LIMO SABBIOSO nocciola e a livelli di SABBIA MEDIA LIMOSA nocciola, mediamente addensata, talora consistente.								1.56	0.21
22	20.3	140.9	1.54	0.22	0.49	2.04	3710	1247	48291	LIMO ARGILLOSO bruno/nero consistente								1.54	0.22
23	21.0	146.7	1.57	0.22	0.49	2.04	3697	1243	50537	LIMO ARGILLOSO nocciola con alcuni livelli mm e cm di LIMO SABBIOSO, presenti passate ocra di ocra ed inclusi di materiale organico nerastro. Consistente								1.57	0.22
24	21.4	151.9	1.62	0.22	0.49	2.04	3852	1295	54441	LIMO ARGILLOSO nocciola mediamente consistente con inclusi mm di materiale organico ocraceo	1.523	0.207	0.490	2.062	2749	903	47395	1.62	0.22
25	22.1	156.1	1.62	0.22	0.49	2.03	3963	1332	54522									1.62	0.22
26	22.9	160.0	1.58	0.21	0.49	2.04	3977	1336	51209	LIMO ARGILLOSO variegato nocciola e grigio,nocciola prevalente, consistente con inclusi mm di materiale organico nerastro e passate ocra di cav								1.58	0.21
27	23.6	165.8	1.68	0.21	0.49	2.04	3796	1276	53239	LIMO SABBIOSO nocciola-ocraceo da consistente a mediamente consistente								1.68	0.21
28	24.0	170.1	1.59	0.21	0.49	2.04	3787	1273	51364	LIMO ARGILLOSO nocciola-beige con passate ocra di cav								1.59	0.21
29	24.9	175.0	1.69	0.21	0.49	2.04	3857	1296	57188	LIMO ARGILLOSO grigio chiaro consistente con resti inclusi mm di materiale organico nerastro e passaggi cm di colore grigio scuro								1.69	0.21
30	25.6	176.9	1.43	0.22	0.49	2.03	2973	1000	40732	SABBIA LIMOSA fine nocciola								1.43	0.22
31	26.3	183.3	1.41	0.23	0.49	2.02	3053	1026	39549	LIMO ARGILLOSO grigio chiaro, consistente								1.41	0.23
32	26.9	186.8	1.46	0.25	0.48	2.03	3272	1099	41469	LIMO ARGILLOSO nocciola alternato a LIMO SABBIOSO nocciola-ocraceo, consistente								1.46	0.25
33	27.6	190.9	1.46	0.26	0.48	2.04	3252	1093	42171	LIMO ARGILLOSO grigio chiaro consistente								1.46	0.26
34	28.3	194.2	1.48	0.25	0.48	2.04	3281	1102	43627	ALTERNANZA di LIMO ARGILLOSO da grigio a beige e di LIMO SABBIOSO beige, mediamente consistente. Talora livelli cm di SABBIA FINE LIMOSA beige-nocciola								1.48	0.25
35	29.0	199.1	1.59	0.25	0.49	2.05	3869	1302	45516	LIMO ARGILLOSO grigio chiaro consistente con inclusi mm di materiale organico nerastreo/ aree torbose nerastre								1.59	0.25
36	29.4	202.4	1.58	0.25	0.48	2.07	3910	1315	51139	SABBIA medio-fine nocciola passante a media-grossolana da 36,0 m in poi. Da 36,5 m è grigia.								1.58	0.25
37	29.9	205.1	1.54	0.26	0.49	2.04	3119	1048	50215									1.54	0.26
38	30.7	212.2	1.68	0.27	0.48	2.08	4483	1494	56074	LIMO ARGILLOSO grigio consistente con resti inclusi mm di materiale organico nerastro mm. In base livelli mm di LIMO SABBIOSO	1.686	0.271	0.483	2.073	4669	1563	62902	1.68	0.27
39	31.6	217.4	1.69	0.29	0.48	2.04	5757	1773	63909	SABBIA MEDIA grigia								1.69	0.29
40	31.8	218.8	1.73	0.31	0.48	2.10	6388	2125	61102	SABBIA FINE DA DEBOLMENTE LIMOSA A LIMOSA nocciola-beige								1.73	0.31

Legenda parametri dinamici

Tp	Tempi onde di compressione	millesecondi	γ	Peso di volume	Ton/m³
Ts	Tempi onde di taglio	millesecondi	Edin	Modulo di Elasticità dinamico	Kg/cm²
Vp	Velocità onde di compressione	Km/sec	Gdin	Modulo di Taglio dinamico	Kg/cm²
Vs	Velocità onde di taglio	Km/sec	Kdin	Modulo di Compressibilità dinamico	Kg/cm²
v	Coefficiente di Poisson				

CLASSIFICAZIONE SISMICA DEI SUOLI
(NUOVE NORME TECNICHE PER LE COSTRUZIONI - D.M. del 14 gennaio 2008)

$$Vs = \frac{30}{\sum_{i=1}^{N} \frac{h_i}{V_i}}$$

Vs = 165 m/sec

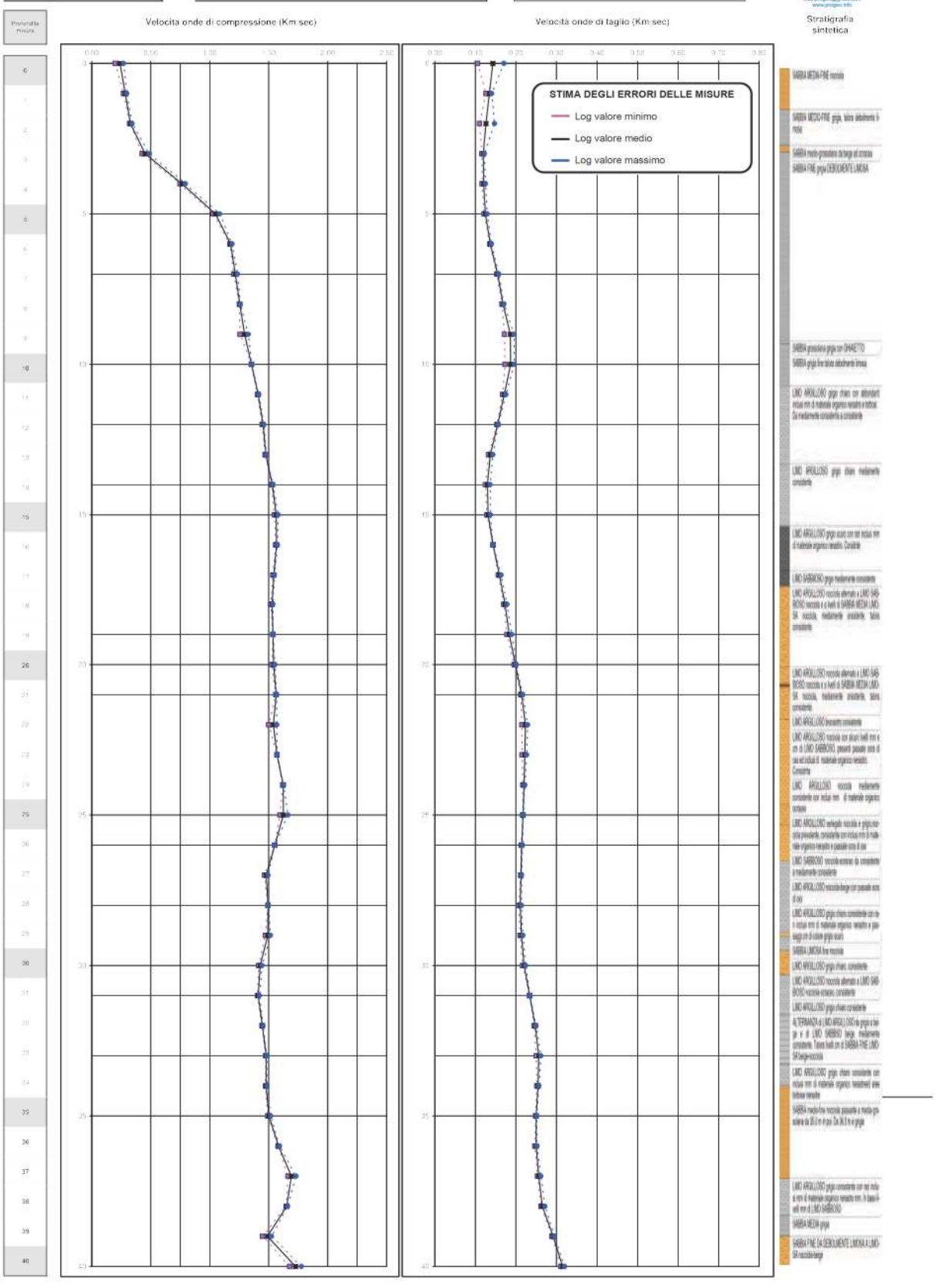
G = 521 Kg/cm²

CATEGORIA SUOLO = D

Fig. 3

COMMITTENTE	COOP ADRIATICA	CODICE LAVORO: 1113/2011
DOWN HOLE	S1	LOG DEI PARAMETRI ELASTICI
Località	Milano Marittima - Cervia	INDAGINE SU TERRENO NATURALE
Data acquisizione	05/08/2011	SHOT a 2.00 m da bocca foro

PROGEO s.r.l.
Via Talete 10/6
47100 Forlì
tel. 0543 723580
fax. 0543 721486
mail:progeo@gmail.com
www.progeo.info

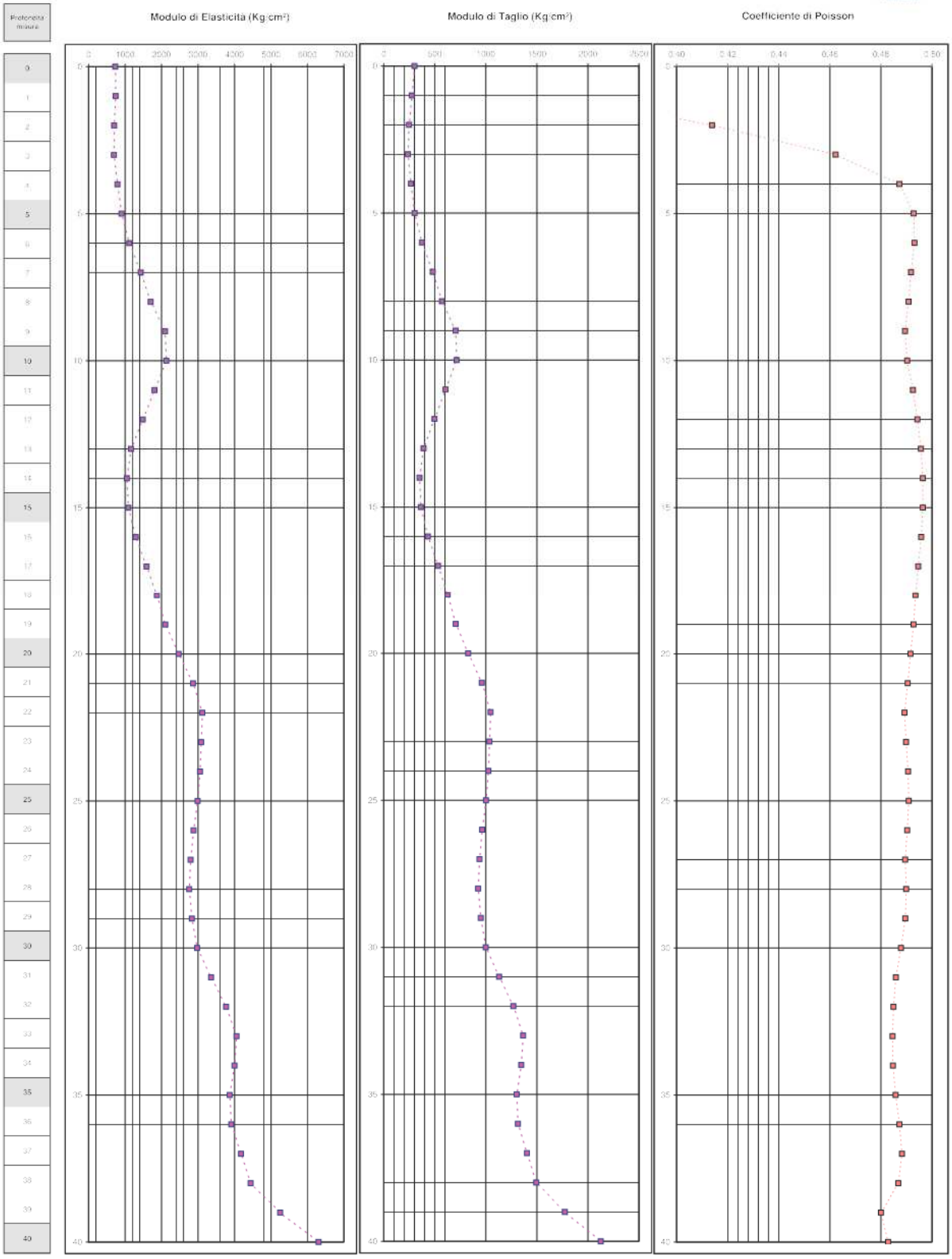


LOG DELLE VELOCITA' DELLE ONDE DI COMPRESSIONE E TAGLIO

Fig. 4

COMMITTENTE	COOP ADRIATICA	CODICE LAVORO: 1113/2011	
DOWN HOLE	S1	LOG DEI PARAMETRI ELASTICI	
Località	Milano Marittima - Cervia	INDAGINE SU TERRENO NATURALE	
Data acquisizione	05/08/2011	SHOT a 2.00 m da bocca foro	

PROGEO s.r.l.
Via Talete 10/B
47100 Forlì
tel. 0543 722580
fax. 0543 721480
mail.progeo@gmail.com
www.progeo.info



LOG DEI PARAMETRI ELASTICI

Fig. 5

COMMITTENTE	COOP ADRIATICA
CONO SISMICO	CPT 1
Località	Milano Marittima (RA)
Data acquisizione	21/7/2011

Codice lavoro	1113

PROGEO s.r.l.
Via Talete 10/B
47100 Forlì
tel. 0543 723580
fax. 0543 721486
mail.progeo@gmail.com
www.progeo.info

Profondità	Vp	Vs	ν	γ	E_{din}	G_{din}	K_{din}
	m/sec	m/sec		T/m³	Kg/cm²	Kg/cm²	Kg/cm²
0							
1	255	112	0.38	1.46	517	187	719
2	288	154	0.30	1.50	936	360	785
3	373	166	0.38	1.57	1215	442	1639
4	458	169	0.42	1.63	1357	477	2856
5	569	150	0.46	1.70	1147	392	5095
6	901	150	0.49	1.86	1261	424	14807
7	1192	199	0.49	1.96	2339	787	27326
8	1356	201	0.49	2.01	2473	831	36524
9	1345	197	0.49	2.00	2365	794	35907
10	1415	147	0.49	2.02	1341	449	40712
11	1476	117	0.50	2.04	850	284	44932
12	1480	108	0.50	2.04	731	244	45255
13	1422	113	0.50	2.03	796	266	41404
14	1487	151	0.49	2.04	1429	478	45416
15	1455	157	0.49	2.03	1532	513	43227
16	1532	214	0.49	2.05	2864	961	47879
17	1482	275	0.48	2.04	4670	1575	43615
18	1477	229	0.49	2.04	3246	1091	43923
19	1519	233	0.49	2.05	3366	1131	46743
20	1562	237	0.49	2.06	3525	1184	49714
21	1566	201	0.49	2.06	2524	846	50454
22	1568	195	0.49	2.06	2386	800	50660
23	1501	210	0.49	2.05	2755	925	45776
24	1545	237	0.49	2.06	3495	1174	48513
25	1481	212	0.49	2.04	2799	940	44395
26	1475	185	0.49	2.04	2133	715	44291
27	1540	209	0.49	2.06	2728	915	48505
28	1494	242	0.49	2.05	3621	1218	44906
29	1482	284	0.48	2.04	4985	1683	43471
30	1582	286	0.48	2.07	5130	1730	50437
31							
32							
33							
34							
35							

VELOCITA' ONDE DI COMPRESSIONE
m/sec

VELOCITA' ONDE DI TAGLIO
m/sec

Legenda parametri dinamici

Tp	Tempo onda di compressione	millisecondi	γ	Peso di volume	T/m³
Ts	Tempo onda di taglio	millisecondi	E_{din}	Modulo di Elasticità dinamico	Kg/cm²
Vp	Velocità onde di compressione	m/sec	G_{din}	Modulo di Taglio dinamico	Kg/cm²
Vs	Velocità onde di taglio	m/sec	K_{din}	Modulo di Compressibilità dinamico	Kg/cm²
ν	Coefficiente di Poisson	-			

CLASSIFICAZIONE SISMICA DEI SUOLI
(D.M. del 14/01/2008)

$$Vs_{30} = \frac{30}{\sum_{i=1..N} \frac{h_i}{V_i}}$$

Vs_{30} = **178** m/sec

CATEGORIA SUOLO = **D**

Fig . 6

COMMITTENTE	COOP ADRIATICA
CONO SISMICO	CPT 1
Località	Milano Marittima (RA)
Data acquisizione	21/7/2011

PROGEO s.r.l.

GRAFICI DEI PARAMETRI ELASTICI DINAMICI

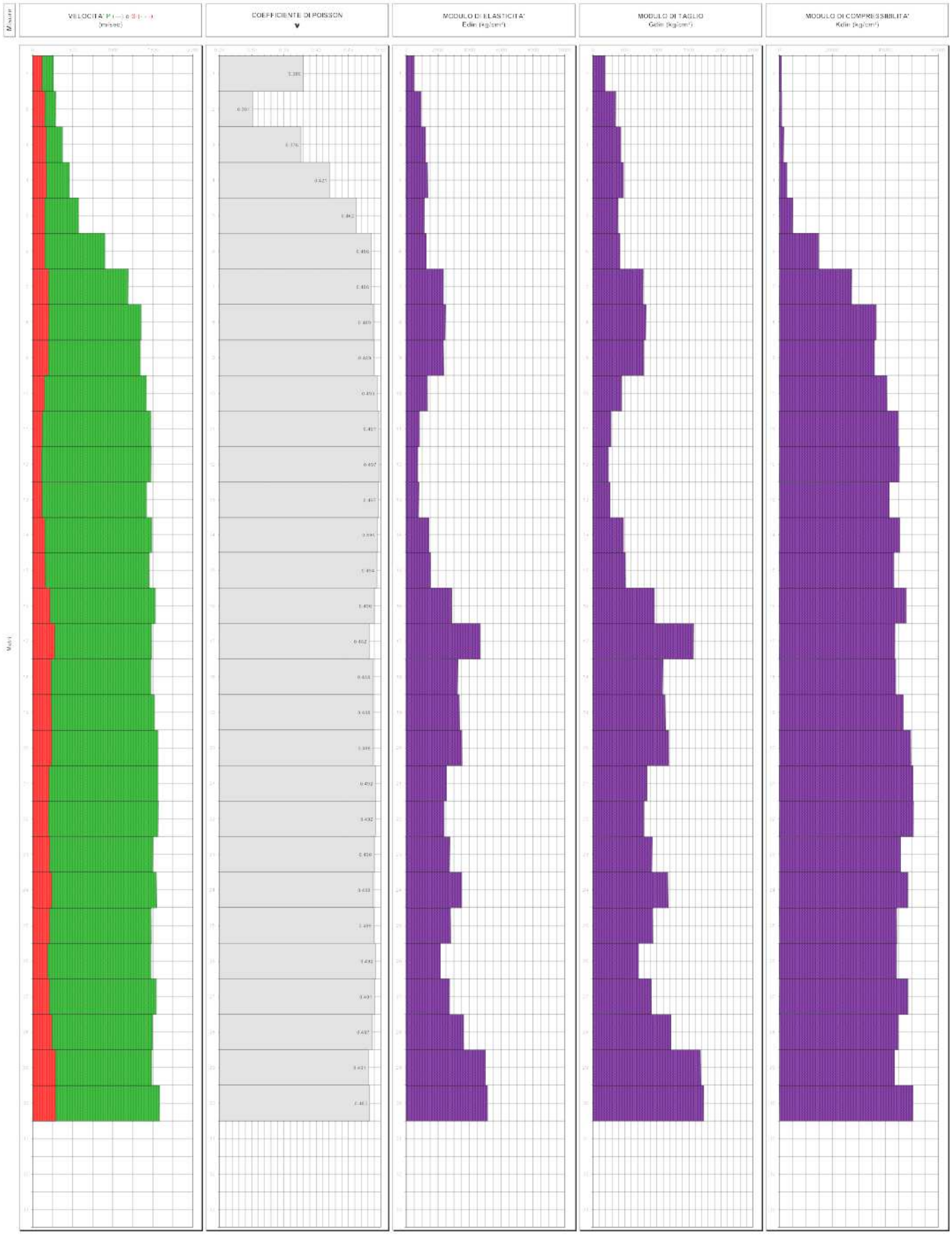


Fig . 7

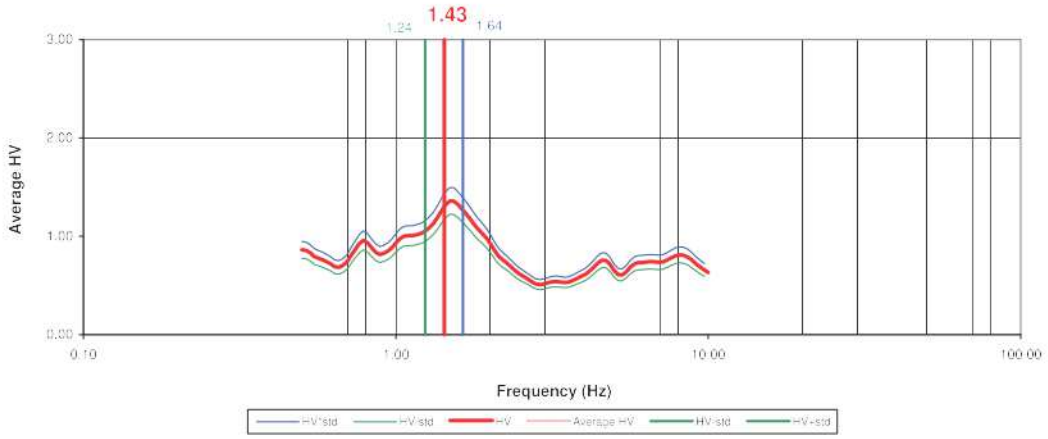
COMMITTENTE	**COOP ADRIATICA**
CODICE LAVORO	1113
N° PROVA	141
LOCALITA'	Milano Marittima (RA)
DATA	21/7/2011

Start recording	7.09.00
End recording	7.29.00
Trace lenght	20 m
Sampling frequency	200 Hz

PROCESSING DATA	
Windows lenght (sec)	20
Overlap	5%
Smoothing windows	Konno & Ohmachi
Costante	40
Taper	0.50%
Low Pass	15 Hz
Numero di finestre	24

Max HVSR 1.43 ± 0.19 Hz.

