



**COMUNE DI CASTENASO**

**P O C 3**

**PIANO OPERATIVO COMUNALE**

(L.R. 24 marzo 2000, n. 20 - art. 30)

**VARIANTE 2**

---

**Relazione Geologica e Sismica**

**Comparto ANS\_C2.1 "De Coubertin"**

---

Adozione D.C.C. n. ____ del __/__/____	Approvazione D.C.C. n. ____ del __/__/____
--	--

---

**il Sindaco**

Carlo GUBELLINI

**l'Assessore all'Urbanistica**

Alberto BIANCOLI

**il Segretario Generale**

Letizia RISTAURI

**ARCH.it Studio**

William BERTI  
Paolo GROSSI  
Luca MAGRI

**Comune di Castenaso**

Fabrizio RUSCELLONI  
Deborah CAVINA  
Leonardo ALTILIA

**STUDIO SAMUEL SANGIORGI**

Geol. Samuel SANGIORGI

Via Valsellustra 32  
40060 Dozza - BOLOGNA



**Studio Samuel Sangiorgi**  
*Geologia Applicata*

**Comune:**

**COMUNE DI CASTENASO (BO)**

**Oggetto:**

***PROPOSTA DI VARIANTE AL POC COMPARTO "DE  
COUBERTIN"***

*RELAZIONE GEOLOGICA E SISMICA DI LIVELLO 3  
(DGR 476/2021)*

**Stesura:**

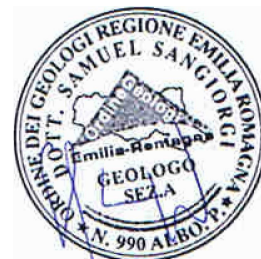
**luglio 2021**

**Elaborazione:**

**Dott. Geol. Samuel Sangiorgi**

**Committente:**

**Castenaso Immobiliare srl**



tel/fax 0542 640279

mail [info@studiosamuelsangiorgi.eu](mailto:info@studiosamuelsangiorgi.eu)

[www.studiosamuelsangiorgi.eu](http://www.studiosamuelsangiorgi.eu)



## Indice generale

<b>1</b>	<b>PREMESSA.....</b>	<b>3</b>
<b>2</b>	<b>ASPETTI METODOLOGICI.....</b>	<b>5</b>
2.1	Studi di riferimento e indagini di repertorio.....	5
2.2	Nuove Indagini geognostiche/geofisiche.....	5
<b>3</b>	<b>CARATTERIZZAZIONE GEOLOGICA.....</b>	<b>11</b>
3.1	Geomorfologia e litostratigrafia sub affiorante.....	11
3.2	Contesto idrogeologico e pericolosità idraulica.....	14
<b>4</b>	<b>CARATTERIZZAZIONE SISMICA.....</b>	<b>17</b>
4.1	Pericolosità sismica di base.....	17
4.2	Gli studi di pericolosità sismica elaborati per la pianificazione territoriale e urbanistica.....	19
4.2.1	<i>Gli Indirizzi tecnici regionali di riferimento: DGR 476/2021.....</i>	<i>19</i>
4.2.2	<i>Il rischio sismico definito nel Piano Territoriale Metropolitano di Bologna.....</i>	<i>20</i>
4.2.3	<i>La microzonazione sismica comunale.....</i>	<i>21</i>
<b>5</b>	<b>APPROFONDIMENTI SISMICI DI LIVELLO 3 (DGR 476/2021).....</b>	<b>23</b>
5.1	Modellazione sismostratigrafica del sottosuolo.....	23
5.2	Modellazione numerica della Risposta Sismica Locale.....	26
5.2.1	<i>Cenni introduttivi.....</i>	<i>26</i>
5.2.2	<i>Input sismici di riferimento.....</i>	<i>27</i>
5.2.3	<i>Modello sismostratigrafico di input.....</i>	<i>29</i>
5.2.4	<i>Esiti delle simulazioni.....</i>	<i>31</i>
5.3	Verifiche quantitative della liquefacibilità e dei cedimenti post sisma.....	33
5.3.1	<i>Cenni introduttivi.....</i>	<i>33</i>
5.3.2	<i>Metodologia delle verifiche.....</i>	<i>34</i>
5.3.3	<i>Esiti delle verifiche.....</i>	<i>39</i>
<b>6</b>	<b>ORIENTAMENTI GEOTECNICI.....</b>	<b>46</b>
6.1	Caratterizzazione geotecnica di massima.....	46
6.2	Ulteriori indicazioni geotecniche.....	48
<b>7</b>	<b>SCHEDA DI SINTESI DELLO STUDIO.....</b>	<b>49</b>

## ALLEGATI:

REPORT INDAGINI GEOGNOSTICHE E GEOFISICHE  
COLONNE GEOTECNICHE DI SINTESI (PROVE CPTE)  
REPORT VERIFICHE LIQUEFAZIONI E CEDIMENTI POST SISMA (PROVE CPTE)

## 1 PREMESSA

Lo Studio scrivente è stato incaricato di redigere le analisi geologiche e sismiche a corredo della proposta di variante al POC, con valore ed effetto di Piano Urbanistico Attuativo relativo al comparto denominato "De Coubertin" nel Comune di Castenaso (figura 1.1).

Per l'area in oggetto, confinante a sud con il comparto ANS C2.1 "Frullo Nord", il Piano Urbanistico prevede un'edificazione residenziale con viabilità interna di accesso e parcheggi pubblici, inoltre spazi verdi, pubblici e privati (figura 1.2). Nel comparto è anche prevista un'area verde di laminazione delle acque.



Figura 1.1 - Localizzazione del comparto "De Coubertin" (Base topografica: Cartografia RER 1:25.000; foto aerea: "Google Earth")





*Figura 1.2 - Stralcio dell'assetto di PUA con individuazione delle aree di lottizzazione previste*

Ai fini dell'approvazione del PUA, il presente studio fornisce ulteriori elementi di caratterizzazione geologica, idrogeologica, geotecnica e sismica, in coerenza con quanto indicato dalla LR 19/2008 e delle delibere regionali di settore, ultima delle quali la DGR 476/2021 - Aggiornamento dell'"Atto di coordinamento tecnico sugli studi di microzonazione sismica per la pianificazione territoriale e urbanistica (artt. 22 e 49, LR 24/2017)" di cui alla deliberazione della Giunta regionale 29 aprile 2019, n. 630, recentemente integrata con la DGR 564/2021.

Più in particolare per questo studio:

- ✓ sono state eseguite indagini geognostiche e geofisiche (penetrometrie elettriche con piezocono CPTU; stendimento sismico MASW/ReMi; registrazioni sismiche HVSR;
- ✓ si sono forniti ulteriori elementi di caratterizzazione geologica, idrogeologica e geotecnica propedeutici alla valutazione di ammissibilità delle previsioni edificatorie, con indicazioni utili ai fini delle successive fasi di progettazione.
- ✓ è stato elaborato un modello numerico monodimensionale di RSL, rappresentativo dell'area in oggetto, secondo la procedura indicata dalla DGR 476/2021 per gli approfondimenti sismici di livello 3;
- ✓ sono state eseguite verifiche quantitative della liquefazione e dei cedimenti post sisma (DGR 476/2021) basate sui dati delle prove CPTU eseguite per questo studio.

## 2 ASPETTI METODOLOGICI

### 2.1 Studi di riferimento e indagini di repertorio

- ✓ Per il contesto geologico e geolitologico → ci si è riferiti alla Carta Geologica in scala 1:10.000 della Regione Emilia-Romagna (pubblicata anche on line nel sito del Servizio Geologico Sismico e dei Suoli – SGSS – della nostra Regione). Per il modello geologico profondo si sono inoltre considerate le sezioni geologiche RER anch'esse pubblicate nel sito internet del SGSS e la Carta Sismotettonica della Regione Emilia-Romagna alla scala 1:250.000 (SGSS RER – CNR - DST Firenze - INGV, aggiornamento 2017);
- ✓ Per il contesto idrogeologico → ci si è riferiti alla tavola Ca.B.1.2 elaborata alla scala 1:10.000 per il PSC dei Comuni dell'Associazione Valle Idice (Viel & Associati, 2007) e ai dati piezometrici ricavati direttamente dalle prove eseguite nel comparto in oggetto;
- ✓ Per la pericolosità idraulica → ci si è riferiti al Piano di Gestione rischio Alluvioni realizzato dalle UoM del Distretto idrografico Appennino Settentrionale (in recepimento alla “direttiva alluvioni 2007/60/CE”) e alla <<Variante ai Piani Stralcio del bacino idrografico del Fiume Reno finalizzata al coordinamento tra tali Piani e il Piano Gestione Rischio Alluvioni (PGRA)>>;
- ✓ Per il contesto di pericolosità sismica locale → ci si è riferiti allo studio di Microzonazione sismica elaborata alla scala 1:5.000 (Tavola Ca.B.1.6a) elaborata per il Piano Strutturale di Castenaso (Viel & Sangiorgi, 2008). Si sono inoltre considerati gli elementi di pericolosità riportati nel Piano Territoriale Metropolitano di Bologna e in particolare la <<Tavola 4 - Carta di area vasta delle aree suscettibili di effetti locali>> alla scala 1:65.000 (per la pianura), approvata con Delibera del consiglio metropolitano n.16 del 12/05/2021;
- ✓ Indagini geognostiche e geofisiche pregresse → si sono considerate le indagini disponibili nella Banca Dati del SGSS regionale. Sono inoltre disponibili prove eseguite per lo studio di MS del PSC 2008 (CPTU; MASW), prove eseguite in limitrofi di comparti inseriti nel POC 2009 (CPTU; MASW), infine le più recenti indagini (CPTU; HVSR) eseguite nel comparto “Frullo Nord” per il POC/PUA (vedi figura 2.1).

### 2.2 Nuove Indagini geognostiche/geofisiche

Per questo studio, sono state complessivamente eseguite **n. 16 penetrometrie statiche con puntale elettrico CPTU** (foto 2.1), approfondite fino a 15 metri dal p.c. Il numero di penetrometrie è certamente ridondante per il Piano Attuativo, tuttavia si è deciso di effettuare già in questa fase di pianificazione un numero sufficiente di prove per ricavare dati di sottosuolo utili ai fini della progettazione delle costruzioni. Le terebrazioni sono state realizzate con un penetrometro dotato di spinta da 200 kN, montato su mezzo semovente cingolato e cocalizzate attraverso un dispositivo GPS portatile.



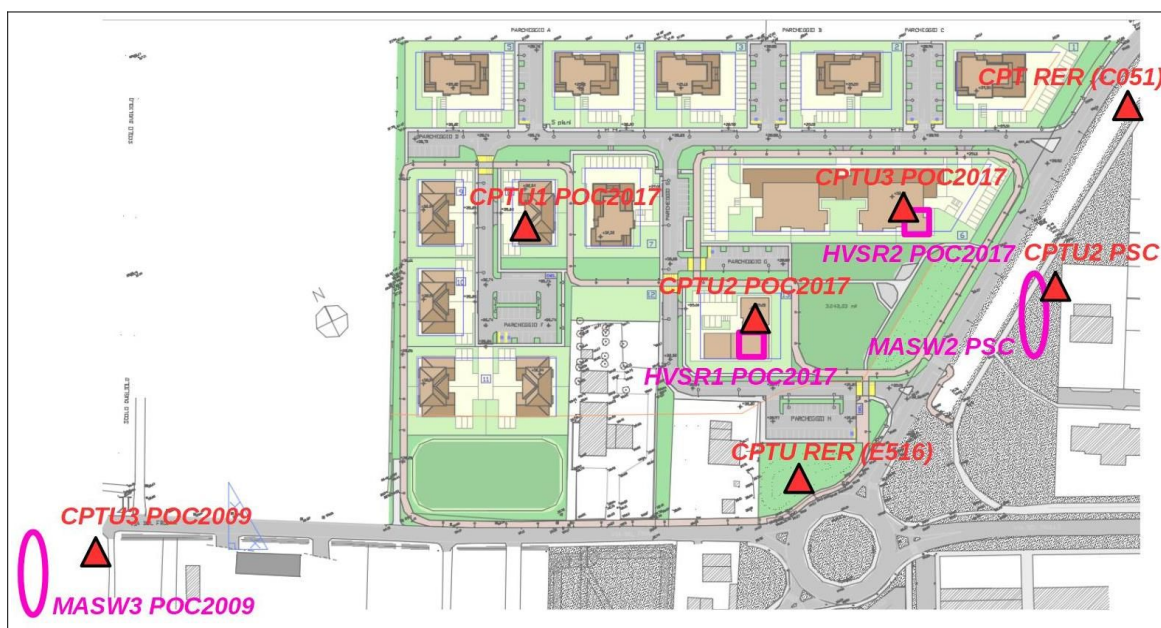


Figura 2.1 – Localizzazione delle indagini geognostiche e geofisiche pregresse, di riferimento per lo studio geologico e sismico redatto per il POC/PUA del limitrofo comparto "Frullo Nord" (geol. S. Sangiorgi, 2017-2018). In rosso: indagini geognostiche; in fuxia: indagini geofisiche

La punta piezometrica utilizzata presenta caratteristiche standard e la speciale attrezzatura utilizzata permette l'acquisizione dei dati ogni cm di avanzamento attraverso lettura diretta delle resistenze. I dati di penetrazione (qc; fs; u2) sono stati elaborati per le verifiche quantitative della liquefazione e cedimenti post sisma e per la stima automatica dei principali parametri meccanici fondamentali.



Foto 2.1 - Prove penetrometriche CPTU eseguite per questo studio

È stato realizzato uno **stendimento sismico lineare MASW/ReMi** (foto 2.2) per la ricostruzione sismostratigrafica locale e in particolare per la stima della velocità di propagazione delle onde sismiche di taglio ( $V_s$ ) nel sottosuolo fino a circa -35÷40 metri di profondità. La metodologia per



la realizzazione di una indagine sismica MASW/ReMi ha previsto acquisizioni dei segnali sismici con sismografo multicanale ABEM RAS24 a 24 canali, passivi e attivi (generati da sorgenti energizzanti artificiali lungo lo stendimento dei geofoni).

*Foto 2.2 - Stendimento sismico MASW/ReMi  
eseguito per questo studio*



*Foto 2.3 - Registrazioni sismiche HVSR eseguite per questo studio*

Sono state infine realizzate n. 2 **registrazioni dei microtremori sismici ambientali HVSR** (foto 2.3) con strumento tromografico portatile. Lo strumento dispone di tre canali di acquisizione connessi a tre velocimetri elettrodinamici ad alta risoluzione, in grado di misurare le componenti della velocità (moto) di ogni strato lungo le direzioni N-S; E-W; H-V. L'elaborazione del microtremore misurato, fornisce i rapporti spettrali HVSR o H/V (Nogoshi & Igarashi, 1970), risultando efficace per la stima delle frequenze fondamentali di risonanza fr del sottosuolo:  $fr = Vs/4 \cdot H$  (con  $H$  = spessore strato). La stima delle frequenze amplificanti del terreno consente anche una preliminare valutazione delle eventuali "doppie risonanze" con le tipologie di manufatti di progetto.

Le indagini sono state tutte realizzate alla quota attuale di campagna e sono localizzate nella figura 2.2. In calce al testo si allegano i grafici di sintesi delle prove eseguite.

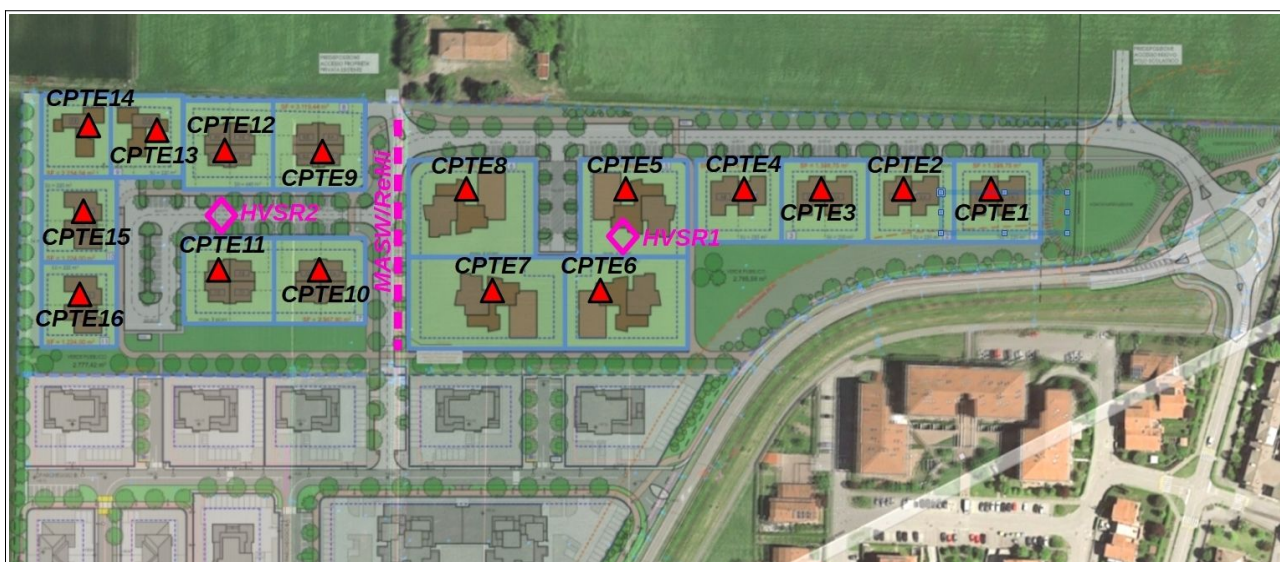


Figura 2.2 – Localizzazione delle indagini eseguite nel comparto "De Coubertin" (penetrometrie CPTe; stendimento MASW/ReMi; registrazioni HVSR)



### 3 CARATTERIZZAZIONE GEOLOGICA

#### 3.1 Geomorfologia e litostratigrafia sub affiorante

L'area studiata si colloca nel contesto più generale di pianura alluvionale e più in particolare in ambito deposizionale di “depositi di canale e argine indifferenziati” attribuibili ai corsi d'acqua Savena e Idice. Morfologicamente, l'area è situata a quote comprese tra 40,0 m a 39,5 metri circa slmm, con un declivio verso NE (cfr. Carta Tecnica Regionale).

La figura 3.1 riporta uno stralcio della cartografia geologica elaborata dal SGSS regionale: essa distingue le Unità continentali alluvionali secondo la convenzionale classificazione stratigrafica sequenziale (cicli deposizionali), comprese nel principale “Supersistema Emiliano-Romagnolo” (R.E.R., ENI-AGIP, 1998).

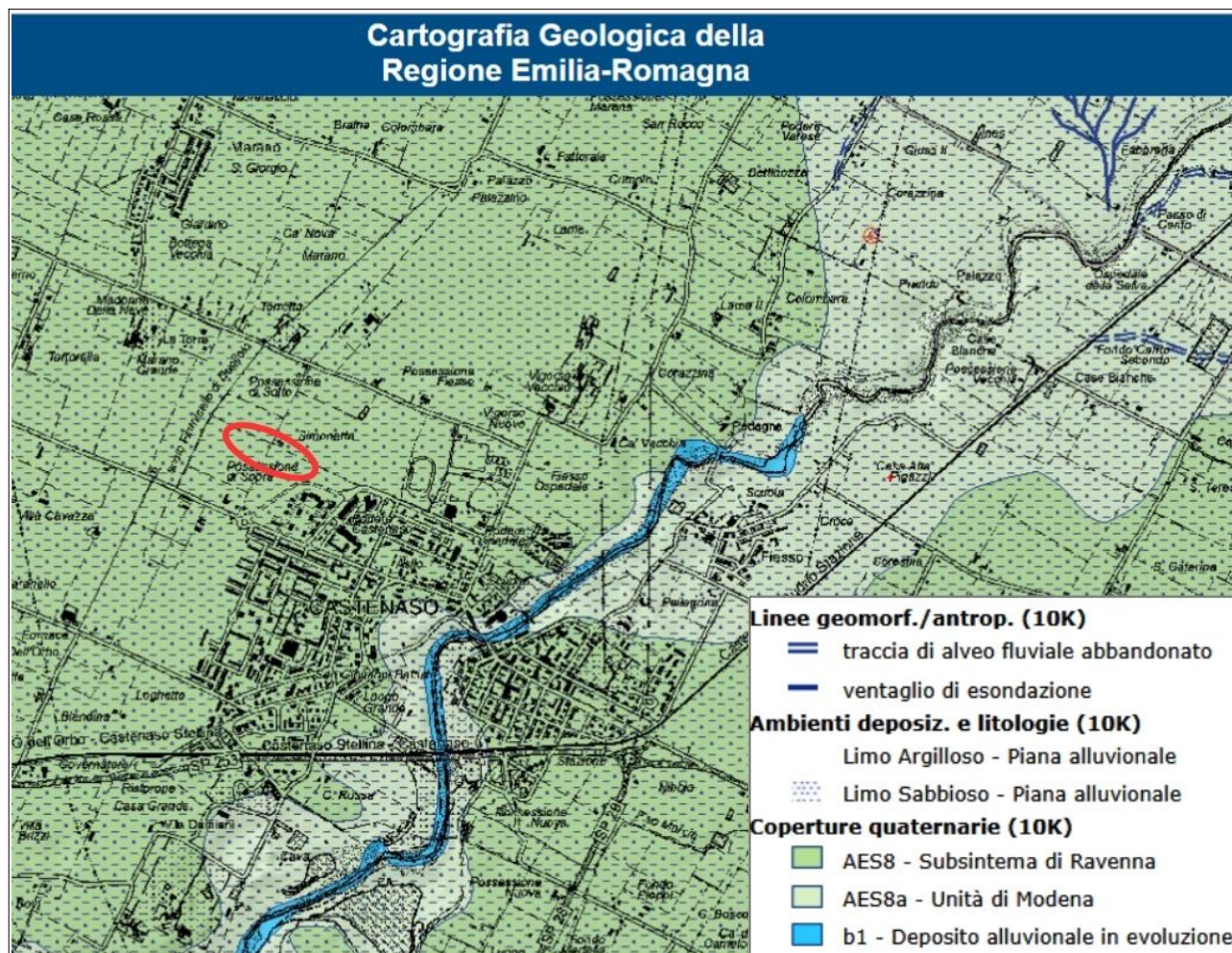


Figura 3.1 - Stralcio della Cartografia Geologica interattiva pubblicata nel sito internet del SGSS della Regione Emilia-Romagna

I depositi alluvionali relativamente più recenti vengono attribuiti al “Sintema Emiliano-Romagnolo Superiore” (AES) e sono suddivisi in sequenze deposizionali di diverso ordine gerarchico



(subsintemi identificati con sigle da AES5 – più antichi - ad AES8 – più recenti), delimitati in genere da scarpate di erosione. I sedimenti affioranti nell'area di studio sono compresi nel "Subsistema di Ravenna" (identificati con sigla AES8). Si tratta di depositi alluvionali recenti, costituiti da ghiaie sabbiose, sabbie e limi ricoperti da una coltre fine (limi e argille) discontinua; vengono attribuiti al Pleistocene superiore – Olocene. In particolare, nell'area studiata, i dati pregressi del sottosuolo meno profondo evidenziano (dalla superficie):

- 1) sedimenti prevalentemente fini (argilloso limosi) con intercalati rari intervalli limoso sabbiosi profondità di circa 20 metri;
- 4) intervalli prevalentemente sabbioso limosi fino a circa 27÷30 metri, con presenza di strati sabbiosi di media densità (cfr. CPTU2\_PSC e CPTU3\_POC2009).

Le penetrometrie realizzate nel comparto hanno consentito un ulteriore affinamento delle conoscenze del sottosuolo. Gli esiti delle indagini sono sintetizzati nelle due sezioni elaborate per questo studio (A-A' e B-B') e rappresentate nelle figure 3.2 e 3.3.

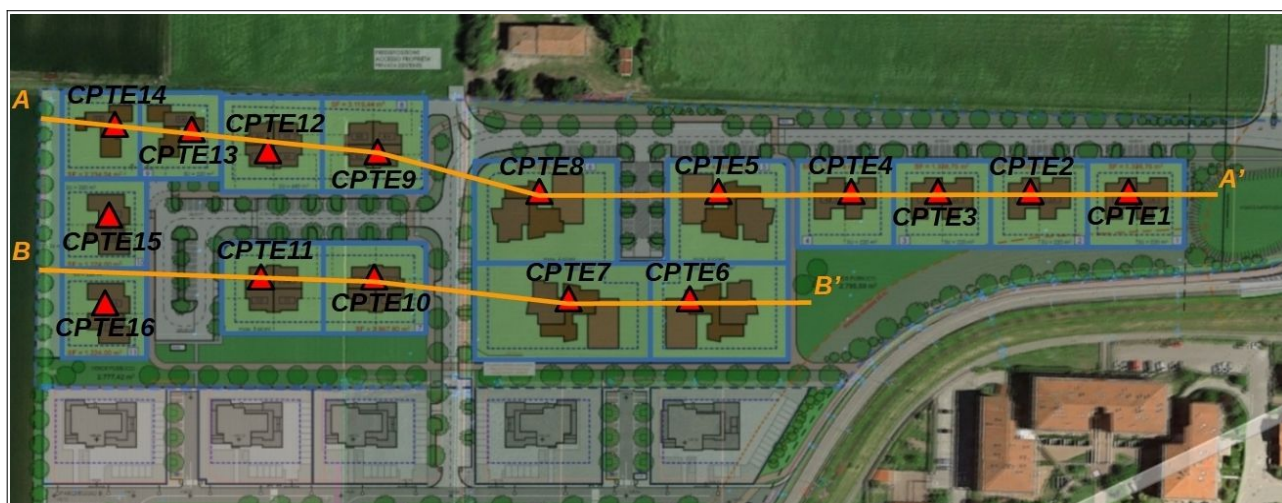


Figura 3.2 - Tracce delle sezioni geologiche di sintesi elaborate per il comparto "De Coubertin"

Le nuove indagini penetrometriche hanno in parte confermato il contesto deposizionale già noto e descritto, con sedimenti più superficiali limoso argillosi (fino a -3,0÷4,0 metri), molto rimaneggiati fino a circa -0,8÷1,2 metri (suolo recente) ed essiccati fino a circa 1,5÷1,8 metri. Le prove CPT hanno poi attraversato sedimenti prevalentemente argillosi con rare intercalazioni limoso sabbiose. Le prove (CPT11-12-13) hanno tuttavia intercettato spessori più potenti di limi sabbiosi e sabbie a dimostrare la presenza di inviluppi di paleoalvei, di modesto sviluppo laterale, che attraversano il settore occidentale del comparto e che si sviluppano in direzione nord.

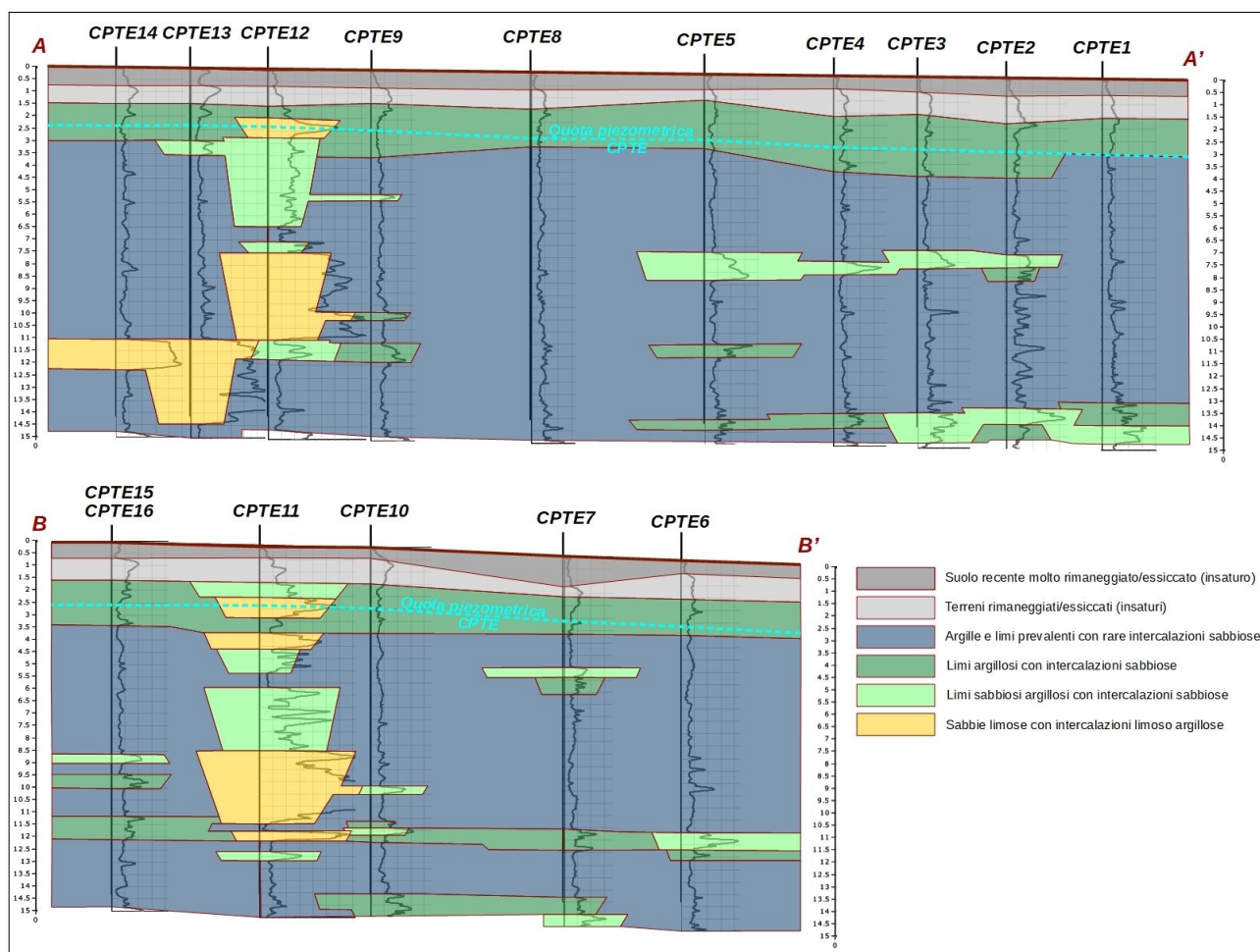


Figura 3.3 - Sezioni geologiche di sintesi elaborate per il comparto "De Coubertin"

### 3.2 Contesto idrogeologico e pericolosità idraulica

La tavola Ca.B.1.2 elaborata alla scala 1:10.000 per il PSC dei Comuni dell'Associazione Valle Idice (Viel & Associati, 2007), riporta la geometria della tavola d'acqua meno profonda (figura 3.2): si evince un deflusso sotterraneo diretto verso NE e un livello statico di circa 38 m slmm. La prima falda è pertanto caratterizzata da una soggiacenza media di circa 2 metri.

Le prove CPTe eseguite nell'area di intervento hanno riscontrato soggiacenze coerenti con l'inquadramento idrogeologico sopra descritto, comprese tra 2,3 metri e 3,0 metri. Occorre precisare che le indagini sono state eseguite in un periodo caratterizzato da scarse precipitazioni meteoriche. Le differenze delle quote piezometriche tra prova e prova sono anche da imputarsi alla blanda variabilità morfologica del piano campagna.

In conclusione, la prima falda intercettata dalle indagini penetrometriche è caratterizzata da mediocri caratteristiche idrogeologiche in termini di permeabilità e trasmissività; inoltre, il deflusso è ancora blandamente condizionato verso SE dall'azione drenante del torrente Idice, il cui alveo attraversa il Capoluogo inforato nei suoi depositi alluvionali.



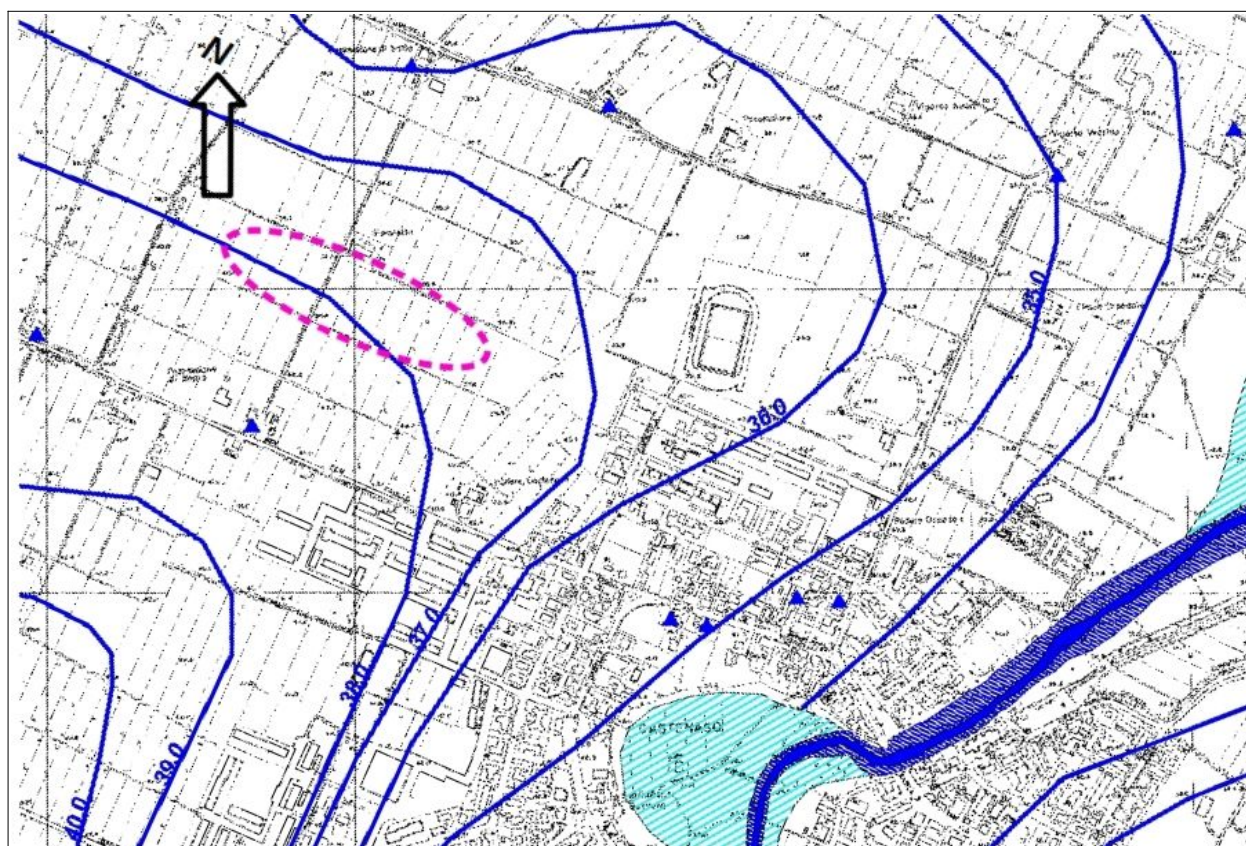


Figura 3.4 – Stralcio della Carta Idrogeologica – Tav. Ca.B.1.2 – prodotta per le analisi conoscitive del PSC associato Valle Idice. L'area di studio è localizzata nel cerchiato fucsia

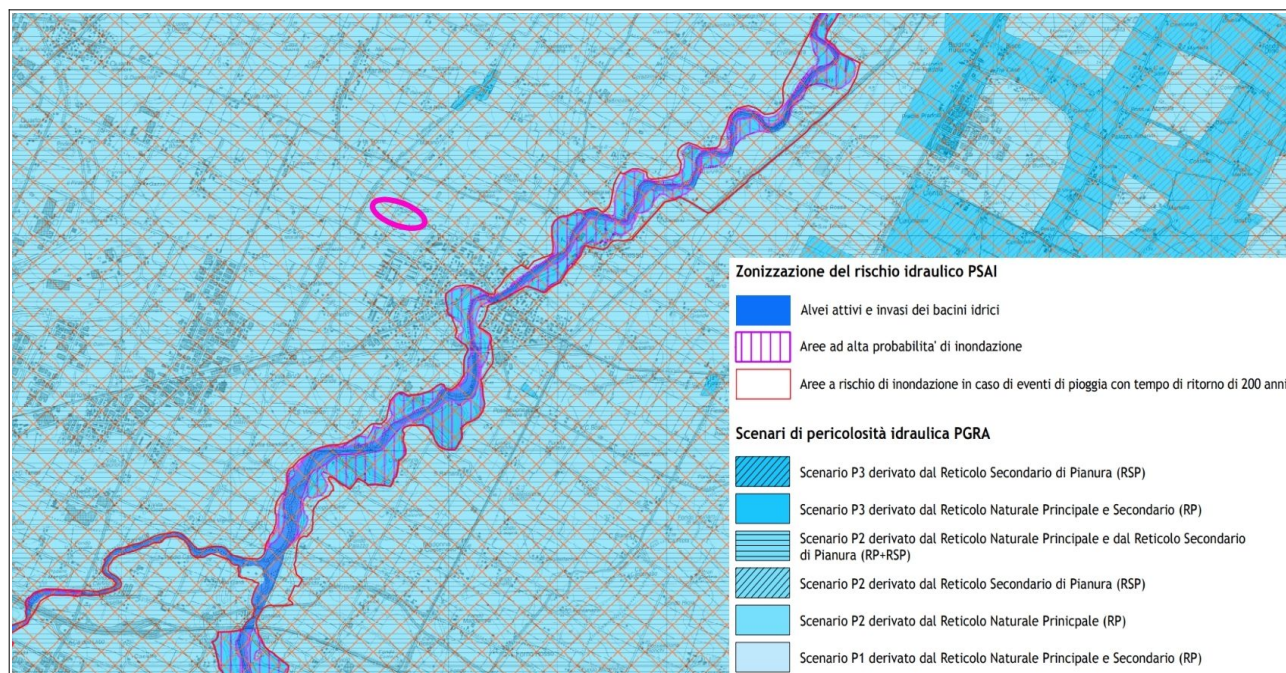


Figura 3.5 - Stralcio della tavola 3 del PTM di Bologna "Carta di area vasta del rischio idraulico, rischio da frana e dell'assetto dei versanti" (foglio IV, scala 1:25.000). L'area di studio è localizzata nel cerchiato fucsia

Dal punto di vista idraulico, la regimazione locale secondaria è fornita dai fossi di testata e trasversali dei campi agricoli. Non sussistono, comunque, particolari criticità idrauliche. Ciò è confermato anche dalla cartografia prodotta per il Piano di Gestione del Rischio di Alluvioni (Direttiva Europea 2007/60/CE), che inserisce l'area studiata nello scenario "P2" (alluvioni poco frequenti: TR 100-200 anni) relativamente al reticolo naturale e al reticolo secondario artificiale (scoli di bonifica).

La figura 3.4 riporta uno stralcio della tavola 3 (foglio IV, scala 1:25.000) del PTM "Carta di area vasta del rischio idraulico, rischio da frana e dell'assetto dei versanti" che per la pianura riassume le criticità di carattere idraulico desunte dal PGRA e dal PSAI vigente.

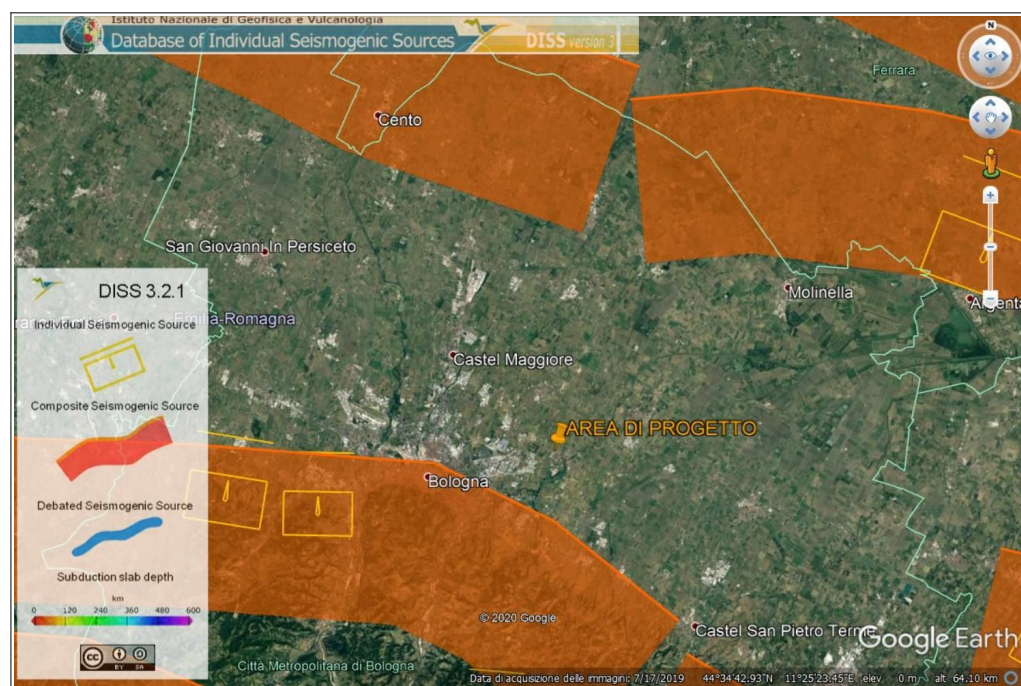


## 4 CARATTERIZZAZIONE SISMICA

### 4.1 Pericolosità sismica di base

L'ultima zonazione sismogenica del territorio nazionale è nota con la semplice sigla "ZS9" (2004), prodotta dall'Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia (INGV). Questa zonazione rappresenta il più recente riferimento per gli studi di pericolosità sismica del territorio italiano, elaborata riferendosi anche i più recenti background informativi sui terremoti ed in particolare le ultime banche dati relative alle sorgenti sismogeniche italiane DISS<sup>1</sup> 3.2.1 e il catalogo CPTI<sup>2</sup>.

*Figura 4.1 -  
Distribuzione  
delle sorgenti  
sismogenetiche  
contenute in  
DISS 3.2.1  
(foto aerea:  
Google Earth)*



L'area di studio ricade nella macrozona sismogenica 612 (ZS9), con magnitudo massima attribuita  $M = 6,14$ ; la sismicità è correlabile alla tettonica attiva del fronte compressivo del margine appenninico sepolto. Più nel dettaglio (figura 4.1) la banca dati DISS 3.2 indica che l'area studiata ricade poco a nord della fascia sismogenica ITCS047 (Castelvetro di Modena-Castel San Pietro Terme) alla quale è attribuita una magnitudo di riferimento ( $TR = 475$  anni) pari a  $M_w = 6,0$ . Questa magnitudo è fondamentalmente legata ai terremoti storici del bolognese del 1505 e 1929.

Dai cataloghi storici e dalla Banca Dati delle intensità macrosismiche elaborato da INGV (DBMI, 2015), per il Capoluogo sono documentati 14 eventi sismici (figura 4.2), tuttavia caratterizzati da intensità non particolarmente elevate, fino a 5-6 (terremoti "Emilia Romagna Orientale" del 1909 e bolognese del 1929).

<sup>1</sup> <<Database of Potential Sources for Earthquake Larger than  $M_{5.5}$  in Italy">> (Valensise e Pantosti, 2001)

<sup>2</sup> <<Catalogo Parametrico dei Terremoti Italiani", Gruppo di lavoro CPTI, 1999-2002>>

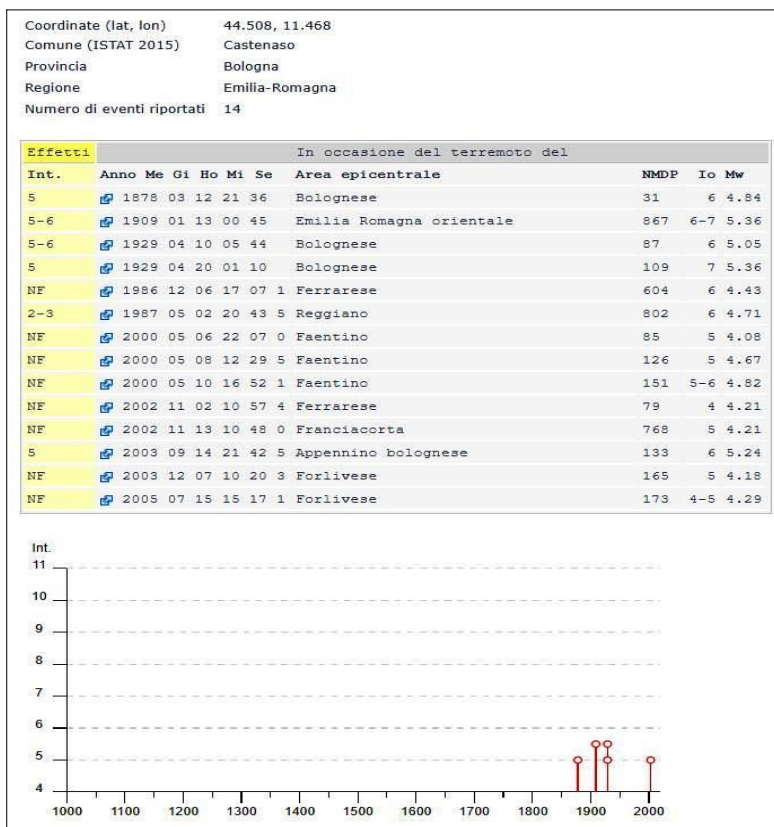


Figura 4.2 - Diagramma temporale dei principali eventi sismici che hanno interessato l'area di studio macrosismiche (fonte: DBMI15 – scaricabile dal sito internet INGV)

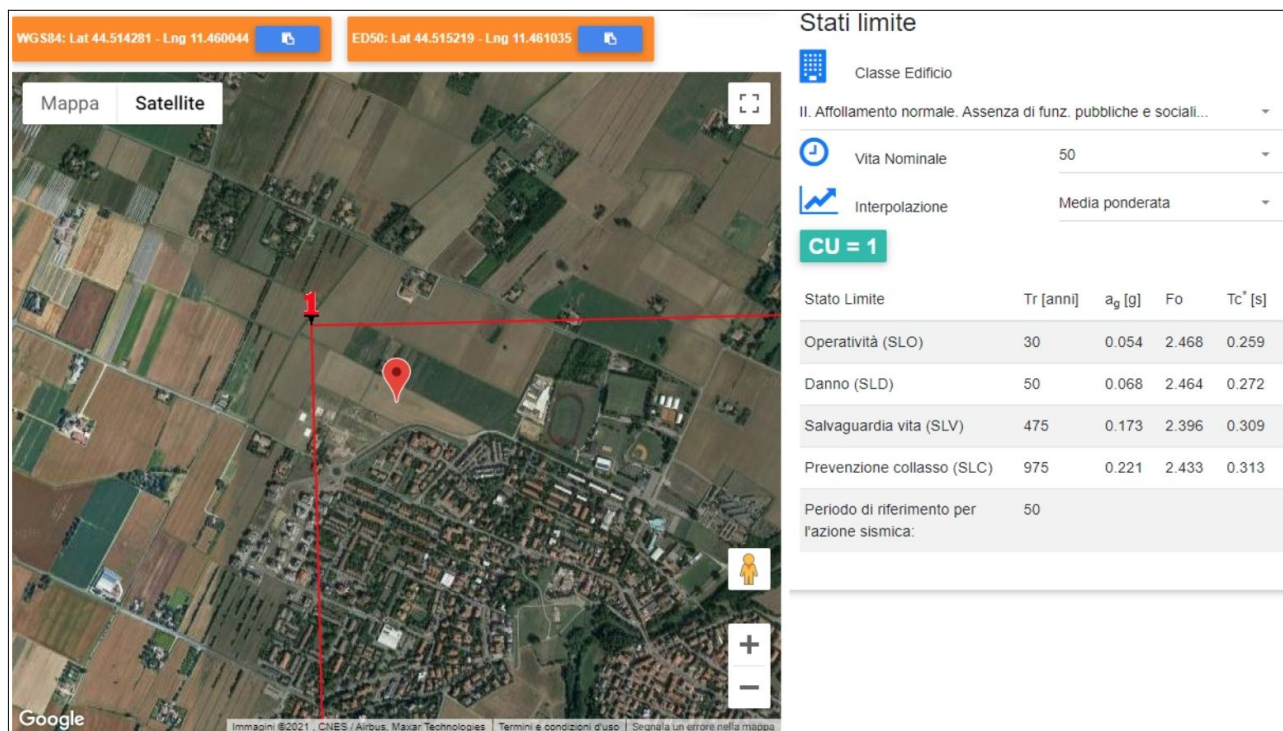


Figura 4.3 – Determinazione dei parametri sismici di base da utilizzare per l'analisi della risposta sismica locale (DGR 476/2021) e per le verifiche dell'azione sismica - progettazione ordinaria (NTC 2018)

La pericolosità sismica locale di riferimento, sia per la pianificazione territoriale (DGR 476/2021) sia per la progettazione di costruzioni (NTC 2018), viene definita mediante un approccio "sito dipendente" e basato su una "griglia di riferimento" di punti, costruita per l'intero territorio



nazionale; ad ogni punto vengono attribuiti, a seconda del periodo di ritorno atteso per il terremoto, valori di  $a_g$  di riferimento al "bedrock rigido" ( $a_{g,ref}$ ) e dei principali parametri "spettrali" da utilizzare per il calcolo dell'azione sismica. La griglia di riferimento ed i dati di pericolosità sismica si basano sul modello di pericolosità sismica MPS04\_S1 definito dall'INGV, pubblicati nel sito <http://esse1.mi.ingv.it/>. Nello specifico, la  $a_{g,ref}$  per l'area di studio è determinata sulla base delle coordinate corrispondenti grossomodo al baricentro dei due sub compartimenti, ricavate con il supporto della georeferenziazione proposto dal programma on-line <<GeoStru Parametri Sismici>> (figure 4.3). All'area di studio viene attribuita una  $a_{g,ref}$  pari a 0,173g ( $T_R = 475$  anni).

## **4.2 Gli studi di pericolosità sismica elaborati per la pianificazione territoriale e urbanistica**

### **4.2.1 Gli indirizzi tecnici regionali di riferimento: DGR 476/2021**

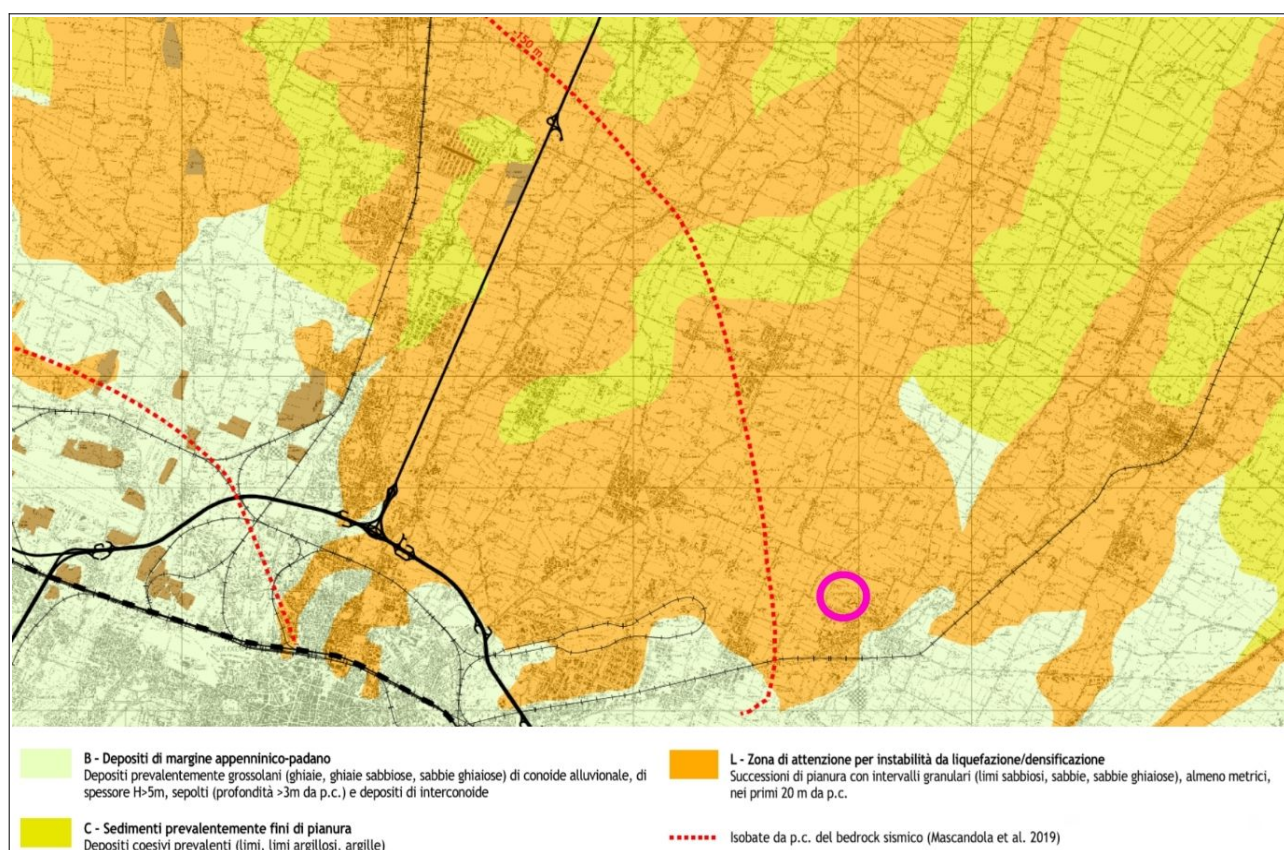
La Regione Emilia-Romagna è dotata di indirizzi tecnici di riferimento per gli studi di pericolosità e microzonazione sismica a supporto della pianificazione territoriale e urbanistica: la DAL 112/2007 e le successive deliberazioni d'aggiornamento (DGR 2193/2015; DGR 630/2019; DGR 476/2021). Con l'emanazione delle Delibere successive alla DAL 112/2007 vengono introdotti sostanziali aggiornamenti agli indirizzi tecnici di riferimento per le analisi sismiche da espletare a supporto della pianificazione territoriale e urbanistica. Tali aggiornamenti hanno infatti tenuto conto delle successive Norme Tecniche per le Costruzioni (D.M. 14/1/2008), delle ulteriori esperienze derivate dall'applicazione della DAL 112/2007 e delle specifiche esperienze seguite agli eventi sismici italiani di L'Aquila 2009 e della pianura emiliana del 2012. In sintesi, le principali novità consistono:

- nelle rimodulazioni degli abachi di microzonazione sismica da considerarsi per le analisi semplificate ("livello 2");
- nella definizione di fattori di amplificazione riferiti all'accelerazione spettrale  $SA_1$ ,  $SA_2$ ,  $SA_3$ ,  $SA_4$  (per intervalli di periodo  $T$  rispettivamente di 0,1-0,5s, 0,4-0,8s, 0,7-0,11s, 0,5-1,5s);
- nella definizione di un ulteriore fattore di amplificazione riferito all'intensità spettrale di Housner  $SI_3$  (per l'intervallo di periodo  $T$  compreso tra 0,5 s e 1,5 s);
- nella definizione dell'input sismico ( $a_g$  al sito di riferimento) che ora è definito in base ai valori di pericolosità sismica elaborati dall'INGV per tutto il territorio nazionale sui punti di una griglia di passo pari a 0,05° (reticolo analogo a quello previsto per le NTC 2008);
- nella predisposizione di cartografie delle frequenze naturali (per gli studi territoriali di "livello 1").

I più recenti aggiornamenti agli indirizzi regionali, apportati con la DGR 476/2021 (e DGR integrativa 564/2021), hanno infine riguardato la selezione di nuovi segnali (accelerogrammi) di riferimento per le analisi di risposta sismica locale negli studi di terzo livello. Rispetto ai precedenti indirizzi, approvati con DGR 630/2019, si è quindi proceduto alla sostituzione dell'Allegato A4.

#### 4.2.2 Il rischio sismico definito nel Piano Territoriale Metropolitano di Bologna

Il PTM di Bologna è dotato di uno studio di pericolosità sismica preliminare relativo a tutto il territorio amministrativo competente. Gli esiti di tali studi sono descritti nel Quadro Conoscitivo e ulteriormente sintetizzati nella tavola 4 “Carta di area vasta delle aree suscettibili di effetti locali” alla scala 1:65.000 (per la pianura), con stesura approvata nel maggio 2021. Tale tavola costituisce il primo livello di approfondimento sismico richiesto dagli Indirizzi regionali di riferimento e dalla LR 24/2017, e identifica gli scenari di pericolosità sismica locale dell’intero territorio provinciale. La citata Tavola fornisce anche le prime indicazioni sui limiti e sulle condizioni richieste per orientare le scelte di pianificazione alla scala comunale verso ambiti meno esposti alla pericolosità sismica.



*Figura 4.4 – Stralcio della Tavola 4 “Carta di area vasta delle aree suscettibili di effetti locali” scala 1:65.000, redatta per il Piano Territoriale Metropolitano di Bologna. Si riportano gli elementi indicati in legenda che risultano di interesse per l’area studiata (evidenziata nel cerchiato fucsia)*

Occorre rammentare che i contenuti sul “rischio sismico” riportati nel PTM rappresentano un ulteriore aggiornamento degli approfondimenti sismici preliminari già aspletati in precedenza per il PTCP (cfr. “Variante al PTCP in materia di Rischio Sismico>>”, approvata nel 2013).

La tavola 4 del PTM include l’ambito studiato nella <<zona di attenzione per instabilità da liquefazione/densificazione>> (figura 4.4). Per tale area, sono richiesti approfondimenti sismici di



livello 3, in coerenza con i contenuti degli Indirizzi regionali di settore, da espletare nelle fasi di pianificazione territoriale/urbanistica comunale.

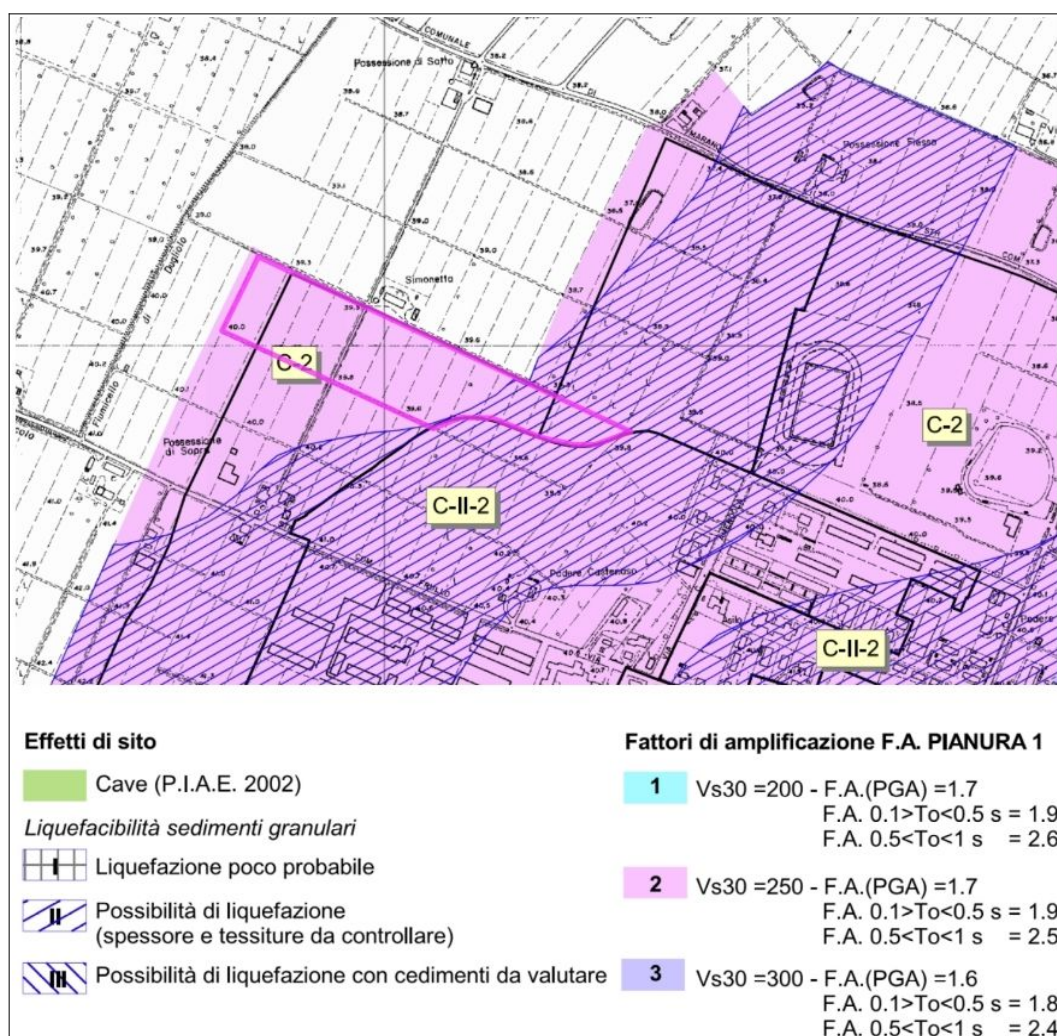
#### 4.2.3 La microzonazione sismica comunale

Lo studio geologico e sismico elaborato a corredo del PSC di Castenaso (Viel & Sangiorgi, 2008), ha individuato alla scala comunale le principali condizioni di pericolosità sismica locali, ed elaborato la Microzonazione sismica di secondo livello richiesta dalla DAL 112/2007 per le aree urbane e urbanizzabili

Si tratta di uno studio necessariamente da aggiornare, tuttavia propone una delimitazione delle aree suscettibili di effetti locali e una quantificazione semplificata dei fattori di amplificazione (microzonazione sismica di livello 2) indicati nella DAL 112/2007.

La figura 4.5 propone uno stralcio della tavola Ca.B.1.6a <<Microzonazione sismica>> elaborata alla scala 1:5.000: si evince come il comparto studiato ricada in due distinte zone: la "C-2" (il settore centro-occidentale) e la "C-II-2" (il settore orientale).

*Figura 4.5 - Stralcio della tavola Ca.B.1.6a elaborata per lo studio di MS di Castenaso. L'area di studio è delimitata nel poligono fucsia*



Le citate zone omogenee sono così definite:

**C-2** = sottosuolo di fondazione "C" ( $180 < V_{s30} < 360$  m/s), non risultano sedimenti liquefacibili sotto impulsi ciclici, nei primi 15 metri di sottosottosuolo. Fattori di amplificazione locale  $FA_{Pga} = 1,7$   $FA_{SI} = 1,9$  ( $0,1s < T_0 < 0,5s$ )  $FA_{SI} = 2,5$  ( $0,5s < T_0 < 1,0s$ )

**C-II-2**= sottosuolo di fondazione "C" ( $180 < V_{s30} < 360$  m/s) sedimenti con possibilità di liquefazione (spessore e tessiture da controllare). Fattori di amplificazione locale  $FA_{SI} = 1,9$  per periodi da 0.1 secondi a 0.5 secondi;  $FA_{SI} = 2.5$  per periodi da 0.5 secondi a 1 secondo.

Per questo studio, si sono dunque espletati gli ulteriori approfondimenti fino al livello 3 (DGR 476/2021, necessari a quantificare la risposta sismica locale e verificare la propensione alla liquefacibilità/densificazione dei sedimenti in caso di sisma.

## 5 APPROFONDIMENTI SISMICI DI LIVELLO 3 (DGR 476/2021)

### 5.1 Modellazione sismostratigrafica del sottosuolo

Per l'analisi numerica della RSL è di fondamentale importanza l'elaborazione di un modello sismostratigrafico profondo il più possibile oggettivo. In tal senso, risultano di basilare supporto i dati e gli studi del SGSS regionale e in particolare le sezioni geologiche RER (figura 5.1) e gli approfondimenti espletati per lo studio di microzonazione sismica dei Comuni interessati dal sisma emiliano del 2012.

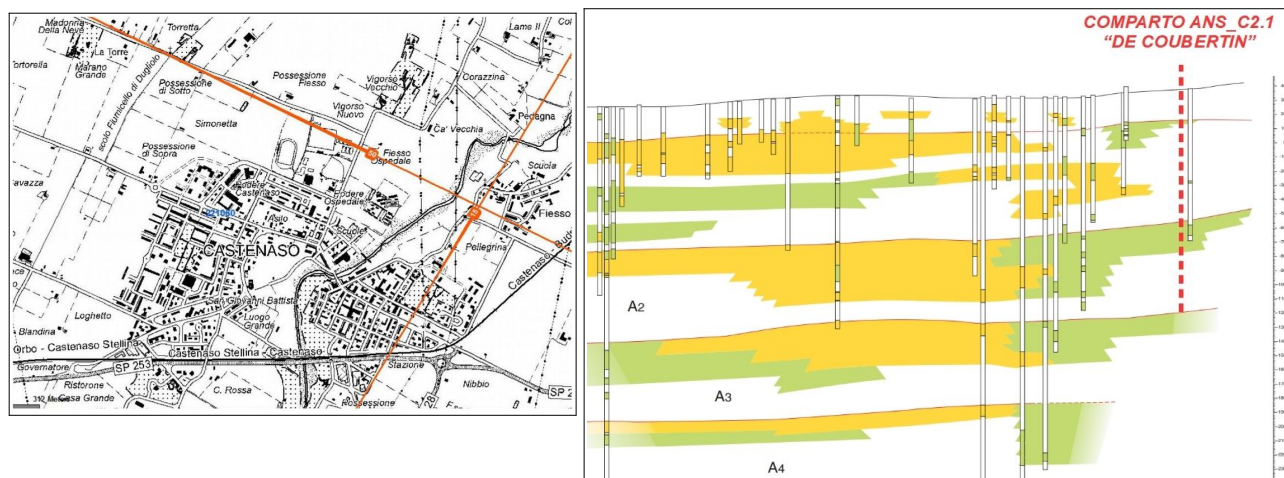


Figura 5.1 - Sezioni geologiche pubblicate dal SGSS regionale e stralcio della sezione n.50

Tali studi hanno ad esempio confermato come il primo forte contrasto di impedenza si ha nei depositi alluvionali, in genere tra la base del Sintema Emiliano-Romagnolo Superiore (SERS, datata 400.000-450.000 anni) e la base del subsintema AES6 (datata 230.000-250.000 anni), mentre una seconda importante discontinuità sismica corrisponde alla più profonda interfaccia da depositi alluvionali e bedrock marino. Gli studi del SGSS regionale, sintetizzati nella “*Carta Sismotettonica della Regione Emilia-Romagna e aree limitrofe*” (scala 1:250.000) e redatta a cura del SGSS regionale, consentono di stimare la profondità della base del SERS a circa -140 metri slmm (figura 5.2), cioè a circa -170÷180 metri rispetto al piano campagna locale.

Le indagini effettuate nell'area di studio, e in particolare lo stendimento sismico MASW/ReMi, hanno consentito la stima della velocità delle onde di taglio fino a una profondità di circa 35÷40 metri, ricavando una Vs30 pari a 245 m/s (figura 5.3).

