



Autorità di Sistema Portuale del Mar Tirreno Settentrionale  
Scali Rosciano, 6 - 57123 Livorno, Italia

R.U.P. ing. Enrico Pribaz  
D.E.C. ing. Ilaria Lotti

R.T.P.



30035 Mirano (VE)  
Viale Belvedere, 8/10  
www.fm-ingegneria.com

Tel. +39 041 5785 711  
Fax +39 041 4355 933  
portolivorno@fm-ingegneria.com



P.O. Box 1132  
3800 BC Amersfoort  
The Netherlands  
www.royalhaskoningdhv.com

Tel. +44 (0)207 222 2115  
Fax +44 (0)207 222 2659  
info@rhdhv.com



35027 Noventa Padovana (PD)  
Via Panà 56/a

Tel. +39 049 8945 087  
Fax +39 049 8707 868  
mail@hsmarinesrl.com



31027 Spresiano (TV)  
Via Tiepolo, 8  
www.gtgeo.it

Tel. +39 0422 8870 31  
Fax +39 0422 8895 89  
info@gtgeo.it

PROGETTO

**PROGETTAZIONE PRELIMINARE E DEFINITIVA DELLE  
OPERE MARITTIME DI DIFESA E DEI DRAGAGGI PREVISTI  
NELLA NUOVA PRIMA FASE DI ATTUAZIONE DELLA  
PIATTAFORMA EUROPA, COMPRESO LO STUDIO DI  
IMPATTO AMBIENTALE E LA VALUTAZIONE DI INCIDENZA  
AMBIENTALE**

EMISSIONE

**PROGETTO PRELIMINARE**

TITOLO

**B - GEOLOGIA E GEOTECNICA**  
Relazione sismica

REV.	DATA	FILE	OGGETTO	DIS.	APPR.
1					
2					
3					
4					
5					

ELABORATO N.

**B004**

DATA: 08/11/2019	SCALA: -	FILE: 1233_PP-B-004_0.doc	J.N. 1233/'19
PROGETTO L. Masiero	DISEGNO C. Scarpa	VERIFICA L.Masiero	APPROVAZIONE T. Tassi

Progetto:

Progettazione preliminare e definitiva delle opere marittime di difesa e dei dragaggi previsti nella nuova prima fase di attuazione della Piattaforma Europa, compreso lo studio di impatto ambientale e la valutazione di incidenza ambientale

Livello progettazione:

Progetto di fattibilità tecnico economica

Elaborato:

GEOLOGIA E GEOTECNICA

1233\_PP-B-004\_0.docx

## Indice generale

<b>1</b>	<b>SINTESI DELLA RELAZIONE</b>	<b>5</b>
<b>2</b>	<b>CRITERI PROGETTUALI</b>	<b>6</b>
2.1	LEGGI, DECRETI E CIRCOLARI	6
<b>3</b>	<b>CLASSIFICAZIONE SISMICA DELL'AREA</b>	<b>7</b>
3.1	CATEGORIA DI SOTTOSUOLO	10
3.2	VITA NOMINALE E CLASSE D'USO DELL'OPERA	11
3.3	PARAMETRI SISMICI DI PROGETTO	11
<b>4</b>	<b>SISMICITA' STORICA DELL'AREA</b>	<b>13</b>
4.1	DATABASE "CPTI04"	13
4.2	DATABASE NT4.1	14
<b>5</b>	<b>ZONAZIONE SISMOGENETICA</b>	<b>17</b>
<b>6</b>	<b>VALUTAZIONE DEL POTENZIALE DI LIQUEFAZIONE</b>	<b>18</b>
6.1	IL FENOMENO "LIQUEFAZIONE"	18
6.2	STABILITÀ NEI CONFRONTI DELLA LIQUEFAZIONE (D.M. 17.01.2018)	19
6.2.1	CALCOLO DEL COEFFICIENTE DI SICUREZZA	21
6.2.2	VALUTAZIONE DEL RAPPORTO DI SFORZO CICLICO (CSR)	21
6.2.3	VALUTAZIONE DEL RAPPORTO DI RESISTENZA CICLICA (CRR)	22
6.2.4	VALUTAZIONE DEL POTENZIALE DI LIQUEFAZIONE (LPI)	22
<b>8</b>	<b>APPENDICE</b>	<b>25</b>
8.1	RISULTATI CLIQ – STATO DI FATTO	25
8.1.1	ID01_CPTU1	25
8.1.2	ID09_CPTU4	26
8.1.3	ID10_CPTU28	26
8.1.4	ID24_CPTU29	27
8.1.5	ID27_CPTU12	28
8.1.6	ID46_CPTU21	28
8.1.7	ID48_CPTU23	29
8.1.8	ID55_CPTU26	30
8.2	RISULTATI CLIQ STATO DI PROGETTO	31
8.2.1	ID01_CPTU1	31
8.2.2	ID09_CPTU4	31
8.2.3	ID10_CPTU28	32
8.2.4	ID24_CPTU29	33

Progetto:

Progettazione preliminare e definitiva delle opere marittime di difesa e dei dragaggi previsti nella nuova prima fase di attuazione della Piattaforma Europa, compreso lo studio di impatto ambientale e la valutazione di incidenza ambientale

Livello progettazione:

Progetto di fattibilità tecnico economica

Elaborato:

GEOLOGIA E GEOTECNICA

1233\_PP-B-004\_0.docx

8.2.5	ID27_CPTU12	33
8.2.6	ID46_CPTU21	34
8.2.7	ID48_CPTU23	35
8.2.8	ID55_CPTU26	35

Progetto:

Progettazione preliminare e definitiva delle opere marittime di difesa e dei dragaggi previsti nella nuova prima fase di attuazione della Piattaforma Europa, compreso lo studio di impatto ambientale e la valutazione di incidenza ambientale

Livello progettazione:

Progetto di fattibilità tecnico economica

Elaborato:

GEOLOGIA E GEOTECNICA

1233\_PP-B-004\_0.docx

## Indice delle figure

Figura 3.1 – Classificazione sismica del territorio italiano (1984).....	7
Figura 3.2 – Classificazione sismica del territorio italiano (Proposta GdL 1998). ....	8
Figura 3.3 – Classificazione sismica del territorio italiano (OPCM 3274/03). ....	8
Figura 3.4 – Riclassificazione sismica del territorio italiano (2004). ....	9
Figura 3.5 – Mappa di pericolosità sismica della Toscana. Accelerazione attesa con probabilità del 10% in 50 anni (INGV, 2004). ....	9
Figura 3.6 – Classificazione sismica del Comune di Livorno (I.N.G.V.). ....	10
Figura 3.7 – Parametri sismici del Comune di Livorno (GeoStru). ....	12
Figura 4.1 – Carta della sismicità in Italia (distribuzione degli epicentri fino al 2002).....	14
Figura 4.2 – Epicentri dei terremoti in funzione dell'intensità macrosismica Ms.....	15
Figura 4.3 – Massima intensità macrosismica osservata nel territorio toscano.....	16
Figura 5.1 – Zonazione sismogenetica: a) ZS.4 - 1996. b) ZS.9 - 2004. ....	17
Figura 5.2 – Magnitudo zona ZS 921. ....	17
Figura 6.1 – Incremento della pressione neutra di un terreno liquefacibile durante un sisma.....	19
Figura 6.2 – Fusi granulometrici di terreni suscettibili di liquefazione: a) con $U_c < 3.5$ . b) con $U_c \geq 3.5$ .....	20
Figura 6.3 – Presentazione grafica del metodo utilizzato per il calcolo del potenziale di liquefazione...	22
Figura 6.4 – LPI per ogni prova – stato di fatto.....	23
Figura 6.4 – LPI per ogni prova – stato di progetto. ....	24
Figura 6.5 – Potenziale di liquefazione: a) Stato di fatto. b) Stato di progetto.....	24

Progetto:

Progettazione preliminare e definitiva delle opere marittime di difesa e dei dragaggi previsti nella nuova prima fase di attuazione della Piattaforma Europa, compreso lo studio di impatto ambientale e la valutazione di incidenza ambientale

Livello progettazione:

Progetto di fattibilità tecnico economica

Elaborato:

GEOLOGIA E GEOTECNICA

1233\_PP-B-004\_0.docx

## Indice delle tabelle

Tabella 3.1 – Classificazione sismica fino al 2004 .....	7
Tabella 3.2 – Categorie di sottosuolo. ....	10
Tabella 3.3 – Coefficienti di amplificazione stratigrafica e topografica relativi all’area in esame. ....	12
Tabella 6.1 – Rischio di liquefazione in funzione di LPI.....	22
Tabella 6.2 – LPI per ogni prova. ....	23

Progetto:

Progettazione preliminare e definitiva delle opere marittime di difesa e dei dragaggi previsti nella nuova prima fase di attuazione della Piattaforma Europa, compreso lo studio di impatto ambientale e la valutazione di incidenza ambientale

Livello progettazione:

Progetto di fattibilità tecnico economica

Elaborato:

GEOLOGIA E GEOTECNICA

1233\_PP-B-004\_0.docx

## 1 SINTESI DELLA RELAZIONE

Nella presente relazione viene fornito un quadro generale sulla sismicità dell'area di progetto e vengono illustrate le metodologie di calcolo utilizzate per la valutazione della suscettibilità alla liquefazione dei terreni.

L'analisi storica degli eventi sismici che maggiormente hanno caratterizzato l'area interessata dall'intervento deriva da uno studio basato su dati registrati e pubblicati in rete dall'Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia (I.N.G.V.). Lo studio ha permesso di analizzare i terremoti a partire dal I secolo A.C. fino ai giorni d'oggi.

Dopo una breve descrizione delle normative nazionali e regionali vigenti in materia sismica, saranno dettate le procedure di classificazione sismica dell'area, sulla base:

- delle direttive legislative;
- della sismicità storica dell'area di Livorno in funzione dei dati divulgati nel web dall'I.N.G.V.;
- della zonazione sismogenetica;
- degli effetti di amplificazione locale.

L'esame accurato delle singole procedure permetterà di definire l'attività sismica che si può verificare il loco, definita in termini di accelerazione massima orizzontale ( $a_g$ ) e di Magnitudo Momento (M).

La conoscenza delle caratteristiche geofisiche dei terreni di fondazione deriva da correlazioni empiriche basate sui risultati delle campagne di indagini geotecniche e geognostiche, consistenti in:

- Esecuzione di n. 15 sondaggi a carotaggio continuo;
- Esecuzione di n. 71 sondaggi ambientali con vibrocorer;
- Esecuzione di n. 87 prove SPT;
- Esecuzione di n. 10 prove CPTU;
- Esecuzione di 158 analisi granulometriche.

I risultati delle indagini in sito e l'ubicazione in pianta delle verticali esplorate sono riportate negli elaborati 1233\_PP-B-002\_0, 1233\_PP-B-101\_0 e 1233\_PP-B-102\_0.

Progetto:

Progettazione preliminare e definitiva delle opere marittime di difesa e dei dragaggi previsti nella nuova prima fase di attuazione della Piattaforma Europa, compreso lo studio di impatto ambientale e la valutazione di incidenza ambientale

Livello progettazione:

Progetto di fattibilità tecnico economica

Elaborato:

GEOLOGIA E GEOTECNICA

1233\_PP-B-004\_0.docx

## 2 CRITERI PROGETTUALI

I criteri di progettazione, dimensionamento e verifica sono conformi alle seguenti direttive:

### 2.1 LEGGI, DECRETI E CIRCOLARI

- Legge 2 febbraio 1974, n°64 “Provvedimenti per le costruzioni con particolari prescrizioni per le zone sismiche”.
- D.M. LL. PP. 16 gennaio 1996 “Norme Tecniche per le costruzioni in zone sismiche”.
- Circolare del M. LL. PP. 10 aprile 1997, n°65/AA.GG. “Istruzioni per l’applicazione delle «Norme tecniche per le costruzioni in zone sismiche» di cui al decreto ministeriale 16 gennaio 1996”.
- D.M. 17 gennaio 2018 “Aggiornamento delle «Norme tecniche per le costruzioni»”.
- CIRCOLARE 21 gennaio 2019, n. 7 “Istruzioni per l’applicazione dell’«Aggiornamento delle «Norme tecniche per le costruzioni» di cui al decreto ministeriale 17 gennaio 2018”.
- Ordinanza P.C.M. del 20 marzo 2003 n°3274 “Primi elementi in materia di criteri generali per la classificazione sismica del territorio nazionale e di normative tecniche per la costruzione in zona sismica”.
- Ordinanza P.C.M. n°3431 03 maggio 2005 “Ulteriori modifiche ed integrazioni all’ordinanza del Presidente del Consiglio dei Ministri n. 3274 del 20 marzo 2003, recante «Primi elementi in materia di criteri generali per la classificazione sismica del territorio nazionale e di normative tecniche per le costruzioni in zona sismica»”.

Progetto:

Progettazione preliminare e definitiva delle opere marittime di difesa e dei dragaggi previsti nella nuova prima fase di attuazione della Piattaforma Europa, compreso lo studio di impatto ambientale e la valutazione di incidenza ambientale

Livello progettazione:

Progetto di fattibilità tecnico economica

Elaborato:

GEOLOGIA E GEOTECNICA

1233\_PP-B-004\_0.docx

### 3 CLASSIFICAZIONE SISMICA DELL'AREA

In base all'Ordinanza del Presidente del Consiglio dei Ministri n. 3274 del 20 marzo 2003 e alla successiva Ordinanza del Presidente del Consiglio dei Ministri n. 3519 del 28 aprile 2006, il Comune di Livorno è classificato in **zona 2** contraddistinta da un parametro di accelerazione massima orizzontale  $a_g$  dell'ordine di 0.1-0.125g (valore riferito ad una probabilità di superamento del 10% in 50 anni) come segnalato dall'Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia (<http://esse1-gis.mi.ingv.it/>).

Tabella 3.1 – Classificazione sismica fino al 2004

Denominazione	Comune	Provincia	Coordinate	Categoria			
				Decreti fino al 1984	Proposta GdL 1998	O.P.C.M. 3274/03	Riclassificazione 2004
Livorno	Livorno	Livorno	43°33'N 10°19'E	2	3	2	2

Si riportano a seguire le mappe cromatiche con la classificazione sismica storica del territorio italiano, a partire dall'anno 1984 fino alla riclassificazione del 2004, sulla base delle normative nazionali e regionali vigenti.

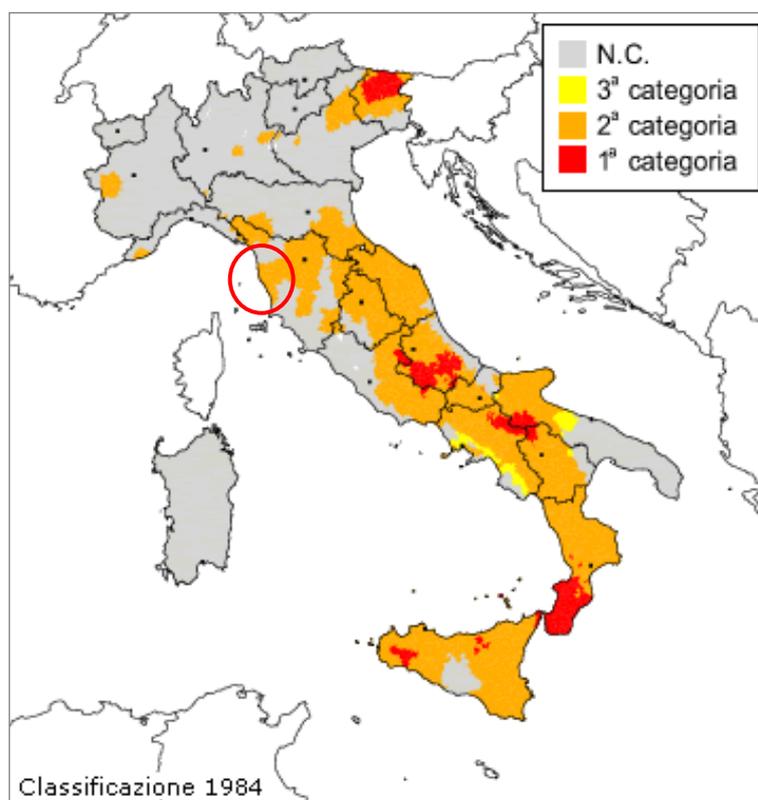


Figura 3.1 – Classificazione sismica del territorio italiano (1984).