HVSR SPECTRAL RATIO



Criteria for a reliable HVSR curve [All 3 should be fullfilled]			
f0	1.43		
Lw	20		
nw	71		
f0 > 10 / Lw	1.43 > 10/20	☑	
nc (f0) > 200	2030.6 > 200	☑	
σA(f) < 2 for 0.5 f0 < f < 2 f0 if f0 > 0.5 Hz	Exceeded 0 out of 100 times	☑	
σA(f) < 3 for 0.5 f0 < f < 2 f0 if f0 < 0.5 Hz			

Criteria for a clear HVSR peak [At least 5 out of 6 should be fullfilled]			
Exists f⁻ in [f0/4, f0] | AH/V(f⁻) < A0/2	1.39 Hz	☑	
Exists f⁺ in [4f0, f0] | AH/V(f⁺) < A0/2	1.44 Hz	☑	
A0 > 2	1.35 > 2		☒
fpeak [AH/V(f) ± σA(f)] = f0 ± 5%	0.0561800000000001 <		☒
σf < ε(f0)	0.19999 < 0.143		☒
σA(f0) < θ(f0)	0.346015 < 1.78	☑	

Lw	Window lenght
nW	Number of windows used in the analysis
nc = Lw nW f0	Number of significant cycles
f	Current frequency
f0	H/V peak frequency
σf	Standard deviation of H/V peak frequency
ε(f0)	Threshold value for the stability condition σf < ε(f0)
A0	H/V peak amplitude at frequency f0
AH/V(f)	H/V curve amplitude at frequency f
f⁻	Frequency between f0/4 and f0 for which AH/V(f-) = A0/2
f⁺	Frequency between f0 and 4f0 for which AH/V(f+) = A0/2
σA(f)	Standard deviation of AH/V(f). σA(f) is the factor by which the mean AH/V(f) curve should be multiplied or divided
σlogH/V(f)	Standard deviation of log AH/V(f) curve
θ(f0)	Threshold value for the stability condition σA(f) < θ(f0)

Thresold value for σ_f and $\sigma_A(f_0)$					
Freq. Range [Hz]	< 0.2	0.2 - 0.5	0.5 - 1.0	1.0 - 2.0	> 2.0
$\varepsilon(f_0)$ (Hz)	0.25 f_0	0.20 f_0	0.15 f_0	0.10 f_0	0.05 f_0
$\theta(f_0)$ for $\sigma_A(f_0)$	3.00	2.50	2.00	1.78	1.58
Log $\theta(f_0)$ for $\sigma_{logH/V}(f_0)$	0.48	0.40	0.30	0.25	0.20

In accordo con SESAME Guidelines 2005

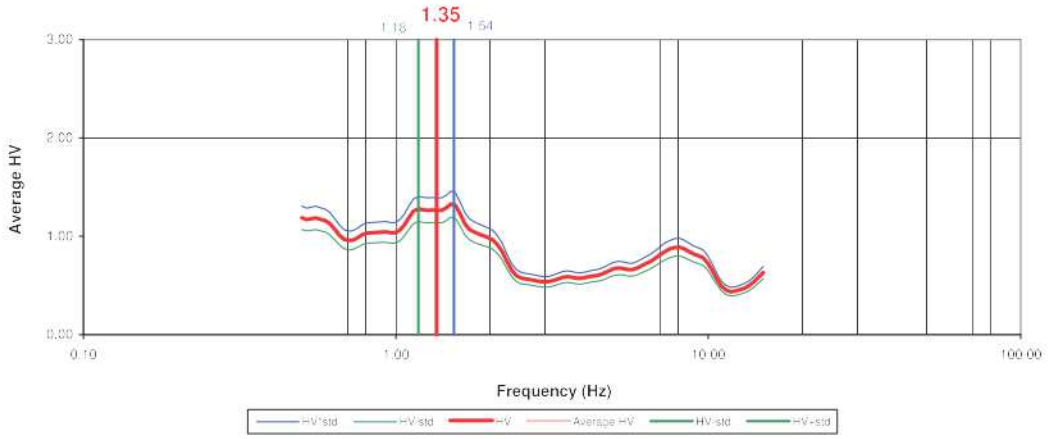
COMMITTENTE	**COOP ADRIATICA**
CODICE LAVORO	1113
N° PROVA	143
LOCALITA'	Milano Marittima (RA)
DATA	21/7/2011

Start recording	7.34.00
End recording	7.54.00
Trace lenght	20 m
Sampling frequency	200 Hz

PROCESSING DATA	
Windows lenght (sec)	20
Overlap	5%
Smoothing windows	Konno & Ohmachi
Costante	40
Taper	0.50%
Low Pass	15 Hz
Numero di finestre	24

Max HVSR 1.35 ± 0.17 Hz.

HVSR SPECTRAL RATIO



Criteria for a reliable HVSR curve [All 3 should be fullfilled]			
f0	1.35		
Lw	20		
nw	71		
f0 > 10 / Lw	1.35 > 10/20	☑	
nc (f0) > 200	1917 > 200	☑	
σA(f) < 2 for 0.5 f0 < f < 2 f0 if f0 > 0.5 Hz	Exceeded 0 out of 100 times	☑	
σA(f) < 3 for 0.5 f0 < f < 2 f0 if f0 < 0.5 Hz			

Criteria for a clear HVSR peak [At least 5 out of 6 should be fullfilled]			
Exists f⁻ in [f0/4, f0] | AH/V(f⁻) < A0/2	0 Hz		☒
Exists f⁺ in [4f0, f0] | AH/V(f⁺) < A0/2	2.34 Hz	☑	
A0 > 2	1.32 > 2		☒
fpeak [AH/V(f) ± σA(f)] = f0 ± 5%	0.15115 < 0.05		☒
σf < ε(f0)	0.17822 < 0.135		☒
σA(f0) < θ(f0)	0.311205 < 1.78	☑	

Lw	Window lenght
nW	Number of windows used in the analysis
nc = Lw nW f0	Number of significant cycles
f	Current frequency
f0	H/V peak frequency
σf	Standard deviation of H/V peak frequency
ε(f0)	Threshold value for the stability condition σf < ε(f0)
A0	H/V peak amplitude at frequency f0
AH/V(f)	H/V curve amplitude at frequency f
f⁻	Frequency between f0/4 and f0 for which AH/V(f-) = A0/2
f⁺	Frequency between f0 and 4f0 for which AH/V(f+) = A0/2
σA(f)	Standard deviation of AH/V(f). σA(f) is the factor by which the mean AH/V(f) curve should be multiplied or divided
σlogH/V(f)	Standard deviation of log AH/V(f) curve
θ(f0)	Threshold value for the stability condition σA(f) < θ(f0)

Thresold value for σ_f and $\sigma_A(f_0)$					
Freq. Range [Hz]	< 0.2	0.2 - 0.5	0.5 - 1.0	1.0 - 2.0	> 2.0
$\varepsilon(f_0)$ (Hz)	0.25 f_0	0.20 f_0	0.15 f_0	0.10 f_0	0.05 f_0
$\theta(f_0)$ for $\sigma_A(f_0)$	3.00	2.50	2.00	1.78	1.58
Log $\theta(f_0)$ for $\sigma_{logH/V}(f_0)$	0.48	0.40	0.30	0.25	0.20

In accordo con SESAME Guidelines 2005

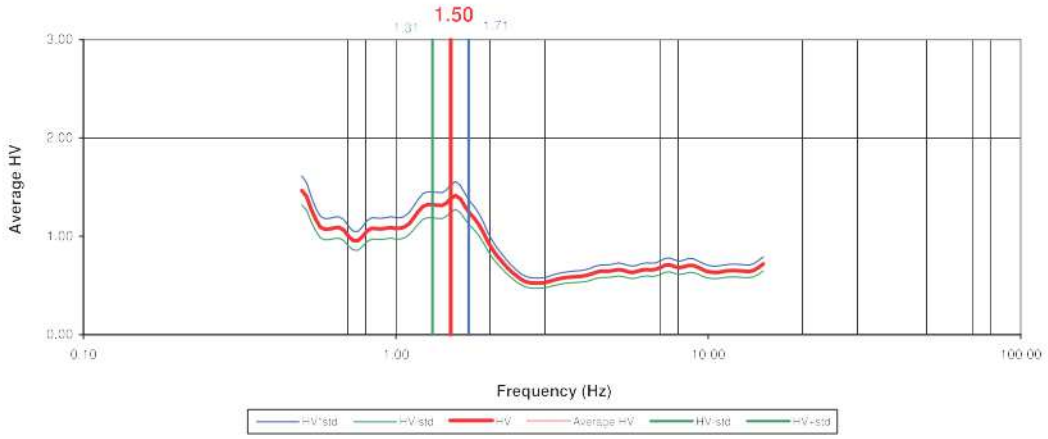
COMMITTENTE	**COOP ADRIATICA**
CODICE LAVORO	1113
N° PROVA	144
LOCALITA'	Milano Marittima (RA)
DATA	21/7/2011

Start recording	8.11.00
End recording	8.31.00
Trace lenght	20 m
Sampling frequency	200 Hz

PROCESSING DATA	
Windows lenght (sec)	20
Overlap	5%
Smoothing windows	Konno & Ohmachi
Costante	40
Taper	0.50%
Low Pass	15 Hz
Numero di finestre	23

Max HVSR 1.5 ± 0.2 Hz.

HVSR SPECTRAL RATIO



Criteria for a reliable HVSR curve [All 3 should be fullfilled]			
f0	1.50		
Lw	20		
nw	71		
f0 > 10 / Lw	1.5 > 10/20	☑	
nc (f0) > 200	2130 > 200	☑	
σA(f) < 2 for 0.5 f0 < f < 2 f0 if f0 > 0.5 Hz	Exceeded 0 out of 100 times	☑	
σA(f) < 3 for 0.5 f0 < f < 2 f0 if f0 < 0.5 Hz			

Criteria for a clear HVSR peak [At least 5 out of 6 should be fullfilled]			
Exists f⁻ in [f0/4, f0] | AH/V(f⁻) < A0/2	0 Hz		☒
Exists f⁺ in [4f0, f0] | AH/V(f⁺) < A0/2	2.26 Hz	☑	
A0 > 2	1.41 > 2		☒
fpeak [AH/V(f) ± σA(f)] = f0 ± 5%	0.05362 < 0.05		☒
σf < ε(f0)	0.2007 < 0.15		☒
σA(f0) < θ(f0)	0.309245 < 1.78	☑	

Lw	Window lenght
nW	Number of windows used in the analysis
nc = Lw nW f0	Number of significant cycles
f	Current frequency
f0	H/V peak frequency
σf	Standard deviation of H/V peak frequency
ε(f0)	Threshold value for the stability condition σf < ε(f0)
A0	H/V peak amplitude at frequency f0
AH/V(f)	H/V curve amplitude at frequency f
f⁻	Frequency between f0/4 and f0 for which AH/V(f-) = A0/2
f⁺	Frequency between f0 and 4f0 for which AH/V(f+) = A0/2
σA(f)	Standard deviation of AH/V(f). σA(f) is the factor by which the mean AH/V(f) curve should be multiplied or divided
σlogH/V(f)	Standard deviation of log AH/V(f) curve
θ(f0)	Threshold value for the stability condition σA(f) < θ(f0)

Thresold value for σ_f and $\sigma_A(f_0)$					
Freq. Range [Hz]	< 0.2	0.2 - 0.5	0.5 - 1.0	1.0 - 2.0	> 2.0
$\varepsilon(f_0)$ (Hz)	0.25 f_0	0.20 f_0	0.15 f_0	0.10 f_0	0.05 f_0
$\theta(f_0)$ for $\sigma_A(f_0)$	3.00	2.50	2.00	1.78	1.58
Log $\theta(f_0)$ for $\sigma_{logH/V}(f_0)$	0.48	0.40	0.30	0.25	0.20

In accordo con SESAME Guidelines 2005

Fig. 10

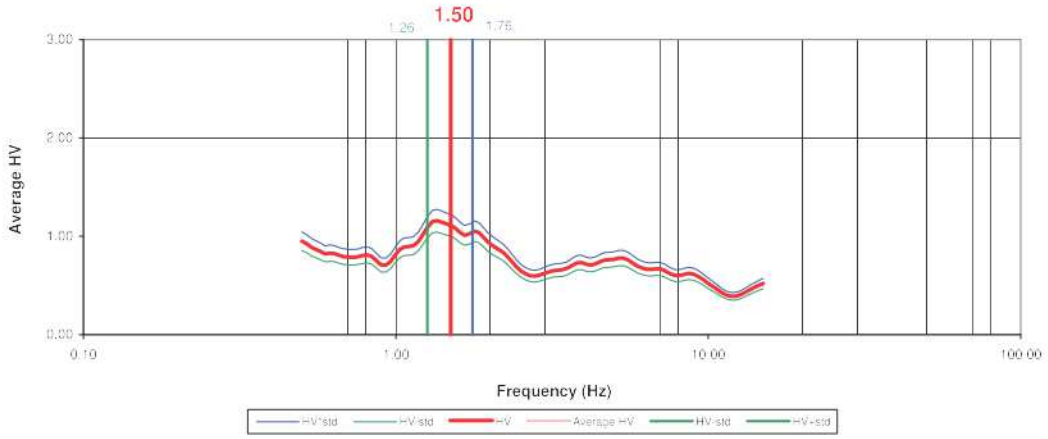
COMMITTENTE	**COOP ADRIATICA**
CODICE LAVORO	1113
N° PROVA	145
LOCALITA'	Milano Marittima (RA)
DATA	21/7/2011

Start recording	8.42.00
End recording	9.02.00
Trace lenght	20 m
Sampling frequency	200 Hz

PROCESSING DATA	
Windows lenght (sec)	20
Overlap	5%
Smoothing windows	Konno & Ohmachi
Costante	40
Taper	0.50%
Low Pass	15 Hz
Numero di finestre	26

Max HVSR 1.5 ± 0.24 Hz.

HVSR SPECTRAL RATIO



Criteria for a reliable HVSR curve [All 3 should be fullfilled]			
f0	1.50		
Lw	20		
nw	71		
f0 > 10 / Lw	1.5 > 10/20	☑	
nc (f0) > 200	2130 > 200	☑	
σA(f) < 2 for 0.5 f0 < f < 2 f0 if f0 > 0.5 Hz	Exceeded 0 out of 100 times	☑	
σA(f) < 3 for 0.5 f0 < f < 2 f0 if f0 < 0.5 Hz			

Criteria for a clear HVSR peak [At least 5 out of 6 should be fullfilled]			
Exists f⁻ in [f0/4, f0] | AH/V(f⁻) < A0/2	0 Hz		☒
Exists f⁺ in [4f0, f0] | AH/V(f⁺) < A0/2	0 Hz		☒
A0 > 2	1.11 > 2		☒
fpeak [AH/V(f) ± σA(f)] = f0 ± 5%	0.00114999999999998 <	☑	
σf < ε(f0)	0.24855 < 0.15		☒
σA(f0) < θ(f0)	0.2291735 < 1.78	☑	

Lw	Window lenght
nW	Number of windows used in the analysis
nc = Lw nW f0	Number of significant cycles
f	Current frequency
f0	H/V peak frequency
σf	Standard deviation of H/V peak frequency
ε(f0)	Threshold value for the stability condition σf < ε(f0)
A0	H/V peak amplitude at frequency f0
AH/V(f)	H/V curve amplitude at frequency f
f⁻	Frequency between f0/4 and f0 for which AH/V(f-) < A0/2
f⁺	Frequency between f0 and 4f0 for which AH/V(f+) < A0/2
σA(f)	Standard deviation of AH/V(f). σA(f) is the factor by which the mean AH/V(f) curve should be multiplier or divided
σlogH/V(f)	Standard deviation of log AH/V(f) curve
θ(f0)	Threshold value for the stability condition σA(f) < θ(f0)

Thresold value for σ_f and $\sigma_A(f_0)$					
Freq. Range [Hz]	< 0.2	0.2 - 0.5	0.5 - 1.0	1.0 - 2.0	> 2.0
$\varepsilon(f_0)$ (Hz)	0.25 f_0	0.20 f_0	0.15 f_0	0.10 f_0	0.05 f_0
$\theta(f_0)$ for $\sigma_A(f_0)$	3.00	2.50	2.00	1.78	1.58
Log $\theta(f_0)$ for $\sigma_{logH/V}(f_0)$	0.48	0.40	0.30	0.25	0.20

In accordo con SESAME Guidelines 2005

Fig. 11

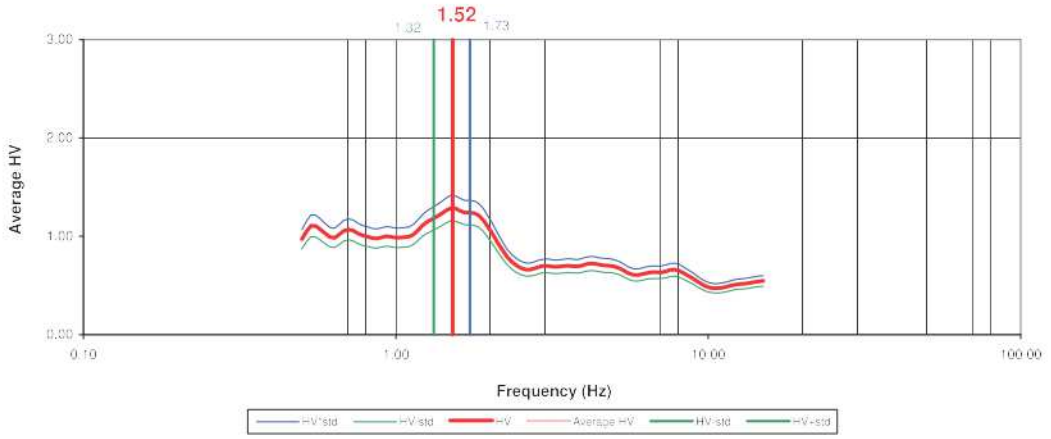
COMMITTENTE	**COOP ADRIATICA**
CODICE LAVORO	1113
N° PROVA	146
LOCALITA'	Milano Marittima (RA)
DATA	21/7/2011

Start recording	9.11.00
End recording	9.31.00
Trace lenght	20 m
Sampling frequency	200 Hz

PROCESSING DATA	
Windows lenght (sec)	20
Overlap	5%
Smoothing windows	Konno & Ohmachi
Costante	40
Taper	0.50%
Low Pass	15 Hz
Numero di finestre	24

Max HVSR 1.52 ± 0.2 Hz.

HVSR SPECTRAL RATIO



Criteria for a reliable HVSR curve [All 3 should be fullfilled]			
f0	1.52		
Lw	20		
nw	71		
f0 > 10 / Lw	1.52 > 10/20	☑	
nc (f0) > 200	2158.4 > 200	☑	
σA(f) < 2 for 0.5 f0 < f < 2 f0 if f0 > 0.5 Hz	Exceeded 0 out of 100 times	☑	
σA(f) < 3 for 0.5 f0 < f < 2 f0 if f0 < 0.5 Hz			

Criteria for a clear HVSR peak [At least 5 out of 6 should be fullfilled]			
Exists f⁻ in [f0/4, f0] | AH/V(f⁻) < A0/2	0 Hz		☒
Exists f⁺ in [4f0, f0] | AH/V(f⁺) < A0/2	5.53 Hz	☑	
A0 > 2	1.28 > 2		☒
fpeak [AH/V(f) ± σA(f)] = f0 ± 5%	-0.01885 < 0.05	☑	
σf < ε(f0)	0.20153 < 0.152		☒
σA(f0) < θ(f0)	0.24892 < 1.78	☑	

Lw	Window lenght
nW	Number of windows used in the analysis
nc = Lw nW f0	Number of significant cycles
f	Current frequency
f0	H/V peak frequency
σf	Standard deviation of H/V peak frequency
ε(f0)	Threshold value for the stability condition σf < ε(f0)
A0	H/V peak amplitude at frequency f0
AH/V(f)	H/V curve amplitude at frequency f
f⁻	Frequency between f0/4 and f0 for which AH/V(f-) < A0/2
f⁺	Frequency between f0 and 4f0 for which AH/V(f+) < A0/2
σA(f)	Standard deviation of AH/V(f); σA(f) is the factor by which the mean AH/V(f) curve should be multiplier or divided
σlogH/V(f)	Standard deviation of log AH/V(f) curve
θ(f0)	Threshold value for the stability condition σA(f) < θ(f0)

Thresold value for σ_f and $\sigma_A(f_0)$					
Freq. Range [Hz]	< 0.2	0.2 - 0.5	0.5 - 1.0	1.0 - 2.0	> 2.0
$\varepsilon(f_0)$ (Hz)	0.25 f_0	0.20 f_0	0.15 f_0	0.10 f_0	0.05 f_0
$\theta(f_0)$ for $\sigma_A(f_0)$	3.00	2.50	2.00	1.78	1.58
Log $\theta(f_0)$ for $\sigma_{logH/V}(f_0)$	0.48	0.40	0.30	0.25	0.20

In accordo con SESAME Guidelines 2005

Fig. 12

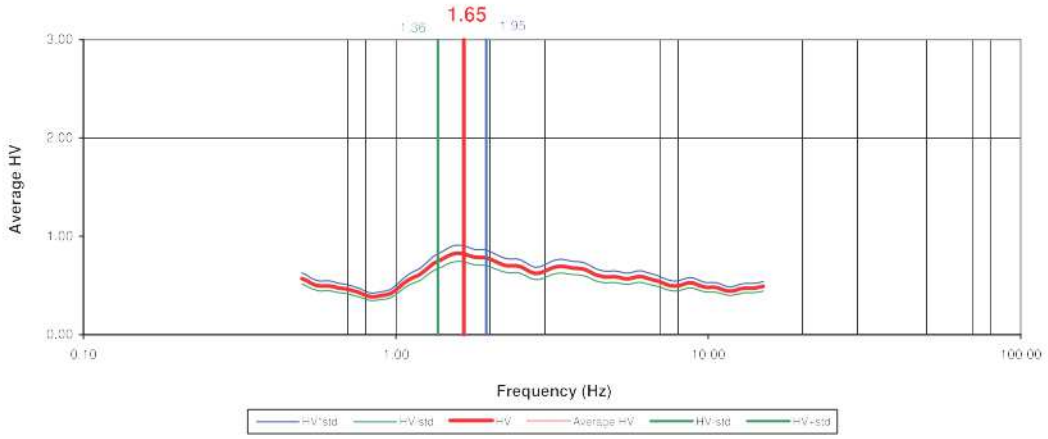
COMMITTENTE	**COOP ADRIATICA**
CODICE LAVORO	1113
N° PROVA	214
LOCALITA'	Milano Marittima (RA)
DATA	05/08/2011

Start recording	8.25.00
End recording	8.45.00
Trace lenght	20 m
Sampling frequency	200 Hz

PROCESSING DATA	
Windows lenght (sec)	20
Overlap	5%
Smoothing windows	Konno & Ohmachi
Costante	40
Taper	0.50%
Low Pass	15 Hz
Numero di finestre	22

Max HVSR 1.65 ± 0.29 Hz.