Le due registrazioni HVSR, eseguite anch'esse nell'area di studio e rappresentate nella figura 5.4, hanno inoltre evidenziato un principale picco spettrale (seppur blando, con rapporto H/V pari a 1,8) a circa 0,8 Hz, correlabile a un riflettore sismico profondo (>100 metri). Le registrazioni evidenziano un picco H/V di bassa intensità a circa 4,0÷4,5 Hz, presumibilmente correlabile al contrasto di impedenza tra i depositi meno consistenti subaffioranti e i depositi alluvionali più consistenti e/o addensati (tetto dell'subsintema AES7?).



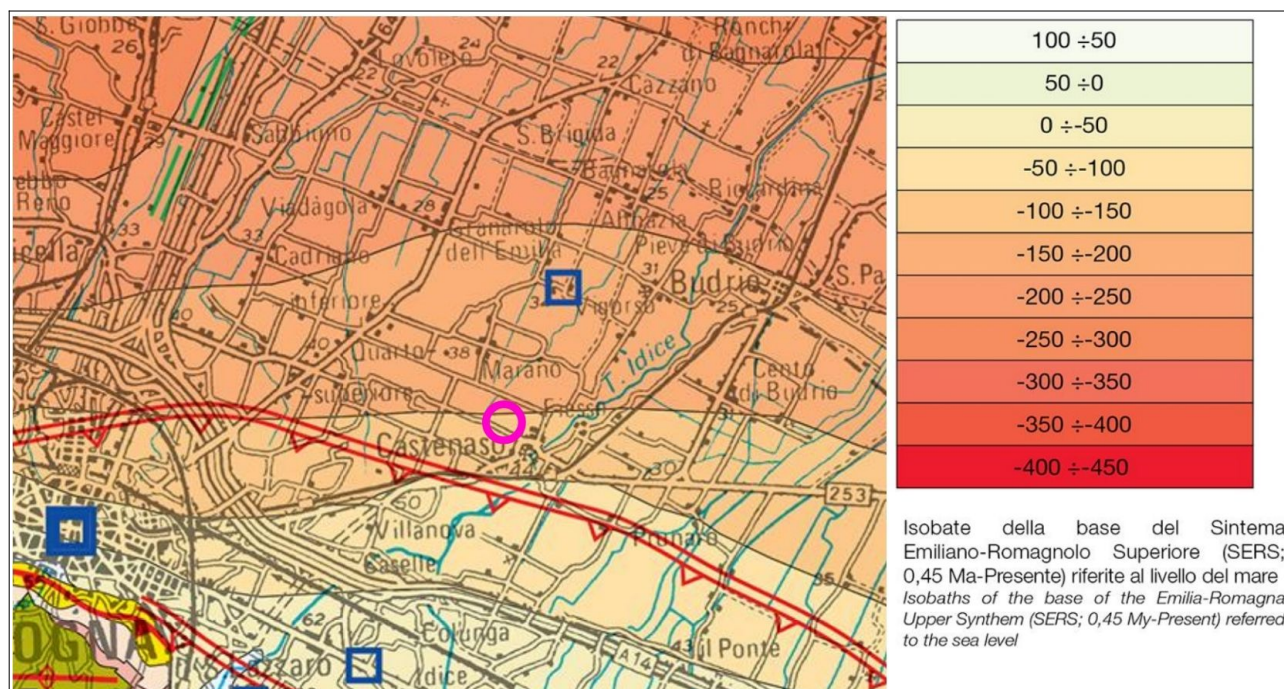


Figura 5.2 – Stralcio della “Carta Sismotettonica della Regione Emilia-Romagna e aree limitrofe” - scala 1:250.000 (SGSS RER – CNR - DST Firenze - INGV, aggiornamento 2017). La cartografia riporta le isobate della base dello spessore di depositi alluvionali corrispondenti al Sintema SERS. L’area di studio è localizzata nel cerchiato fucsia

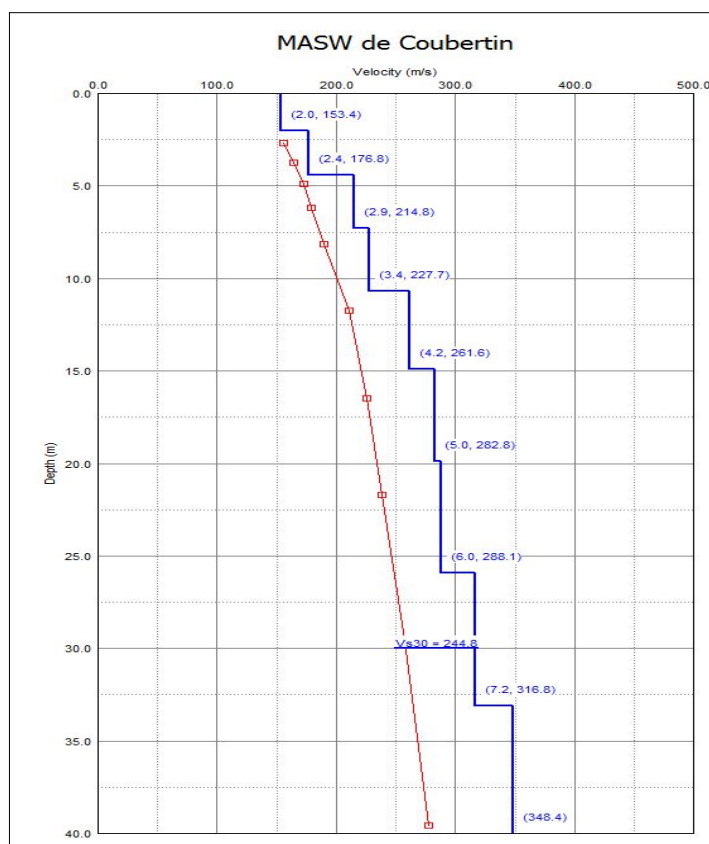


Figura 5.3 – Modello sismostratigrafico ottenuto dallo stendimento MASW/ReMi eseguito nel comparto studiato



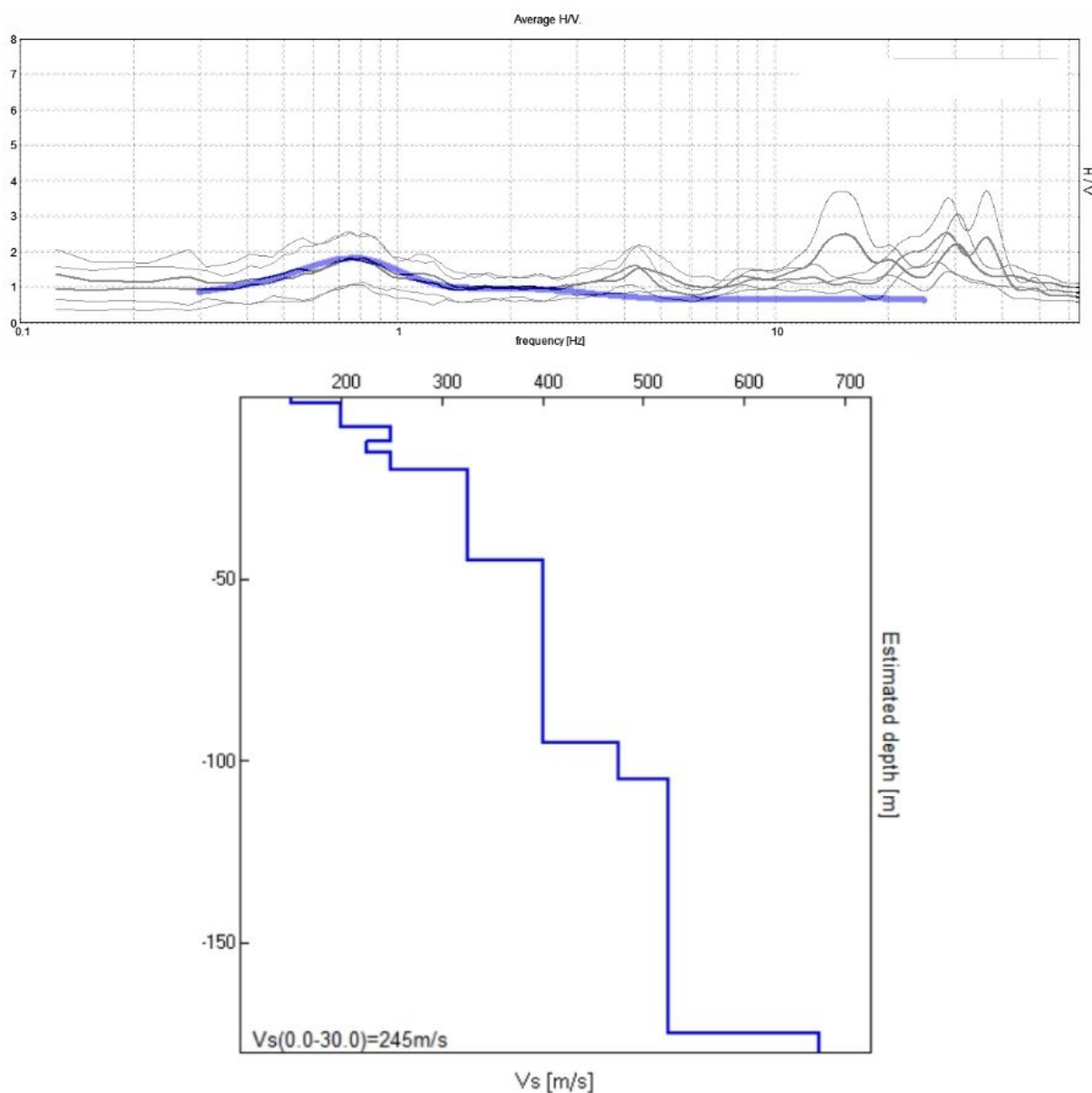


Figura 5.4 – Spettri H/V ricavati dalle registrazioni HVSR e modello sintetico di riferimento per l'analisi della RSL numerica

Rispetto a quanto indicato nelle Norme Tecniche per le Costruzioni vigenti (NTC 2018), l'area di studio è pertanto ascrivibile alla "categoria di sottosuolo" C (<<depositi di terreni a grana grossa mediamente addensati o terreni a grana fina mediamente consistenti con profondità del substrato superiori a 30 m, caratterizzati da un miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di velocità equivalente compresi tra 180 m/s e 360 m/s>>).

Sulla base di quanto indicato nella DGR 476/2021 (allegato A2), l'area di interesse può essere ascrivibile al macro contesto "MARGINE di tipo B" <<caratterizzato da spessore dei sedimenti fini o grossolani poco consolidati superiore a 30 metri; la successione sottostante è costituita da alternanze di orizzonti grossolani e orizzonti fini. Si tratta, tuttavia di un'attribuzione al limite del

macrocontesto citato con "PIANURA 2" (cfr. DGR 476/2021, Allegato A2), per la presenza nel sottosuolo di alternanze prevalentemente costituite da argille, limi e sabbie). La figura 5.5 riporta gli esiti dei fattori di amplificazione derivati dall'abaco RER (microzonazione sismica di livello 2).

*Figura 5.5 - Abaco dei parametri di RSL semplificata (DGR 476/2021, all. A2) riferito al macro contesto "Margine di tipo B"*

$V_{S30}$ (m/s) →	150	200	250	300	350	400
PGA	1,6	1,6	1,6	1,6	1,6	1,5
Fattore di Amplificazione <b>PGA</b>						
$V_{S30}$ (m/s) →	150	200	250	300	350	400
SA1	1,8	1,8	1,8	1,7	1,7	1,5
SA2	2,6	2,6	2,3	2,1	1,9	1,7
SA3	3,1	2,9	2,7	2,4	2,3	2,1
SA4	3,0	2,9	2,6	2,3	2,1	1,9
Fattori di Amplificazione <b>SA1</b> ( $0,1s \leq T \leq 0,5s$ ), <b>SA2</b> ( $0,4s \leq T \leq 0,8s$ ), <b>SA3</b> ( $0,7s \leq T \leq 1,1s$ ) e <b>SA4</b> ( $0,5s \leq T \leq 1,5s$ )						
$V_{S30}$ (m/s) →	150	200	250	300	350	400
SI1	1,9	1,9	1,9	1,8	1,7	1,6
SI2	2,9	2,8	2,5	2,3	2,1	2,0
SI3	3,3	3,1	2,7	2,4	2,2	2,0
Fattori di Amplificazione <b>SI1</b> ( $0,1s \leq T \leq 0,5s$ ), <b>SI2</b> ( $0,5s \leq T \leq 1,0s$ ), <b>SI3</b> ( $0,5s \leq T \leq 1,5s$ )						

Occorre tuttavia precisare che l'inclusione parziale del comparto in zona sismica potenzialmente liquefacibile ha richiesto ulteriori approfondimenti relativamente alla RSL e alla stessa verifica dell'effettiva propensione alla liquefazione dei sedimenti in caso di sisma (approfondimenti di "livello 3").

## 5.2 Modellazione numerica della Risposta Sismica Locale

### 5.2.1 Cenni introduttivi

Le modellazioni numeriche di RSL sono state elaborate utilizzando il software di calcolo "LSR 2D" prodotto dalla STACEC Srl in grado di generare modelli 1D secondo l'approccio analitico lineare equivalente, grazie alla discretizzazione di una striscia unitaria di terreno e all'applicazione di un sistema di vincoli sul modello FEM tale da consentire solo deformazioni di taglio.

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

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

Le modellazioni numeriche della RSL sono state eseguite allo scopo di una migliore caratterizzazione sismica del comparto in oggetto. In particolare si è implementata nell'analisi

numerica un modello sismostratigrafico mediamente rappresentativo dell'area di studio e in particolare del settore caratterizzato da spessori sabbioso limosi potenzialmente liquefacibili.

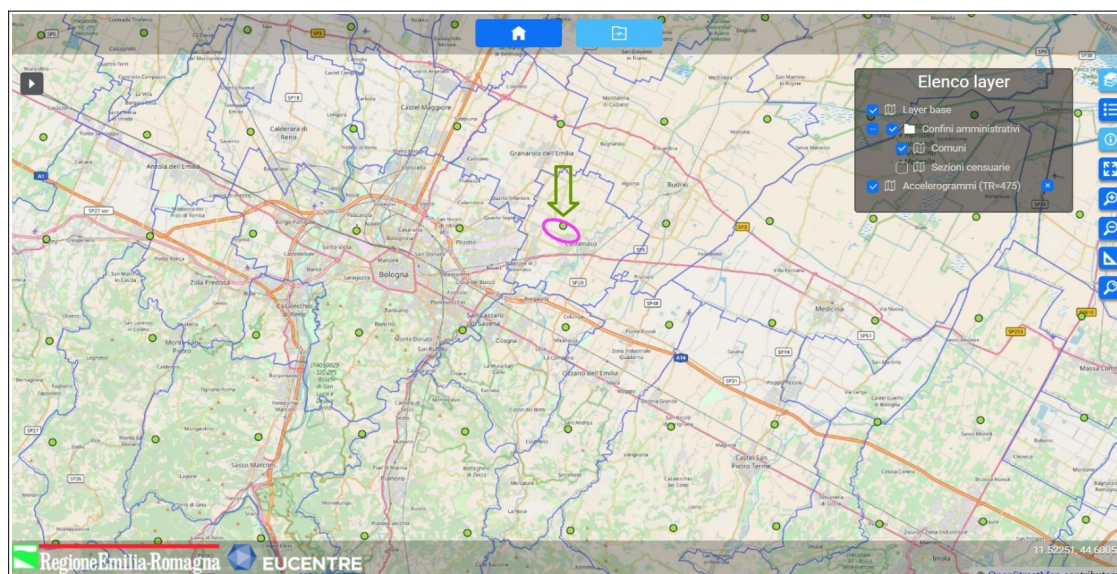
### 5.2.2 Input sismici di riferimento

Dalla piattaforma WebGIS all'indirizzo <http://egeos-test.eucentre.it/rer/home.html> è possibile scaricare l'input sismico su sito rigido selezionato per ciascun nodo del reticolo di riferimento considerato dalle NTC vigenti, interno al territorio della Regione Emilia-Romagna (figura 5.6).

Ai sensi della DGR 476/2021, l'input sismico è espresso in termini di un gruppo di 7 accelerogrammi reali, registrati su roccia, spettro-compatibili in media agli spettri di normativa definiti nelle NTC vigenti, per periodi di ritorno di 475 anni (figura 5.7).

La tabella 5.1 riassume le informazioni sui 7 accelerogrammi selezionati: magnitudo ( $M_w$ ) dell'evento che ha generato l'accelerogramma; distanza epicentrale (km) alla quale è avvenuta la registrazione; fattore di scala rispetto all'accelerogramma originario, nome della banca-dati alla quale appartiene l'accelerogramma originario (ESM, NGA-West2 o KiK-net); nome dell'accelerogramma all'interno della banca-dati. Per l'area di studio gli input accelerometrici vengono pertanto scalati a 0,173g (cfr. paragrafo 4.1). La figura 5.8 rappresenta graficamente gli accelerogrammi di input utilizzati per l'analisi numerica.

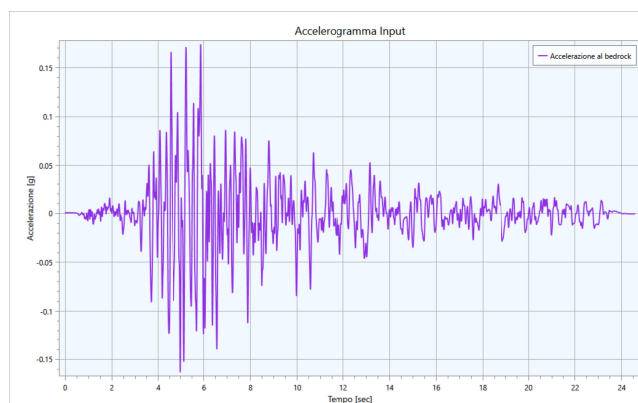
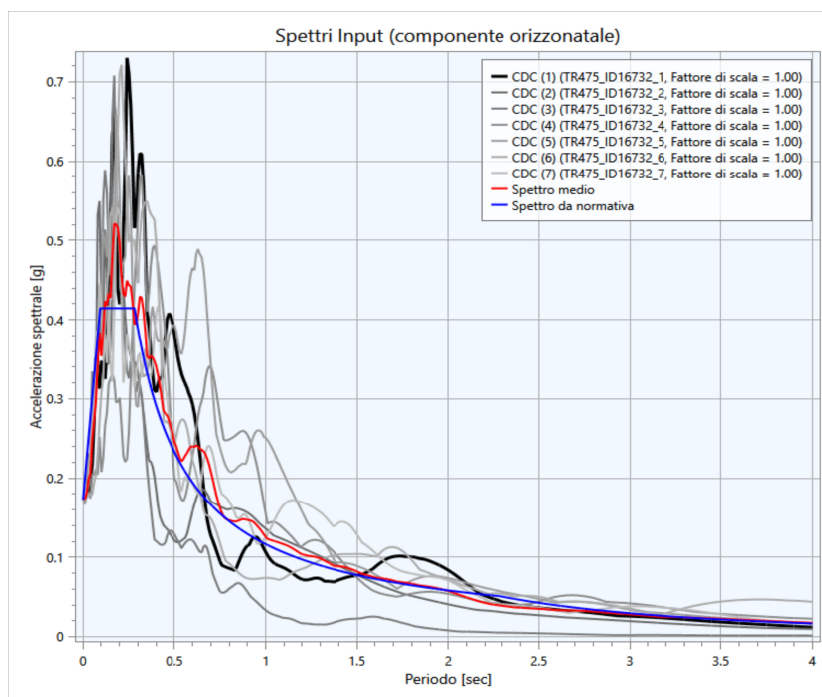
Figura 5.6 - Selezione del nodo del reticolo di riferimento (DGR 476/2021)



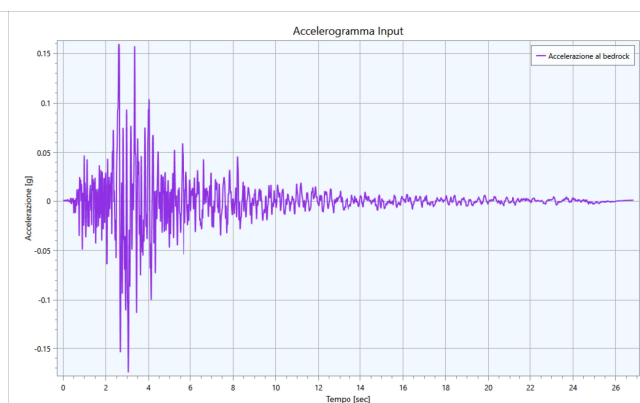
Progr.	Magnitude ( $M_w$ )	Epic.Distance (km)	Scaling_Factor (%)	Source	File_Name
1	6.20	29.90	2.28	ESM	EU.HRZ..HNE.D.19790524.172317.C.ACC.ASC
2	5.74	12.57	1.50	NGA	RSN146_COYOTELK_G01320.AT2
3	5.99	54.21	2.81	NGA	RSN703_WHITTIER.A_A-VAS000.AT2
4	6.93	83.53	1.66	NGA	RSN804_LOMAP_SSF205.AT2
5	6.69	38.07	1.25	NGA	RSN1091_NORTHR_VAS090.AT2
6	6.60	31.00	0.70	KiKnet	SMNH100010061330.EW2
7	5.90	14.40	2.97	ESM	IT.SLO..HGE.D.20161026.191806.C.ACC.ASC

Tabella 5.1 - Dati relativi agli accelerogrammi selezionati per l'analisi numerica di RSL (DGR 476/2021)

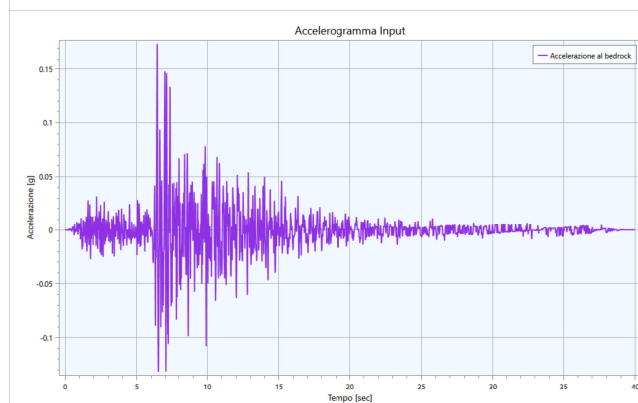
*Figura 5.7 - Confronto tra spettri di input in accelerazione e spettro NTC su suolo rigido sito specifico*



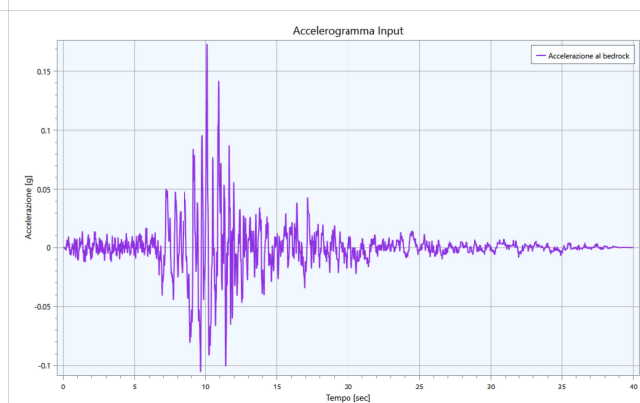
ACC1



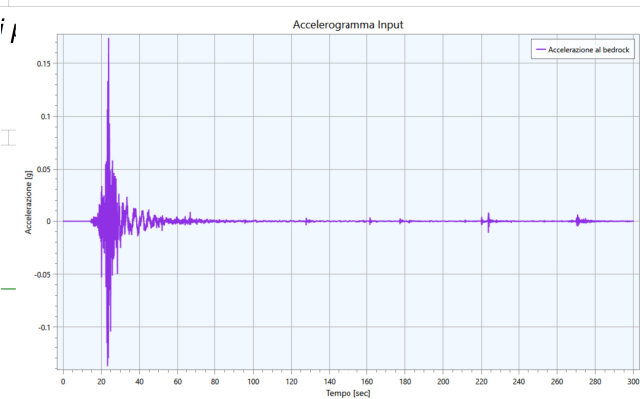
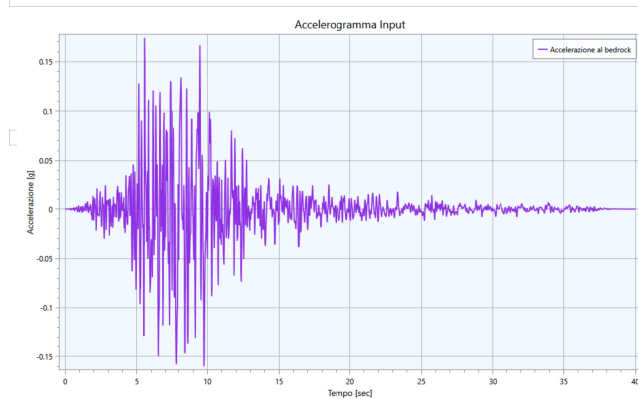
ACC2



ACC3



ACC4





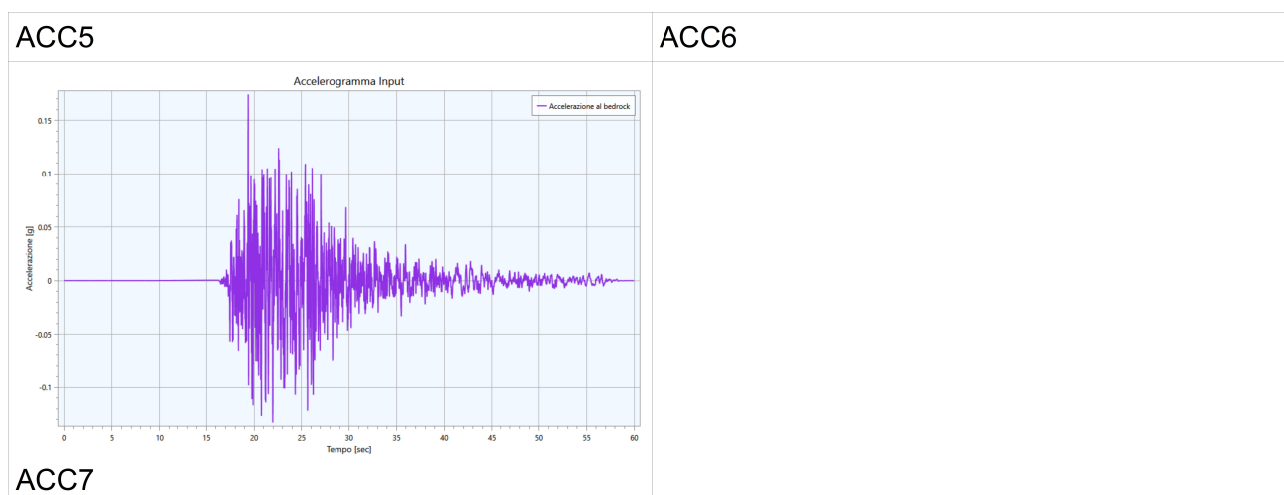


Figura 5.8 (segue) - Accelerogrammi di input utilizzati per l'analisi numerica di RSL (DGR 476/2021)

### 5.2.3 Modello sismostratigrafico di input

Le indagini geognostiche/geofisiche eseguite, nell'area di progetto, nonché i dati di repertorio disponibili, hanno permesso di definire un modello sismostratigrafico esaustivo del sottosuolo fino alla profondità di circa 35÷40 metri, mentre la stratigrafia profonda è invece estrapolata dal modello geologico profondo fornito dai dati del SGSS e dalle registrazioni HVSR eseguite nell'area di studio (cfr. paragrafo 5.1).

Il bedrock sismico è stato collocato alla profondità di -175 metri dal p.c., cioè in corrispondenza alla base del SERS. In questo senso, si ritiene che la colonna sismostratigrafica sovrastante il limite imposto nella modellazione, costituisca lo spessore di depositi sedimentari in grado di offrire il maggior contributo all'amplificazione dello scuotimento sismico più profondo. Si tratta, peraltro, di un limite da considerarsi ancora come "pseudobedrock" sismico, cioè caratterizzato da  $V_s < 800$  m/s (sebbene nell'elaborazione sia stato cautelativamente considerato "rigido").

La seguente tabella 5.2 descrive il modello sismostratigrafico implementato nel programma di calcolo.

Tabella 5.2 - Modello sismostratigrafico

Strato	S [m]	$\rho$ [Kg/m <sup>3</sup> ]	$V_s$ [m/s]	$\gamma$	Curva decadimento
Strato (1) Suolo essiccato	1.50	1700.00	150.00	0.35	Vucetic & Dobry, PI=15
Strato (2) LAS	6.50	1800.00	200.00	0.35	Vucetic & Dobry, PI=15
Strato (3) S	4.00	1900.00	250.00	0.35	Idriss (1990), Sand
Strato (4) LA	3.00	1800.00	225.00	0.35	Vucetic & Dobry, PI=30
Strato (5) S	3.00	1900.00	250.00	0.35	Idriss (1990), Sand
Strato (6) LA	2.00	1850.00	250.00	0.35	Vucetic & Dobry, PI=30

Strato (7) SLA	7.00	1950.00	325.00	0.35	Idriss (1990), Sand
Strato (6) A	18.00	1900.00	325.00	0.35	Vucetic & Dobry, PI=30
Strato (7) SL	10.00	2000.00	400.00	0.35	Idriss (1990), Sand
Strato (8) A	40.00	2000.00	400.00	0.35	Vucetic & Dobry, PI=30
Strato (9) SL	10.00	2100.00	475.00	0.35	Idriss (1990), Sand
Strato (10) ALS	70.00	2100.00	525.00	0.35	Vucetic & Dobry, PI=15
Pseudo bedrock sismico			>700.00		

dove:

S = spessore del singolo strato

$\rho$  = densità di massa del singolo strato

$V_s$  = velocità di propagazione delle onde di taglio del singolo strato

$\gamma$  = coefficiente di contrazione trasversale (di Poisson) del singolo strato

Per ogni sismostrato, il codice di elaborazione richiede l'inserimento delle fondamentali proprietà dinamiche del suolo, rappresentate dal fattore di smorzamento D e dal modulo di rigidezza a taglio G. Mentre i valori di rigidezza iniziale  $G_0$  sono stati determinati sulla base delle indagini geofisiche (stima delle  $V_s$ ), le caratteristiche di deformazione a taglio e smorzamento dei sedimenti sottoposti a sollecitazioni impulsive devono essere necessariamente determinate da prove di laboratorio.

In tal senso, sono stati adottati dati disponibili in letteratura e confacenti con il contesto litotecnico locale. Nella figura 5.9 si riportano le curve di riferimento utilizzate nell'analisi numerica.

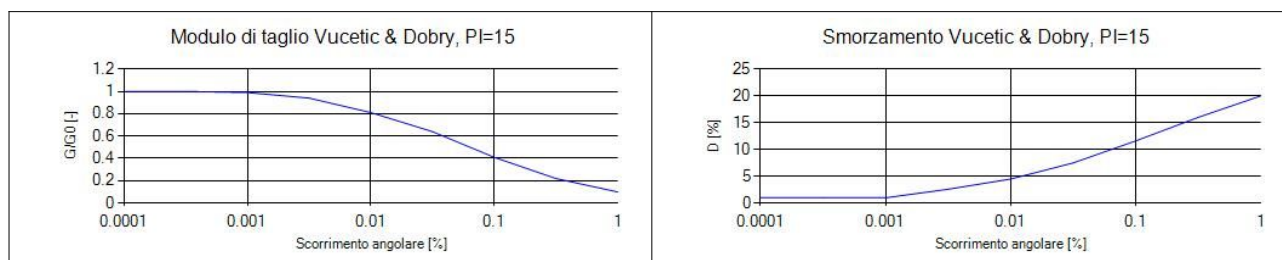
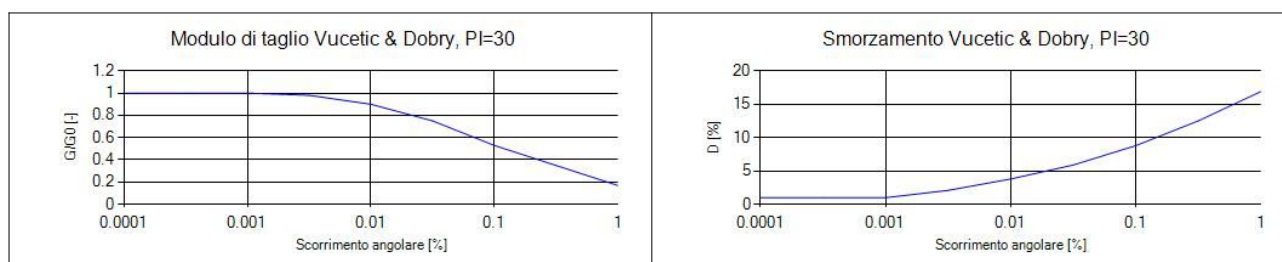


Figura 5.9 - Proprietà dinamiche dei materiali: curve di decadimento considerate per l'analisi di RSL





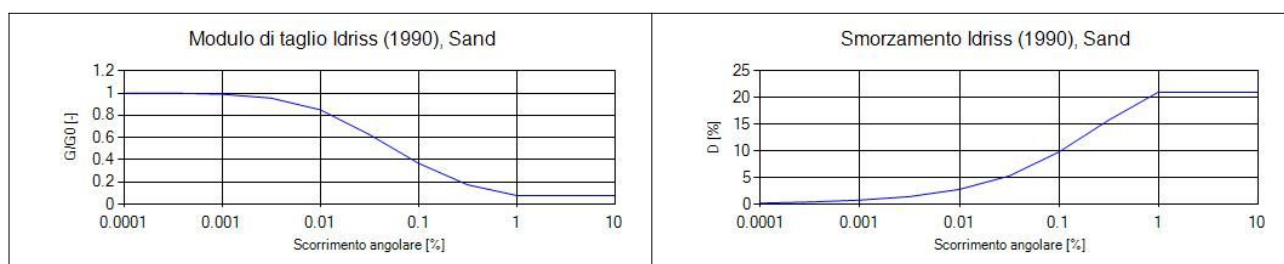


Figura 5.9 (segue) - Proprietà dinamiche dei materiali: curve di decadimento considerate per l'analisi di RSL

## 5.2.4 Esiti delle simulazioni

I fattori di amplificazione (FA) rappresentano il rapporto fra lo scuotimento sismico valutato per la condizione geolitologica specifica e il corrispondente scuotimento relativo al tetto del bedrock sismicamente rigido. I FA da determinare ai sensi della DGR 476/2021 per il macro contesto geologico di “pianura” in cui risulta ricadere l'area di studio, calcolati per un tempo di ritorno  $TR=475$  anni, con smorzamento  $\zeta=5\%$ , sono i seguenti:

- ✓ accelerazione di picco orizzontale (PGA)
- ✓ intensità spettrale in termini di accelerazione SA1 (0,1s-0,5s), SA2 (0,4s-0,8s), SA3 (0,7s-1,1s), SA4 (0,5s-1,5s)
- ✓ intensità spettrale in termini di velocità SI1 (0,1s-0,5s), SI2 (0,5s-1,0s), SI3 (0,5s-1,5s).

Per quanto riguarda l'accelerazione di picco orizzontale, la seguente figura 5.11 riporta il grafico della variabilità dell'accelerazione orizzontale dal bedrock al suolo. In sintesi, si è ricavato un valore medio di Pga al suolo pari a 0,224g, corrispondente a un FA  $Pga=1,29$ .

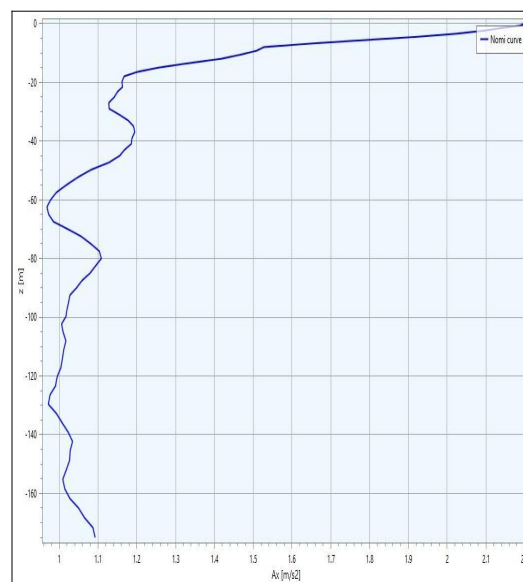


Figura 5.10 – Grafici andamento della Pga nel sottosuolo (valori in  $m/s^2$ )

Per quanto riguarda intensità spettrale in termini di accelerazione e di velocità, le seguenti figure 5.11 e 5.12 riportano il confronto tra gli spettri di RSL riferiti ad accelerazione e velocità (output singoli; output medio e output medio liscio) e gli spettri medi ricavabili al suolo rigido.

Nella tabella 5.3 sono invece riportati i relativi FA medi riepilogativi desunti dall'analisi sumerica della RSL.

Tabella 5.3 - Riepilogo dei fattori di amplificazione

AMBITO	PGA	SA1	SA2	SA3	SA4	SI1	SI2	SI3
ANS_C2.1 "DE COUBERTIN" CASTENASO	1,29 (0,224g)	1,45	1,88	1,98	1,90	1,51	1,85	1,85

Figura 5.11 – Esiti di intensità spettrale media al suolo (accelerazione). In blu lo spettro medio liscio

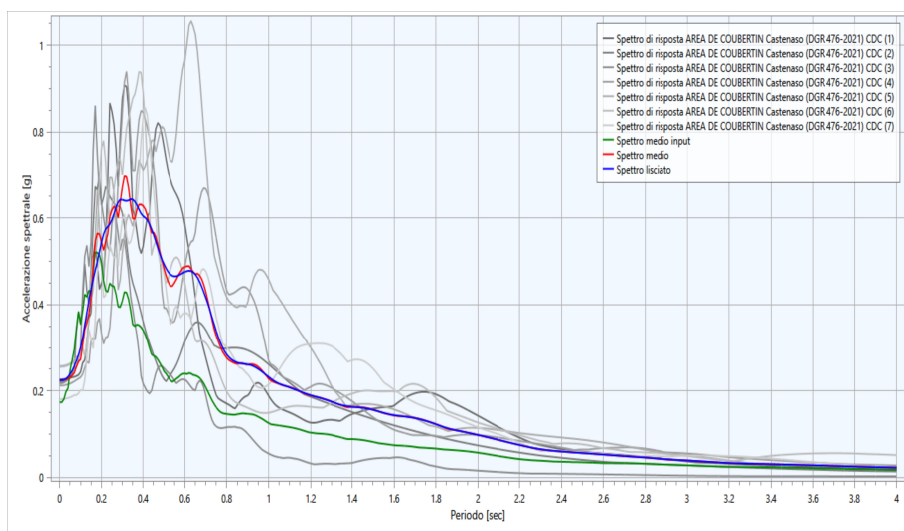
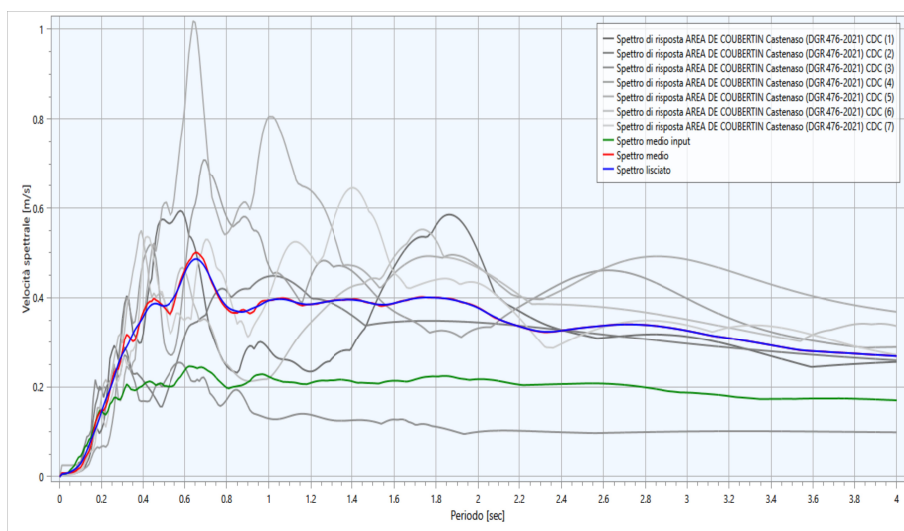


Figura 5.12 – Esiti di intensità spettrale media al suolo (velocità). In blu lo spettro medio liscio



Come già scritto, la risposta sismica locale è stata valutata anche in funzione delle amplificazioni del moto di vibrazione in termini di frequenze dell'impulso sismico, considerando i fattori di smorzamento  $D$  e i rapporti tra le impedenze sismiche dei sismostrati. La variazione del fattore di amplificazione con la frequenza definisce la funzione di amplificazione  $A(f)$  della colonna sismostratigrafica. Il moto sismico può dunque essere amplificato in corrispondenza di determinate frequenze, corrispondenti alle frequenze naturali di vibrazione della colonna stratigrafica. In questo senso, è molto importante definire la prima frequenza naturale di vibrazione  $f_0$  denominata

frequenza fondamentale, in corrispondenza della quale la funzione di amplificazione assume un valore che dovrebbe risultare il massimo. In questo senso, le simulazioni numeriche evidenziano massime amplificazioni spettrali a basse frequenze (0,7 Hz), inoltre si riscontrano amplificazioni significative fino a frequenze di circa 4 Hz (figura 5.13).

Occorre tuttavia ricordare che la funzione di amplificazione locale non è una proprietà univoca del sito ma è anche dipendente dalle caratteristiche del moto di input (es. ampiezza e contenuto in frequenza, energia, effetti del comportamento non lineare del terreno, ecc.).

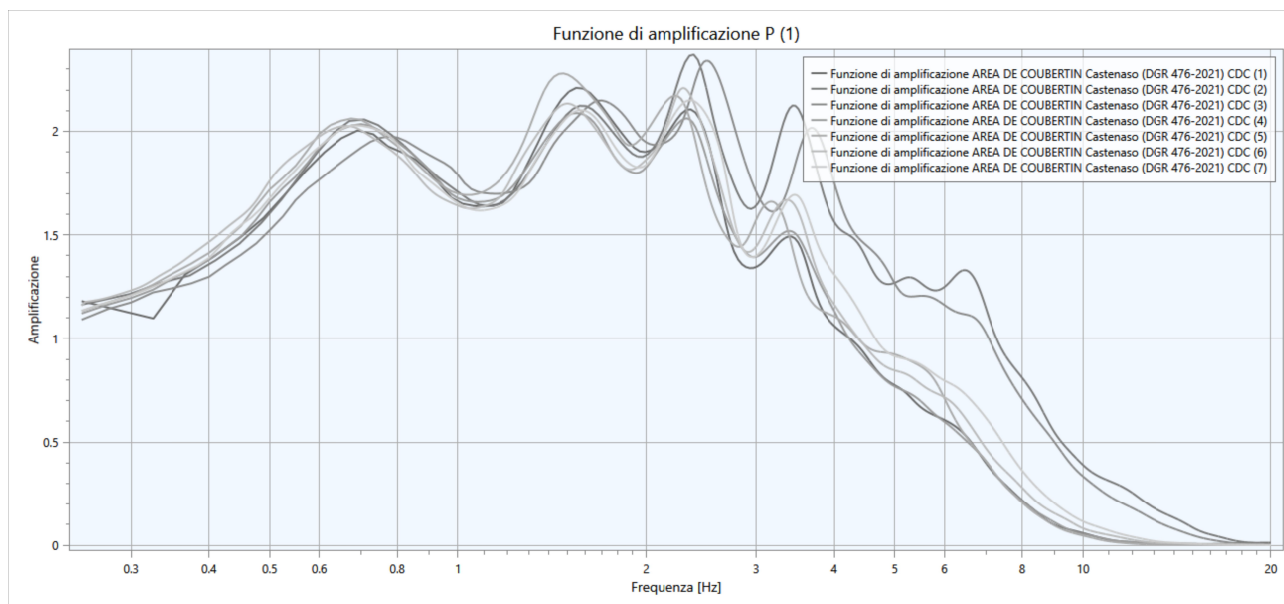


Figura 5.13 – Funzioni di trasferimento ricavate dalla modellazione numerica della RSL

## 5.3 Verifiche quantitative della liquefacibilità e dei cedimenti post sisma

### 5.3.1 Cenni introduttivi

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

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



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

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

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

Fenomeni di liquefazione si sono chiaramente manifestati con gli eventi sismici emiliani del maggio 2012, tuttavia non si sono riscontrati i fenomeni più critici riconducibili a fluidificazione (con perdita della capacità portante del terreno dei sedimenti al di sotto delle costruzioni); anche i cedimenti riscontrati per gli edifici sono risultati complessivamente limitati e per lo più uniformi al di sotto delle costruzioni<sup>3</sup>. Per ulteriori aspetti teorici, si rimanda alla vasta letteratura scientifica e in particolare ai rapporti tecnici elaborati a seguito del sisma emiliano del maggio 2012 (consultabili anche on line nel sito del SGSS).

### **5.3.2 Metodologia delle verifiche**

Il presente studio, ha elaborato le analisi del rischio di liquefazione mediante correlazioni empiriche che si basano sui risultati delle prove penetrometriche CPTU eseguite nei due sub-comparti.

Il vantaggio dell'uso delle prove CPTU/CPTU è da ricercarsi nella maggiore accuratezza e ripetibilità rispetto ad altre indagini, nella relativa economicità e soprattutto nella possibilità di avere profili continui con la profondità, con informazioni dettagliate anche sulla stratigrafia. Gli esiti delle prove CPTU sono stati utilizzati per la stima del rischio di liquefazione, procedendo secondo le seguenti fasi:

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

<sup>3</sup> Fonte: "Rapporto preliminare sui diffusi fenomeni di liquefazione verificatisi durante il terremoto in pianura padana emiliana del maggio 2012", C. Crespellani et Al., 2012.

La stima del Fattore di Sicurezza nei confronti della Liquefazione (FSL) è definito dalla relazione:

$$FSL = \frac{CRR_{7.5}}{CSR} \cdot MSF \cdot K_{\sigma}$$

con

$CRR_{7.5}$  = resistenza alla liquefazione ciclica (Cyclic Resistance Ratio) dei sedimenti attraversati, ricavata dagli esiti CPT (a punta elettrica), per terremoti di  $M = 7,5$ . La procedura si fonda su equazioni che determinano i valori di  $CRR$  dei sedimenti attraversati utilizzando i valori di resistenza alla punta  $q_t$ , corretti per tenere conto delle tensioni litostatiche di confinamento, della differente classificazione dei sedimenti attraversati (contenuto di fine; plasticità);

$CSR$  = rapporto di sollecitazione ciclica (Cyclic Stress Ratio) prodotta da un sisma e stimata sulla base di correlazioni empiriche dalle caratteristiche del terremoto, magnitudo e accelerazione tangenziale del suolo ( $a_{max}$ ). Il  $CSR$  viene calcolato dalla nota equazione semiempirica proposta da Seed e Idriss (1971) per terremoti di  $M = 7,5$ :

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

$K_{\sigma}$  = Fattore di correzione per la pressione di confinamento (Overburden Correction Factor)

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

FSL è stato determinato mediante calcolo automatico con il noto software "Cliq", sviluppato dalla GeoLogismiki Geotechnical Engineers, che consente di utilizzare differenti metodi di stima di FSL. Per questo lavoro, si sono considerati i seguenti metodi di calcolo di FSL, tutti di lunga sperimentazione e di ampia diffusione nel campo ingegneristico:

1. procedura NCEER<sup>4</sup> (1996; 1998; 2001)

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

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

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

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

3. procedura di Boulanger & Idriss (2014)

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

<sup>4</sup> National Center for Earthquake Engineering Research (USA)

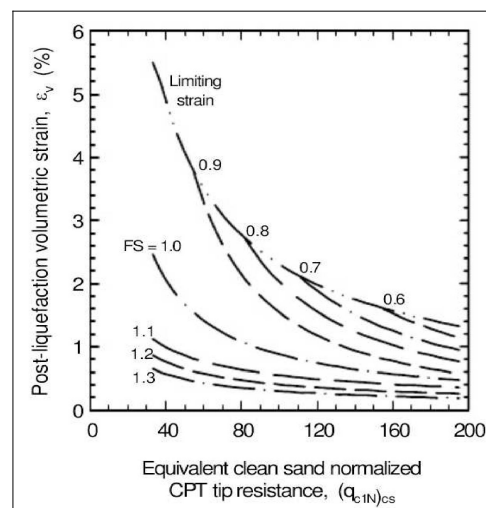
Per la descrizione dettagliata dei metodi si rimanda alla letteratura scientifica originaria. Si rammenta che tali approcci differiscono nel calcolo dei parametri di MSF, CRR7.5,  $K_\sigma$  e  $r_d$  e che i metodi di P.K. Robertson (2009) e di Boulanger & Idriss (2014) sono validi per tutti i tipi di sedimenti, e considerano anche la possibilità di “cyclic softening” nei sedimenti fini poco coesivi. Gli esiti sono inoltre condizionati da altre grandezze: tra queste, il contenuto in fini FC che introduce significative correzioni alla resistenza penetrometrica normalizzata.

Ciò detto, nel calcolo di FSL si sono considerate le seguenti condizioni di input:

- si sono considerati degli esiti di  $P_{ga}$  più cautelativi rispetto a quella derivata dall'analisi di RSL, cioè adottando una  $P_{ga}$  equiparabile alla condizione SLV indicata dalle Norme Tecniche per le Costruzioni (NTC 2018) con approccio semplificato e relativo a TR pari a 475 anni, classe edificio II; vita nominale 50 anni, categoria di sottosuolo C. L'uso dell'approccio semplificato è infatti giustificato dal contesto sismostratigrafico locale (come descritto nel par. 5.1). Ciò detto, la  $P_{ga}$  considerata è pari a  $0,173 \cdot 1,45 = 0,25g$
- come livello di falda si è assunta la quota d'acqua ricavata dalle indagini CPTe;
- sulla base della pericolosità sismica di base, si è considerata una magnitudo di input pari a  $M_w = 6,14$  (cfr. zonizzazione macrosismica “ZS9”).

Per quanto riguarda la stima dei cedimenti post sisma e in particolare nei sedimenti saturi a comportamento granulare, si è proceduto al calcolo automatico secondo il metodo di Zhang et. Al. (2002; 2004). Questo procedimento si basa sui risultati empirici di Ishihara & Yoshimine (1992), per sabbie e sedimenti limosi, e definisce l'entità delle deformazioni volumetriche post-liquefazione sulla base delle resistenze alla punta  $(q_{c1N})_{cs}$  e dei corrispondenti esiti di FSL (figura 5.14).

*Figura 5.14 – Diagrammi di correlazione tra deformazioni volumetriche post-liquefazione e resistenze CPT per differenti fattori di sicurezza (da Zhang et Al., 2002)*



Per i sedimenti a comportamento fine, il cedimento è causato principalmente da fenomeni di riconsolidazione conseguenti alla dissipazione delle pressioni interstiziali accumulate durante il terremoto e al manifestarsi di deformazioni da taglio indotte dalle sollecitazioni cicliche.

Esperienze empiriche, hanno dimostrato che le deformazioni per riconsolidamento nelle argille



sono controllate principalmente dallo sforzo di taglio massimo, funzione di un fattore di sicurezza  $FS_{\gamma=3\%} = CRR_M/CSR_M = CRR_{7,5}/CRS_{7,5}$  (Boulanger & Idriss, 2007) e dello stato tensionale dei sedimenti (OCR). Il fattore di sicurezza è stato dunque calcolato come  $FS_{\gamma=3\%} = CRR_{6,14}/CRS_{6,14}$ . Le deformazioni volumetriche sono state calcolate secondo il metodo di Robertson (2009), utilizzando le seguenti relazioni:

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

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

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

Il rischio di liquefazione è valutato mediante il calcolo dell'indice del potenziale di liquefazione LPI (Liquefaction Potential Index) di Iwasaki et al. (1982) e la stima del parametro LSN (Liquefaction Severity Number), recentemente proposto da Tonkin & Taylor (2013).

L'Indice di Potenziale Liquefazione si calcola per una profondità "critica" fino a 20 metri di profondità ed è definito nel seguente modo:

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

[con:  $W(z)$  fattore di peso della profondità  $= 10 - 0.5z$ ;  $F_1$  variabile  $= 1 - FSL$  (per  $FSL < 1,2$ ) oppure  $F_1 = 0$  per  $FSL > 1,2$ ;  $z$  = profondità dello strato considerato]

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

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

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

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

*Figura 5.15 –  
Correlabilità  
dell'indice LSN  
con gli effetti di  
liquefazione nei  
sedimenti  
superficiali e con  
l'intensità del  
danno  
riscontrato nei  
manufatti  
(Tonkin &  
Taylor, 2013)*

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

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

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

Il calcolo fornisce un valore numerico compreso tra 0 e 100 e gli Autori hanno proposto una classificazione di LSN relazionata agli effetti di liquefazione superficiali rilevati nelle zone “free field” e/o alla severità dei danni riscontrati nei manufatti (figura 5.15). Secondo gli Autori, l'indice LSN, rispetto alla stima di LPI, risulterebbe “pesare” maggiormente il contributo degli strati superficiali liquefacibili rispetto agli strati critici riscontrabili a profondità maggiori, fornendo esiti più coerenti con gli effetti di liquefazione effettivamente rilevati al piano campagna, inoltre fornirebbe una migliore (seppure blanda) correlazione anche con l'entità dei danni riscontrati nelle opere di fondazione degli edifici.

### 5.3.3 Esiti delle verifiche

Le verifiche non hanno riscontrato particolari situazioni di criticità. Tuttavia, le penetrometrie CPTE11-12-13 eseguite nel comparto hanno intercettato spessori più potenti di limi sabbiosi e sabbie a dimostrare la presenza di involucri di paleoalvei, di modesto sviluppo laterale, che attraversano il settore occidentale del comparto e che si sviluppano in direzione nord. Le verifiche hanno dunque evidenziato la presenza di intervalli granulari liquefacibili (cioè con  $FS < 1$ ). In termini quantitativi, gli esiti cumulativi di LPI (vedi figura 5.16) risultano sempre contenuti entro la classe di rischio “basso” ( $LPI < 2$ ), ad esclusione della sola prova CPTE12 ricadente nella classe di rischio “moderato” ( $2 < LPI \leq 5$ ) con esiti di LPI di poco più elevati (LPI fino a 3,3).

L'analisi degli ulteriori risultati evidenzia come l'indice LSN rientri per tutte le prove nella classe di “rischio basso” (con esiti di  $LSN < 4$ ), a dimostrare l'assenza di manifestazioni superficiali di liquefazione (figura 5.17).

I cedimenti post sisma (figura 5.18), infine, risultano anch'essi scarsamente significativi in termini di possibile interazione con i manufatti da costruire (contenuti entro il “pollice”), anche in considerazione del fatto che si tratta di valori cumulativi.

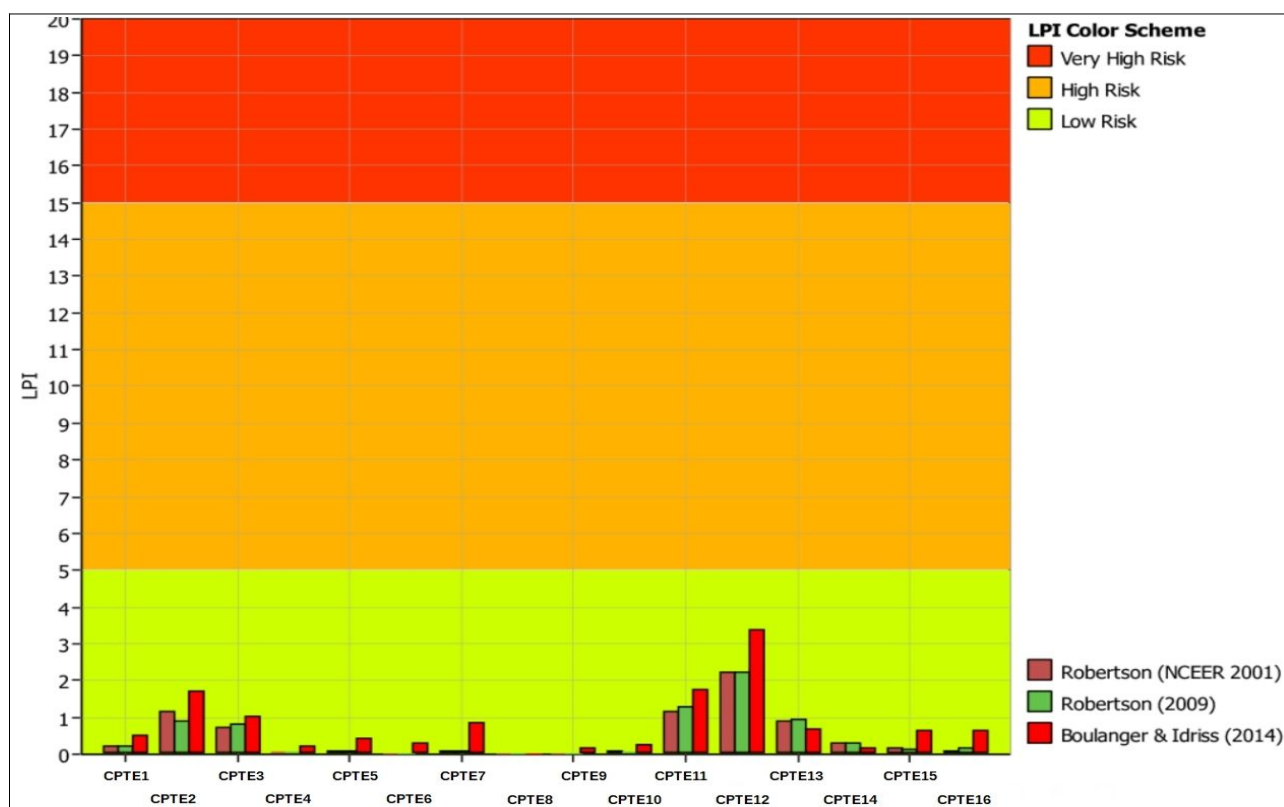


Figura 5.16 – Plottaggio degli esiti di LPI



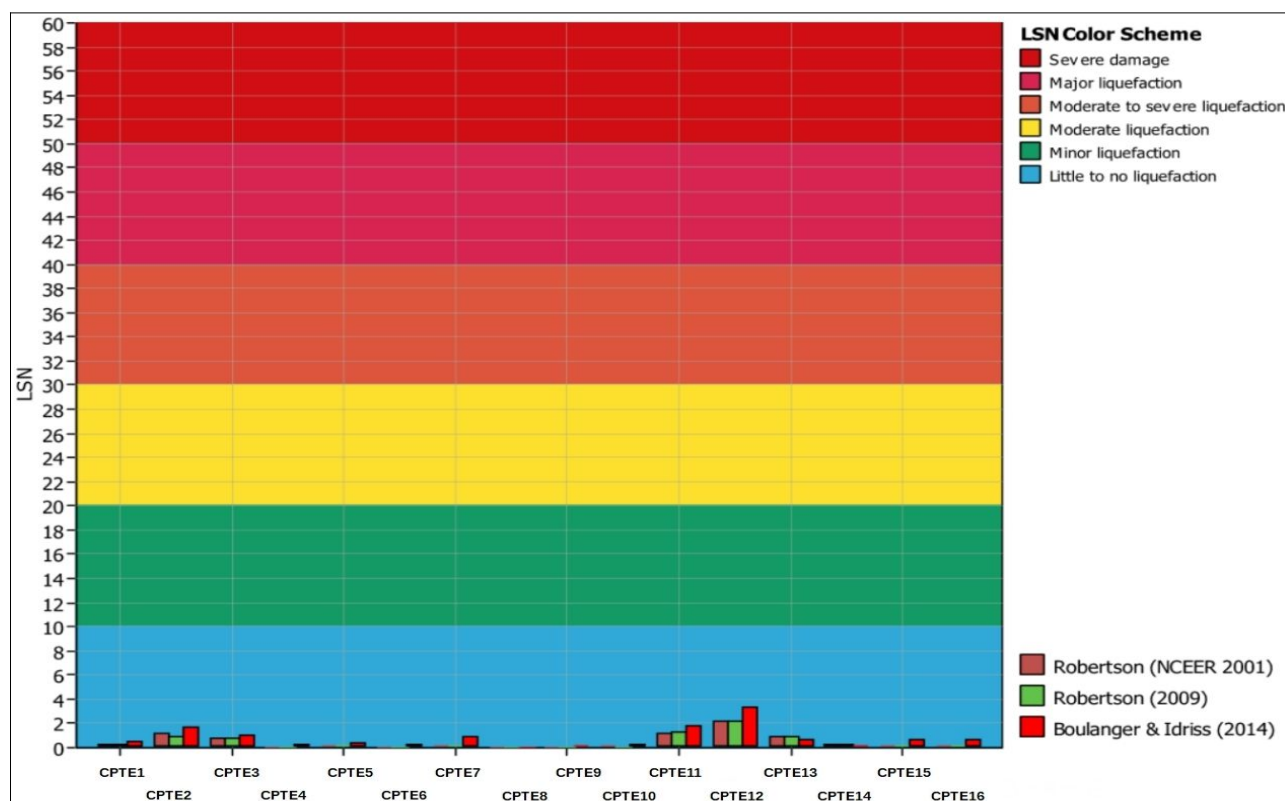


Figura 5.17 – Plottaggio degli esiti di LSN

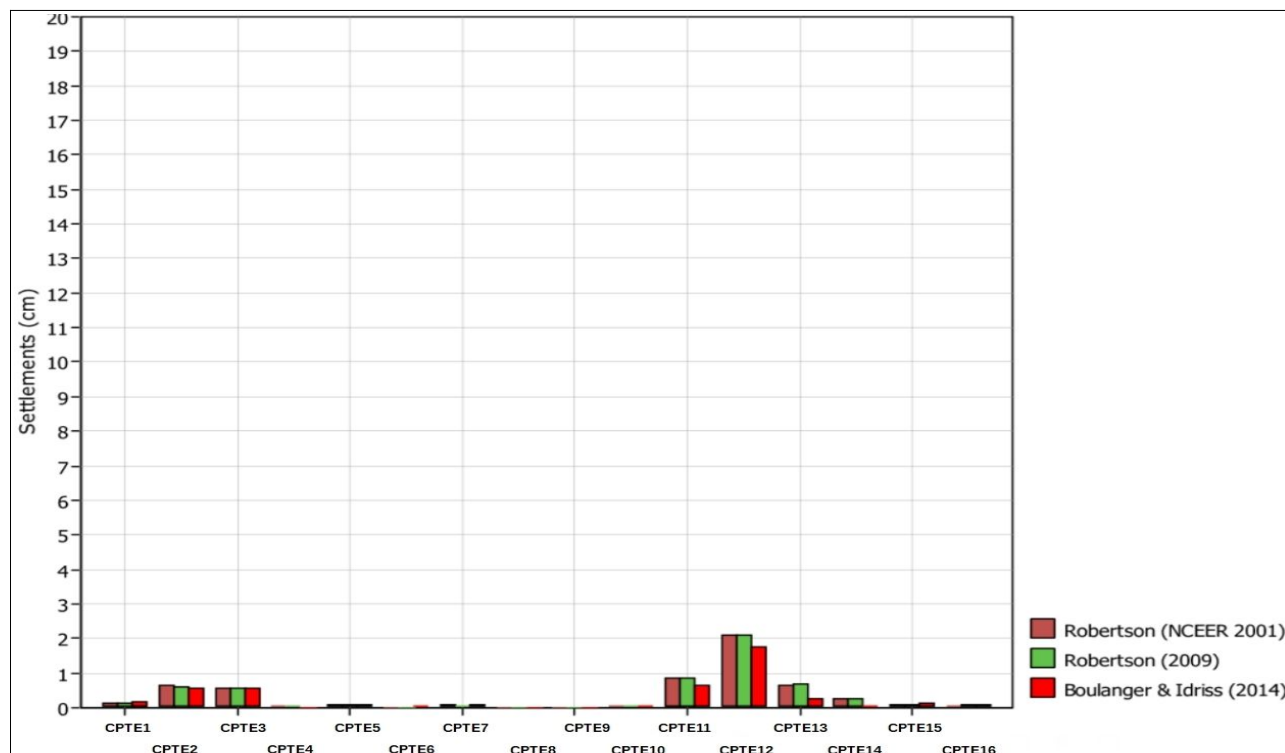


Figura 5.18 – Plottaggio degli esiti di cedimento post sisma

Gli esiti di verifica più cautelativi, sono tendenzialmente ricavati con il metodo di Boulanger & Idriss 2014. In questo senso, la figura 5.19 propone un'ulteriore rappresentazione planimetrica degli esiti di LPI ricavati con questo metodo e della classificazione di pericolosità dei punti di controllo CPTE, mentre in calce alla presente Relazione vengono allegati i report di ogni singola prova.