Progetto:

Progettazione preliminare e definitiva delle opere marittime di difesa e dei dragaggi previsti nella nuova prima fase di attuazione della Piattaforma Europa, compreso lo studio di impatto ambientale e la valutazione di incidenza ambientale

Livello progettazione:

Progetto di fattibilità tecnico economica

Elaborato:

GEOLOGIA E GEOTECNICA

1233\_PP-B-004\_0.docx

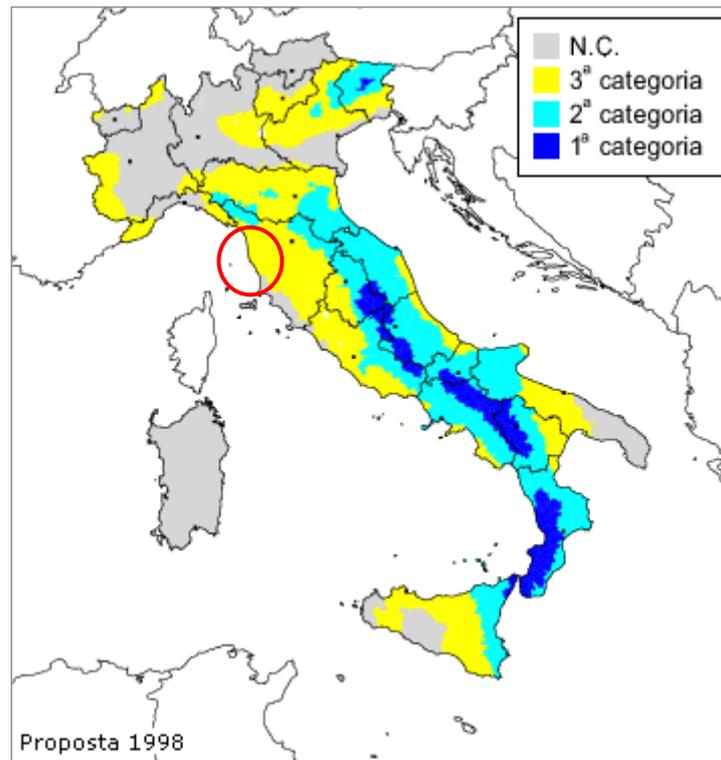


Figura 3.2 – Classificazione sismica del territorio italiano (Proposta GdL 1998).

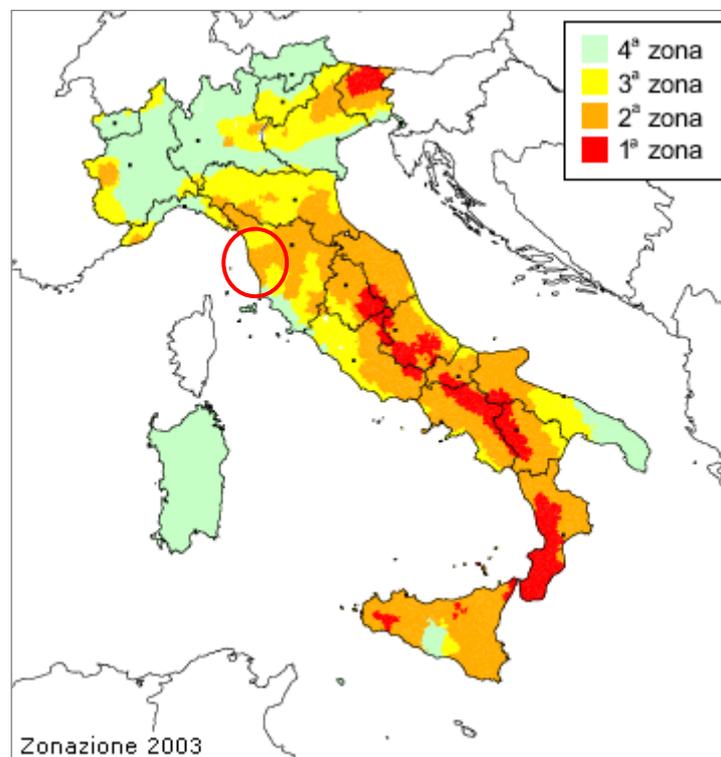


Figura 3.3 – Classificazione sismica del territorio italiano (OPCM 3274/03).

Progetto:

Progettazione preliminare e definitiva delle opere marittime di difesa e dei dragaggi previsti nella nuova prima fase di attuazione della Piattaforma Europa, compreso lo studio di impatto ambientale e la valutazione di incidenza ambientale

Livello progettazione:

Progetto di fattibilità tecnico economica

Elaborato:

GEOLOGIA E GEOTECNICA

1233\_PP-B-004\_0.docx

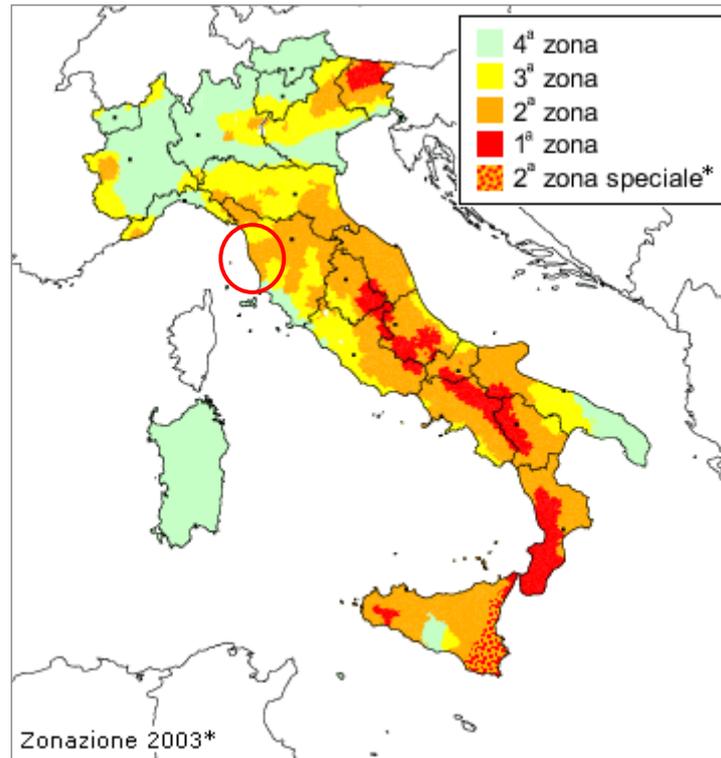


Figura 3.4 – Riclassificazione sismica del territorio italiano (2004).

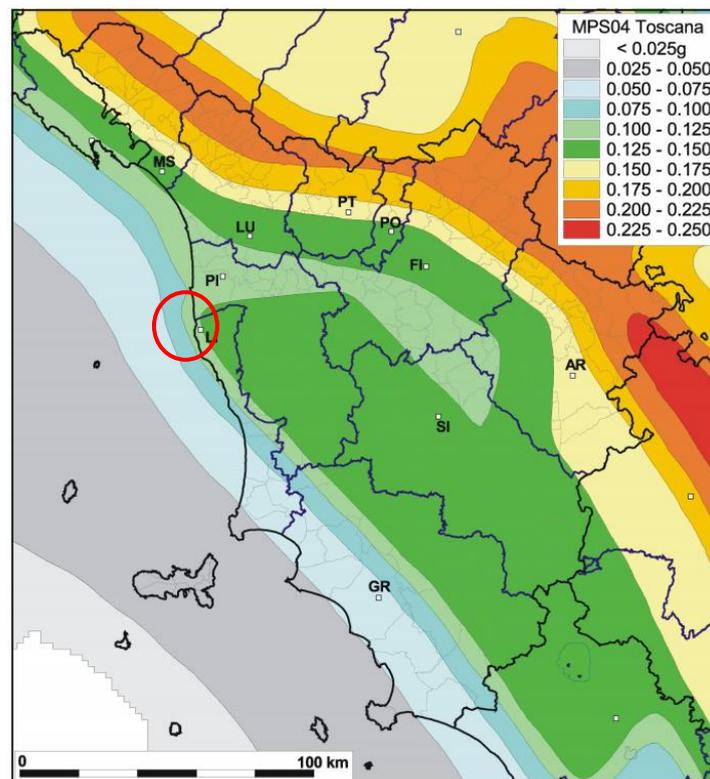


Figura 3.5 – Mappa di pericolosità sismica della Toscana. Accelerazione attesa con probabilità del 10% in 50 anni (INGV, 2004).

Progetto:

Progettazione preliminare e definitiva delle opere marittime di difesa e dei dragaggi previsti nella nuova prima fase di attuazione della Piattaforma Europa, compreso lo studio di impatto ambientale e la valutazione di incidenza ambientale

Livello progettazione:

Progetto di fattibilità tecnico economica

Elaborato:

GEOLOGIA E GEOTECNICA

1233\_PP-B-004\_0.docx

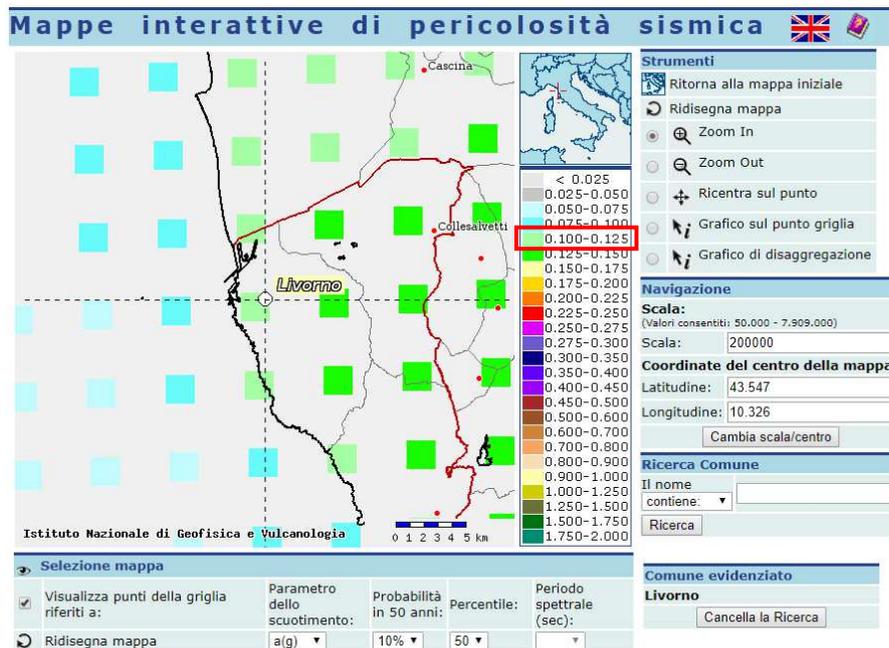


Figura 3.6 – Classificazione sismica del Comune di Livorno (I.N.G.V.).

### 3.1 CATEGORIA DI SOTTOSUOLO

Ai fini della definizione dell'azione sismica di progetto, si rende necessario valutare l'effetto della risposta sismica locale mediante l'utilizzo di un approccio semplificato che si basa sull'individuazione di categorie di sottosuolo di riferimento. In particolare, si classifica il terreno presente al di sotto del piano di posa delle fondazioni dell'opera di progetto, attraverso il valore della velocità equivalente  $V_{s,30}$  di propagazione delle onde di taglio (definita successivamente) entro i primi 30 m di profondità.

La normativa (NTC 2018) suddivide i terreni secondo la tabella seguente.

Tabella 3.2 – Categorie di sottosuolo.

Categoria	Caratteristiche della superficie topografica
A	<i>Ammassi rocciosi affioranti o terreni molto rigidi caratterizzati da valori di velocità delle onde di taglio superiori a 800 m/s, eventualmente comprendenti in superficie terreni di caratteristiche meccaniche più scadenti con spessore massimo pari a 3 m.</i>
B	<i>Rocce tenere e depositi di terreni a grana grossa molto addensati o terreni a grana fina molto consistenti, caratterizzati da un miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di velocità equivalente compresi tra 360 m/s e 800 m/s.</i>
C	<i>Depositati 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.</i>
D	<i>Depositati di terreni a grana grossa scarsamente addensati o di terreni a grana fina scarsamente 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 100 e 180 m/s.</i>
E	<i>Terreni con caratteristiche e valori di velocità equivalente riconducibili a quelle definite per le categorie C o D, con profondità del substrato non superiore a 30 m.</i>

Progetto:

Progettazione preliminare e definitiva delle opere marittime di difesa e dei dragaggi previsti nella nuova prima fase di attuazione della Piattaforma Europa, compreso lo studio di impatto ambientale e la valutazione di incidenza ambientale

Livello progettazione:

Progetto di fattibilità tecnico economica

Elaborato:

GEOLOGIA E GEOTECNICA

1233\_PP-B-004\_0.docx

La velocità equivalente delle onde di taglio  $V_{s,30}$  è definita dall'espressione:

$$V_{s,30} = 30 / \sum_i h_i / V_{s,i}$$

in cui  $h_i$  e  $V_i$  indicano lo spessore in metri e la velocità delle onde di taglio (per deformazioni di taglio  $\gamma < 10^{-6}$ ) dello strato  $i$ -esimo, per un totale di  $n$ -strati presenti nei 30 m superiori.

I valori di  $V_s$  sono ottenuti mediante specifiche prove oppure, con giustificata motivazione e limitatamente all'approccio semplificato, sono valutati tramite relazioni empiriche di comprovata affidabilità con i risultati di altre prove in sito, quali ad esempio le prove penetrometriche dinamiche per i terreni a grana grossa e le prove penetrometriche statiche.

In mancanza di prove sismiche dirette, la stima della velocità equivalente delle onde di taglio ( $V_{s,30}$ ) è stata effettuata a partire dalle prove CPT.

Si ha, quindi una  $V_{s,30}$  media di circa 200 m/s che corrisponde ad una categoria di suolo C.

### 3.2 VITA NOMINALE E CLASSE D'USO DELL'OPERA

- Classe d'Uso dell'opera: III  $\rightarrow$  CU = 1.5
- Vita Nominale dell'opera: VN = 50 anni
- Periodo di riferimento dell'azione sismica VR = VN x CU = 75 anni

Tabella 2.4.I – Vita nominale  $V_N$  per diversi tipi di opere

TIPI DI COSTRUZIONE		Vita Nominale $V_N$ (in anni)
1	Opere provvisorie – Opere provvisionali - Strutture in fase costruttiva <sup>1</sup>	$\leq 10$
2	Opere ordinarie, ponti, opere infrastrutturali e dighe di dimensioni contenute o di importanza normale	$\geq 50$
3	Grandi opere, ponti, opere infrastrutturali e dighe di grandi dimensioni o di importanza strategica	$\geq 100$

Tab. 2.4.II – Valori del coefficiente d'uso  $C_U$

CLASSE D'USO	I	II	III	IV
COEFFICIENTE $C_U$	0,7	1,0	1,5	2,0

Se  $V_R \leq 35$  anni si pone comunque  $V_R = 35$  anni.

### 3.3 PARAMETRI SISMICI DI PROGETTO

Il parametro di accelerazione massima orizzontale se riferito alla Classe d'Uso dell'opera, alla Vita Nominale dell'opera e alla categoria del sottosuolo di fondazione, assume i seguenti valori massimi in funzione dello stato limite utilizzato per la progettazione delle opere.

Progetto:

Progettazione preliminare e definitiva delle opere marittime di difesa e dei dragaggi previsti nella nuova prima fase di attuazione della Piattaforma Europa, compreso lo studio di impatto ambientale e la valutazione di incidenza ambientale

Livello progettazione:

Progetto di fattibilità tecnico economica

Elaborato:

GEOLOGIA E GEOTECNICA

1233\_PP-B-004\_0.docx

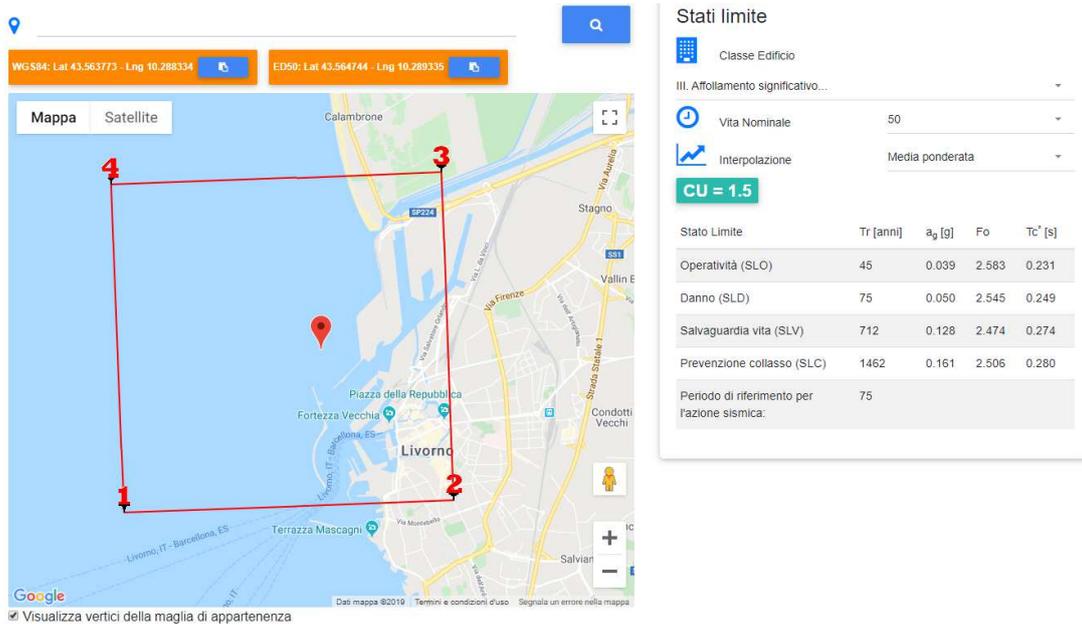


Figura 3.7 – Parametri sismici del Comune di Livorno (GeoStru).