HVSR SPECTRAL RATIO



Criteria for a reliable HVSR curve [All 3 should be fullfilled]			
f0	1.65		
Lw	20		
nw	71		
f0 > 10 / Lw	1.65 > 10/20	☑	
nc (f0) > 200	2343 > 200	☑	
σA(f) < 2 for 0.5 f0 < f < 2 f0 if f0 > 0.5 Hz	Exceeded 0 out of 100 times	☑	
σA(f) < 3 for 0.5 f0 < f < 2 f0 if f0 < 0.5 Hz			

Criteria for a clear HVSR peak [At least 5 out of 6 should be fullfilled]			
Exists f⁻ in [f0/4, f0] | AH/V(f⁻) < A0/2	0.92 Hz	☑	
Exists f⁺ in [4f0, f0] | AH/V(f⁺) < A0/2	0 Hz		☒
A0 > 2	0.82 > 2		☒
fpeak [AH/V(f) ± σA(f)] = f0 ± 5%	-0.0420799999999999 <	☑	
σf < ε(f0)	0.29101 < 0.165		☒
σA(f0) < θ(f0)	0.2552555 < 1.78	☑	

Lw	Window lenght
nW	Number of windows used in the analysis
nc = Lw nW f0	Number of significant cycles
f	Current frequency
f0	H/V peak frequency
σf	Standard deviation of H/V peak frequency
ε(f0)	Threshold value for the stability condition σf < ε(f0)
A0	H/V peak amplitude at frequency f0
AH/V(f)	H/V curve amplitude at frequency f
f⁻	Frequency between f0/4 and f0 for which AH/V(f-) = A0/2
f⁺	Frequency between f0 and 4f0 for which AH/V(f+) = A0/2
σA(f)	Standard deviation of AH/V(f); σA(f) is the factor by which the mean AH/V(f) curve should be multiplied or divided
σlogH/V(f)	Standard deviation of log AH/V(f) curve
θ(f0)	Threshold value for the stability condition σA(f) < θ(f0)

Thresold value for σ_f and $\sigma_A(f_0)$					
Freq. Range [Hz]	< 0.2	0.2 - 0.5	0.5 - 1.0	1.0 - 2.0	> 2.0
$\varepsilon(f_0)$ (Hz)	0.25 f_0	0.20 f_0	0.15 f_0	0.10 f_0	0.05 f_0
$\theta(f_0)$ for $\sigma_A(f_0)$	3.00	2.50	2.00	1.78	1.58
Log $\theta(f_0)$ for $\sigma_{logH/V}(f_0)$	0.48	0.40	0.30	0.25	0.20

In accordo con SESAME Guidelines 2005

Fig. 13

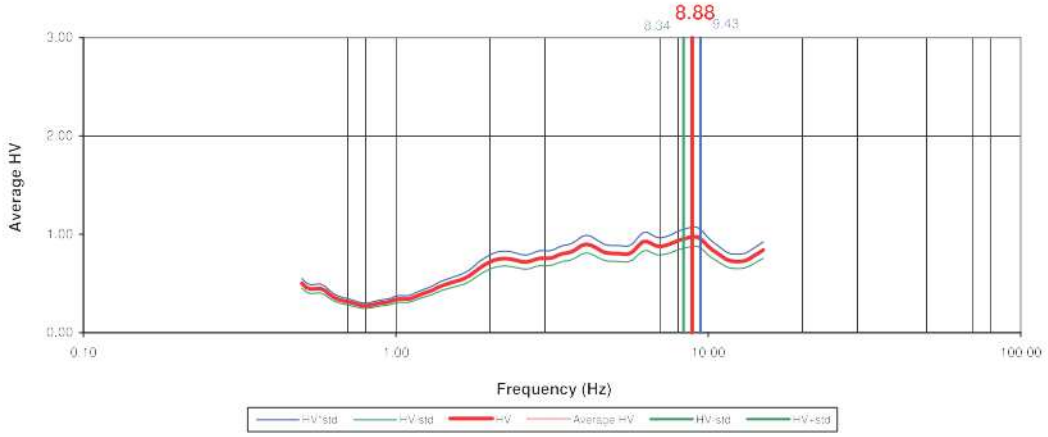
COMMITTENTE	**COOP ADRIATICA**
CODICE LAVORO	1113
N° PROVA	215
LOCALITA'	Milano Marittima (RA)
DATA	05/08/2011

Start recording	8.52.00
End recording	9.12.00
Trace lenght	20 m
Sampling frequency	200 Hz

PROCESSING DATA	
Windows lenght (sec)	20
Overlap	5%
Smoothing windows	Konno & Ohmachi
Costante	40
Taper	0.50%
Low Pass	15 Hz
Numero di finestre	24

Max HVSR 8.88 ± 0.54 Hz.

HVSR SPECTRAL RATIO



Criteria for a reliable HVSR curve [All 3 should be fullfilled]			
f0	8.88		
Lw	20		
nw	71		
f0 > 10 / Lw	8.88 > 10/20	☑	
nc (f0) > 200	12609.6 > 200	☑	
σA(f) < 2 for 0.5 f0 < f < 2 f0 if f0 > 0.5 Hz	Exceeded 0 out of 100 times	☑	
σA(f) < 3 for 0.5 f0 < f < 2 f0 if f0 < 0.5 Hz			

Criteria for a clear HVSR peak [At least 5 out of 6 should be fullfilled]			
Exists f⁻ in [f0/4, f0] | AH/V(f⁻) < A0/2	0 Hz		☒
Exists f⁺ in [4f0, f0] | AH/V(f⁺) < A0/2	0 Hz		☒
A0 > 2	0.97 > 2		☒
fpeak [AH/V(f) ± σA(f)] = f0 ± 5%	0.0795300000000001 <		☒
σf < ε(f0)	0.54547 < 0.444		☒
σA(f0) < θ(f0)	0.1247915 < 1.58	☑	

Lw	Window lenght
nW	Number of windows used in the analysis
nc = Lw nW f0	Number of significant cycles
f	Current frequency
f0	H/V peak frequency
σf	Standard deviation of H/V peak frequency
ε(f0)	Threshold value for the stability condition σf < ε(f0)
A0	H/V peak amplitude at frequency f0
AH/V(f)	H/V curve amplitude at frequency f
f⁻	Frequency between f0/4 and f0 for which AH/V(f-) < A0/2
f⁺	Frequency between f0 and 4f0 for which AH/V(f+) < A0/2
σA(f)	Standard deviation of AH/V(f). σA(f) is the factor by which the mean AH/V(f) curve should be multiplier or divided
σlogH/V(f)	Standard deviation of log AH/V(f) curve
θ(f0)	Threshold value for the stability condition σA(f) < θ(f0)

Thresold value for σ_f and $\sigma_A(f_0)$					
Freq. Range [Hz]	< 0.2	0.2 - 0.5	0.5 - 1.0	1.0 - 2.0	> 2.0
$\varepsilon(f_0)$ (Hz)	0.25 f_0	0.20 f_0	0.15 f_0	0.10 f_0	0.05 f_0
$\theta(f_0)$ for $\sigma_A(f_0)$	3.00	2.50	2.00	1.78	1.58
Log $\theta(f_0)$ for $\sigma_{logH/V}(f_0)$	0.48	0.40	0.30	0.25	0.20

In accordo con SESAME Guidelines 2005

Fig. 14

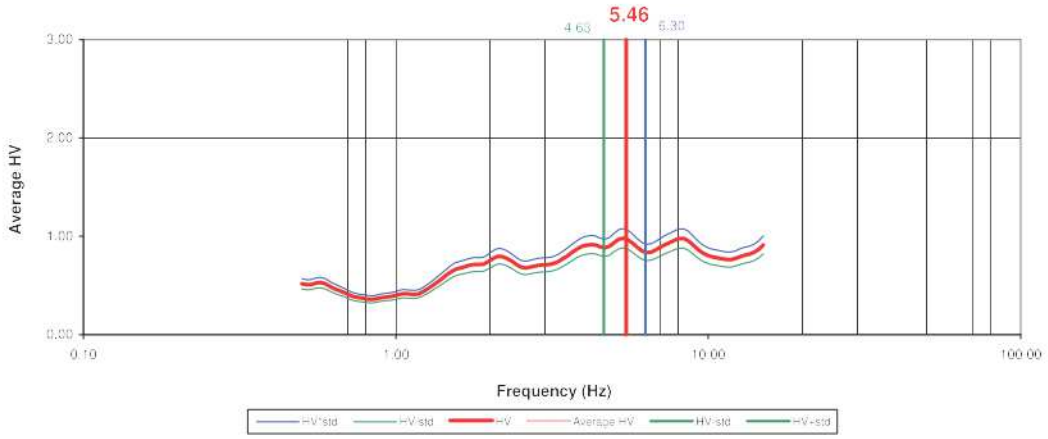
COMMITTENTE	**COOP ADRIATICA**
CODICE LAVORO	1113
N° PROVA	216
LOCALITA'	Milano Marittima (RA)
DATA	05/08/2011

Start recording	9.30.00
End recording	9.50.00
Trace lenght	20 m
Sampling frequency	200 Hz

PROCESSING DATA	
Windows lenght (sec)	20
Overlap	5%
Smoothing windows	Konno & Ohmachi
Costante	40
Taper	0.50%
Low Pass	15 Hz
Numero di finestre	25

Max HVSR 5.46 ± 0.83 Hz.

HVSR SPECTRAL RATIO



Criteria for a reliable HVSR curve [All 3 should be fullfilled]			
f0	5.46		
Lw	20		
nw	71		
f0 > 10 / Lw	5.46 > 10/20	☑	
nc (f0) > 200	7753.2 > 200	☑	
σA(f) < 2 for 0.5 f0 < f < 2 f0 if f0 > 0.5 Hz	Exceeded 0 out of 100 times	☑	
σA(f) < 3 for 0.5 f0 < f < 2 f0 if f0 < 0.5 Hz			

Criteria for a clear HVSR peak [At least 5 out of 6 should be fullfilled]			
Exists f⁻ in [f0/4, f0] | AH/V(f⁻) < A0/2	0 Hz		☒
Exists f⁺ in [4f0, f0] | AH/V(f⁺) < A0/2	0 Hz		☒
A0 > 2	0.97 > 2		☒
fpeak [AH/V(f) ± σA(f)] = f0 ± 5%	-0.10846 < 0.05	☑	
σf < ε(f0)	0.835430000000001 < 0		☒
σA(f0) < Θ(f0)	0.109348 < 1.58	☑	

Lw	Window lenght
nW	Number of windows used in the analysis
nc = Lw nW f0	Number of significant cycles
f	Current frequency
f0	H/V peak frequency
σf	Standard deviation of H/V peak frequency
ε(f0)	Threshold value for the stability condition σf < ε(f0)
A0	H/V peak amplitude at frequency f0
AH/V(f)	H/V curve amplitude at frequency f
f⁻	Frequency between f0/4 and f0 for which AH/V(f-) < A0/2
f⁺	Frequency between f0 and 4f0 for which AH/V(f+) < A0/2
σA(f)	Standard deviation of AH/V(f). σA(f) is the factor by which the mean AH/V(f) curve should be multiplier or divided
σlogH/V(f)	Standard deviation of log AH/V(f) curve
Θ(f0)	Threshold value for the stability condition σA(f) < Θ(f0)

Thresold value for σ_f and $\sigma_A(f_0)$					
Freq. Range [Hz]	< 0.2	0.2 - 0.5	0.5 - 1.0	1.0 - 2.0	> 2.0
$\varepsilon(f_0)$ (Hz)	0.25 f_0	0.20 f_0	0.15 f_0	0.10 f_0	0.05 f_0
$\Theta(f_0)$ for $\sigma_A(f_0)$	3.00	2.50	2.00	1.78	1.58
Log $\Theta(f_0)$ for $\sigma_{logH/V}(f_0)$	0.48	0.40	0.30	0.25	0.20

In accordo con SESAME Guidelines 2005

Fig. 15

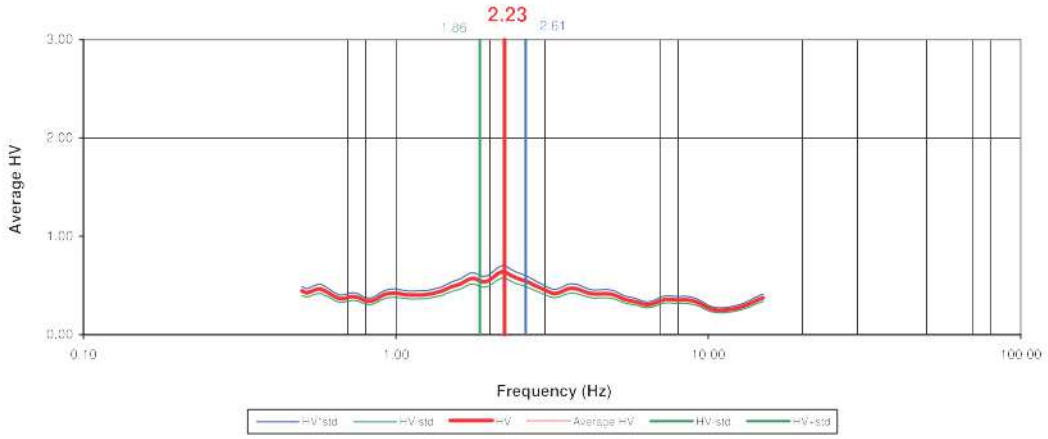
COMMITTENTE	**COOP ADRIATICA**
CODICE LAVORO	1113
N° PROVA	218
LOCALITA'	Milano Marittima (RA)
DATA	05/08/2011

Start recording	9.57.00
End recording	10.17.00
Trace lenght	20 m
Sampling frequency	200 Hz

PROCESSING DATA	
Windows lenght (sec)	20
Overlap	5%
Smoothing windows	Konno & Ohmachi
Costante	40
Taper	0.50%
Low Pass	15 Hz
Numero di finestre	12

Max HVSR 2.23 ± 0.37 Hz.

HVSR SPECTRAL RATIO



Criteria for a reliable HVSR curve [All 3 should be fullfilled]			
f0	2.23		
Lw	20		
nw	71		
f0 > 10 / Lw	2.23 > 10/20	☑	
nc (f0) > 200	3166.6 > 200	☑	
σA(f) < 2 for 0.5 f0 < f < 2 f0 if f0 > 0.5 Hz	Exceeded 0 out of 100 times	☑	
σA(f) < 3 for 0.5 f0 < f < 2 f0 if f0 < 0.5 Hz			

Criteria for a clear HVSR peak [At least 5 out of 6 should be fullfilled]			
Exists f⁻ in [f0/4, f0] | AH/V(f⁻) < A0/2	0 Hz		☒
Exists f⁺ in [4f0, f0] | AH/V(f⁺) < A0/2	6.13 Hz	☑	
A0 > 2	0.64 > 2		☒
fpeak [AH/V(f) ± σA(f)] = f0 ± 5%	-0.0394800000000002 <	☑	
σf < ε(f0)	0.37425 < 0.1115		☒
σA(f0) < θ(f0)	0.155234 < 1.58	☑	

Lw	Window lenght
nW	Number of windows used in the analysis
nc = Lw nW f0	Number of significant cycles
f	Current frequency
f0	H/V peak frequency
σf	Standard deviation of H/V peak frequency
ε(f0)	Threshold value for the stability condition σf < ε(f0)
A0	H/V peak amplitude at frequency f0
AH/V(f)	H/V curve amplitude at frequency f
f⁻	Frequency between f0/4 and f0 for which AH/V(f-) = A0/2
f⁺	Frequency between f0 and 4f0 for which AH/V(f+) = A0/2
σA(f)	Standard deviation of AH/V(f), σA(f) is the factor by which the mean AH/V(f) curve should be multiplied or divided
σlogH/V(f)	Standard deviation of log AH/V(f) curve
θ(f0)	Threshold value for the stability condition σA(f) < θ(f0)

Thresold value for σ_f and $\sigma_A(f_0)$					
Freq. Range [Hz]	< 0.2	0.2 - 0.5	0.5 - 1.0	1.0 - 2.0	> 2.0
$\varepsilon(f_0)$ (Hz)	0.25 f_0	0.20 f_0	0.15 f_0	0.10 f_0	0.05 f_0
$\theta(f_0)$ for $\sigma_A(f_0)$	3.00	2.50	2.00	1.78	1.58
Log $\theta(f_0)$ for $\sigma_{logH/V}(f_0)$	0.48	0.40	0.30	0.25	0.20

In accordo con SESAME Guidelines 2005

Fig. 16

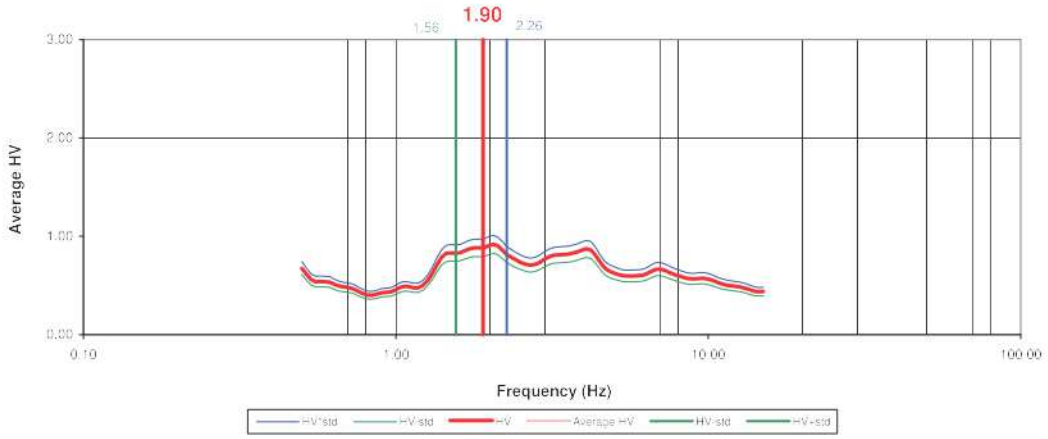
COMMITTENTE	**COOP ADRIATICA**
CODICE LAVORO	1113
N° PROVA	219
LOCALITA'	Milano Marittima (RA)
DATA	05/08/2011

Start recording	11.02.00
End recording	11.22.00
Trace lenght	20 m
Sampling frequency	200 Hz

PROCESSING DATA	
Windows lenght (sec)	20
Overlap	5%
Smoothing windows	Konno & Ohmachi
Costante	40
Taper	0.50%
Low Pass	15 Hz
Numero di finestre	22

Max HVSR 1.9 ± 0.35 Hz.

HVSR SPECTRAL RATIO



Criteria for a reliable HVSR curve [All 3 should be fullfilled]			
f0	1.90		
Lw	20		
nw	71		
f0 > 10 / Lw	1.9 > 10/20	☑	
nc (f0) > 200	2698 > 200	☑	
σA(f) < 2 for 0.5 f0 < f < 2 f0 if f0 > 0.5 Hz	Exceeded 0 out of 100 times	☑	
σA(f) < 3 for 0.5 f0 < f < 2 f0 if f0 < 0.5 Hz			

Criteria for a clear HVSR peak [At least 5 out of 6 should be fullfilled]			
Exists f⁻ in [f0/4, f0] | AH/V(f⁻) < A0/2	0.99 Hz	☑	
Exists f⁺ in [4f0, f0] | AH/V(f⁺) < A0/2	0 Hz		☒
A0 > 2	0.91 > 2		☒
fpeak [AH/V(f) ± σA(f)] = f0 ± 5%	0.14506 < 0.05		☒
σf < ε(f0)	0.3524 < 0.19		☒
σA(f0) < θ(f0)	0.1755635 < 1.78	☑	

Lw	Window lenght
nW	Number of windows used in the analysis
nc = Lw nW f0	Number of significant cycles
f	Current frequency
f0	H/V peak frequency
σf	Standard deviation of H/V peak frequency
ε(f0)	Threshold value for the stability condition σf < ε(f0)
A0	H/V peak amplitude at frequency f0
AH/V(f)	H/V curve amplitude at frequency f
f⁻	Frequency between f0/4 and f0 for which AH/V(f-) = A0/2
f⁺	Frequency between f0 and 4f0 for which AH/V(f+) = A0/2
σA(f)	Standard deviation of AH/V(f). σA(f) is the factor by which the mean AH/V(f) curve should be multiplier or divided
σlogH/V(f)	Standard deviation of log AH/V(f) curve
θ(f0)	Threshold value for the stability condition σA(f) < θ(f0)

Thresold value for σ_f and $\sigma_A(f_0)$					
Freq. Range [Hz]	< 0.2	0.2 - 0.5	0.5 - 1.0	1.0 - 2.0	> 2.0
$\varepsilon(f_0)$ (Hz)	0.25 f_0	0.20 f_0	0.15 f_0	0.10 f_0	0.05 f_0
$\theta(f_0)$ for $\sigma_A(f_0)$	3.00	2.50	2.00	1.78	1.58
Log $\theta(f_0)$ for $\sigma_{logH/V}(f_0)$	0.48	0.40	0.30	0.25	0.20

In accordo con SESAME Guidelines 2005

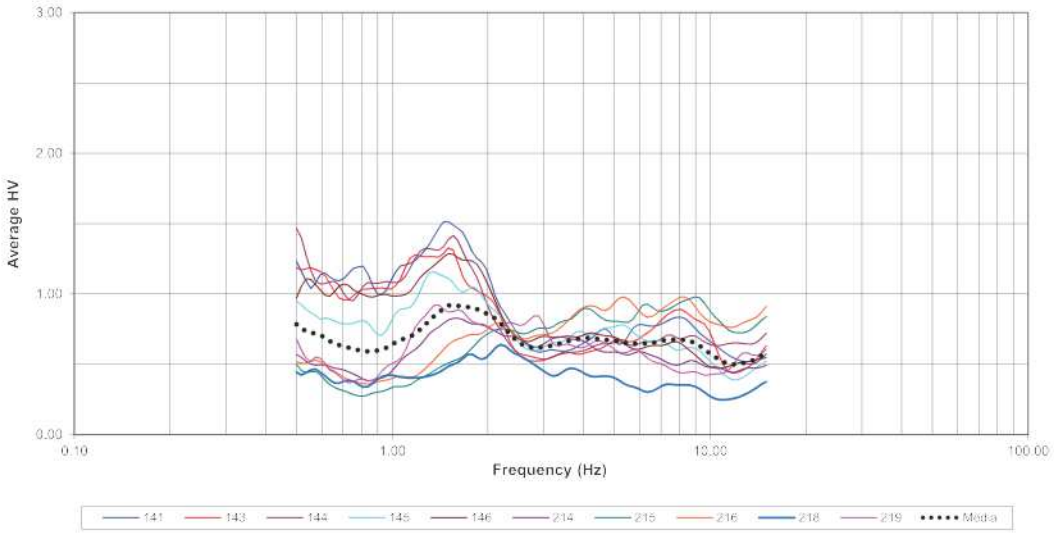
Fig. 17

COMMITTENTE	**COOP ADRIATICA**
CODICE LAVORO	1113
N° PROVE	141-143-144-145-146-214-215-216-218-219
LOCALITA'	MILANO MARITTIMA (RA)
DATA	Luglio - Agosto 2011

Start recording	---
End recording	---
Trace lenght	30 m
Sampling frequency	200 Hz

PROCESSING DATA	
Windows lenght (sec)	20
Overlap	5%
Smoothing windows	Konno & Ohmachi
Costante	40
Taper	0.50%
Low Pass	15 Hz
Numero di finestre	

HVSR SPECTRAL RATIO



Riepilogo HVSR
141 Max HVSR 1.49 +/- 0.26 Hz
143 Max HVSR 1.35 +/- 0.17 Hz
144 Max HVSR 1.5 +/- 0.2 Hz
145 Max HVSR 1.5 +/- 0.24 Hz
146 Max HVSR 1.52 +/- 0.2 Hz
214 Max HVSR 1.65 +/- 0.29 Hz
215 Max HVSR 8.88 +/- 0.54 Hz
216 Max HVSR 5.46 +/- 0.83 Hz
218 Max HVSR 2.23 +/- 0.37 Hz
219 Max HVSR 1.9 +/- 0.35 Hz
Media Max HVSR 1.55 +/- 0.1 Hz