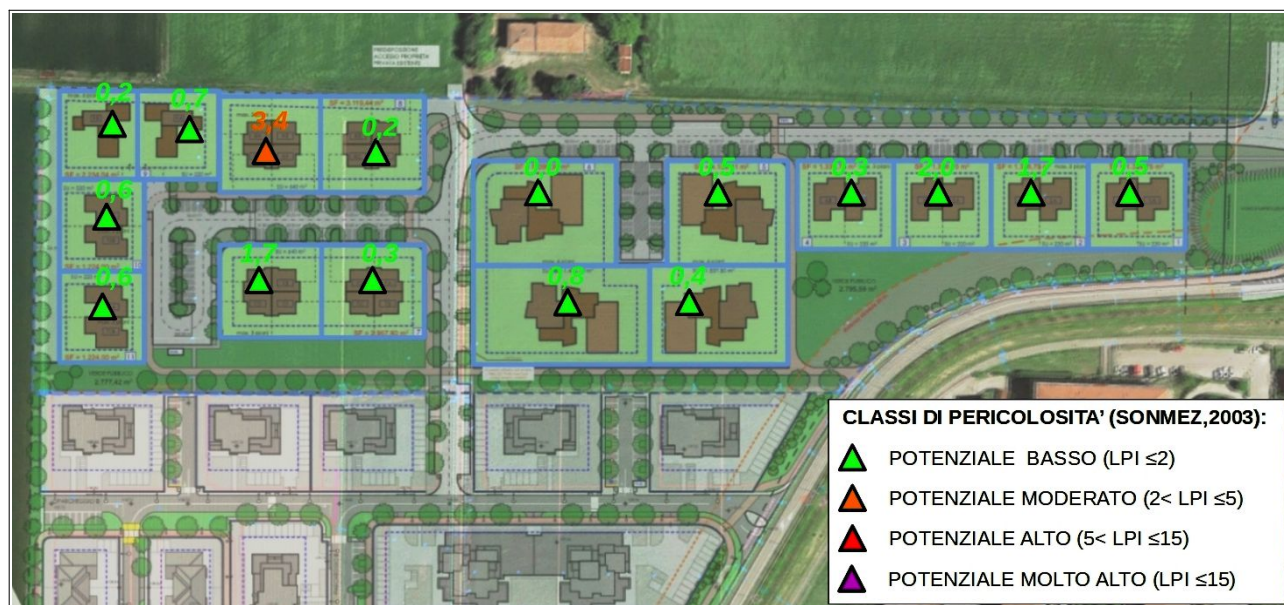


Figura 5.19 – Classificazione dei punti di controllo (CPTE)

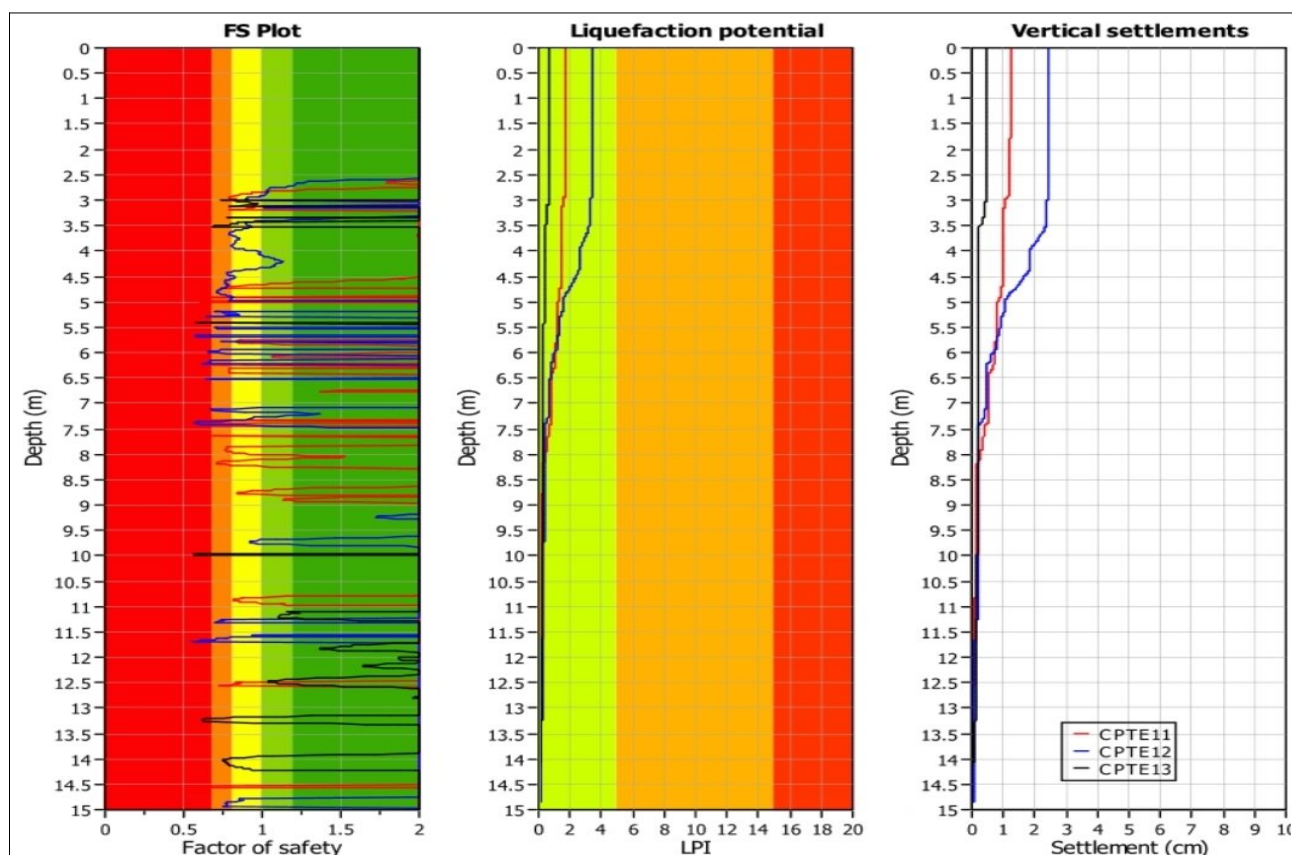


Figura 5.20 – Plottaggio delle verifiche effettuate per le prove CPTE11-12-13

La figura 5.20 rappresenta gli esiti delle verifiche lungo le verticali delle prove CPTE11-12-13, cioè delle penetrometrie che hanno intercettato paleoalvei limoso sabbiosi. Si evince come tali sedimenti non presentino significativi incrementi dell'LPI e dei cedimenti post sisma, sia per la maggiore profondità degli strati granulari (vedi CPTE13), sia per la presenza di tessiture più fini che granulari (vedi prove CPTE11 e CPTE12).

In conclusione, le analisi indicano un rischio complessivamente basso per la progettazione dei manufatti previsti, con esiti che evidenziano l'impossibilità di manifestazioni superficiali e/o di eventuali ripercussioni a fondazioni di tipologia diretta. Si precisa che le verifiche effettuate non considerano la presenza delle stesse costruzioni (le verifiche hanno considerato le condizioni "free field"), dunque non viene determinato il contributo di resistenza alla liquefazione che generalmente è fornito dalle pressioni scaricate nel terreno sottostante le opere di fondazione. Tali verifiche saranno comunque da svolgere in fase di progettazione esecutiva, come richiede la normativa di settore.

Gli interventi previsti si ritengono ammissibili rispetto al contesto di pericolosità sismica locale descritto. Viste le caratteristiche degli edifici previsti nei subcomparti, è dunque possibile prevedere fondazioni dirette, consigliando di adottare fondazioni a comportamento "rigido" per ottimizzare la capacità di contrasto alle deformazioni del suolo, consigliando distribuzioni delle sovrappressioni scaricate nei terreni relativamente omogenee.



## 6 ORIENTAMENTI GEOTECNICI

### 6.1 Caratterizzazione geotecnica di massima

I dati di resistenza alla punta e laterale delle prove CPTE consentono di ottenere un buon dettaglio litotecnico del sottosuolo investigato, costituito da sedimenti di tracimazione fluviale prevalentemente fine e in particolare:

- ✓ sedimenti più superficiali limoso argillosi (fino a  $-3,0 \div -4,0$  metri), molto rimaneggiati fino a circa  $-0,8 \div -1,2$  metri (suolo recente) ed essiccati fino a circa  $1,5 \div 1,8$  metri;
- ✓ sedimenti prevalentemente argillosi di consistenza variabile, con rare intercalazioni limoso sabbiose fino al termine delle prove;
- ✓ nel settore occidentale del comparto si sono attraversati spessori più potenti di limi sabbiosi e sabbie, a partire da circa 2 metri, riconducibili a involucri di paleoalvei di modesto sviluppo laterale (vedi prove CPTE11-12-13) che si sviluppano in direzione nord.

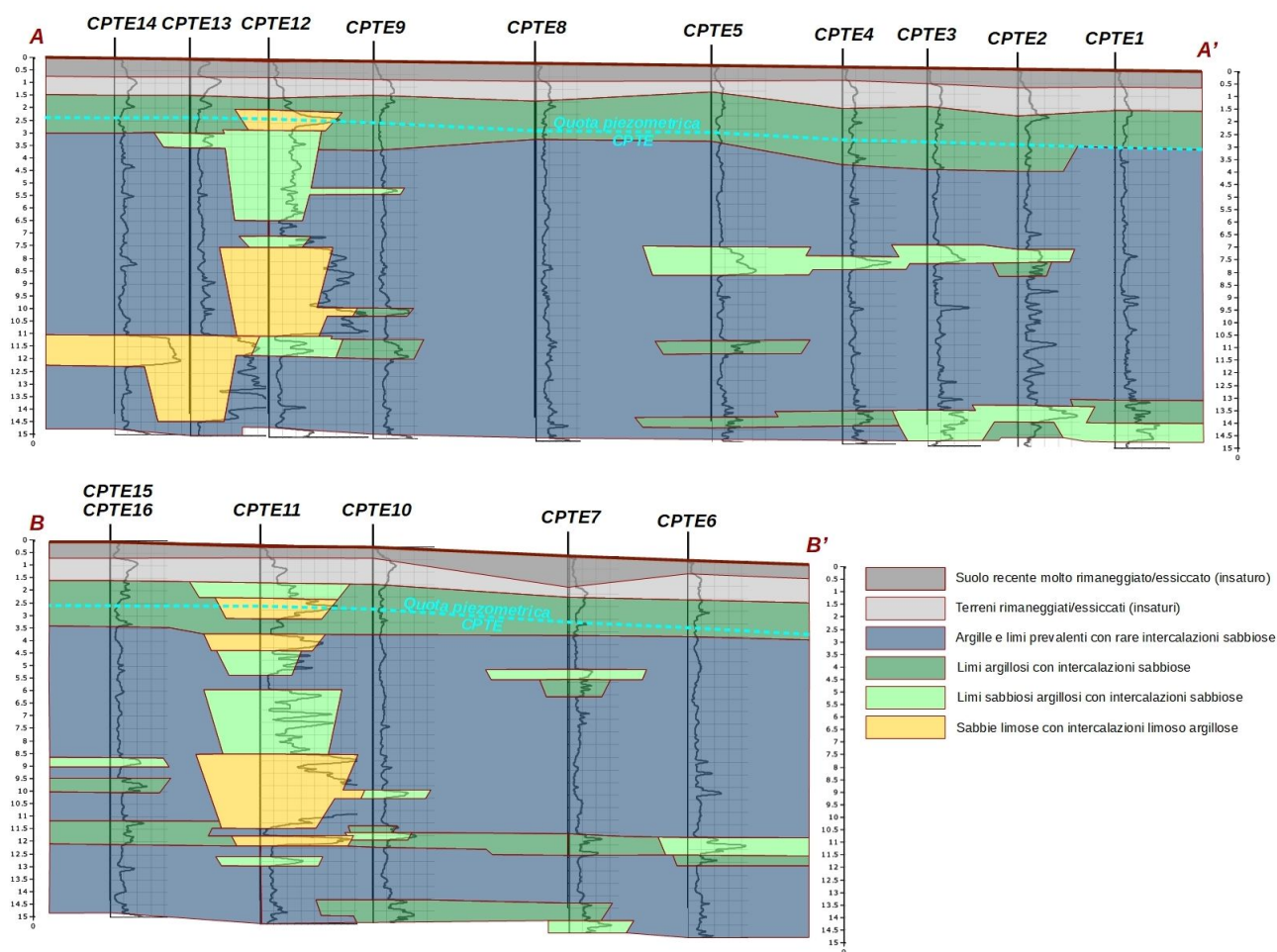


Figura 6.1 - Sezioni geologiche di sintesi elaborate per il comparto "De Coubertin"

Nella figura La figura 6.1 viene riproposta la sezione geologica di sintesi già descritta nel paragrafo 3.1.

Le caratteristiche tessiturali dei sedimenti attraversati sono determinate attraverso la classificazione bilogaritmica dei terreni proposta da P. K. Robertson (1985; 1990). La figura 6.2 riporta le principali correlazioni<sup>5</sup> utilizzate per la stima delle proprietà meccaniche dei sedimenti attraversati.

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

Figura 6.2 – Correlazioni utilizzate per la stima dei parametri geotecnici da prove CPTU

Le NTC vigenti e gli indirizzi in materia (AGI; DM 11/03/1988) esplicitano la necessità di caratterizzare dal punto di vista geotecnico i sedimenti che costituiscono il “volume significativo”, inteso come parte del sottosuolo influenzata direttamente o indirettamente dalla costruzione dei manufatti di progetto.

Per il sottosuolo investigato è dunque possibile proporre una caratterizzazione geotecnica di

<sup>5</sup> Robertson, P.K., Cabal K.L., Guide to Cone Penetration Testing for Geotechnical Engineering, Gregg Drilling & Testing, Inc., 4th Edition, July 2010

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

massima con la stima dei principali parametri geotecnici basata sulle resistenze penetrometriche CPTE. In questo senso, in calce alla Relazione viene fornita una modellazione geotecnica per le verticali d'indagine CPTE: per ogni strato vengono attribuiti i valori geotecnici medi desunti dalle letture penetrometriche. Le colonne geotecniche riportano anche la quota di falda misurata al termine delle prove nel foro d'indagine.

## 6.2 Ulteriori indicazioni geotecniche

Gli esiti delle penetrometrie CPTE non evidenziano particolari criticità di carattere geotecnico. In sede di progettazione dei fabbricati si potranno prevedere fondazioni dirette, tuttavia da dimensionare con cura in relazione alle sovra pressioni di progetto. In questo senso, gli esiti delle indagini evidenziano sedimenti superficiali più alterati e con resistenze alla punta più eterogenee fino a circa  $-0,8 \div 1,2$  metri. I sedimenti più superficiali sono inoltre soggetti ad essiccamento, che risulta più significativo fino a circa  $-1,5 \div 1,8$  metri, con resistenze alla punta qc relativamente più elevate. Si tratta di una condizione che può ritenersi reversibile e da tenere in considerazione in fase di progettazione. Più in profondità le prove CPTU eseguite hanno evidenziato resistenze di punta qc generalmente superiori a 1.000 kPa, dimostrando una discreta qualità geotecnica dei sedimenti attraversati.

In sede di progettazione delle costruzioni, sarà opportuno procedere con ulteriori analisi geotecniche, controllando anche eventuali limitazioni legate all'interazione sedimenti-struttura, cioè ai cedimenti assoluti e differenziali o all'entità delle pressioni d'esercizio.

Le verifiche di liquefazione e dei cedimenti post sisma, non indicano particolari criticità, tuttavia si consiglia di adottare fondazioni superficiali a comportamento rigido, in grado di sostenere cedimenti differenziali di maggiore entità. Le fondazioni rigide sono inoltre meno vulnerabili agli effetti di liquefazione e in particolare ai cedimenti cosismici.

In conclusione, si ribadisce ancora che, per questo piano attuativo, non emergono particolari criticità o limitazioni di carattere puramente geotecnico, sebbene il contesto geotecnico per quanto già scritto imponga necessariamente ulteriori approfondimenti e un'attenta scelta delle fondazioni in relazione all'entità delle pressioni d'esercizio attese.



## 7 SCHEDA DI SINTESI DELLO STUDIO

Indagini eseguite (cfr. capitolo 2) → sono disponibili indagini pregresse (es. penetrometrie CPTU; MASW; HVSR) effettuate per gli stidi di MS comunale e POC/PUA di comparti limitrofi. Per questo studio, sono state eseguite n. 16 penetrometrie CPTU (fino a -15 m), n. 1 stendimento sismico MASW/ReMi e n. 2 registrazioni HVSR.

Contesto geologico (cfr. par. 3.1) → il comparto si colloca in un contesto di pianura alluvionale e più in particolare di “depositi di canale e argine indifferenziati”, attribuibili ai corsi d'acqua Savena e Idice. I sedimenti alluvionali affioranti sono compresi nel “Subsistema di Ravenna” (sigla AES8) di età deposizionale recente (Pleistocene superiore – Olocene).

Le prove eseguite nel comparto hanno attraversato sedimenti più superficiali limoso argillosi (fino a -3,0÷4,0 metri), molto rimaneggiati fino a circa -0,8÷1,2 metri (suolo recente) ed essiccati fino a circa 1,5÷1,8 metri. Le prove CPTU hanno poi attraversato sedimenti prevalentemente argillosi con rare intercalazioni limoso sabbiose. Le prove (CPTU11-12-13) hanno tuttavia intercettato spessori più potenti di limi sabbiosi e sabbie a dimostrare la presenza di involucri di paleoalvei, di modesto sviluppo laterale, che attraversano il settore occidentale del comparto e che si sviluppano in direzione nord. La figura 3.3 rappresenta le sezioni geologiche di sintesi dell'area studiata.

Contesto idrogeologico e aspetti idraulici locali (cfr. par. 3.2) → la tavola Ca.B.1.2 elaborata alla scala 1:10.000 per il PSC dei Comuni dell'Associazione Valle Idice (Viel & Associati, 2007), indica un deflusso sotterraneo della prima falda diretto verso NE e un livello statico di circa 38 m slmm (soggiacenza media di circa 2 metri).

Le prove CPTU hanno riscontrato soggiacenze comprese tra 2,3 m e 3,0 metri, con differenze anche imputabili alla morfologia superficiale e al blando condizionamento drenante dell'alveo del torrente Idice.

Dal punto di vista idraulico, la regimazione locale secondaria è fornita dai fossi trasversali e di testata dei campi agricoli. L'area è inclusa nello scenario di pericolosità “P2” alluvioni poco frequenti con TR 100-200 anni (cfr. PGRA), risulta distante da corsi d'acqua naturali o antropici di particolare significato. Non sussistono particolari criticità idrauliche

Pericolosità sismica di base (cfr. par. 4.1) → l'area studiata ricade poco a nord della fascia sismogenica ITCS047 (Castelvetro di Modena-Castel San Pietro Terme) alla quale è attribuita una magnitudo di riferimento (TR = 475 anni) pari a  $M_w = 6,0$  connessa ai terremoti storici del bolognese del 1505 e 1929. L'archivio DBMI15 dell'INGV documenta per il Capoluogo 14 eventi sismici, tuttavia caratterizzati da intensità non particolarmente elevate (fino a 5-6).

Rischio sismico PTM e microzonazione sismica comunale (cfr. par. 4.2) → rispetto alla Tavola 4 del PTM di Bologna, l'area ricade in zona di attenzione per instabilità liquefazione/densificazione. Anche lo studio di MS comunale a corredo del PSC include parzialmente l'ambito nel contesto di potenziale liquefazione e potenziali cedimenti post sisma. Sulla base del modello di pericolosità sismica MPS04\_S1 definito dall'INGV, all'area di studio viene attribuita una  $a_{g,ref}$  pari a 0,173g (TR = 475 anni).

Ulteriori approfondimenti sismici di livello 3 ai sensi della DGR 476/2021 (capitolo 5) → le registrazioni sismiche HVSR effettuate evidenziano massime amplificazioni spettrali H/V a basse frequenze (circa 0,8 Hz), associabili a riflettori sismici profondi oltre 100 metri. Lo stendimento sismico MASW/ReMi eseguito nel comparto studiato ha stimato una Vs30 pari a 245 m/s.

Per il calcolo dei fattori di amplificazione richiesti dalla Delibera regionale, è stato elaborato un modello numerico di RSL rappresentativo dell'area di studio e più in particolare del settore caratterizzato da inviluppi di paleoalvei limoso sabbiosi (vedi CPTe11-12-13). Nel paragrafo 5.2.3 viene descritto il modello sismostratigrafico profondo, mentre gli esiti dell'analisi numerica di RSL sono riportati nel paragrafo 5.2.4.

Sono state effettuate verifiche quantitative della liquefacibilità e dei cedimenti post sisma (da prove CPTe): hanno evidenziato la scarsa presenza di intervalli di sedimenti granulari liquefacibili (cioè con FS <1) con valori del potenziale di liquefazione che risultano sempre bassi (LPI ≤2), tranne un solo punto da classificare moderato (LPI =3,4). Nel settore occidentale del comparto, la presenza di inviluppi di paleoalvei limoso sabbiosi (CPTe11-12-13) non comporta significativi incrementi degli indici (LPI; LSN) e dei cedimenti post sisma, sia per la maggiore profondità degli strati granulari (vedi CPTe13), sia per la presenza di tessiture più fini che granulari (vedi prove CPTe11 e CPTe12).

Gli interventi previsti si ritengono ammissibili, consigliando fondazioni dirette a comportamento "rigido" e sovrappressioni scaricate nei terreni relativamente omogenee. Si ritengono comunque necessarie ulteriori verifiche da svolgere in fase di progettazione esecutiva, ai sensi delle vigenti NTC.

Orientamenti geotecnici (cfr. capitolo 6) → le penetrometrie CPTe eseguite forniscono esiti di resistenza utili per la caratterizzazione geotecnica di massima dei sedimenti attraversati. In calce alla Relazione si riportano le colonne geotecniche desunte dalle singole prove penetrometriche (strati "omogenei" con la stima dei principali parametri meccanici). Nel paragrafo 6.2 si riportano ulteriori considerazioni di carattere geotecnico utili ai fini della progettazione delle opere di fondazione da prevedere.

Le indagini evidenziano sedimenti superficiali più alterati e con resistenze alla punta più eterogenee fino a circa -0,8÷1,2 metri. I sedimenti più superficiali sono inoltre soggetti ad essiccamento, che risulta più significativo fino a circa -1,5÷1,8 metri, con resistenze alla punta qc relativamente più elevate. Si tratta di una condizione che può ritenersi reversibile e da tenere in considerazione in fase di progettazione. Più in profondità le prove CPTU eseguite hanno evidenziato resistenze di punta qc generalmente superiori a 1.000 kPa, dimostrando una discreta qualità geotecnica dei sedimenti attraversati.

In conclusione, le indagini svolte per il piano attuativo non evidenziano particolari criticità di carattere geotecnico. In sede di progettazione dei fabbricati si potranno prevedere fondazioni dirette, procedendo con ulteriori analisi geotecniche e controllando eventuali limitazioni legate all'interazione sedimenti-struttura, cioè ai cedimenti assoluti e differenziali o all'entità delle

pressioni d'esercizio.

Le verifiche di liquefazione e dei cedimenti post sisma, non indicano particolari criticità, tuttavia si consiglia di adottare fondazioni a comportamento rigido, in grado di sostenere cedimenti differenziali di maggiore entità.

Elaborazione: geol. Samuel Sangiorgi



ALLEGATI:

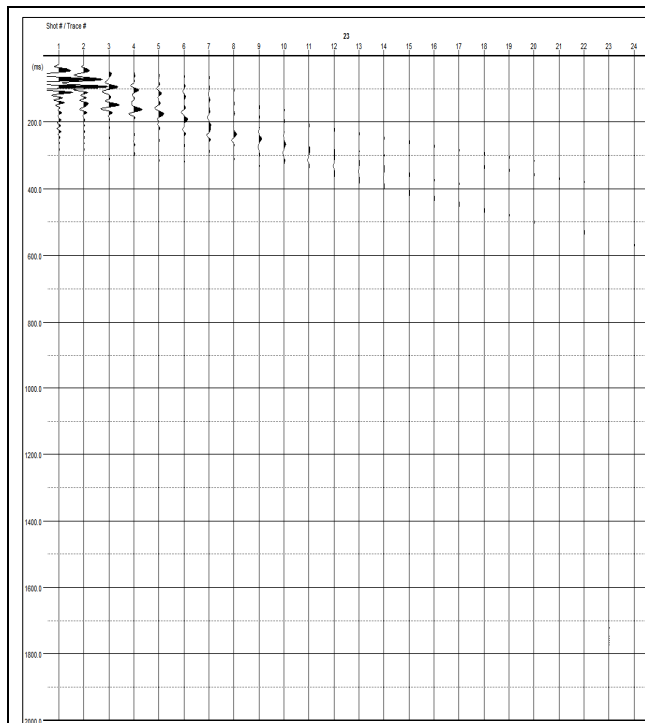
REPORT INDAGINI GEOGNOSTICHE E GEOFISICHE  
COLONNE GEOTECNICHE DI SINTESI (PROVE CPTE)  
REPORT VERIFICHE LIQUEFAZIONI E CEDIMENTI POST SISMA (PROVE CPTE)

# PROSPEZIONE SISMICA CON METODOLOGIA ATTIVA/PASSIVA MASW/Re.Mi.

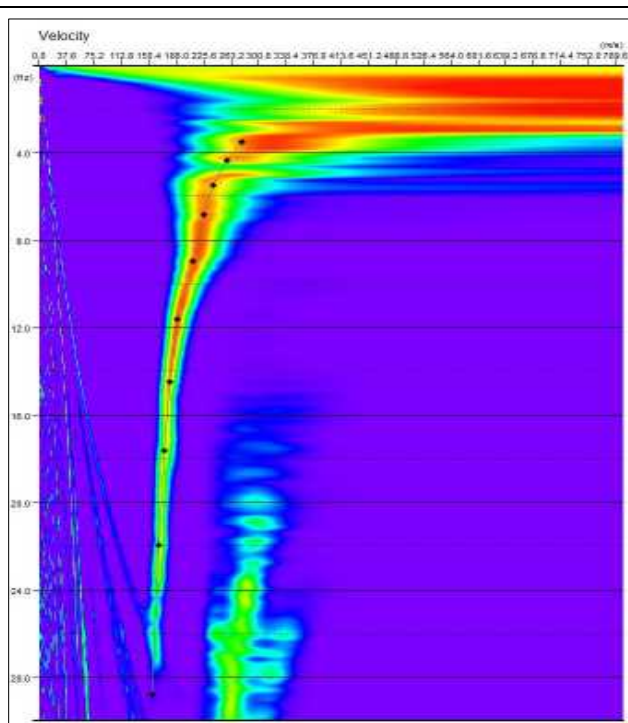
PUA de Coubertin – Castenaso (BO)

n° tracce	$\Delta x$ (m)	L tot (m)	$\Delta t$ (ms)	T (s)
25	3,0	69,0	0,5/2,0	2,0/32,0

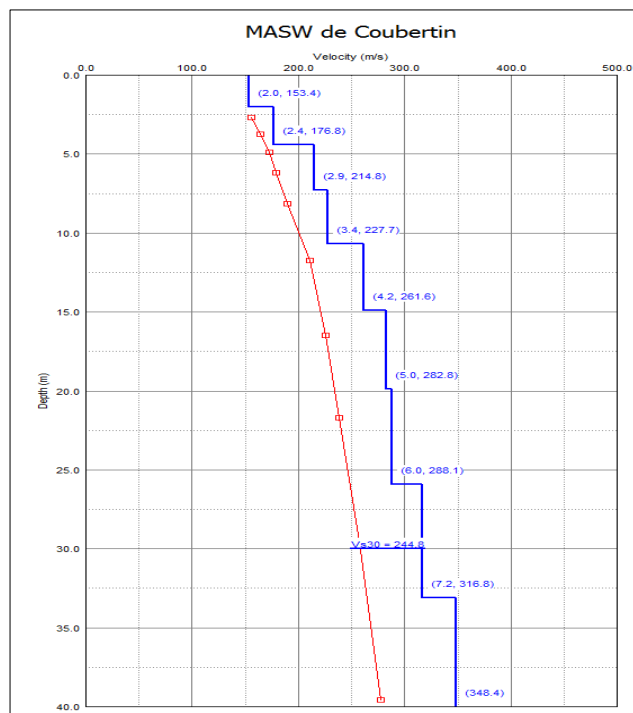
$\Delta x$ : interdistanza geofonica; L tot: lunghezza profilo;  $\Delta t$ : passo di campionamento; T: durata registrazione.



Sismogramma registrato durante le acquisizioni di microtremore sismico. In ascissa il numero dei geofoni, in ordinata il tempo (ms).



Spettro di potenza nel dominio  $f-v$  e Picking della curva sperimentali delle onde R (croci nere).



Modello di sottosuolo (1D) descritti in termini di  $V_s$  e spessore dei sismostrati (spezzata blu) e curva di dispersione sperimentale delle onde R (curva rossa).

## Tabella di sintesi

n. Strato	Profondità letto (m dal p.c.)	Spessore (m)	$V_s$ (m/s)
1	2.0	2.0	153.4
2	4.4	2.4	176.8
3	7.3	2.9	214.8
4	10.7	3.4	227.7
5	14.9	4.2	261.6
6	19.9	5.0	282.8
7	25.9	6.0	288.1
8	33.1	7.2	316.8
9	$\infty$	$\infty$	348.4

$$V_{s30} = 244.8 \pm 10\% \text{ [m/s]}$$

Sintesi dei parametri del modello di sottosuolo ottenuto e Valore di  $V_{s30}$  calcolato.

## CASTENASO – COMPARTO DE COUBERTIN, HVSR1

Instrument: TRZ-0108/01-10

Start recording: 21/04/01 10:08:34 End recording: 21/04/01 10:28:35

Channel labels: NORTH SOUTH; EAST WEST ; UP DOWN

Trace length: 0h20'00". Analyzed 87% trace (manual window selection)

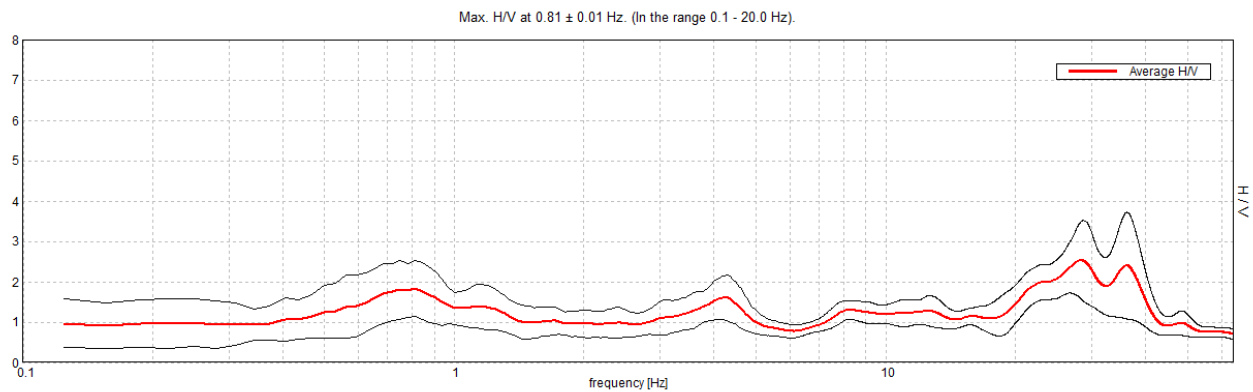
Sampling rate: 128 Hz

Window size: 20 s

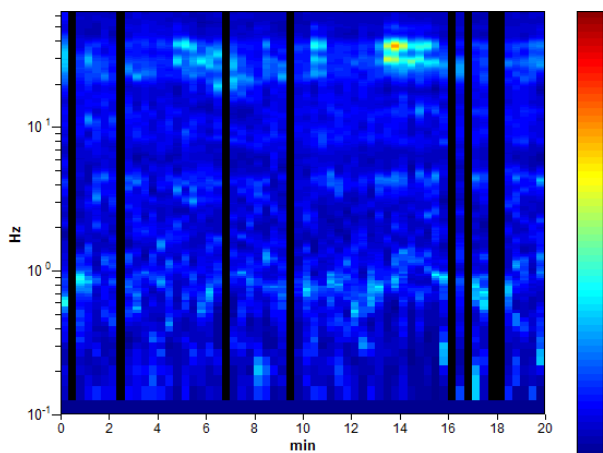
Smoothing type: Triangular window

Smoothing: 10%

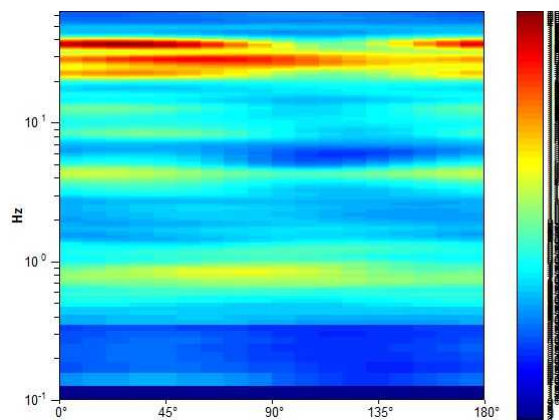
### HORIZONTAL TO VERTICAL SPECTRAL RATIO



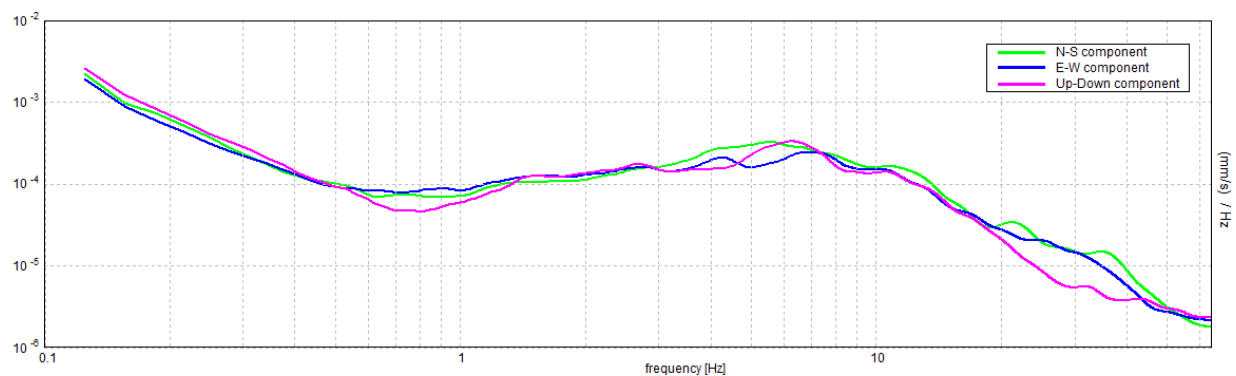
### H/V TIME HISTORY



### DIRECTIONAL H/V



### SINGLE COMPONENT SPECTRA





[According to the SESAME, 2005 guidelines. **Please read carefully the *Grilla* manual before interpreting the following tables.**]

**Max. H/V at  $0.81 \pm 0.01$  Hz (in the range 0.1 - 20.0 Hz).**

**Criteria for a reliable H/V curve**

[All 3 should be fulfilled]

$f_0 > 10 / L_w$	$0.81 > 0.50$	OK	
$n_c(f_0) > 200$	$845.0 > 200$	OK	
$\sigma_A(f) < 2$ for $0.5f_0 < f < 2f_0$ if $f_0 > 0.5\text{Hz}$ $\sigma_A(f) < 3$ for $0.5f_0 < f < 2f_0$ if $f_0 < 0.5\text{Hz}$	Exceeded 0 out of 40 times	OK	

**Criteria for a clear H/V peak**

[At least 5 out of 6 should be fulfilled]

Exists $f^-$ in $[f_0/4, f_0]$   $A_{H/V}(f^-) < A_0 / 2$			NO
Exists $f^+$ in $[f_0, 4f_0]$   $A_{H/V}(f^+) < A_0 / 2$			NO
$A_0 > 2$	$1.84 > 2$		NO
$f_{\text{peak}}[A_{H/V}(f) \pm \sigma_A(f)] = f_0 \pm 5\%$	$ 0.00538  < 0.05$	OK	
$\sigma_f < \varepsilon(f_0)$	$0.00438 < 0.12188$	OK	
$\sigma_A(f_0) < \theta(f_0)$	$0.3436 < 2.0$	OK	

$L_w$	window length
$n_w$	number of windows used in the analysis
$n_c = L_w n_w f_0$	number of significant cycles
$f$	current frequency
$f_0$	H/V peak frequency
$\sigma_f$	standard deviation of H/V peak frequency
$\varepsilon(f_0)$	threshold value for the stability condition $\sigma_f < \varepsilon(f_0)$
$A_0$	H/V peak amplitude at frequency $f_0$
$A_{H/V}(f)$	H/V curve amplitude at frequency $f$
$f^-$	frequency between $f_0/4$ and $f_0$ for which $A_{H/V}(f^-) < A_0/2$
$f^+$	frequency between $f_0$ and $4f_0$ for which $A_{H/V}(f^+) < A_0/2$
$\sigma_A(f)$	standard deviation of $A_{H/V}(f)$ , $\sigma_A(f)$ is the factor by which the mean $A_{H/V}(f)$ curve should be multiplied or divided
$\sigma_{\log H/V}(f)$	standard deviation of $\log A_{H/V}(f)$ curve
$\theta(f_0)$	threshold value for the stability condition $\sigma_A(f) < \theta(f_0)$

**Threshold values for  $\sigma_f$  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]	$0.25 f_0$	$0.2 f_0$	$0.15 f_0$	$0.10 f_0$	$0.05 f_0$
$\theta(f_0)$ for $\sigma_A(f_0)$	3.0	2.5	2.0	1.78	1.58
$\log \theta(f_0)$ for $\sigma_{\log H/V}(f_0)$	0.48	0.40	0.30	0.25	0.20

## CASTENASO - COMPARTO DE COUBERTIN, HVSR2

Instrument: TRZ-0108/01-10

Start recording: 21/04/01 10:36:42 End recording: 21/04/01 10:56:43

Channel labels: NORTH SOUTH; EAST WEST ; UP DOWN

Trace length: 0h20'00". Analyzed 88% trace (manual window selection)

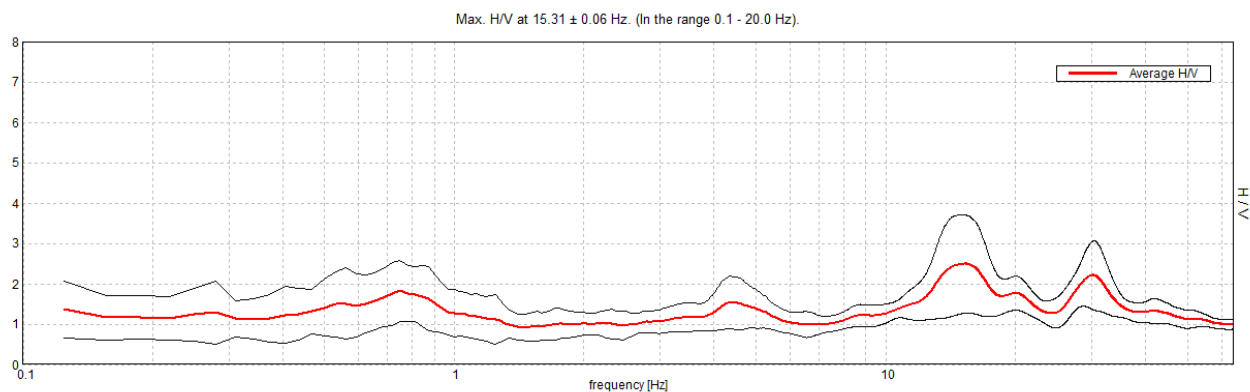
Sampling rate: 128 Hz

Window size: 20 s

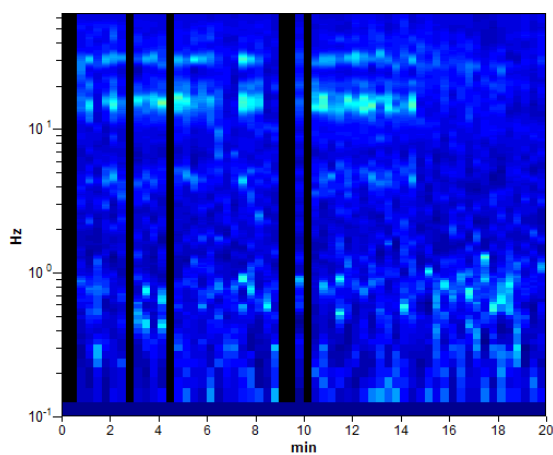
Smoothing type: Triangular window

Smoothing: 10%

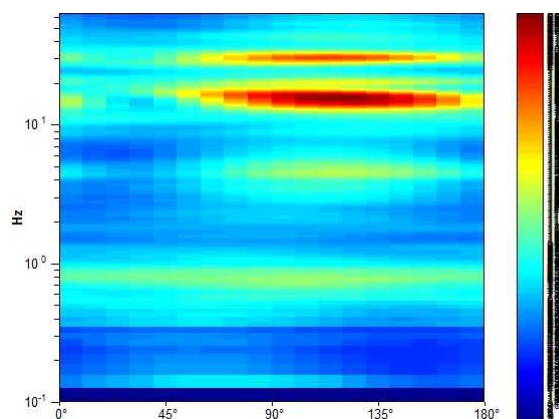
### HORIZONTAL TO VERTICAL SPECTRAL RATIO



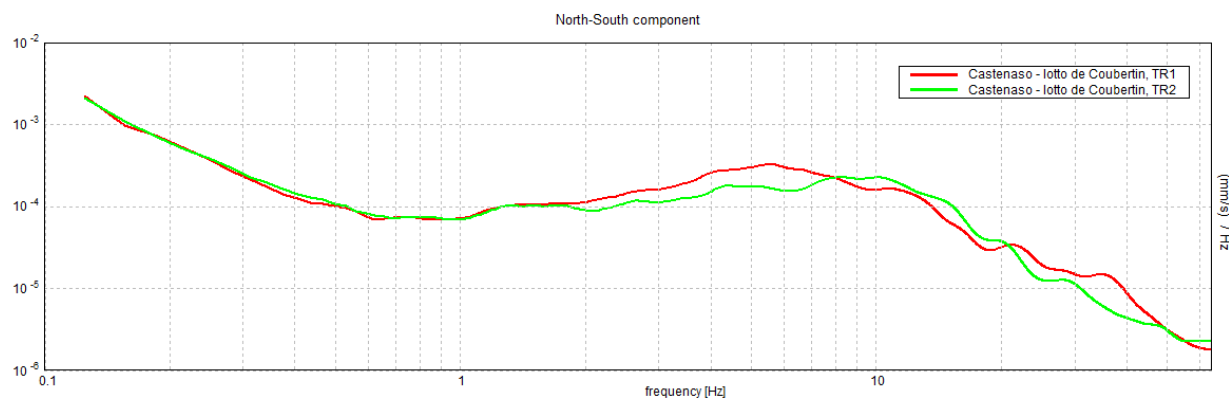
### H/V TIME HISTORY



### DIRECTIONAL H/V



### SINGLE COMPONENT SPECTRA



[According to the SESAME, 2005 guidelines. **Please read carefully the *Grilla* manual before interpreting the following tables.**]

**Max. H/V at  $15.31 \pm 0.06$  Hz (in the range 0.1 - 20.0 Hz).**

**Criteria for a reliable H/V curve**

[All 3 should be fulfilled]

$f_0 > 10 / L_w$	$15.31 > 0.50$	<b>OK</b>	
$n_c(f_0) > 200$	$16231.3 > 200$	<b>OK</b>	
$\sigma_A(f) < 2$ for $0.5f_0 < f < 2f_0$ if $f_0 > 0.5\text{Hz}$ $\sigma_A(f) < 3$ for $0.5f_0 < f < 2f_0$ if $f_0 < 0.5\text{Hz}$	Exceeded 0 out of 736 times	<b>OK</b>	

**Criteria for a clear H/V peak**

[At least 5 out of 6 should be fulfilled]

Exists $f^-$ in $[f_0/4, f_0]$   $A_{H/V}(f^-) < A_0 / 2$	9.875 Hz	<b>OK</b>	
Exists $f^+$ in $[f_0, 4f_0]$   $A_{H/V}(f^+) < A_0 / 2$	45.5 Hz	<b>OK</b>	
$A_0 > 2$	$2.49 > 2$	<b>OK</b>	
$f_{\text{peak}}[A_{H/V}(f) \pm \sigma_A(f)] = f_0 \pm 5\%$	$ 0.00179  < 0.05$	<b>OK</b>	
$\sigma_f < \varepsilon(f_0)$	$0.02749 < 0.76563$	<b>OK</b>	
$\sigma_A(f_0) < \theta(f_0)$	$0.5984 < 1.58$	<b>OK</b>	

$L_w$	window length
$n_w$	number of windows used in the analysis
$n_c = L_w n_w f_0$	number of significant cycles
$f$	current frequency
$f_0$	H/V peak frequency
$\sigma_f$	standard deviation of H/V peak frequency
$\varepsilon(f_0)$	threshold value for the stability condition $\sigma_f < \varepsilon(f_0)$
$A_0$	H/V peak amplitude at frequency $f_0$
$A_{H/V}(f)$	H/V curve amplitude at frequency $f$
$f^-$	frequency between $f_0/4$ and $f_0$ for which $A_{H/V}(f^-) < A_0/2$
$f^+$	frequency between $f_0$ and $4f_0$ for which $A_{H/V}(f^+) < A_0/2$
$\sigma_A(f)$	standard deviation of $A_{H/V}(f)$ , $\sigma_A(f)$ is the factor by which the mean $A_{H/V}(f)$ curve should be multiplied or divided
$\sigma_{\log H/V}(f)$	standard deviation of $\log A_{H/V}(f)$ curve
$\theta(f_0)$	threshold value for the stability condition $\sigma_A(f) < \theta(f_0)$

**Threshold values for  $\sigma_f$  and  $\sigma_A(f_0)$**

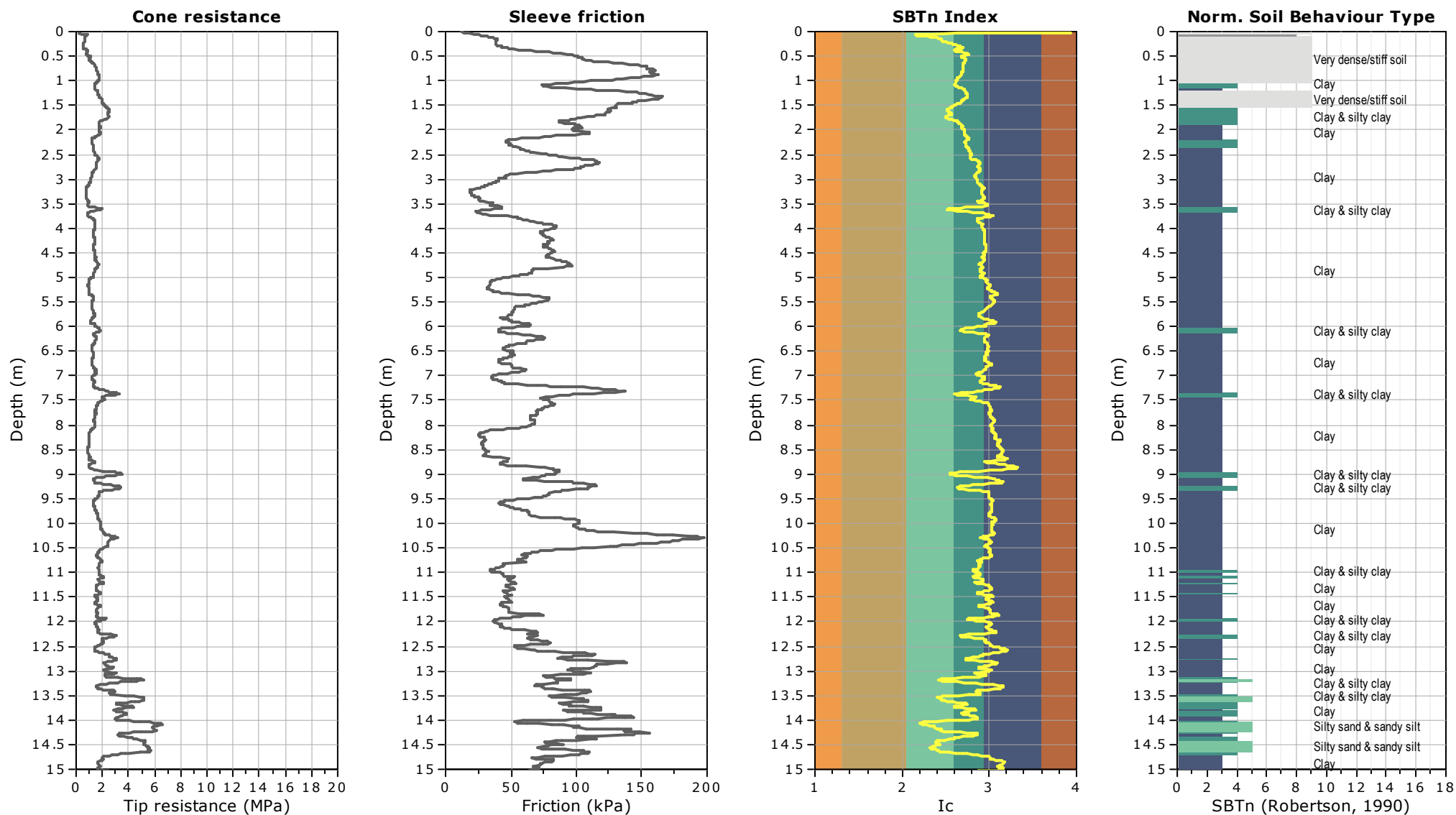
Freq. range [Hz]	< 0.2	0.2 – 0.5	0.5 – 1.0	1.0 – 2.0	> 2.0
$\varepsilon(f_0)$ [Hz]	$0.25 f_0$	$0.2 f_0$	$0.15 f_0$	$0.10 f_0$	$0.05 f_0$
$\theta(f_0)$ for $\sigma_A(f_0)$	3.0	2.5	2.0	1.78	1.58
$\log \theta(f_0)$ for $\sigma_{\log H/V}(f_0)$	0.48	0.40	0.30	0.25	0.20

**Project:** Lotto de Coubertin

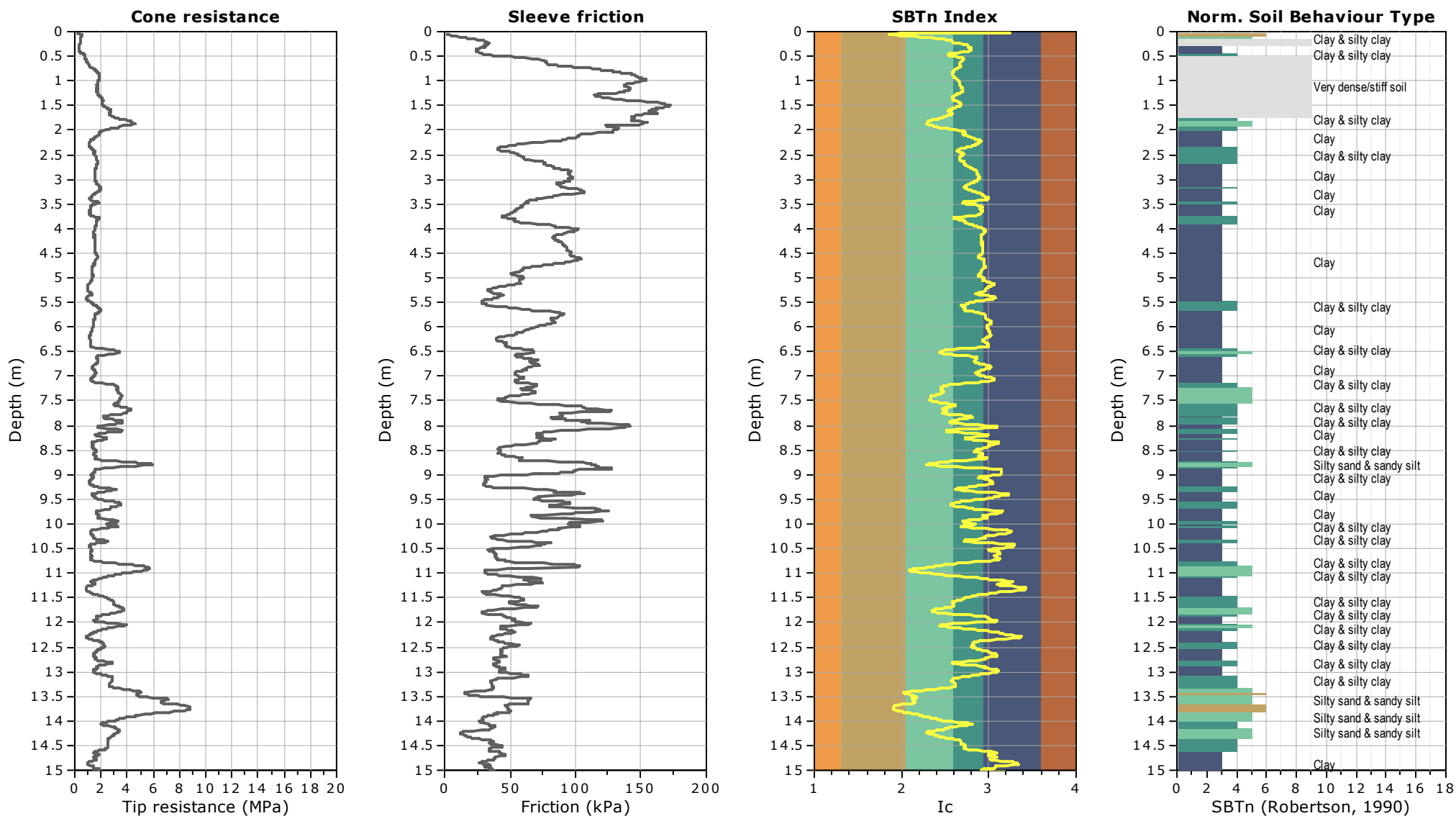
**Location:** Castenaso (BO)

**CPT: CPTE1**

Total depth: 15.05 m, Date: 22/04/2021





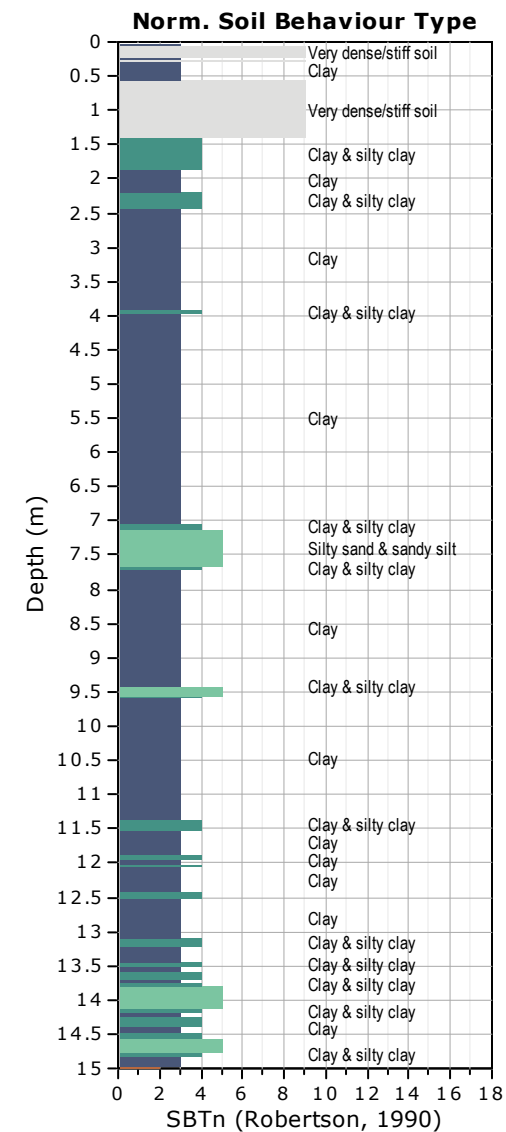
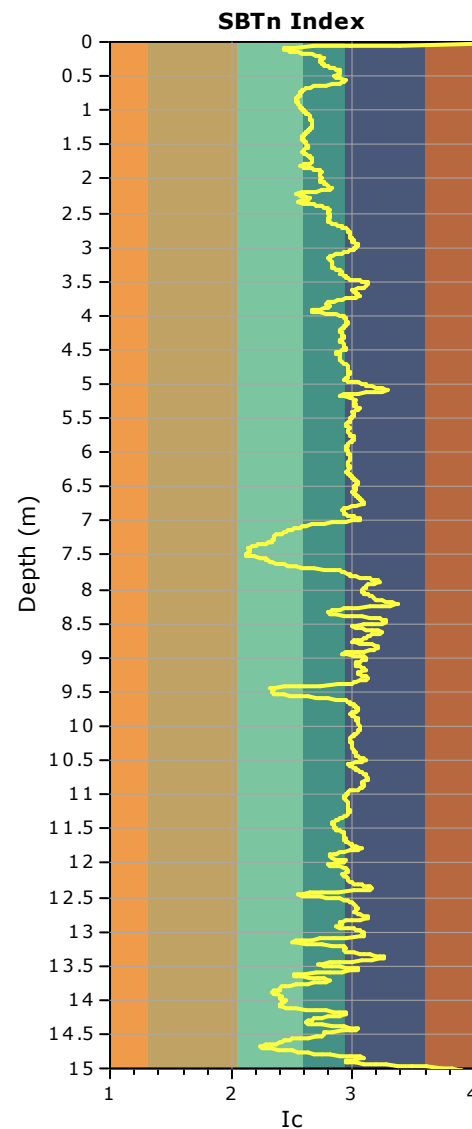
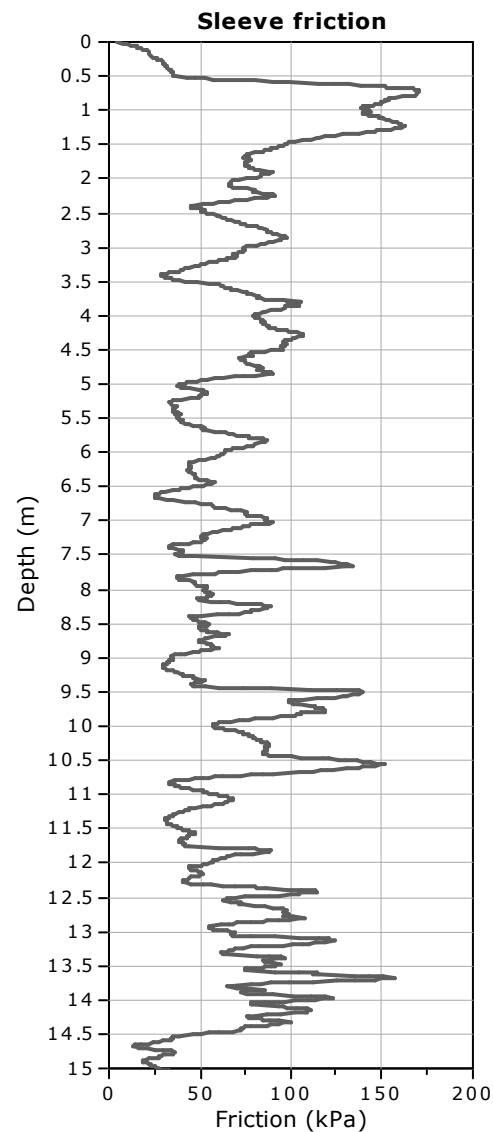
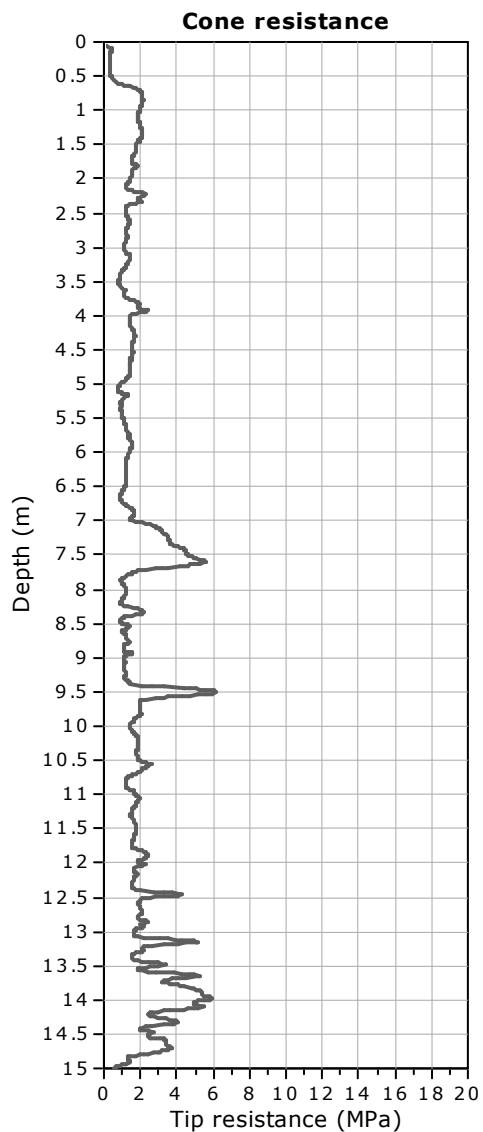


**Project:** Lotto de Coubertin

**Location:** Castenaso (BO)

**CPT: CPTE3**

Total depth: 15.05 m, Date: 22/04/2021

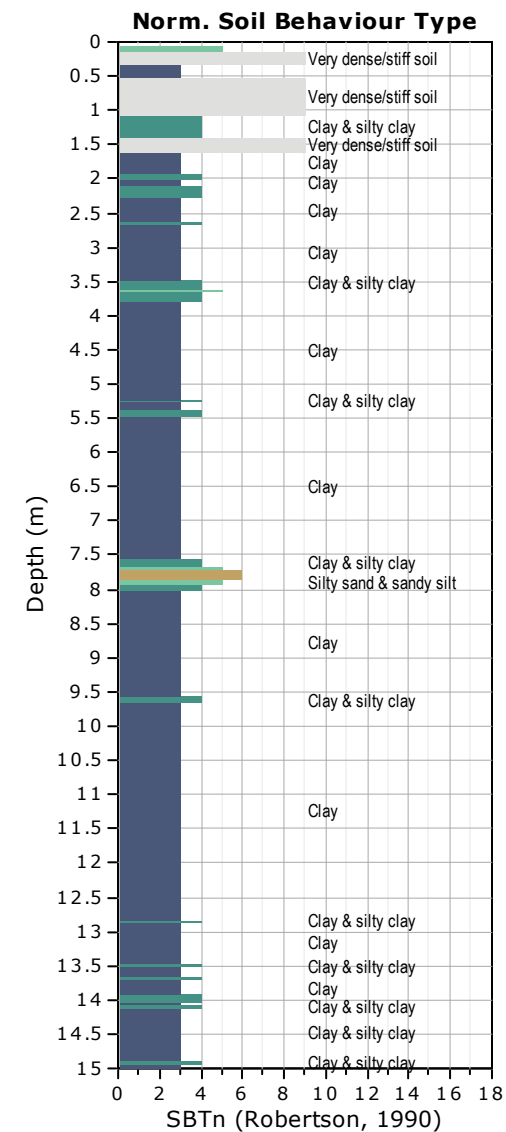
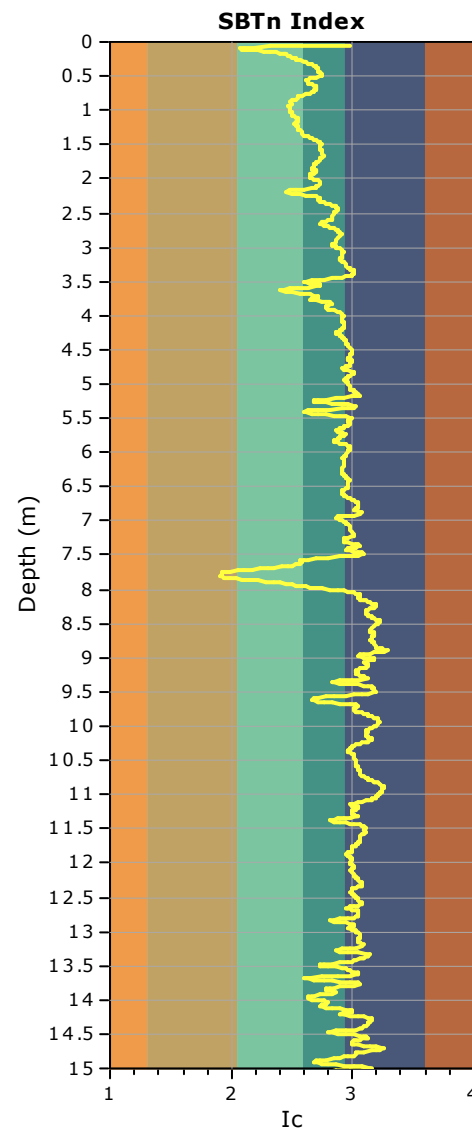
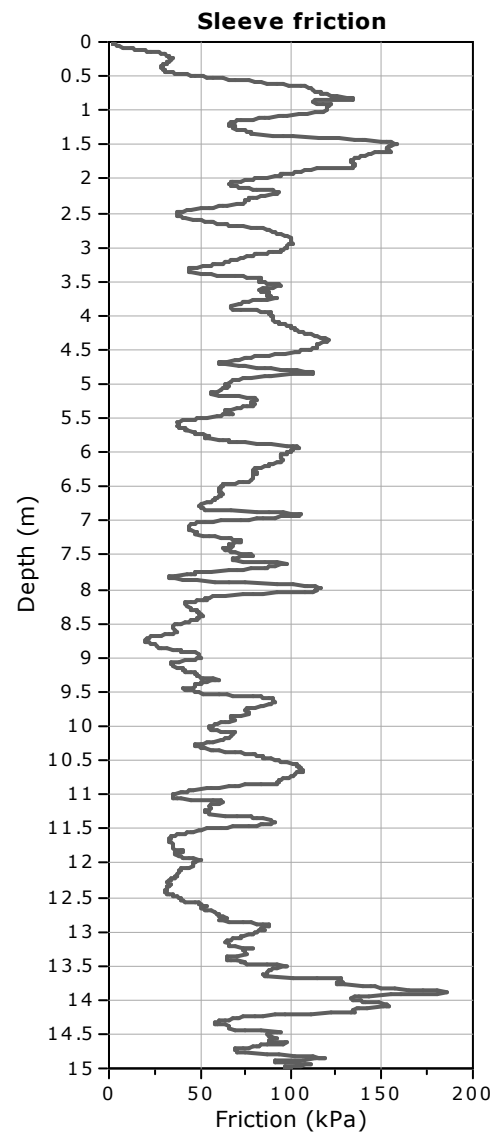
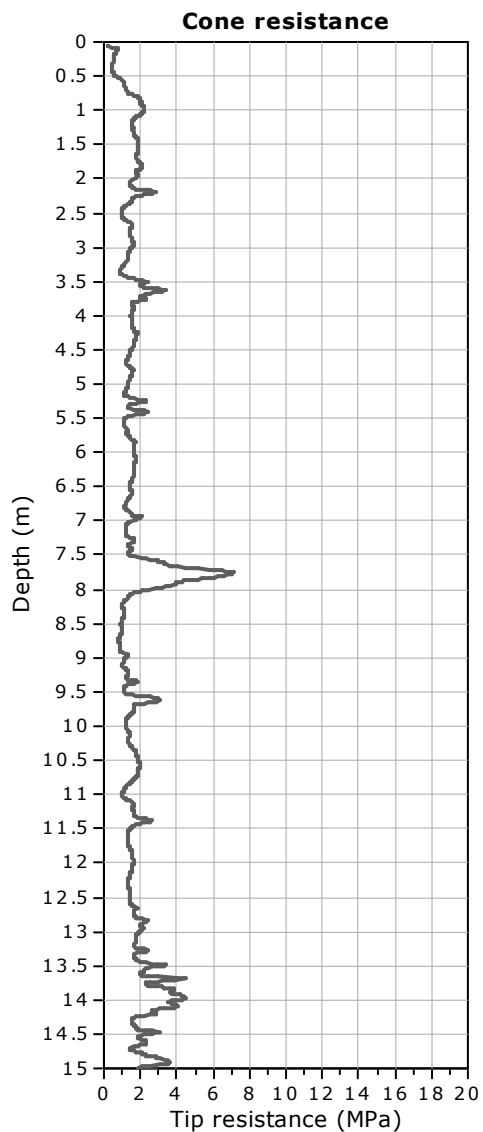