Tabella 3.3 – Coefficienti di amplificazione stratigrafica e topografica relativi all'area in esame.

	SLO	SLD	SLV	SLC
Cat. Sottosuolo	C			
Cat. Topografica	T1			
SS Amplificazione stratigrafica	1,50	1,50	1,50	1,46
CC Coeff. funz categoria	1,70	1,66	1,61	1,60
ST Amplificazione topografica	1,00	1,00	1,00	1,00

Progetto:

Progettazione preliminare e definitiva delle opere marittime di difesa e dei dragaggi previsti nella nuova prima fase di attuazione della Piattaforma Europa, compreso lo studio di impatto ambientale e la valutazione di incidenza ambientale

Livello progettazione:

Progetto di fattibilità tecnico economica

Elaborato:

GEOLOGIA E GEOTECNICA

1233\_PP-B-004\_0.docx

## 4 SISMICITA' STORICA DELL'AREA

Per l'analisi della sismicità che in passato ha interessato l'area in oggetto, si è fatto riferimento ai seguenti cataloghi:

- **CPTI04** (maggio 2004), Catalogo Parametrico dei Terremoti Italiani;
- **NT4.1**, catalogo parametrico di terremoti di area italiana al di sopra della soglia del danno (aggiornamento marzo 1998).

### 4.1 DATABASE "CPTI04"

Redatto a partire dal 1999 da studi operati nel settore della sismologia storica e della macrosismica degli ultimi venti anni. Il catalogo contiene 2480 eventi di cui sono riportate le seguenti informazioni:

Tr	tipo di record
Ye	anno
Mo	mese
Da	giorno
Ho	ora
Mi	minuto
Se	secondo
AE	denominazione dell'area dei massimi effetti
Rt	codice bibliografico dello studio di riferimento
Np	numero dei punti di intensità
Imx	intensità massima (scala MCS)
Io	intensità epicentrale (scala MCS)
Lat	latitudine in gradi e decimali
Lon	longitudine in gradi e decimali
Me	Magnitudo equivalente
dE	errore associato alla stima di Me
Mm	magnitudo macrosismica
dM	errore associato alla stima di Mm
tM	codice di determinazione di Mm
Ms	magnitudo strumentale
dS	errore associato alla stima di Ms
tS	codice di determinazione di Ms
Ma	magnitudo media pesata
dA	errore associato alla stima di Ma

Ad esso è associato un database di riferimento per poter compiere le necessarie correlazioni tra ciascun evento e il sito in esame. Da tutti gli eventi con dati di base è possibile selezionare le notizie in modo da definire "storie sismiche" dei singoli siti, identificanti cioè la successione temporale delle

Progetto:

Progettazione preliminare e definitiva delle opere marittime di difesa e dei dragaggi previsti nella nuova prima fase di attuazione della Piattaforma Europa, compreso lo studio di impatto ambientale e la valutazione di incidenza ambientale

Livello progettazione:

Progetto di fattibilità tecnico economica

Elaborato:

GEOLOGIA E GEOTECNICA

1233\_PP-B-004\_0.docx

intensità risentite (in una definita località) rispetto alle intensità epicentrali dei vari eventi nel corso dei secoli.

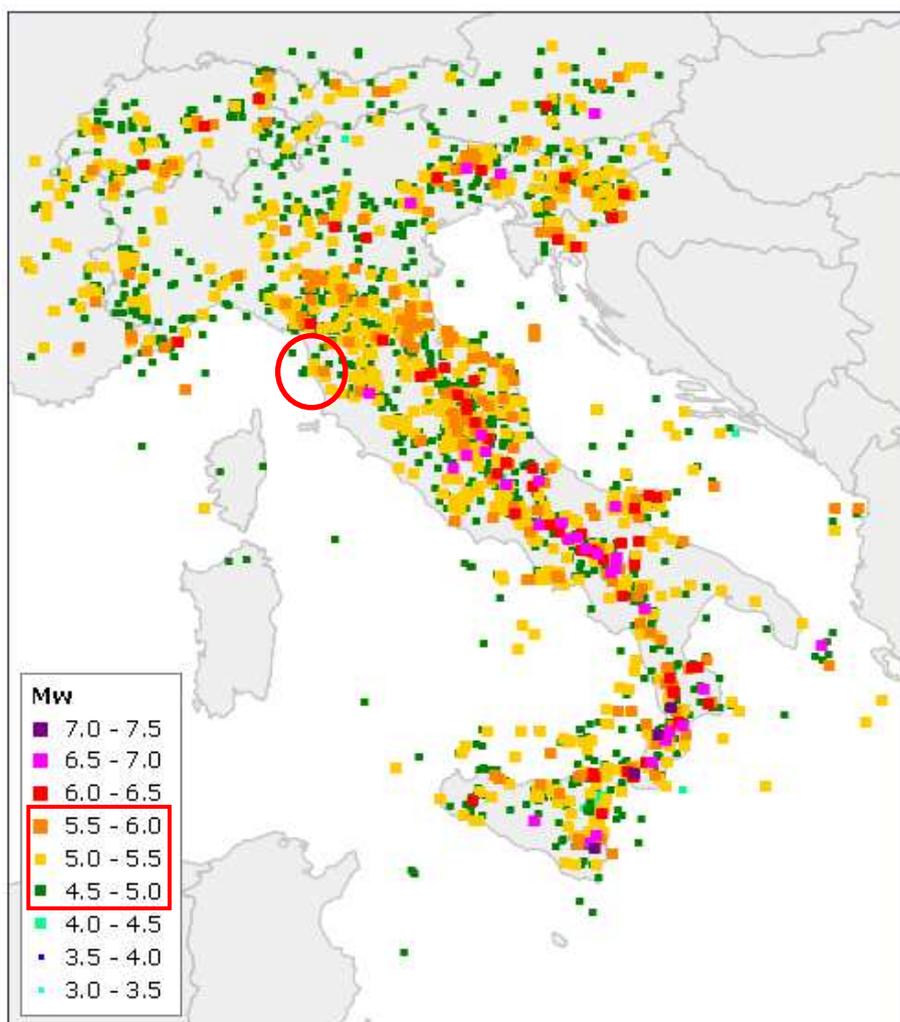


Figura 4.1 – Carta della sismicità in Italia (distribuzione degli epicentri fino al 2002).

## 4.2 DATABASE NT4.1

Realizzato nell'ambito del GNDDT sono considerati solo eventi principali con soglia di magnitudo avvenuti dal 1065 al 1976. L'osservazione ha permesso riportare nella Figura gli epicentri dei terremoti che hanno interessato le aree limitrofe al Comune di Livorno, in funzione dell'intensità macrosismica ( $MCS > 2$ ) e della magnitudo ( $M_s$ ).

Progetto:

Progettazione preliminare e definitiva delle opere marittime di difesa e dei dragaggi previsti nella nuova prima fase di attuazione della Piattaforma Europa, compreso lo studio di impatto ambientale e la valutazione di incidenza ambientale

Livello progettazione:

Progetto di fattibilità tecnico economica

Elaborato:

GEOLOGIA E GEOTECNICA

1233\_PP-B-004\_0.docx

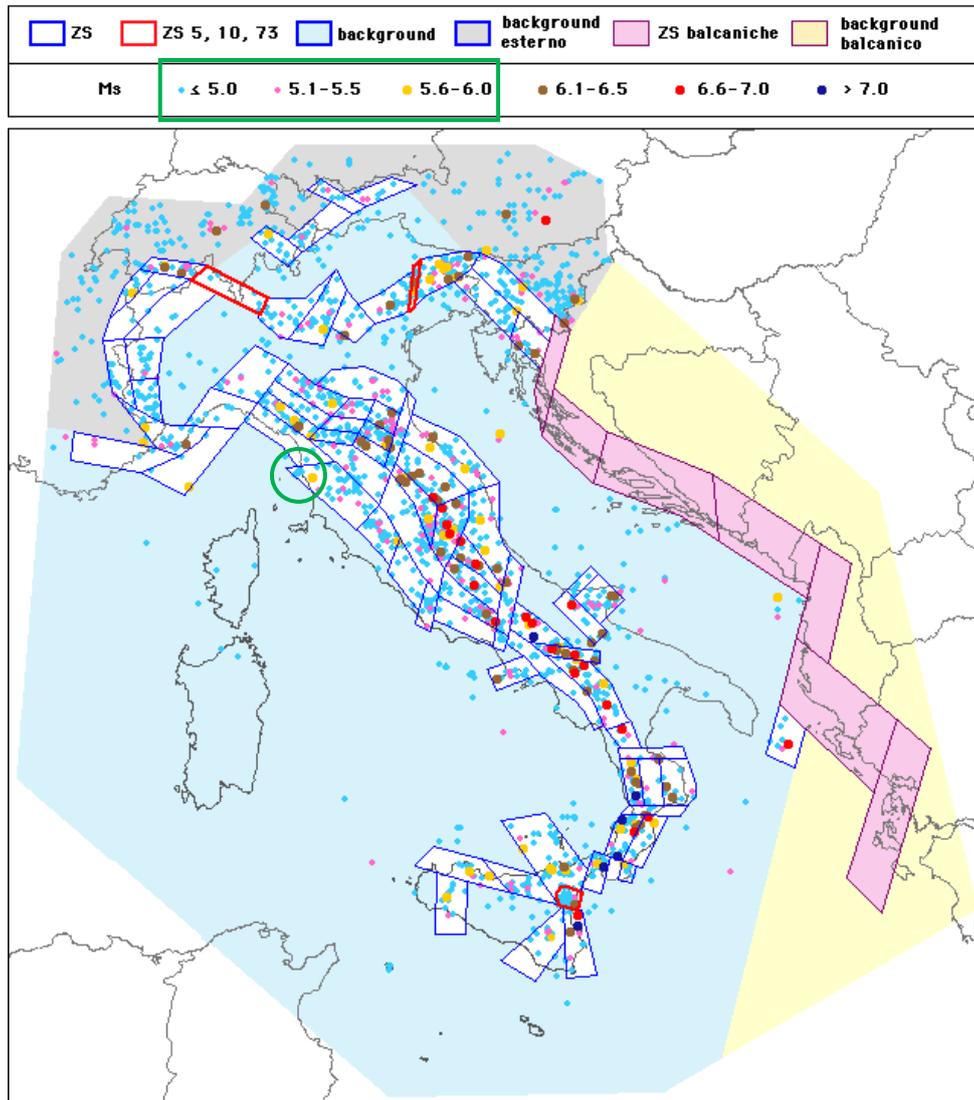


Figura 4.2 – Epicentri dei terremoti in funzione dell'intensità macrosismica Ms.

Progetto:

Progettazione preliminare e definitiva delle opere marittime di difesa e dei dragaggi previsti nella nuova prima fase di attuazione della Piattaforma Europa, compreso lo studio di impatto ambientale e la valutazione di incidenza ambientale

Livello progettazione:

Progetto di fattibilità tecnico economica

Elaborato:

GEOLOGIA E GEOTECNICA

1233\_PP-B-004\_0.docx

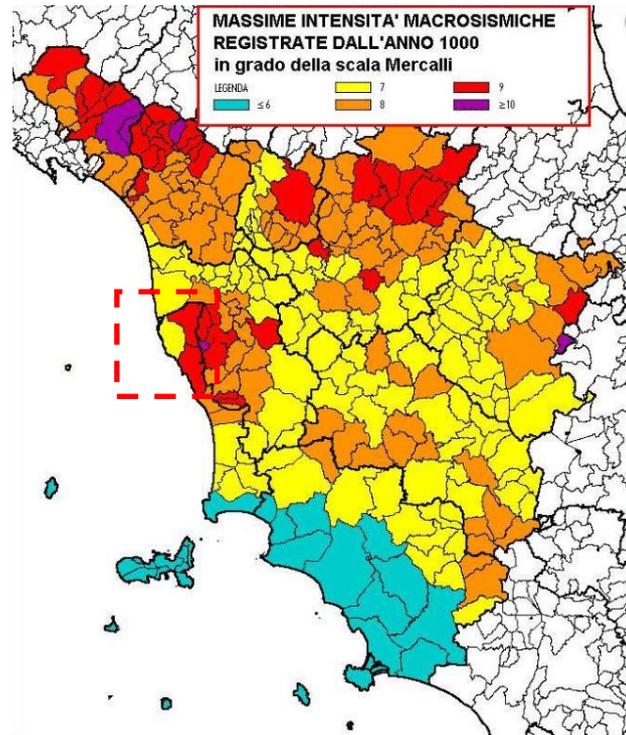


Figura 4.3 – Massima intensità macrosismica osservata nel territorio toscano.

Progetto:

Progettazione preliminare e definitiva delle opere marittime di difesa e dei dragaggi previsti nella nuova prima fase di attuazione della Piattaforma Europa, compreso lo studio di impatto ambientale e la valutazione di incidenza ambientale

Livello progettazione:

Progetto di fattibilità tecnico economica

Elaborato:

GEOLOGIA E GEOTECNICA

1233\_PP-B-004\_0.docx

## 5 ZONAZIONE SISMOGENETICA

La zonazione sismogenetica è uno degli strumenti utilizzati per la valutazione della pericolosità sismica del territorio italiano. La sismogenetica ZS.4 è stata tracciata nel 1996, utilizzata per la redazione della carta di pericolosità sismica nazionale dal Gruppo Nazionale Difesa Terremoti (1996) e dal Servizio Sismico Nazionale (2001) e rappresenta uno schema geodinamico e sismotettonico ancora valido nelle sue linee generali, sebbene le nuove conoscenze in riferimento al quadro cinematico generale e alla geometria delle sorgenti sismogenetiche e la necessità di una maggiore coerenza con il nuovo catalogo dei terremoti CPT12, abbiano portato alla redazione di una nuova zonazione sismogenetica ZS.9 (2004).

Le zone rappresenterebbero quindi degli embrioni di macrostrutture le cui orientazioni seguono i principali andamenti alpini o appenninici, con importanti strutture trasversali di svincolo.

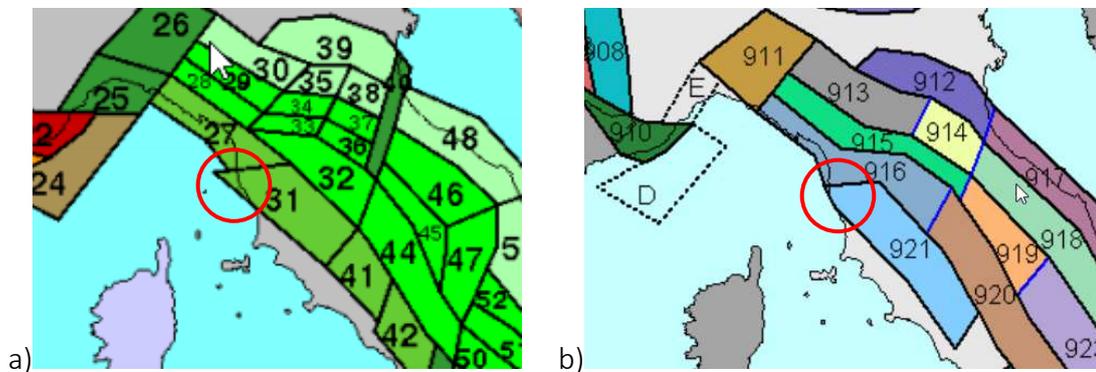


Figura 5.1 – Zonazione sismogenetica: a) ZS.4 - 1996. b) ZS.9 - 2004.

Come si evince dalla zonazione sismogenetica ZS.9, Livorno rientra nella zona sismogenetica 921, la cui magnitudo di riferimento è 6.14.

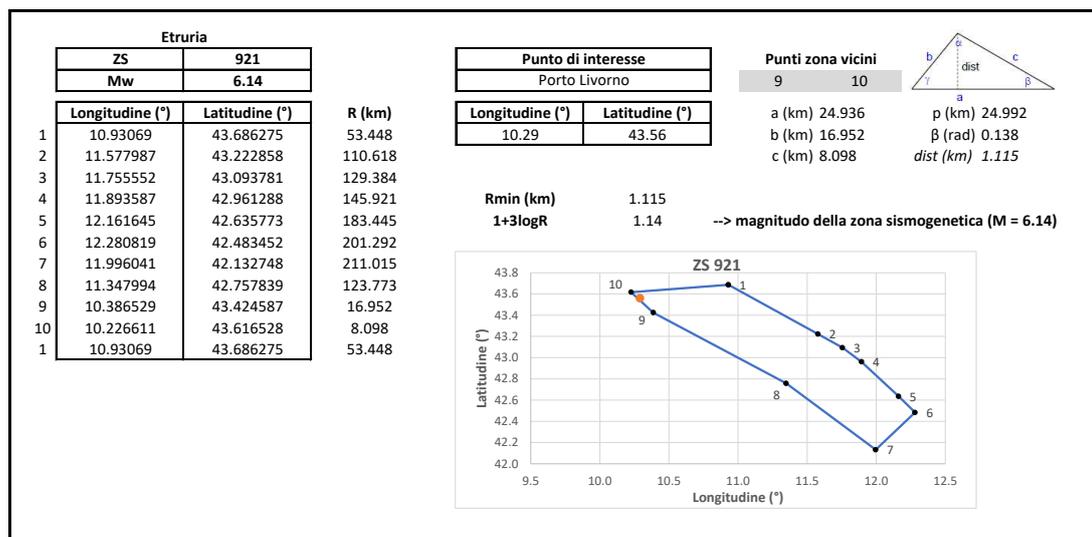


Figura 5.2 – Magnitudo zona ZS 921.