GeoLogismiki
Geotechnical Engineers
P.O. Box 33539
621 25 - Serrai - GREECE

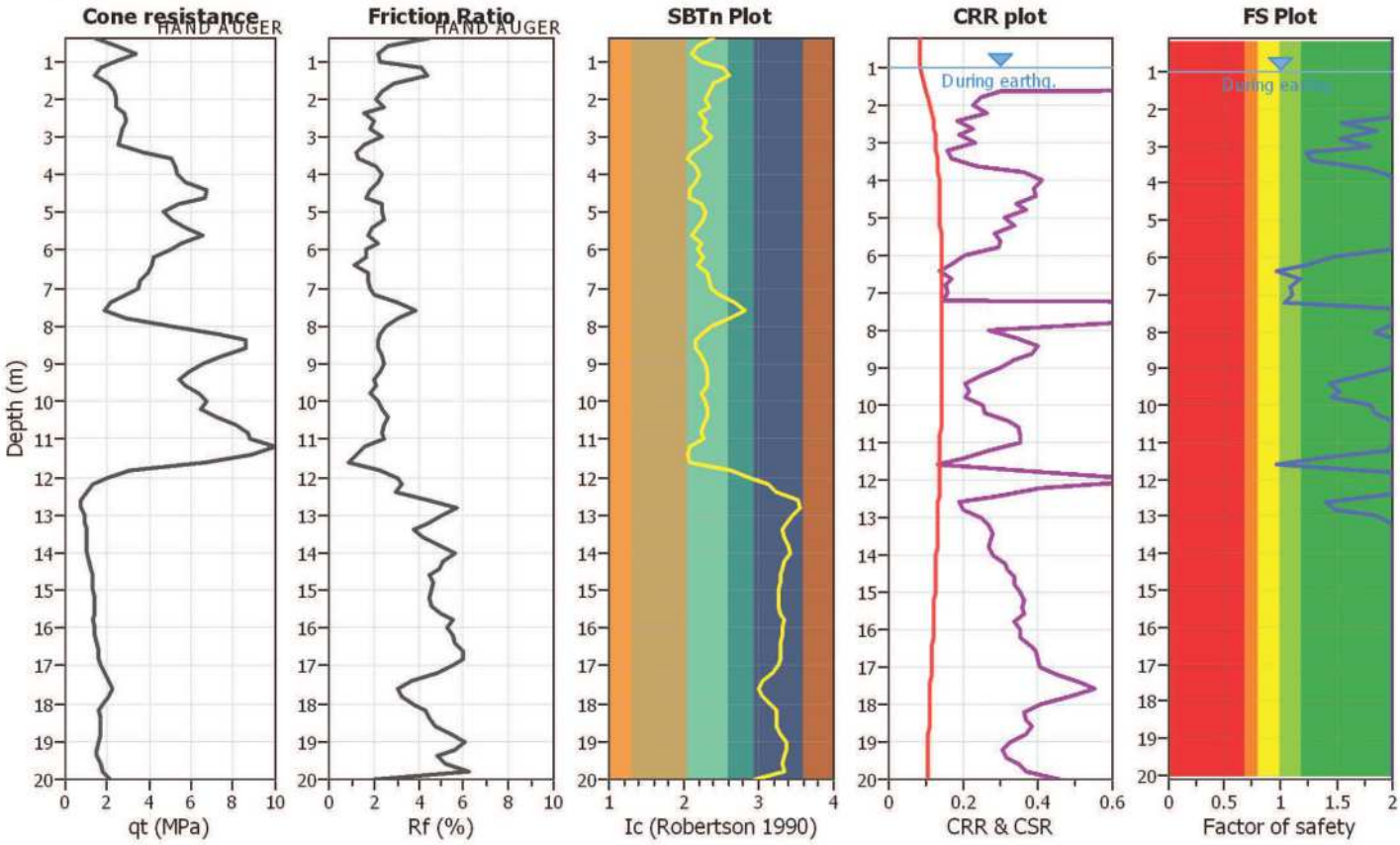
LIQUEFACTION ANALYSIS REPORT

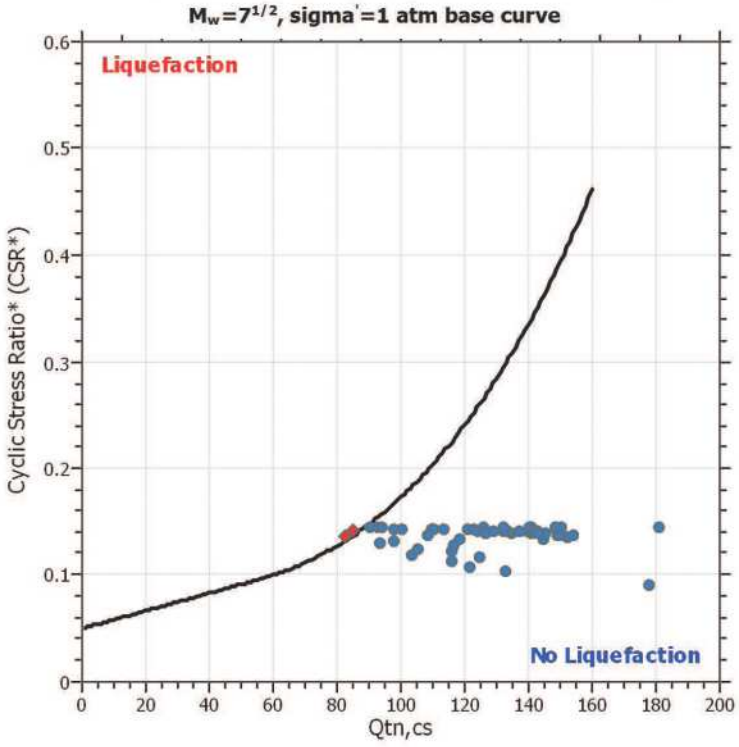
Project title : **Location :**

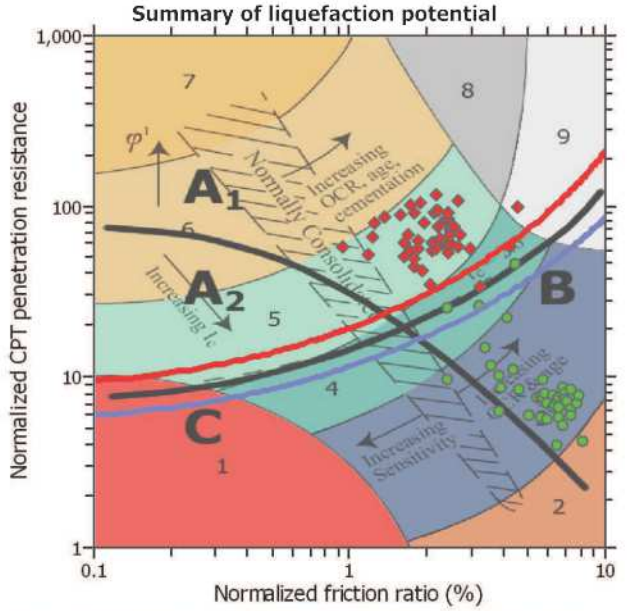
CPT file : CPT 1

Input parameters and analysis data

Analysis method:	Robertson (2009)	G.W.T. (in-situ):	1.30 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:	Yes
Points to test:	Based on Ic value	Average results interval:	3	Fill weight:	N/A	Limit depth:	20.00 m
Earthquake magnitude M_w:	5.94	Ic cut-off value:	2.60	Trans. detect. applied:	Yes		
Peak ground acceleration:	0.23	Unit weight calculation:	Based on SBT	K_σ applied:	Yes		

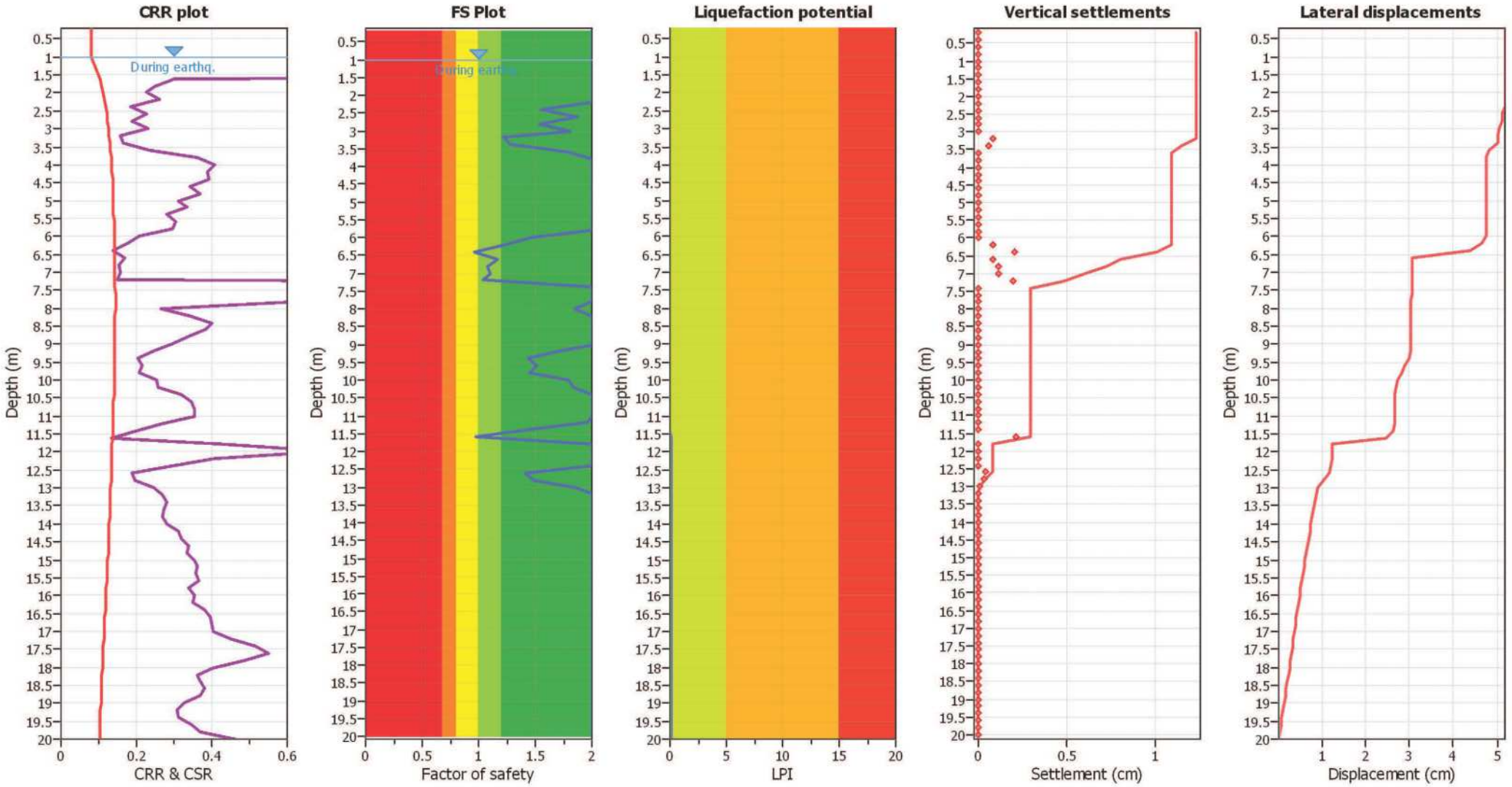






Zone A_1: Cyclic liquefaction likely depending on size and duration of cyclic loading
Zone A_2: Cyclic liquefaction and strength loss likely depending on loading and ground geometry
Zone B: Liquefaction and post-earthquake strength loss unlikely, check cyclic softening
Zone C: Cyclic liquefaction and 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 (erthq.):	1.00 m	Fill weight:	N/A
Fines correction method:	Robertson (2009)	Average results interval:	3	Transition detect. applied:	Yes
Points to test:	Based on Ic value	Ic cut-off value:	2.60	K_σ applied:	Yes
Earthquake magnitude M_w:	5.94	Unit weight calculation:	Based on SBT	Clay like behavior applied:	All soils
Peak ground acceleration:	0.23	Use fill:	No	Limit depth applied:	Yes
Depth to water table (insitu):	1.30 m	Fill height:	N/A	Limit depth:	20.00 m

F.S. color scheme

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

LPI color scheme

- Very high risk
- High risk
- Low risk

GeoLogismiki
Geotechnical Engineers
P.O. Box 33539
621 25 - Serrai - GREECE

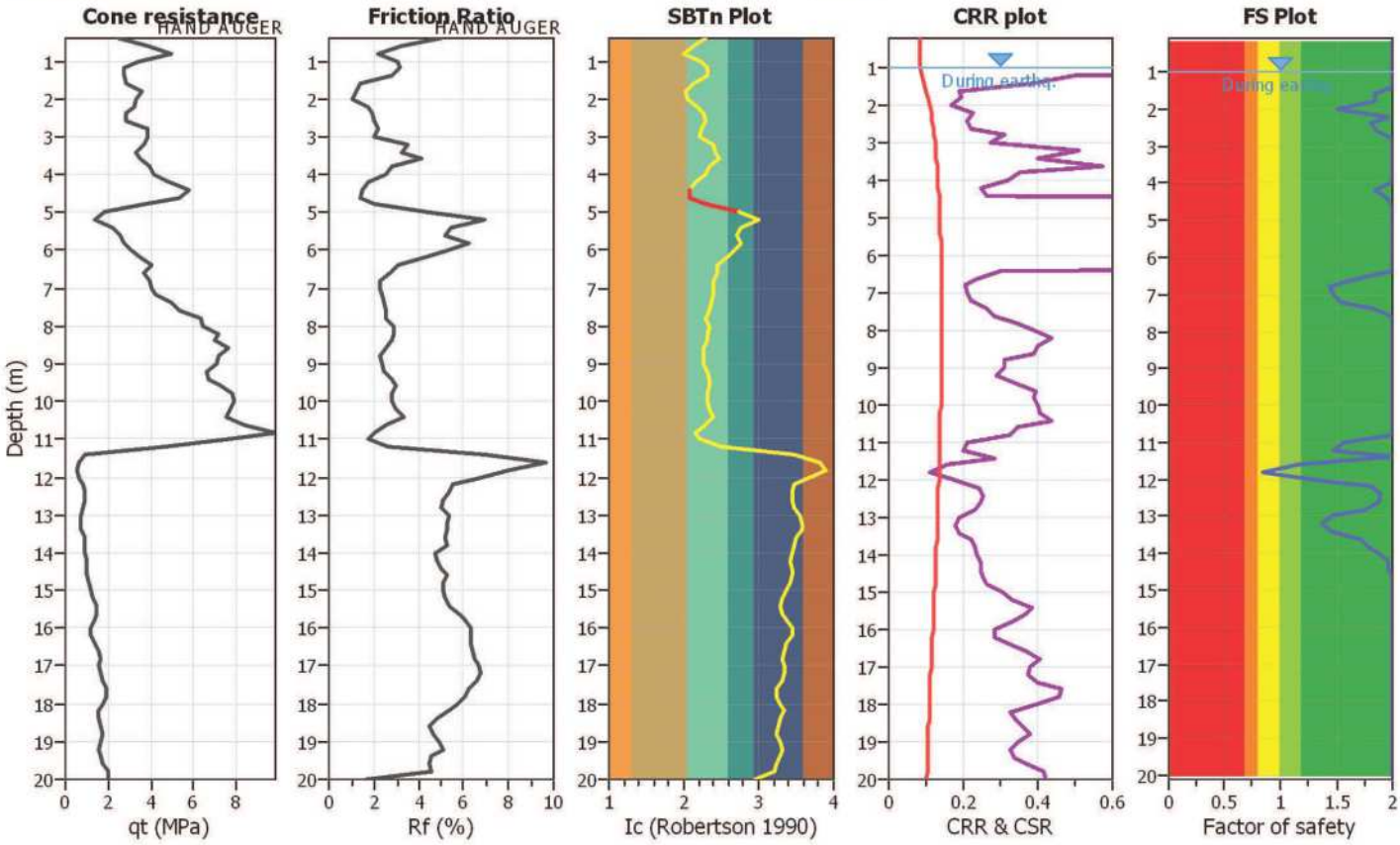
LIQUEFACTION ANALYSIS REPORT

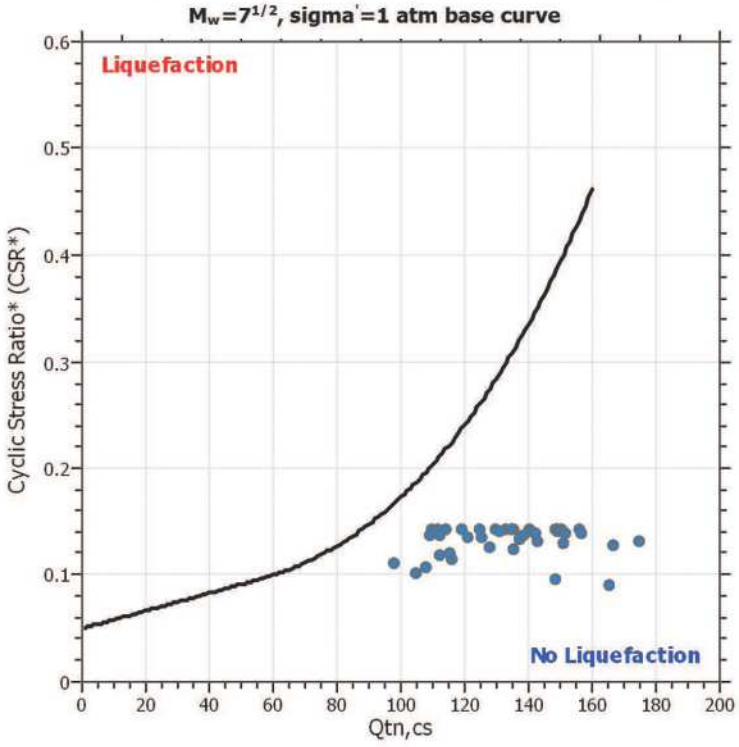
Project title : **Location :**

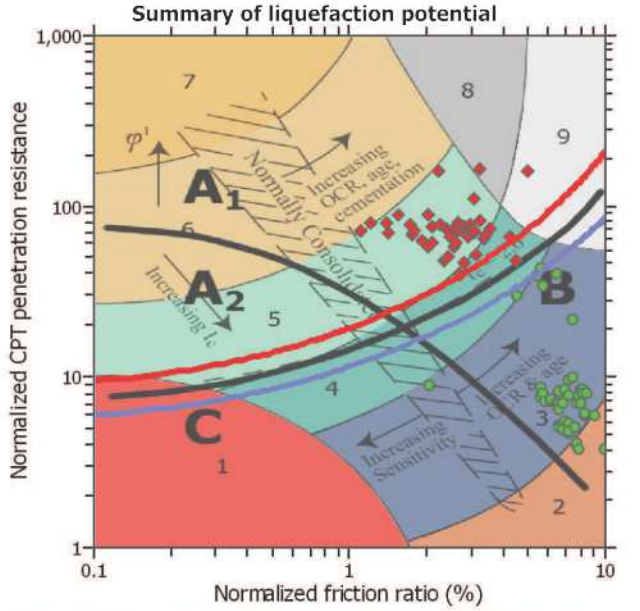
CPT file : CPT 2

Input parameters and analysis data

Analysis method:	Robertson (2009)	G.W.T. (in-situ):	1.30 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:	Yes
Points to test:	Based on Ic value	Average results interval:	3	Fill weight:	N/A	Limit depth:	20.00 m
Earthquake magnitude M_w:	5.94	Ic cut-off value:	2.60	Trans. detect. applied:	Yes		
Peak ground acceleration:	0.23	Unit weight calculation:	Based on SBT	K_σ applied:	Yes		

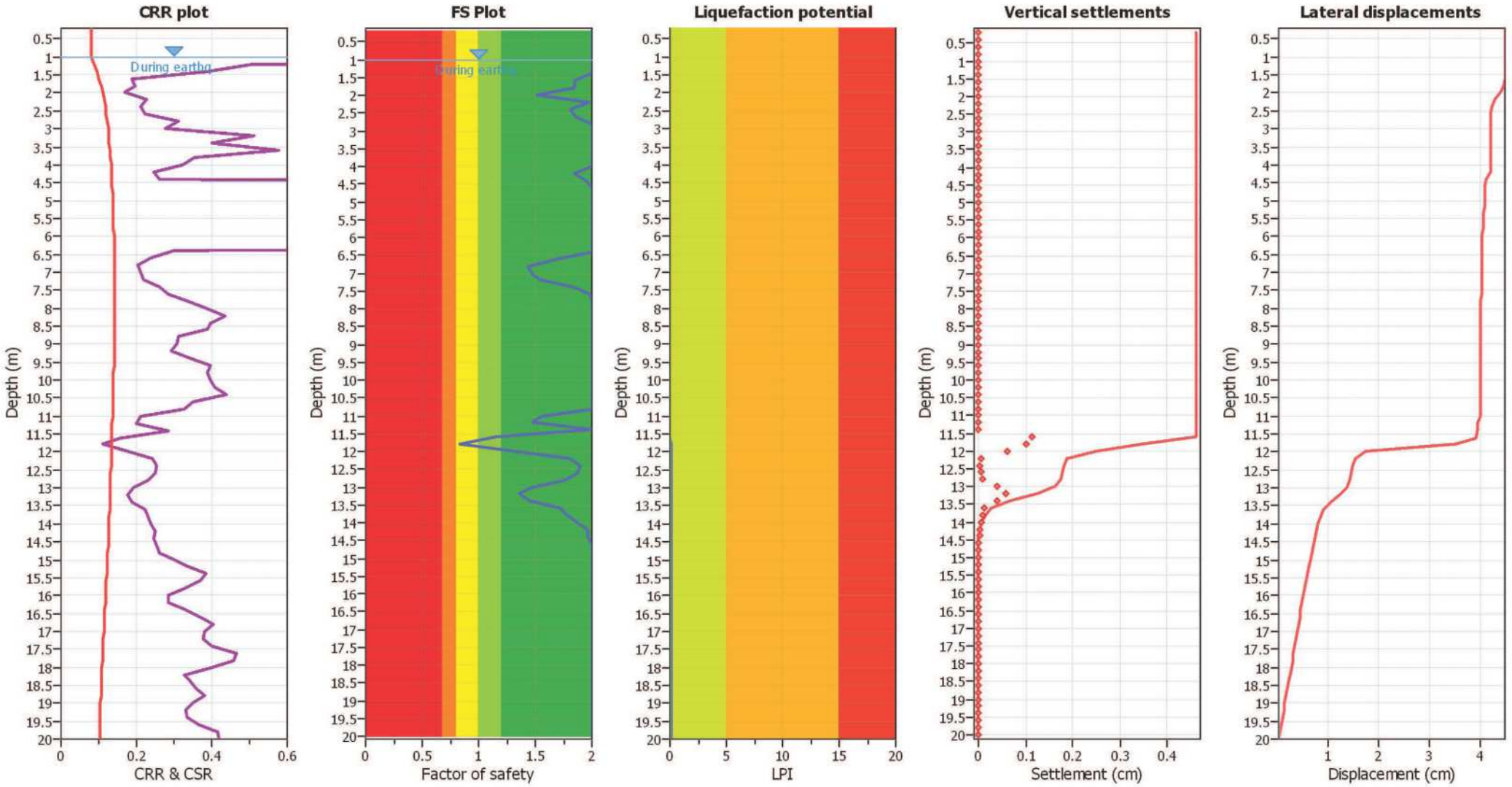






Zone A_1: Cyclic liquefaction likely depending on size and duration of cyclic loading
Zone A_2: Cyclic liquefaction and strength loss likely depending on loading and ground geometry
Zone B: Liquefaction and post-earthquake strength loss unlikely, check cyclic softening
Zone C: Cyclic liquefaction and 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 (erthq.):	1.00 m	Fill weight:	N/A
Fines correction method:	Robertson (2009)	Average results interval:	3	Transition detect. applied:	Yes
Points to test:	Based on Ic value	Ic cut-off value:	2.60	K_σ applied:	Yes
Earthquake magnitude M_w:	5.94	Unit weight calculation:	Based on SBT	Clay like behavior applied:	All soils
Peak ground acceleration:	0.23	Use fill:	No	Limit depth applied:	Yes
Depth to water table (insitu):	1.30 m	Fill height:	N/A	Limit depth:	20.00 m