**Project:** Lotto de Coubertin

**Location:** Castenaso (BO)

**CPT: CPTE4**

Total depth: 15.11 m, Date: 22/04/2021

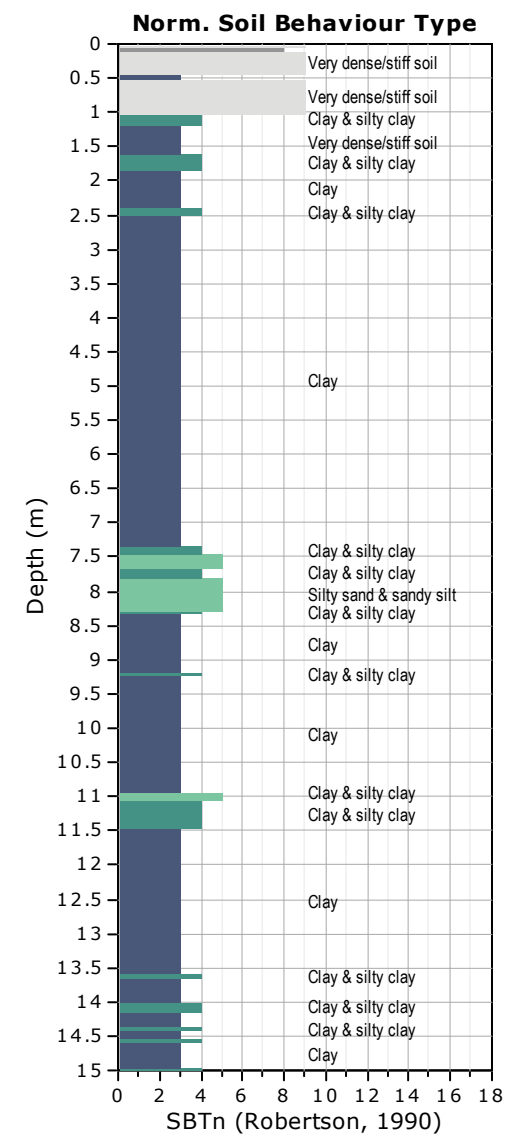
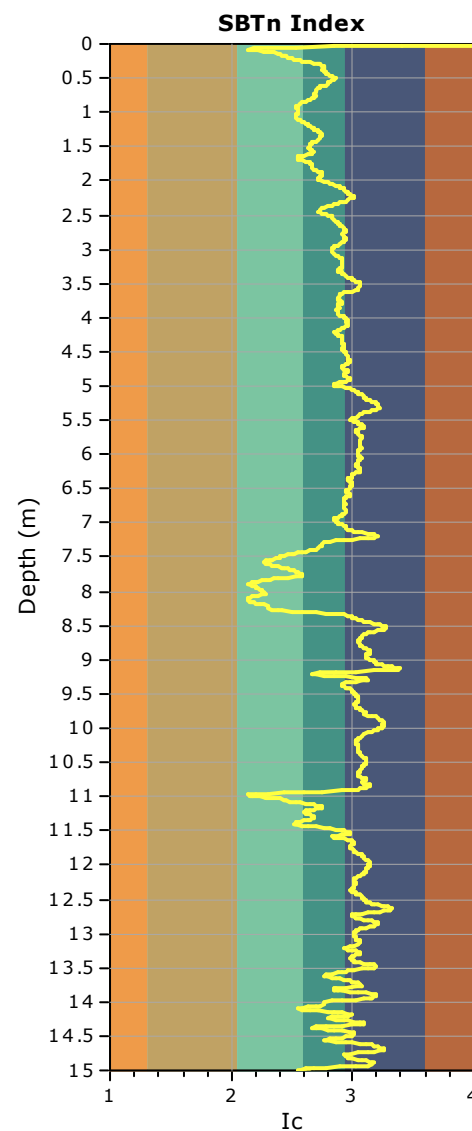
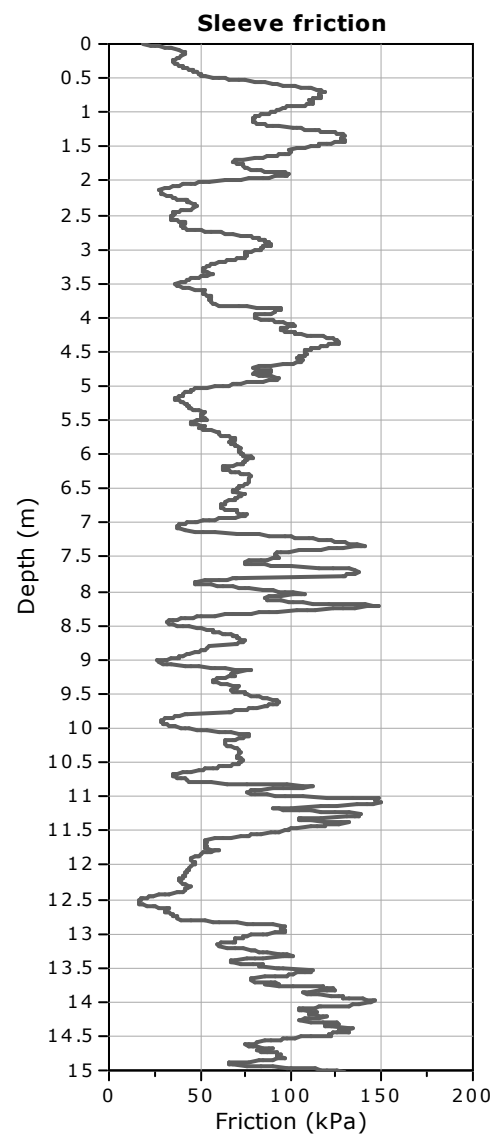
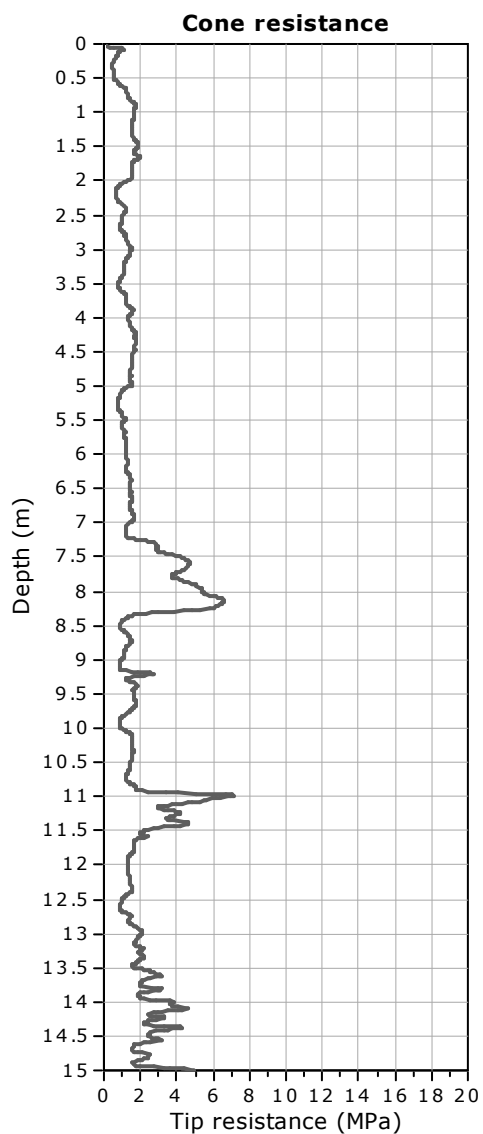


**Project:** Lotto de Coubertin

**Location:** Castenaso (BO)

**CPT: CPTe5**

Total depth: 15.04 m, Date: 06/05/2021



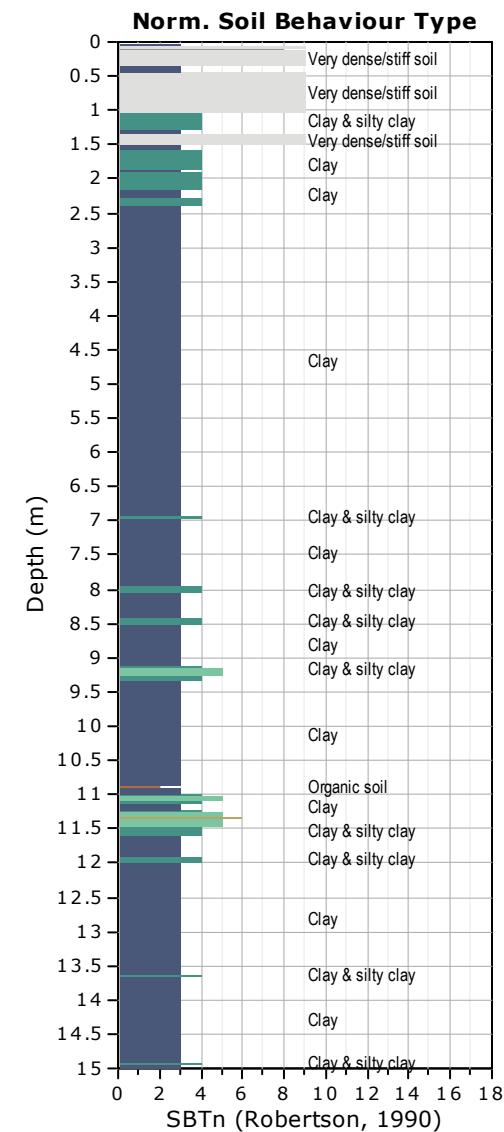
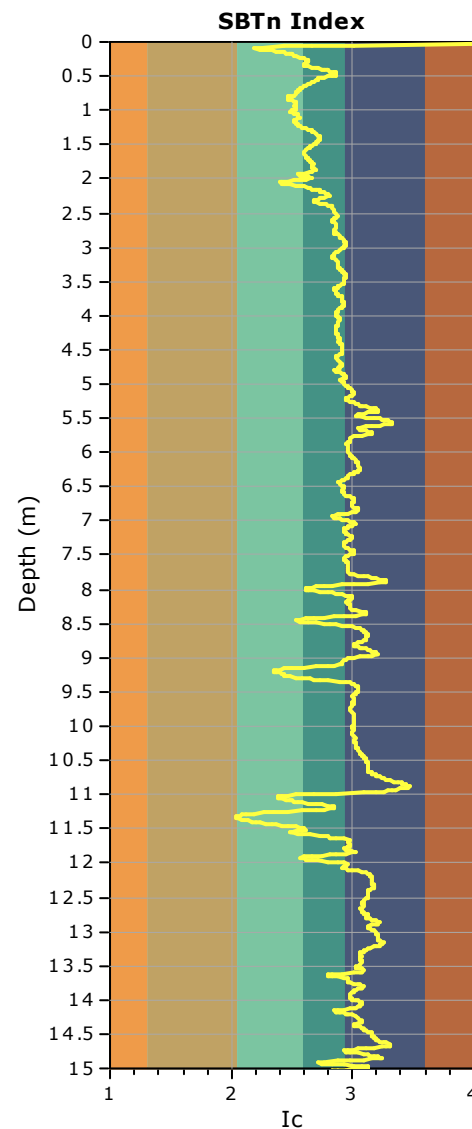
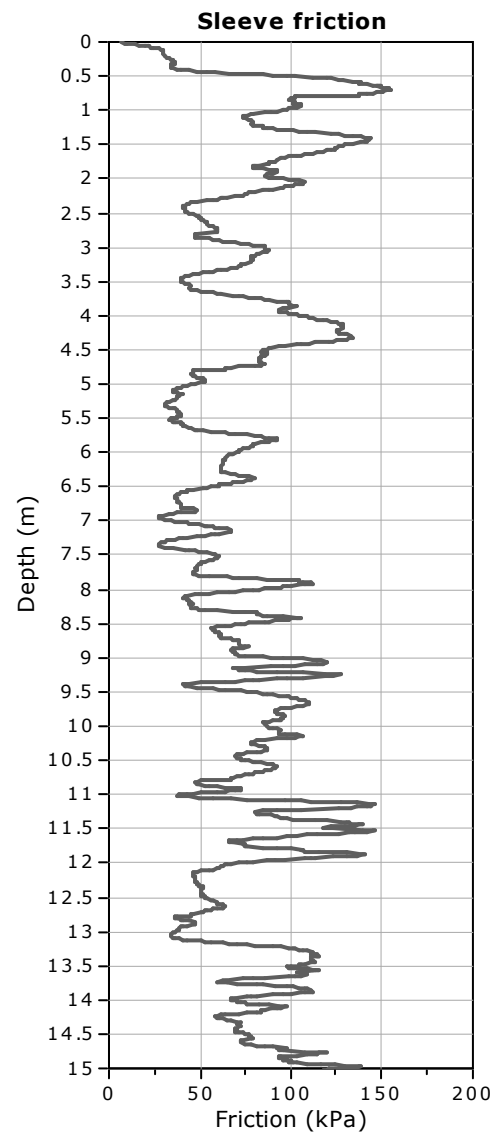
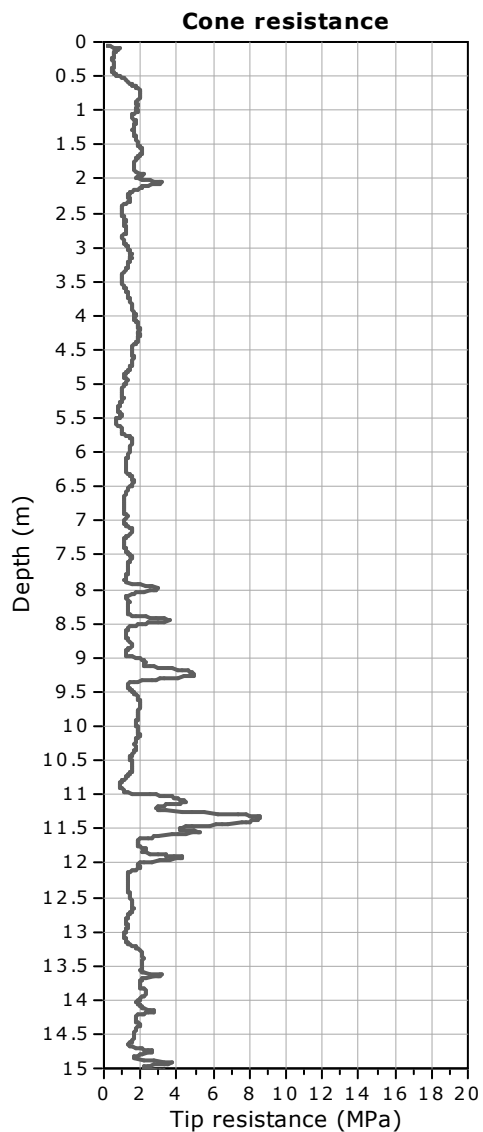


**Project:** Lotto de Coubertin

**Location:** Castenaso (BO)

**CPT: CPTe6**

Total depth: 15.64 m, Date: 22/04/2021

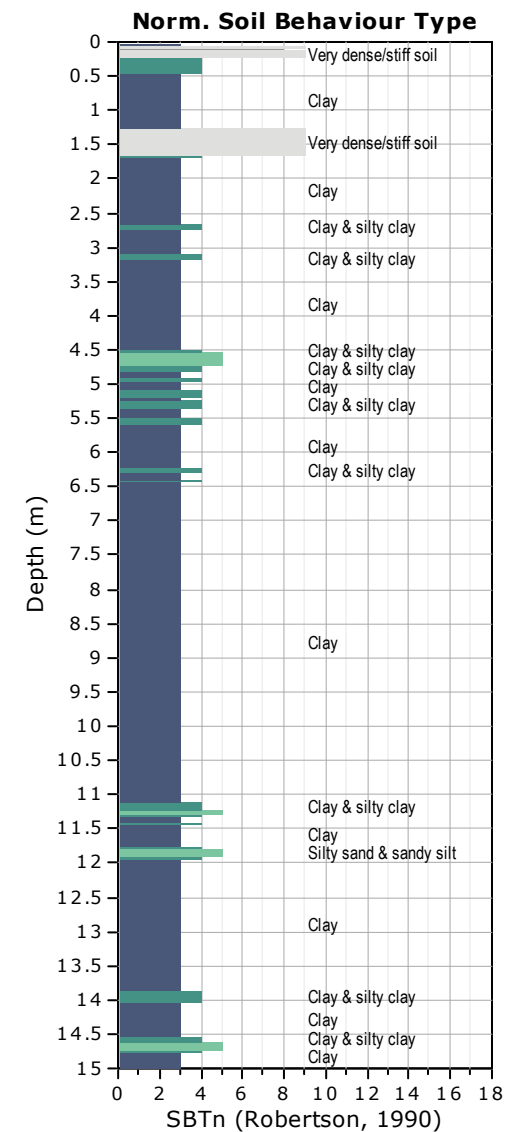
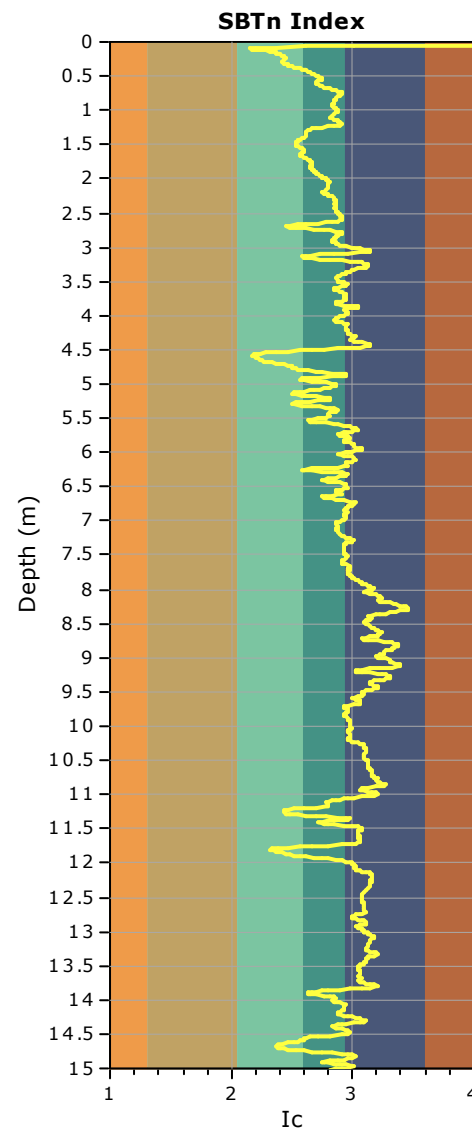
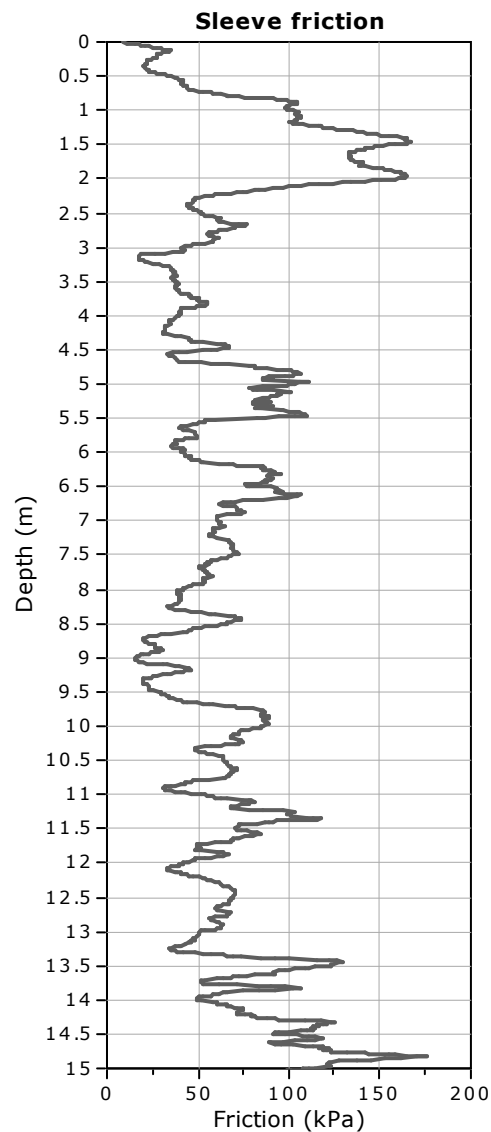
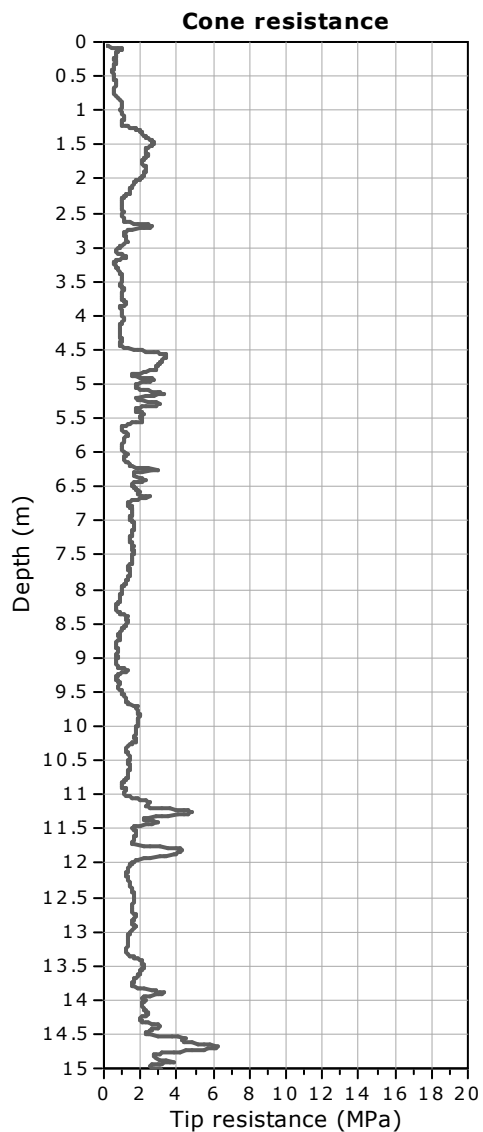


**Project:** Lotto de Coubertin

**Location:** Castenaso (BO)

**CPT: CPTE7**

Total depth: 15.07 m, Date: 06/05/2021

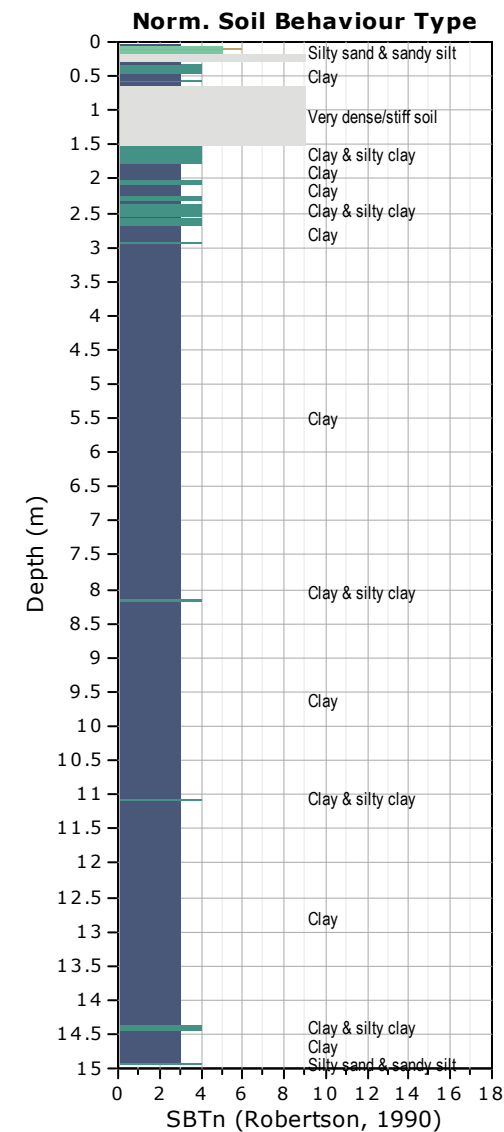
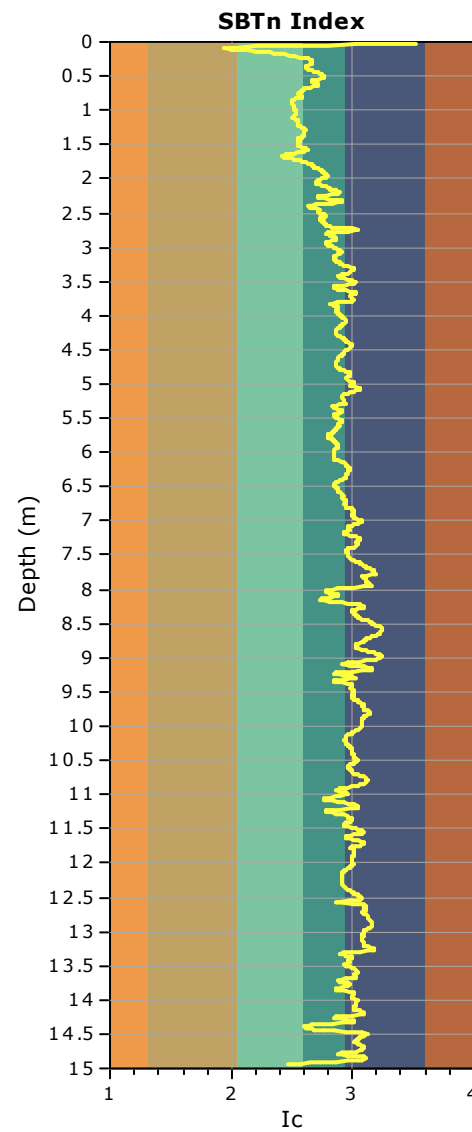
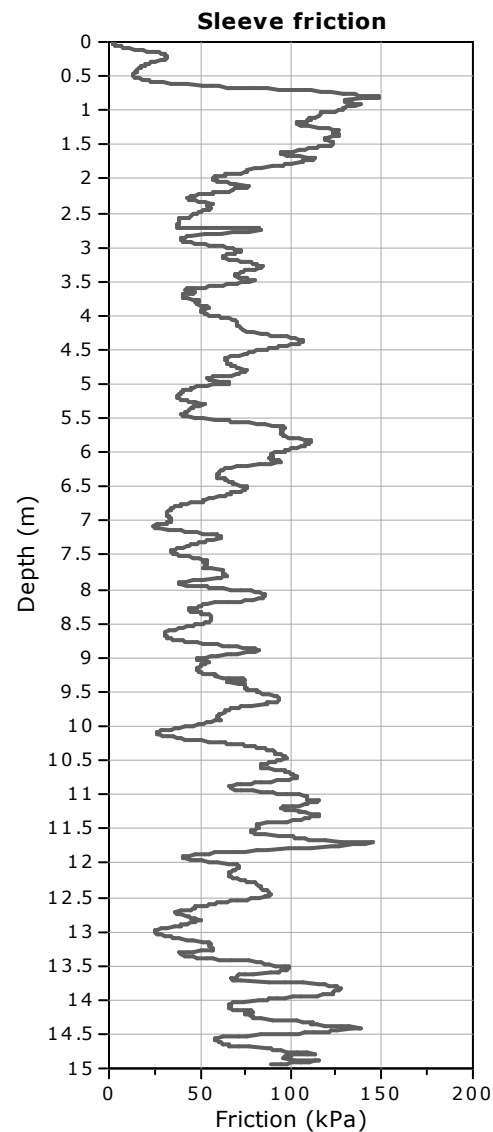
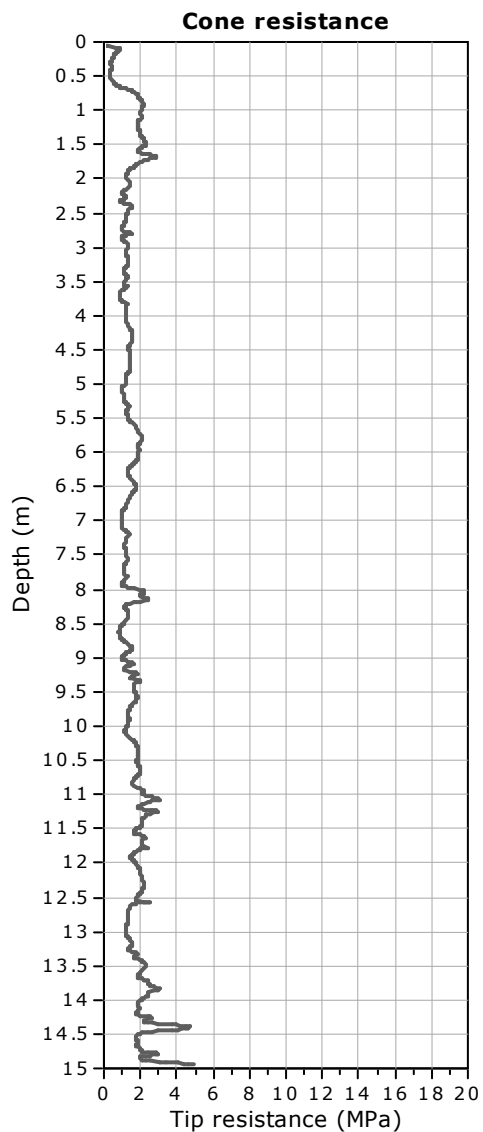


**Project:** Lotto de Coubertin

**Location:** Castenaso (BO)

**CPT: CPTe8**

Total depth: 14.95 m, Date: 22/04/2021

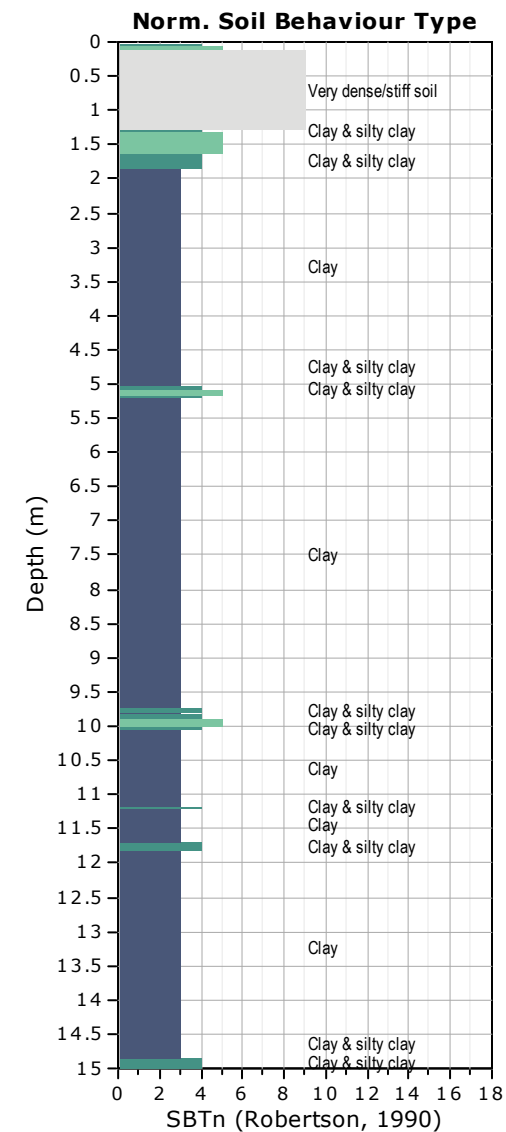
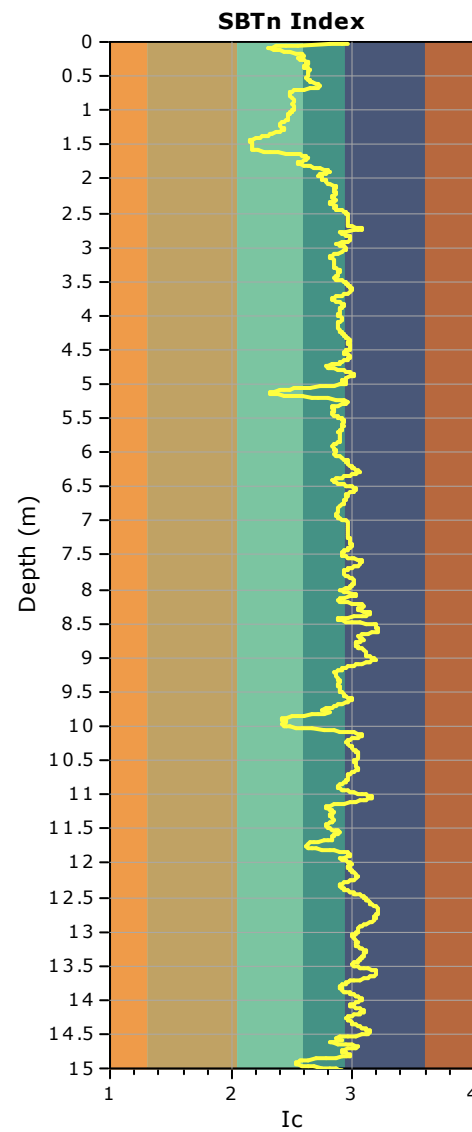
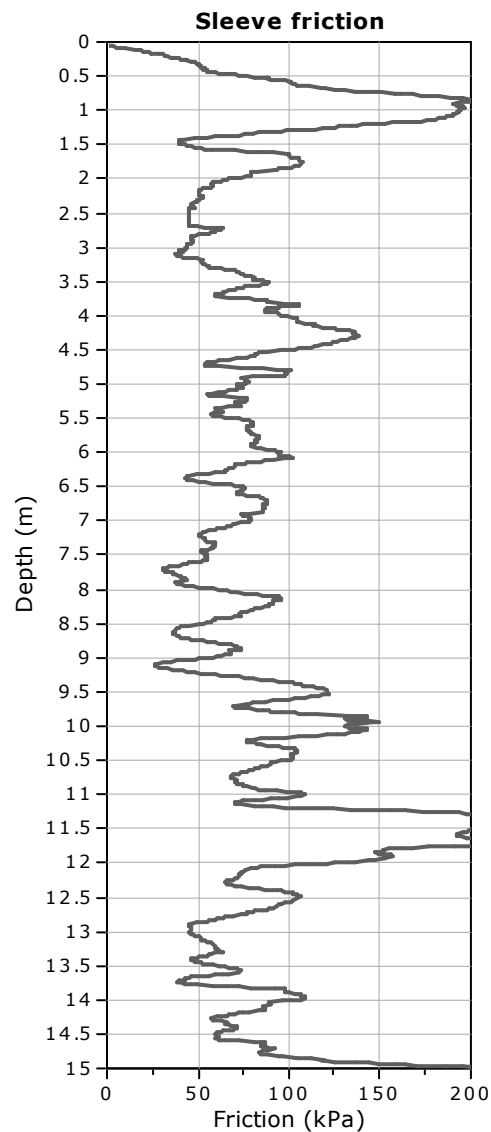
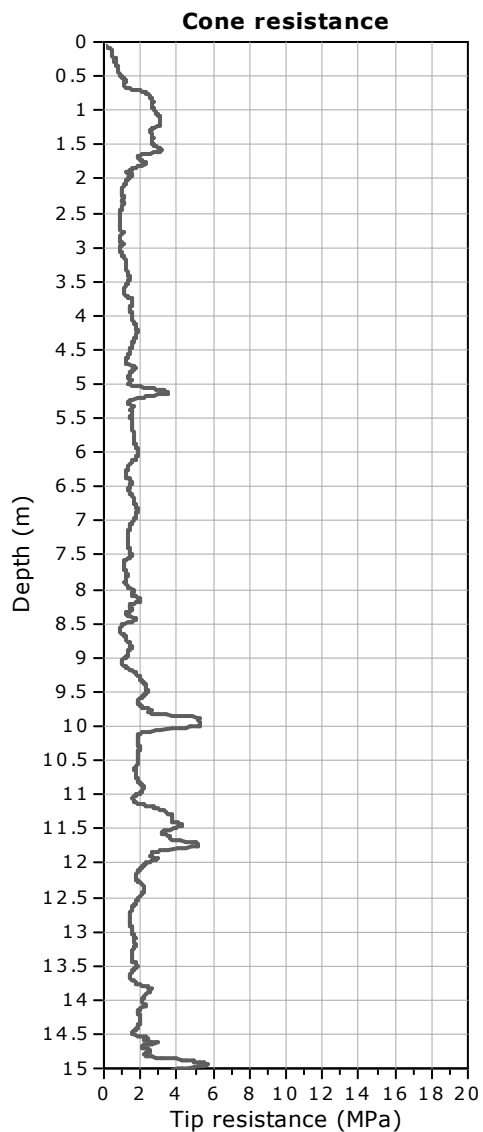


**Project:** Lotto de Coubertin

**Location:** Castenaso (BO)

**CPT: CPTe9**

Total depth: 15.13 m, Date: 29/04/2021



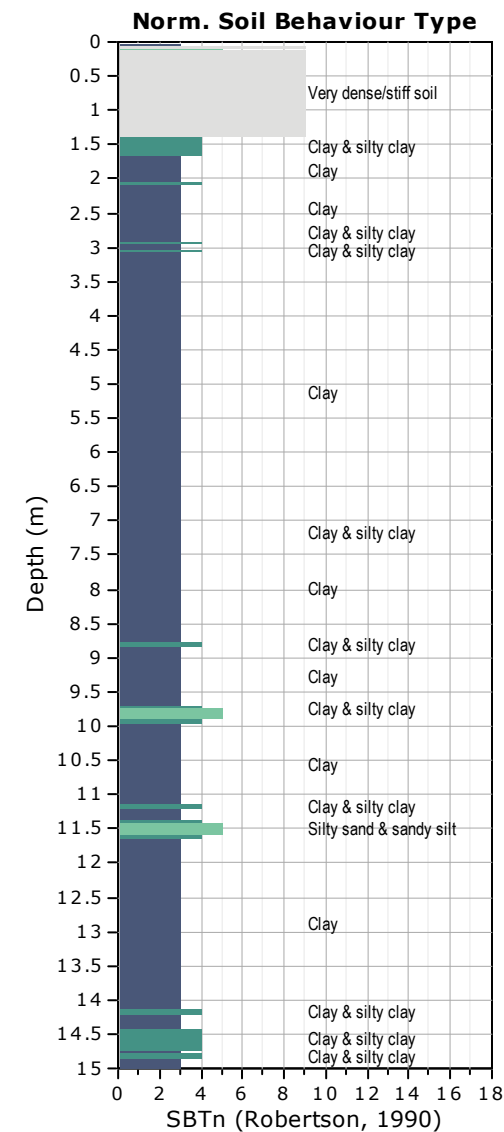
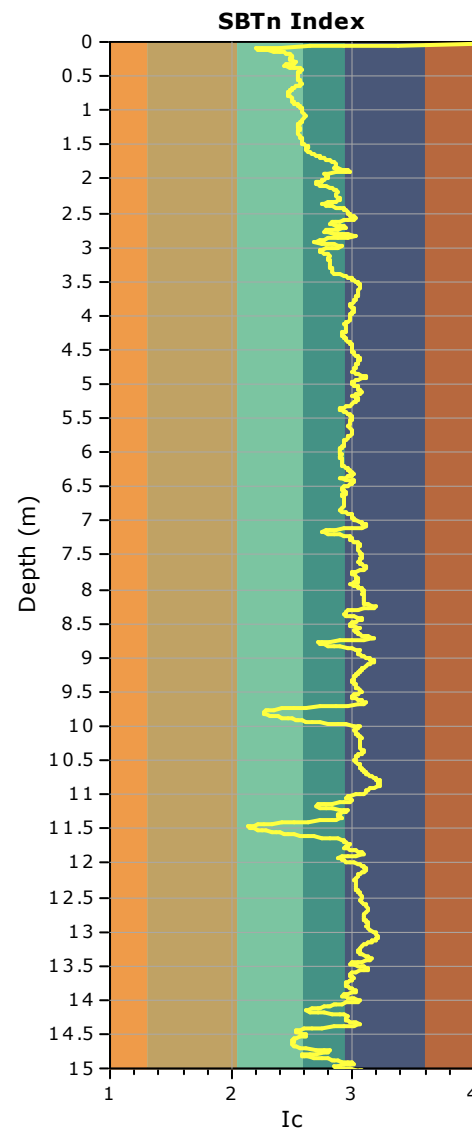
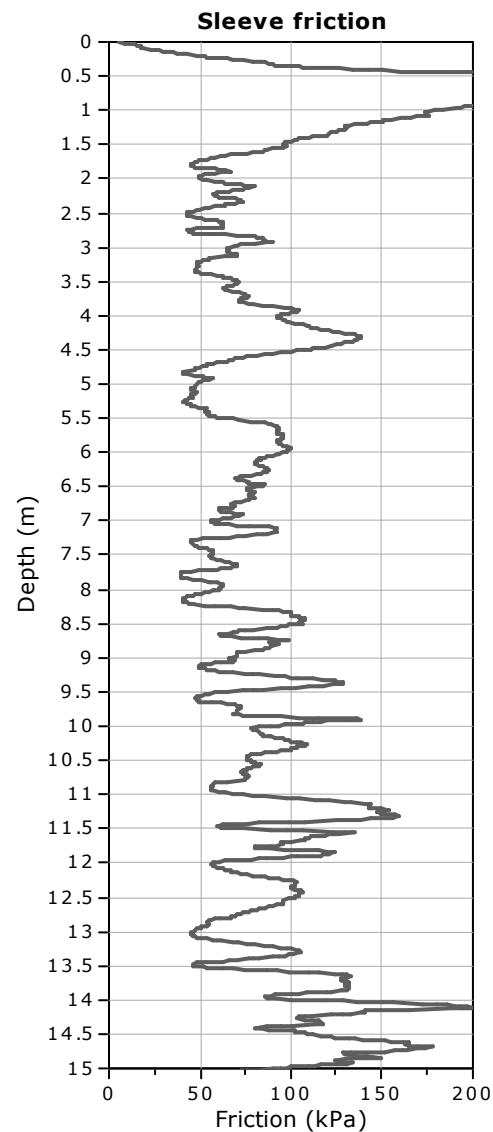
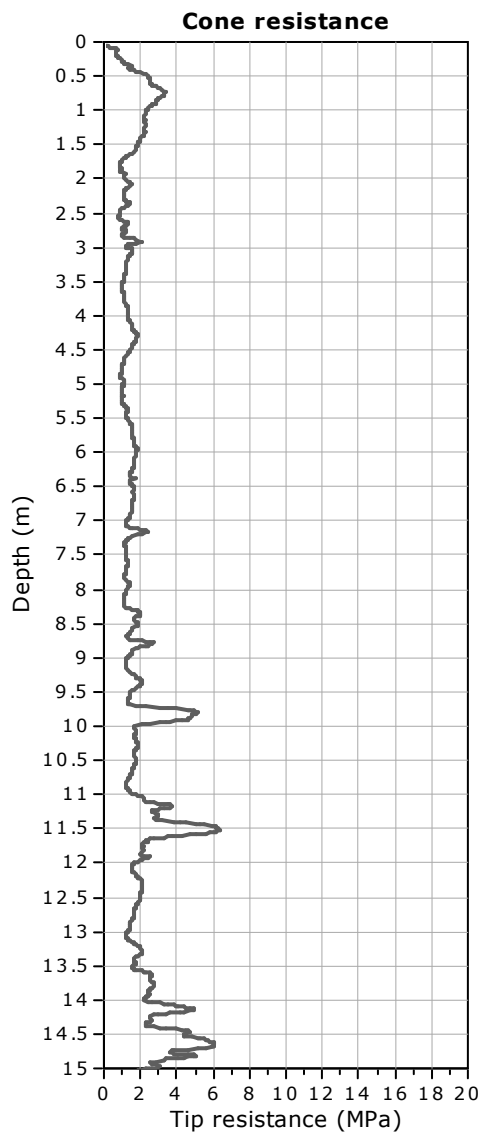


**Project:** Lotto de Coubertin

**Location:** Castenaso (BO)

**CPT: CPTE10**

Total depth: 15.77 m, Date: 29/04/2021



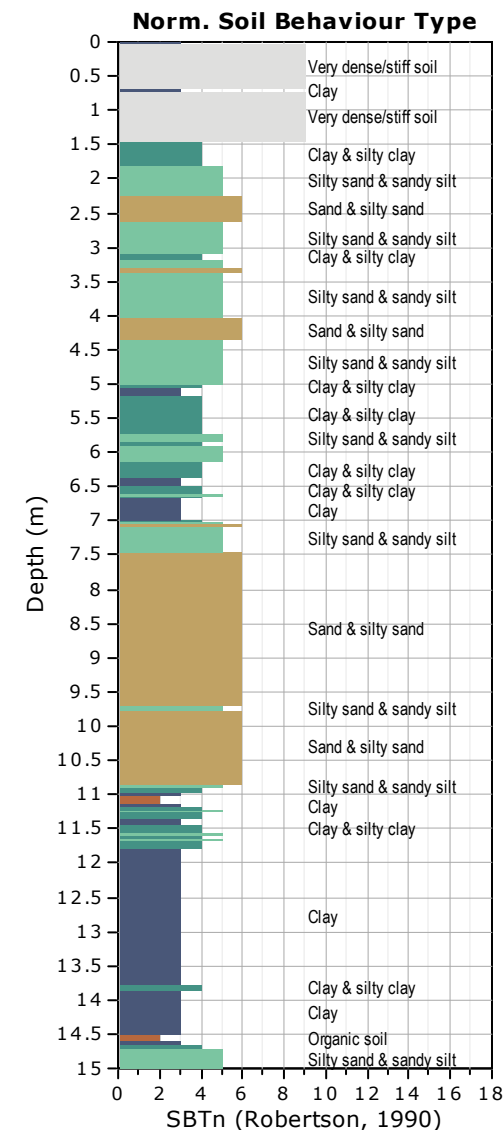
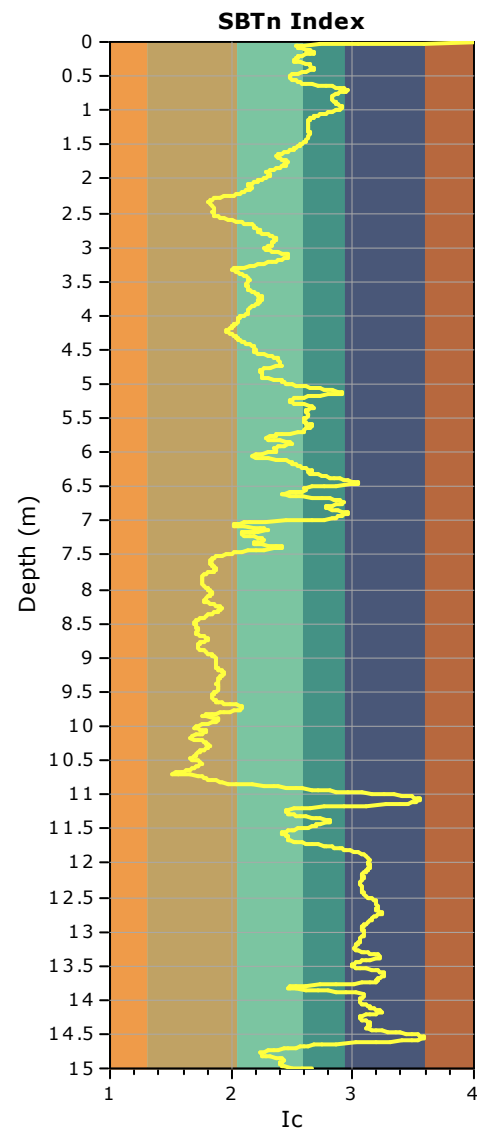
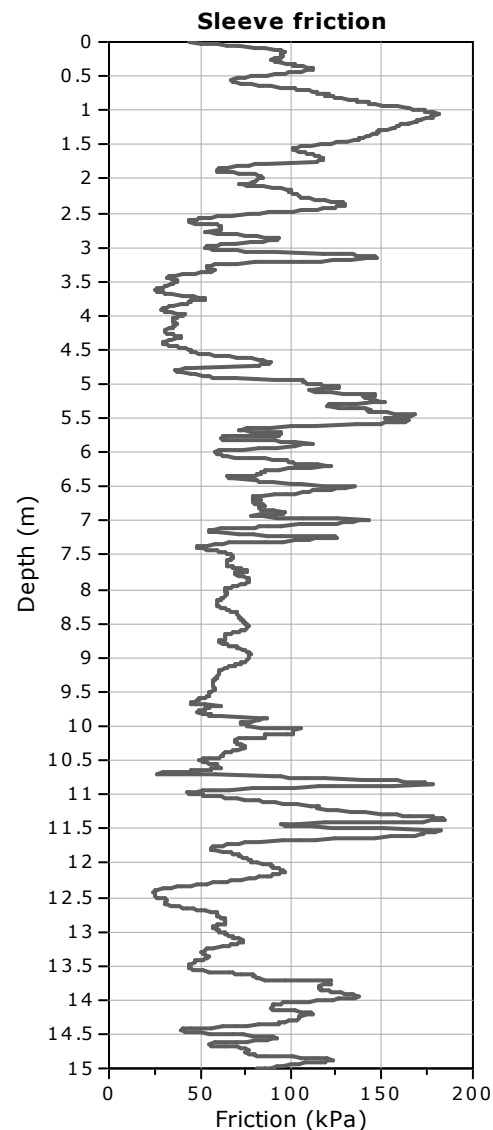
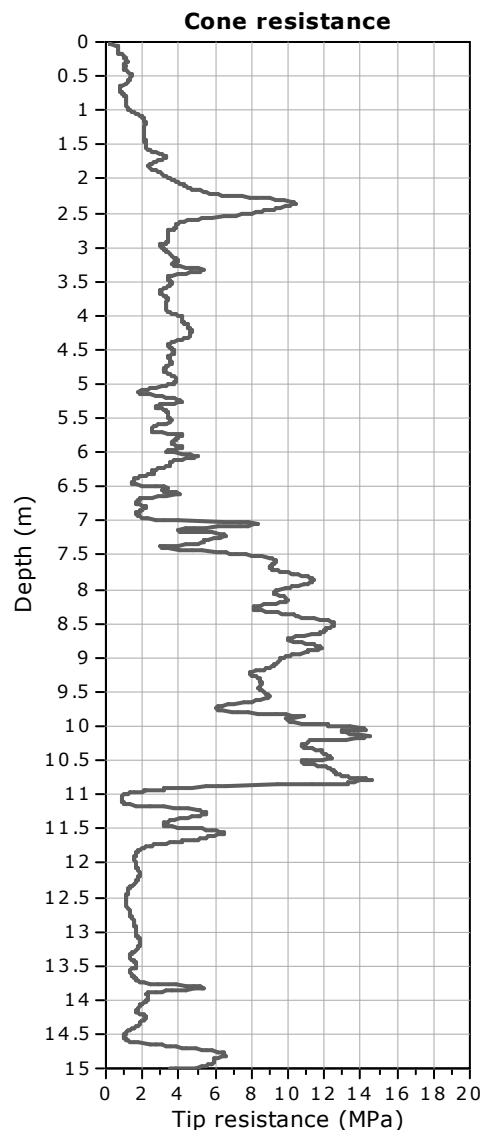


**Project:** Lotto de Coubertin

**Location:** Castenaso (BO)

**CPT: CPTE12**

Total depth: 15.01 m, Date: 29/04/2021





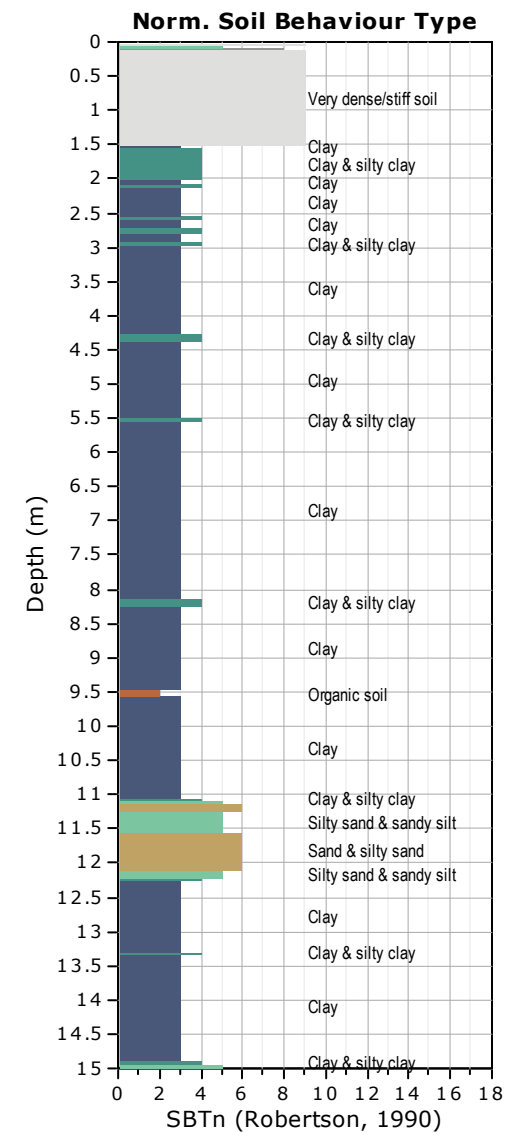
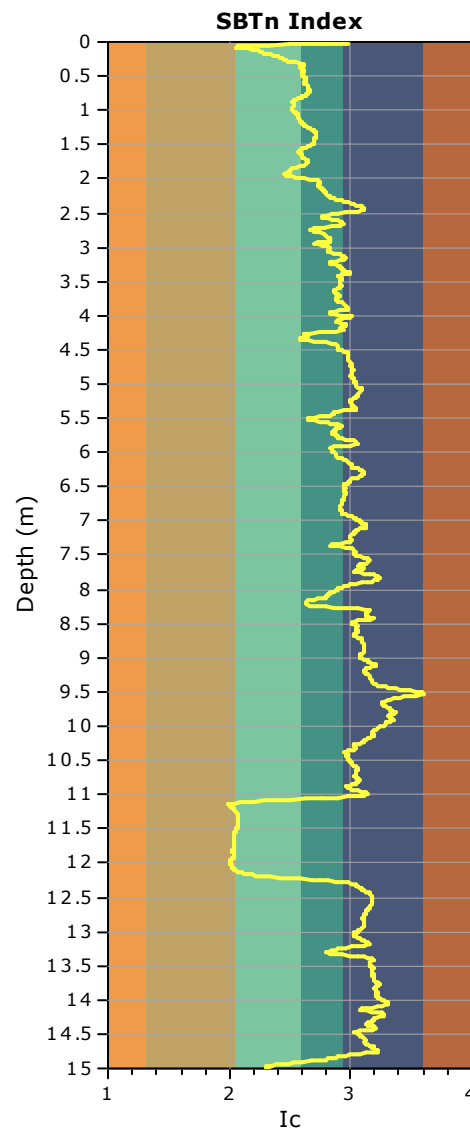
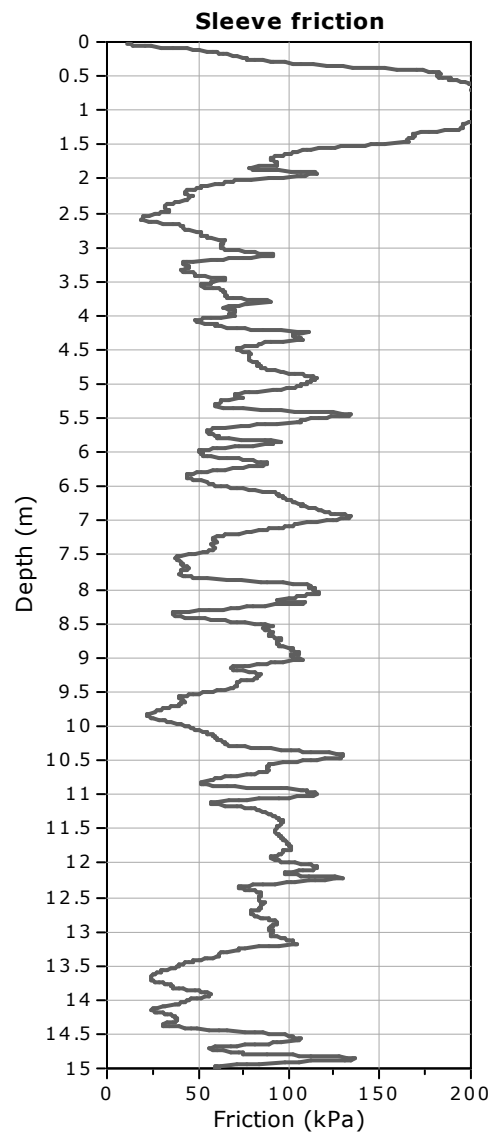
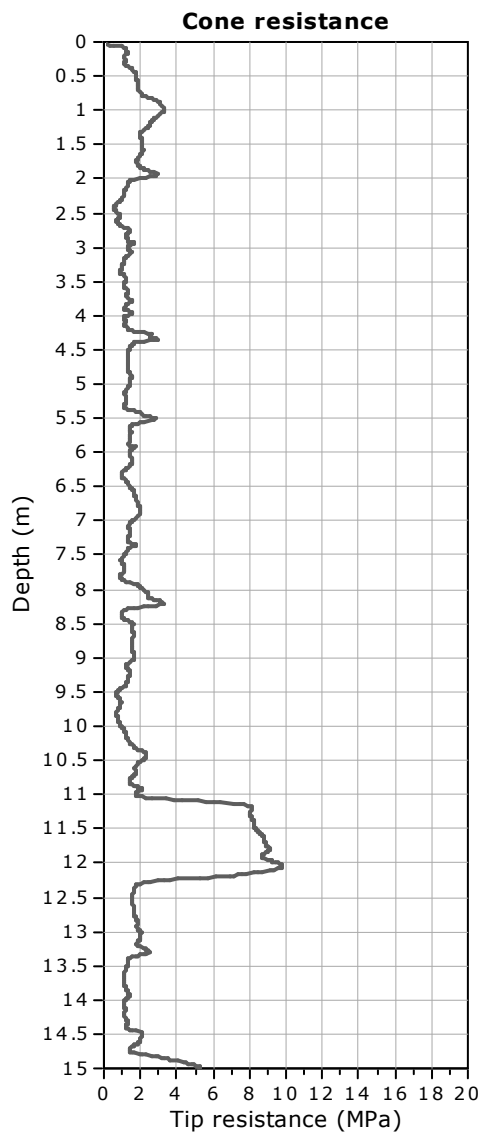


**Project:** Lotto de Coubertin

**Location:** Castenaso (BO)

**CPT: CPTE14**

Total depth: 15.09 m, Date: 06/05/2021

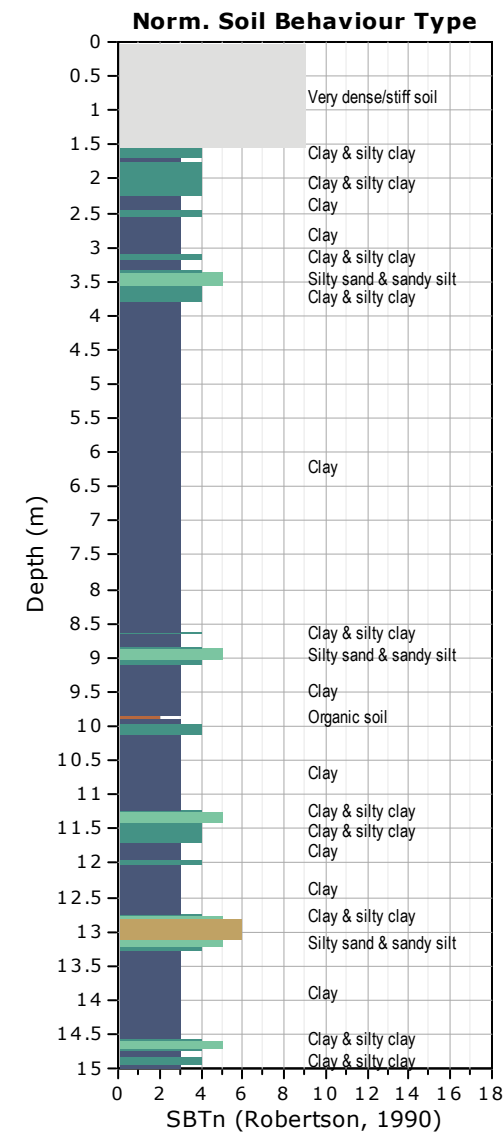
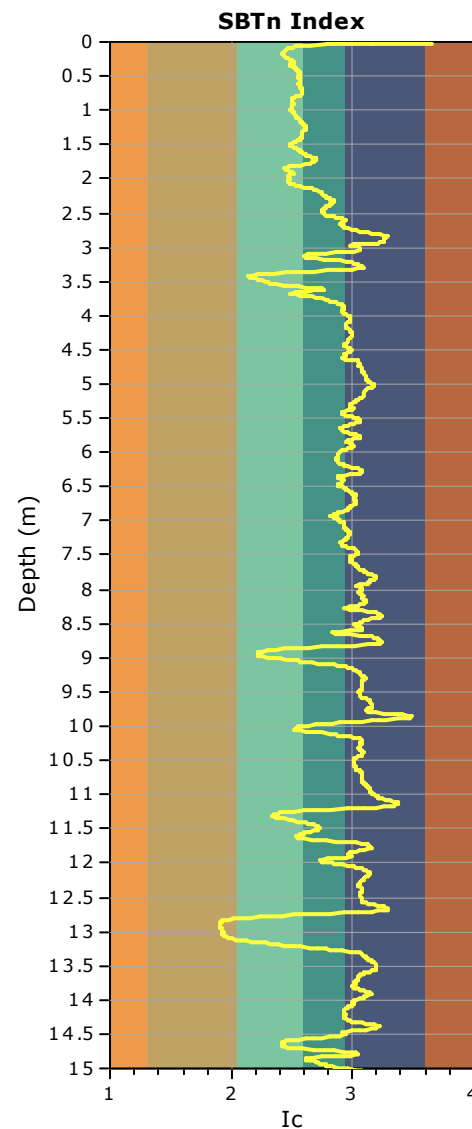
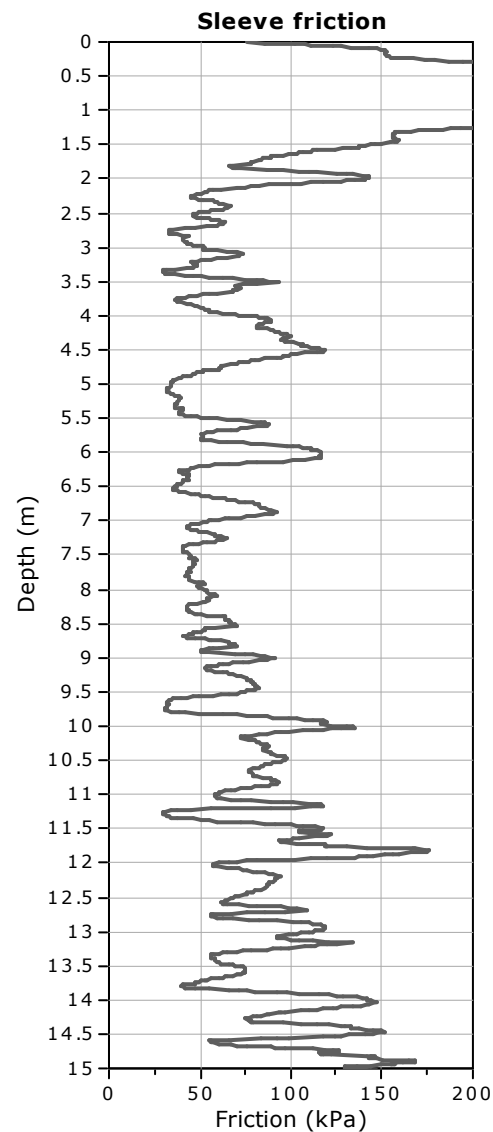
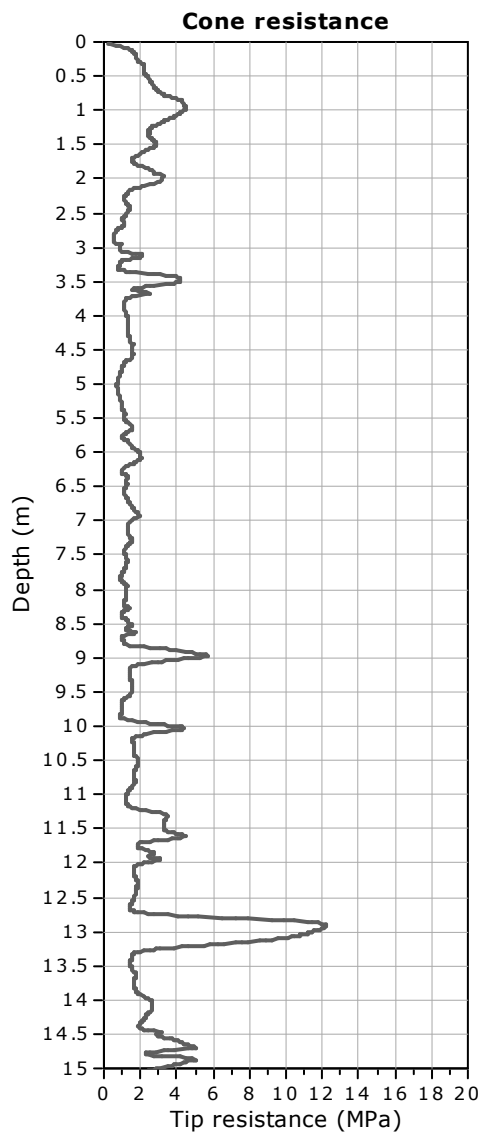