## 6 VALUTAZIONE DEL POTENZIALE DI LIQUEFAZIONE

Il D.M. 14 gennaio 2008, così come l'antecedente Ordinanza del PCM n°3274 del 20 marzo 2003, prevede per i terreni saturi non coesivi, in caso di scuotimento sismico, la verifica della suscettibilità alla **liquefazione** quando la falda freatica si trova in prossimità della quota di piano campagna ed il terreno di fondazione comprende strati estesi o lenti spesse di sabbie sciolte sotto falda, anche se contenenti frazione fine limo-argillosa.

### 6.1 IL FENOMENO "LIQUEFAZIONE"

Con il termine liquefazione si intende un processo in seguito al quale un sedimento che si trova al di sotto del livello freatico perde temporaneamente resistenza e si comporta come un fluido viscoso a causa di un aumento della pressione neutra e di una riduzione della pressione efficace.

La liquefazione ha luogo quando la pressione dei pori aumenta fino a eguagliare la pressione intergranulare; in termini tecnici la liquefazione ha inizio quando la pressione dei pori ( $u_0$ ) eguaglia la pressione totale ( $\sigma_{v0}$ ), producendo uno stato della pressione efficace nullo.

$$\sigma'_{v0} = \sigma_{v0} - u_0 = 0$$

L'incremento della pressione neutra è indotto dalla tendenza di un materiale granulare a compattarsi quando è soggetto ad azioni cicliche di un sisma, con conseguente aumento del potenziale di liquefazione del terreno. La liquefazione del terreno dovuta a movimenti sismici, con le conseguenti deformazioni associate, è una delle cause più importanti di danneggiamento e crollo delle costruzioni fondate su terreni non coesivi saturi ed è il risultato dell'effetto combinato di due principali categorie di fattori:

- fattori predisponenti
  - il terreno deve essere saturo, non compattato, non consolidato, sabbioso o limoso o un miscuglio di poca argilla.
  - Distribuzione granulometrica, uniformità, saturazione, densità relativa, pressioni efficaci di confinamento, stato tensionale in sito iniziale, ecc.
- fattori scatenanti
  - sismicità: magnitudo, durata, distanza dall'epicentro, accelerazione massima superficiale, inoltre il sito deve essere scosso sufficientemente a lungo e con forza dal sisma.

Alla liquefazione del terreno possono, infatti, associarsi estesi fenomeni di subsidenza, movimenti di masse fluidificate del terreno, ecc. ma anche effetti meno devastanti, quali cedimenti differenziali, lesioni nelle strutture, ecc. che tuttavia possono indurre gravi danni alle opere.

Progetto:

Progettazione preliminare e definitiva delle opere marittime di difesa e dei dragaggi previsti nella nuova prima fase di attuazione della Piattaforma Europa, compreso lo studio di impatto ambientale e la valutazione di incidenza ambientale

Livello progettazione:

Progetto di fattibilità tecnico economica

Elaborato:

GEOLOGIA E GEOTECNICA

1233\_PP-B-004\_0.docx

***L'ammortare delle deformazioni conseguenti alla liquefazione dipende dallo stato di addensamento del suolo, spessore ed estensione areale dello strato liquefacibile, dalla pendenza della superficie del terreno e dalla distribuzione dei carichi applicati dalle opere.***

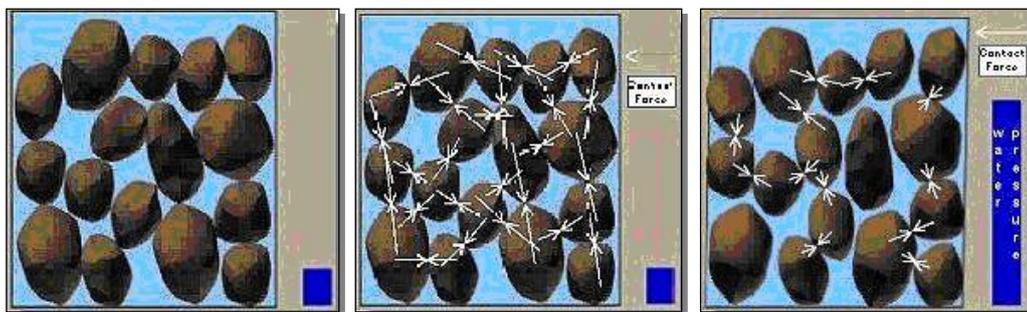


Figura 6.1 – Incremento della pressione neutra di un terreno liquefacibile durante un sisma.

Sono suscettibili alla liquefazione:

- i suoli non coesivi e saturi (sabbie e limi, occasionalmente ghiaie) con contenuto di fini plastici relativamente basso (inferiore al 15%);
- i suoli costituiti da particelle relativamente uniformi, in cui predomina una dimensione di particelle;
- i depositi sabbiosi recenti (età Olocenica).

Nei paragrafi successivi, saranno presentate le metodologie utilizzate per determinare la suscettività o meno alla liquefazione dei terreni interessati dalle opere in oggetto, in funzione:

- delle prescrizioni dettate dalla normativa vigente;
- delle caratteristiche meccaniche dei vari profili litostratigrafici;
- della Magnitudo Momento e del grado di sismicità dell'area.

## 6.2 STABILITÀ NEI CONFRONTI DELLA LIQUEFAZIONE (D.M. 17.01.2018)

Il paragrafo 7.11.3.4 del D.M. 17 gennaio 2018 stabilisce che, in caso di scuotimento sismico, il sito presso il quale è ubicata l'opera deve essere stabile nei confronti della liquefazione, intendendo con tale termine quei fenomeni associati alla perdita di resistenza al taglio o ad accumulo di deformazioni plastiche in terreni saturi, prevalentemente sabbiosi, sollecitati da azioni cicliche e dinamiche che agiscono in condizioni non drenate.

La verifica a liquefazione può essere omessa quando si manifesti almeno una delle seguenti circostanze:

1. accelerazioni massime attese al piano campagna in assenza di manufatti (condizioni di campo libero) minori di 0,1g;
2. profondità media stagionale della falda superiore a 15 m dal piano campagna, per piano campagna sub-orizzontale e strutture con fondazioni superficiali;

3. depositi costituiti da sabbie pulite con resistenza penetrometrica normalizzata  $(N_1)_{60} > 30$  oppure  $q_{c1N} > 180$  dove  $(N_1)_{60}$  è il valore della resistenza determinata in prove penetrometriche dinamiche (Standard Penetration Test) normalizzata ad una tensione efficace verticale di 100 kPa e  $q_{c1N}$  è il valore della resistenza determinata in prove penetrometriche statiche (Cone Penetration Test) normalizzata ad una tensione efficace verticale di 100 kPa;
4. distribuzione granulometrica esterna alle zone indicate nelle seguenti figure a) nel caso di terreni con coefficiente di uniformità  $U_c < 3,5$  e b) nel caso di terreni con coefficiente di uniformità  $U_c \geq 3,5$ .

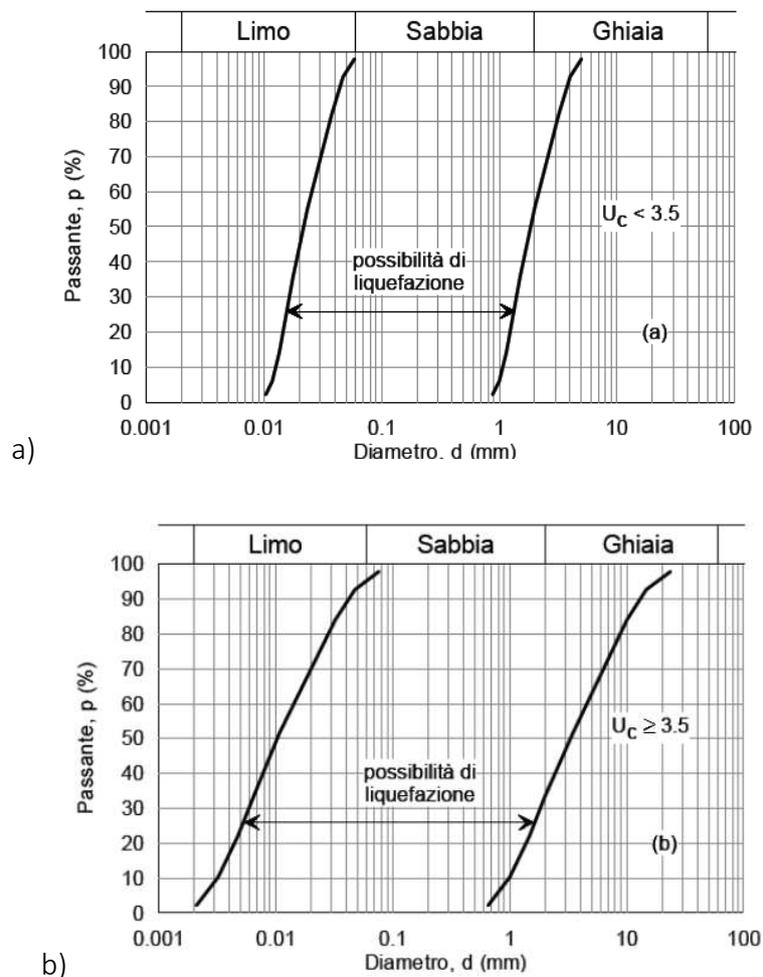


Figura 6.2 – Fusi granulometrici di terreni suscettibili di liquefazione: a) con  $U_c < 3.5$ . b) con  $U_c \geq 3.5$ .

Sulla base di quanto presentato nei precedenti paragrafi e visti i risultati delle indagini geognostiche condotte, si evince che la verifica a liquefazione non può essere omessa.

La procedura di calcolo nel suo insieme è divisa in tre parti:

1. Calcolo della domanda di resistenza ciclica alla liquefazione CSR;
2. Calcolo della capacità di resistenza del terreno alla liquefazione CRR;
3. Valutazione del potenziale di liquefazione.

Progetto:

Progettazione preliminare e definitiva delle opere marittime di difesa e dei dragaggi previsti nella nuova prima fase di attuazione della Piattaforma Europa, compreso lo studio di impatto ambientale e la valutazione di incidenza ambientale

Livello progettazione:

Progetto di fattibilità tecnico economica

Elaborato:

GEOLOGIA E GEOTECNICA

1233\_PP-B-004\_0.docx

### 6.2.1 Calcolo del coefficiente di sicurezza

Il fattore di sicurezza nei confronti della liquefazione è pari al rapporto tra il rapporto di resistenza ciclica (CRR) e il rapporto di sforzo ciclico (CSR) normalizzati rispetto a  $\sigma'_{v0}$  e riferiti ad una magnitudo di 7.5:

$$FS = \frac{CRR_{M=7.5, \sigma'_v=1atm}}{CSR_{M=7.5, \sigma'_v=1atm}}$$

### 6.2.2 Valutazione del rapporto di sforzo ciclico (CSR)

Facendo riferimento alla teoria di Seed & Idriss (1971), il rapporto di sforzo ciclico (sforzo di taglio indotto dal terremoto) dipende dai parametri sismici dell'area ed è così espresso:

$$CSR = 0.65 \cdot \left( \frac{a_{max}}{g} \right) \cdot \left( \frac{\sigma_{v0}}{\sigma'_{v0}} \right) \cdot r_d \cdot \frac{1}{MSF}$$

dove:

- $a_{max}$ : accelerazione orizzontale di picco in superficie;
- $g$ : accelerazione di gravità;
- $\sigma_{v0}$ : tensione verticale litostatica totale;
- $\sigma'_{v0}$ : tensione verticale litostatica efficace;
- $r_d$ : coefficiente di riduzione delle tensioni;
- $MSF$ : coefficiente correttivo dipendente dalla magnitudo del sisma.

Il fattore di riduzione delle tensioni ( $r_d$ ) è calcolato secondo le formule raccomandate dal National Center for Earthquake Engineering Research (NCEER):

$$r_d = \begin{cases} 1 - 0.00765 \cdot z & \text{per } z \leq 9.15 \text{ m} \\ 1.174 - 0.0267 \cdot z & \text{per } 9.15 \text{ m} < z \leq 23 \text{ m} \\ 0.774 - 0.008 \cdot z & \text{per } 23 \text{ m} < z \leq 30 \text{ m} \\ 0.5 & \text{per } z > 30 \end{cases}$$

dove  $z$  è la profondità in metri da piano campagna.

Il valore da attribuire a  $MSF$  è definito dalle seguenti equazioni suggerite dalle raccomandazioni NCEER:

$$MSF = 10^{2.24} / M^{2.56} \quad (\text{Idriss, 1990}) \quad \text{per } M > 7.5$$

$$MSF = 10^{0.99} / M^{1.13} \quad (\text{Idriss, 1995}) \quad \text{per } M > 7.5$$

$$MSF = 10^{2.84} / M^{3.24} \quad (\text{Youd et al., 2001}) \quad \text{per } M < 7.5$$

dove  $M$  è la magnitudo del terremoto.

Progetto:

Progettazione preliminare e definitiva delle opere marittime di difesa e dei dragaggi previsti nella nuova prima fase di attuazione della Piattaforma Europa, compreso lo studio di impatto ambientale e la valutazione di incidenza ambientale

Livello progettazione:

Progetto di fattibilità tecnico economica

Elaborato:

GEOLOGIA E GEOTECNICA

1233\_PP-B-004\_0.docx

### 6.2.3 Valutazione del rapporto di resistenza ciclica (CRR)

Per il calcolo del rapporto di resistenza ciclica (resistenza al taglio ciclica del terreno) è stato utilizzato il metodo di Robertson (NCEER R&W1998, 2009) a partire dai dati forniti dalle prove CPTU.

I calcoli sono stati eseguiti con l'impiego dei programmi CLiq v.3.0. (Copyright © 2006 GeoLogismiki) e sono riportati in appendice.

### 6.2.4 Valutazione del potenziale di liquefazione (LPI)

Il potenziale di liquefazione è stato calcolato mediante l'applicazione della formula di Iwasaki et alii (1978, 1984). Tale metodo è stato proposto basandosi sull'osservazione che la severità dei danni prodotti dalla liquefazione ai manufatti è legata al volume di terreno liquefatto all'interno del deposito. Il metodo si basa su due quantità: il fattore di resistenza ( $F_L$ ) e l'indice di liquefazione (LPI).

Quando  $F < 1$  lo strato di terreno è liquefacibile; mentre LPI, indicativo dell'estensione che il fenomeno della liquefazione può avere nel deposito, è ottenuto dall'espressione:

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

dove:

- $F_L = 1 - FS$  per  $FS < 1$
- $F_L = 0$  per  $FS > 1$
- $W(z) = 10 - 0,5z$
- $z$  = profondità espressa in metri;
- $FS$  = fattore di sicurezza calcolato.

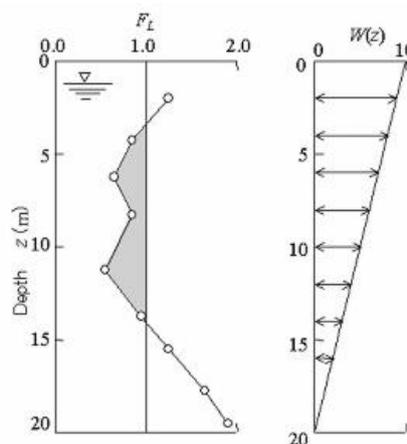


Figura 6.3 – Presentazione grafica del metodo utilizzato per il calcolo del potenziale di liquefazione.

Tabella 6.1 – Rischio di liquefazione in funzione di LPI.

Valori di $L_L$	Rischio di liquefazione
$LPI = 0$	Nulla
$0 < LPI \leq 5$	Basso
$5 < LPI \leq 15$	Alto
$15 < LPI$	Molto alto

Progetto:

Progettazione preliminare e definitiva delle opere marittime di difesa e dei dragaggi previsti nella nuova prima fase di attuazione della Piattaforma Europa, compreso lo studio di impatto ambientale e la valutazione di incidenza ambientale

Livello progettazione:

Progetto di fattibilità tecnico economica

Elaborato:

GEOLOGIA E GEOTECNICA

1233\_PP-B-004\_0.docx

La seguente tabella riepiloga il calcolo del potenziale di liquefazione determinato a partire dalle prove in sito con accelerazione massima pari a 0.192g e magnitudo pari a 6.14 nelle condizioni ante operam e post operam.

Si può notare che nello stato di fatto il potenziale di liquefazione calcolato assume valori superiori a 5, mentre nello stato di progetto l'incremento di carico sul fondale marino dovuto alla presenza delle scogliere comporta un notevole abbassamento del potenziale di liquefazione.

Pertanto, non si ritiene necessario alcun intervento di consolidamento legato a questa tematica.

I tabulati di calcolo sono riportati in appendice alla presente relazione.

Tabella 6.2 – LPI per ogni prova.