F.S. color scheme

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

LPI color scheme

- Very high risk
- High risk
- Low risk

GeoLogismiki
Geotechnical Engineers
P.O. Box 33539
621 25 - Serrai - GREECE

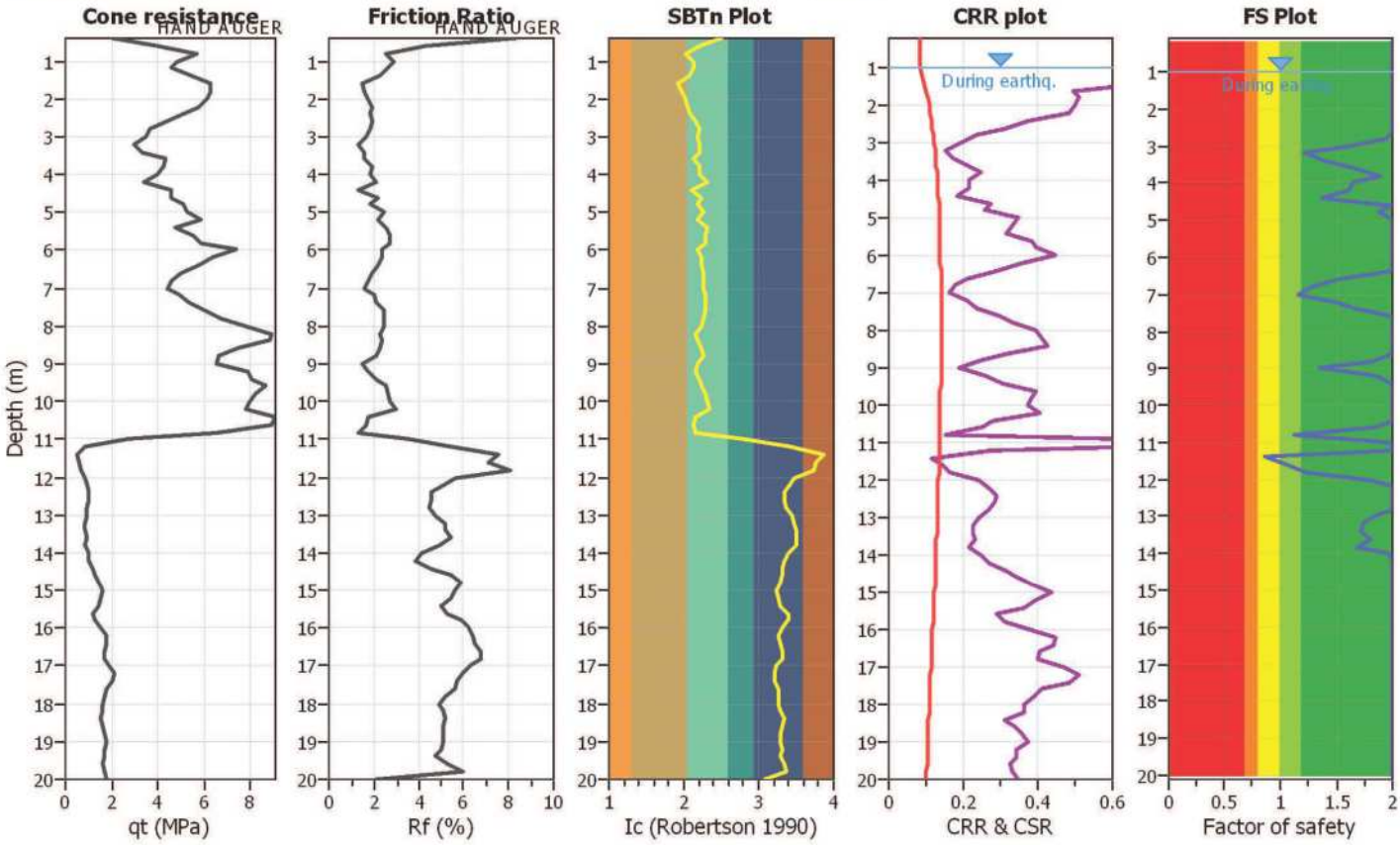
LIQUEFACTION ANALYSIS REPORT

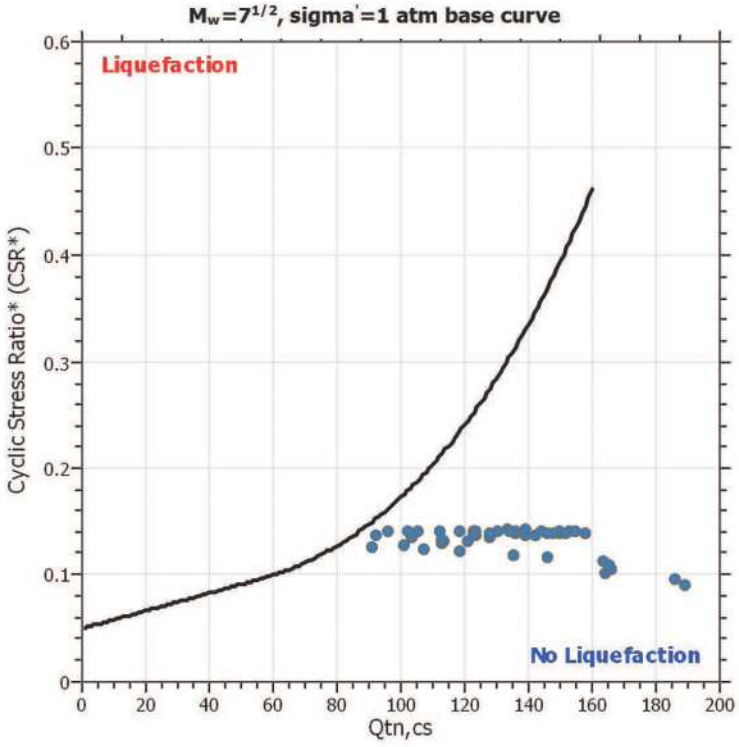
Project title : **Location :**

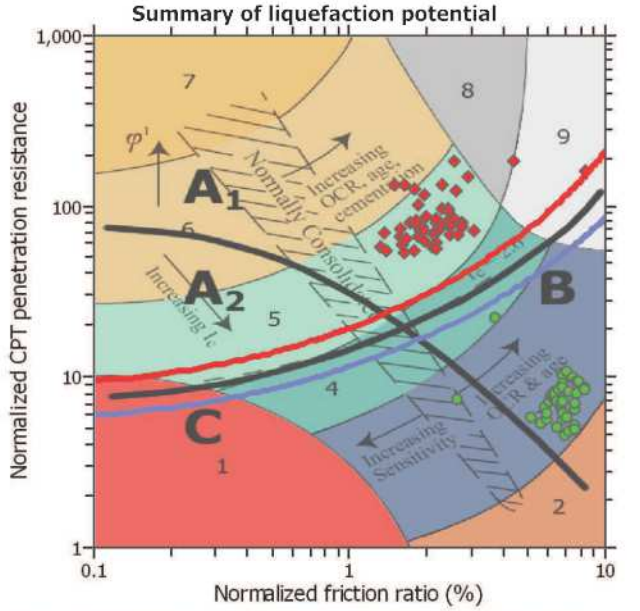
CPT file : CPT 3

Input parameters and analysis data

Analysis method:	Robertson (2009)	G.W.T. (in-situ):	1.30 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:	Yes
Points to test:	Based on Ic value	Average results interval:	3	Fill weight:	N/A	Limit depth:	20.00 m
Earthquake magnitude M_w:	5.94	Ic cut-off value:	2.60	Trans. detect. applied:	Yes		
Peak ground acceleration:	0.23	Unit weight calculation:	Based on SBT	K_σ applied:	Yes		

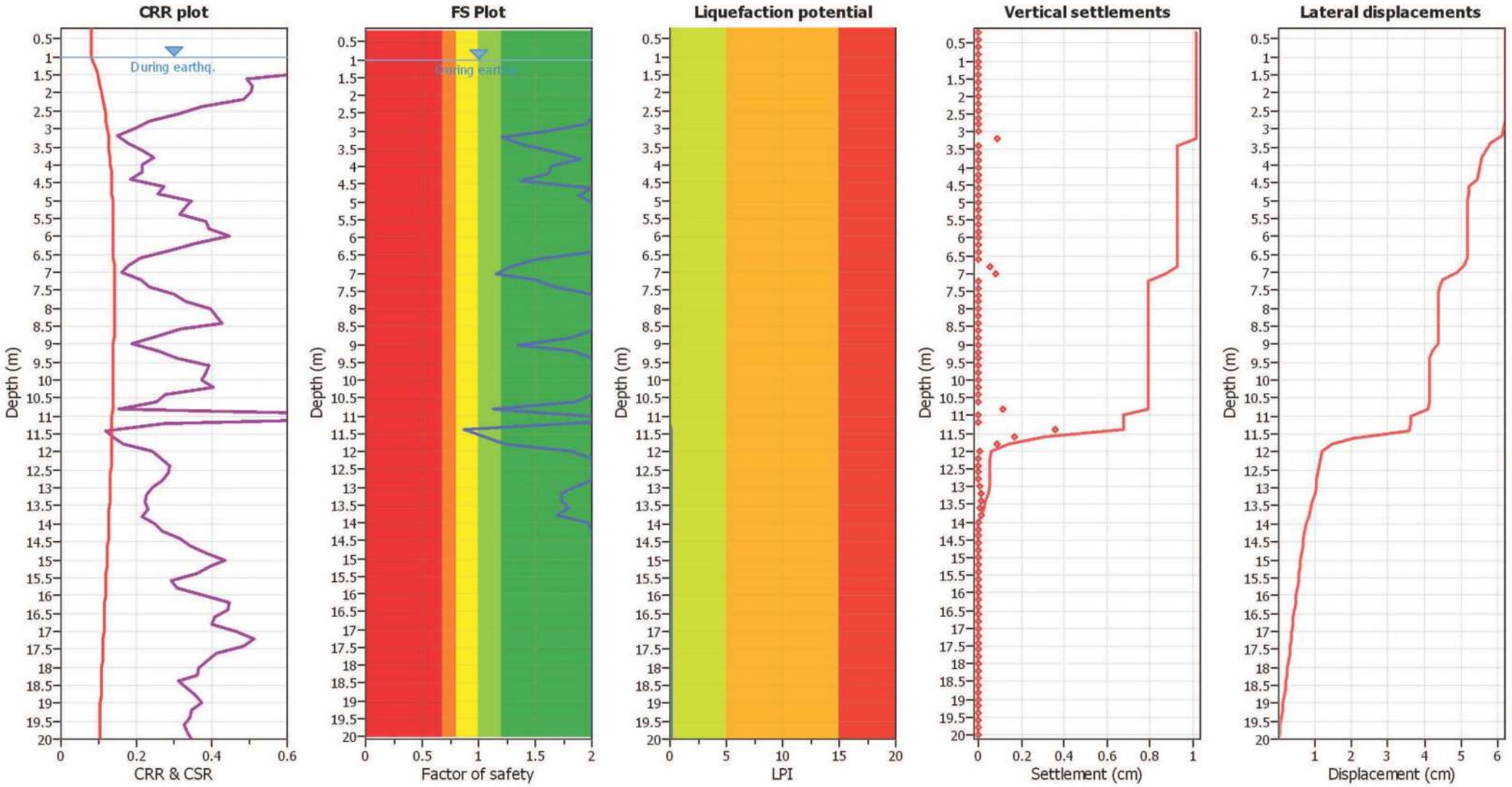






Zone A_1: Cyclic liquefaction likely depending on size and duration of cyclic loading
Zone A_2: Cyclic liquefaction and strength loss likely depending on loading and ground geometry
Zone B: Liquefaction and post-earthquake strength loss unlikely, check cyclic softening
Zone C: Cyclic liquefaction and 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 (erthq.):	1.00 m	Fill weight:	N/A
Fines correction method:	Robertson (2009)	Average results interval:	3	Transition detect. applied:	Yes
Points to test:	Based on Ic value	Ic cut-off value:	2.60	K_σ applied:	Yes
Earthquake magnitude M_w:	5.94	Unit weight calculation:	Based on SBT	Clay like behavior applied:	All soils
Peak ground acceleration:	0.23	Use fill:	No	Limit depth applied:	Yes
Depth to water table (insitu):	1.30 m	Fill height:	N/A	Limit depth:	20.00 m

F.S. color scheme

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

LPI color scheme

- Very high risk
- High risk
- Low risk

GeoLogismiki
Geotechnical Engineers
P.O. Box 33539
621 25 - Serrai - GREECE

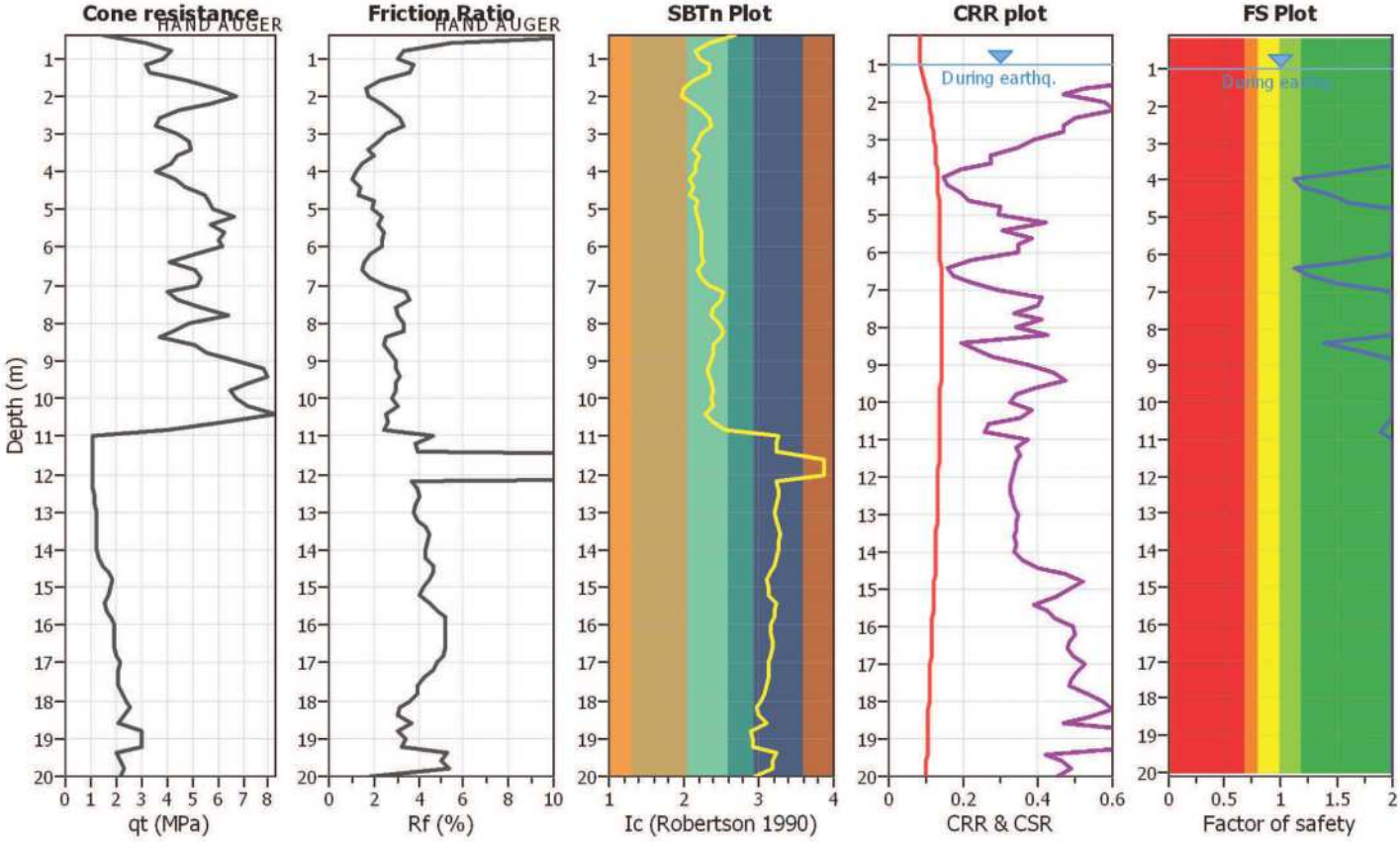
LIQUEFACTION ANALYSIS REPORT

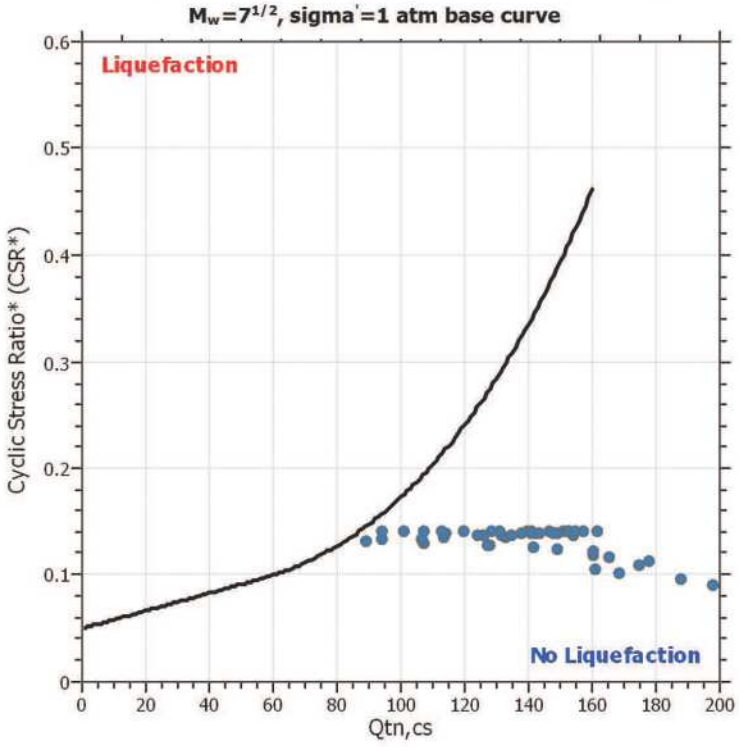
Project title : **Location :**

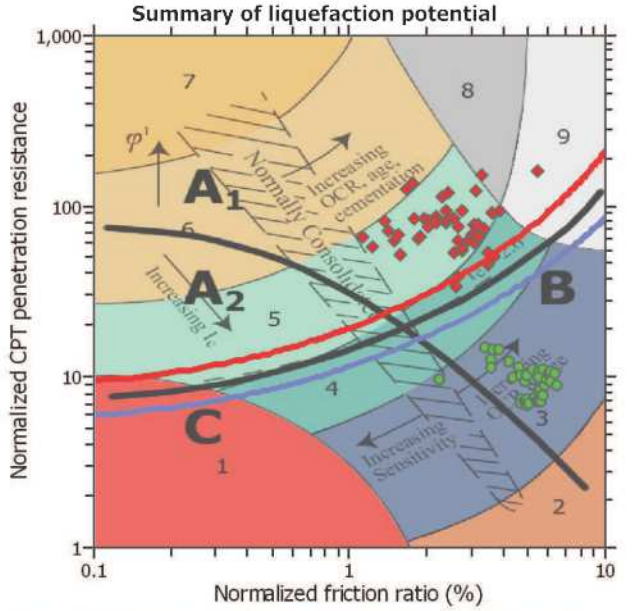
CPT file : CPT 4

Input parameters and analysis data

Analysis method:	Robertson (2009)	G.W.T. (in-situ):	1.30 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:	Yes
Points to test:	Based on Ic value	Average results interval:	3	Fill weight:	N/A	Limit depth:	20.00 m
Earthquake magnitude M_w:	5.94	Ic cut-off value:	2.60	Trans. detect. applied:	Yes		
Peak ground acceleration:	0.23	Unit weight calculation:	Based on SBT	K_σ applied:	Yes		

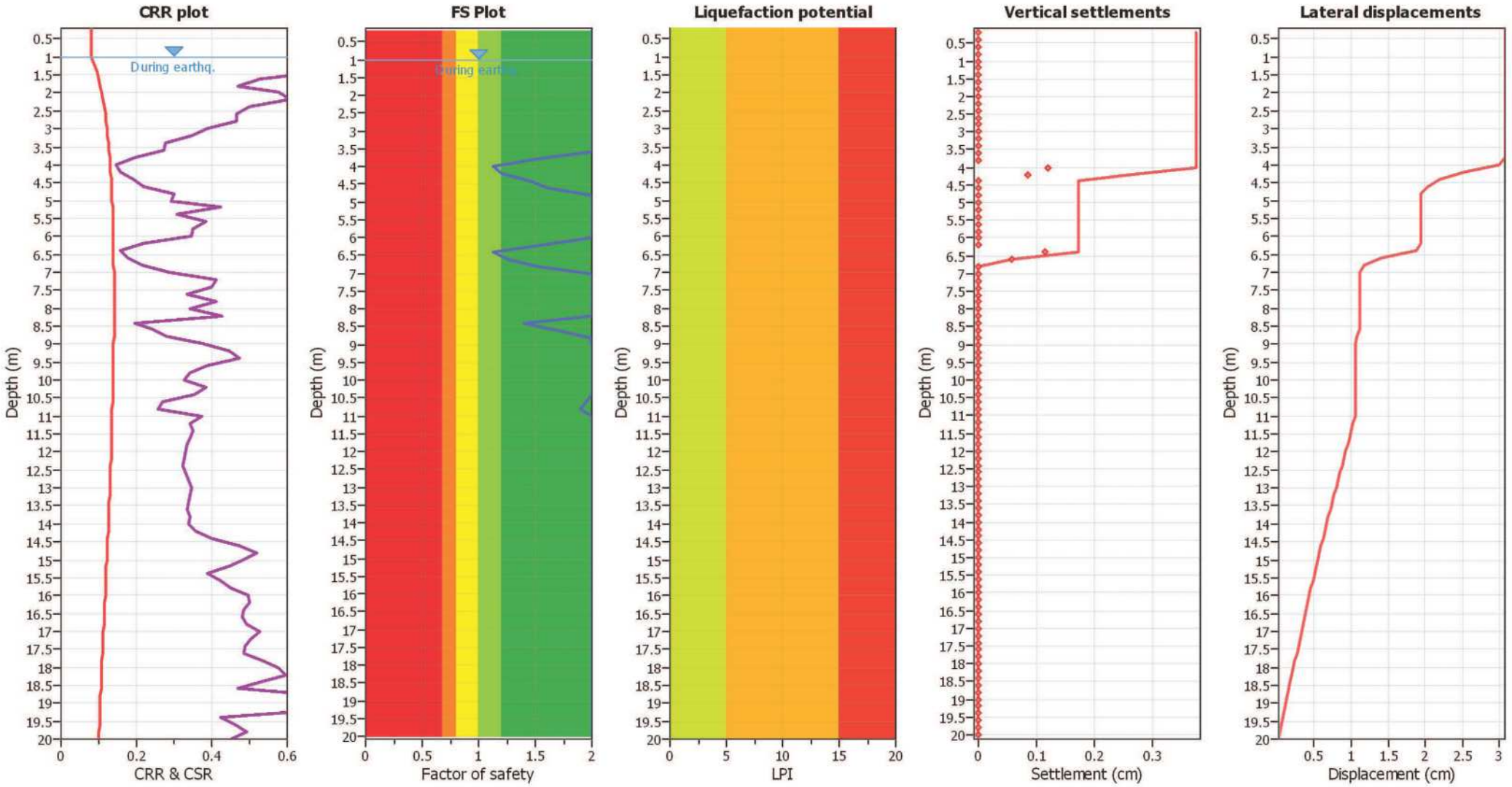






Zone A_1: Cyclic liquefaction likely depending on size and duration of cyclic loading
Zone A_2: Cyclic liquefaction and strength loss likely depending on loading and ground geometry
Zone B: Liquefaction and post-earthquake strength loss unlikely, check cyclic softening
Zone C: Cyclic liquefaction and 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 (erthq.):	1.00 m	Fill weight:	N/A
Fines correction method:	Robertson (2009)	Average results interval:	3	Transition detect. applied:	Yes
Points to test:	Based on Ic value	Ic cut-off value:	2.60	K_σ applied:	Yes
Earthquake magnitude M_w:	5.94	Unit weight calculation:	Based on SBT	Clay like behavior applied:	All soils
Peak ground acceleration:	0.23	Use fill:	No	Limit depth applied:	Yes
Depth to water table (insitu):	1.30 m	Fill height:	N/A	Limit depth:	20.00 m