**Project:** Lotto de Coubertin

**Location:** Castenaso (BO)

**CPT: CPTe15**

Total depth: 15.03 m, Date: 29/04/2021

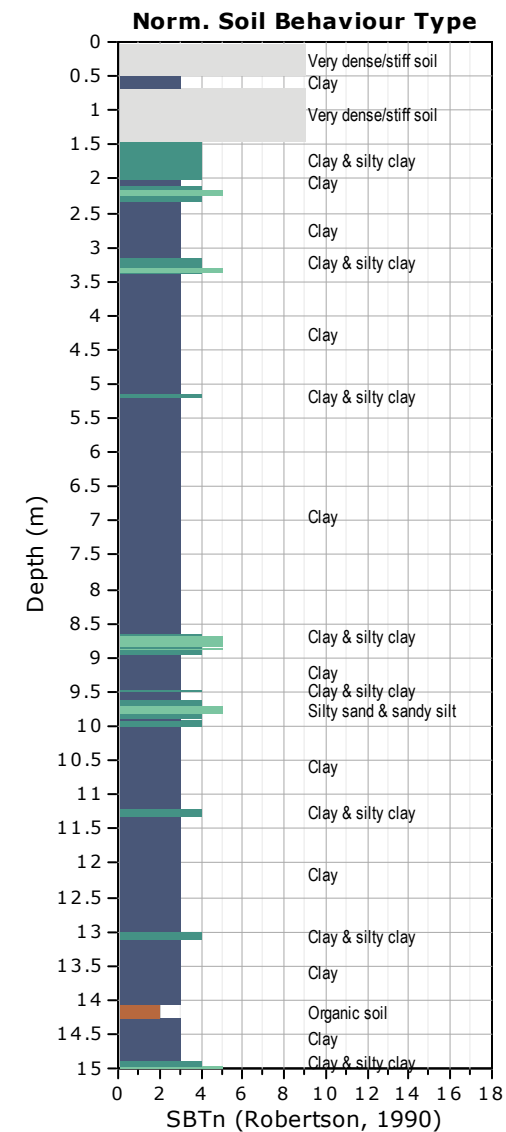
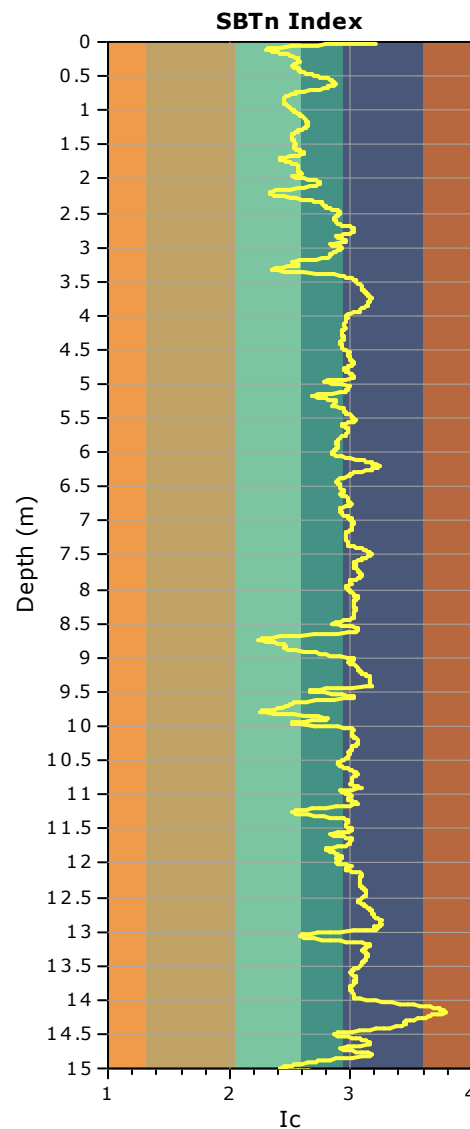
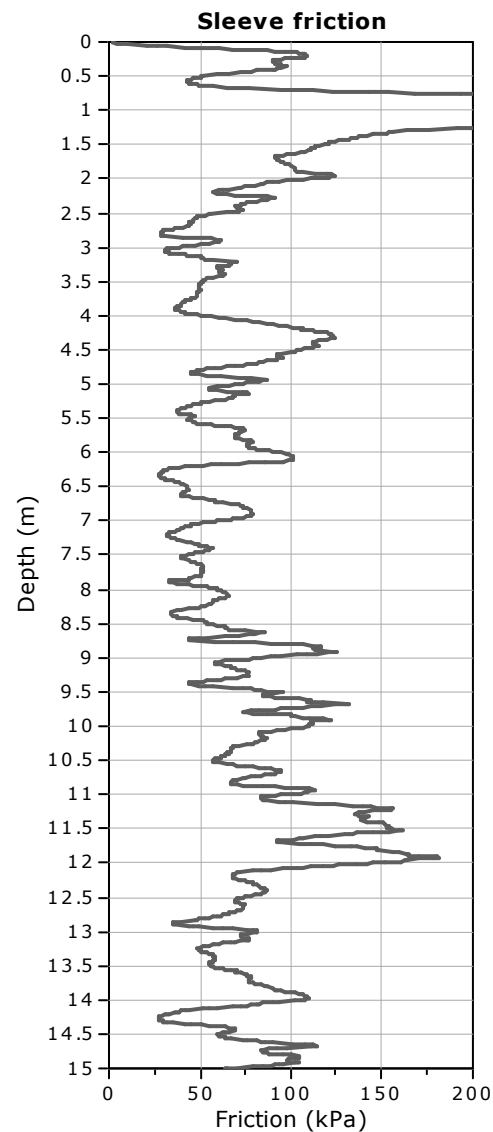
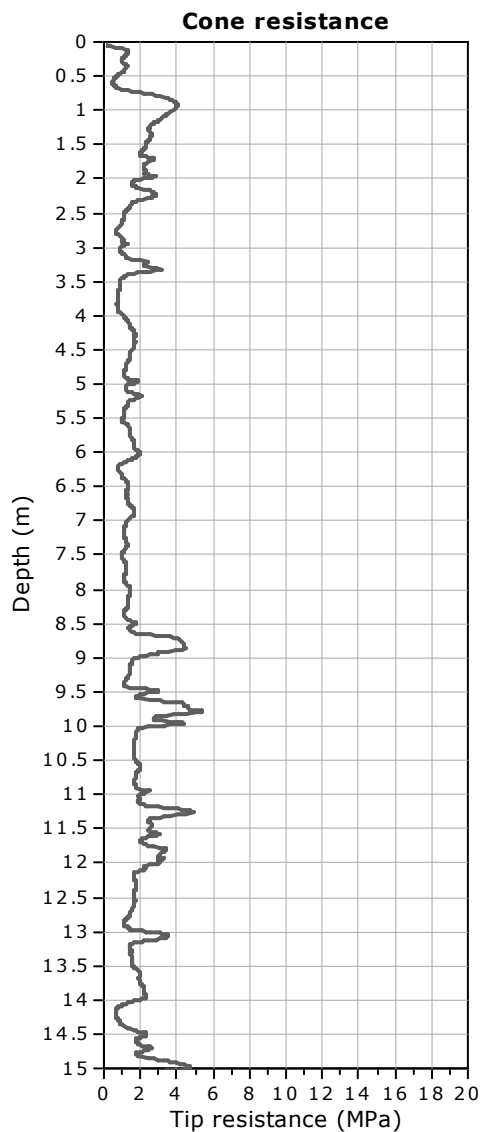


**Project:** Lotto de Coubertin

**Location:** Castenaso (BO)

**CPT: CPTE16**

Total depth: 15.10 m, Date: 29/04/2021

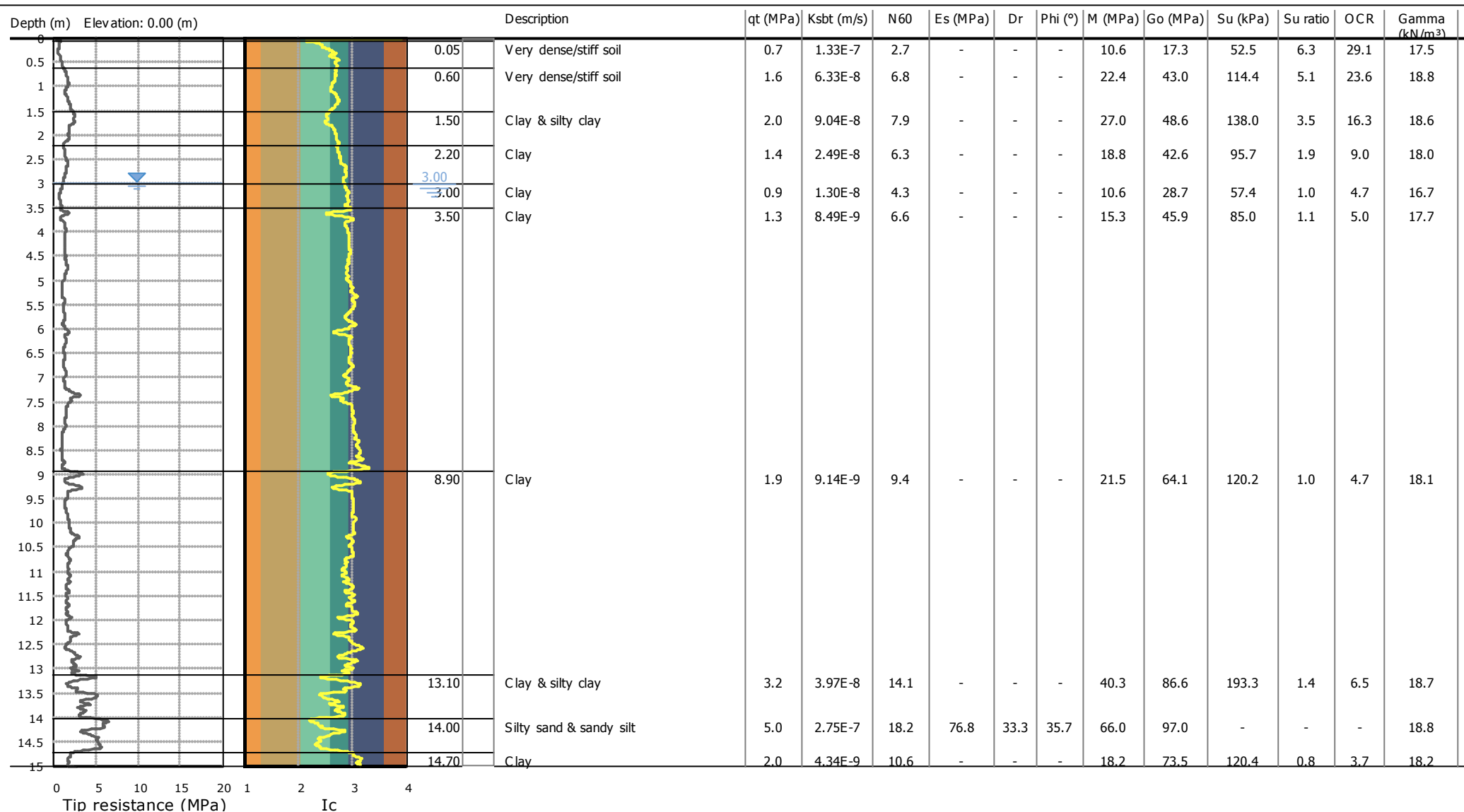


**Project: Lotto de Coubertin**

**Location: Castenaso (BO)**

**CPT: CPTE1**

Total depth: 15.05 m, Date: 22/04/2021



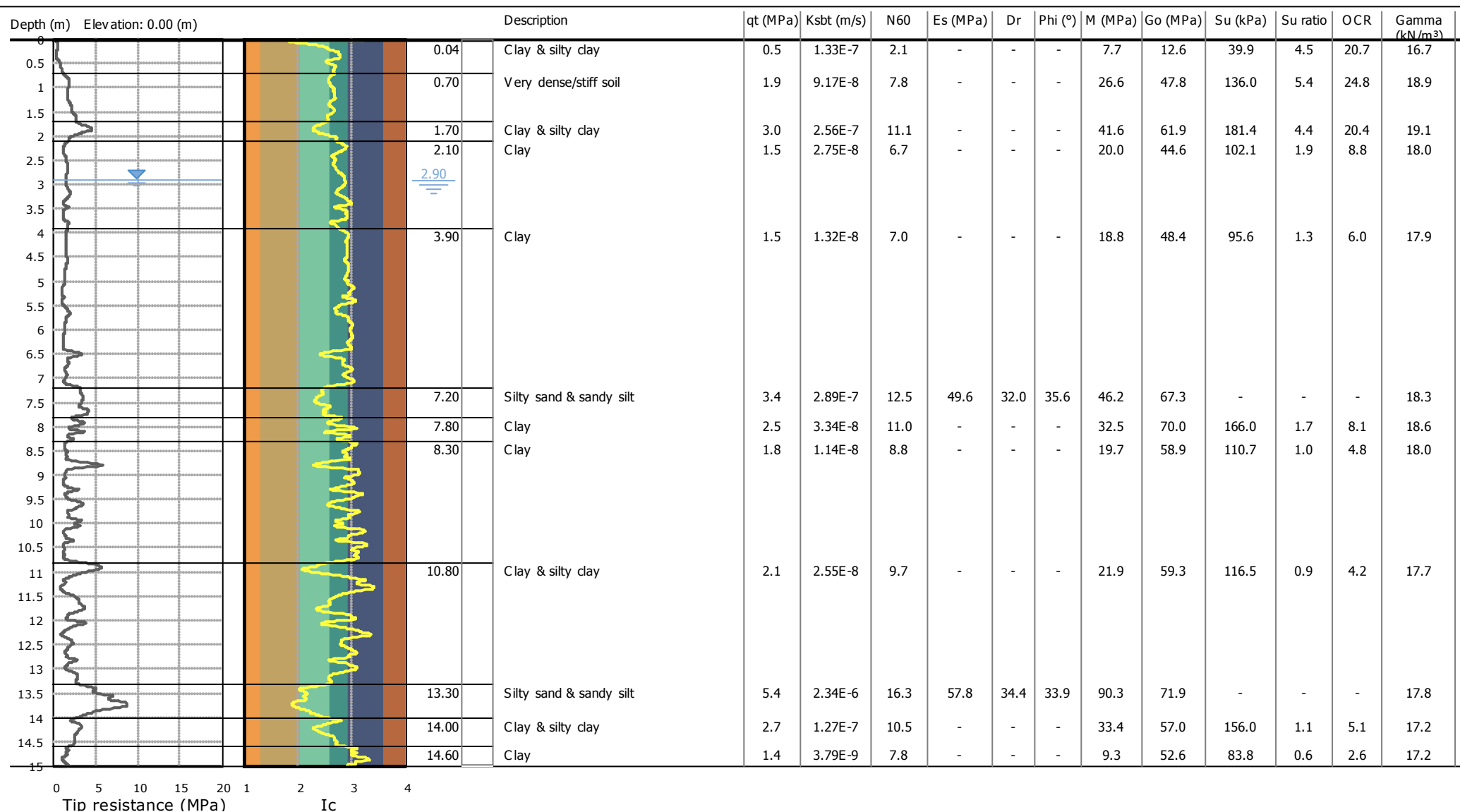


**Project: Lotto de Coubertin**

**Location: Castenaso (BO)**

**CPT: CPTE2**

Total depth: 15.14 m, Date: 22/04/2021

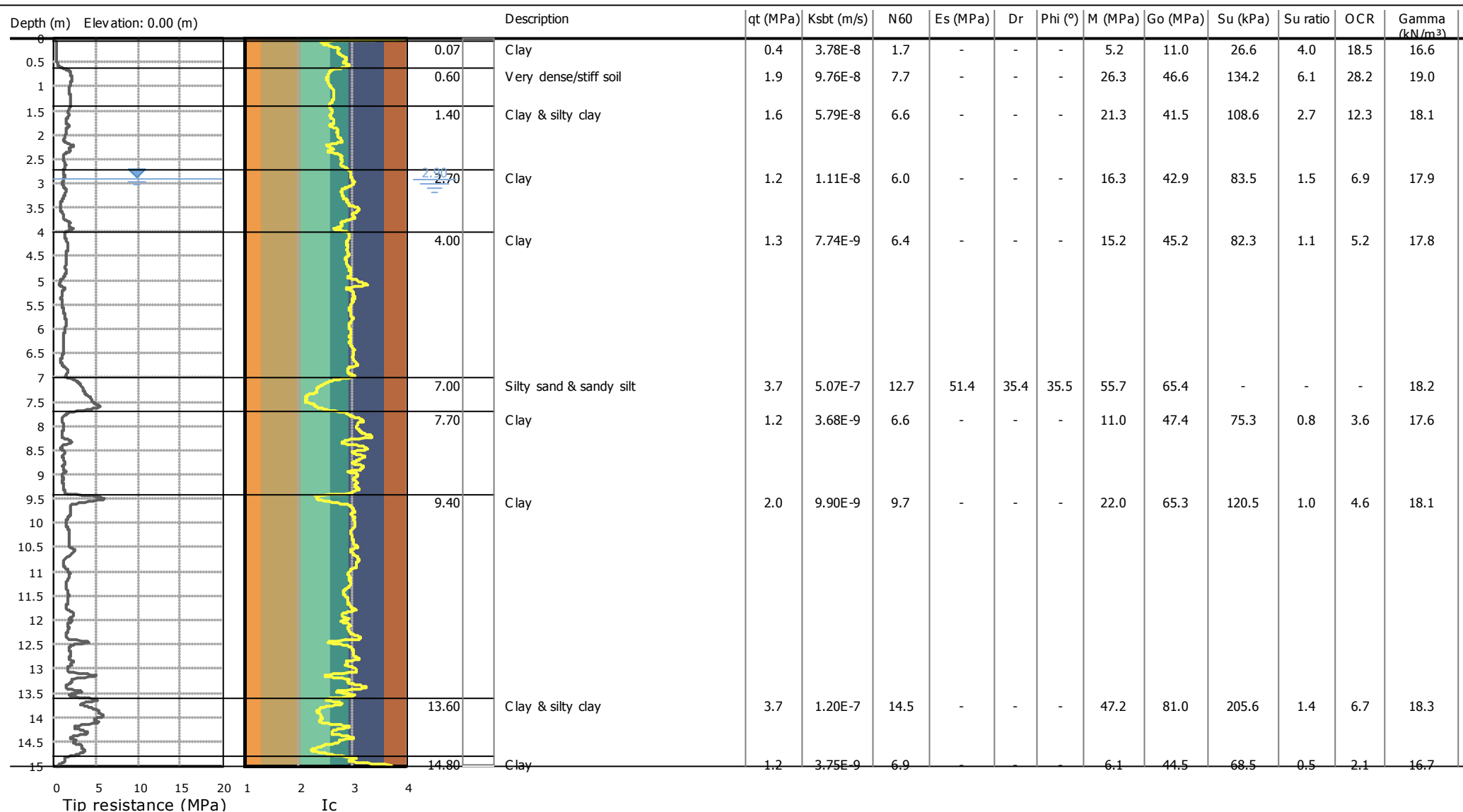


**Project: Lotto de Coubertin**

**Location: Castenaso (BO)**

**CPT: CPTe3**

Total depth: 15.05 m, Date: 22/04/2021

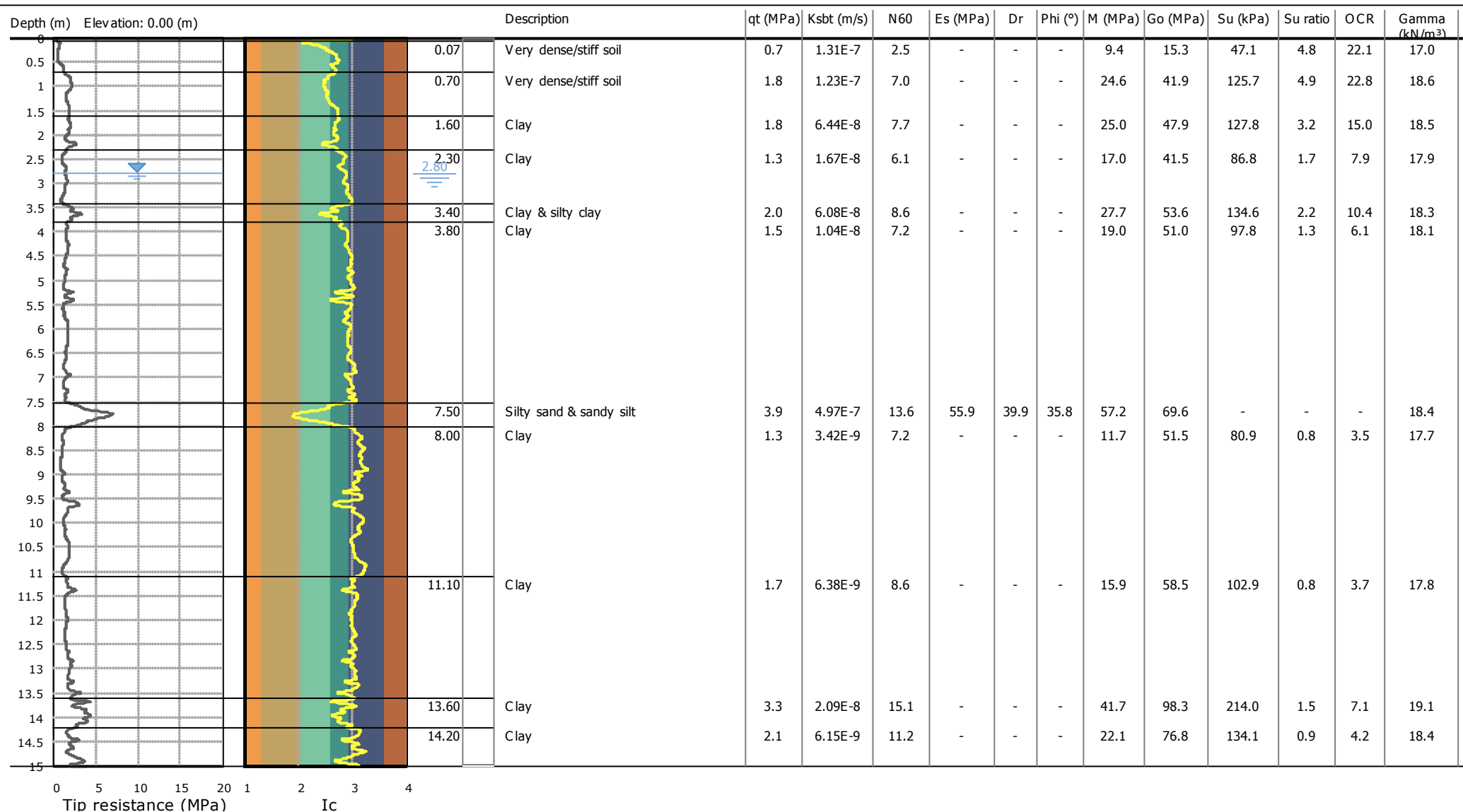


**Project: Lotto de Coubertin**

**Location: Castenaso (BO)**

**CPT: CPTE4**

Total depth: 15.11 m, Date: 22/04/2021

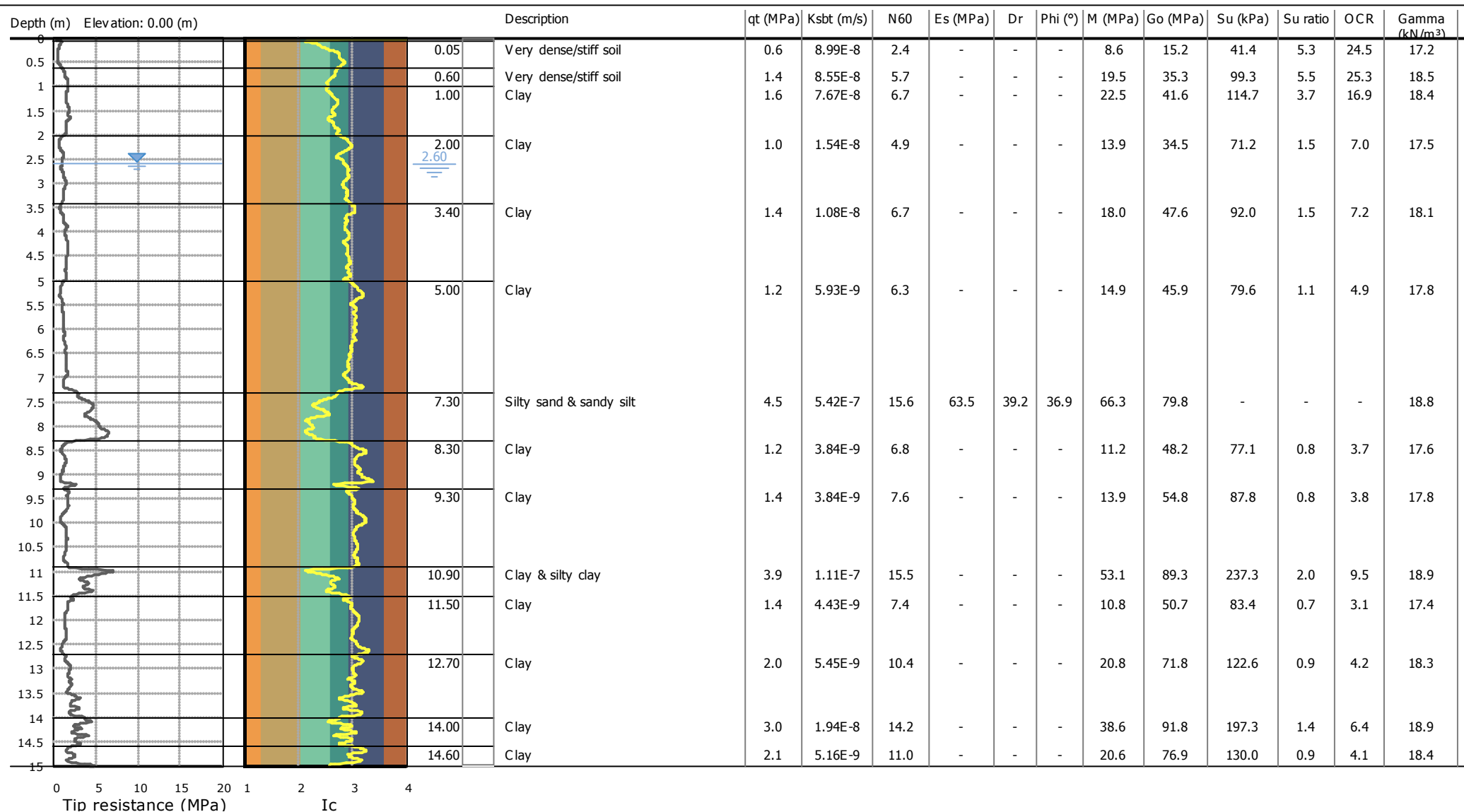


**Project: Lotto de Coubertin**

**Location: Castenaso (BO)**

**CPT: CPTES**

Total depth: 15.04 m, Date: 06/05/2021

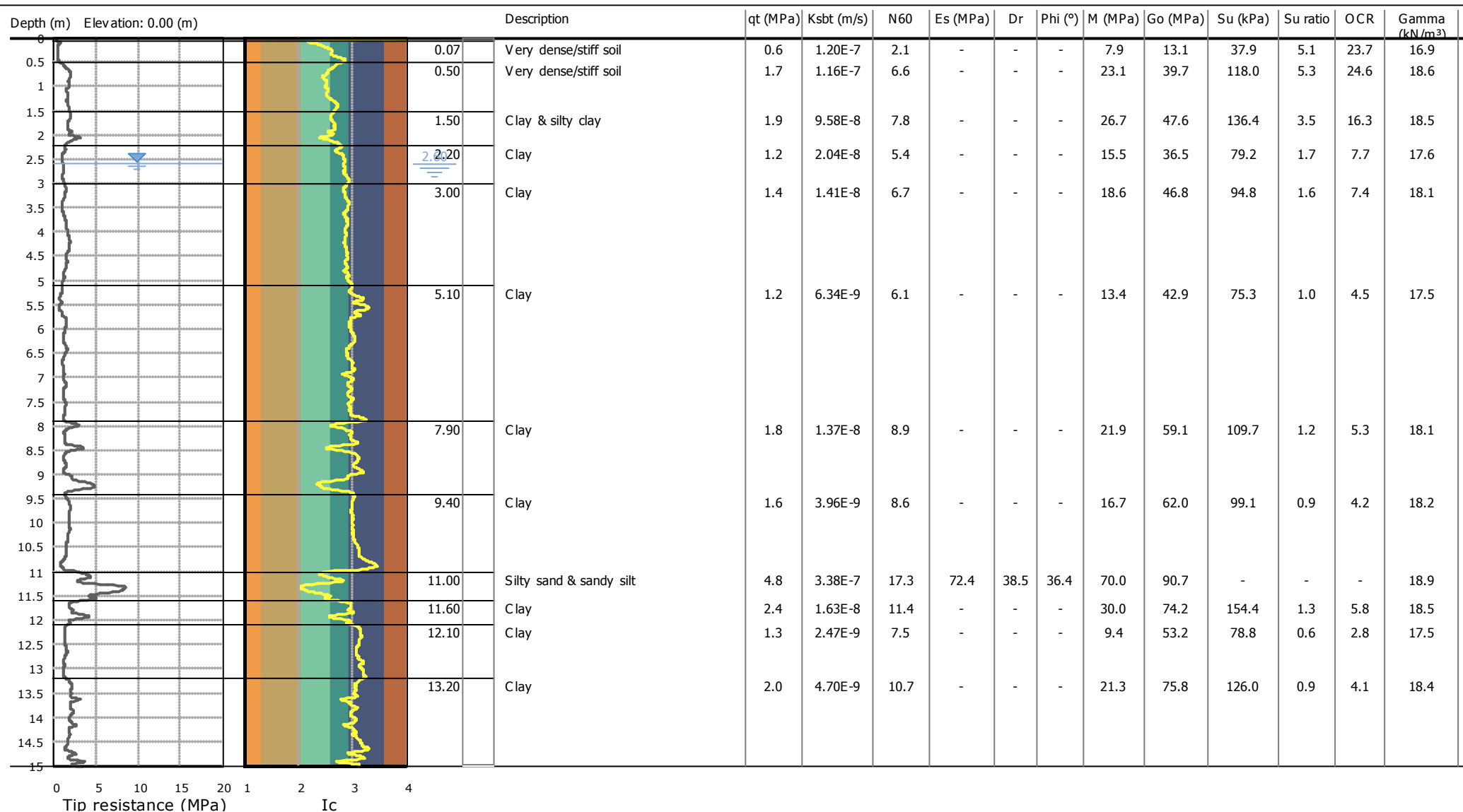


**Project: Lotto de Coubertin**

**Location: Castenaso (BO)**

**CPT: CPTE6**

Total depth: 15.64 m, Date: 22/04/2021



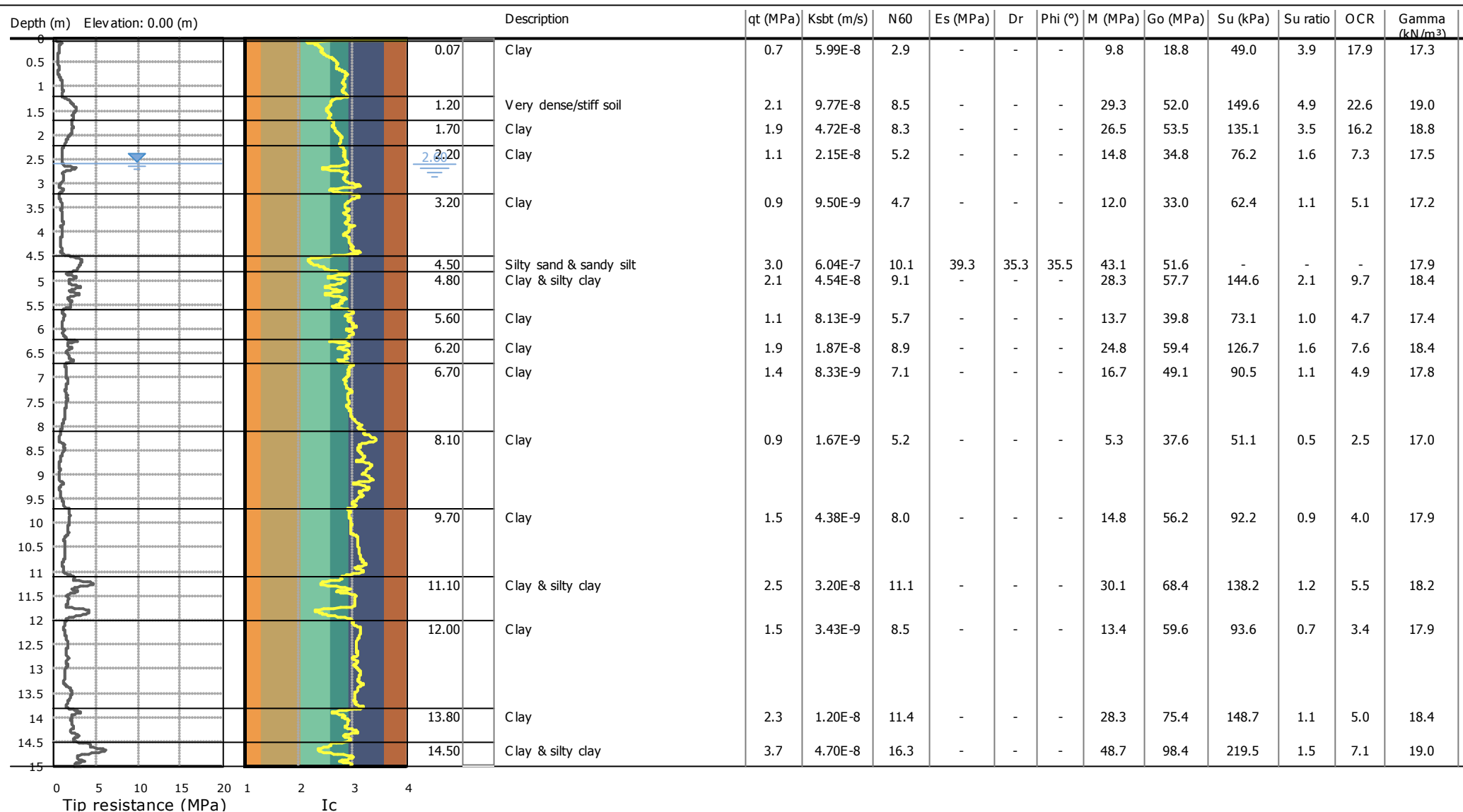


**Project: Lotto de Coubertin**

**Location: Castenaso (BO)**

**CPT: CPTE7**

Total depth: 15.07 m, Date: 06/05/2021

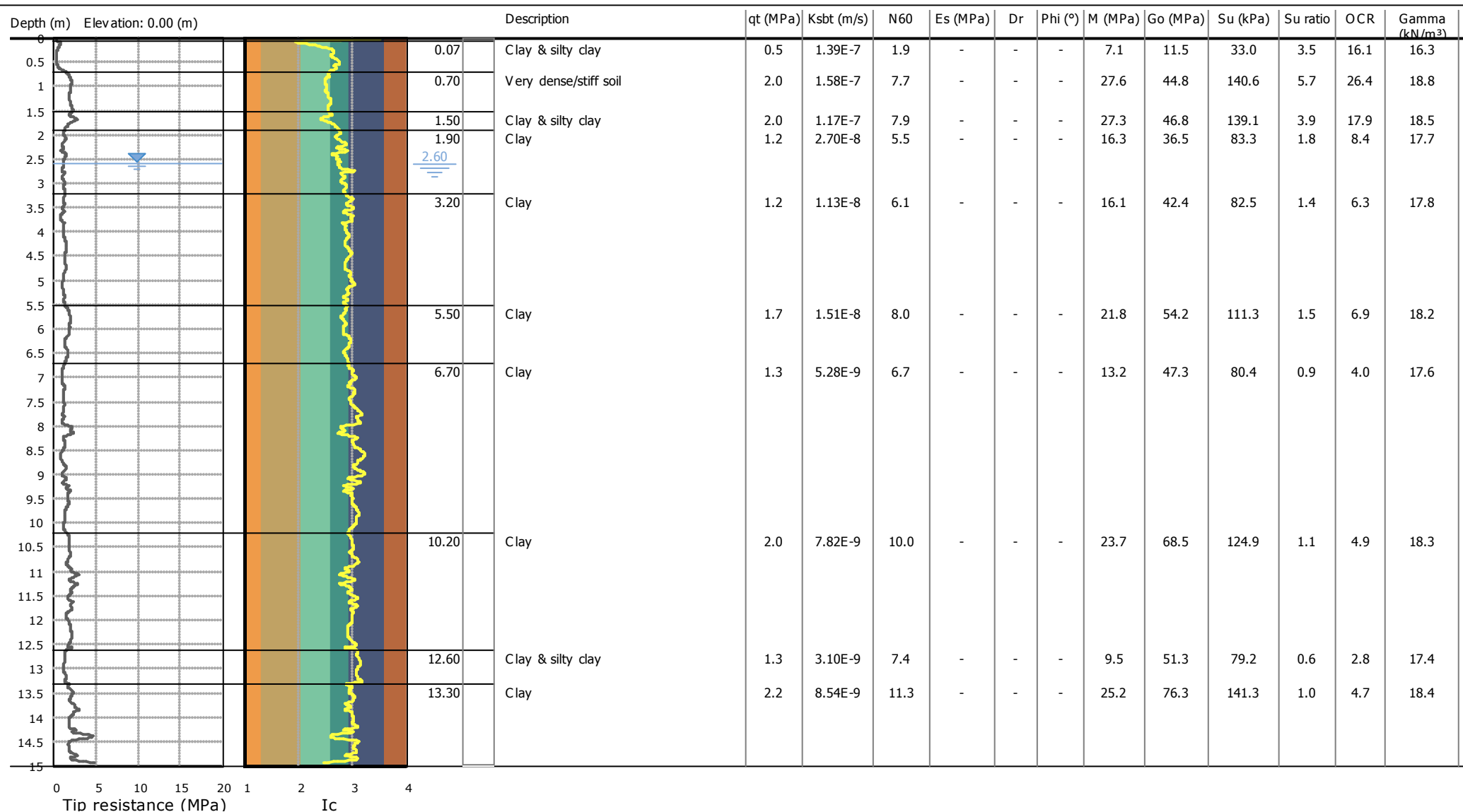


**Project: Lotto de Coubertin**

**Location: Castenaso (BO)**

**CPT: CPTe8**

Total depth: 14.95 m, Date: 22/04/2021

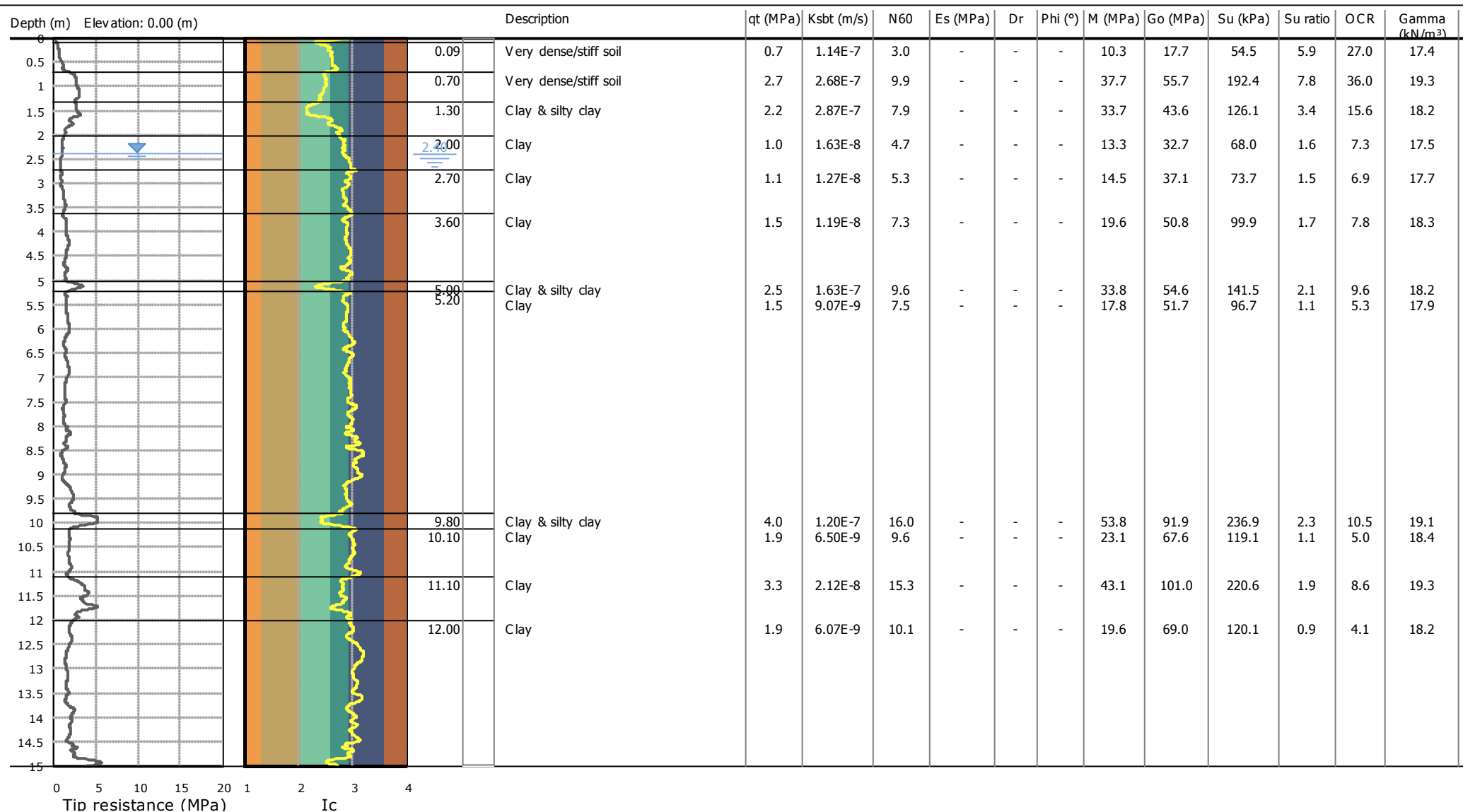


**Project: Lotto de Coubertin**

**Location: Castenaso (BO)**

**CPT: CPTE9**

Total depth: 15.13 m, Date: 29/04/2021

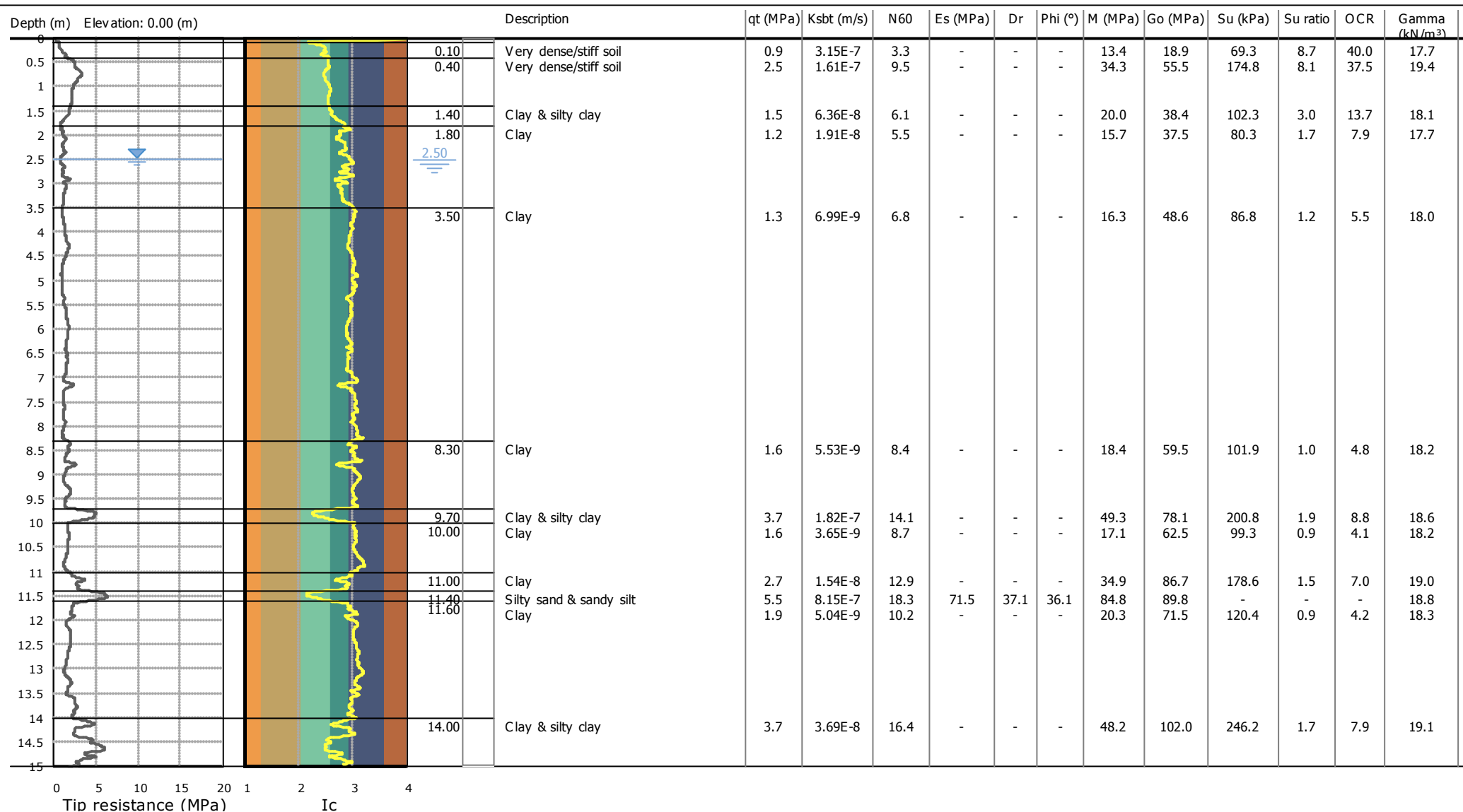


**Project: Lotto de Coubertin**

**Location: Castenaso (BO)**

**CPT: CPTE10**

Total depth: 15.77 m, Date: 29/04/2021

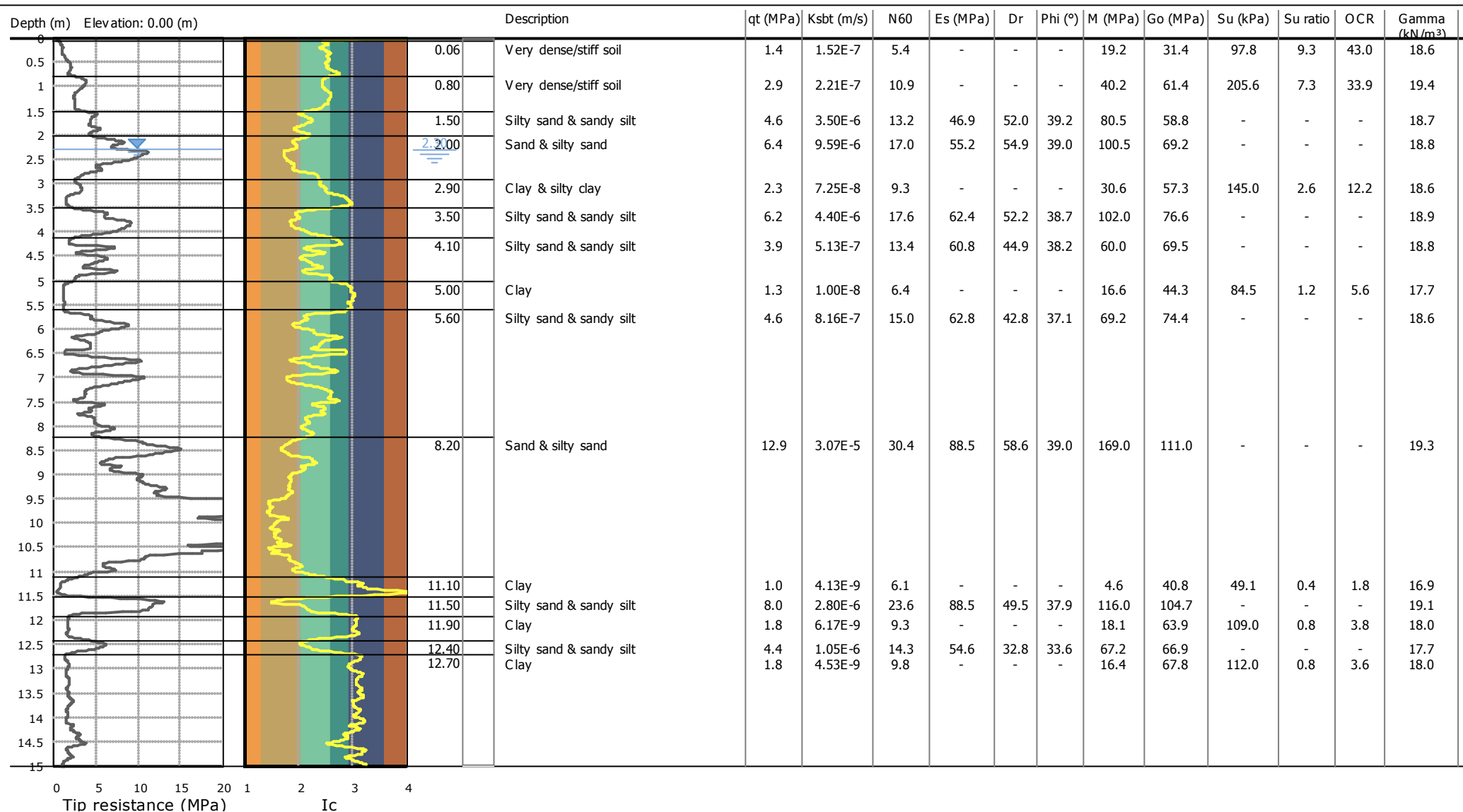


**Project: Lotto de Coubertin**

**Location: Castenaso (BO)**

**CPT: CPTE11**

Total depth: 15.05 m, Date: 06/05/2021



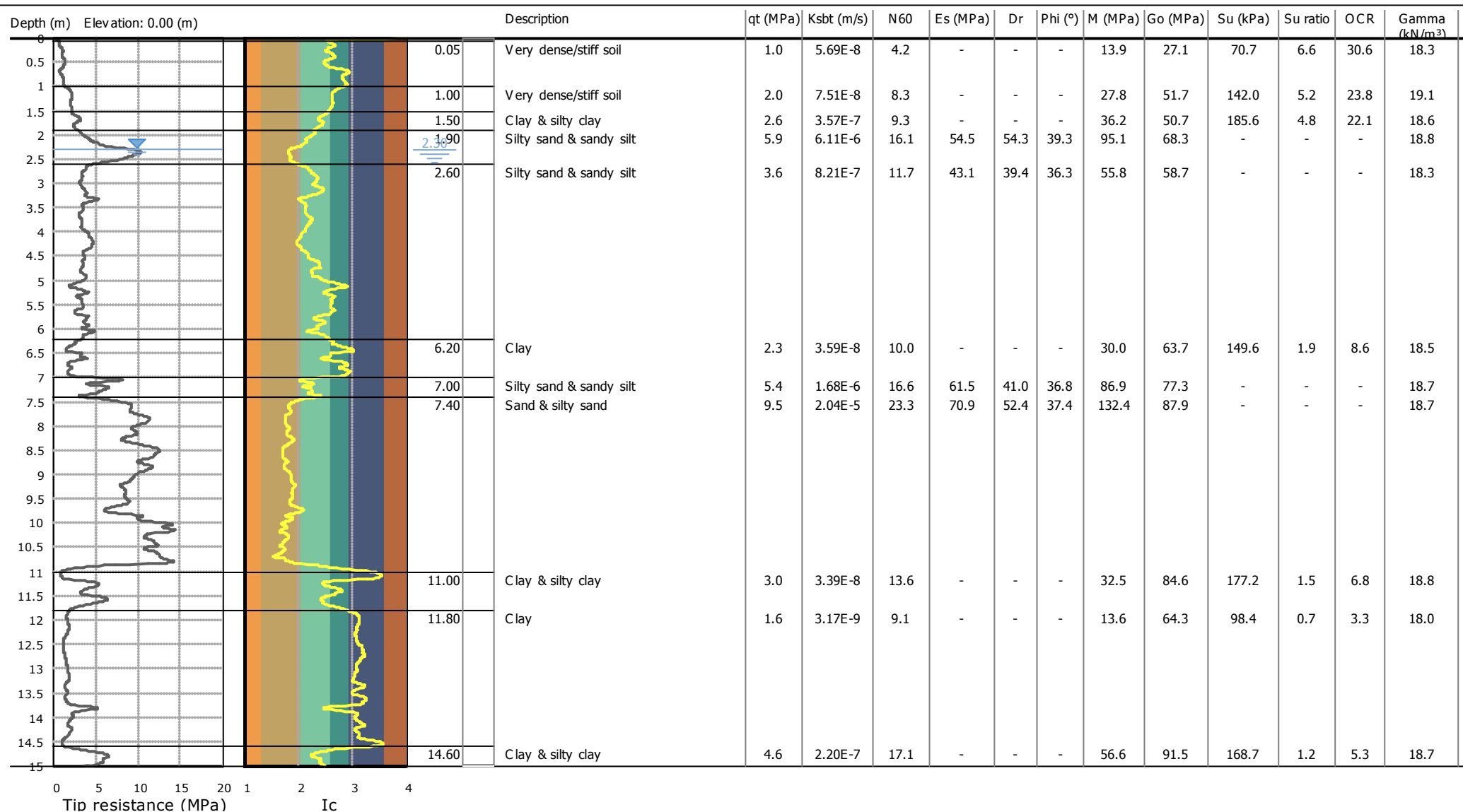


**Project: Lotto de Coubertin**

**Location: Castenaso (BO)**

**CPT: CPTE12**

Total depth: 15.01 m, Date: 29/04/2021

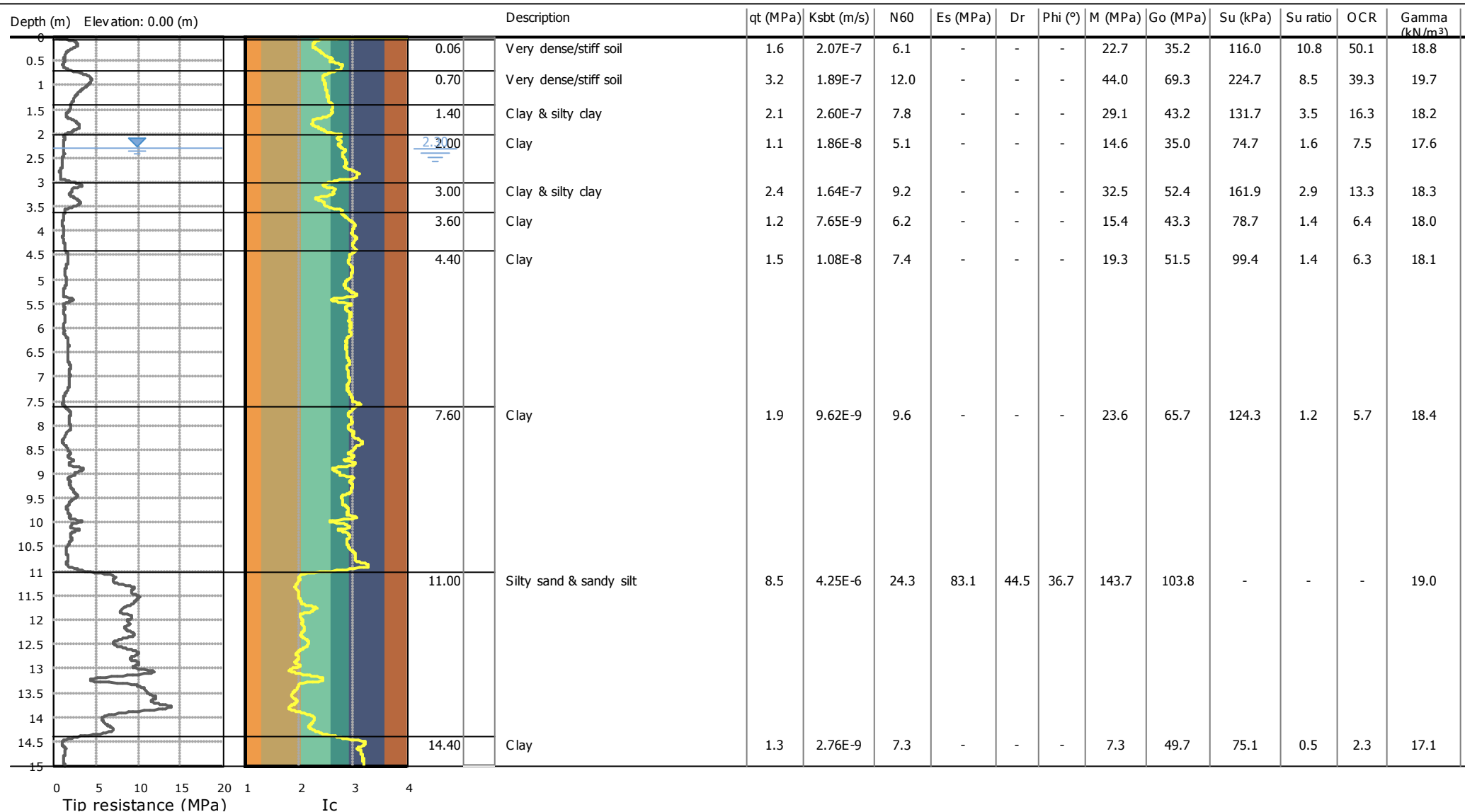


**Project: Lotto de Coubertin**

**Location: Castenaso (BO)**

**CPT: CPTE13**

Total depth: 15.03 m, Date: 06/05/2021

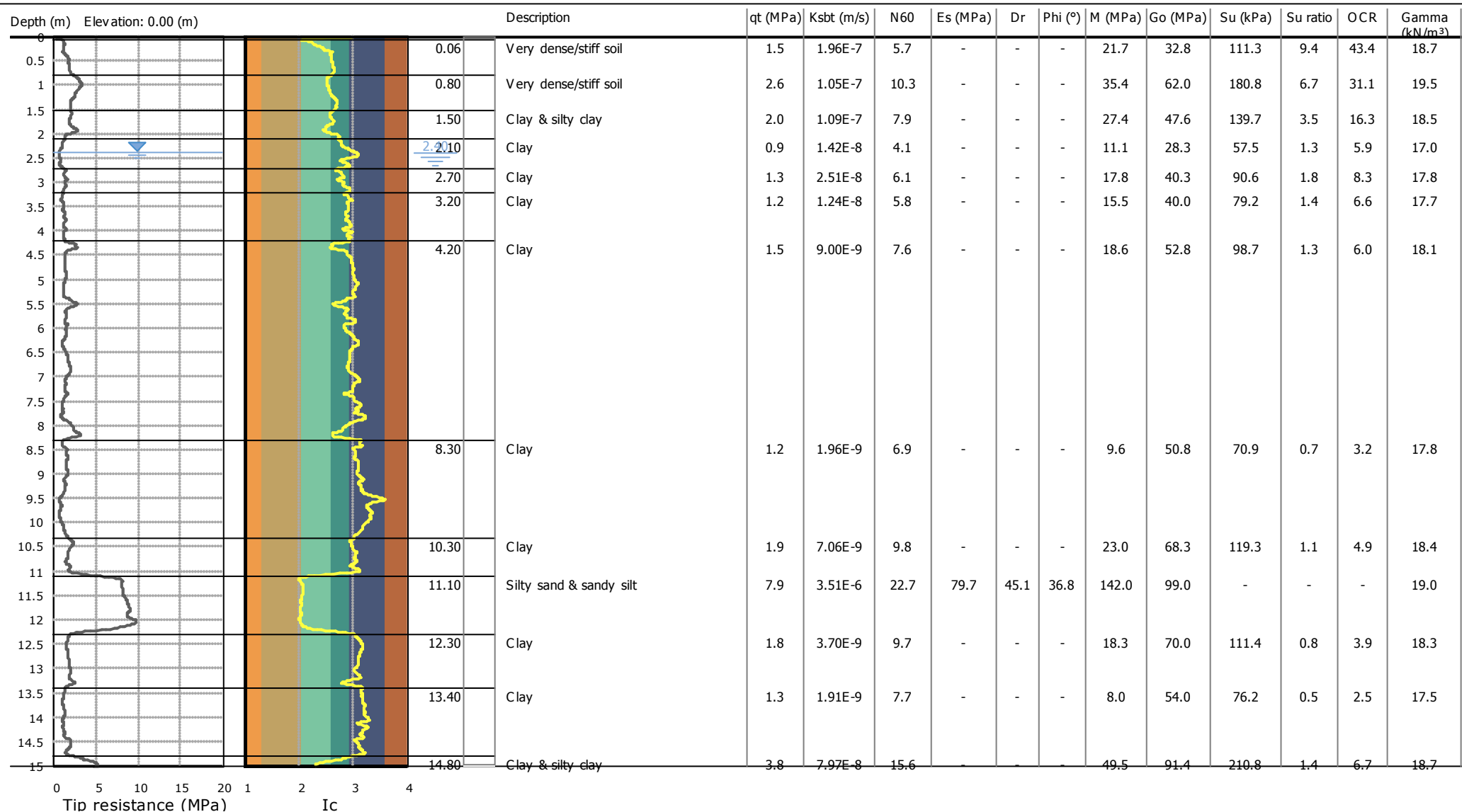


**Project: Lotto de Coubertin**

**Location: Castenaso (BO)**

**CPT: CPTE14**

Total depth: 15.09 m, Date: 06/05/2021

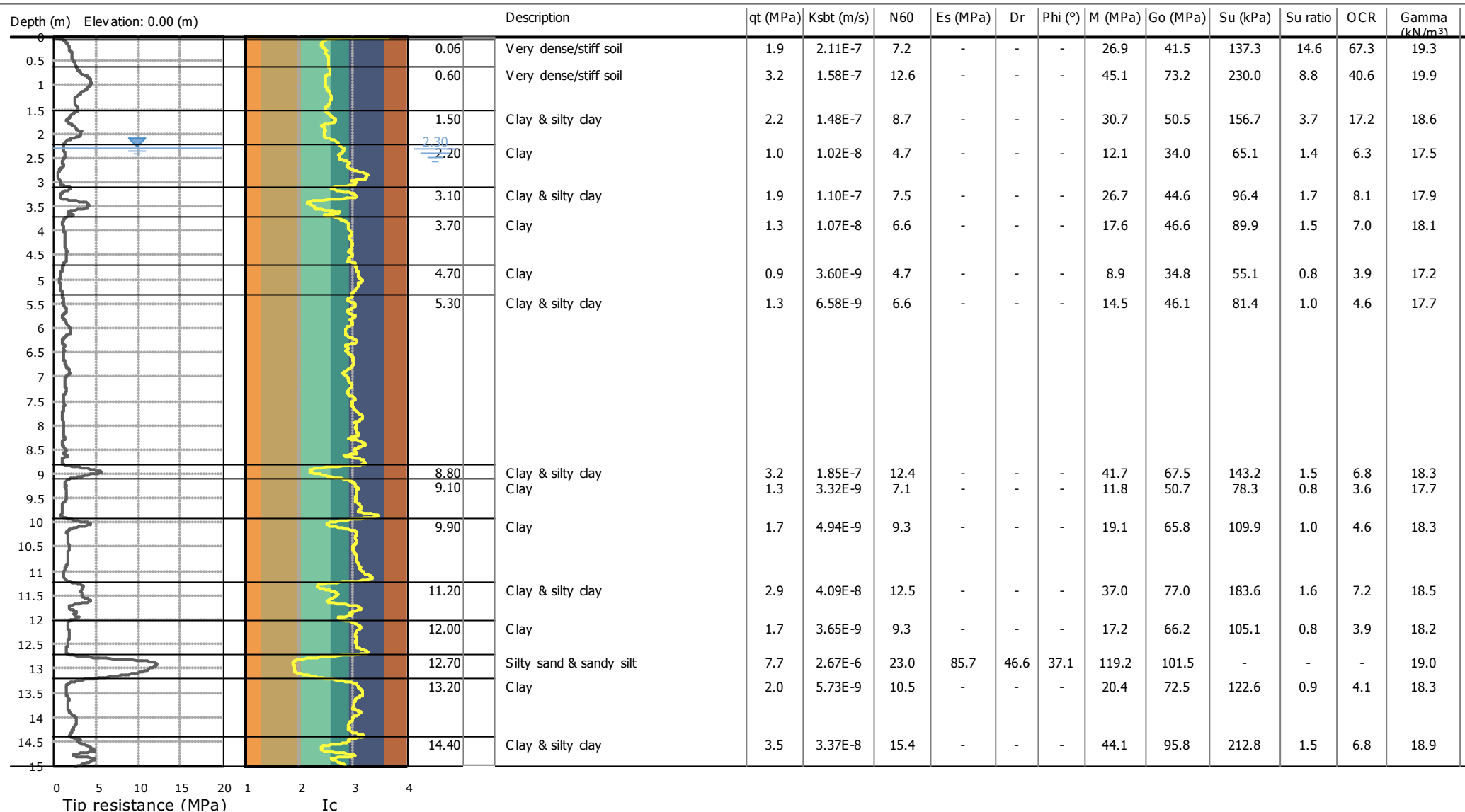


**Project: Lotto de Coubertin**

**Location: Castenaso (BO)**

**CPT: CPTE15**

Total depth: 15.03 m, Date: 29/04/2021

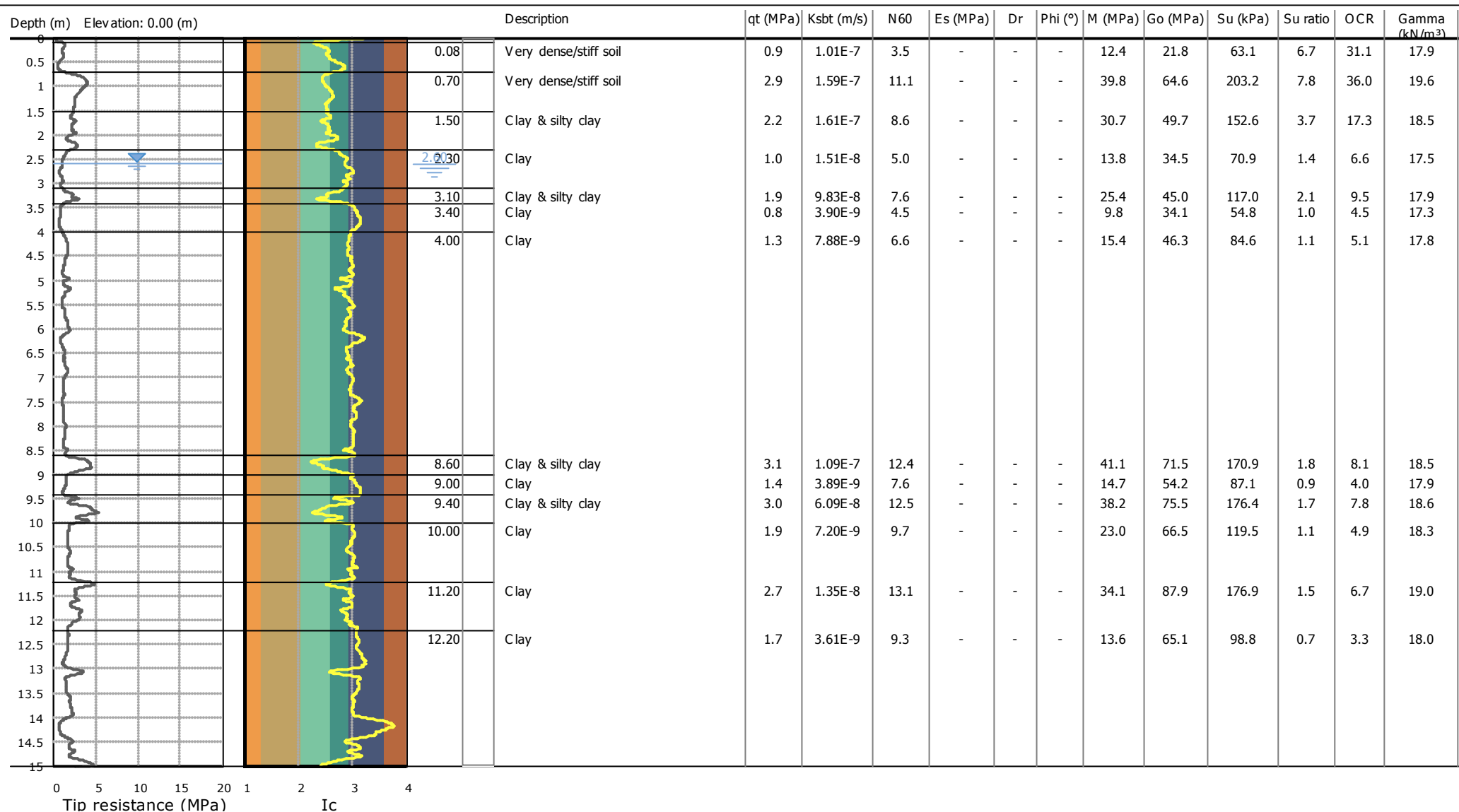


**Project: Lotto de Coubertin**

**Location: Castenaso (BO)**

**CPT: CPTE16**

Total depth: 15.10 m, Date: 29/04/2021





## LIQUEFACTION ANALYSIS REPORT

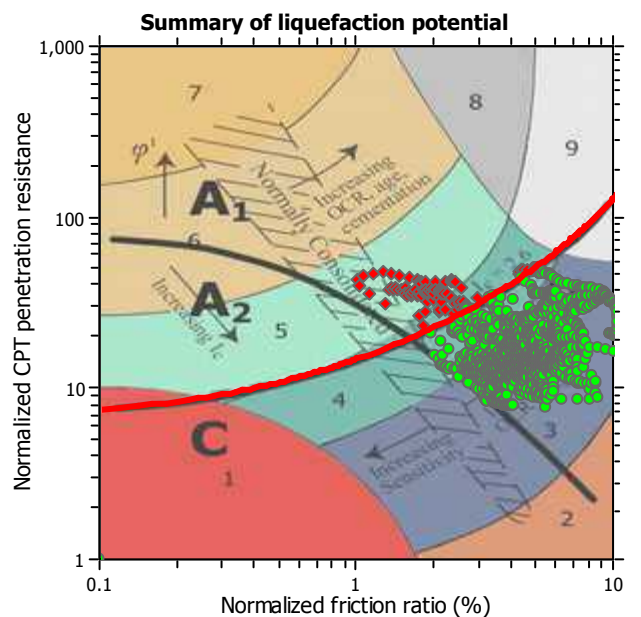
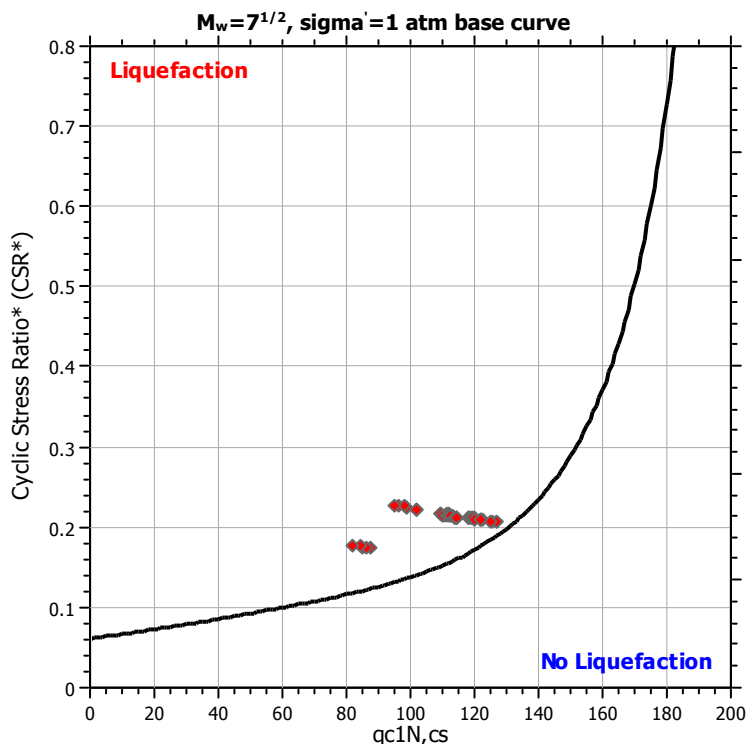
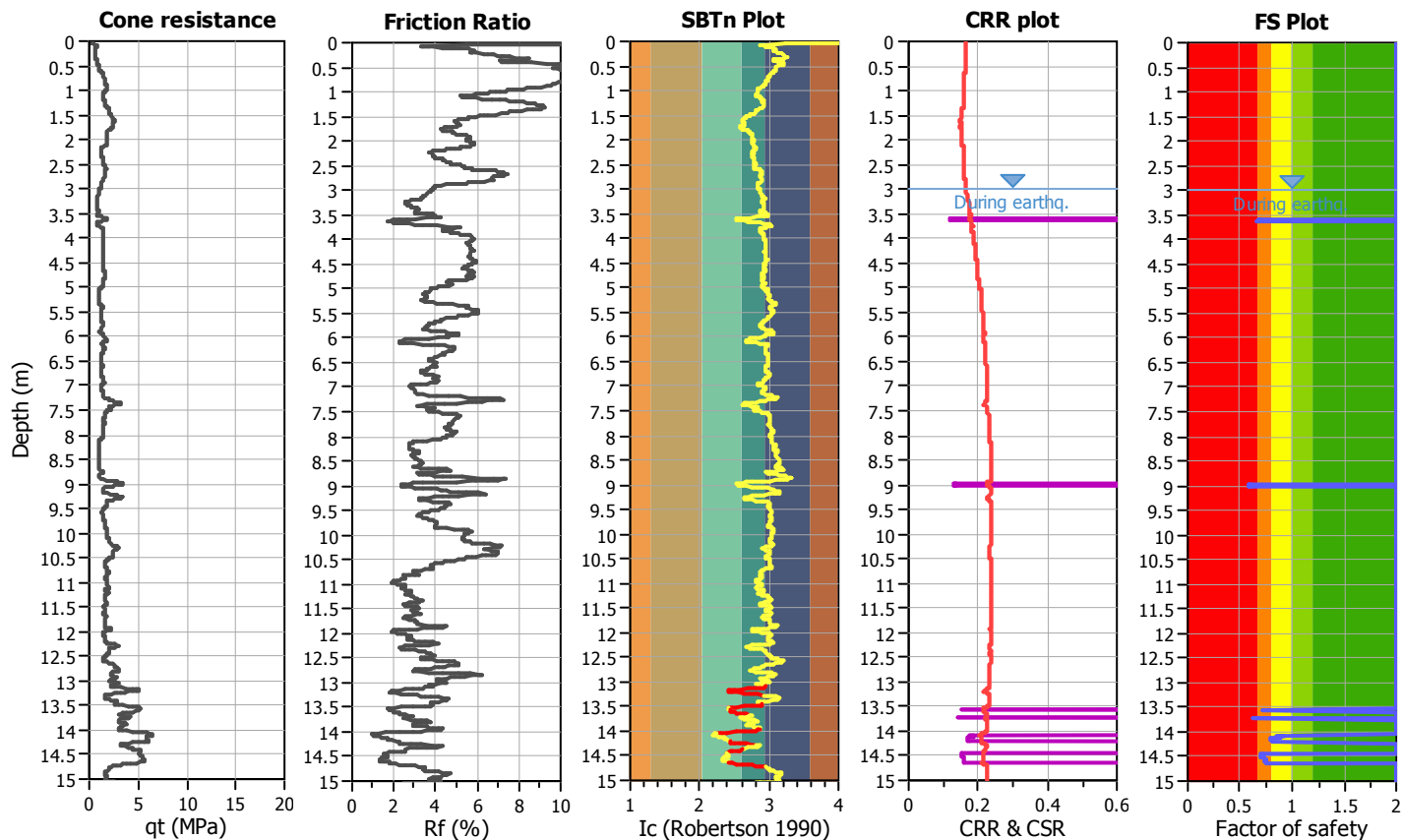
**Project title :** Lotto de Coubertin