PROVA	LPI	
	Stato di fatto	Stato di progetto
ID01_CPTU1	6.76	0.03
ID09_CPTU4	6.57	0.08
ID10_CPTU28	2.56	2.56
ID24_CPTU29	7.61	0.23
ID27_CPTU12	5.07	0.10
ID46_CPTU21	5.16	1.25
ID48_CPTU23	5.92	1.1
ID55_CPTU26	0.42	0.00

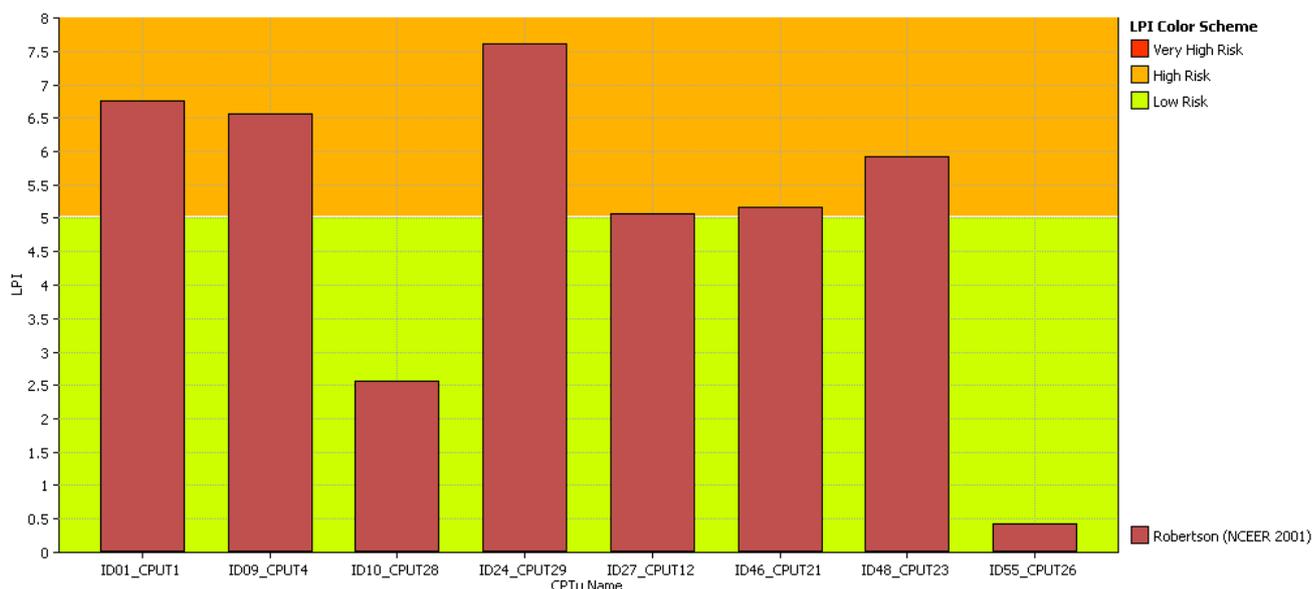


Figura 6.4 – LPI per ogni prova – stato di fatto.

Progetto:

Progettazione preliminare e definitiva delle opere marittime di difesa e dei dragaggi previsti nella nuova prima fase di attuazione della Piattaforma Europa, compreso lo studio di impatto ambientale e la valutazione di incidenza ambientale

Livello progettazione:

Progetto di fattibilità tecnico economica

Elaborato:

GEOLOGIA E GEOTECNICA

1233\_PP-B-004\_0.docx

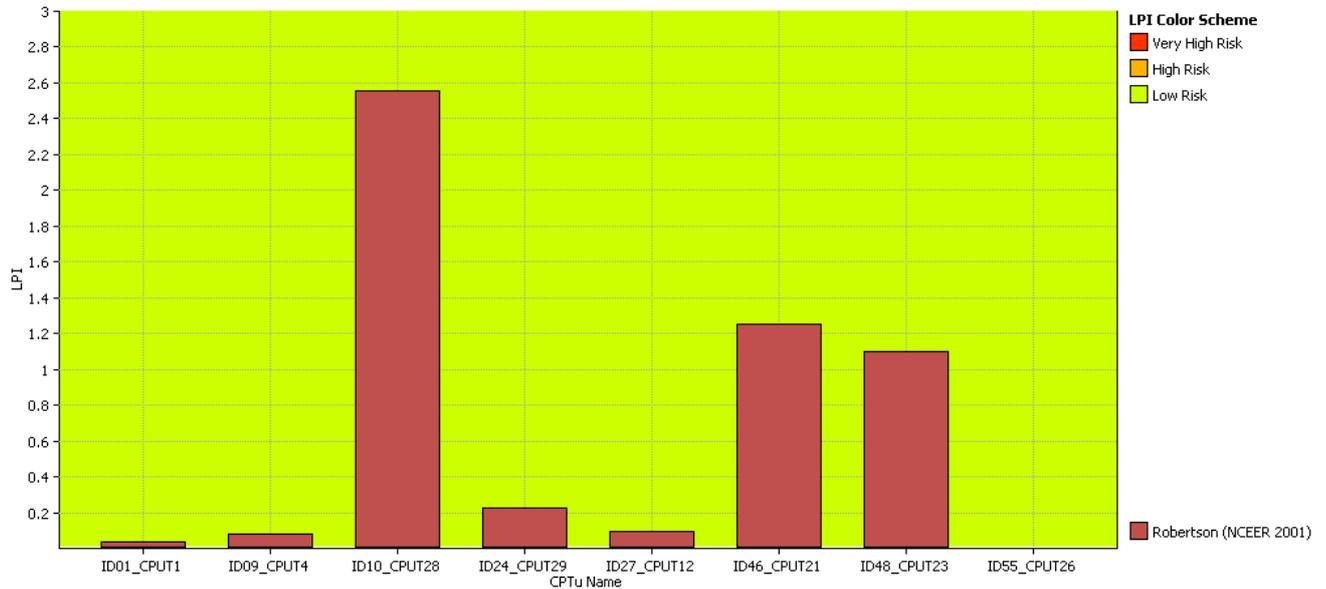


Figura 6.5 – LPI per ogni prova – stato di progetto.

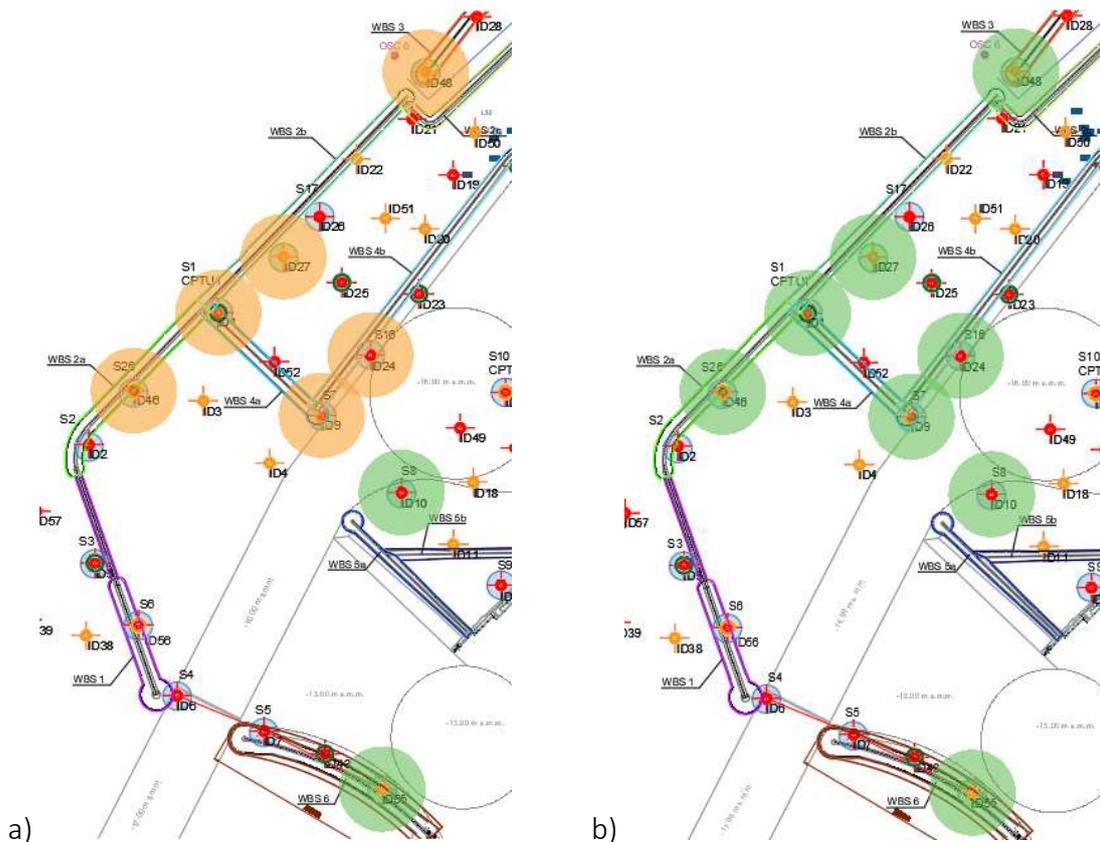


Figura 6.6 – Potenziale di liquefazione: a) Stato di fatto. b) Stato di progetto

Progetto:

Progettazione preliminare e definitiva delle opere marittime di difesa e dei dragaggi previsti nella nuova prima fase di attuazione della Piattaforma Europa, compreso lo studio di impatto ambientale e la valutazione di incidenza ambientale

Livello progettazione:

Progetto di fattibilità tecnico economica

Elaborato:

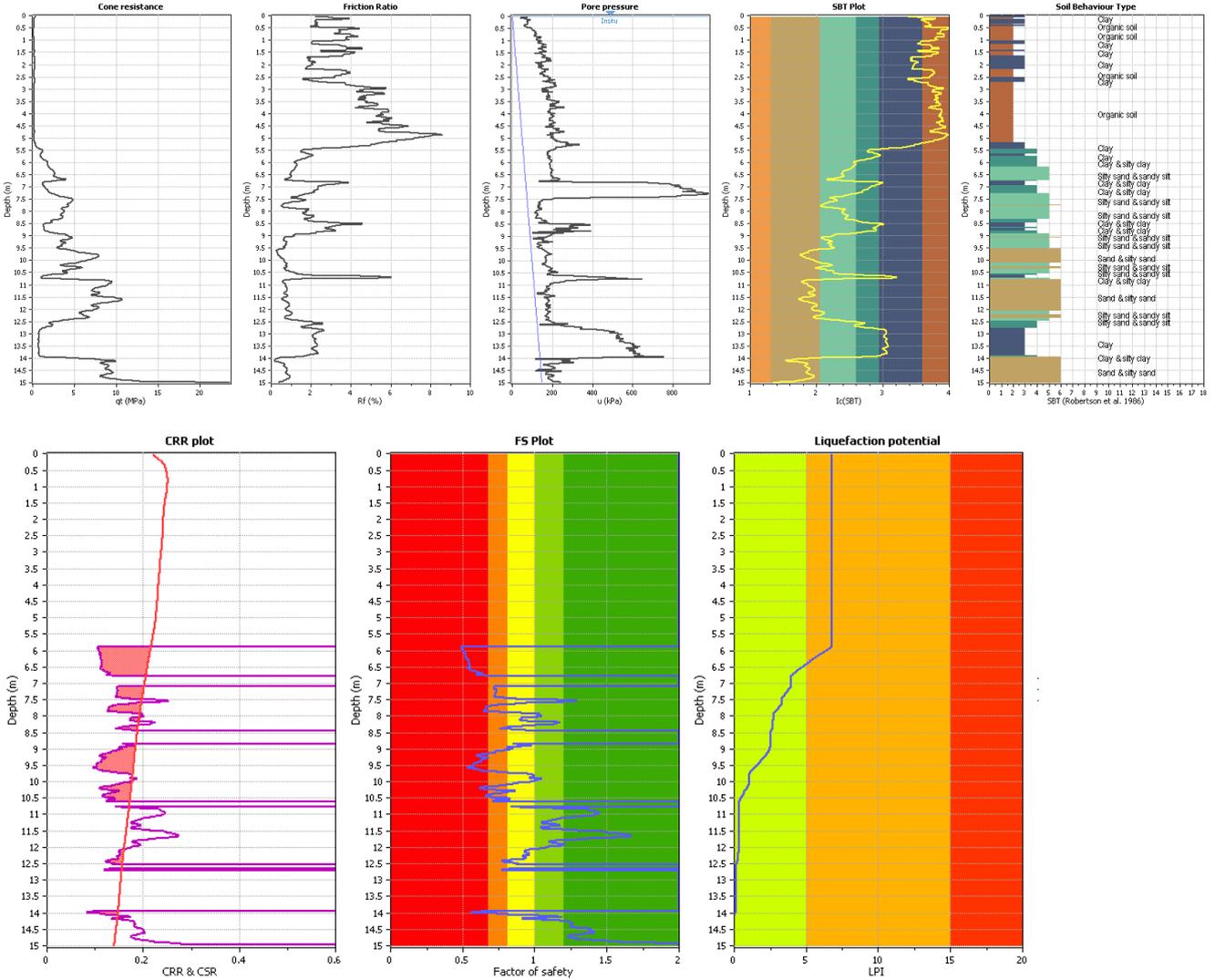
GEOLOGIA E GEOTECNICA

1233\_PP-B-004\_0.docx

## 8 APPENDICE

### 8.1 RISULTATI CLIQ – STATO DI FATTO

#### 8.1.1 ID01\_CPTU1



Progetto:

Progettazione preliminare e definitiva delle opere marittime di difesa e dei dragaggi previsti nella nuova prima fase di attuazione della Piattaforma Europa, compreso lo studio di impatto ambientale e la valutazione di incidenza ambientale

Livello progettazione:

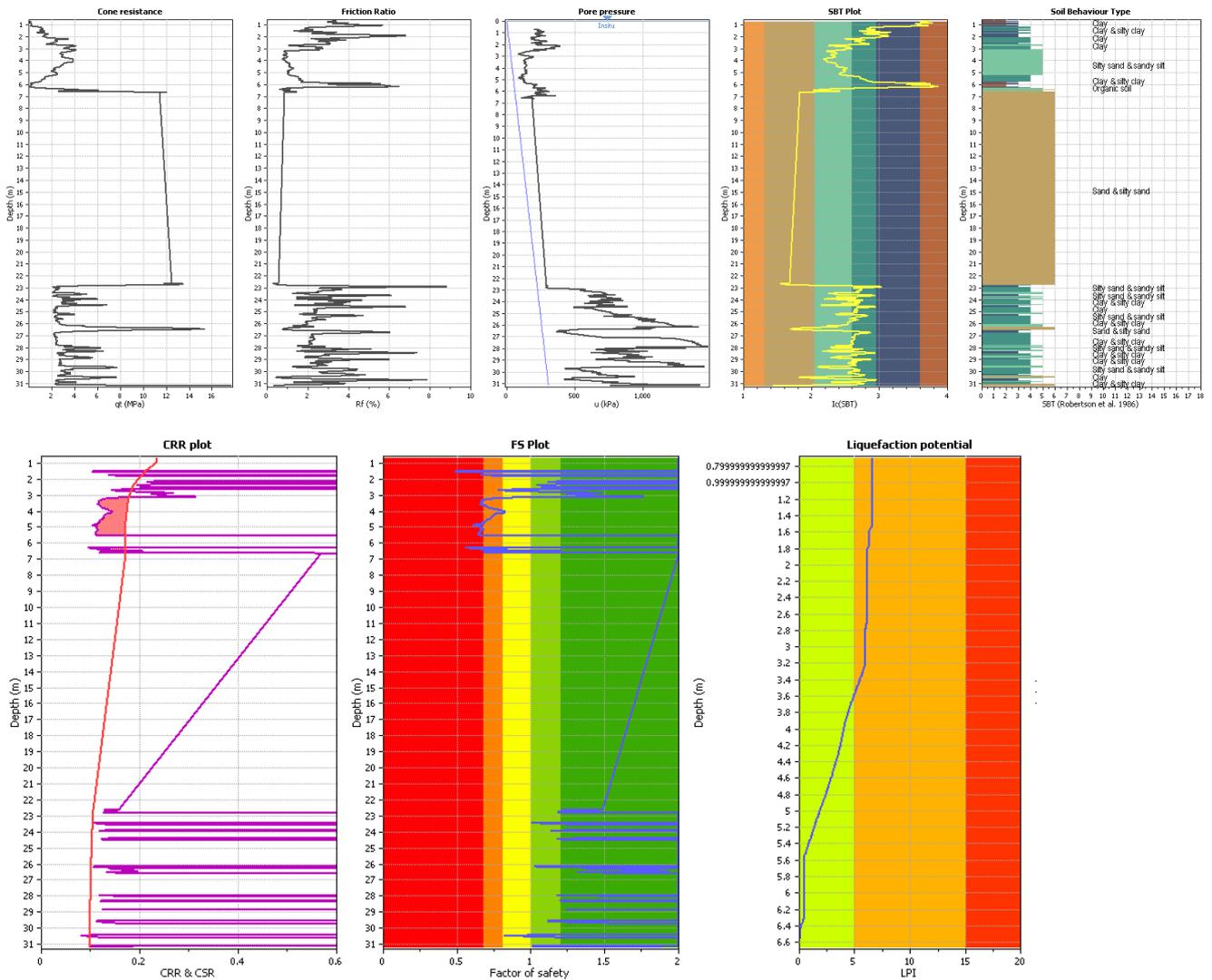
Progetto di fattibilità tecnico economica