F.S. color scheme

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

LPI color scheme

- Very high risk
- High risk
- Low risk

GeoLogismiki
Geotechnical Engineers
P.O. Box 33539
621 25 - Serrai - GREECE

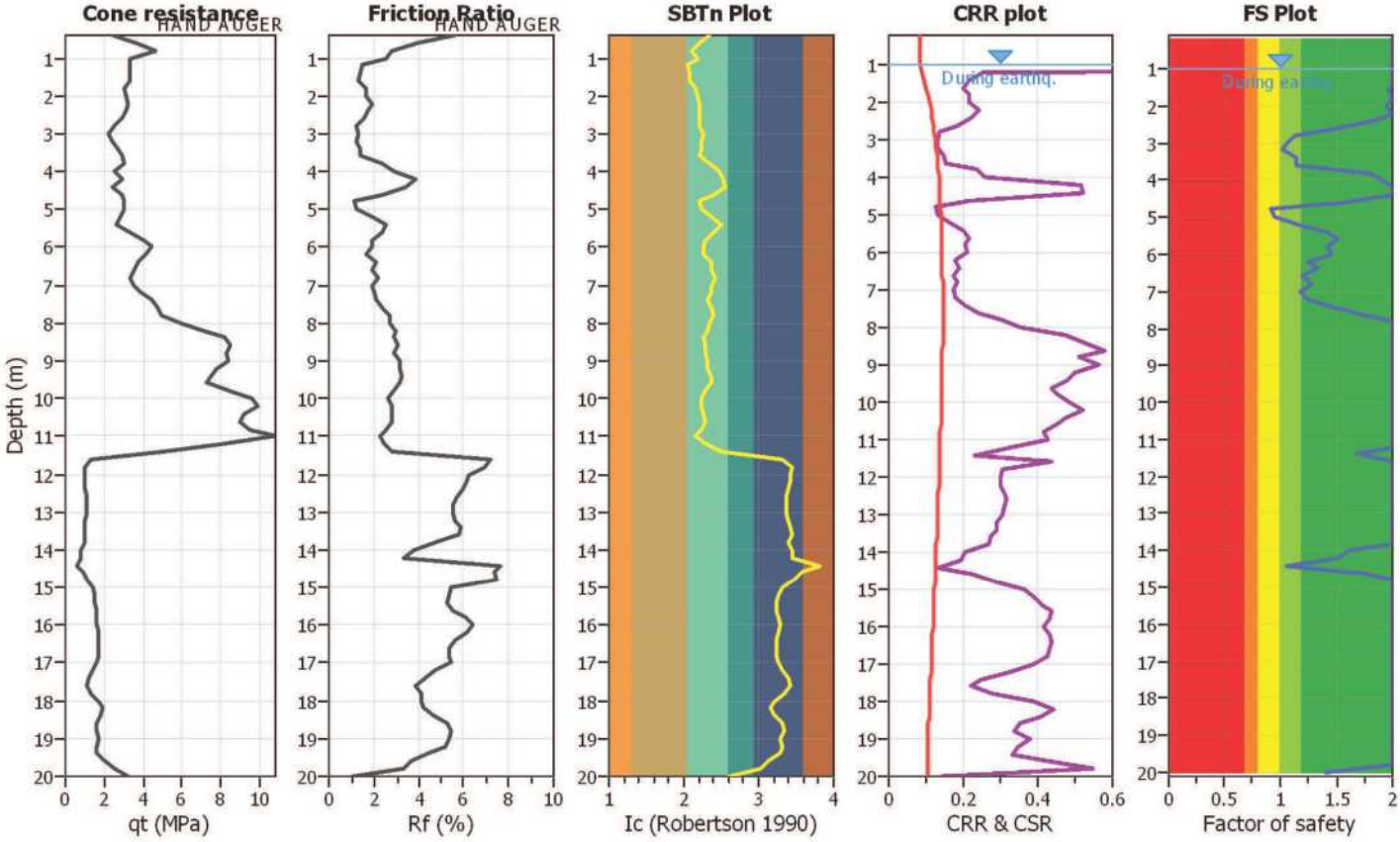
LIQUEFACTION ANALYSIS REPORT

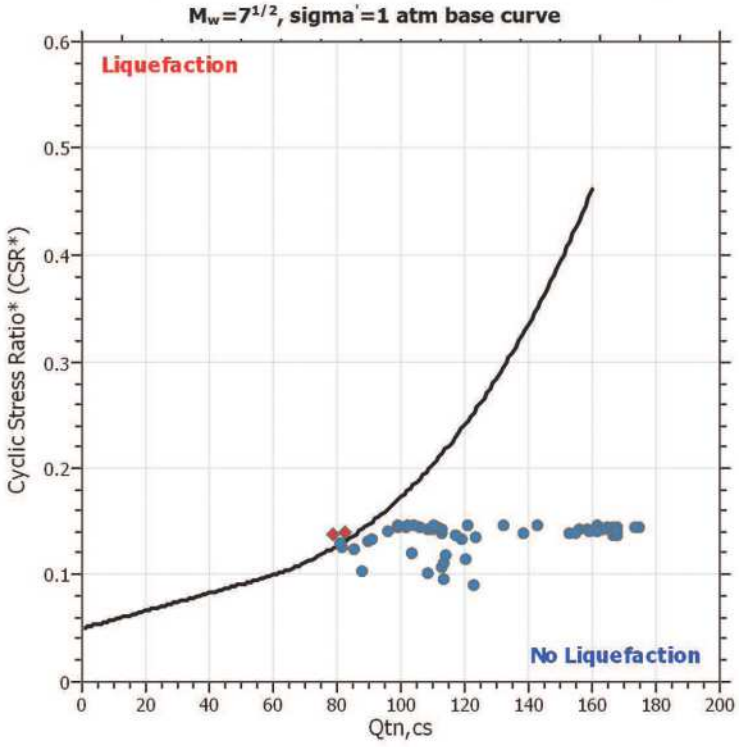
Project title : **Location :**

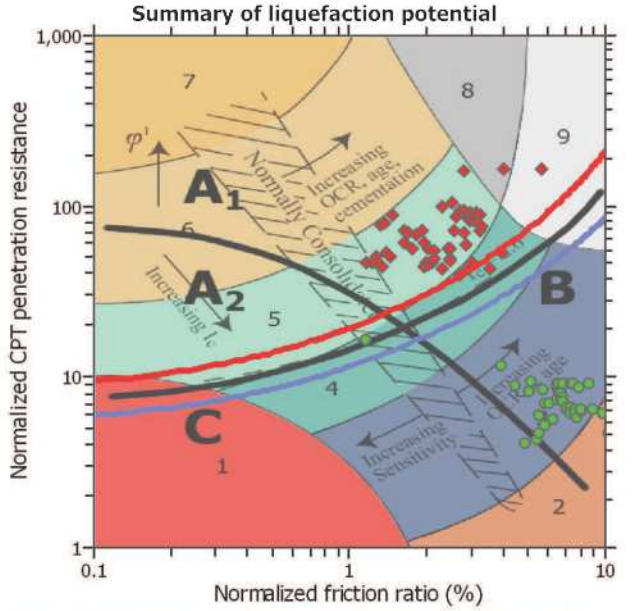
CPT file : CPT 5

Input parameters and analysis data

Analysis method:	Robertson (2009)	G.W.T. (in-situ):	1.30 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:	Yes
Points to test:	Based on Ic value	Average results interval:	3	Fill weight:	N/A	Limit depth:	20.00 m
Earthquake magnitude M_w:	5.94	Ic cut-off value:	2.60	Trans. detect. applied:	Yes		
Peak ground acceleration:	0.23	Unit weight calculation:	Based on SBT	K_σ applied:	Yes		

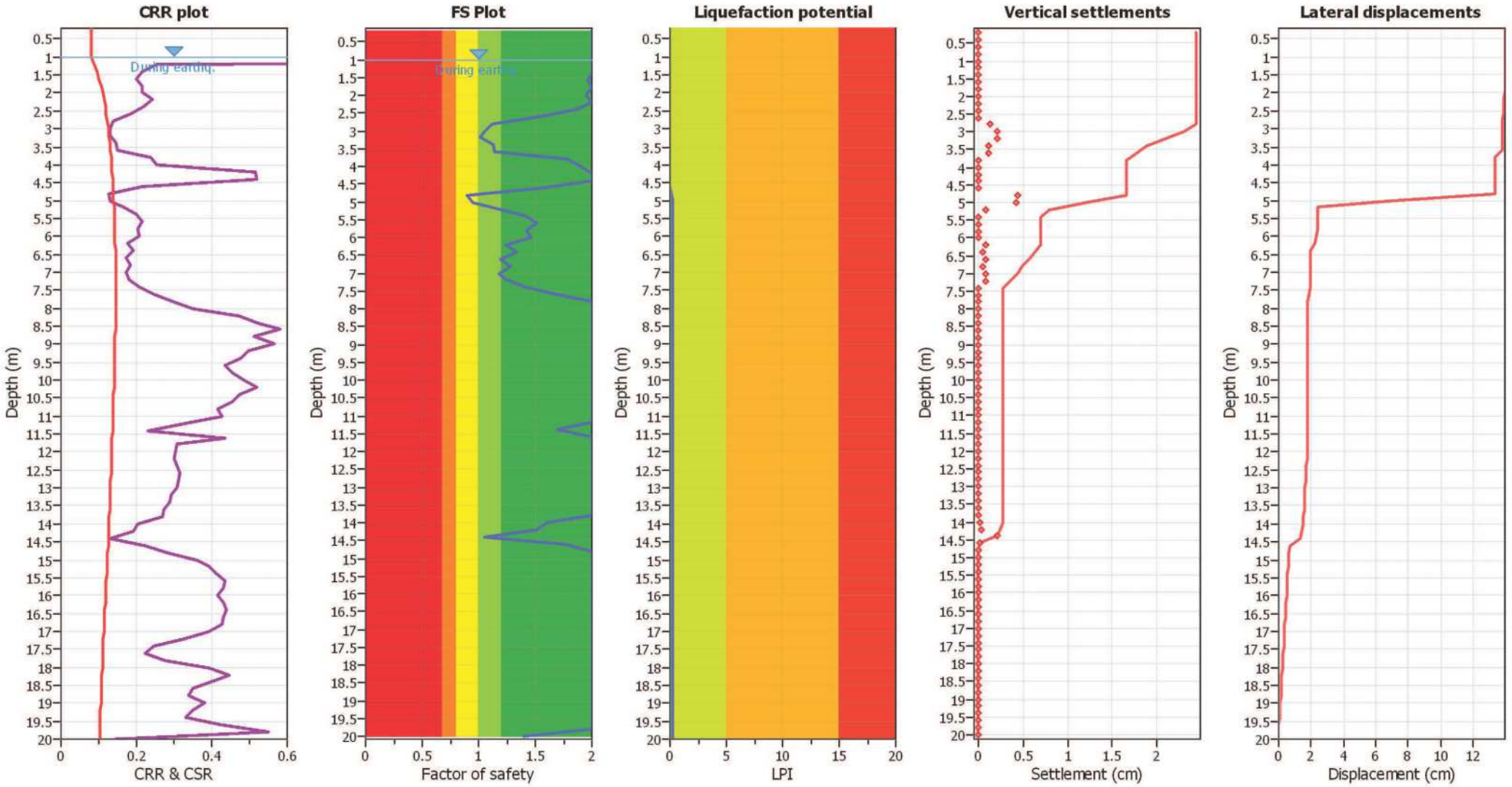






Zone A_1: Cyclic liquefaction likely depending on size and duration of cyclic loading
Zone A_2: Cyclic liquefaction and strength loss likely depending on loading and ground geometry
Zone B: Liquefaction and post-earthquake strength loss unlikely, check cyclic softening
Zone C: Cyclic liquefaction and 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 (erthq.):	1.00 m	Fill weight:	N/A
Fines correction method:	Robertson (2009)	Average results interval:	3	Transition detect. applied:	Yes
Points to test:	Based on Ic value	Ic cut-off value:	2.60	K_σ applied:	Yes
Earthquake magnitude M_w:	5.94	Unit weight calculation:	Based on SBT	Clay like behavior applied:	All soils
Peak ground acceleration:	0.23	Use fill:	No	Limit depth applied:	Yes
Depth to water table (insitu):	1.30 m	Fill height:	N/A	Limit depth:	20.00 m

F.S. color scheme

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

LPI color scheme

- Very high risk
- High risk
- Low risk

GeoLogismiki
Geotechnical Engineers
P.O. Box 33539
621 25 - Serrai - GREECE

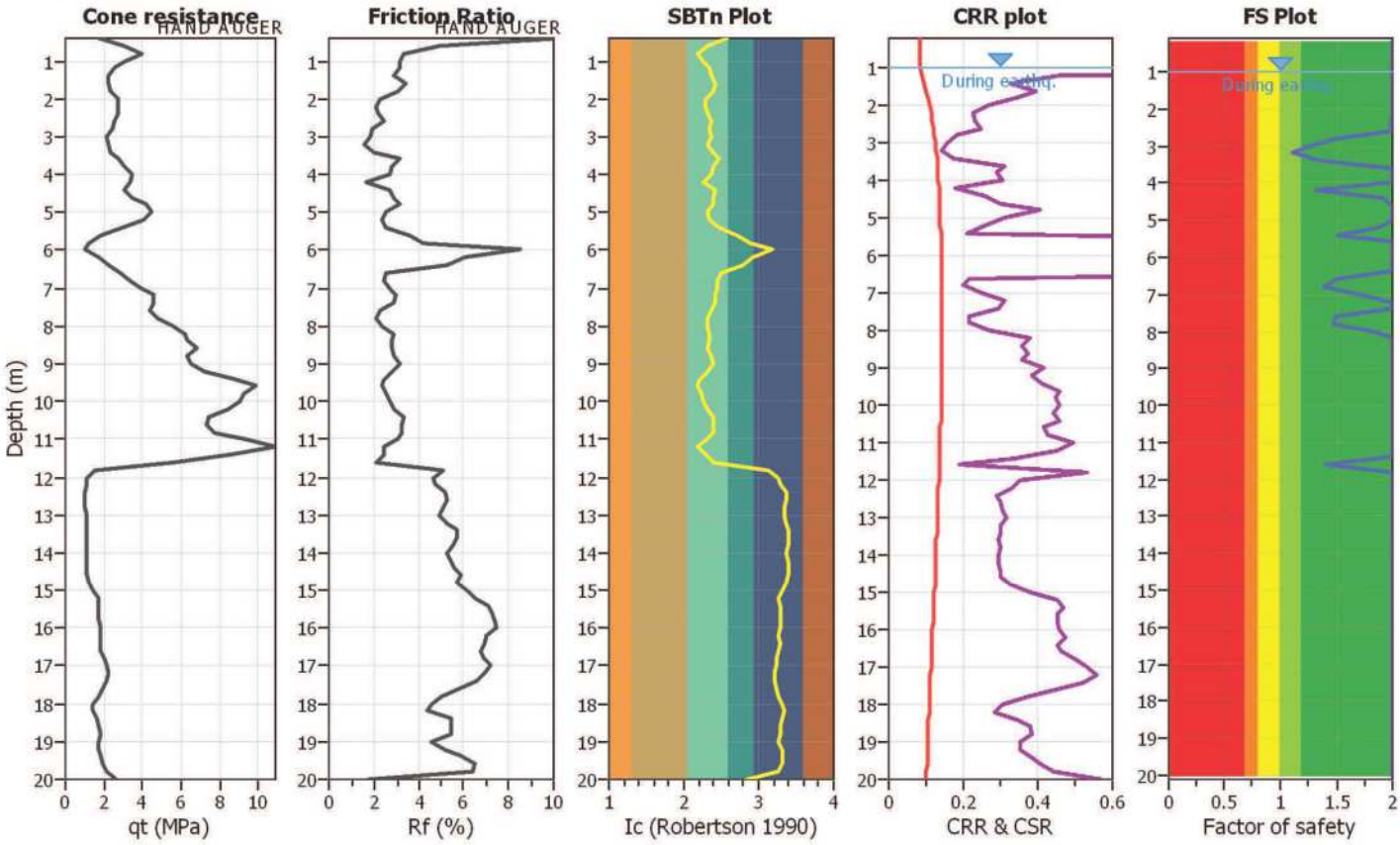
LIQUEFACTION ANALYSIS REPORT

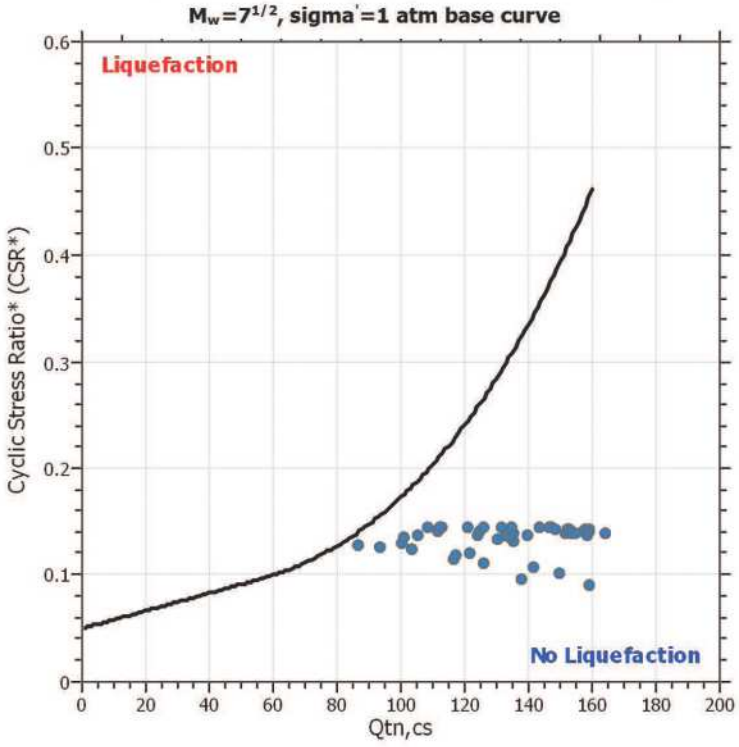
Project title : **Location :**

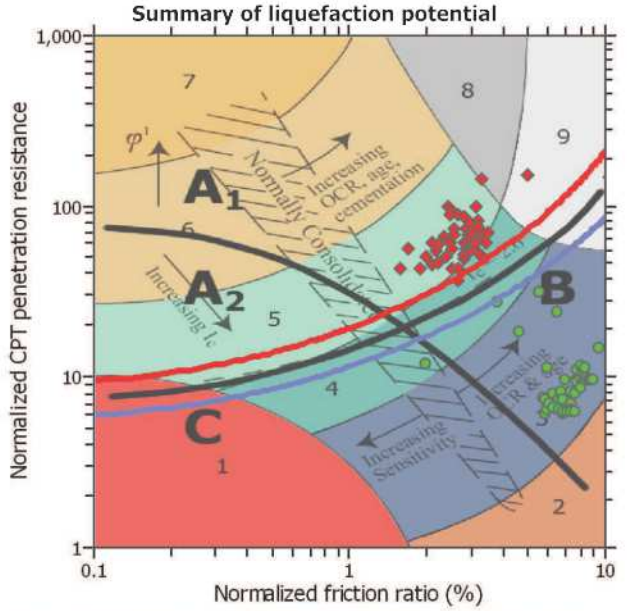
CPT file : CPT 6

Input parameters and analysis data

Analysis method:	Robertson (2009)	G.W.T. (in-situ):	1.30 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:	Yes
Points to test:	Based on Ic value	Average results interval:	3	Fill weight:	N/A	Limit depth:	20.00 m
Earthquake magnitude M_w:	5.94	Ic cut-off value:	2.60	Trans. detect. applied:	Yes		
Peak ground acceleration:	0.23	Unit weight calculation:	Based on SBT	K_σ applied:	Yes		

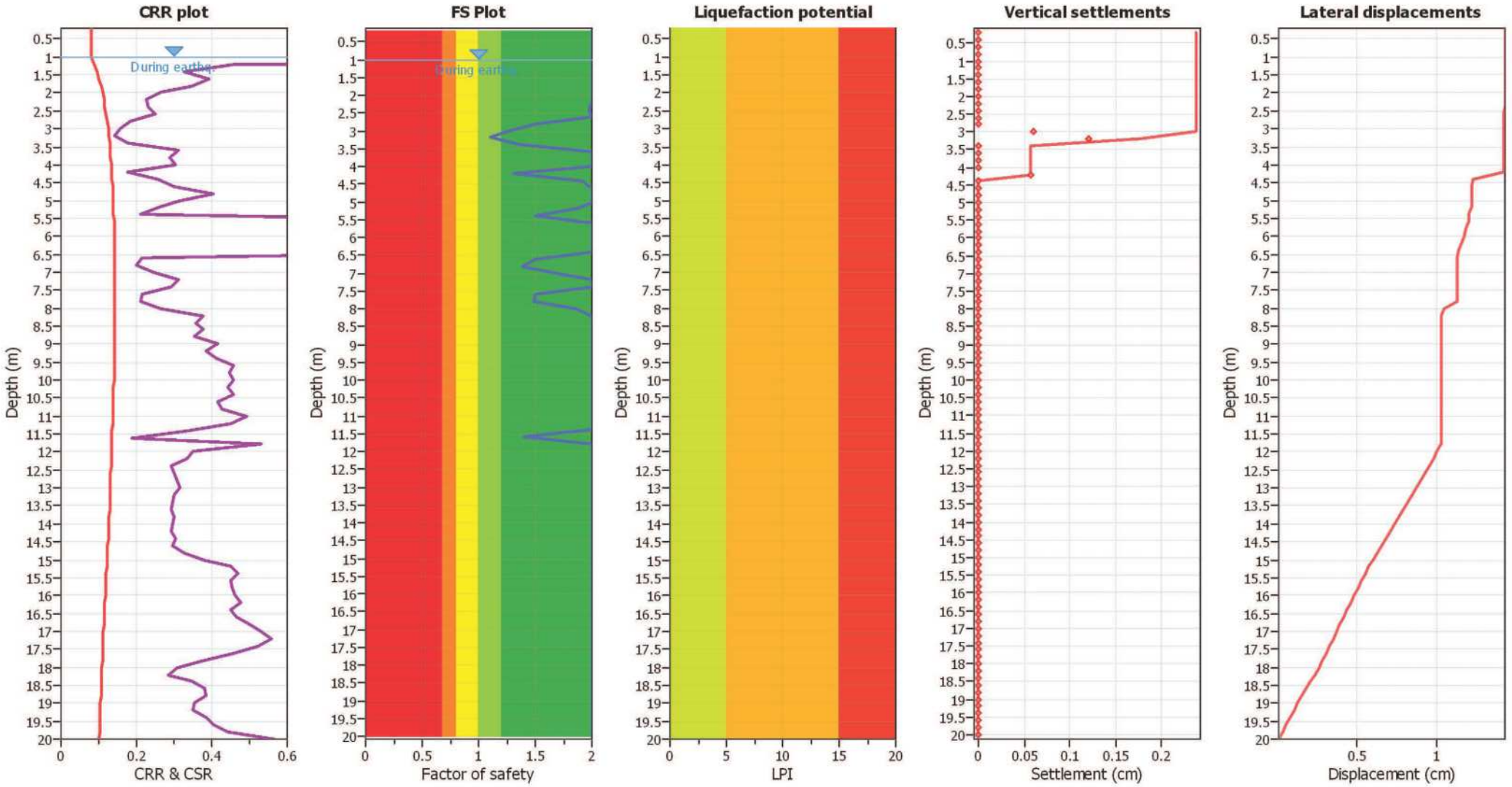






Zone A_1: Cyclic liquefaction likely depending on size and duration of cyclic loading
Zone A_2: Cyclic liquefaction and strength loss likely depending on loading and ground geometry
Zone B: Liquefaction and post-earthquake strength loss unlikely, check cyclic softening
Zone C: Cyclic liquefaction and 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 (erthq.):	1.00 m	Fill weight:	N/A
Fines correction method:	Robertson (2009)	Average results interval:	3	Transition detect. applied:	Yes
Points to test:	Based on Ic value	Ic cut-off value:	2.60	K_σ applied:	Yes
Earthquake magnitude M_w:	5.94	Unit weight calculation:	Based on SBT	Clay like behavior applied:	All soils
Peak ground acceleration:	0.23	Use fill:	No	Limit depth applied:	Yes
Depth to water table (insitu):	1.30 m	Fill height:	N/A	Limit depth:	20.00 m