**Location :** Castenaso (BO)

**CPT file :** CPTE1

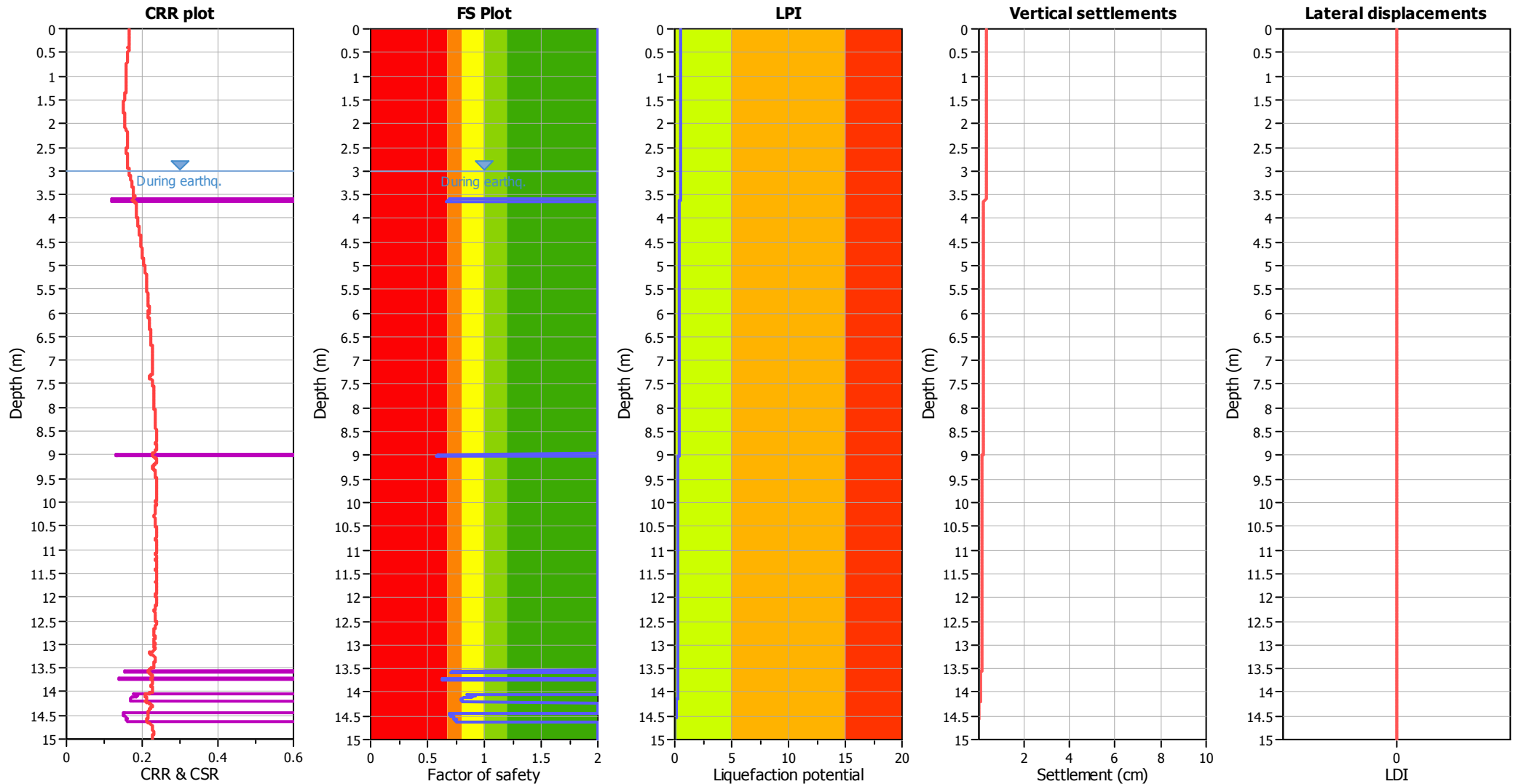
### Input parameters and analysis data

Analysis method:	B&I (2014)	G.W.T. (in-situ):	3.00 m	Use fill:	No	Clay like behavior applied:	Sands only
Fines correction method:	B&I (2014)	G.W.T. (earthq.):	3.00 m	Fill height:	N/A	Limit depth applied:	Yes
Points to test:	Based on Ic value	Average results interval:	3	Fill weight:	N/A	Limit depth:	20.00 m
Earthquake magnitude $M_w$ :	6.14	Ic cut-off value:	2.60	Trans. detect. applied:	Yes	MSF method:	Method
Peak ground acceleration:	0.25	Unit weight calculation:	Based on SBT	$K_\sigma$ applied:	Yes		



Zone A<sub>1</sub>: Cyclic liquefaction likely depending on size and duration of cyclic loading  
 Zone A<sub>2</sub>: Cyclic liquefaction and strength loss likely depending on loading and ground geometry  
 Zone B: Liquefaction and post-earthquake strength loss unlikely, check cyclic softening  
 Zone C: Cyclic liquefaction and strength loss possible depending on soil plasticity, brittleness/sensitivity, strain to peak undrained strength and ground geometry

Liquefaction analysis overall plots



Input parameters and analysis data

Analysis method: B&I (2014)  
Fines correction method: B&I (2014)  
Points to test: Based on Ic value  
Earthquake magnitude  $M_w$ : 6.14  
Peak ground acceleration: 0.25  
Depth to water table (insitu): 3.00 m

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

Fill weight: N/A  
Transition detect. applied: Yes  
 $K_0$  applied: Yes  
Clay like behavior applied: Sands only  
Limit depth applied: Yes  
Limit depth: 20.00 m

F.S. color scheme

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

LPI color scheme

- Very high risk
- High risk
- Low risk

## LIQUEFACTION ANALYSIS REPORT

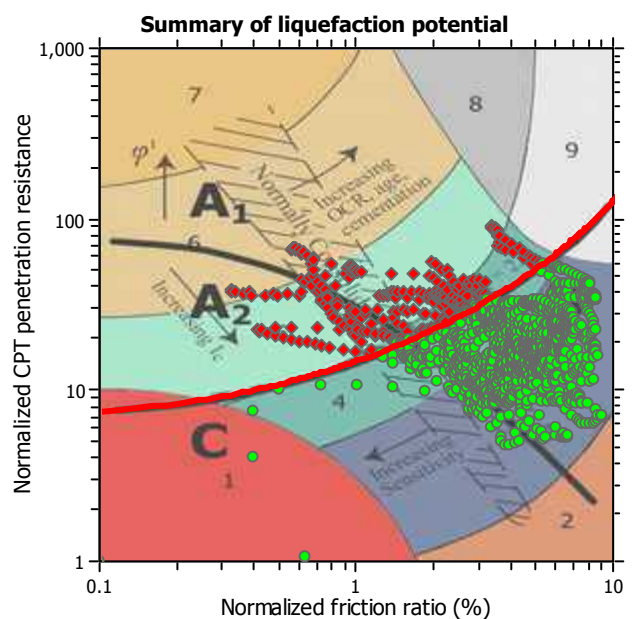
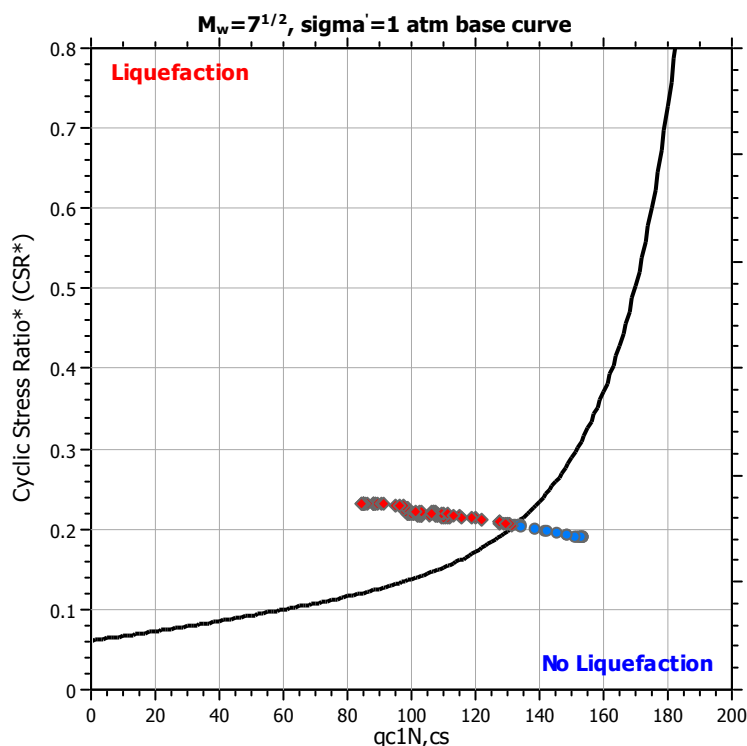
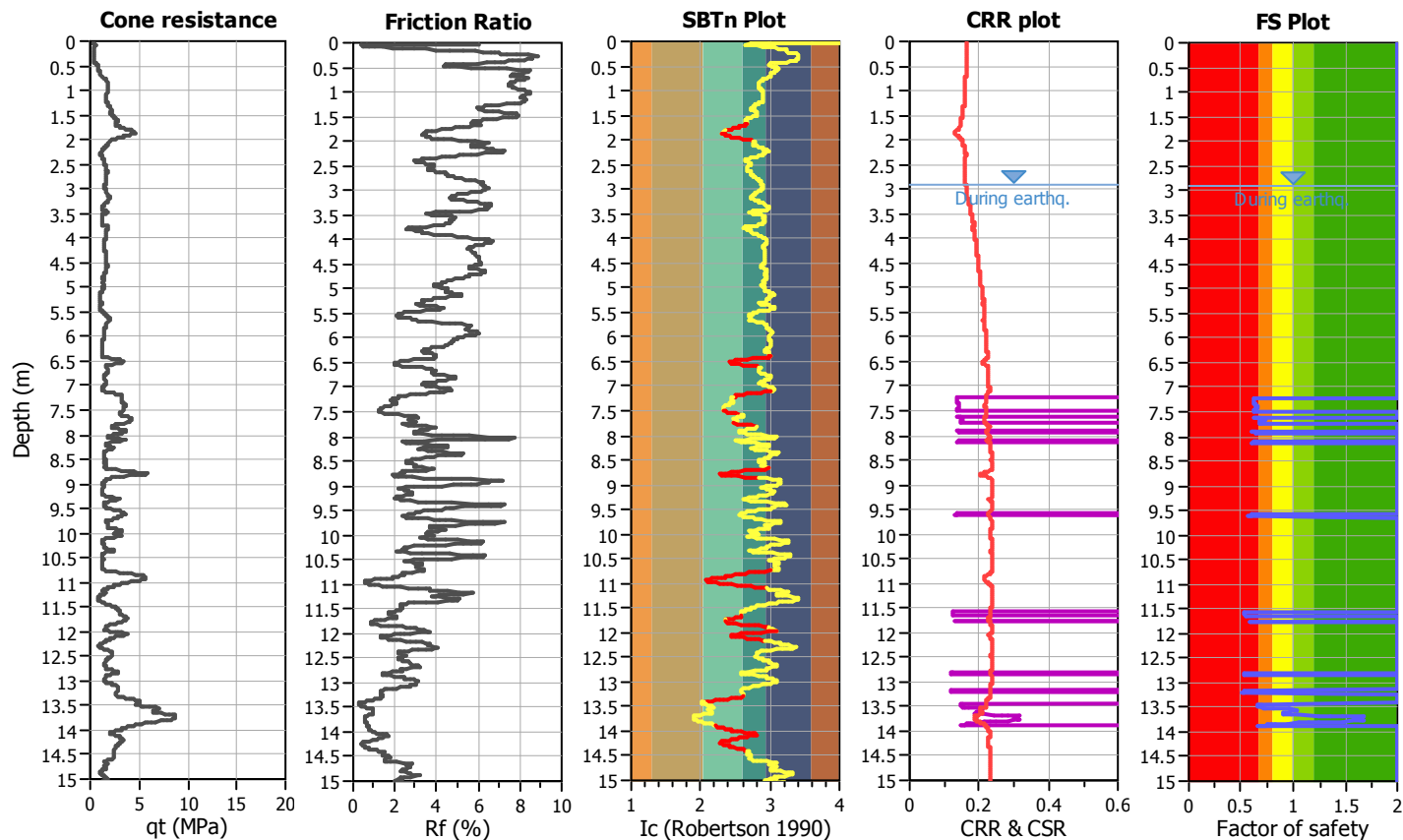
**Project title :** Lotto de Coubertin

**Location :** Castenaso (BO)

**CPT file :** CPTE2

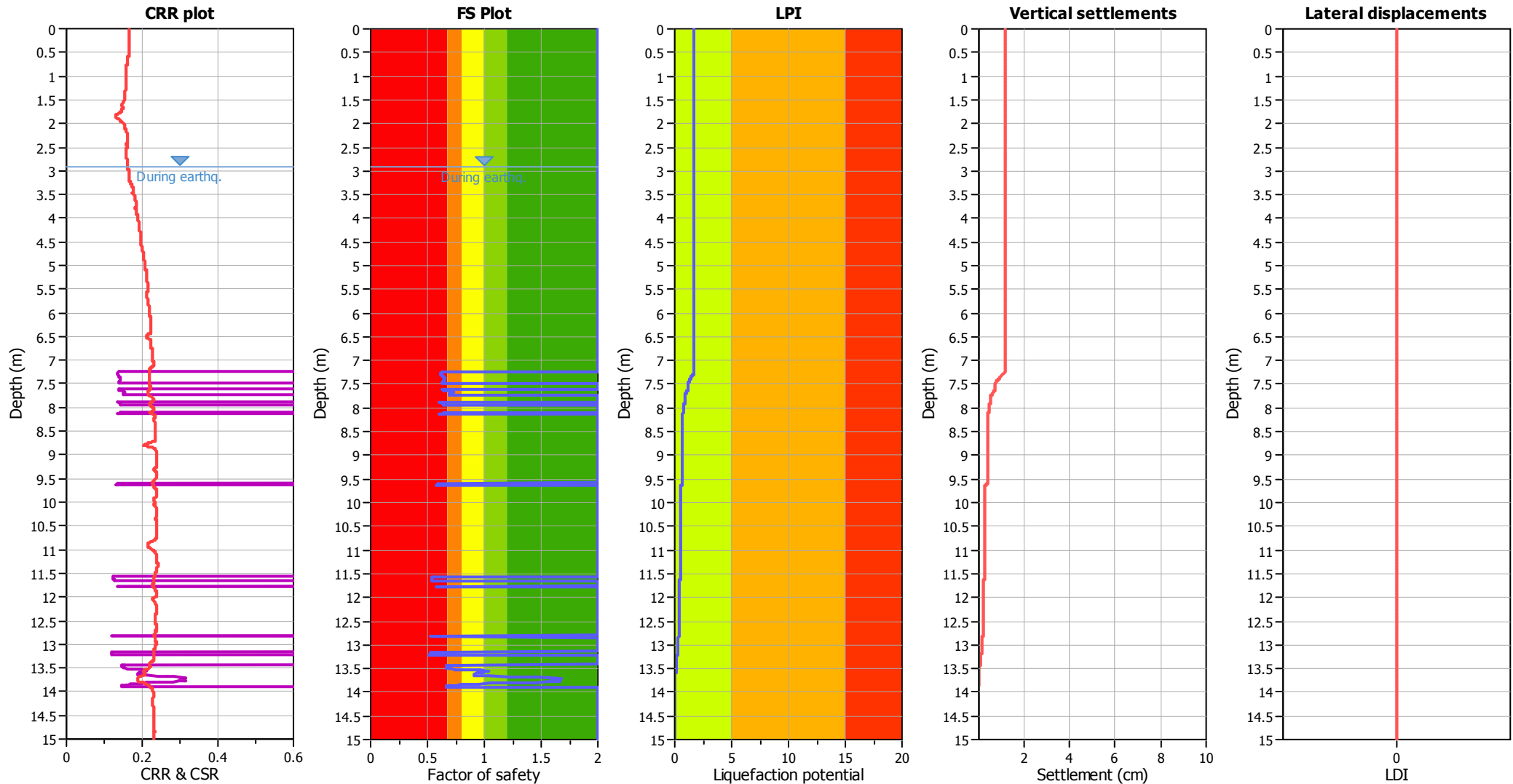
### Input parameters and analysis data

Analysis method:	B&I (2014)	G.W.T. (in-situ):	2.90 m	Use fill:	No	Clay like behavior applied:	Sands only
Fines correction method:	B&I (2014)	G.W.T. (earthq.):	2.90 m	Fill height:	N/A	Limit depth applied:	Yes
Points to test:	Based on Ic value	Average results interval:	3	Fill weight:	N/A	Limit depth:	20.00 m
Earthquake magnitude $M_w$ :	6.14	Ic cut-off value:	2.60	Trans. detect. applied:	Yes	MSF method:	Method
Peak ground acceleration:	0.25	Unit weight calculation:	Based on SBT	$K_0$ applied:	Yes		



Zone A<sub>1</sub>: Cyclic liquefaction likely depending on size and duration of cyclic loading  
 Zone A<sub>2</sub>: Cyclic liquefaction and strength loss likely depending on loading and ground geometry  
 Zone B: Liquefaction and post-earthquake strength loss unlikely, check cyclic softening  
 Zone C: Cyclic liquefaction and strength loss possible depending on soil plasticity, brittleness/sensitivity, strain to peak undrained strength and ground geometry

Liquefaction analysis overall plots



Input parameters and analysis data

Analysis method: B&I (2014)  
Fines correction method: B&I (2014)  
Points to test: Based on Ic value  
Earthquake magnitude  $M_w$ : 6.14  
Peak ground acceleration: 0.25  
Depth to water table (insitu): 2.90 m

Depth to GWT (earthq.): 2.90 m  
Average results interval: 3  
Ic cut-off value: 2.60  
Unit weight calculation: Based on SBT  
Use fill: No  
Fill height: N/A

Fill weight: N/A  
Transition detect. applied: Yes  
 $K_\sigma$  applied: Yes  
Clay like behavior applied: Sands only  
Limit depth applied: Yes  
Limit depth: 20.00 m

F.S. color scheme

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

LPI color scheme

- Very high risk
- High risk
- Low risk

## LIQUEFACTION ANALYSIS REPORT

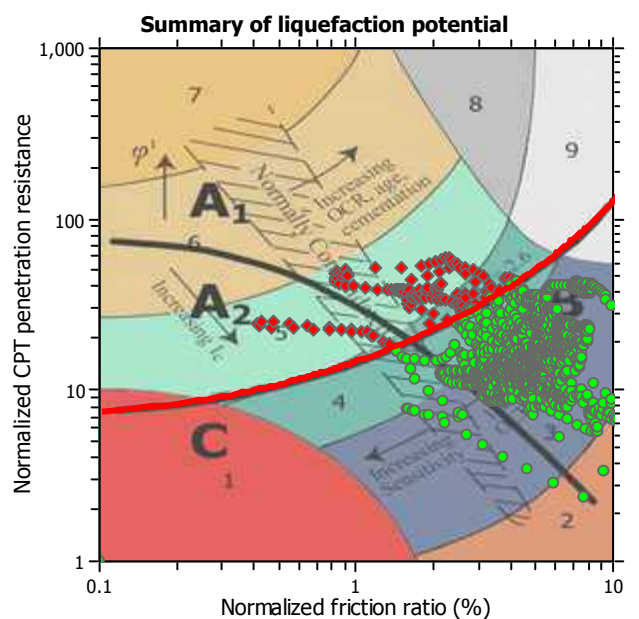
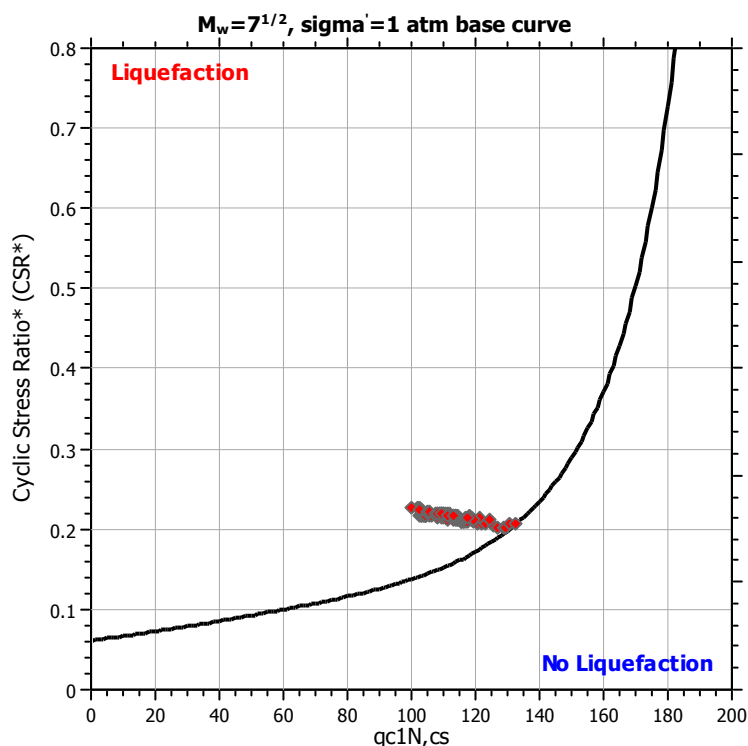
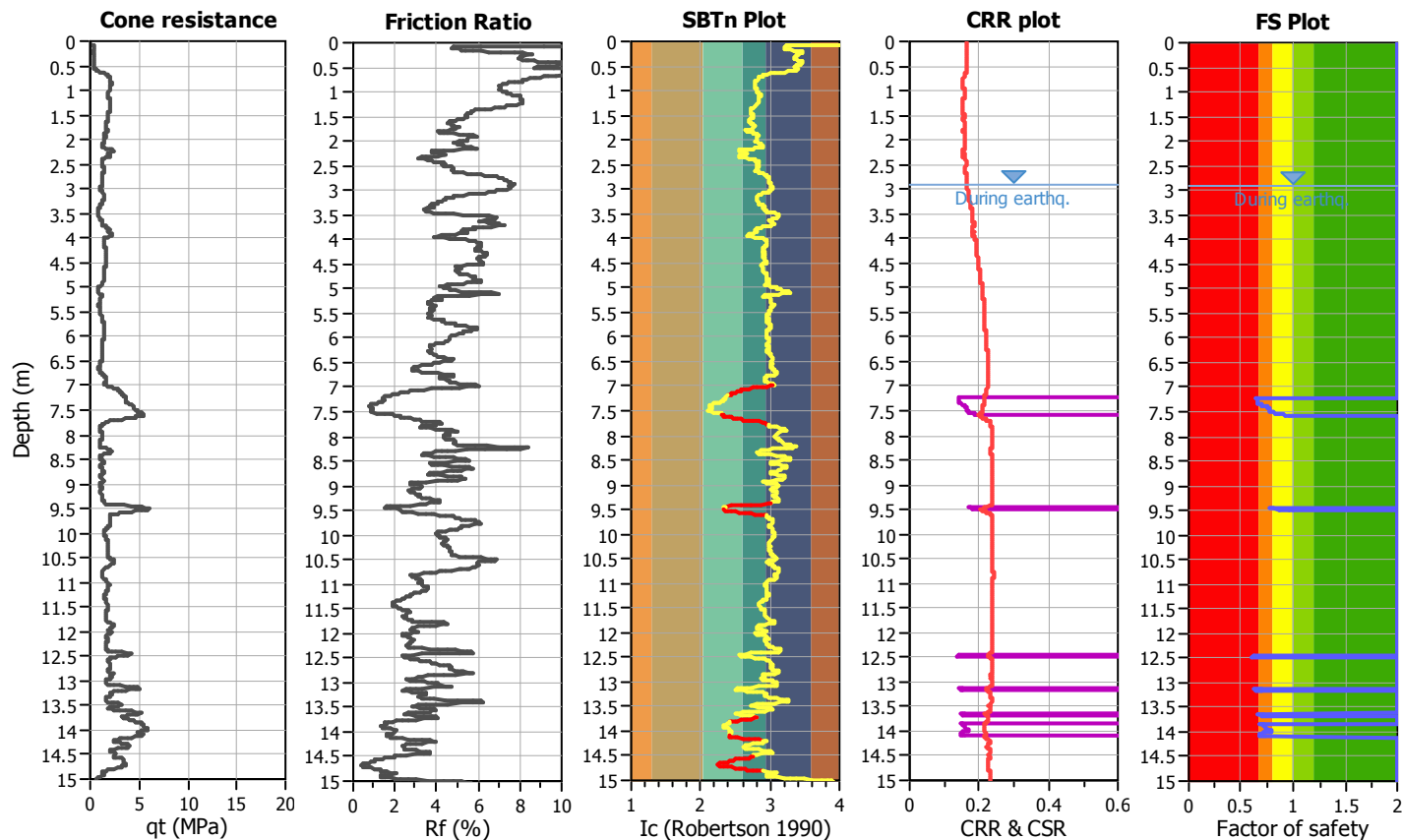
**Project title :** Lotto de Coubertin

**Location :** Castenaso (BO)

**CPT file :** CPTE3

### Input parameters and analysis data

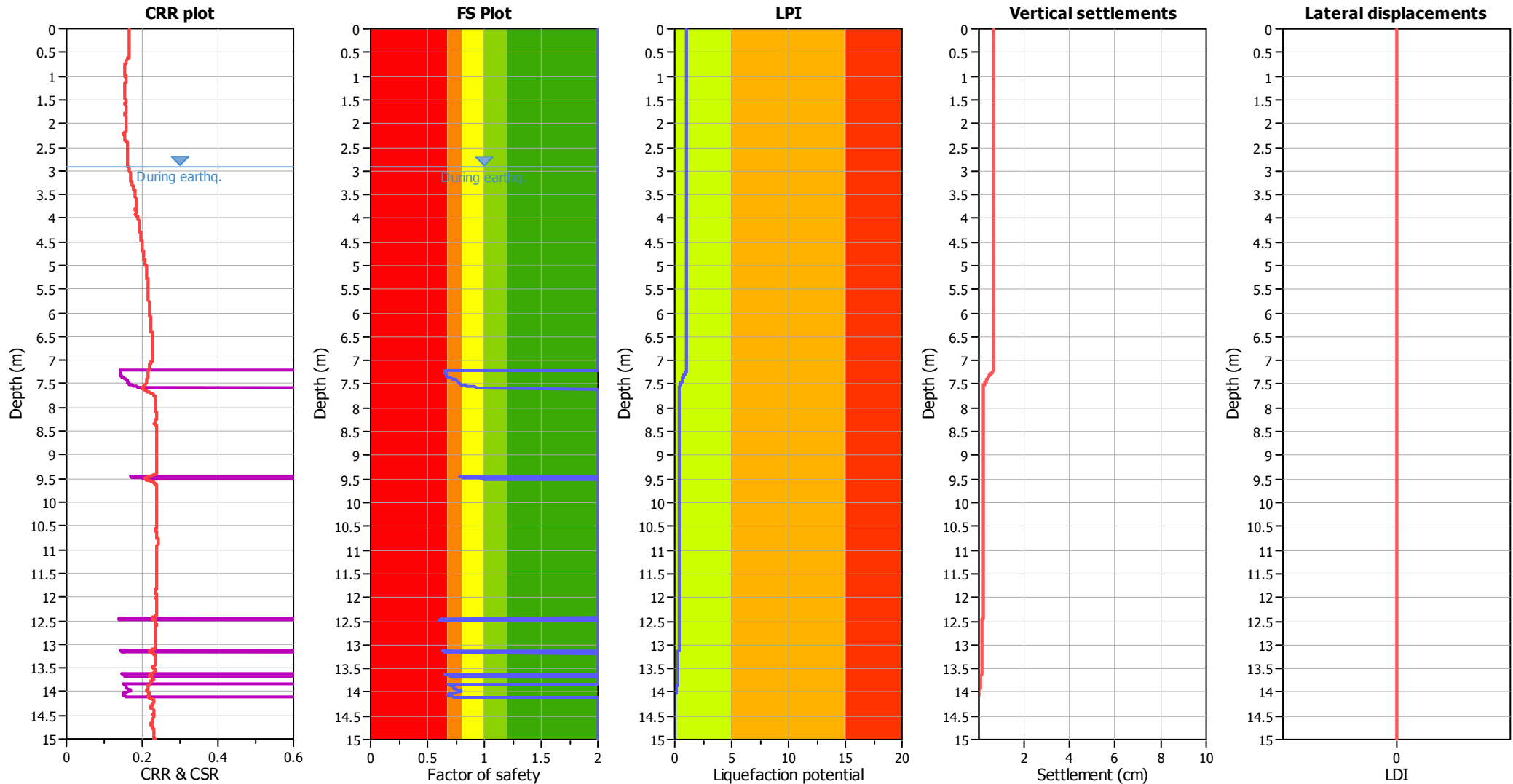
Analysis method:	B&I (2014)	G.W.T. (in-situ):	2.90 m	Use fill:	No	Clay like behavior applied:	Sands only
Fines correction method:	B&I (2014)	G.W.T. (earthq.):	2.90 m	Fill height:	N/A	Limit depth applied:	Yes
Points to test:	Based on Ic value	Average results interval:	3	Fill weight:	N/A	Limit depth:	20.00 m
Earthquake magnitude $M_w$ :	6.14	Ic cut-off value:	2.60	Trans. detect. applied:	Yes	MSF method:	Method
Peak ground acceleration:	0.25	Unit weight calculation:	Based on SBT	$K_g$ applied:	Yes		



Zone A<sub>1</sub>: Cyclic liquefaction likely depending on size and duration of cyclic loading  
 Zone A<sub>2</sub>: Cyclic liquefaction and strength loss likely depending on loading and ground geometry  
 Zone B: Liquefaction and post-earthquake strength loss unlikely, check cyclic softening  
 Zone C: Cyclic liquefaction and strength loss possible depending on soil plasticity, brittleness/sensitivity, strain to peak undrained strength and ground geometry



Liquefaction analysis overall plots



Input parameters and analysis data

Analysis method: B&I (2014)  
Fines correction method: B&I (2014)  
Points to test: Based on Ic value  
Earthquake magnitude  $M_w$ : 6.14  
Peak ground acceleration: 0.25  
Depth to water table (insitu): 2.90 m

Depth to GWT (earthq.): 2.90 m  
Average results interval: 3  
Ic cut-off value: 2.60  
Unit weight calculation: Based on SBT  
Use fill: No  
Fill height: N/A

Fill weight: N/A  
Transition detect. applied: Yes  
 $K_0$  applied: Yes  
Clay like behavior applied: Sands only  
Limit depth applied: Yes  
Limit depth: 20.00 m

F.S. color scheme

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

LPI color scheme

- Very high risk
- High risk
- Low risk

## LIQUEFACTION ANALYSIS REPORT

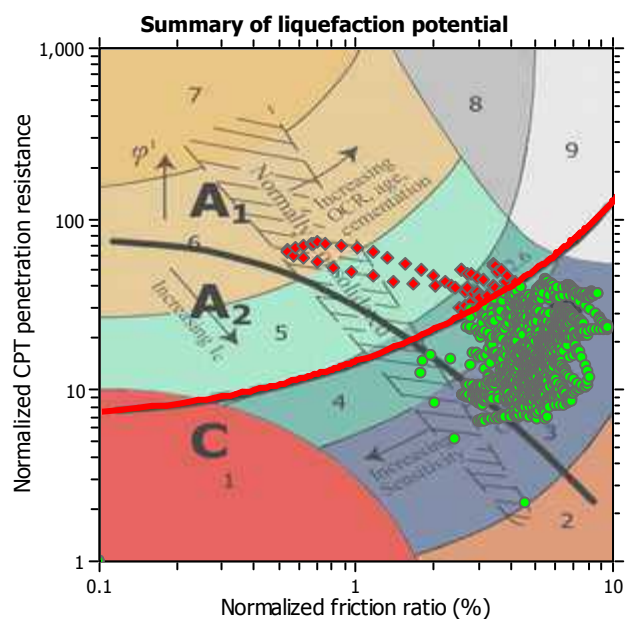
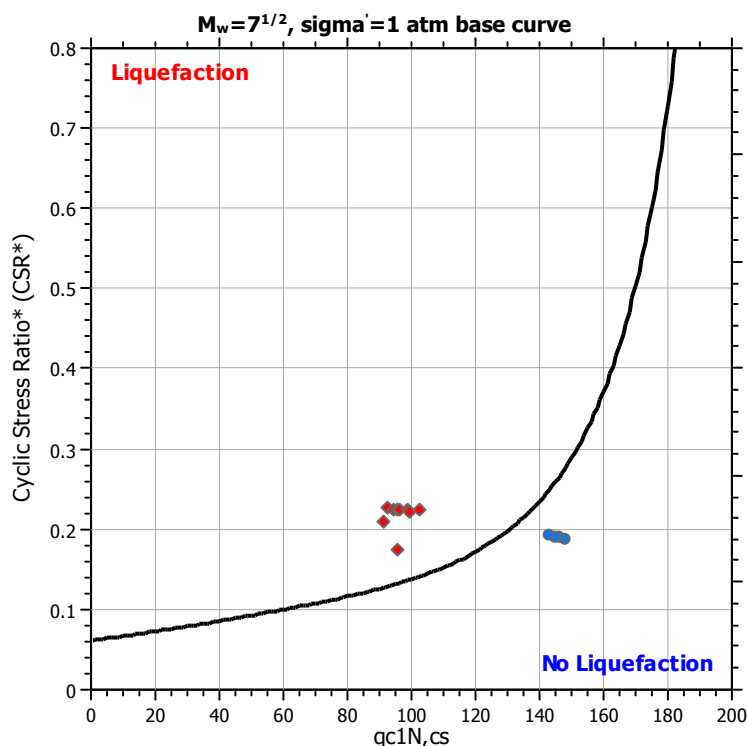
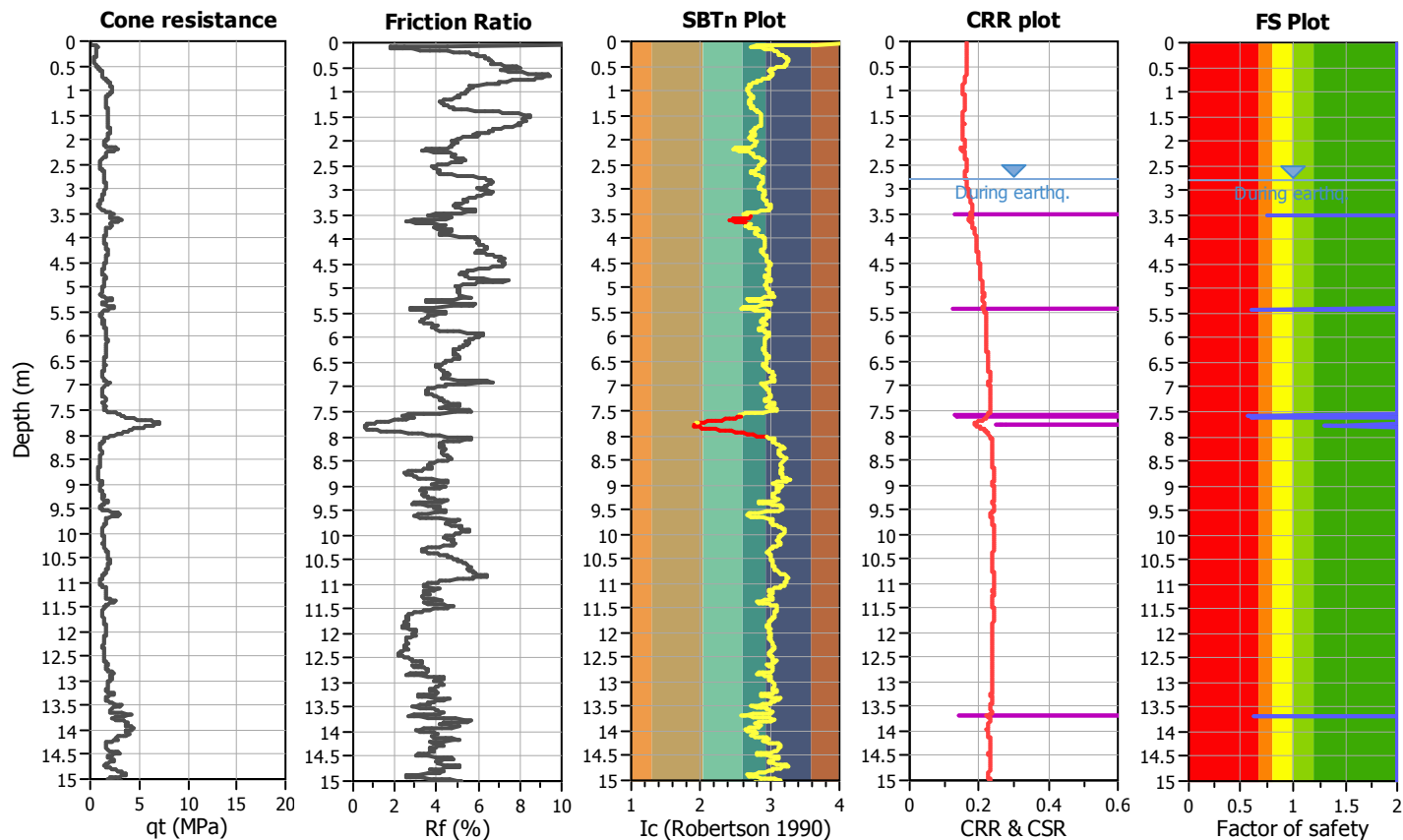
**Project title :** Lotto de Coubertin

**Location :** Castenaso (BO)

**CPT file :** CPTE4

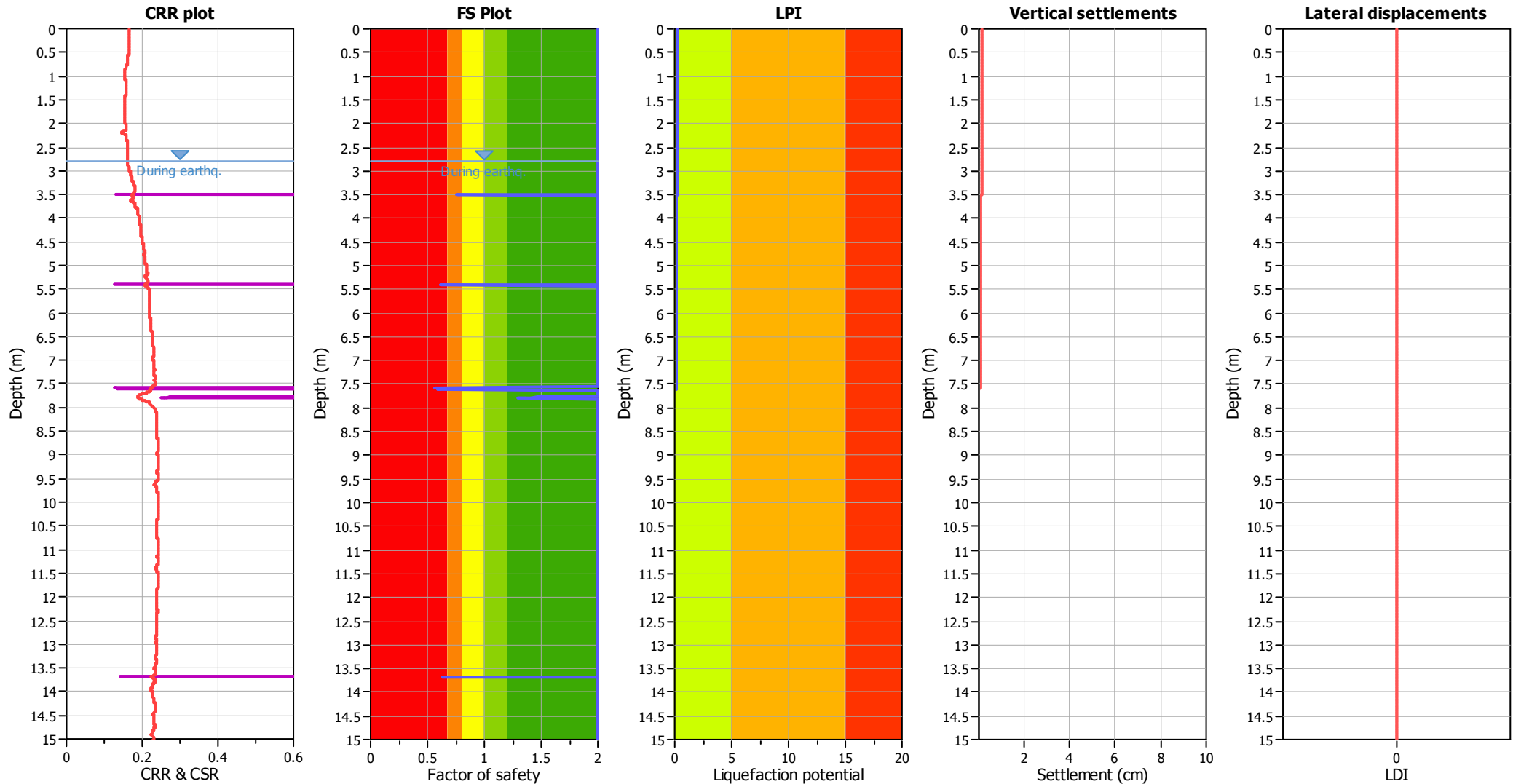
### Input parameters and analysis data

Analysis method:	B&I (2014)	G.W.T. (in-situ):	2.80 m	Use fill:	No	Clay like behavior applied:	Sands only
Fines correction method:	B&I (2014)	G.W.T. (earthq.):	2.80 m	Fill height:	N/A	Limit depth applied:	Yes
Points to test:	Based on Ic value	Average results interval:	3	Fill weight:	N/A	Limit depth:	20.00 m
Earthquake magnitude $M_w$ :	6.14	Ic cut-off value:	2.60	Trans. detect. applied:	Yes	MSF method:	Method
Peak ground acceleration:	0.25	Unit weight calculation:	Based on SBT	$K_g$ applied:	Yes		



Zone A<sub>1</sub>: Cyclic liquefaction likely depending on size and duration of cyclic loading  
 Zone A<sub>2</sub>: Cyclic liquefaction and strength loss likely depending on loading and ground geometry  
 Zone B: Liquefaction and post-earthquake strength loss unlikely, check cyclic softening  
 Zone C: Cyclic liquefaction and strength loss possible depending on soil plasticity, brittleness/sensitivity, strain to peak undrained strength and ground geometry

Liquefaction analysis overall plots



Input parameters and analysis data

Analysis method: B&I (2014)  
Fines correction method: B&I (2014)  
Points to test: Based on Ic value  
Earthquake magnitude  $M_w$ : 6.14  
Peak ground acceleration: 0.25  
Depth to water table (insitu): 2.80 m

Depth to GWT (earthq.): 2.80 m  
Average results interval: 3  
Ic cut-off value: 2.60  
Unit weight calculation: Based on SBT  
Use fill: No  
Fill height: N/A

Fill weight: N/A  
Transition detect. applied: Yes  
 $K_0$  applied: Yes  
Clay like behavior applied: Sands only  
Limit depth applied: Yes  
Limit depth: 20.00 m

F.S. color scheme

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

LPI color scheme

- Very high risk
- High risk
- Low risk

## LIQUEFACTION ANALYSIS REPORT

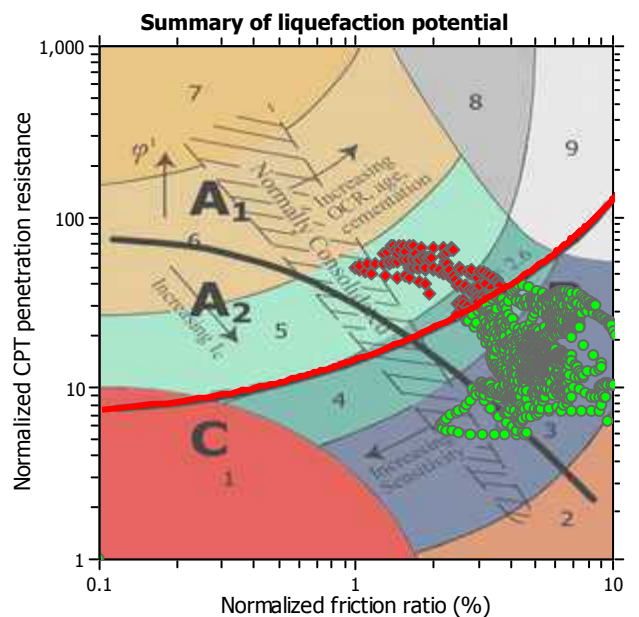
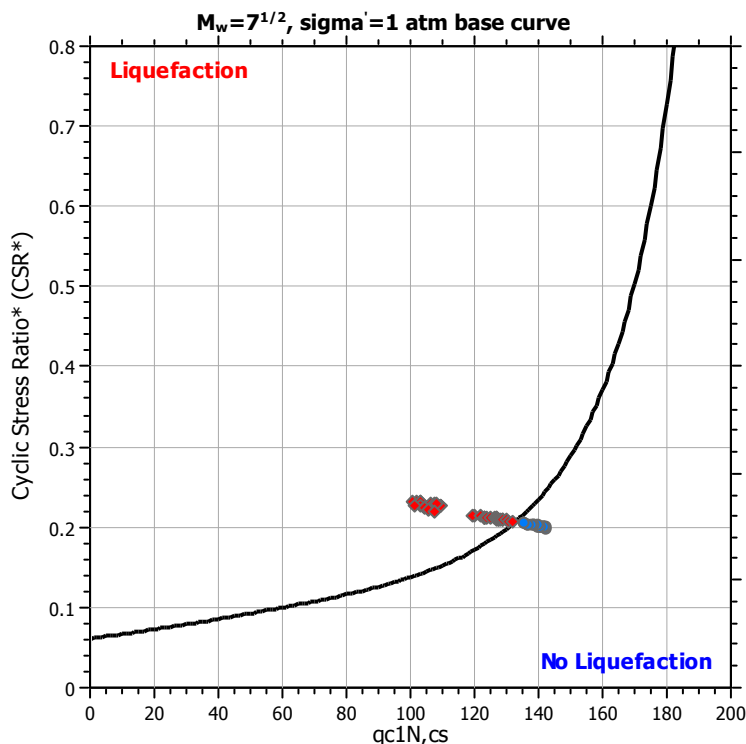
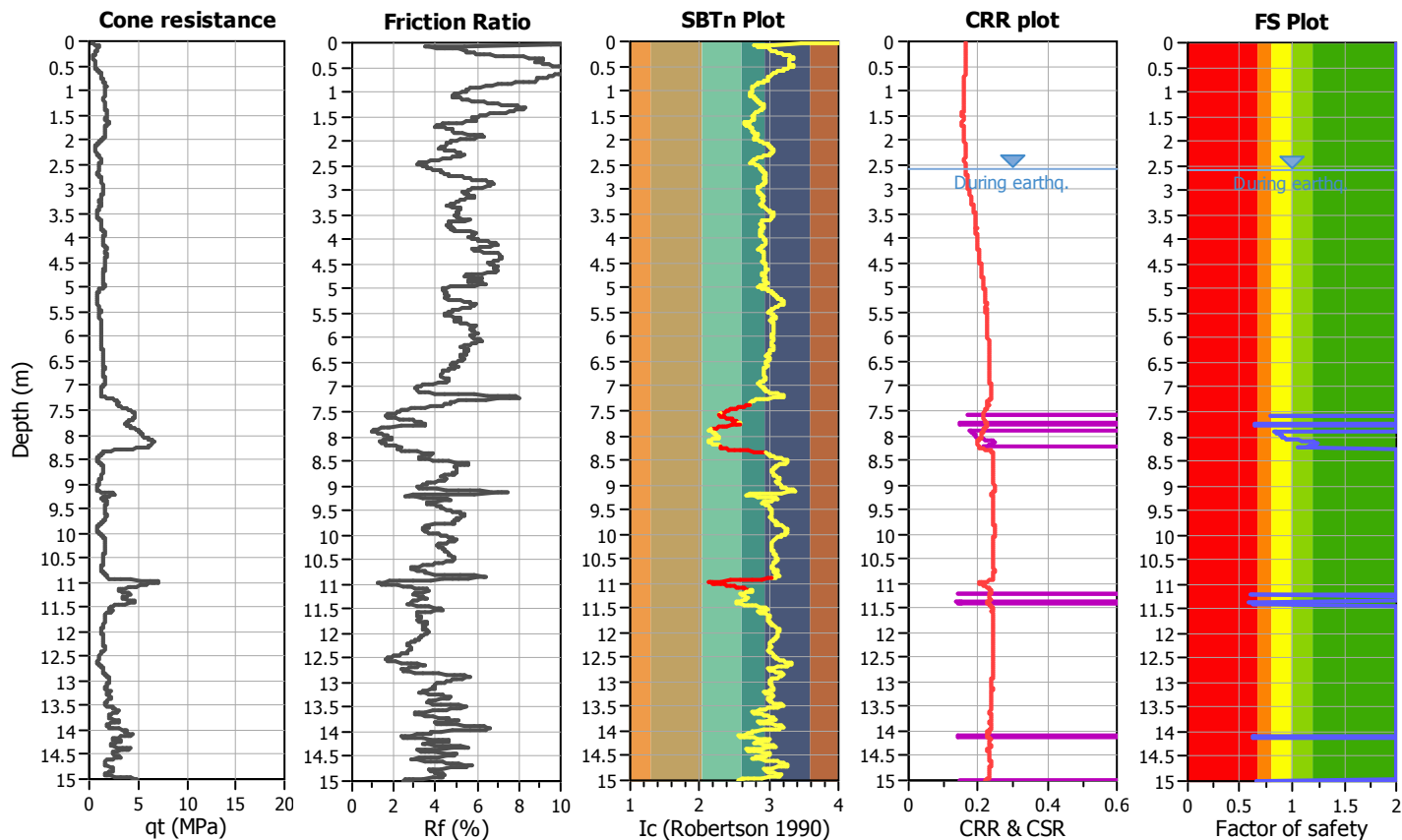
**Project title :** Lotto de Coubertin

**Location :** Castenaso (BO)

**CPT file :** CPT E5

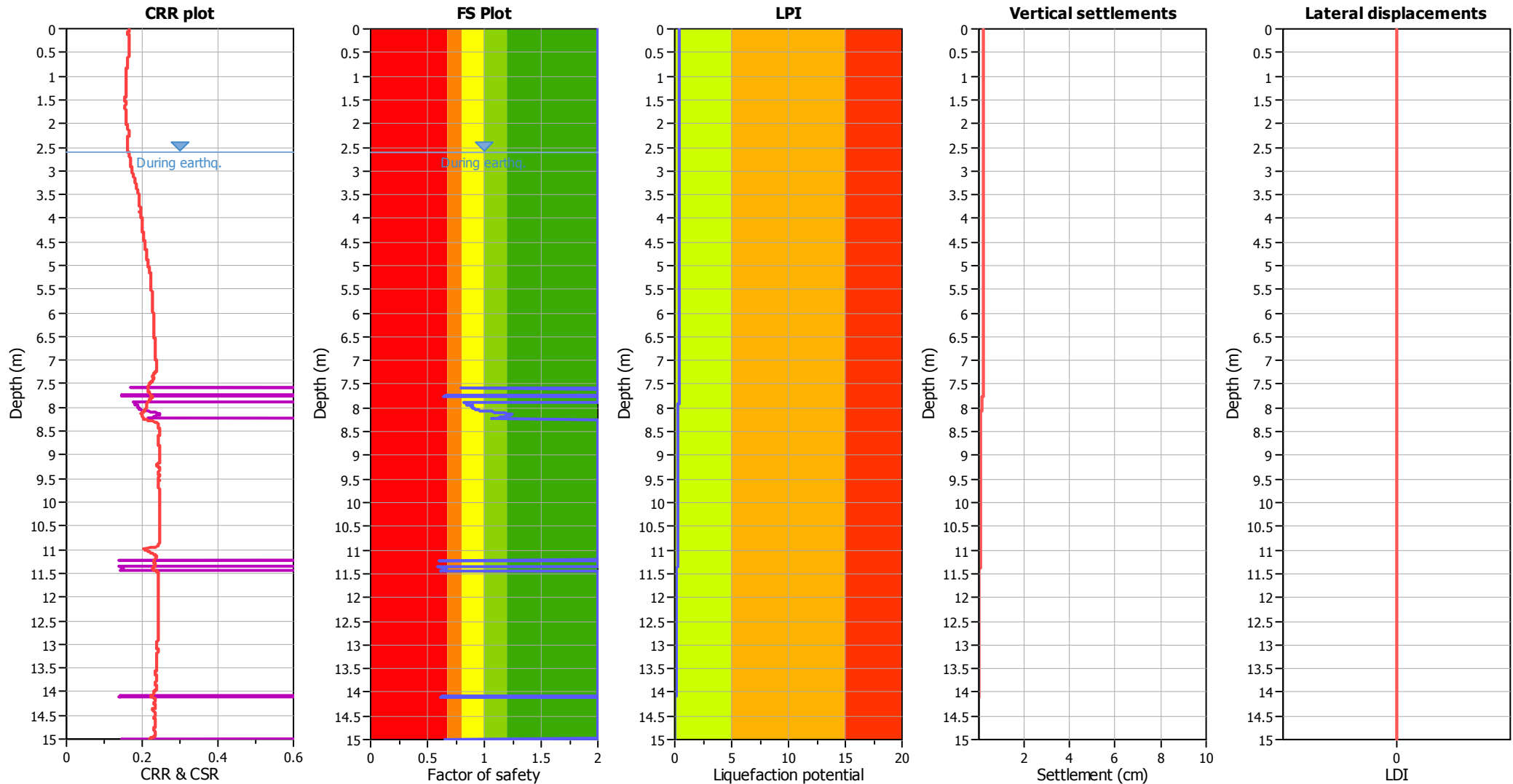
### Input parameters and analysis data

Analysis method:	B&I (2014)	G.W.T. (in-situ):	2.60 m	Use fill:	No	Clay like behavior applied:	Sands only
Fines correction method:	B&I (2014)	G.W.T. (earthq.):	2.60 m	Fill height:	N/A	Limit depth applied:	Yes
Points to test:	Based on Ic value	Average results interval:	3	Fill weight:	N/A	Limit depth:	20.00 m
Earthquake magnitude $M_w$ :	6.14	Ic cut-off value:	2.60	Trans. detect. applied:	Yes	MSF method:	Method
Peak ground acceleration:	0.25	Unit weight calculation:	Based on SBT	$K_g$ applied:	Yes		



Zone A<sub>1</sub>: Cyclic liquefaction likely depending on size and duration of cyclic loading  
 Zone A<sub>2</sub>: Cyclic liquefaction and strength loss likely depending on loading and ground geometry  
 Zone B: Liquefaction and post-earthquake strength loss unlikely, check cyclic softening  
 Zone C: Cyclic liquefaction and strength loss possible depending on soil plasticity, brittleness/sensitivity, strain to peak undrained strength and ground geometry

Liquefaction analysis overall plots



Input parameters and analysis data

Analysis method:	B&I (2014)	Depth to GWT (earthq.):	2.60 m	Fill weight:	N/A
Fines correction method:	B&I (2014)	Average results interval:	3	Transition detect. applied:	Yes
Points to test:	Based on Ic value	Ic cut-off value:	2.60	K <sub>0</sub> applied:	Yes
Earthquake magnitude M <sub>w</sub> :	6.14	Unit weight calculation:	Based on SBT	Clay like behavior applied:	Sands only
Peak ground acceleration:	0.25	Use fill:	No	Limit depth applied:	Yes
Depth to water table (insitu):	2.60 m	Fill height:	N/A	Limit depth:	20.00 m

F.S. color scheme

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

LPI color scheme

Red	Very high risk
Orange	High risk
Yellow	Low risk



## LIQUEFACTION ANALYSIS REPORT

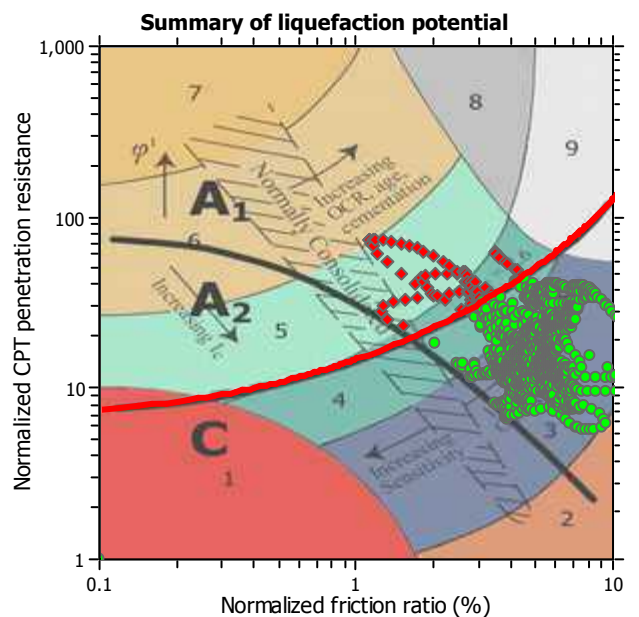
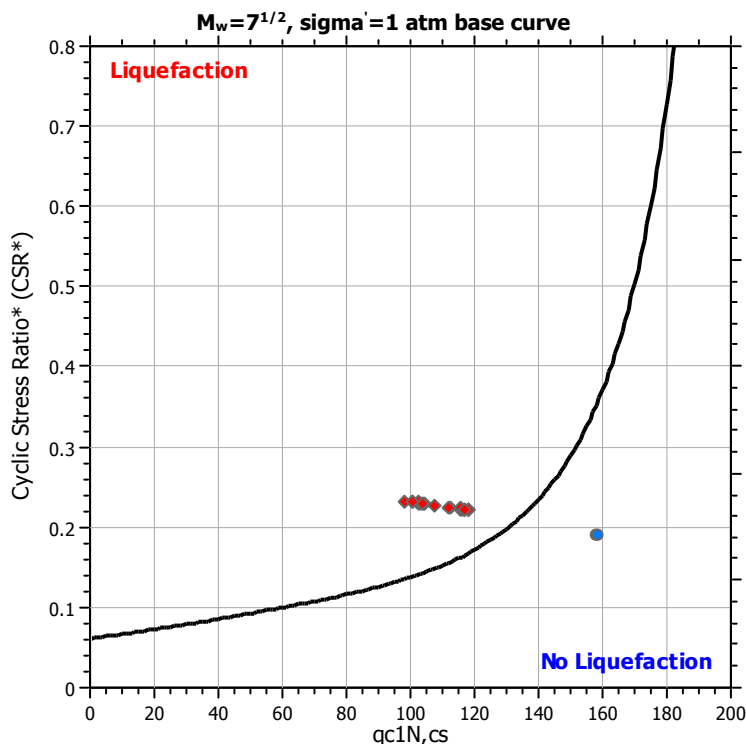
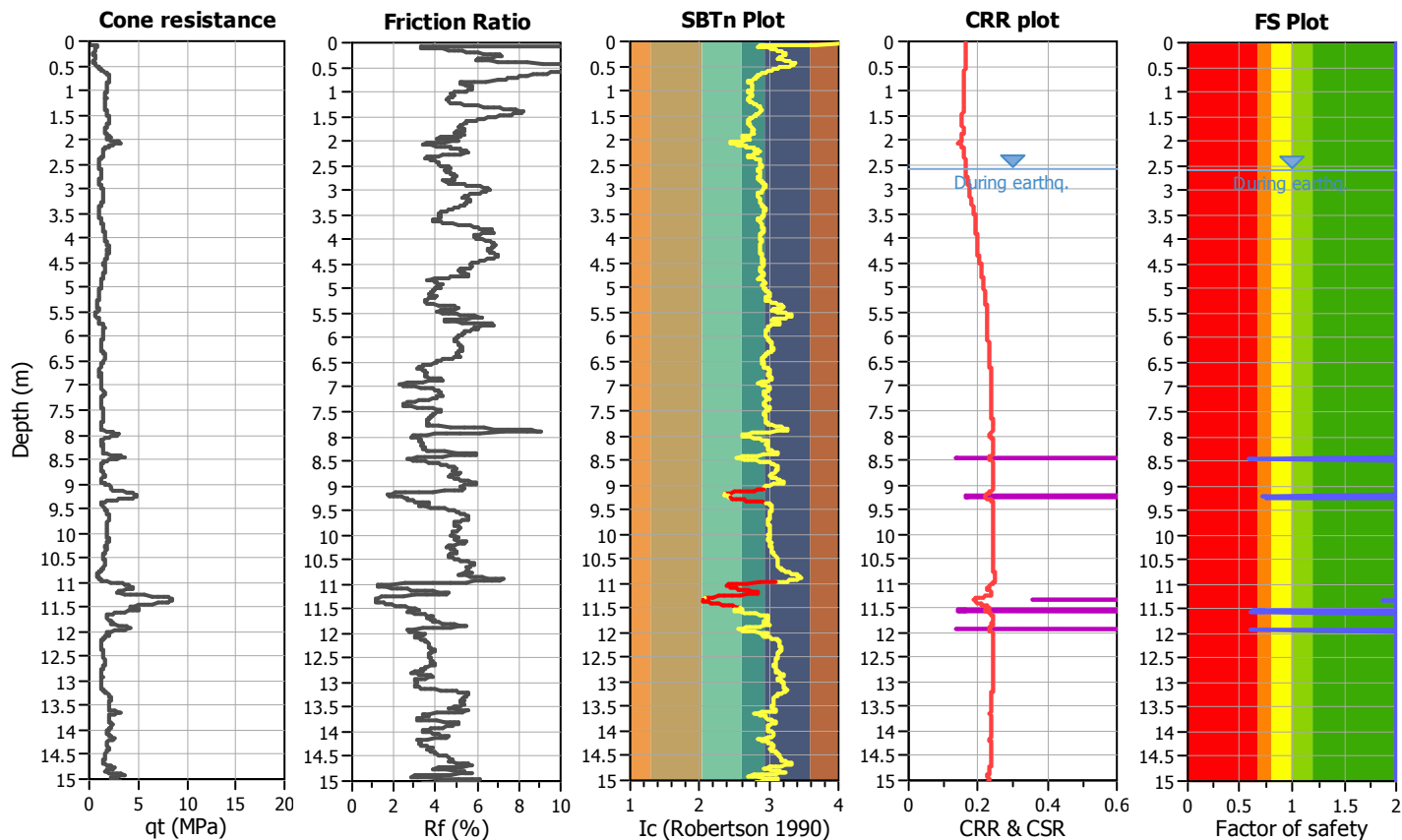
**Project title :** Lotto de Coubertin

**Location :** Castenaso (BO)

**CPT file :** CPTE6

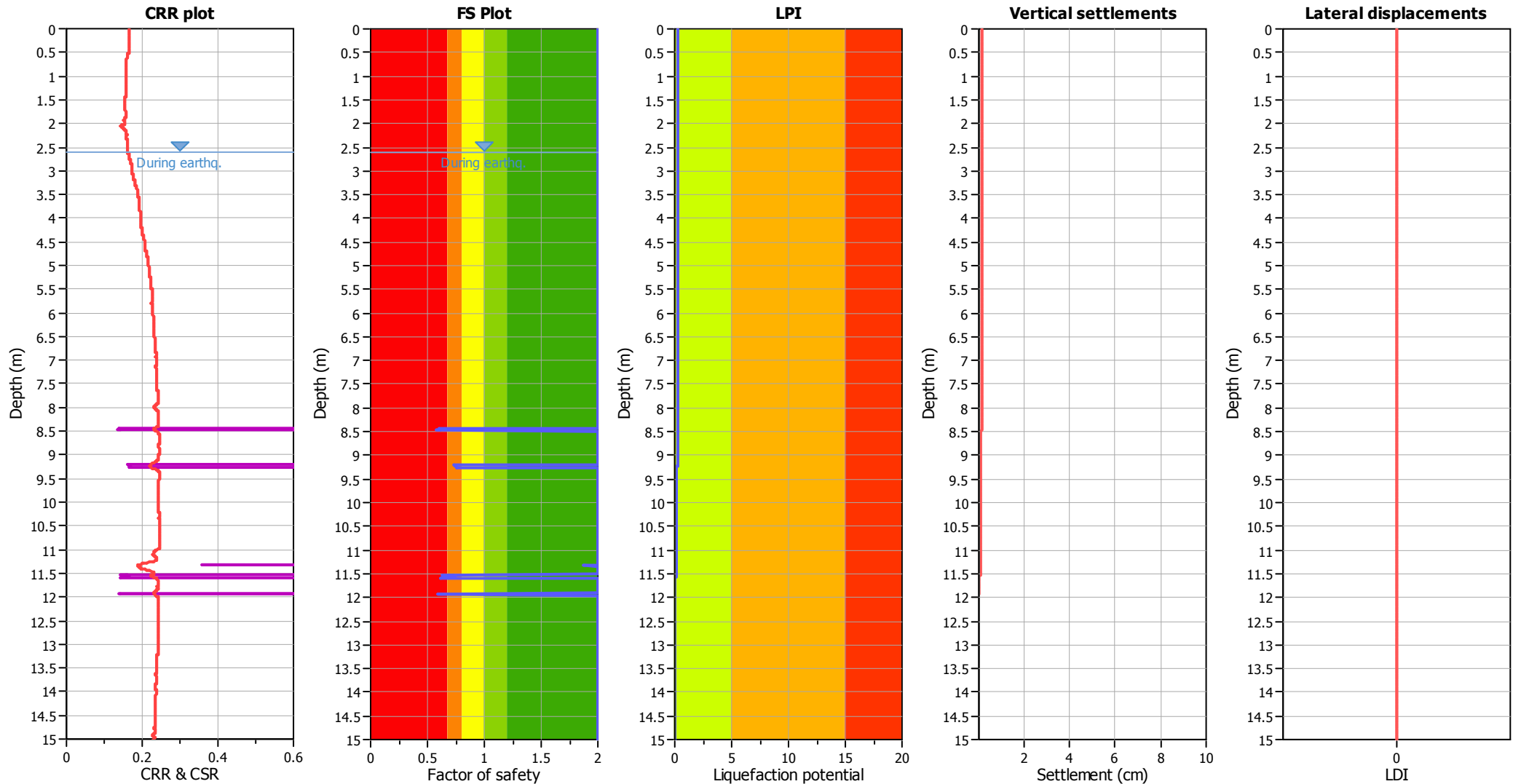
### Input parameters and analysis data

Analysis method:	B&I (2014)	G.W.T. (in-situ):	2.60 m	Use fill:	No	Clay like behavior applied:	Sands only
Fines correction method:	B&I (2014)	G.W.T. (earthq.):	2.60 m	Fill height:	N/A	Limit depth applied:	Yes
Points to test:	Based on Ic value	Average results interval:	3	Fill weight:	N/A	Limit depth:	20.00 m
Earthquake magnitude $M_w$ :	6.14	Ic cut-off value:	2.60	Trans. detect. applied:	Yes	MSF method:	Method
Peak ground acceleration:	0.25	Unit weight calculation:	Based on SBT	$K_\sigma$ applied:	Yes		



Zone A<sub>1</sub>: Cyclic liquefaction likely depending on size and duration of cyclic loading  
 Zone A<sub>2</sub>: Cyclic liquefaction and strength loss likely depending on loading and ground geometry  
 Zone B: Liquefaction and post-earthquake strength loss unlikely, check cyclic softening  
 Zone C: Cyclic liquefaction and strength loss possible depending on soil plasticity, brittleness/sensitivity, strain to peak undrained strength and ground geometry

Liquefaction analysis overall plots



Input parameters and analysis data

Analysis method:	B&I (2014)	Depth to GWT (earthq.):	2.60 m	Fill weight:	N/A
Fines correction method:	B&I (2014)	Average results interval:	3	Transition detect. applied:	Yes
Points to test:	Based on Ic value	Ic cut-off value:	2.60	K <sub>0</sub> applied:	Yes
Earthquake magnitude M <sub>w</sub> :	6.14	Unit weight calculation:	Based on SBT	Clay like behavior applied:	Sands only
Peak ground acceleration:	0.25	Use fill:	No	Limit depth applied:	Yes
Depth to water table (insitu):	2.60 m	Fill height:	N/A	Limit depth:	20.00 m

F.S. color scheme

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

LPI color scheme

Red	Very high risk
Orange	High risk
Yellow	Low risk

## LIQUEFACTION ANALYSIS REPORT

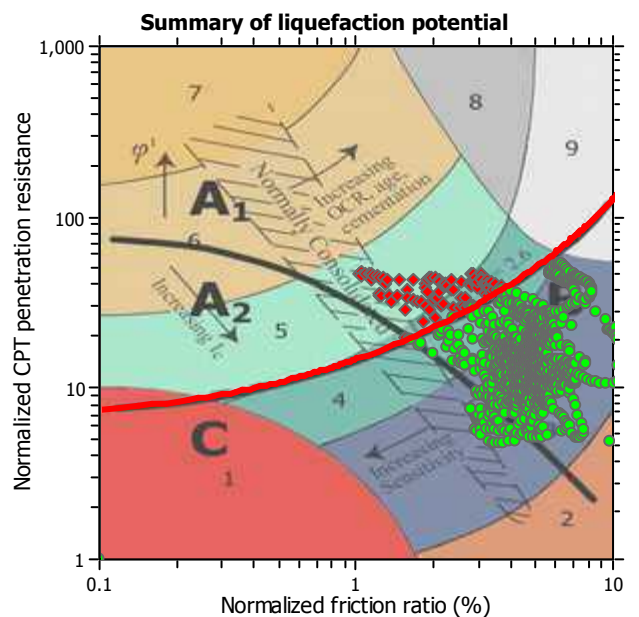
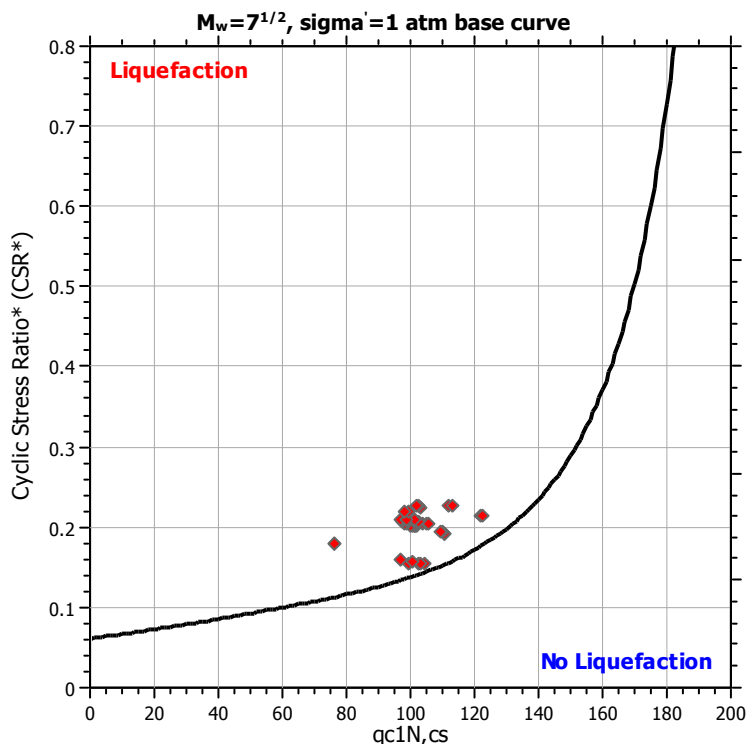
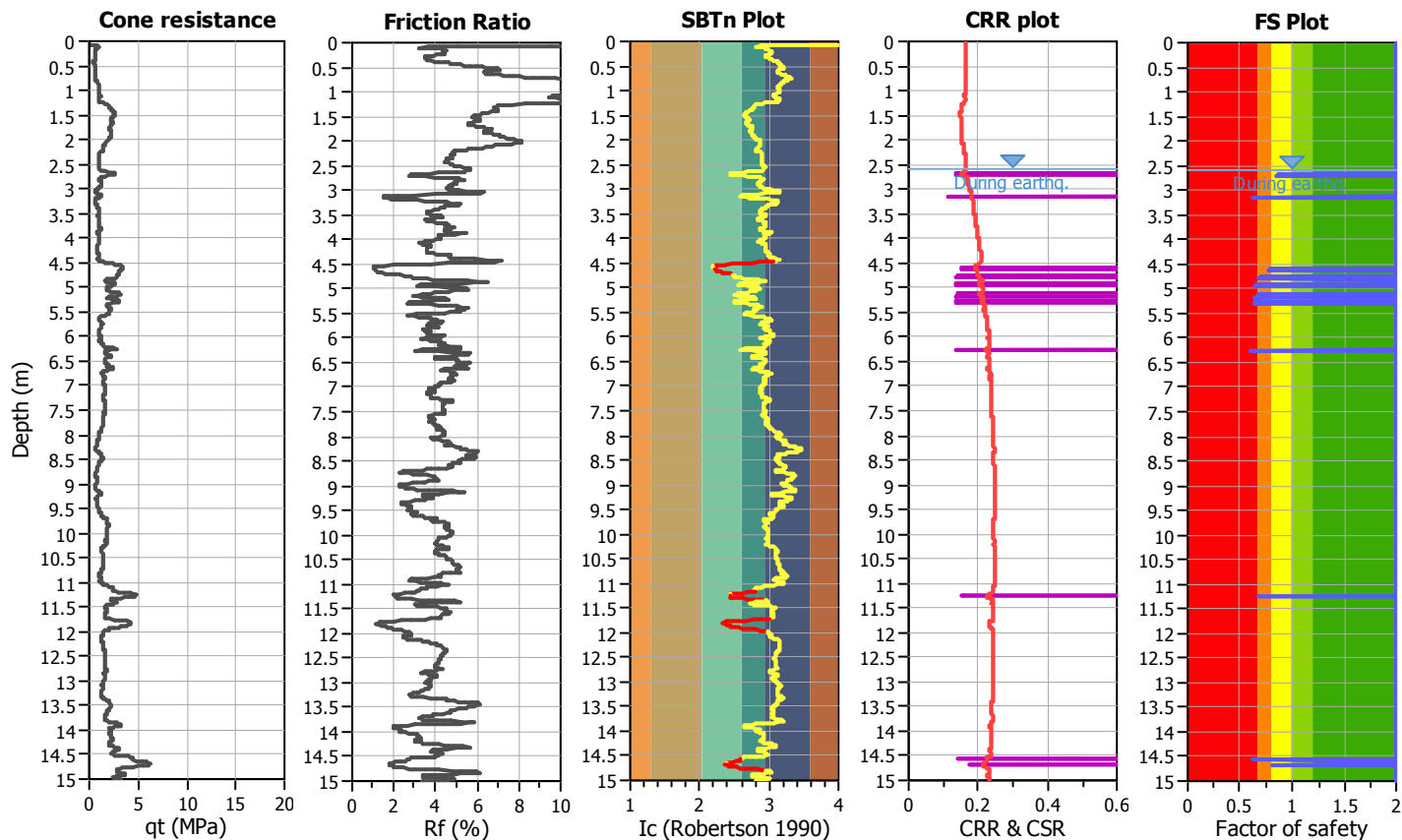
**Project title :** Lotto de Coubertin

**Location :** Castenaso (BO)

**CPT file :** CPTE7

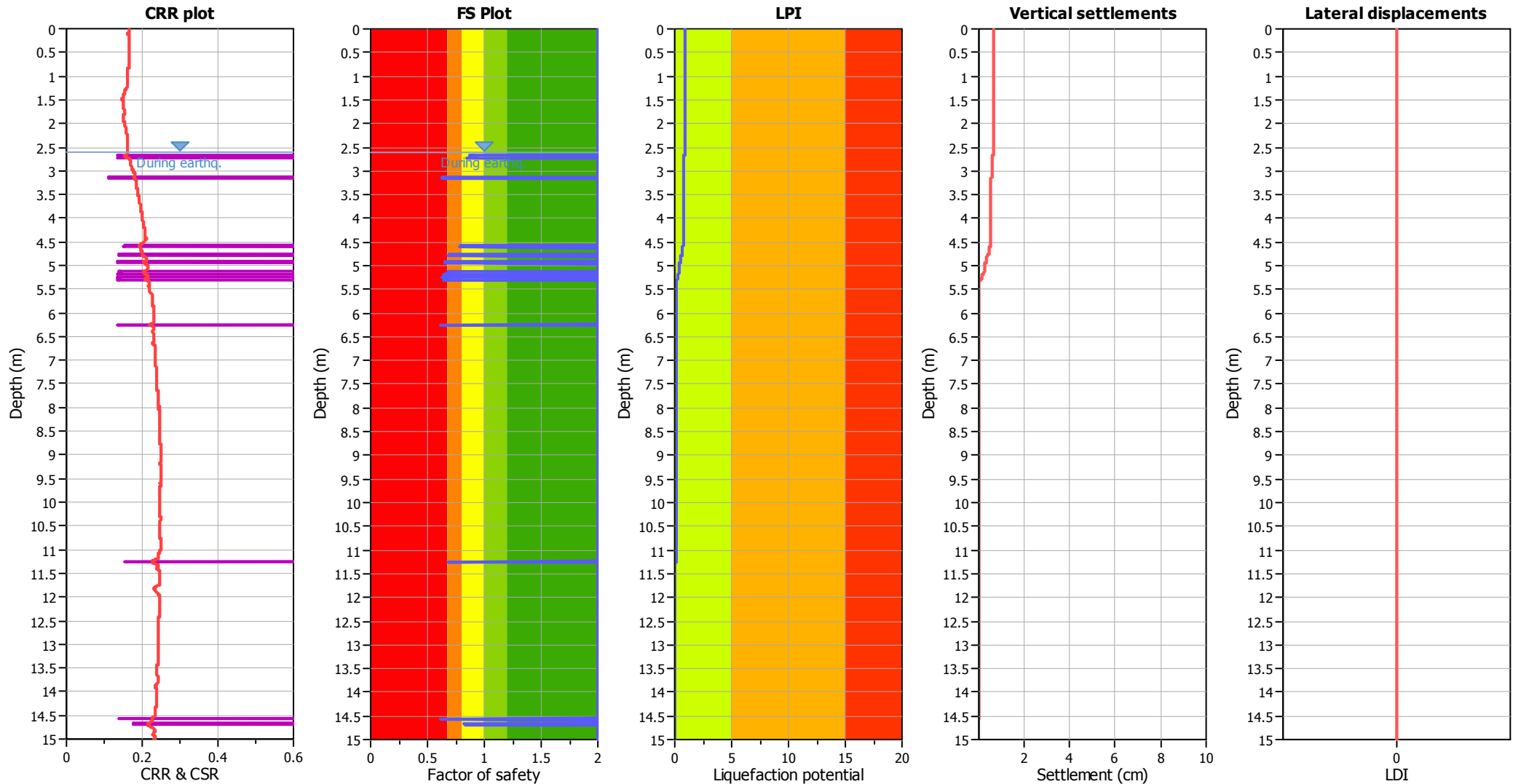
### Input parameters and analysis data

Analysis method:	B&I (2014)	G.W.T. (in-situ):	2.60 m	Use fill:	No	Clay like behavior applied:	Sands only
Fines correction method:	B&I (2014)	G.W.T. (earthq.):	2.60 m	Fill height:	N/A	Limit depth applied:	Yes
Points to test:	Based on Ic value	Average results interval:	3	Fill weight:	N/A	Limit depth:	20.00 m
Earthquake magnitude $M_w$ :	6.14	Ic cut-off value:	2.60	Trans. detect. applied:	Yes	MSF method:	Method
Peak ground acceleration:	0.25	Unit weight calculation:	Based on SBT	$K_g$ applied:	Yes		



Zone A<sub>1</sub>: Cyclic liquefaction likely depending on size and duration of cyclic loading  
 Zone A<sub>2</sub>: Cyclic liquefaction and strength loss likely depending on loading and ground geometry  
 Zone B: Liquefaction and post-earthquake strength loss unlikely, check cyclic softening  
 Zone C: Cyclic liquefaction and strength loss possible depending on soil plasticity, brittleness/sensitivity, strain to peak undrained strength and ground geometry

Liquefaction analysis overall plots



Input parameters and analysis data

Analysis method:	B&I (2014)	Depth to GWT (earthq.):	2.60 m	Fill weight:	N/A
Fines correction method:	B&I (2014)	Average results interval:	3	Transition detect. applied:	Yes
Points to test:	Based on Ic value	Ic cut-off value:	2.60	K <sub>0</sub> applied:	Yes
Earthquake magnitude M <sub>w</sub> :	6.14	Unit weight calculation:	Based on SBT	Clay like behavior applied:	Sands only
Peak ground acceleration:	0.25	Use fill:	No	Limit depth applied:	Yes
Depth to water table (insitu):	2.60 m	Fill height:	N/A	Limit depth:	20.00 m

F.S. color scheme

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

LPI color scheme

Red	Very high risk
Orange	High risk
Yellow	Low risk

## LIQUEFACTION ANALYSIS REPORT

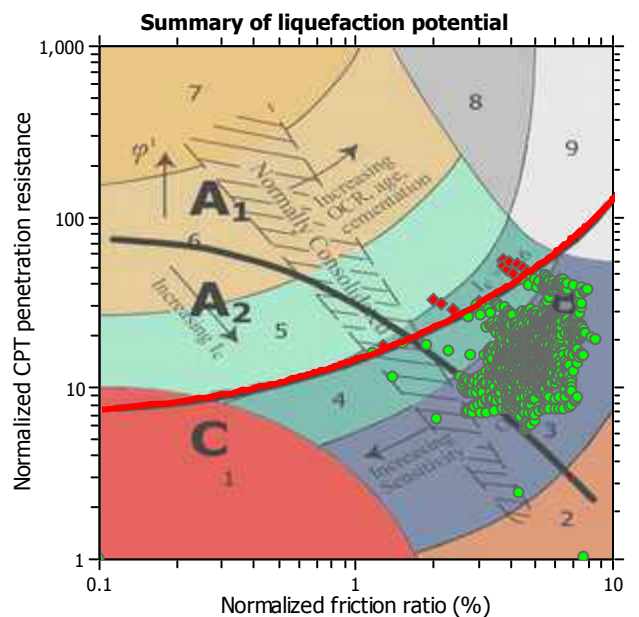
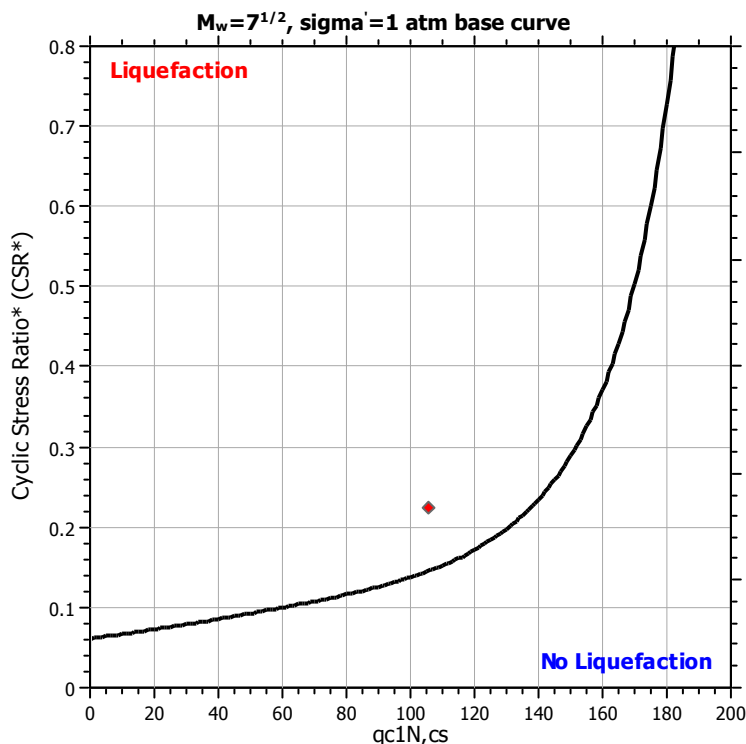
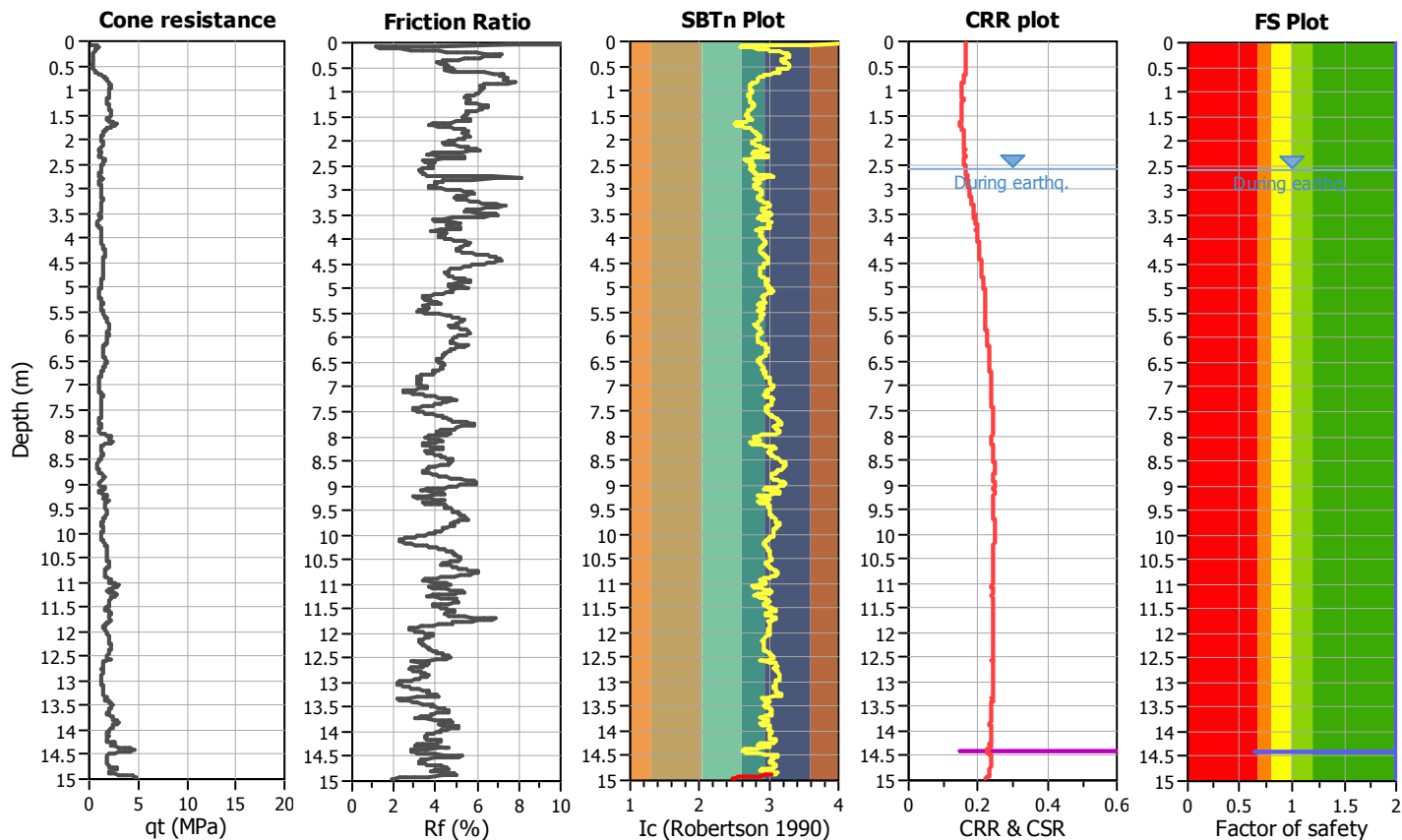
**Project title :** Lotto de Coubertin

**Location :** Castenaso (BO)

**CPT file :** CPTES

### Input parameters and analysis data

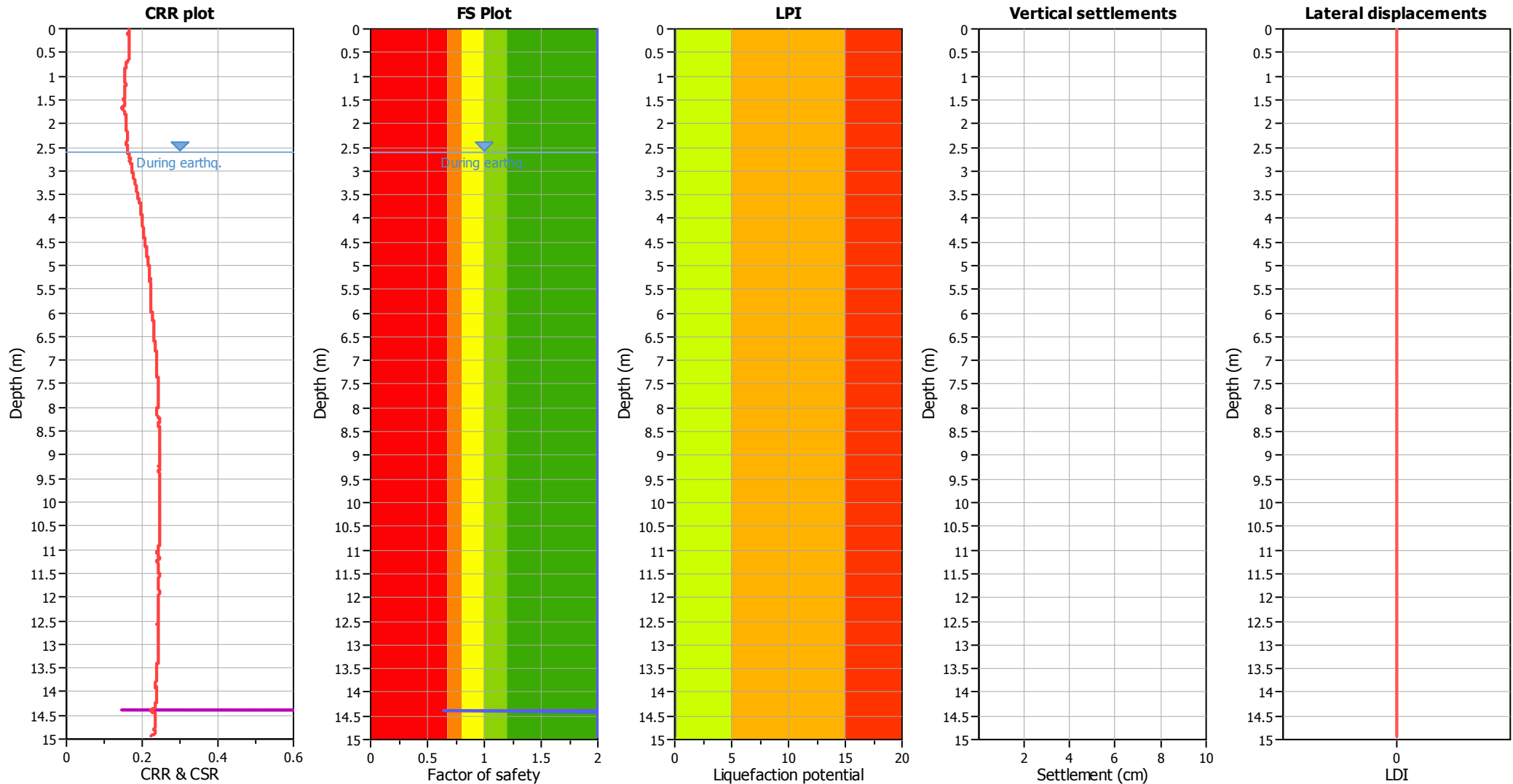
Analysis method:	B&I (2014)	G.W.T. (in-situ):	2.60 m	Use fill:	No	Clay like behavior applied:	Sands only
Fines correction method:	B&I (2014)	G.W.T. (earthq.):	2.60 m	Fill height:	N/A	Limit depth applied:	Yes
Points to test:	Based on Ic value	Average results interval:	3	Fill weight:	N/A	Limit depth:	20.00 m
Earthquake magnitude $M_w$ :	6.14	Ic cut-off value:	2.60	Trans. detect. applied:	Yes	MSF method:	Method
Peak ground acceleration:	0.25	Unit weight calculation:	Based on SBT	$K_g$ applied:	Yes		



Zone A<sub>1</sub>: Cyclic liquefaction likely depending on size and duration of cyclic loading  
 Zone A<sub>2</sub>: Cyclic liquefaction and strength loss likely depending on loading and ground geometry  
 Zone B: Liquefaction and post-earthquake strength loss unlikely, check cyclic softening  
 Zone C: Cyclic liquefaction and strength loss possible depending on soil plasticity, brittleness/sensitivity, strain to peak undrained strength and ground geometry



Liquefaction analysis overall plots



Input parameters and analysis data

Analysis method:	B&I (2014)	Depth to GWT (earthq.):	2.60 m	Fill weight:	N/A
Fines correction method:	B&I (2014)	Average results interval:	3	Transition detect. applied:	Yes
Points to test:	Based on Ic value	Ic cut-off value:	2.60	K <sub>0</sub> applied:	Yes
Earthquake magnitude M <sub>w</sub> :	6.14	Unit weight calculation:	Based on SBT	Clay like behavior applied:	Sands only
Peak ground acceleration:	0.25	Use fill:	No	Limit depth applied:	Yes
Depth to water table (insitu):	2.60 m	Fill height:	N/A	Limit depth:	20.00 m

F.S. color scheme

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

LPI color scheme

Red	Very high risk
Orange	High risk
Yellow	Low risk

## LIQUEFACTION ANALYSIS REPORT

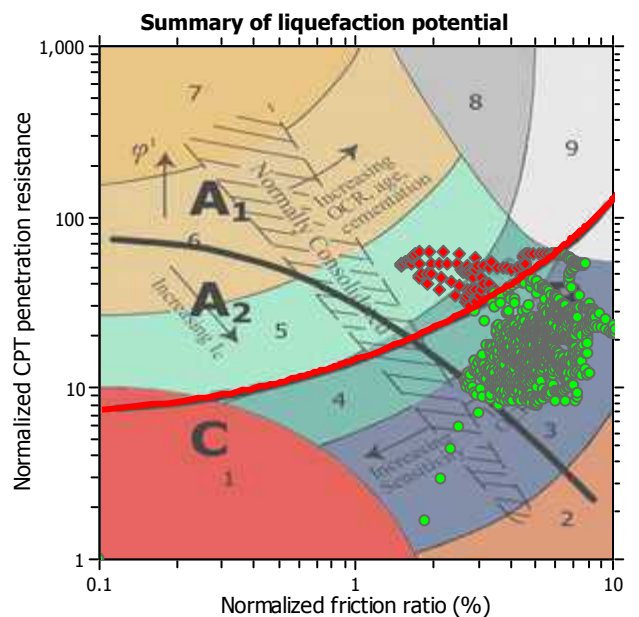
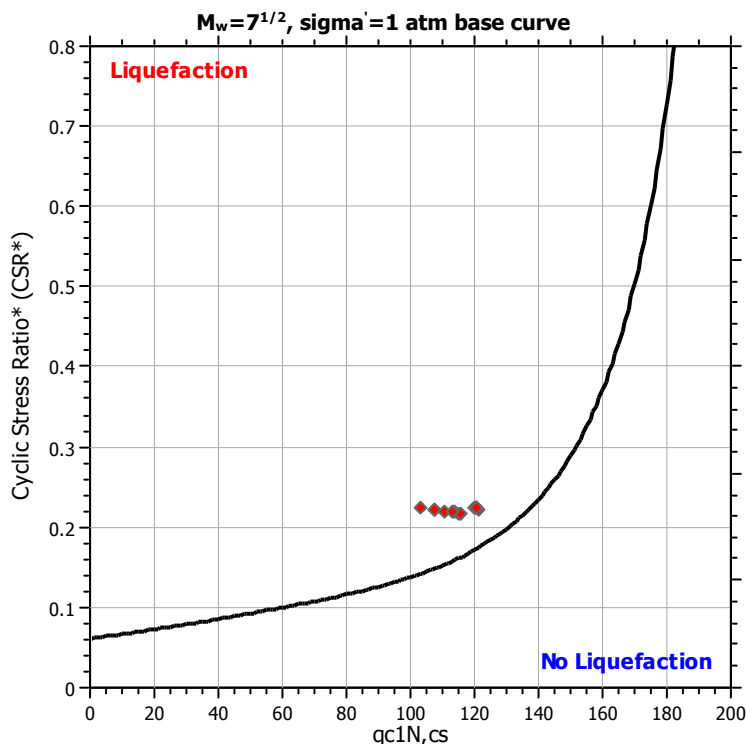
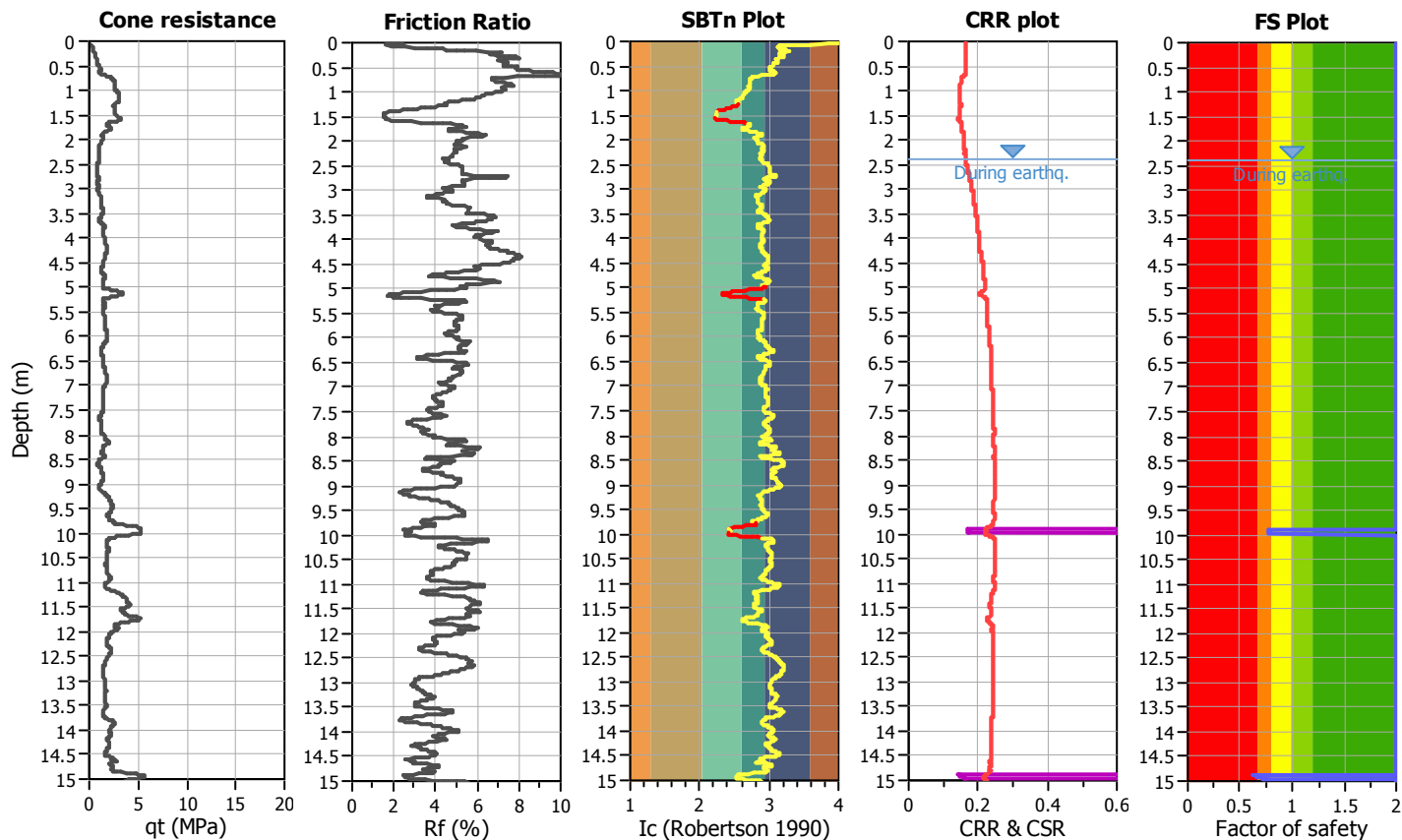
**Project title :** Lotto de Coubertin

**Location :** Castenaso (BO)

**CPT file :** CPTe9

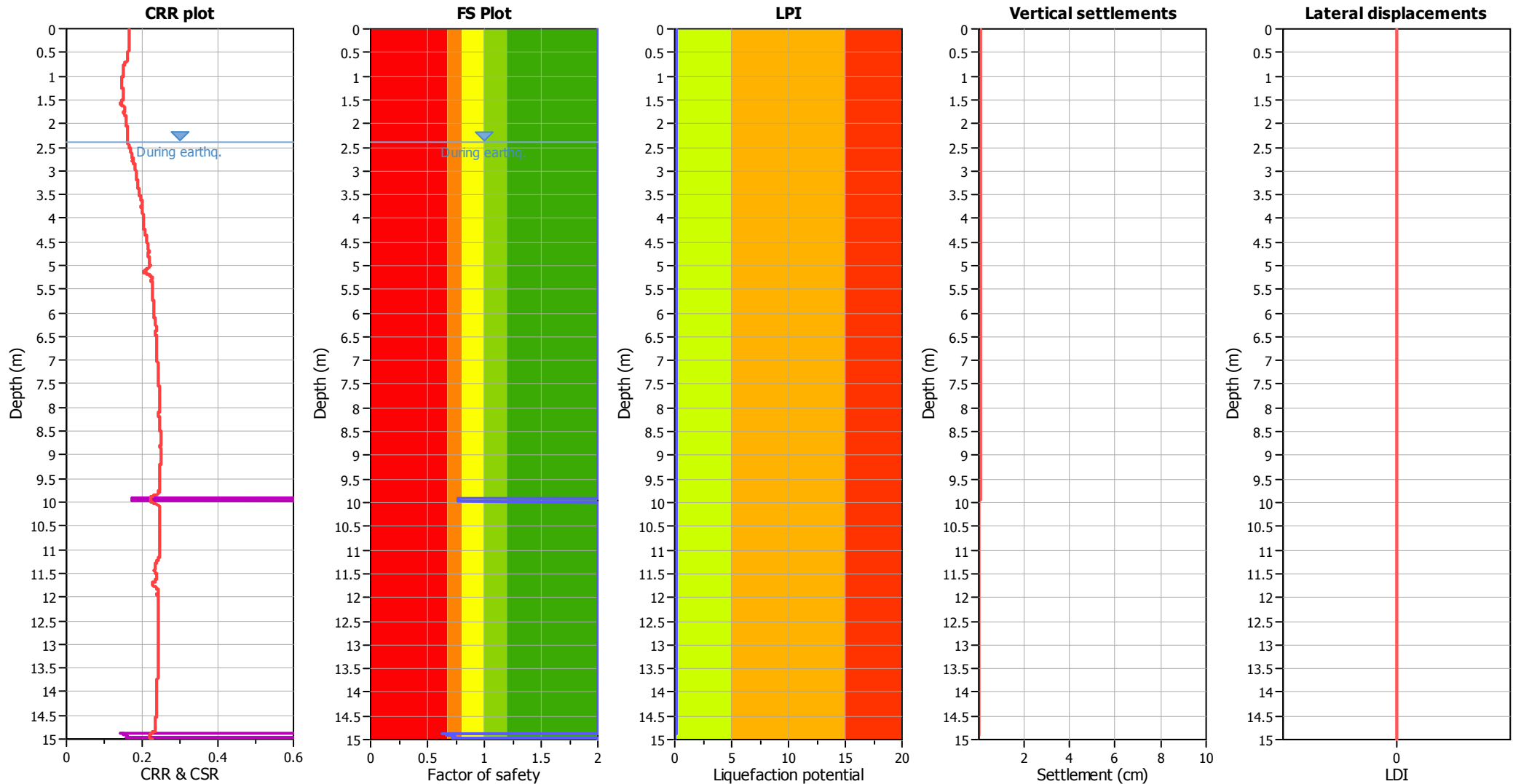
### Input parameters and analysis data

Analysis method:	B&I (2014)	G.W.T. (in-situ):	2.40 m	Use fill:	No	Clay like behavior applied:	Sands only
Fines correction method:	B&I (2014)	G.W.T. (earthq.):	2.40 m	Fill height:	N/A	Limit depth applied:	Yes
Points to test:	Based on Ic value	Average results interval:	3	Fill weight:	N/A	Limit depth:	20.00 m
Earthquake magnitude $M_w$ :	6.14	Ic cut-off value:	2.60	Trans. detect. applied:	Yes	MSF method:	Method
Peak ground acceleration:	0.25	Unit weight calculation:	Based on SBT	$K_g$ applied:	Yes		



Zone A<sub>1</sub>: Cyclic liquefaction likely depending on size and duration of cyclic loading  
 Zone A<sub>2</sub>: Cyclic liquefaction and strength loss likely depending on loading and ground geometry  
 Zone B: Liquefaction and post-earthquake strength loss unlikely, check cyclic softening  
 Zone C: Cyclic liquefaction and strength loss possible depending on soil plasticity, brittleness/sensitivity, strain to peak undrained strength and ground geometry

Liquefaction analysis overall plots



Input parameters and analysis data

Analysis method:	B&I (2014)	Depth to GWT (erthq.):	2.40 m	Fill weight:	N/A
Fines correction method:	B&I (2014)	Average results interval:	3	Transition detect. applied:	Yes
Points to test:	Based on Ic value	Ic cut-off value:	2.60	K <sub>0</sub> applied:	Yes
Earthquake magnitude M <sub>w</sub> :	6.14	Unit weight calculation:	Based on SBT	Clay like behavior applied:	Sands only
Peak ground acceleration:	0.25	Use fill:	No	Limit depth applied:	Yes
Depth to water table (insitu):	2.40 m	Fill height:	N/A	Limit depth:	20.00 m

F.S. color scheme

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

LPI color scheme

Red	Very high risk
Orange	High risk
Yellow	Low risk

## LIQUEFACTION ANALYSIS REPORT

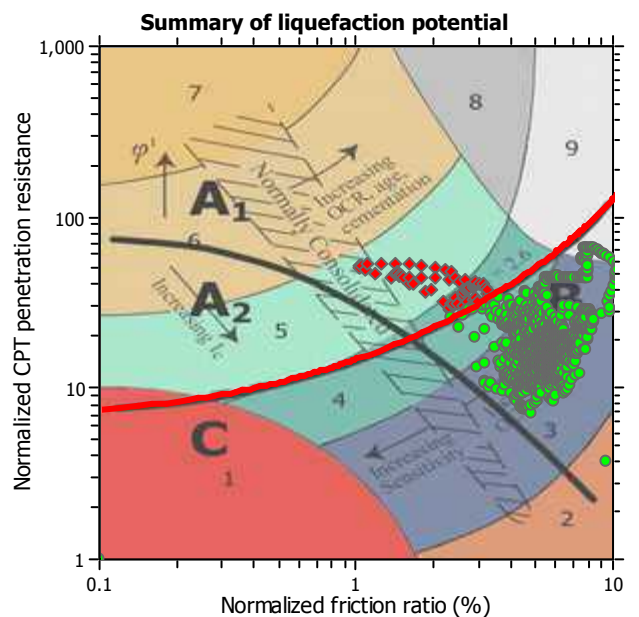
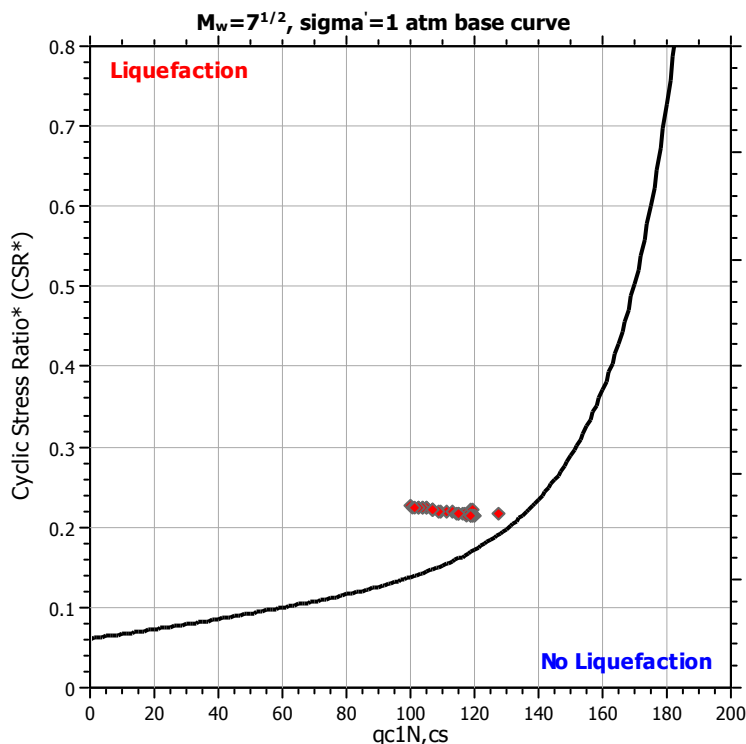
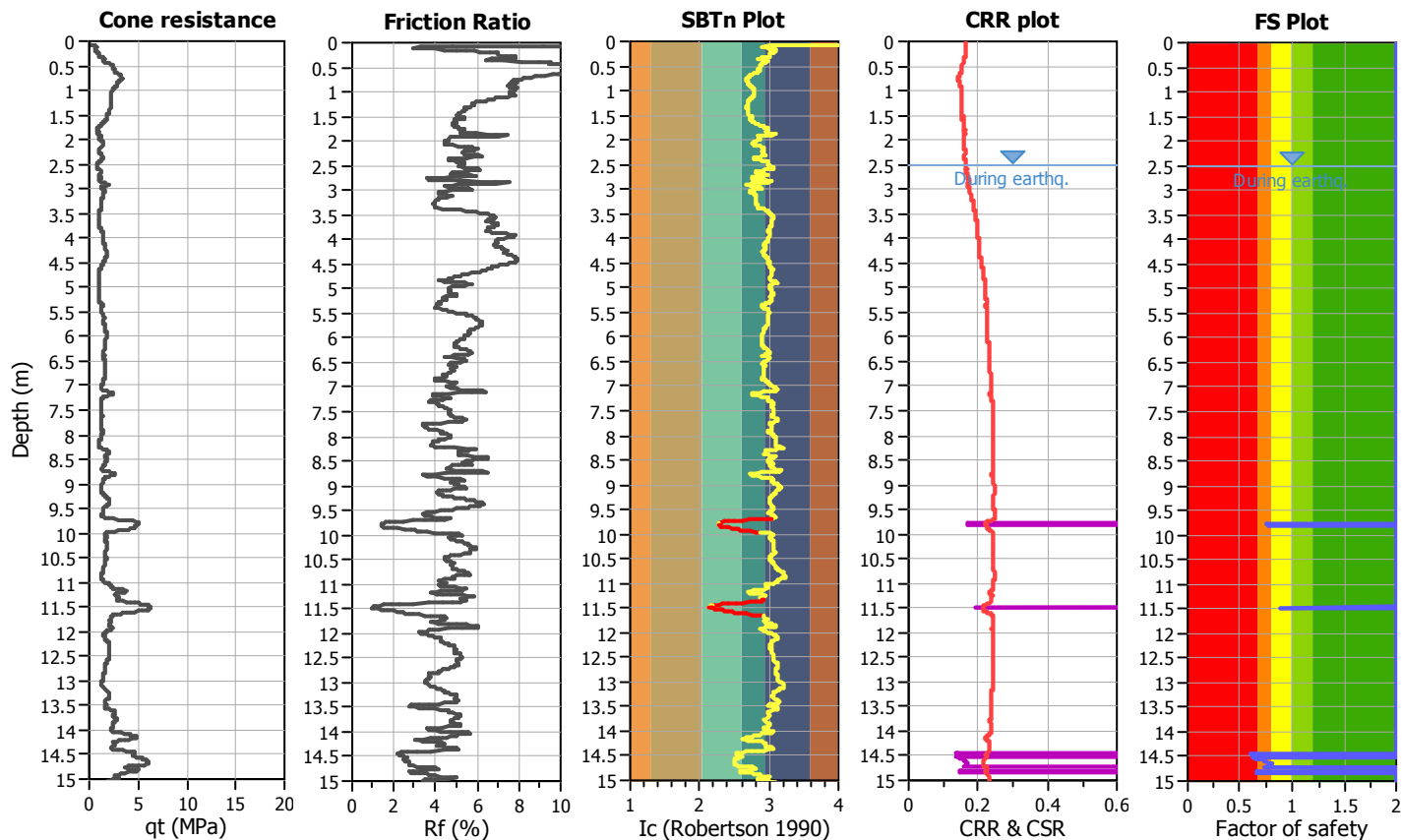
**Project title :** Lotto de Coubertin

**Location :** Castenaso (BO)

**CPT file :** CPTE10

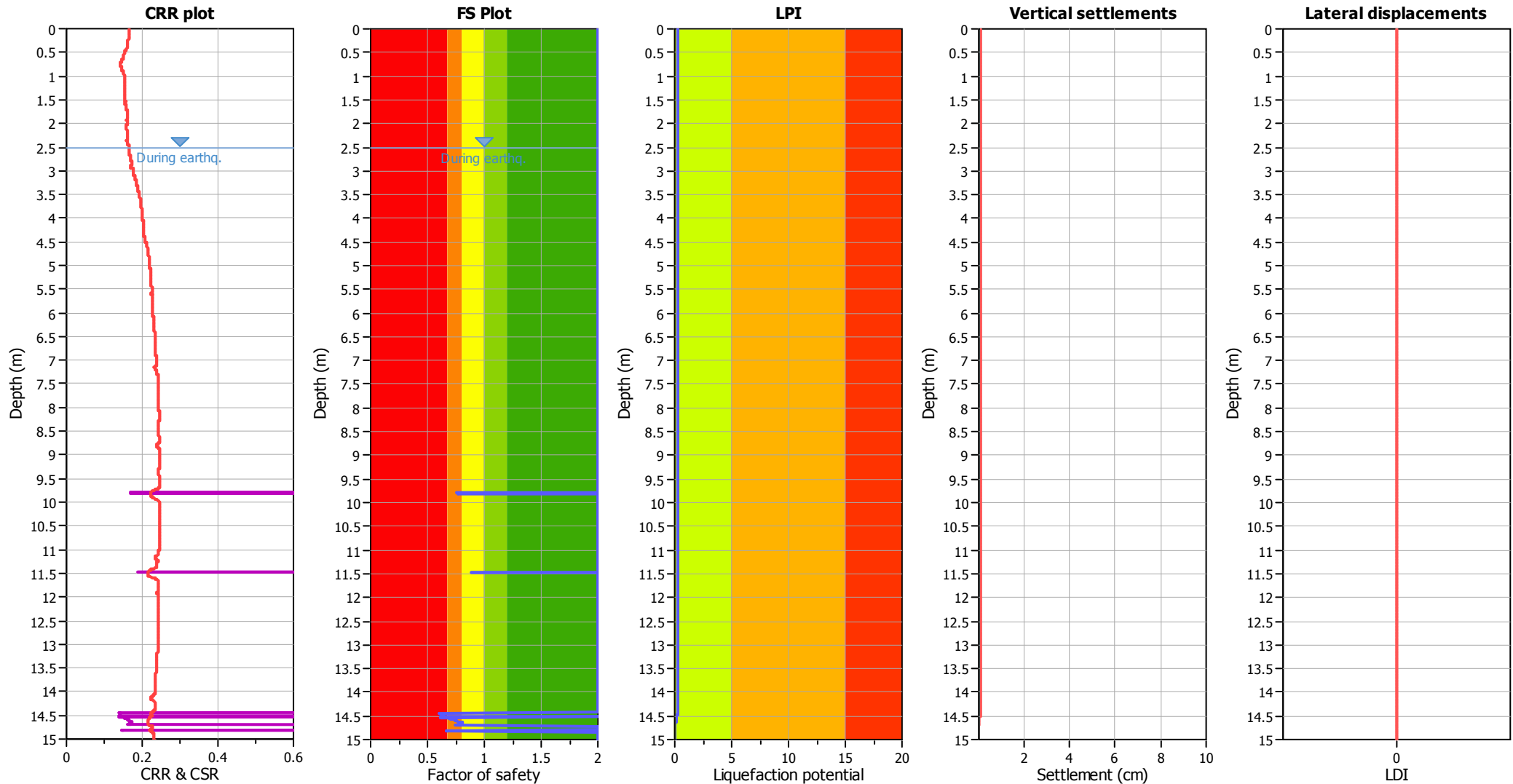
### Input parameters and analysis data

Analysis method:	B&I (2014)	G.W.T. (in-situ):	2.50 m	Use fill:	No	Clay like behavior applied:	Sands only
Fines correction method:	B&I (2014)	G.W.T. (earthq.):	2.50 m	Fill height:	N/A	Limit depth applied:	Yes
Points to test:	Based on Ic value	Average results interval:	3	Fill weight:	N/A	Limit depth:	20.00 m
Earthquake magnitude $M_w$ :	6.14	Ic cut-off value:	2.60	Trans. detect. applied:	Yes	MSF method:	Method
Peak ground acceleration:	0.25	Unit weight calculation:	Based on SBT	$K_\sigma$ applied:	Yes		



Zone A<sub>1</sub>: Cyclic liquefaction likely depending on size and duration of cyclic loading  
 Zone A<sub>2</sub>: Cyclic liquefaction and strength loss likely depending on loading and ground geometry  
 Zone B: Liquefaction and post-earthquake strength loss unlikely, check cyclic softening  
 Zone C: Cyclic liquefaction and strength loss possible depending on soil plasticity, brittleness/sensitivity, strain to peak undrained strength and ground geometry

Liquefaction analysis overall plots



Input parameters and analysis data

Analysis method:	B&I (2014)	Depth to GWT (earthq.):	2.50 m	Fill weight:	N/A
Fines correction method:	B&I (2014)	Average results interval:	3	Transition detect. applied:	Yes
Points to test:	Based on Ic value	Ic cut-off value:	2.60	K <sub>0</sub> applied:	Yes
Earthquake magnitude M <sub>w</sub> :	6.14	Unit weight calculation:	Based on SBT	Clay like behavior applied:	Sands only
Peak ground acceleration:	0.25	Use fill:	No	Limit depth applied:	Yes
Depth to water table (insitu):	2.50 m	Fill height:	N/A	Limit depth:	20.00 m

F.S. color scheme

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

LPI color scheme

Red	Very high risk
Orange	High risk
Yellow	Low risk



## LIQUEFACTION ANALYSIS REPORT

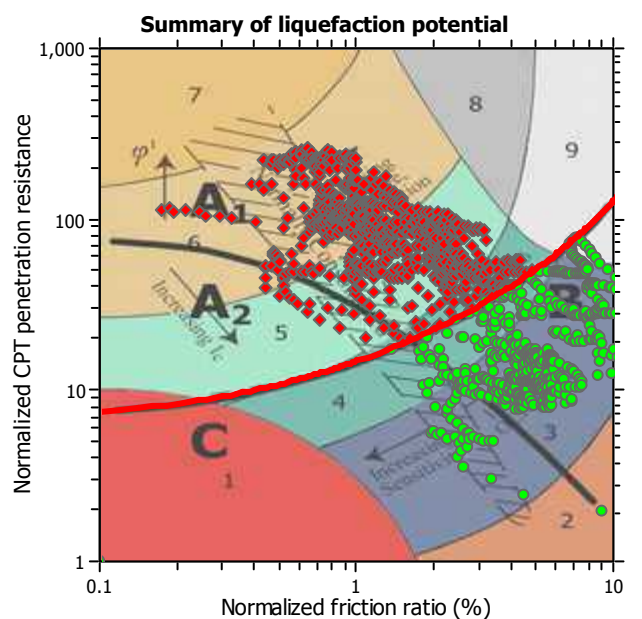
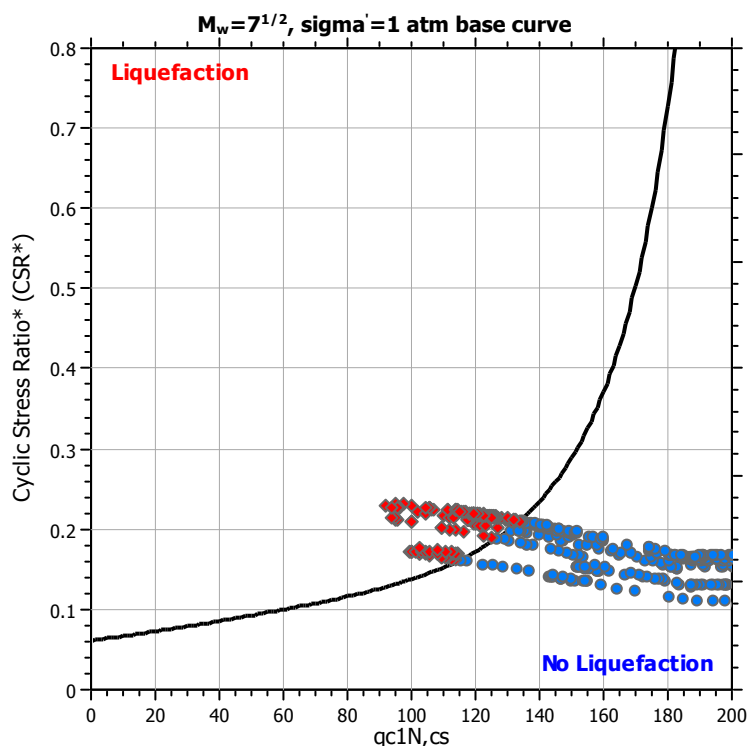
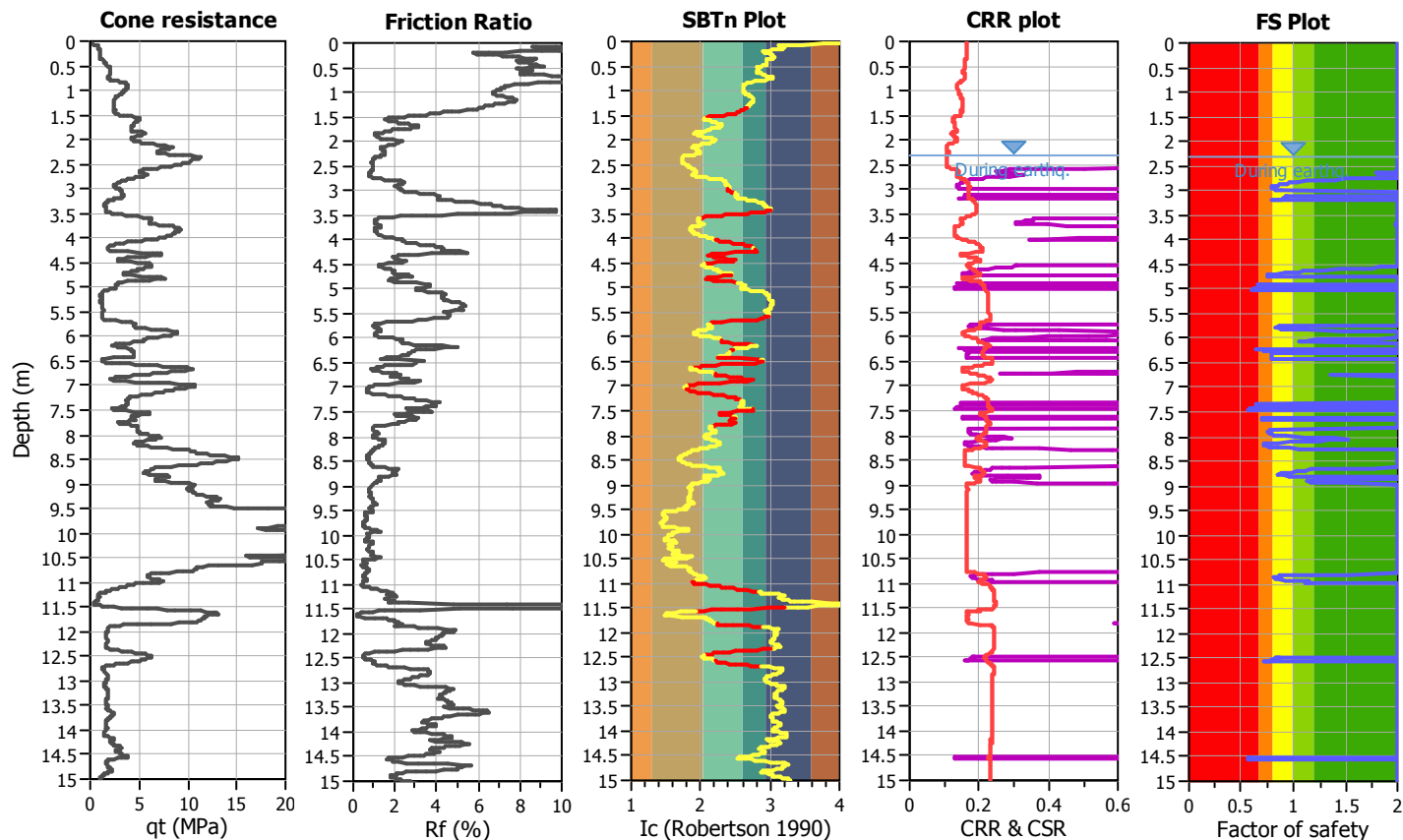
**Project title :** Lotto de Coubertin