F.S. color scheme

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

LPI color scheme

- Very high risk
- High risk
- Low risk

GeoLogismiki
Geotechnical Engineers
P.O. Box 33539
621 25 - Serrai - GREECE

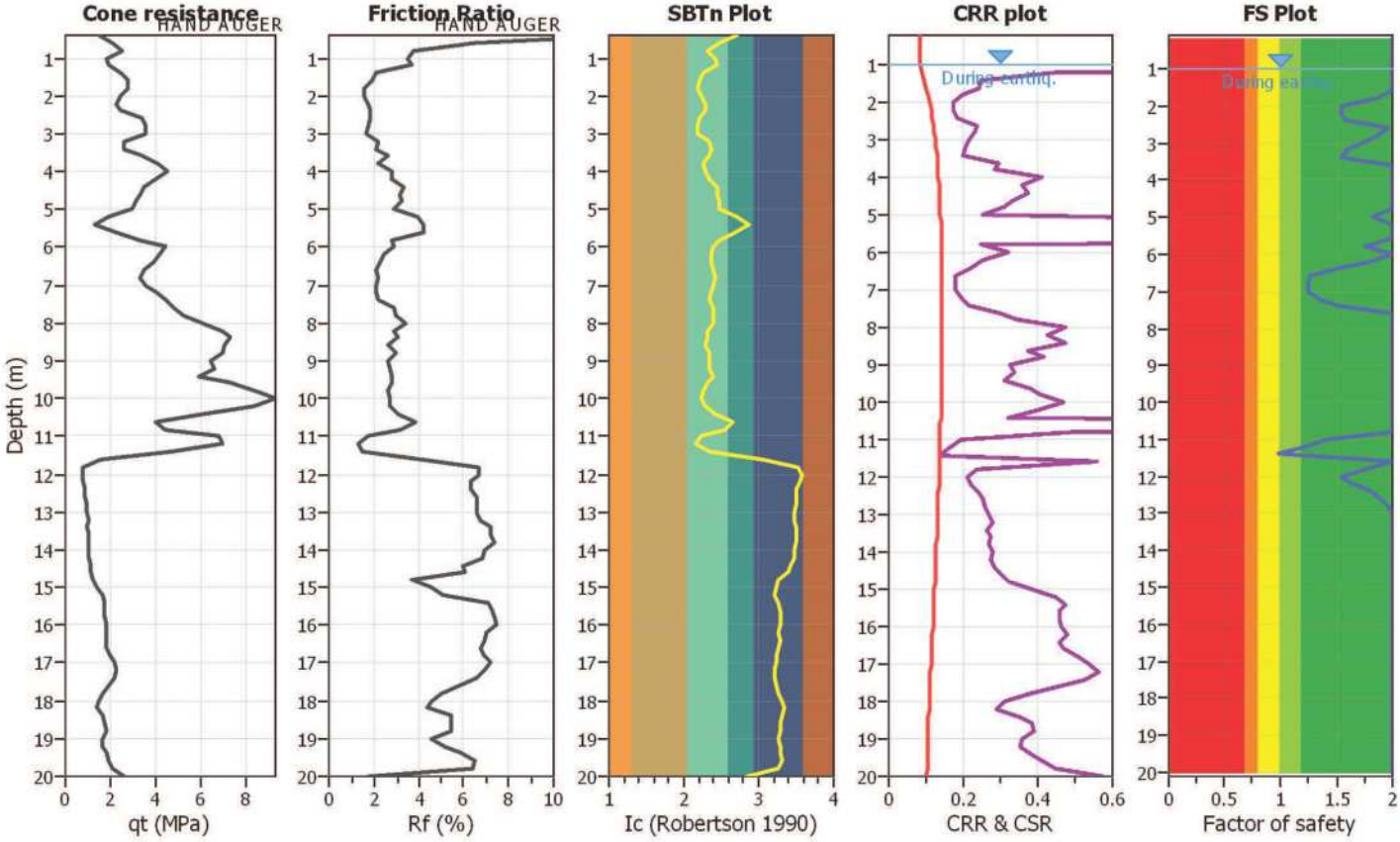
LIQUEFACTION ANALYSIS REPORT

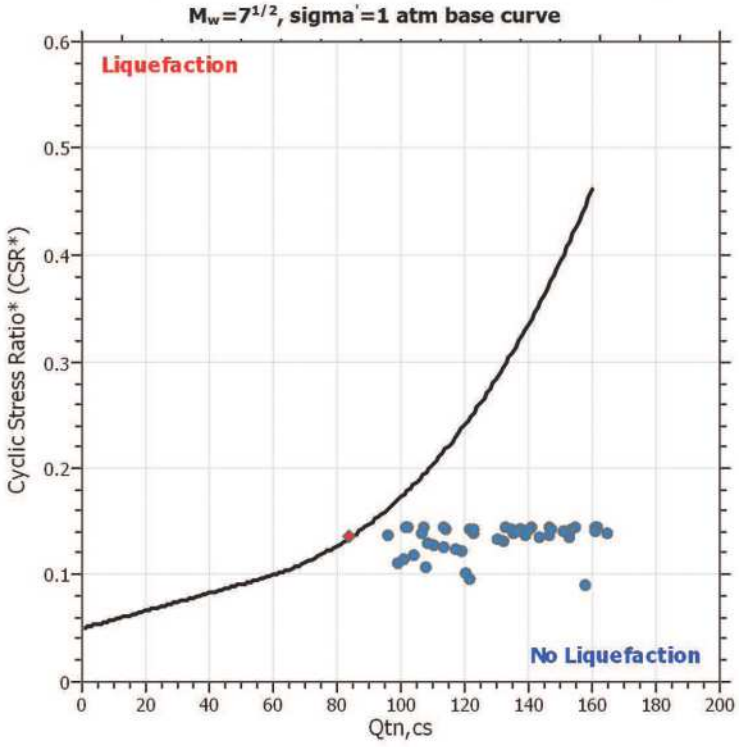
Project title : **Location :**

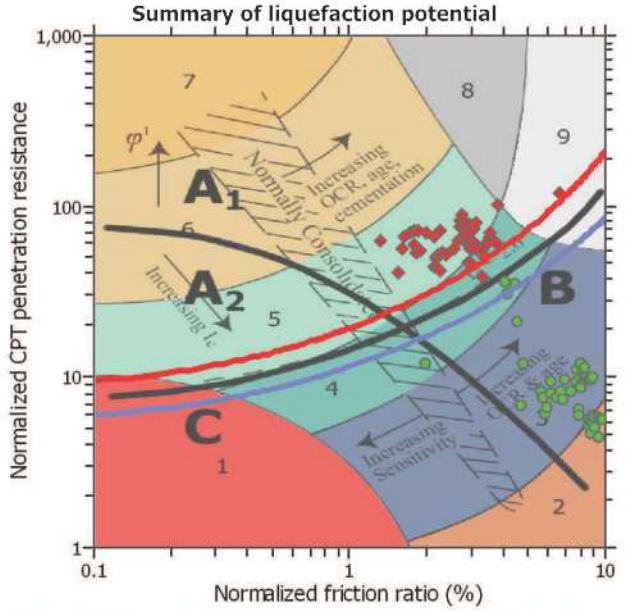
CPT file : CPT 7

Input parameters and analysis data

Analysis method:	Robertson (2009)	G.W.T. (in-situ):	1.30 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:	Yes
Points to test:	Based on Ic value	Average results interval:	3	Fill weight:	N/A	Limit depth:	20.00 m
Earthquake magnitude M_w:	5.94	Ic cut-off value:	2.60	Trans. detect. applied:	Yes		
Peak ground acceleration:	0.23	Unit weight calculation:	Based on SBT	K_σ applied:	Yes		

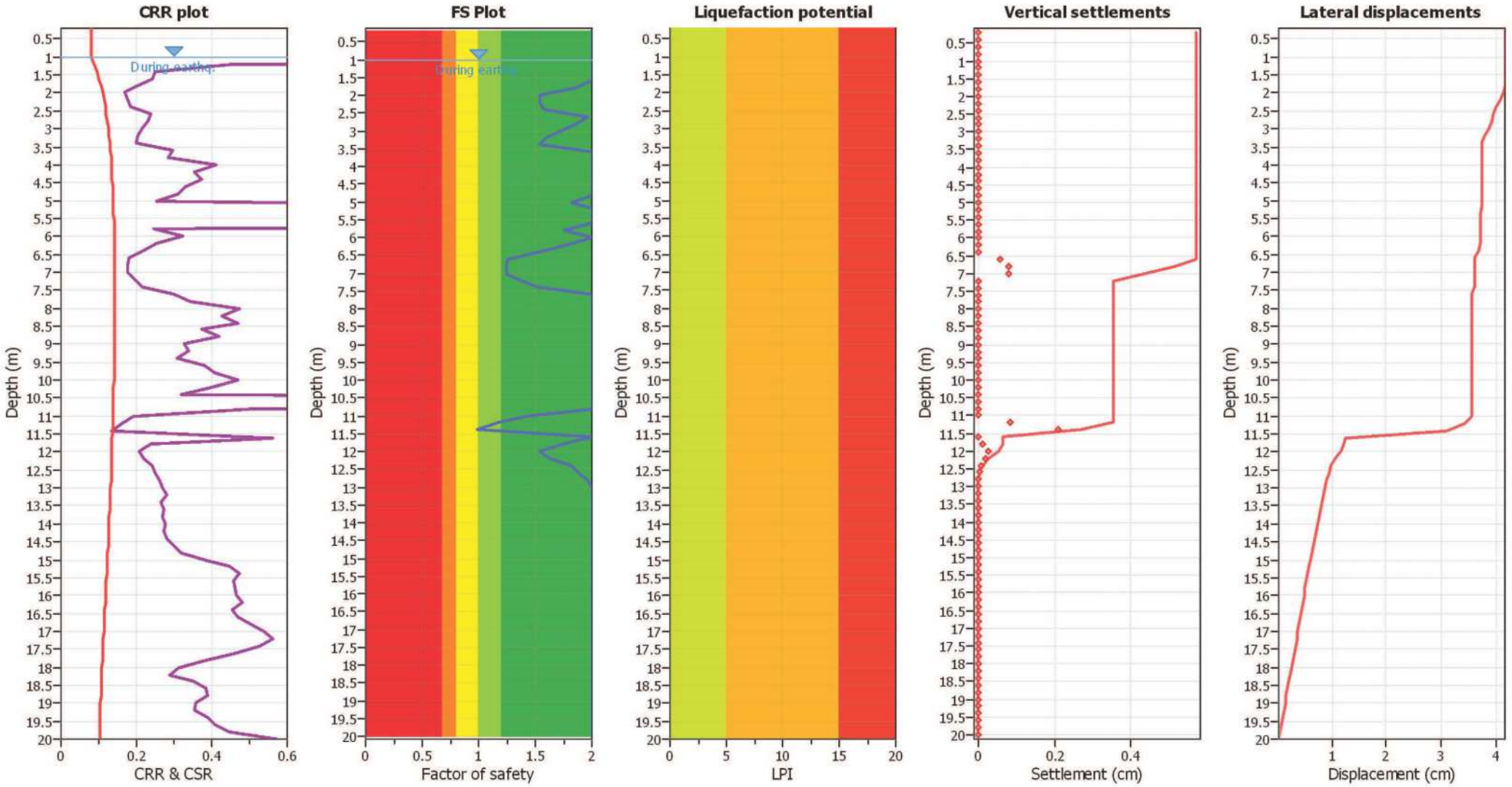






Zone A_1: Cyclic liquefaction likely depending on size and duration of cyclic loading
Zone A_2: Cyclic liquefaction and strength loss likely depending on loading and ground geometry
Zone B: Liquefaction and post-earthquake strength loss unlikely, check cyclic softening
Zone C: Cyclic liquefaction and 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 (erthq.):	1.00 m	Fill weight:	N/A
Fines correction method:	Robertson (2009)	Average results interval:	3	Transition detect. applied:	Yes
Points to test:	Based on Ic value	Ic cut-off value:	2.60	K_σ applied:	Yes
Earthquake magnitude M_w:	5.94	Unit weight calculation:	Based on SBT	Clay like behavior applied:	All soils
Peak ground acceleration:	0.23	Use fill:	No	Limit depth applied:	Yes
Depth to water table (insitu):	1.30 m	Fill height:	N/A	Limit depth:	20.00 m

F.S. color scheme

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

LPI color scheme

- Very high risk
- High risk
- Low risk

GeoLogismiki
Geotechnical Engineers
P.O. Box 33539
621 25 - Serrai - GREECE

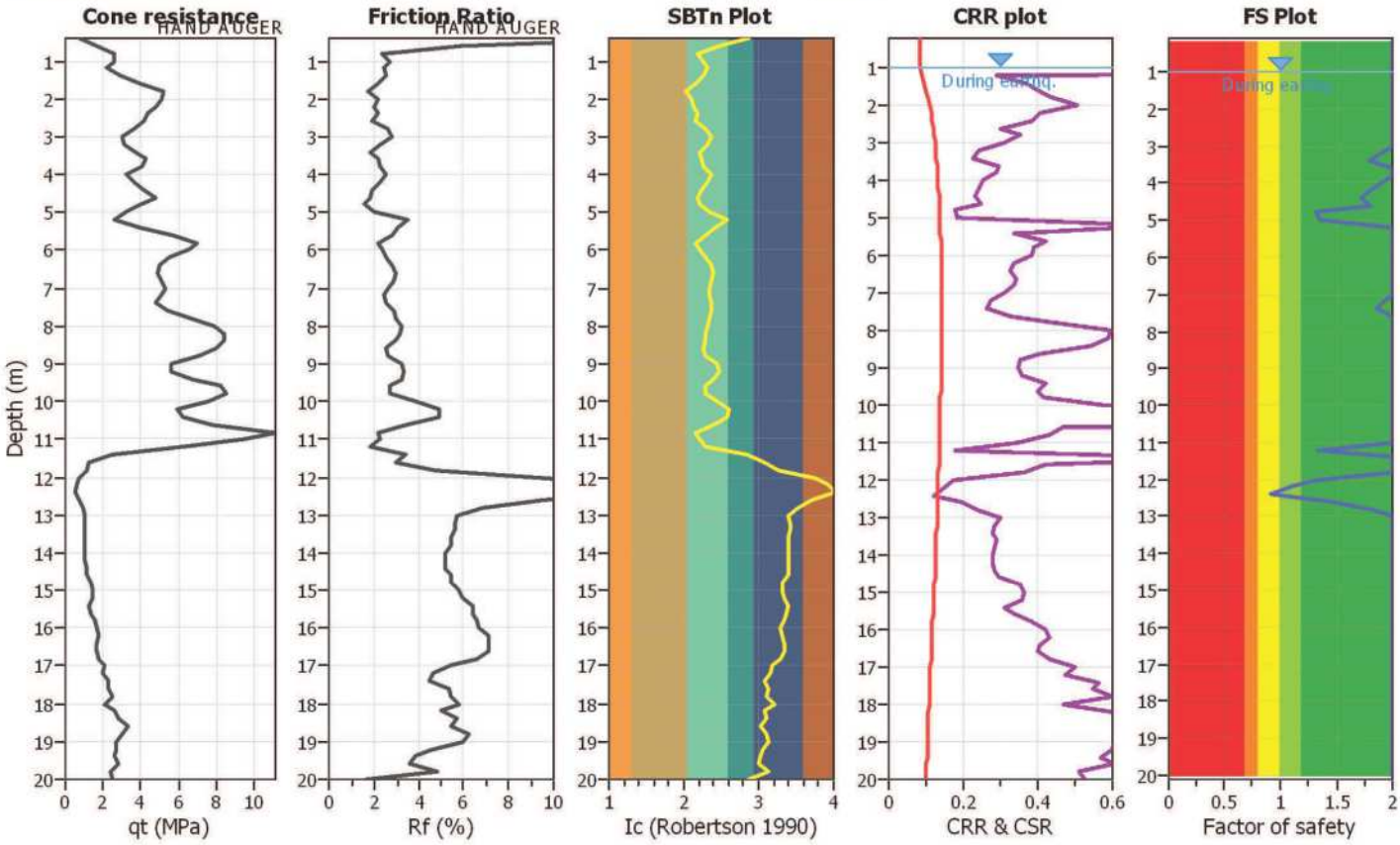
LIQUEFACTION ANALYSIS REPORT

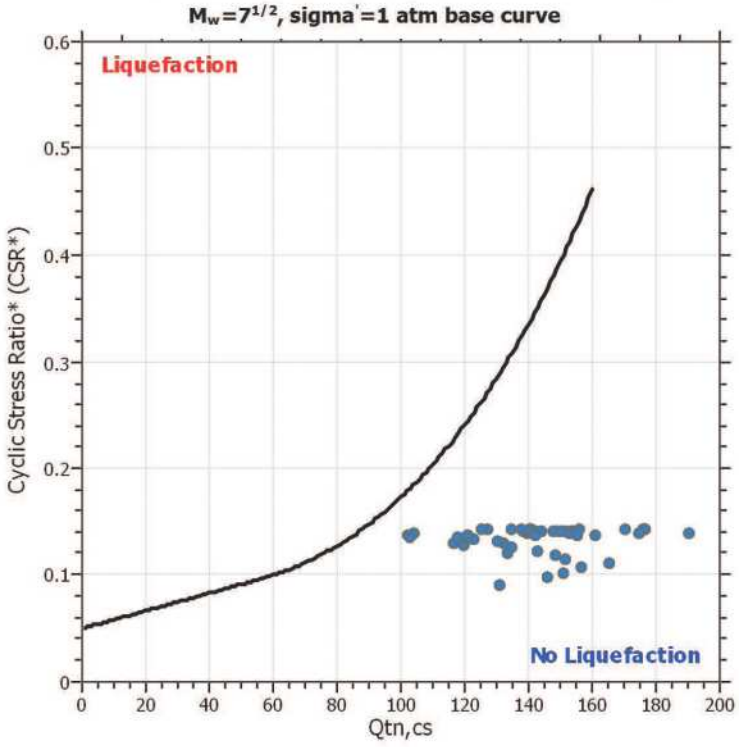
Project title : **Location :**

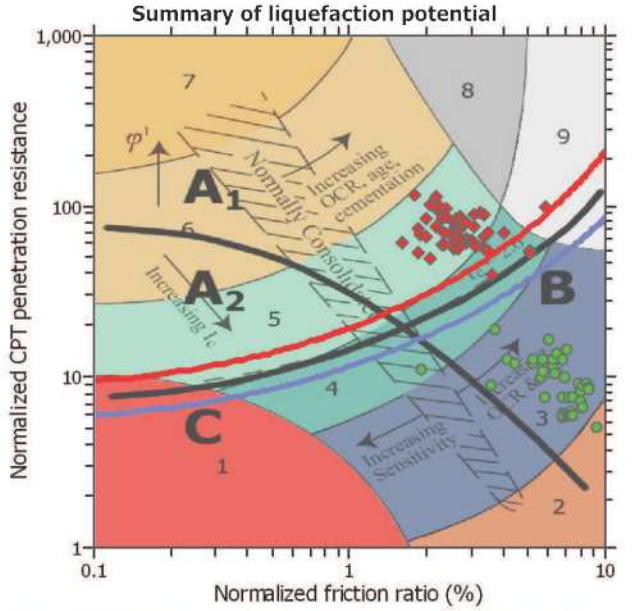
CPT file : CPT 8

Input parameters and analysis data

Analysis method:	Robertson (2009)	G.W.T. (in-situ):	1.30 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:	Yes
Points to test:	Based on Ic value	Average results interval:	3	Fill weight:	N/A	Limit depth:	20.00 m
Earthquake magnitude M_w:	5.94	Ic cut-off value:	2.60	Trans. detect. applied:	Yes		
Peak ground acceleration:	0.23	Unit weight calculation:	Based on SBT	K_σ applied:	Yes		

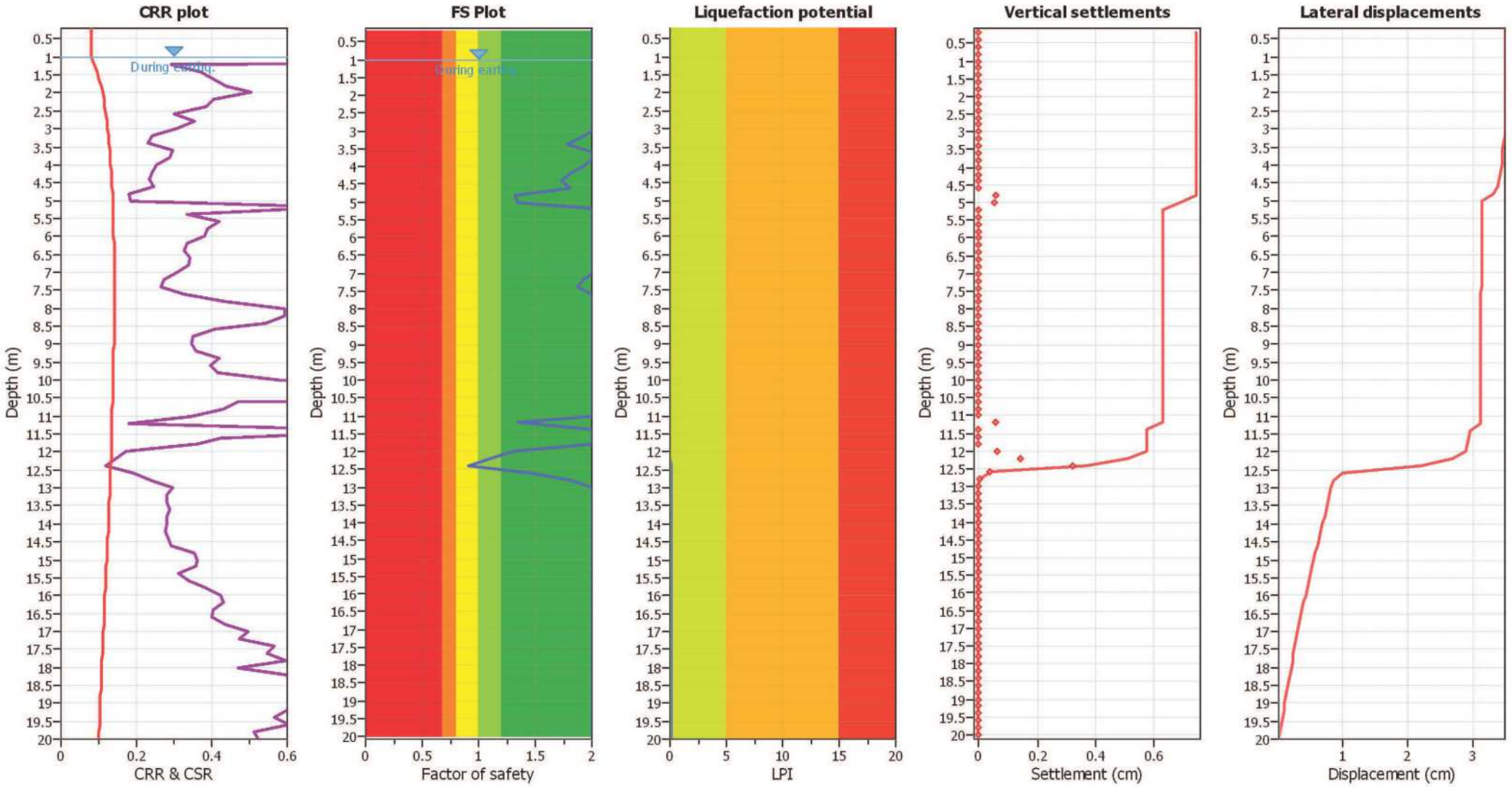






Zone A_1: Cyclic liquefaction likely depending on size and duration of cyclic loading
Zone A_2: Cyclic liquefaction and strength loss likely depending on loading and ground geometry
Zone B: Liquefaction and post-earthquake strength loss unlikely, check cyclic softening
Zone C: Cyclic liquefaction and 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 (erthq.):	1.00 m	Fill weight:	N/A
Fines correction method:	Robertson (2009)	Average results interval:	3	Transition detect. applied:	Yes
Points to test:	Based on Ic value	Ic cut-off value:	2.60	K_σ applied:	Yes
Earthquake magnitude M_w:	5.94	Unit weight calculation:	Based on SBT	Clay like behavior applied:	All soils
Peak ground acceleration:	0.23	Use fill:	No	Limit depth applied:	Yes
Depth to water table (insitu):	1.30 m	Fill height:	N/A	Limit depth:	20.00 m