**Location :** Castenaso (BO)

**CPT file :** CPTE11

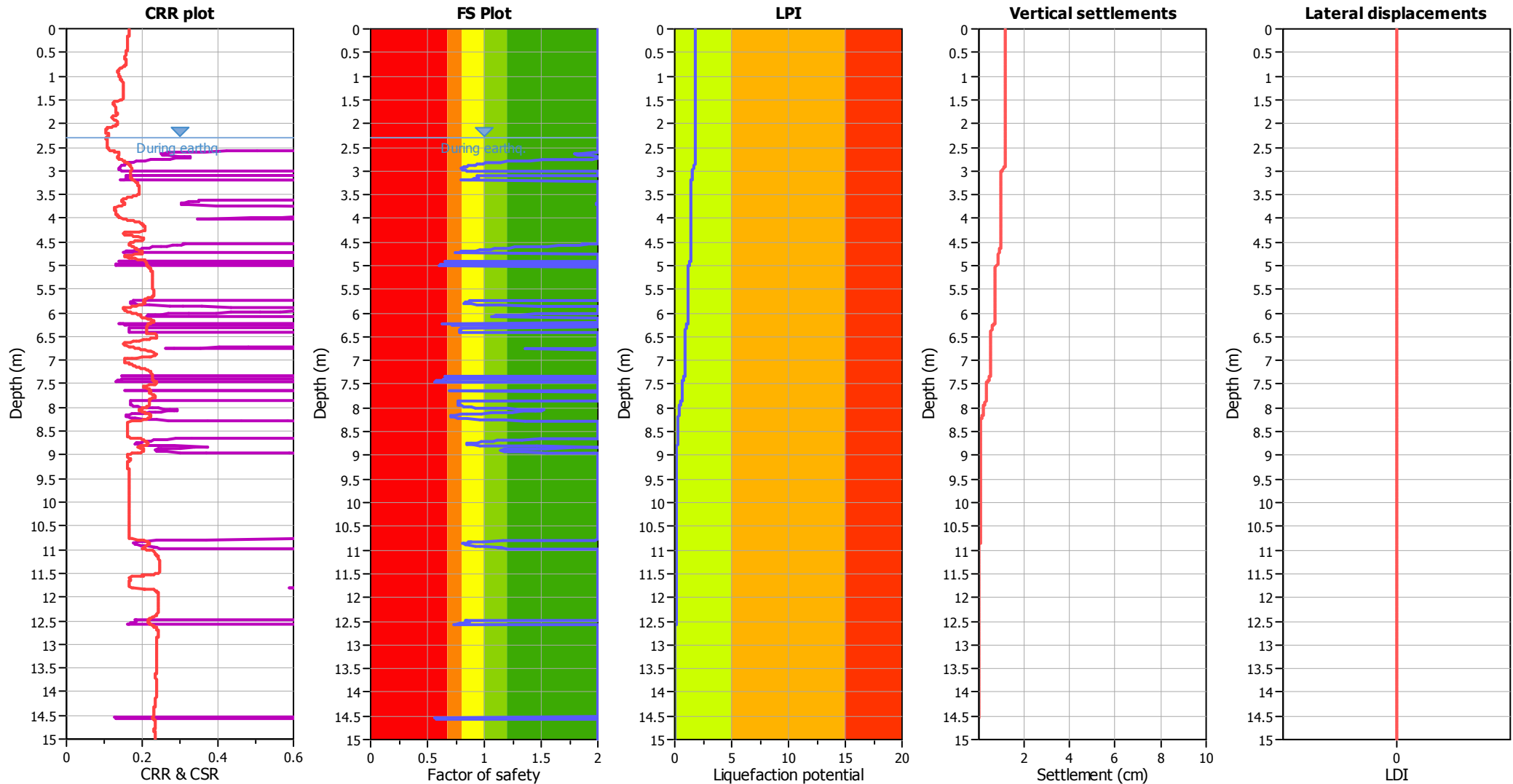
### Input parameters and analysis data

Analysis method:	B&I (2014)	G.W.T. (in-situ):	2.30 m	Use fill:	No	Clay like behavior applied:	Sands only
Fines correction method:	B&I (2014)	G.W.T. (earthq.):	2.30 m	Fill height:	N/A	Limit depth applied:	Yes
Points to test:	Based on Ic value	Average results interval:	3	Fill weight:	N/A	Limit depth:	20.00 m
Earthquake magnitude $M_w$ :	6.14	Ic cut-off value:	2.60	Trans. detect. applied:	Yes	MSF method:	Method
Peak ground acceleration:	0.25	Unit weight calculation:	Based on SBT	$K_\sigma$ applied:	Yes		



Zone A<sub>1</sub>: Cyclic liquefaction likely depending on size and duration of cyclic loading  
 Zone A<sub>2</sub>: Cyclic liquefaction and strength loss likely depending on loading and ground geometry  
 Zone B: Liquefaction and post-earthquake strength loss unlikely, check cyclic softening  
 Zone C: Cyclic liquefaction and strength loss possible depending on soil plasticity, brittleness/sensitivity, strain to peak undrained strength and ground geometry

Liquefaction analysis overall plots



Input parameters and analysis data

Analysis method: B&I (2014)  
Fines correction method: B&I (2014)  
Points to test: Based on  $I_c$  value  
Earthquake magnitude  $M_w$ : 6.14  
Peak ground acceleration: 0.25  
Depth to water table (insitu): 2.30 m

Depth to GWT (earthq.): 2.30 m  
Average results interval: 3  
 $I_c$  cut-off value: 2.60  
Unit weight calculation: Based on SBT  
Use fill: No  
Fill height: N/A

Fill weight: N/A  
Transition detect. applied: Yes  
 $K_\sigma$  applied: Yes  
Clay like behavior applied: Sands only  
Limit depth applied: Yes  
Limit depth: 20.00 m

F.S. color scheme

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

LPI color scheme

- Very high risk
- High risk
- Low risk

## LIQUEFACTION ANALYSIS REPORT

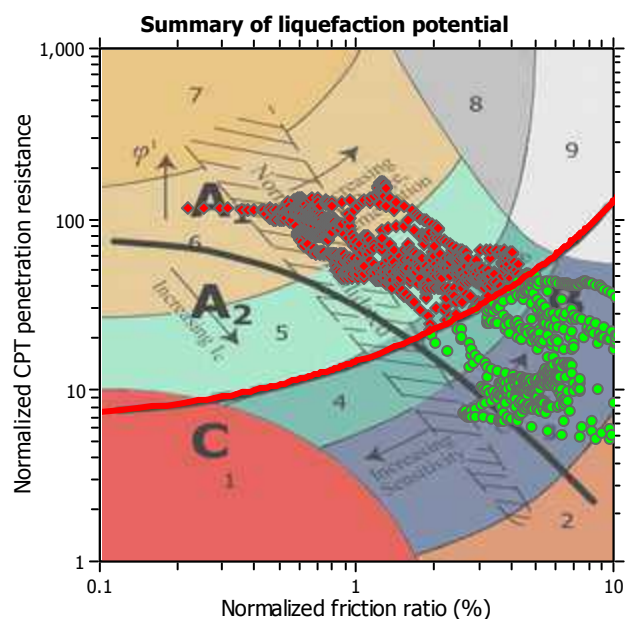
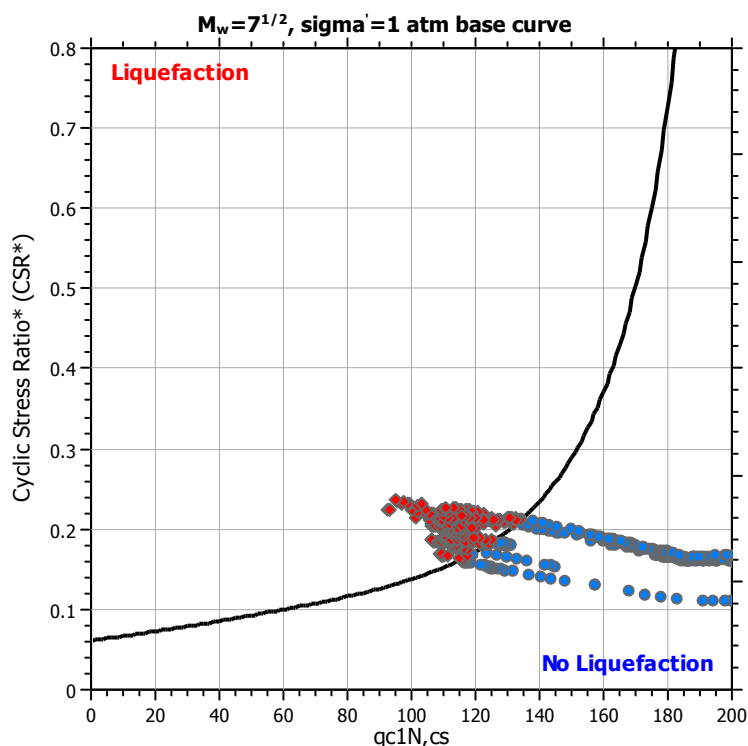
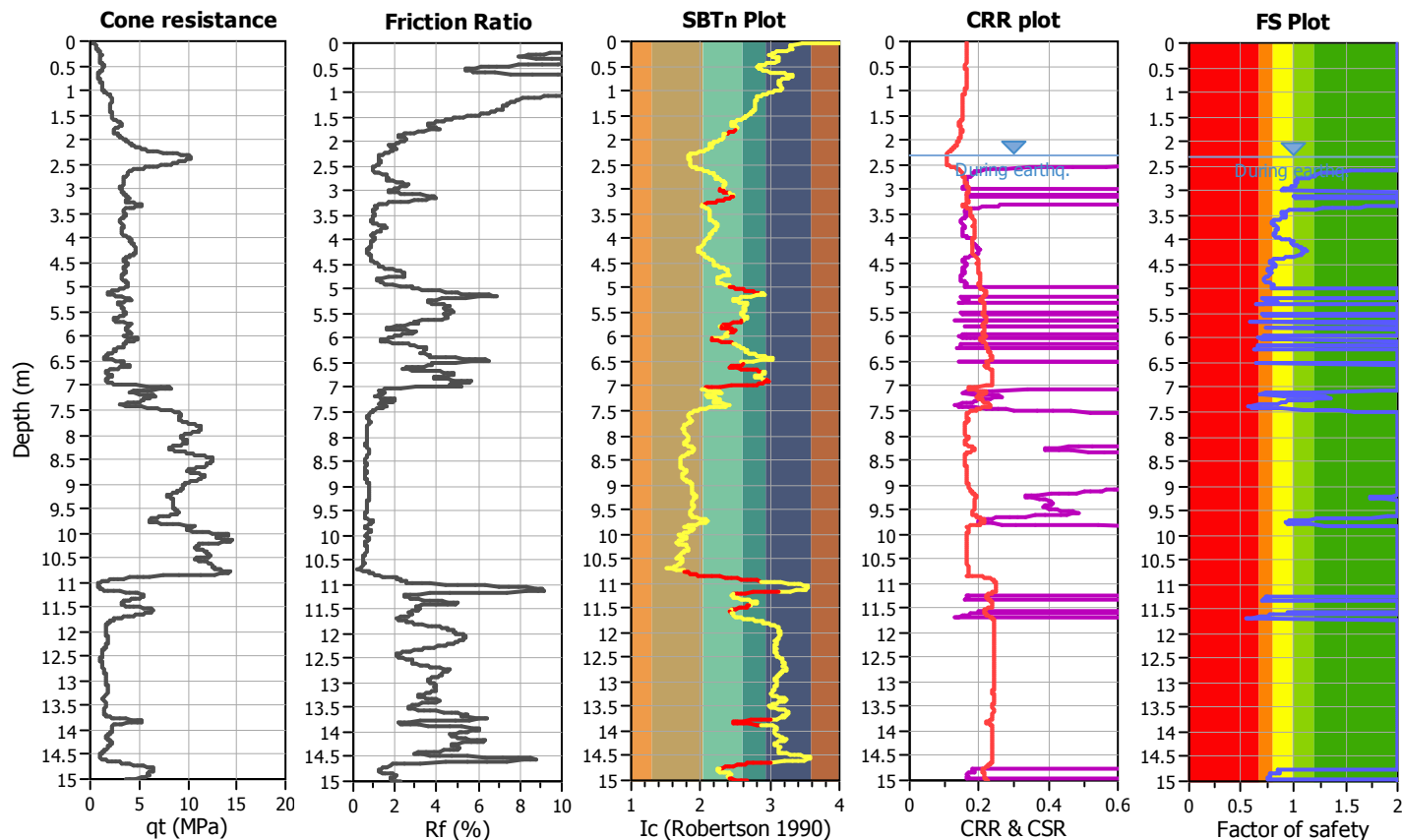
**Project title :** Lotto de Coubertin

**Location :** Castenaso (BO)

**CPT file :** CPTE12

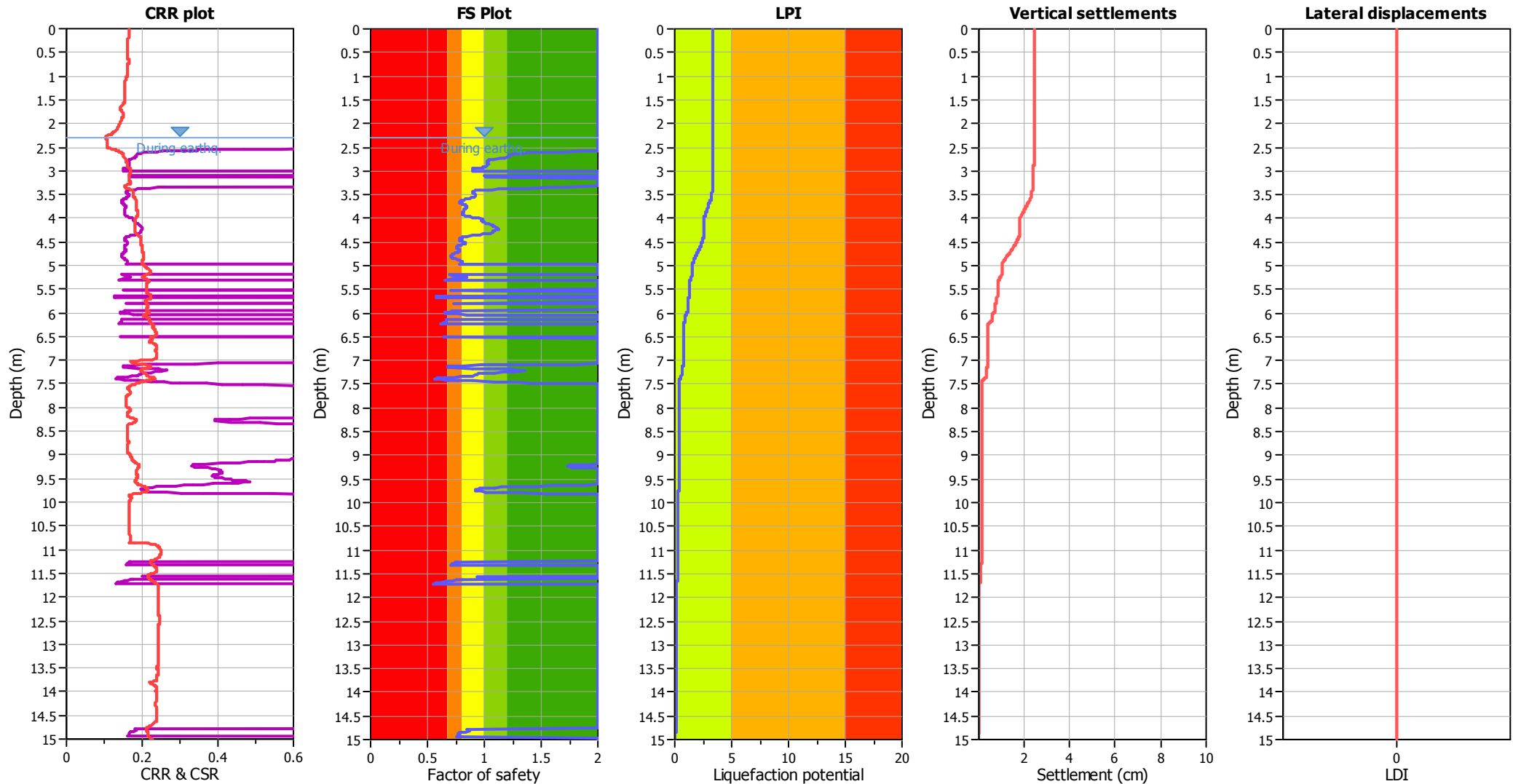
### Input parameters and analysis data

Analysis method:	B&I (2014)	G.W.T. (in-situ):	2.30 m	Use fill:	No	Clay like behavior applied:	Sands only
Fines correction method:	B&I (2014)	G.W.T. (earthq.):	2.30 m	Fill height:	N/A	Limit depth applied:	Yes
Points to test:	Based on Ic value	Average results interval:	3	Fill weight:	N/A	Limit depth:	20.00 m
Earthquake magnitude $M_w$ :	6.14	Ic cut-off value:	2.60	Trans. detect. applied:	Yes	MSF method:	Method
Peak ground acceleration:	0.25	Unit weight calculation:	Based on SBT	$K_g$ applied:	Yes		



Zone A<sub>1</sub>: Cyclic liquefaction likely depending on size and duration of cyclic loading  
 Zone A<sub>2</sub>: Cyclic liquefaction and strength loss likely depending on loading and ground geometry  
 Zone B: Liquefaction and post-earthquake strength loss unlikely, check cyclic softening  
 Zone C: Cyclic liquefaction and strength loss possible depending on soil plasticity, brittleness/sensitivity, strain to peak undrained strength and ground geometry

Liquefaction analysis overall plots



Input parameters and analysis data

Analysis method: B&I (2014)  
Fines correction method: B&I (2014)  
Points to test: Based on Ic value  
Earthquake magnitude  $M_w$ : 6.14  
Peak ground acceleration: 0.25  
Depth to water table (insitu): 2.30 m

Depth to GWT (erthq.): 2.30 m  
Average results interval: 3  
Ic cut-off value: 2.60  
Unit weight calculation: Based on SBT  
Use fill: No  
Fill height: N/A

Fill weight: N/A  
Transition detect. applied: Yes  
 $K_0$  applied: Yes  
Clay like behavior applied: Sands only  
Limit depth applied: Yes  
Limit depth: 20.00 m

F.S. color scheme

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

LPI color scheme

- Very high risk
- High risk
- Low risk

## LIQUEFACTION ANALYSIS REPORT

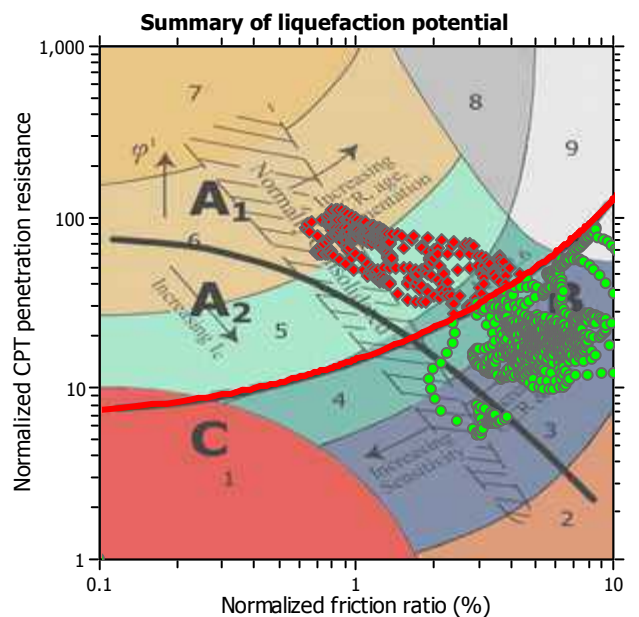
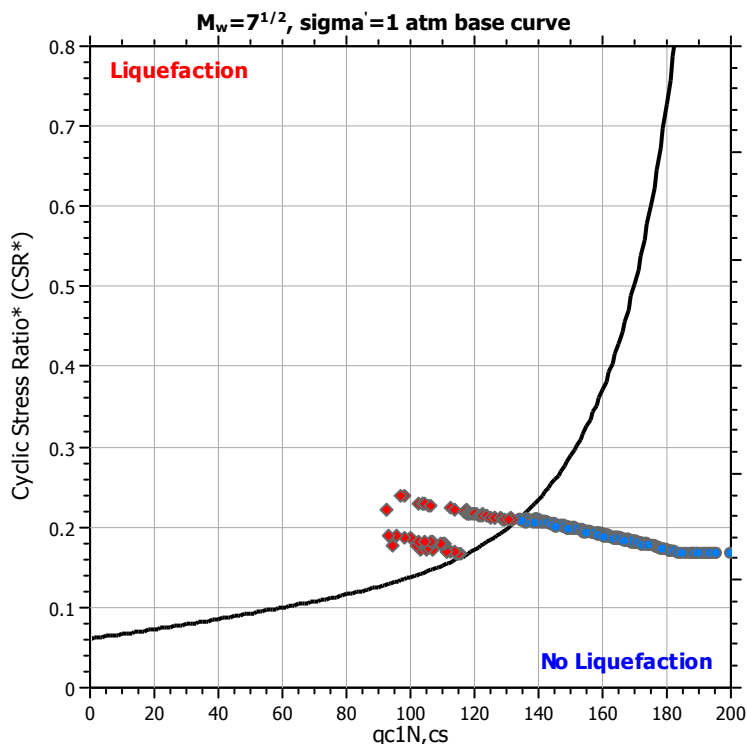
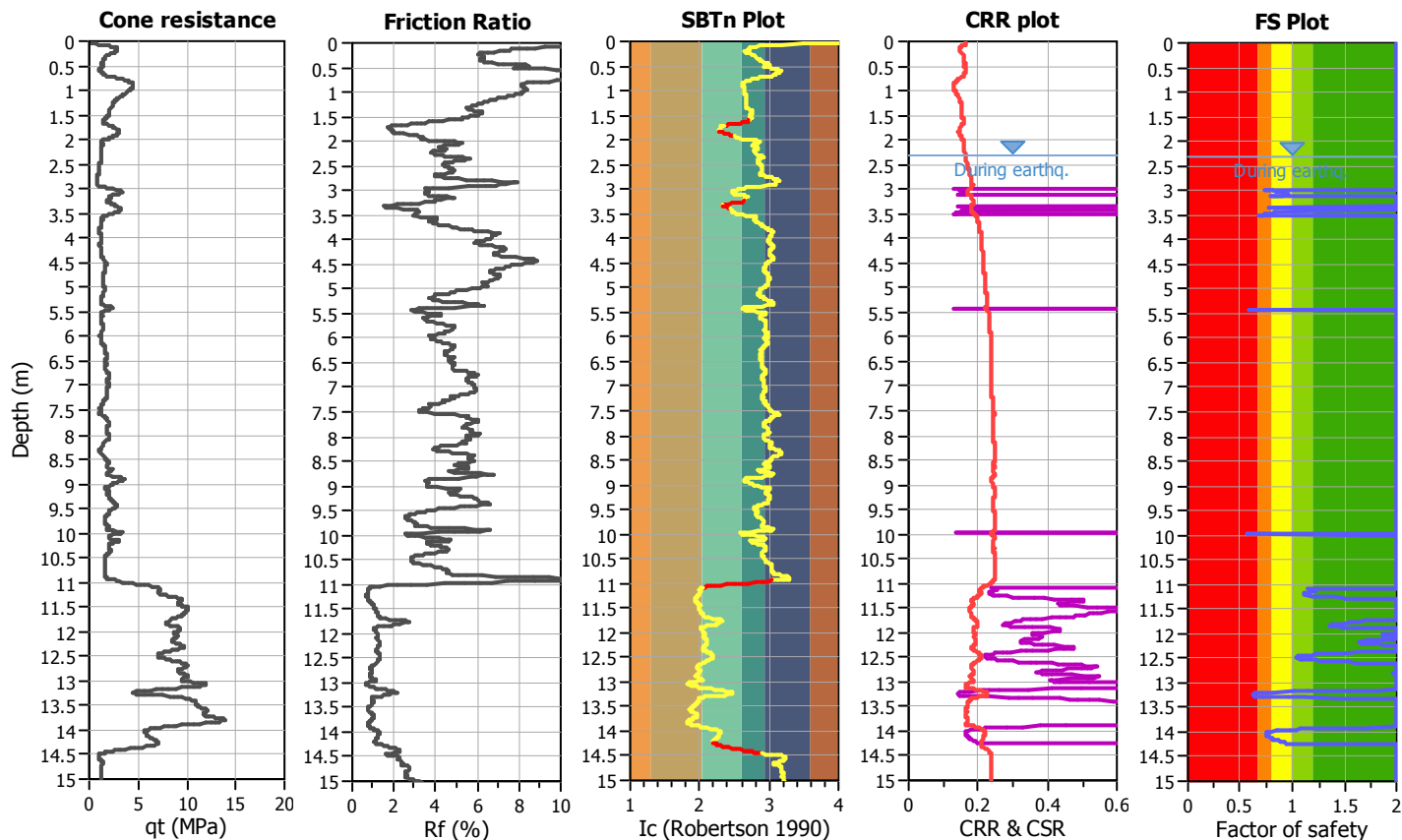
**Project title :** Lotto de Coubertin

**Location :** Castenaso (BO)

**CPT file :** CPTE13

### Input parameters and analysis data

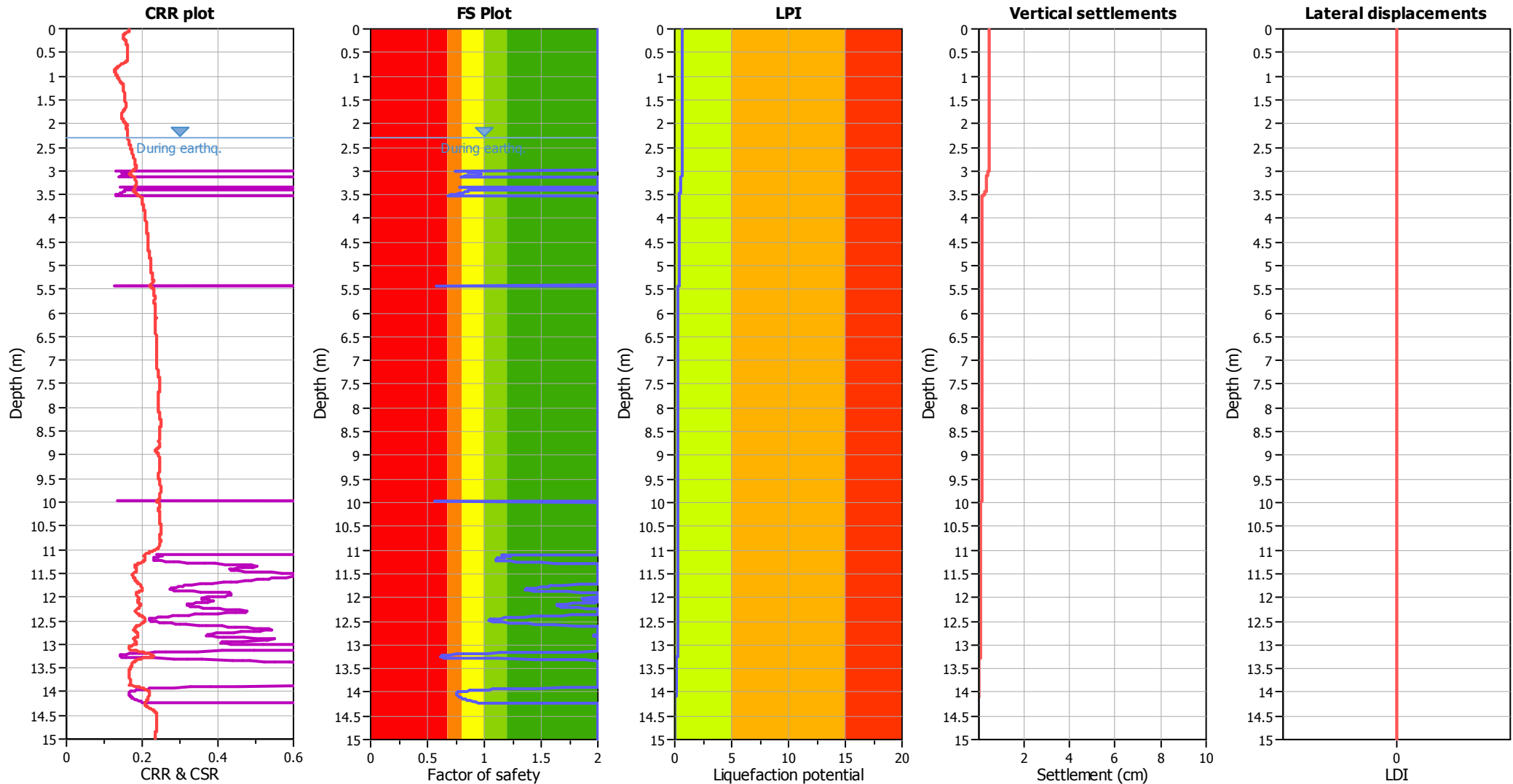
Analysis method:	B&I (2014)	G.W.T. (in-situ):	2.30 m	Use fill:	No	Clay like behavior applied:	Sands only
Fines correction method:	B&I (2014)	G.W.T. (earthq.):	2.30 m	Fill height:	N/A	Limit depth applied:	Yes
Points to test:	Based on Ic value	Average results interval:	3	Fill weight:	N/A	Limit depth:	20.00 m
Earthquake magnitude $M_w$ :	6.14	Ic cut-off value:	2.60	Trans. detect. applied:	Yes	MSF method:	Method
Peak ground acceleration:	0.25	Unit weight calculation:	Based on SBT	$K_g$ applied:	Yes		



Zone A<sub>1</sub>: Cyclic liquefaction likely depending on size and duration of cyclic loading  
 Zone A<sub>2</sub>: Cyclic liquefaction and strength loss likely depending on loading and ground geometry  
 Zone B: Liquefaction and post-earthquake strength loss unlikely, check cyclic softening  
 Zone C: Cyclic liquefaction and strength loss possible depending on soil plasticity, brittleness/sensitivity, strain to peak undrained strength and ground geometry



Liquefaction analysis overall plots



Input parameters and analysis data

Analysis method:	B&I (2014)	Depth to GWT (earthq.):	2.30 m	Fill weight:	N/A
Fines correction method:	B&I (2014)	Average results interval:	3	Transition detect. applied:	Yes
Points to test:	Based on Ic value	Ic cut-off value:	2.60	K <sub>0</sub> applied:	Yes
Earthquake magnitude M <sub>w</sub> :	6.14	Unit weight calculation:	Based on SBT	Clay like behavior applied:	Sands only
Peak ground acceleration:	0.25	Use fill:	No	Limit depth applied:	Yes
Depth to water table (insitu):	2.30 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 liq. are equally likely
- Unlike to liquefy
- Almost certain it will not liquefy

LPI color scheme

- Very high risk
- High risk
- Low risk

## LIQUEFACTION ANALYSIS REPORT

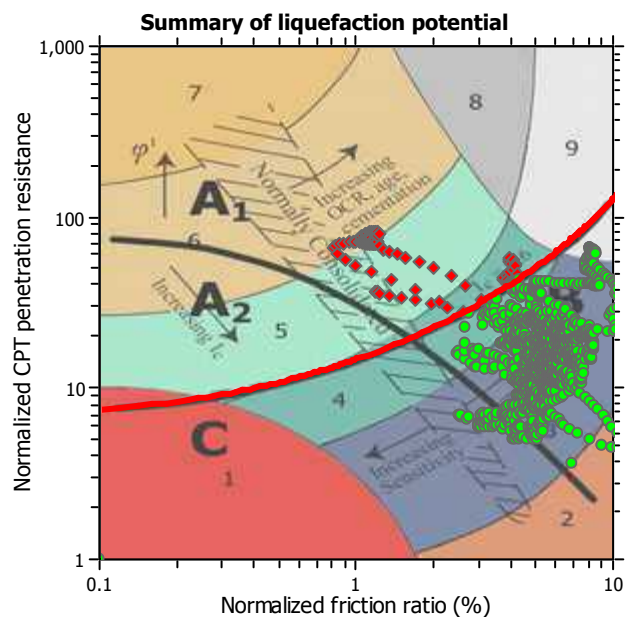
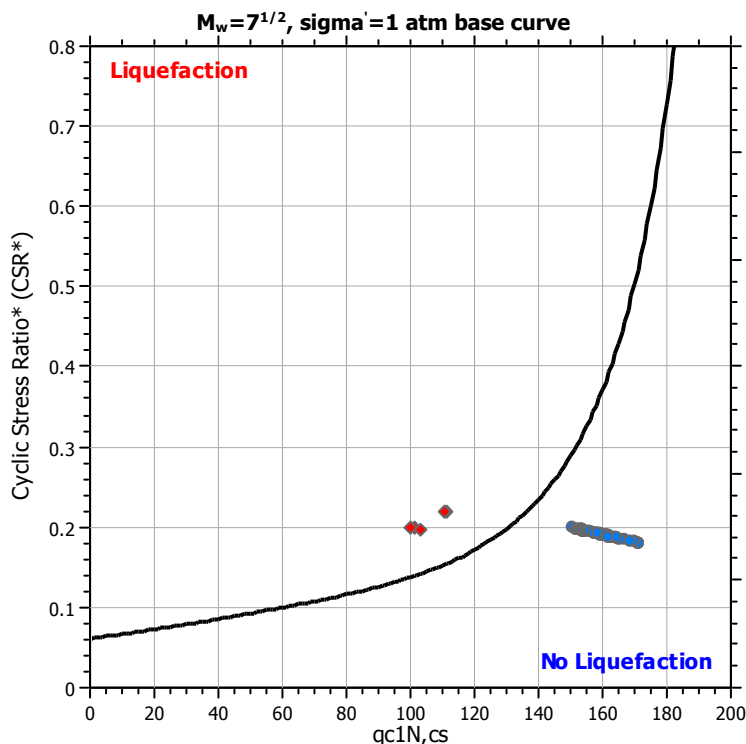
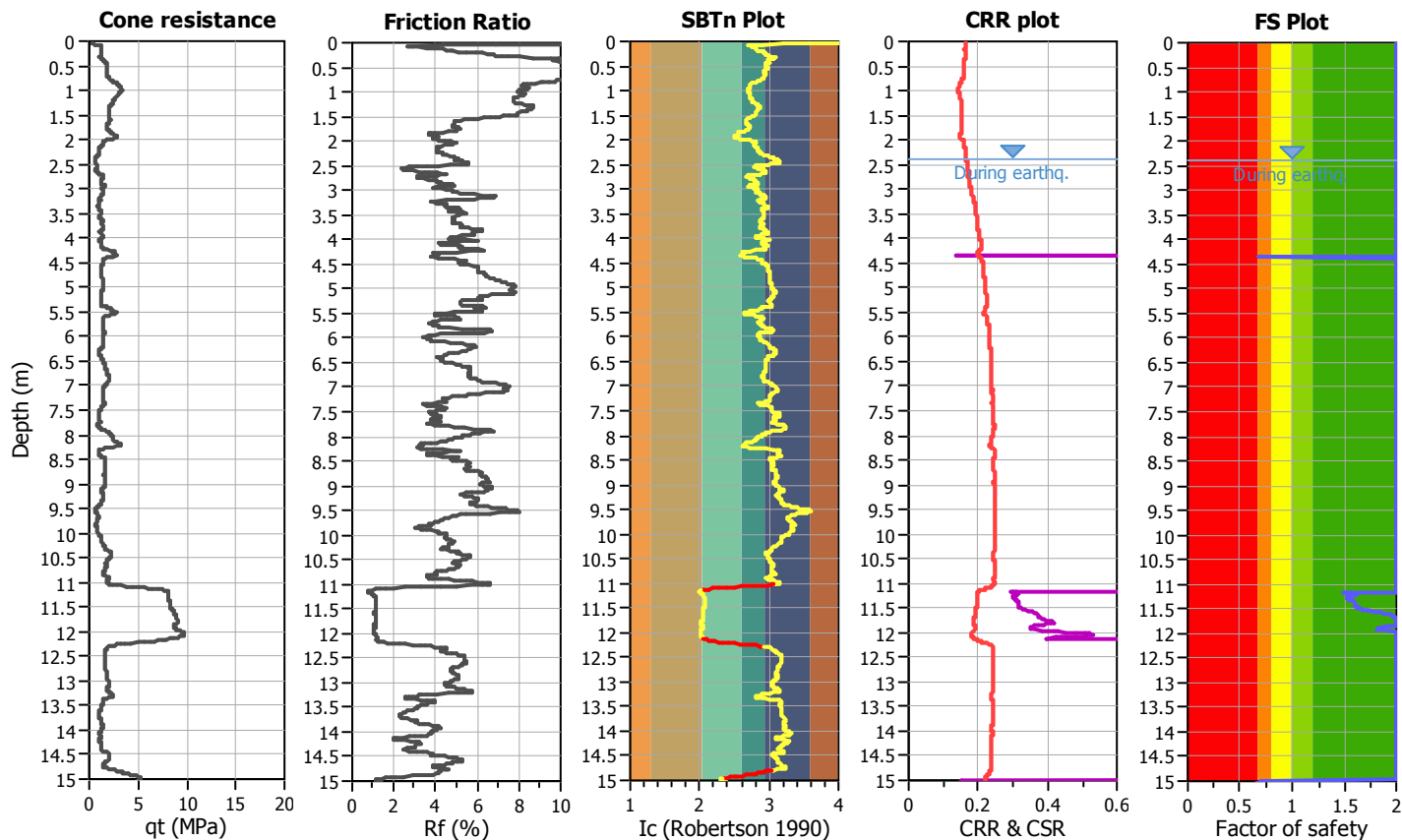
**Project title :** Lotto de Coubertin

**Location :** Castenaso (BO)

**CPT file :** CPTE14

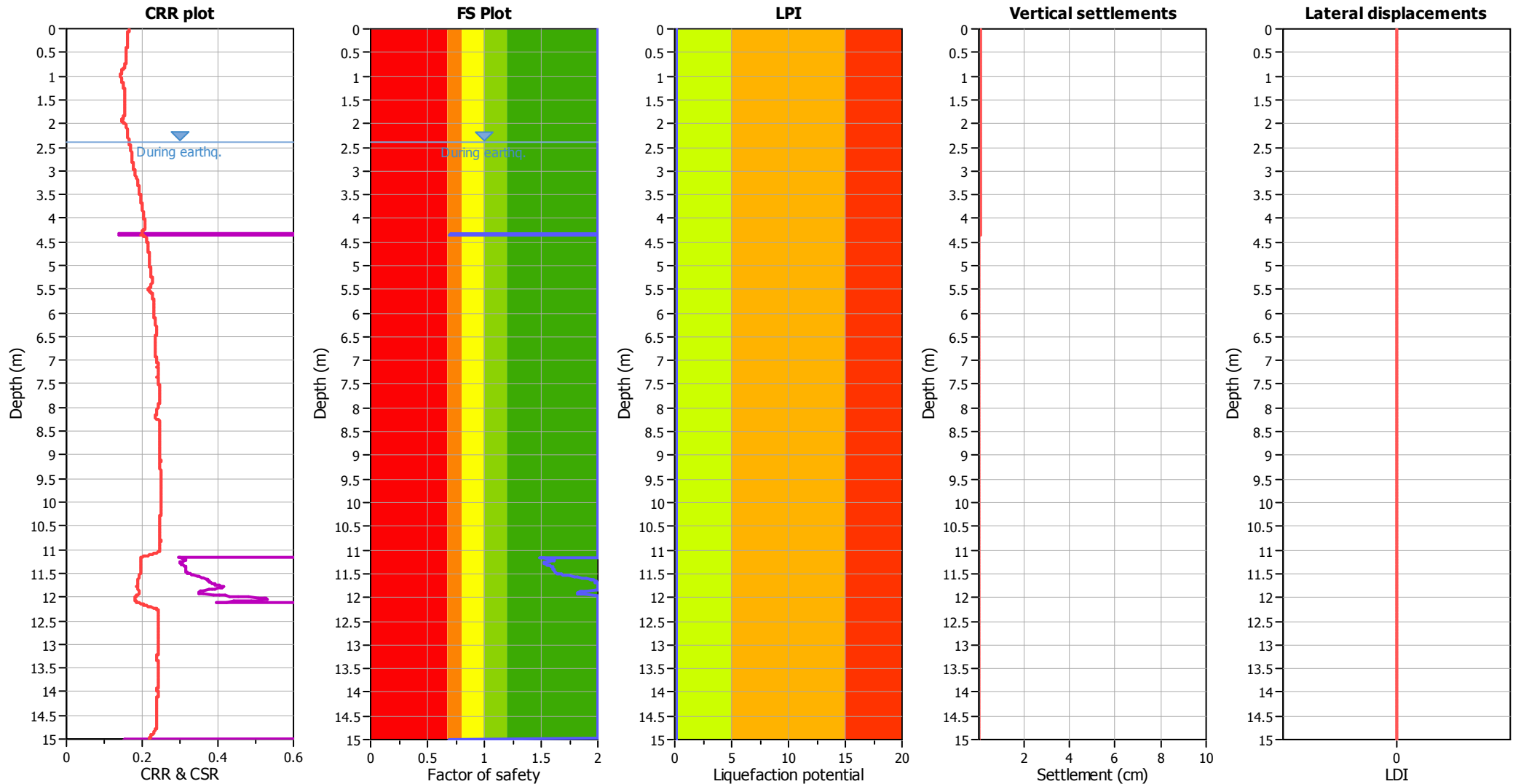
### Input parameters and analysis data

Analysis method:	B&I (2014)	G.W.T. (in-situ):	2.40 m	Use fill:	No	Clay like behavior applied:	Sands only
Fines correction method:	B&I (2014)	G.W.T. (earthq.):	2.40 m	Fill height:	N/A	Limit depth applied:	Yes
Points to test:	Based on Ic value	Average results interval:	3	Fill weight:	N/A	Limit depth:	20.00 m
Earthquake magnitude $M_w$ :	6.14	Ic cut-off value:	2.60	Trans. detect. applied:	Yes	MSF method:	Method
Peak ground acceleration:	0.25	Unit weight calculation:	Based on SBT	$K_g$ applied:	Yes		



Zone A<sub>1</sub>: Cyclic liquefaction likely depending on size and duration of cyclic loading  
 Zone A<sub>2</sub>: Cyclic liquefaction and strength loss likely depending on loading and ground geometry  
 Zone B: Liquefaction and post-earthquake strength loss unlikely, check cyclic softening  
 Zone C: Cyclic liquefaction and strength loss possible depending on soil plasticity, brittleness/sensitivity, strain to peak undrained strength and ground geometry

Liquefaction analysis overall plots



Input parameters and analysis data

Analysis method:	B&I (2014)	Depth to GWT (earthq.):	2.40 m	Fill weight:	N/A
Fines correction method:	B&I (2014)	Average results interval:	3	Transition detect. applied:	Yes
Points to test:	Based on Ic value	Ic cut-off value:	2.60	K <sub>0</sub> applied:	Yes
Earthquake magnitude M <sub>w</sub> :	6.14	Unit weight calculation:	Based on SBT	Clay like behavior applied:	Sands only
Peak ground acceleration:	0.25	Use fill:	No	Limit depth applied:	Yes
Depth to water table (insitu):	2.40 m	Fill height:	N/A	Limit depth:	20.00 m

F.S. color scheme

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

LPI color scheme

Red	Very high risk
Orange	High risk
Yellow	Low risk

## LIQUEFACTION ANALYSIS REPORT

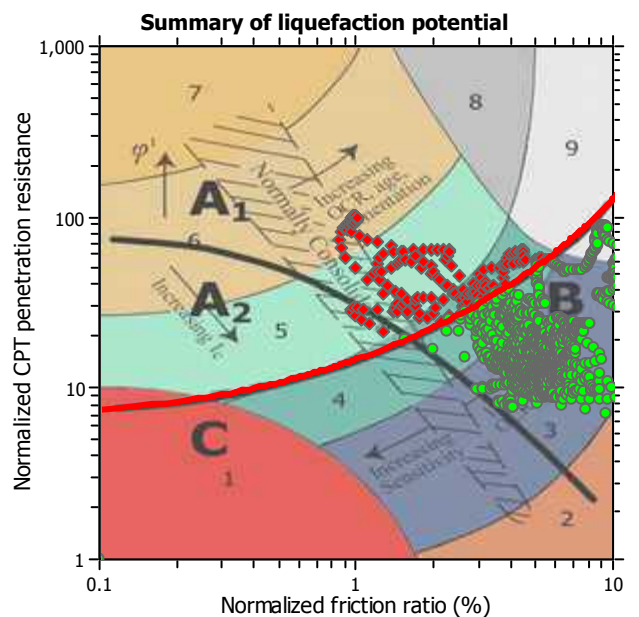
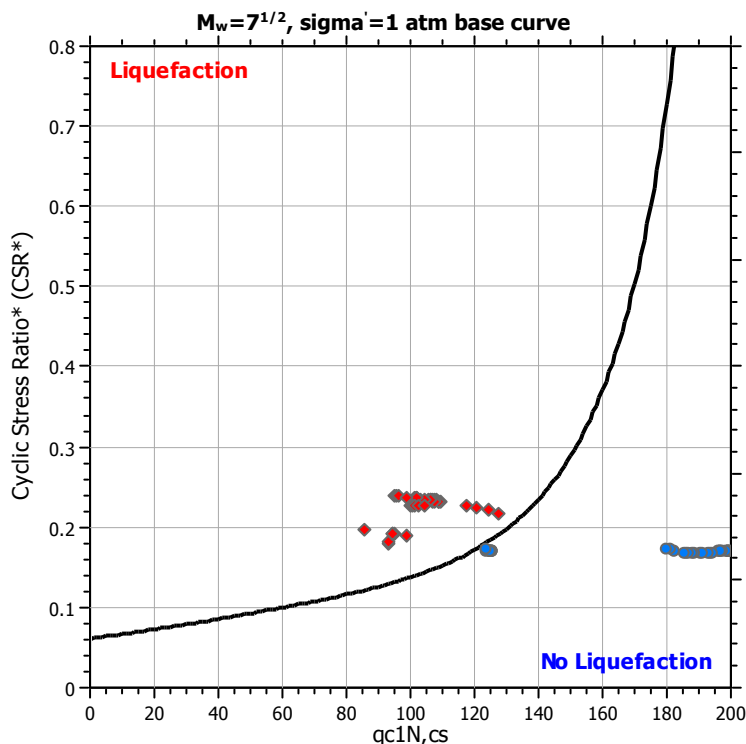
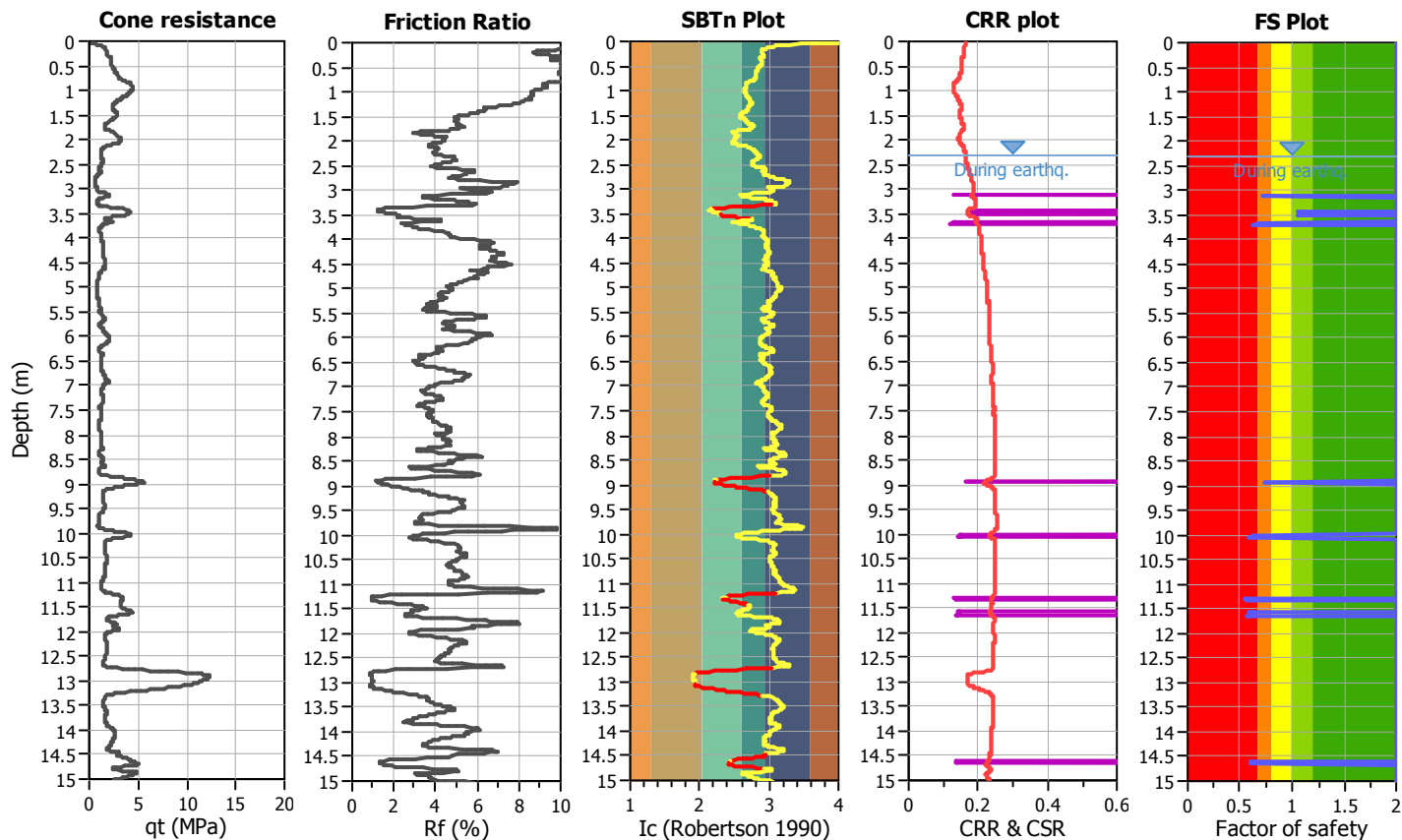
**Project title :** Lotto de Coubertin

**Location :** Castenaso (BO)

**CPT file :** CPTE15

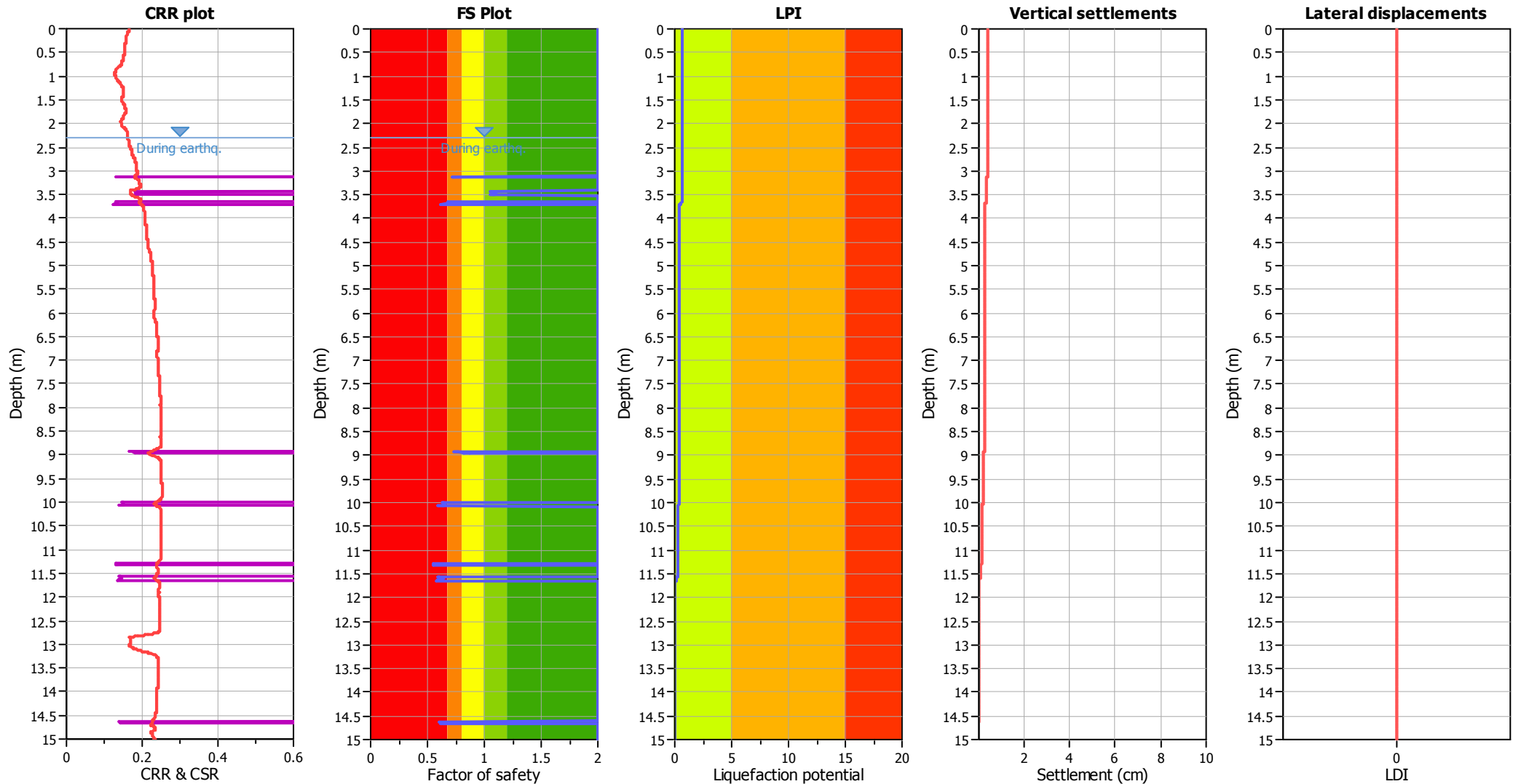
### Input parameters and analysis data

Analysis method:	B&I (2014)	G.W.T. (in-situ):	2.30 m	Use fill:	No	Clay like behavior applied:	Sands only
Fines correction method:	B&I (2014)	G.W.T. (earthq.):	2.30 m	Fill height:	N/A	Limit depth applied:	Yes
Points to test:	Based on Ic value	Average results interval:	3	Fill weight:	N/A	Limit depth:	20.00 m
Earthquake magnitude $M_w$ :	6.14	Ic cut-off value:	2.60	Trans. detect. applied:	Yes	MSF method:	Method
Peak ground acceleration:	0.25	Unit weight calculation:	Based on SBT	$K_0$ applied:	Yes		



Zone A<sub>1</sub>: Cyclic liquefaction likely depending on size and duration of cyclic loading  
 Zone A<sub>2</sub>: Cyclic liquefaction and strength loss likely depending on loading and ground geometry  
 Zone B: Liquefaction and post-earthquake strength loss unlikely, check cyclic softening  
 Zone C: Cyclic liquefaction and strength loss possible depending on soil plasticity, brittleness/sensitivity, strain to peak undrained strength and ground geometry

Liquefaction analysis overall plots



Input parameters and analysis data

Analysis method: B&I (2014)  
Fines correction method: B&I (2014)  
Points to test: Based on Ic value  
Earthquake magnitude  $M_w$ : 6.14  
Peak ground acceleration: 0.25  
Depth to water table (insitu): 2.30 m

Depth to GWT (earthq.): 2.30 m  
Average results interval: 3  
Ic cut-off value: 2.60  
Unit weight calculation: Based on SBT  
Use fill: No  
Fill height: N/A

Fill weight: N/A  
Transition detect. applied: Yes  
 $K_\sigma$  applied: Yes  
Clay like behavior applied: Sands only  
Limit depth applied: Yes  
Limit depth: 20.00 m

F.S. color scheme

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

LPI color scheme

- Very high risk
- High risk
- Low risk



## LIQUEFACTION ANALYSIS REPORT

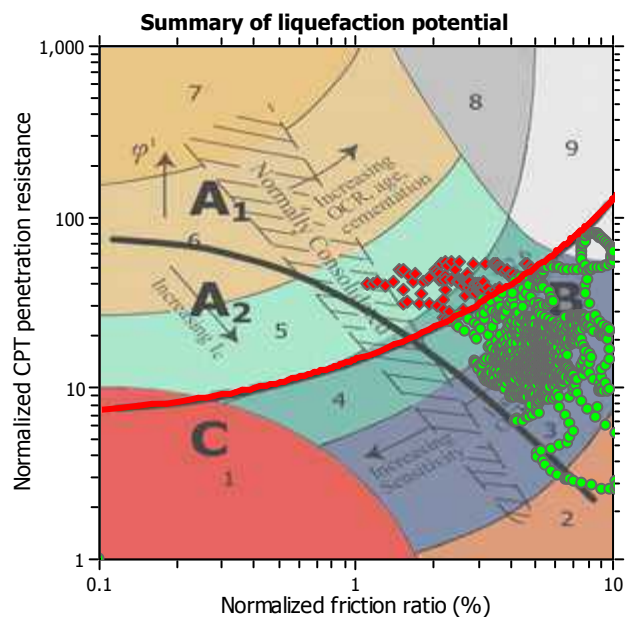
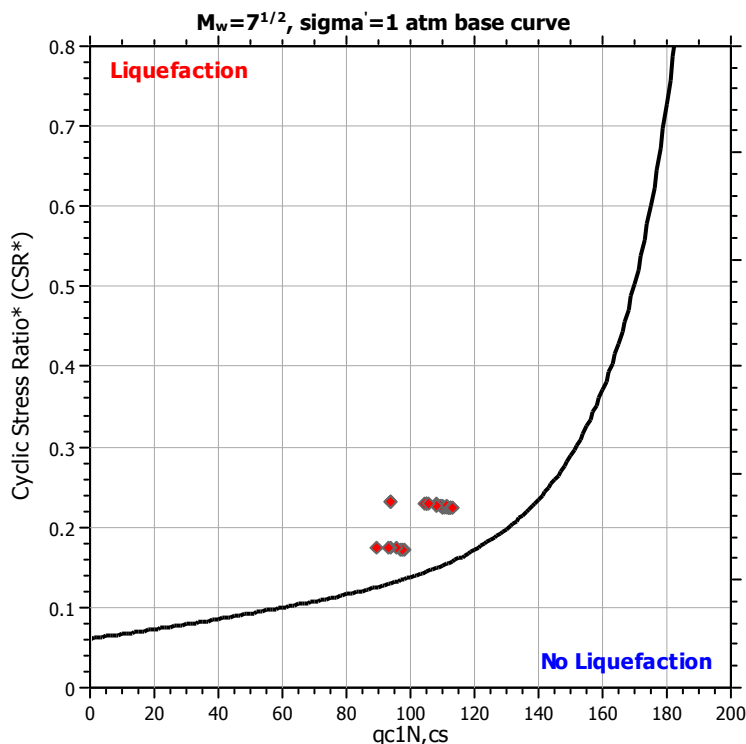
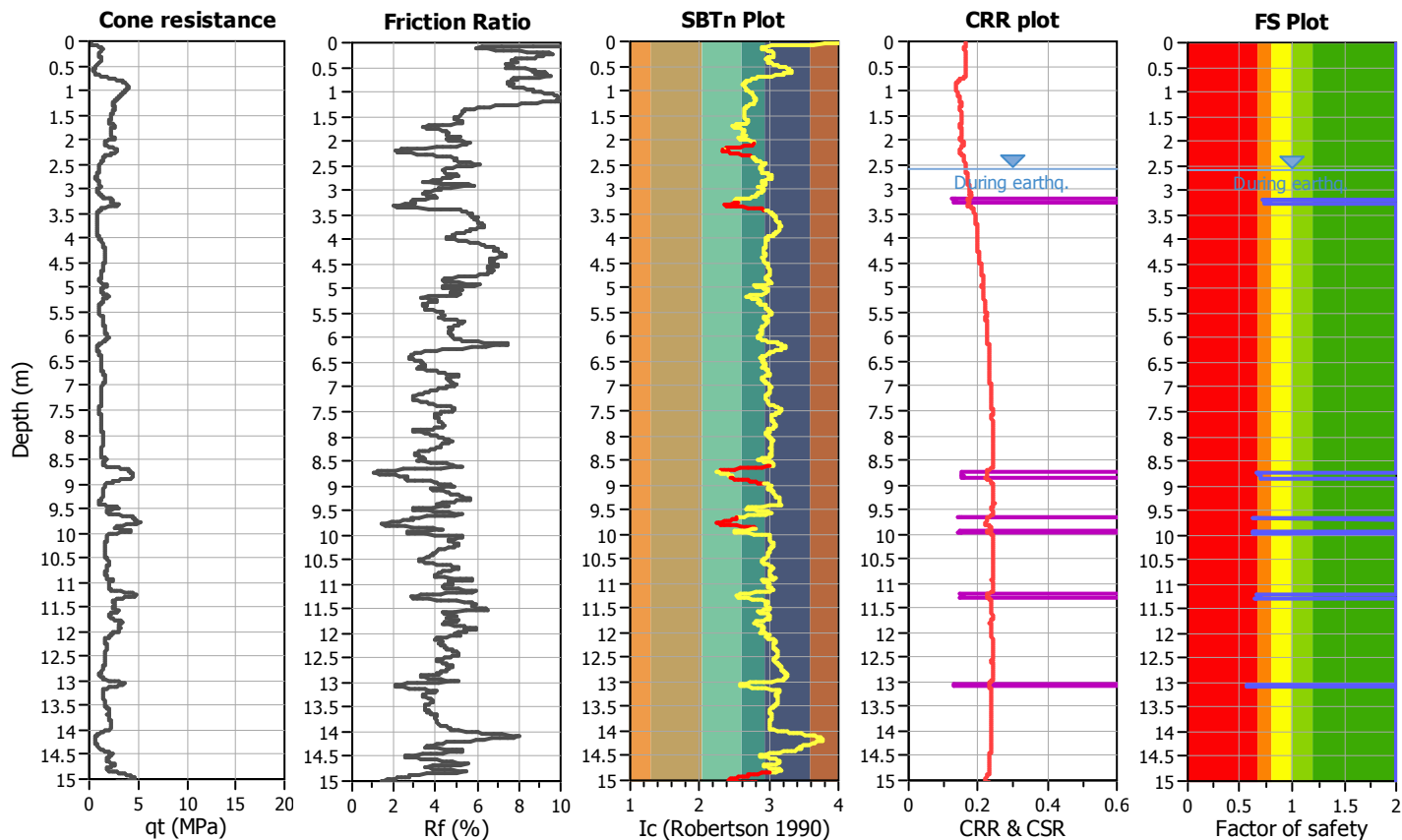
**Project title :** Lotto de Coubertin

**Location :** Castenaso (BO)

**CPT file :** CPTE16

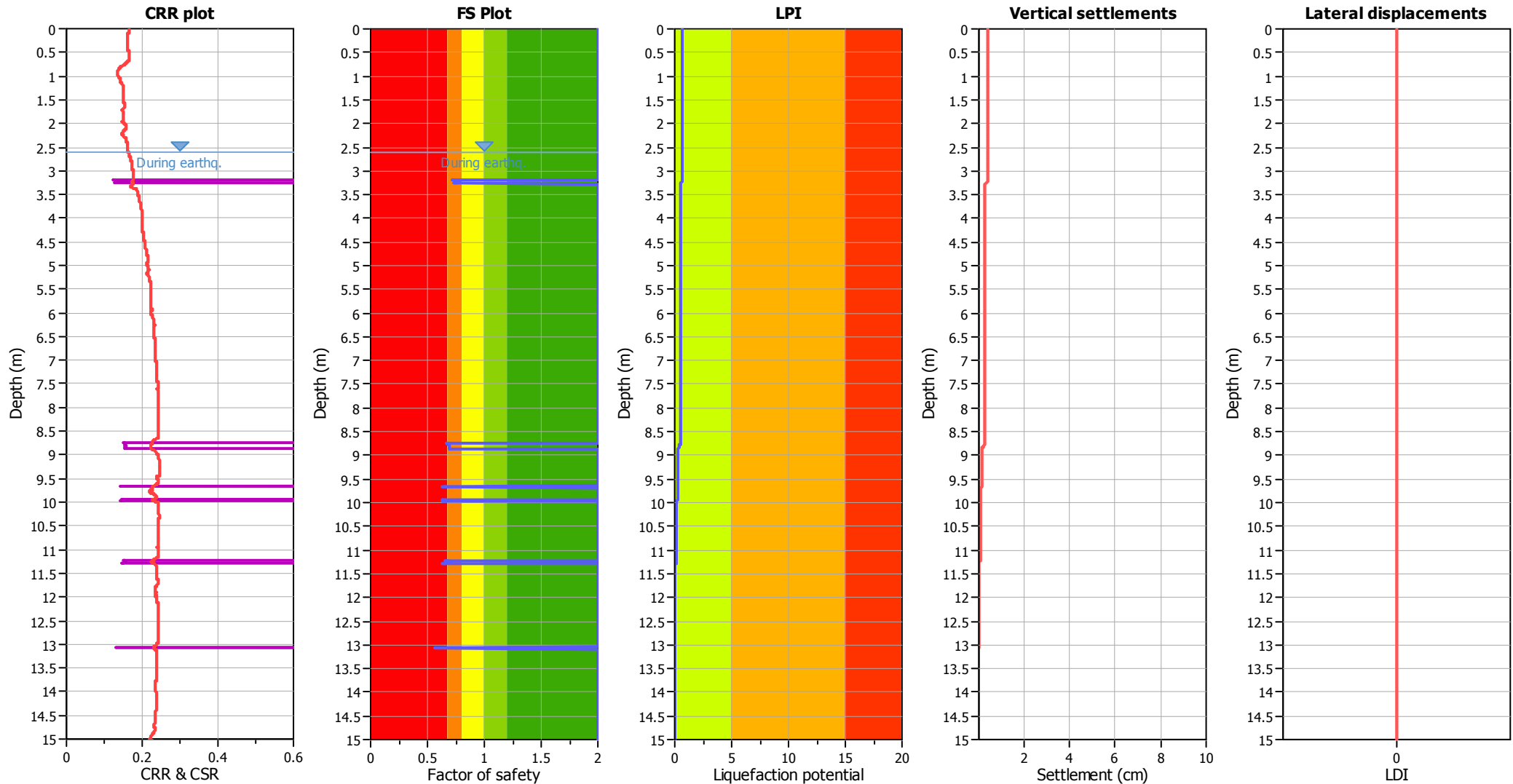
### Input parameters and analysis data

Analysis method:	B&I (2014)	G.W.T. (in-situ):	2.60 m	Use fill:	No	Clay like behavior applied:	Sands only
Fines correction method:	B&I (2014)	G.W.T. (earthq.):	2.60 m	Fill height:	N/A	Limit depth applied:	Yes
Points to test:	Based on Ic value	Average results interval:	3	Fill weight:	N/A	Limit depth:	20.00 m
Earthquake magnitude $M_w$ :	6.14	Ic cut-off value:	2.60	Trans. detect. applied:	Yes	MSF method:	Method
Peak ground acceleration:	0.25	Unit weight calculation:	Based on SBT	$K_\sigma$ applied:	Yes		



Zone A<sub>1</sub>: Cyclic liquefaction likely depending on size and duration of cyclic loading  
 Zone A<sub>2</sub>: Cyclic liquefaction and strength loss likely depending on loading and ground geometry  
 Zone B: Liquefaction and post-earthquake strength loss unlikely, check cyclic softening  
 Zone C: Cyclic liquefaction and strength loss possible depending on soil plasticity, brittleness/sensitivity, strain to peak undrained strength and ground geometry

Liquefaction analysis overall plots



Input parameters and analysis data

Analysis method: B&I (2014)  
Fines correction method: B&I (2014)  
Points to test: Based on Ic value  
Earthquake magnitude  $M_w$ : 6.14  
Peak ground acceleration: 0.25  
Depth to water table (insitu): 2.60 m

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

Fill weight: N/A  
Transition detect. applied: Yes  
 $K_0$  applied: Yes  
Clay like behavior applied: Sands only  
Limit depth applied: Yes  
Limit depth: 20.00 m

F.S. color scheme

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

LPI color scheme

- Very high risk
- High risk
- Low risk