F.S. color scheme

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

LPI color scheme

- Very high risk
- High risk
- Low risk

GeoLogismiki
Geotechnical Engineers
P.O. Box 33539
621 25 - Serrai - GREECE

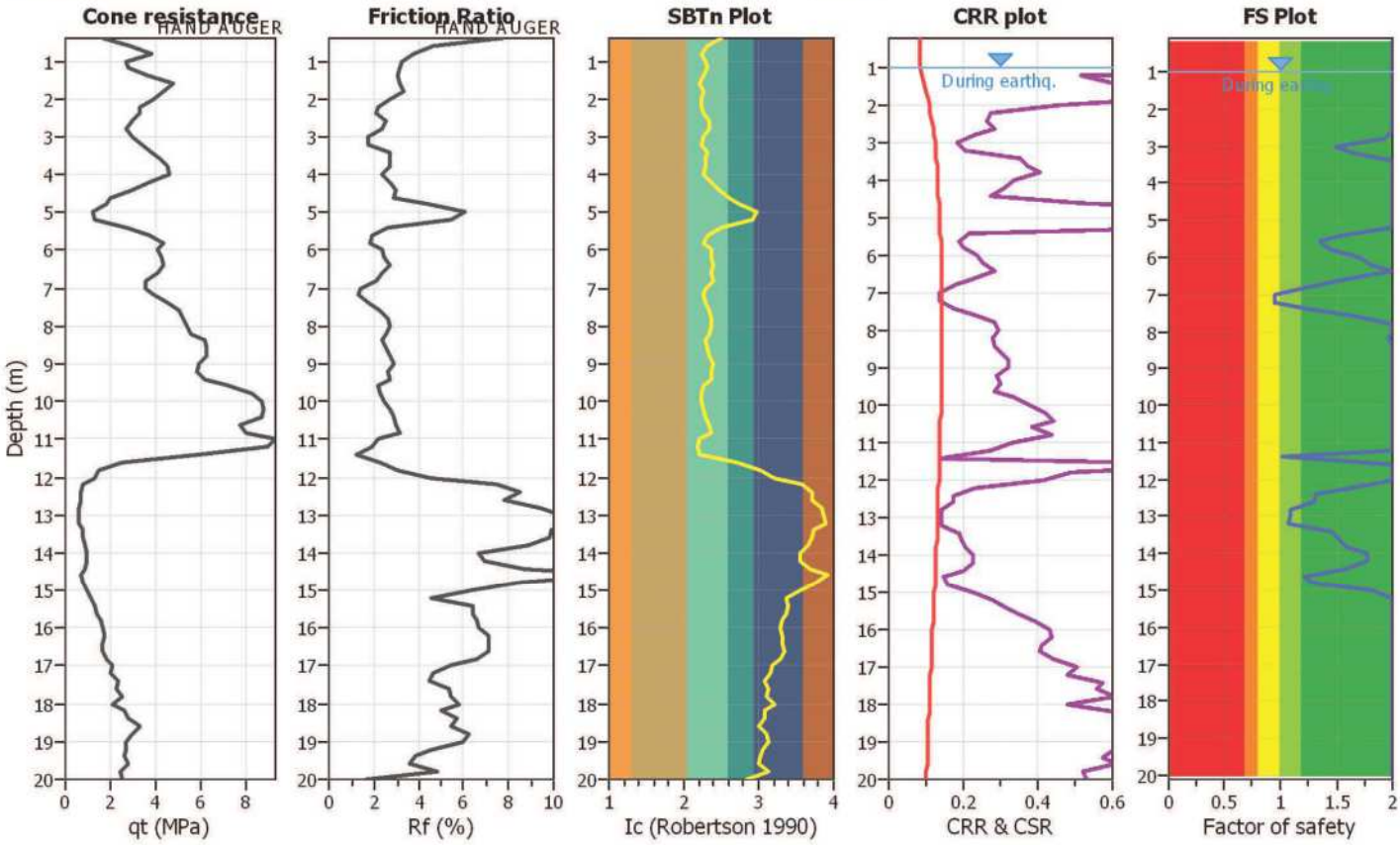
LIQUEFACTION ANALYSIS REPORT

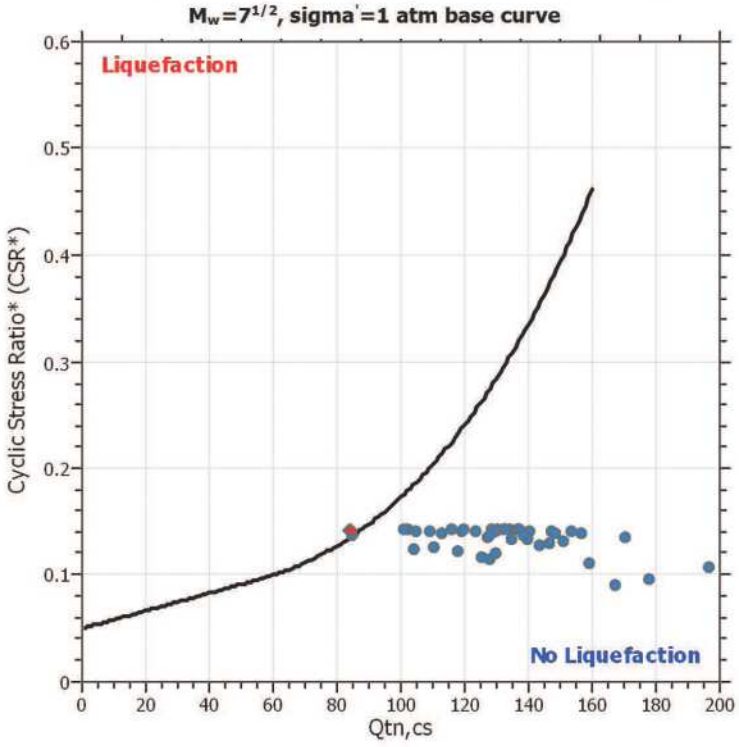
Project title : **Location :**

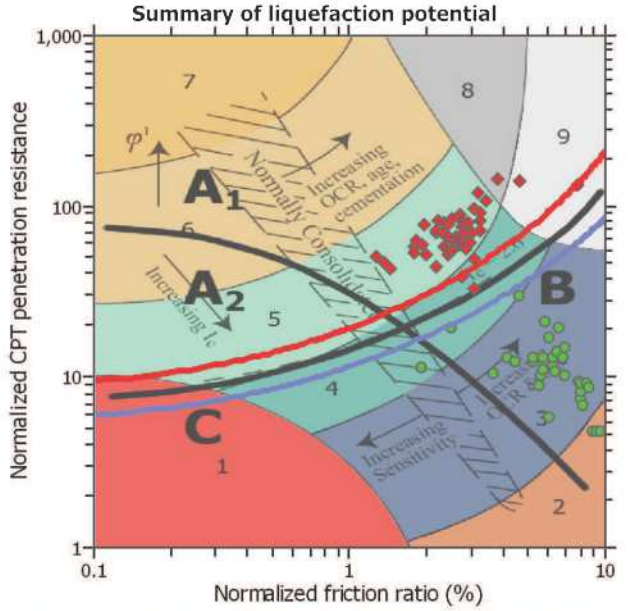
CPT file : CPT 9

Input parameters and analysis data

Analysis method:	Robertson (2009)	G.W.T. (in-situ):	1.30 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:	Yes
Points to test:	Based on Ic value	Average results interval:	3	Fill weight:	N/A	Limit depth:	20.00 m
Earthquake magnitude M_w:	5.94	Ic cut-off value:	2.60	Trans. detect. applied:	Yes		
Peak ground acceleration:	0.23	Unit weight calculation:	Based on SBT	K_σ applied:	Yes		

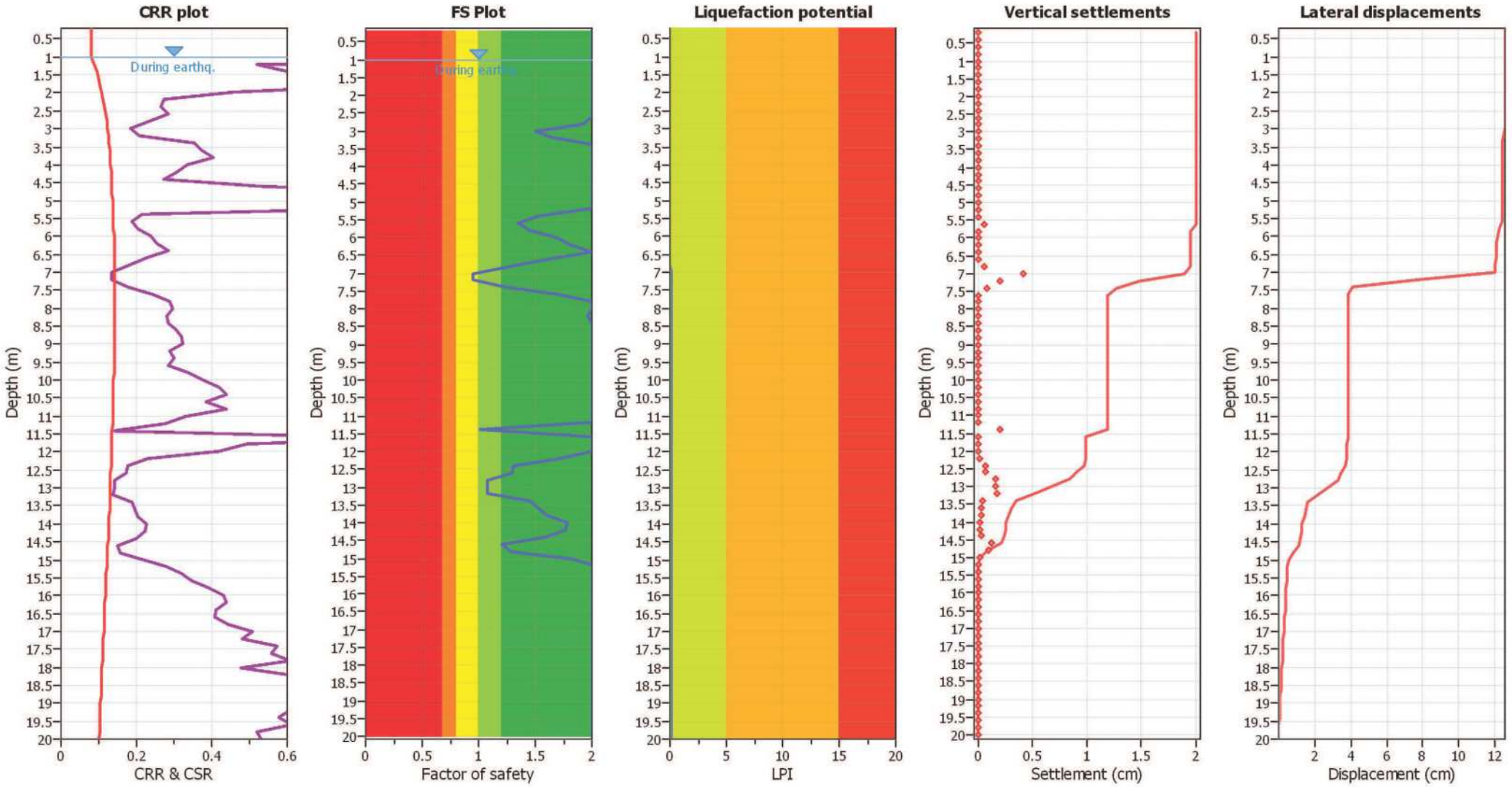






Zone A_1: Cyclic liquefaction likely depending on size and duration of cyclic loading
Zone A_2: Cyclic liquefaction and strength loss likely depending on loading and ground geometry
Zone B: Liquefaction and post-earthquake strength loss unlikely, check cyclic softening
Zone C: Cyclic liquefaction and 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 (erthq.):	1.00 m	Fill weight:	N/A
Fines correction method:	Robertson (2009)	Average results interval:	3	Transition detect. applied:	Yes
Points to test:	Based on Ic value	Ic cut-off value:	2.60	K_σ applied:	Yes
Earthquake magnitude M_w:	5.94	Unit weight calculation:	Based on SBT	Clay like behavior applied:	All soils
Peak ground acceleration:	0.23	Use fill:	No	Limit depth applied:	Yes
Depth to water table (insitu):	1.30 m	Fill height:	N/A	Limit depth:	20.00 m

F.S. color scheme

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

LPI color scheme

- Very high risk
- High risk
- Low risk

GeoLogismiki
Geotechnical Engineers
P.O. Box 33539
621 25 - Serrai - GREECE

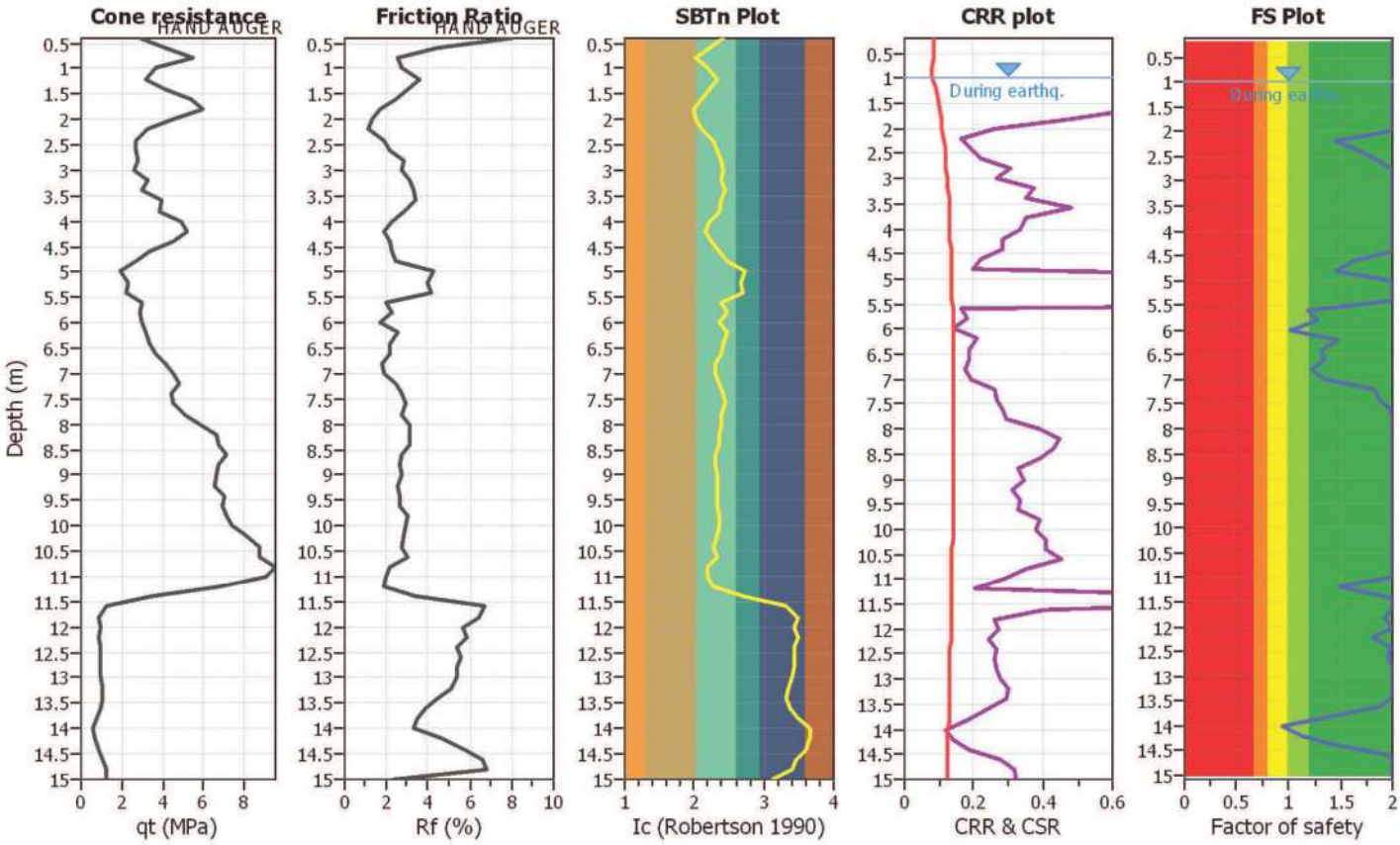
LIQUEFACTION ANALYSIS REPORT

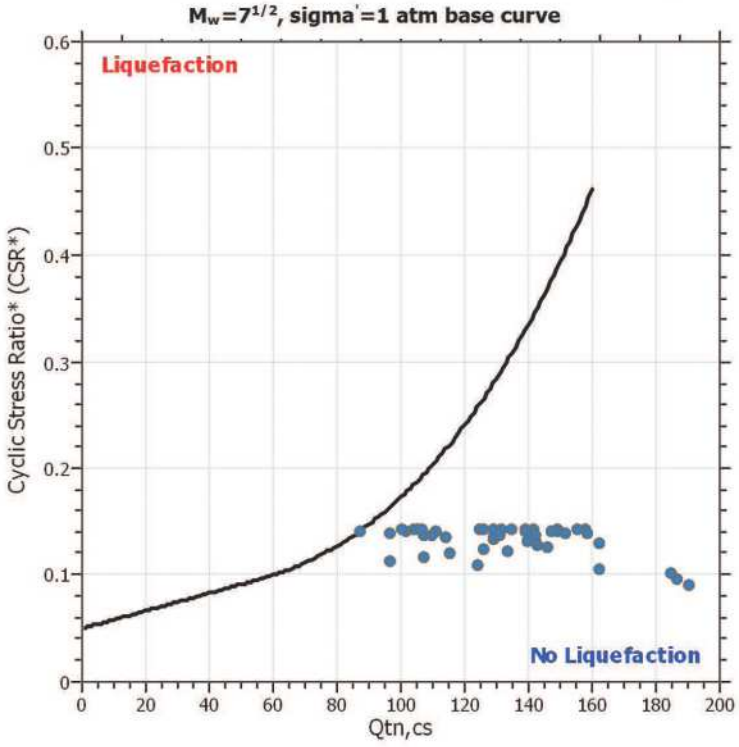
Project title : **Location :**

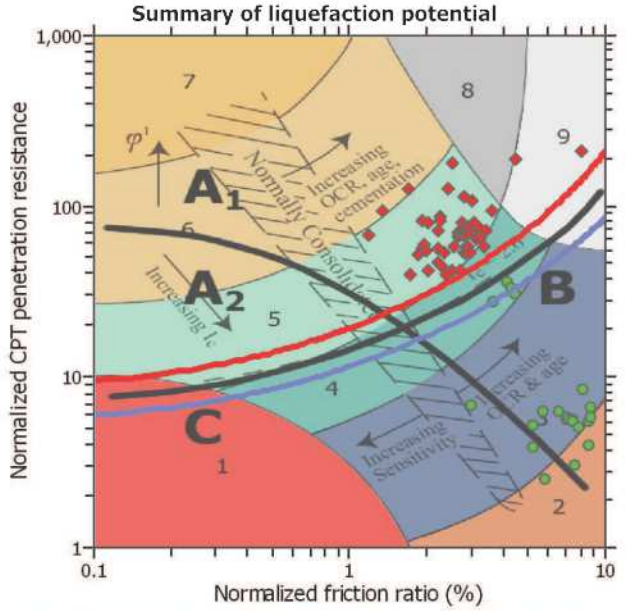
CPT file : CPT 10

Input parameters and analysis data

Analysis method:	Robertson (2009)	G.W.T. (in-situ):	1.30 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:	Yes
Points to test:	Based on Ic value	Average results interval:	3	Fill weight:	N/A	Limit depth:	20.00 m
Earthquake magnitude M_w:	5.94	Ic cut-off value:	2.60	Trans. detect. applied:	Yes		
Peak ground acceleration:	0.23	Unit weight calculation:	Based on SBT	K_σ applied:	Yes		

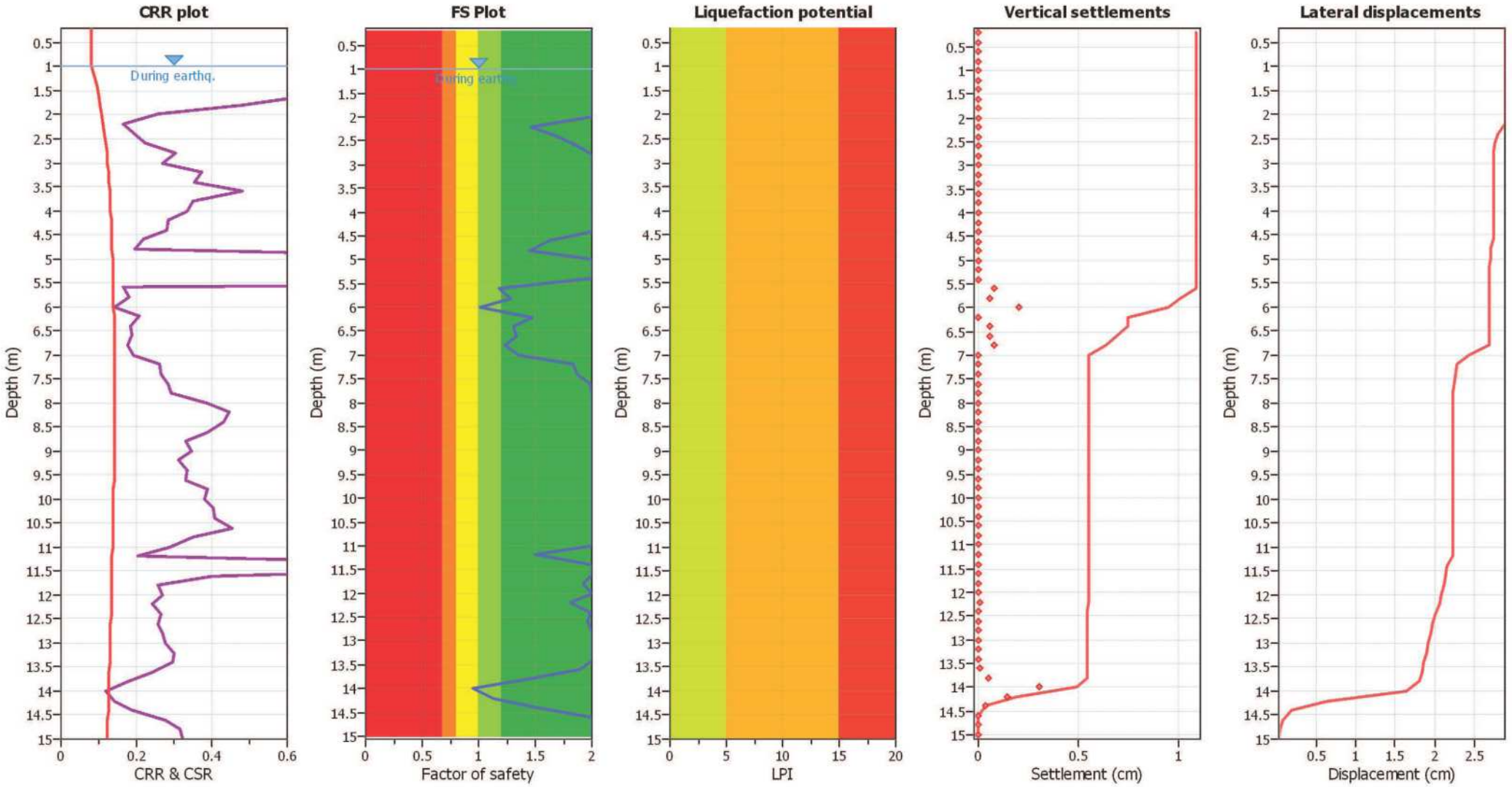






Zone A_1: Cyclic liquefaction likely depending on size and duration of cyclic loading
Zone A_2: Cyclic liquefaction and strength loss likely depending on loading and ground geometry
Zone B: Liquefaction and post-earthquake strength loss unlikely, check cyclic softening
Zone C: Cyclic liquefaction and 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 (erthq.):	1.00 m	Fill weight:	N/A
Fines correction method:	Robertson (2009)	Average results interval:	3	Transition detect. applied:	Yes
Points to test:	Based on Ic value	Ic cut-off value:	2.60	K_σ applied:	Yes
Earthquake magnitude M_w:	5.94	Unit weight calculation:	Based on SBT	Clay like behavior applied:	All soils
Peak ground acceleration:	0.23	Use fill:	No	Limit depth applied:	Yes
Depth to water table (insitu):	1.30 m	Fill height:	N/A	Limit depth:	20.00 m

F.S. color scheme

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

LPI color scheme

- Very high risk
- High risk
- Low risk