Elaborato:

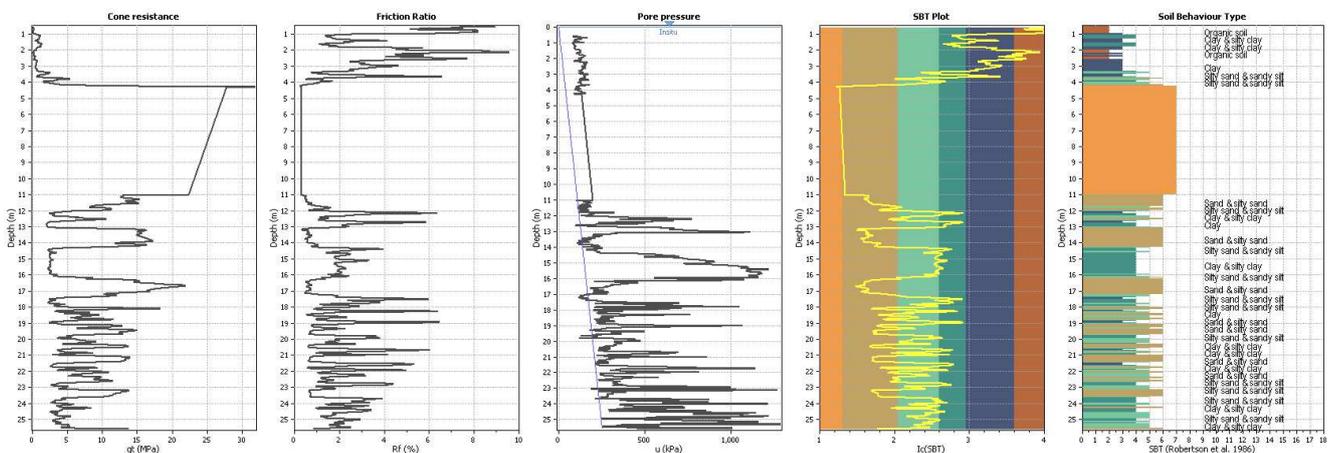
GEOLOGIA E GEOTECNICA

1233\_PP-B-004\_0.docx

### 8.1.2 ID09\_CPTU4



### 8.1.3 ID10\_CPTU28



Progetto:

Progettazione preliminare e definitiva delle opere marittime di difesa e dei dragaggi previsti nella nuova prima fase di attuazione della Piattaforma Europa, compreso lo studio di impatto ambientale e la valutazione di incidenza ambientale

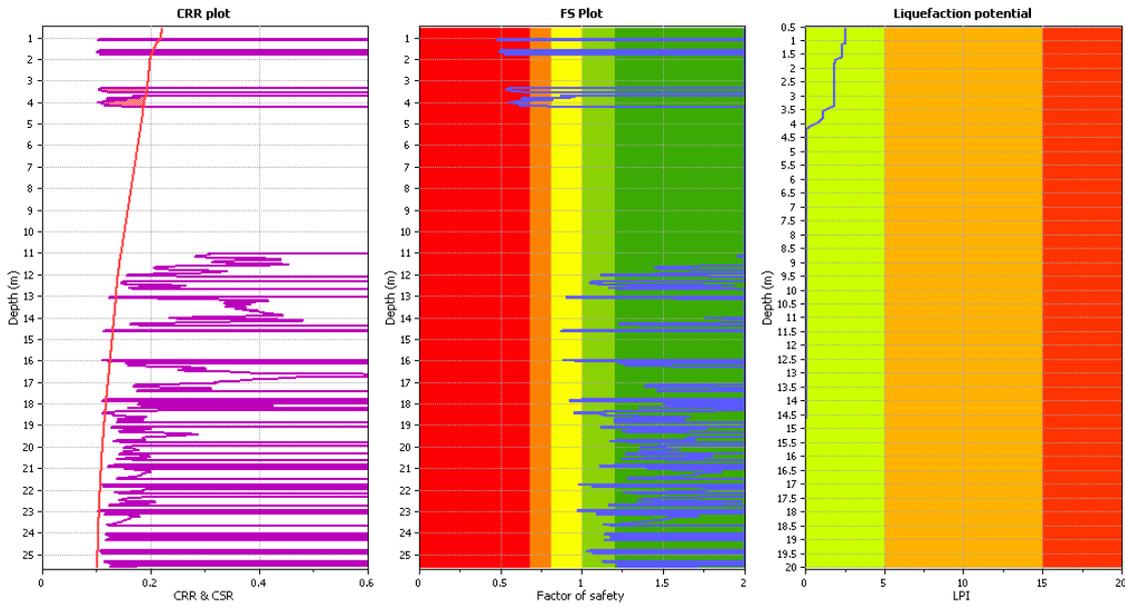
Livello progettazione:

Progetto di fattibilità tecnico economica

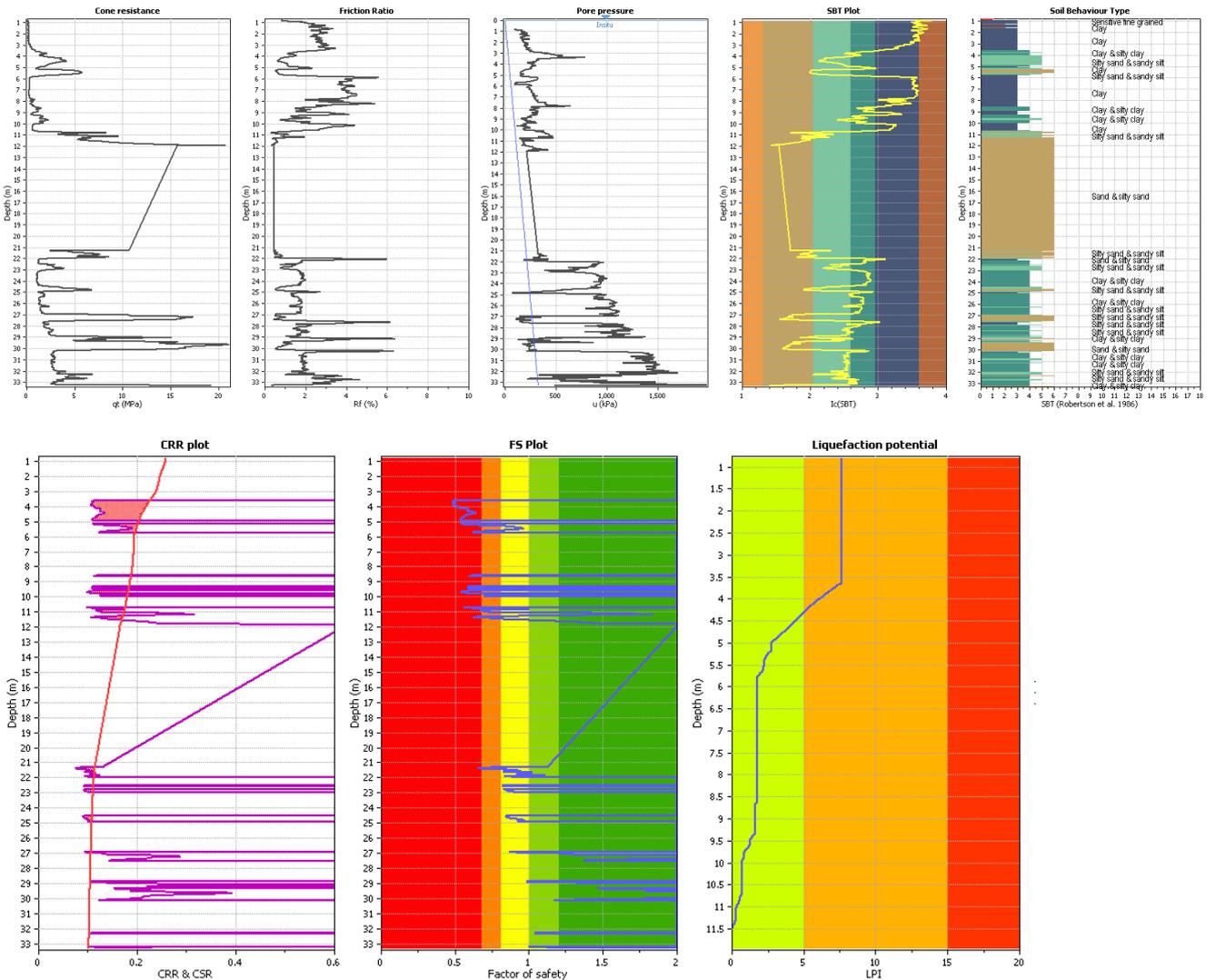
Elaborato:

GEOLOGIA E GEOTECNICA

1233\_PP-B-004\_0.docx



### 8.1.4 ID24\_CPTU29



Progetto:

Progettazione preliminare e definitiva delle opere marittime di difesa e dei dragaggi previsti nella nuova prima fase di attuazione della Piattaforma Europa, compreso lo studio di impatto ambientale e la valutazione di incidenza ambientale

Livello progettazione:

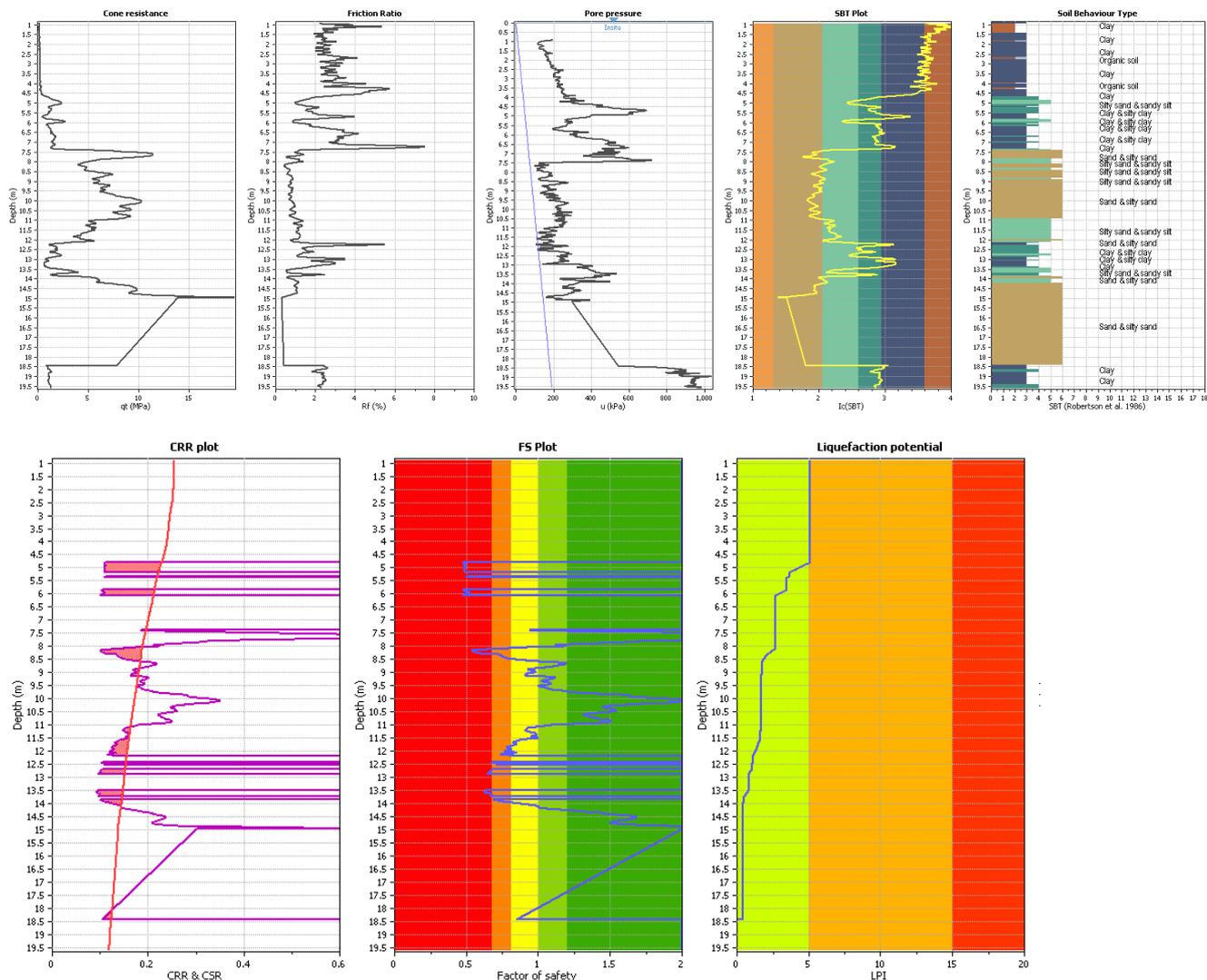
Progetto di fattibilità tecnico economica

Elaborato:

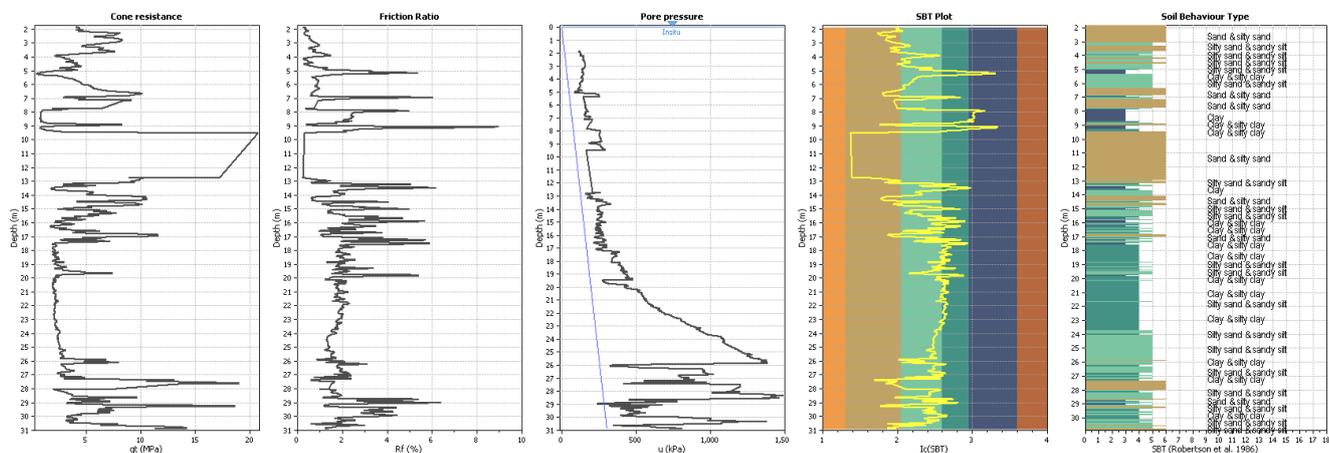
GEOLOGIA E GEOTECNICA

1233\_PP-B-004\_0.docx

### 8.1.5 ID27\_CPTU12



### 8.1.6 ID46\_CPTU21



Progetto:

Progettazione preliminare e definitiva delle opere marittime di difesa e dei dragaggi previsti nella nuova prima fase di attuazione della Piattaforma Europa, compreso lo studio di impatto ambientale e la valutazione di incidenza ambientale

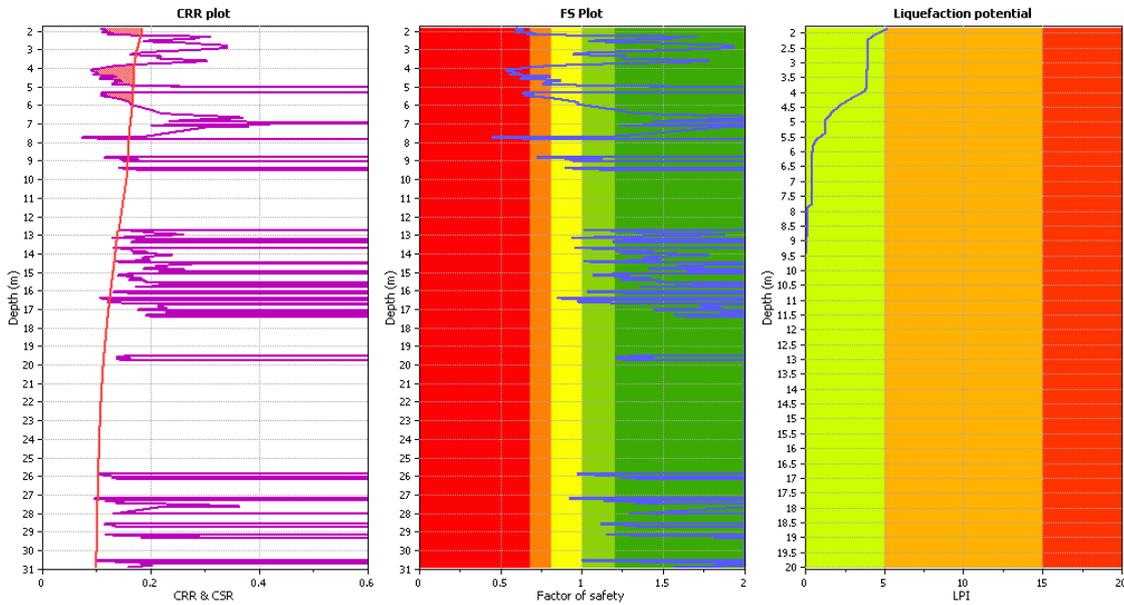
Livello progettazione:

Progetto di fattibilità tecnico economica

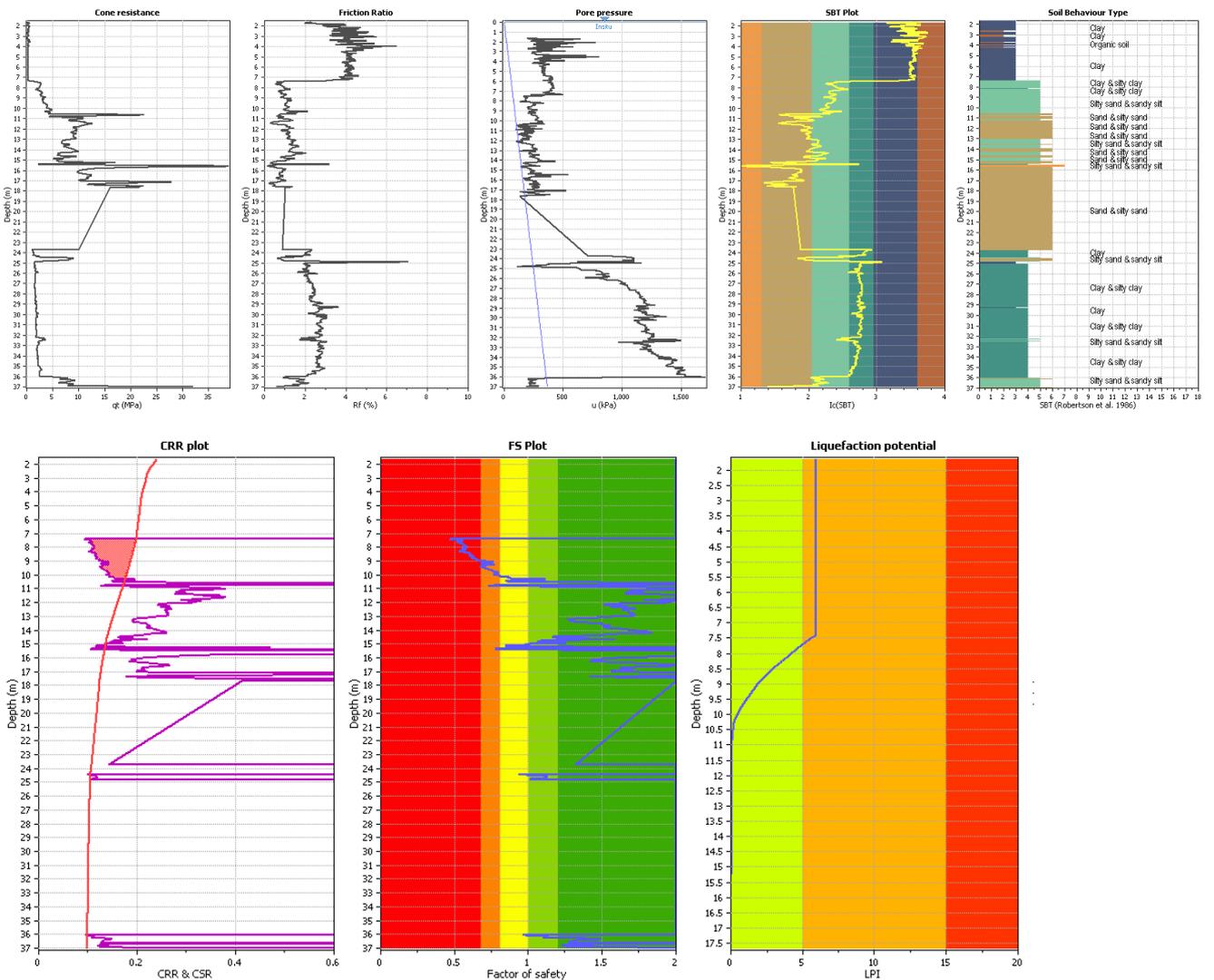
Elaborato:

GEOLOGIA E GEOTECNICA

1233\_PP-B-004\_0.docx



### 8.1.7 ID48\_CPTU23



Progetto:

Progettazione preliminare e definitiva delle opere marittime di difesa e dei dragaggi previsti nella nuova prima fase di attuazione della Piattaforma Europa, compreso lo studio di impatto ambientale e la valutazione di incidenza ambientale

Livello progettazione:

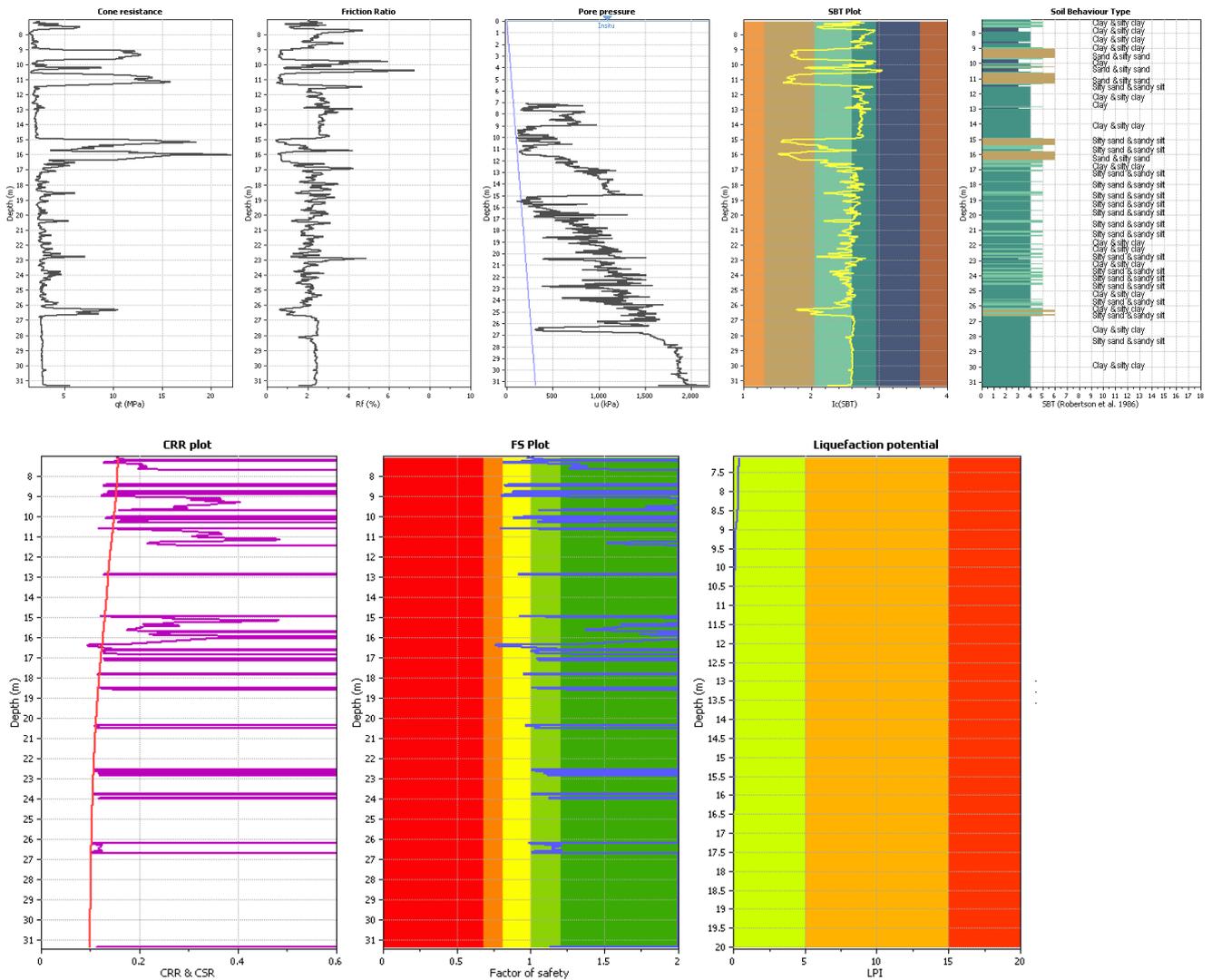
Progetto di fattibilità tecnico economica

Elaborato:

GEOLOGIA E GEOTECNICA

1233\_PP-B-004\_0.docx

### 8.1.8 ID55\_CPTU26



Progetto:

Progettazione preliminare e definitiva delle opere marittime di difesa e dei dragaggi previsti nella nuova prima fase di attuazione della Piattaforma Europa, compreso lo studio di impatto ambientale e la valutazione di incidenza ambientale

Livello progettazione:

Progetto di fattibilità tecnico economica

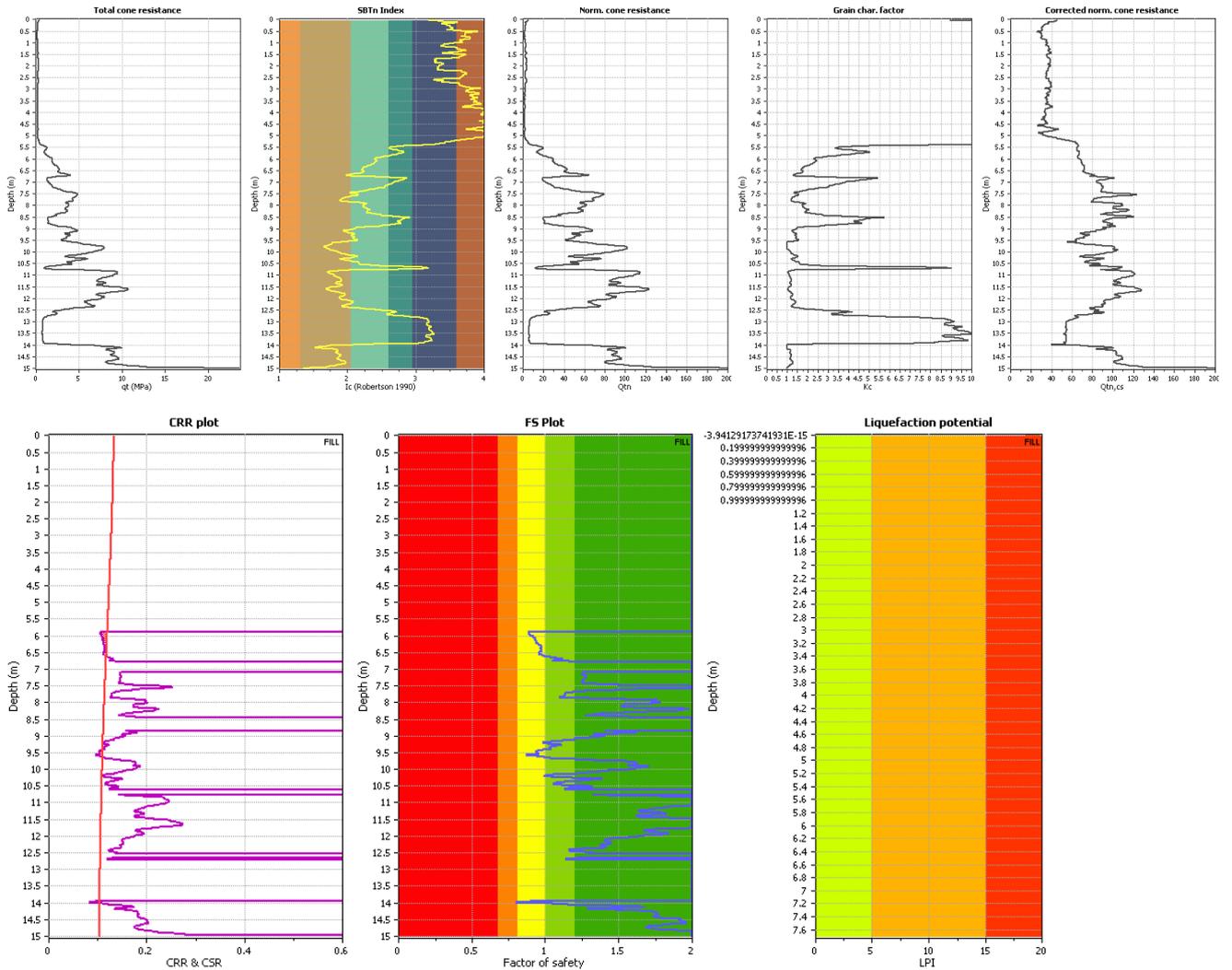
Elaborato:

GEOLOGIA E GEOTECNICA

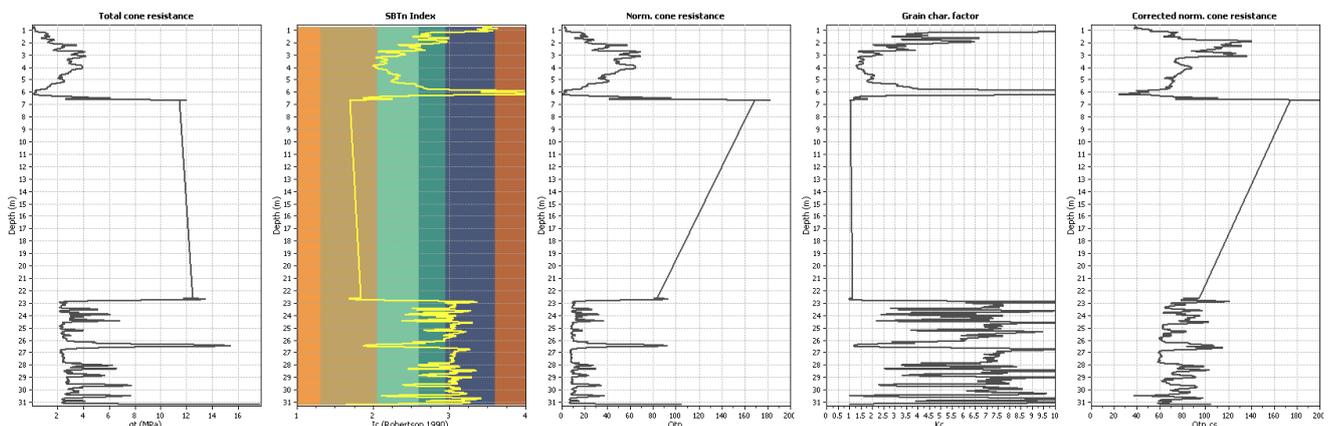
1233\_PP-B-004\_0.docx

## 8.2 RISULTATI CLIQ STATO DI PROGETTO

### 8.2.1 ID01\_CPTU1



### 8.2.2 ID09\_CPTU4



Progetto:

Progettazione preliminare e definitiva delle opere marittime di difesa e dei dragaggi previsti nella nuova prima fase di attuazione della Piattaforma Europa, compreso lo studio di impatto ambientale e la valutazione di incidenza ambientale

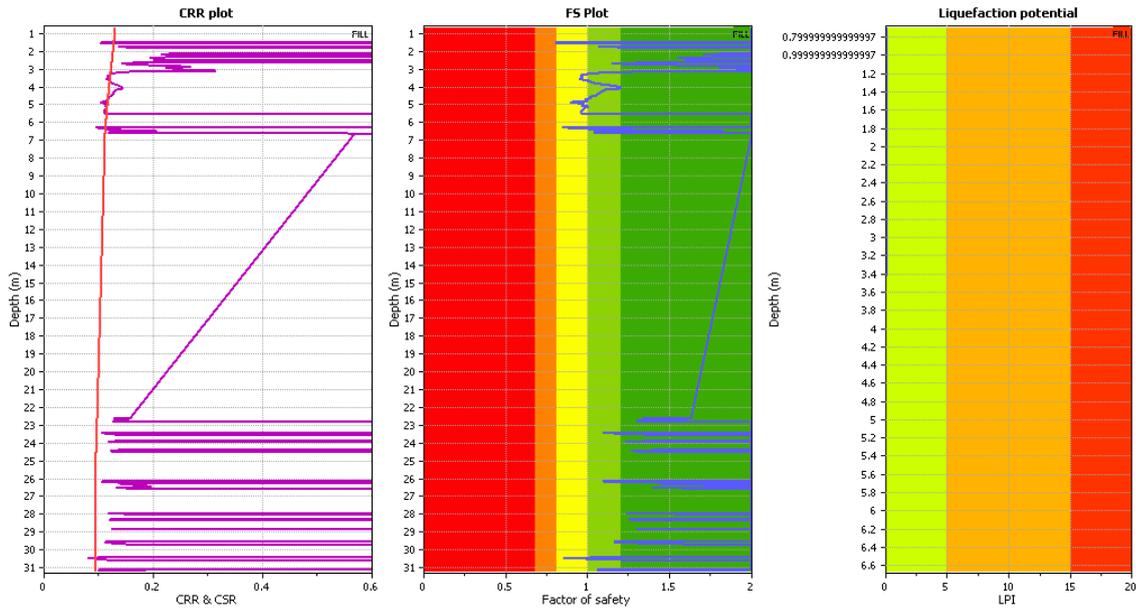
Livello progettazione:

Progetto di fattibilità tecnico economica

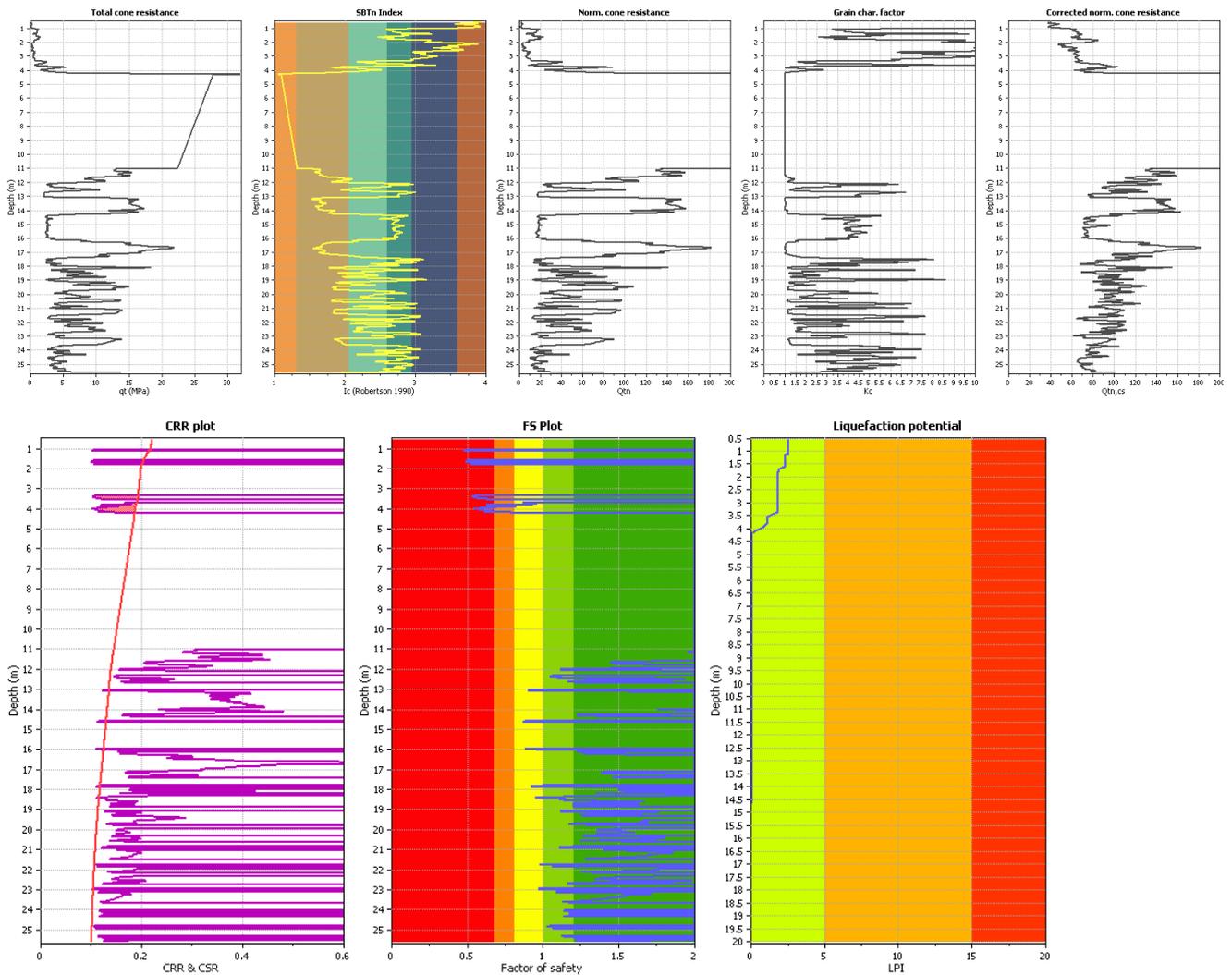
Elaborato:

GEOLOGIA E GEOTECNICA

1233\_PP-B-004\_0.docx



### 8.2.3 ID10\_CPTU28



Progetto:

Progettazione preliminare e definitiva delle opere marittime di difesa e dei dragaggi previsti nella nuova prima fase di attuazione della Piattaforma Europa, compreso lo studio di impatto ambientale e la valutazione di incidenza ambientale

Livello progettazione:

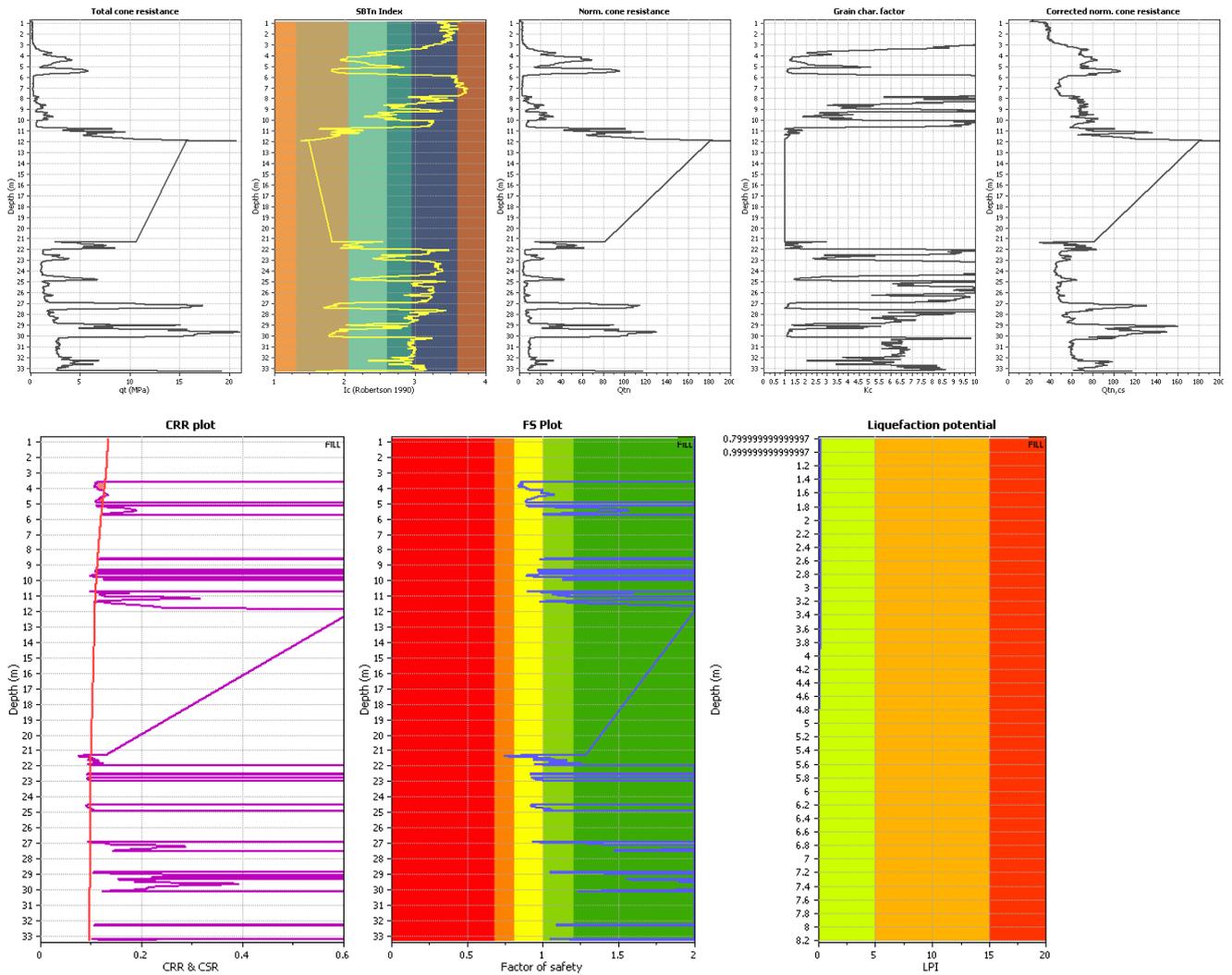
Progetto di fattibilità tecnico economica

Elaborato:

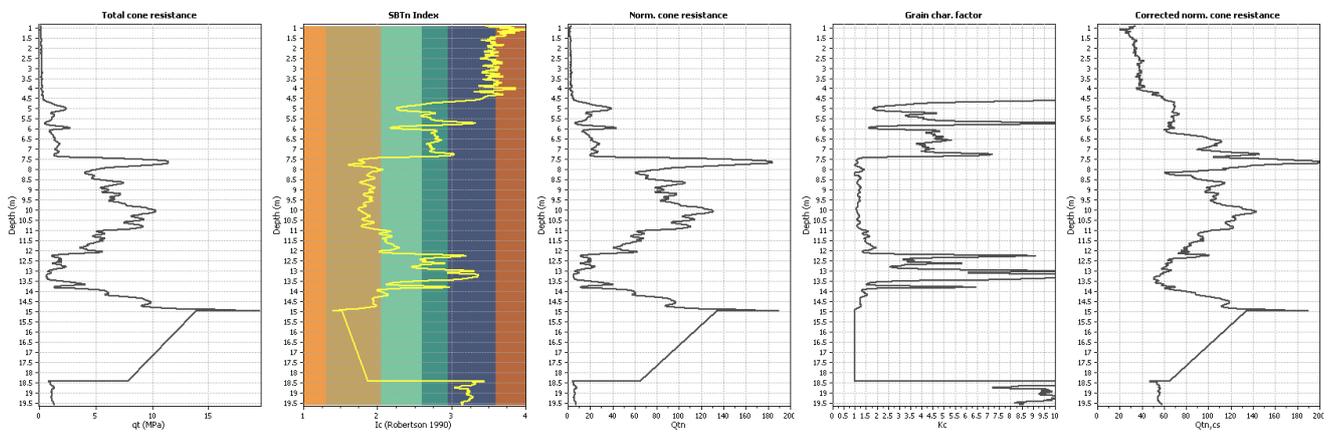
GEOLOGIA E GEOTECNICA

1233\_PP-B-004\_0.docx

### 8.2.4 ID24\_CPTU29



### 8.2.5 ID27\_CPTU12



Progetto:

Progettazione preliminare e definitiva delle opere marittime di difesa e dei dragaggi previsti nella nuova prima fase di attuazione della Piattaforma Europa, compreso lo studio di impatto ambientale e la valutazione di incidenza ambientale

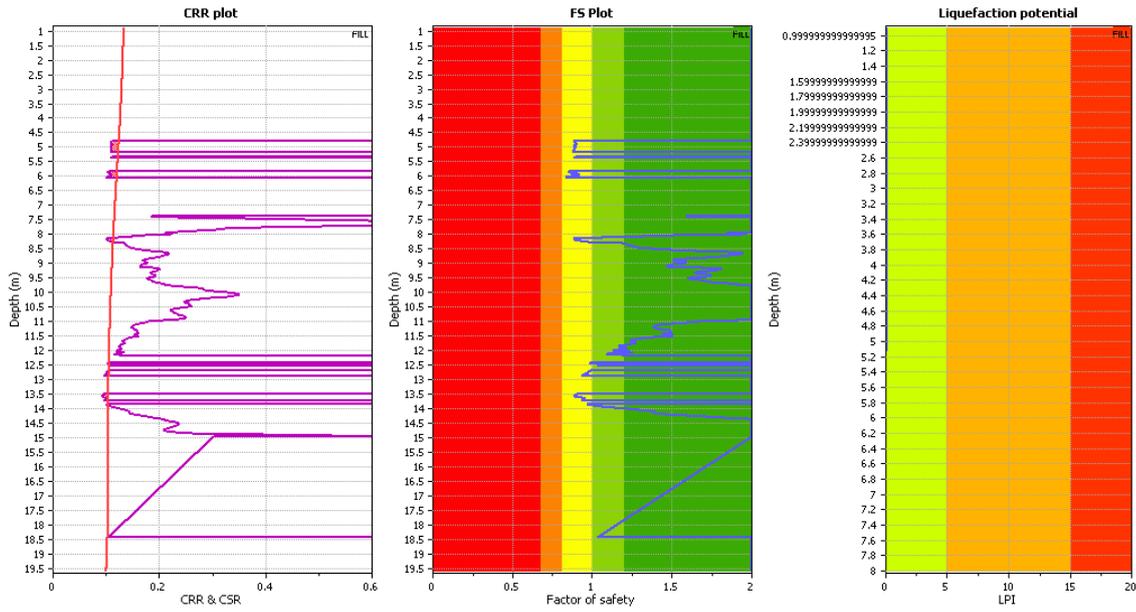
Livello progettazione:

Progetto di fattibilità tecnico economica

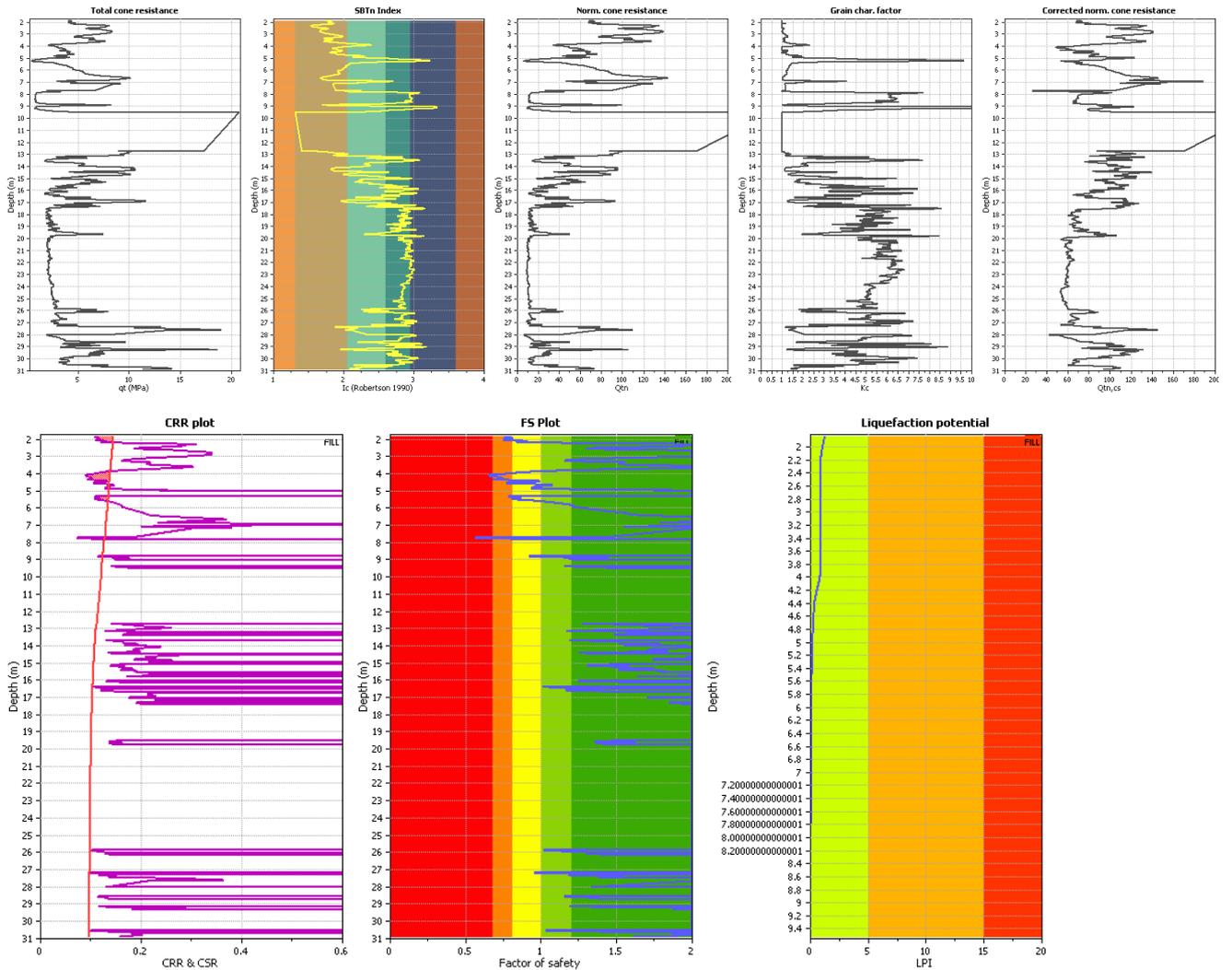
Elaborato:

GEOLOGIA E GEOTECNICA

1233\_PP-B-004\_0.docx



### 8.2.6 ID46\_CPTU21



Progetto:

Progettazione preliminare e definitiva delle opere marittime di difesa e dei dragaggi previsti nella nuova prima fase di attuazione della Piattaforma Europa, compreso lo studio di impatto ambientale e la valutazione di incidenza ambientale

Livello progettazione:

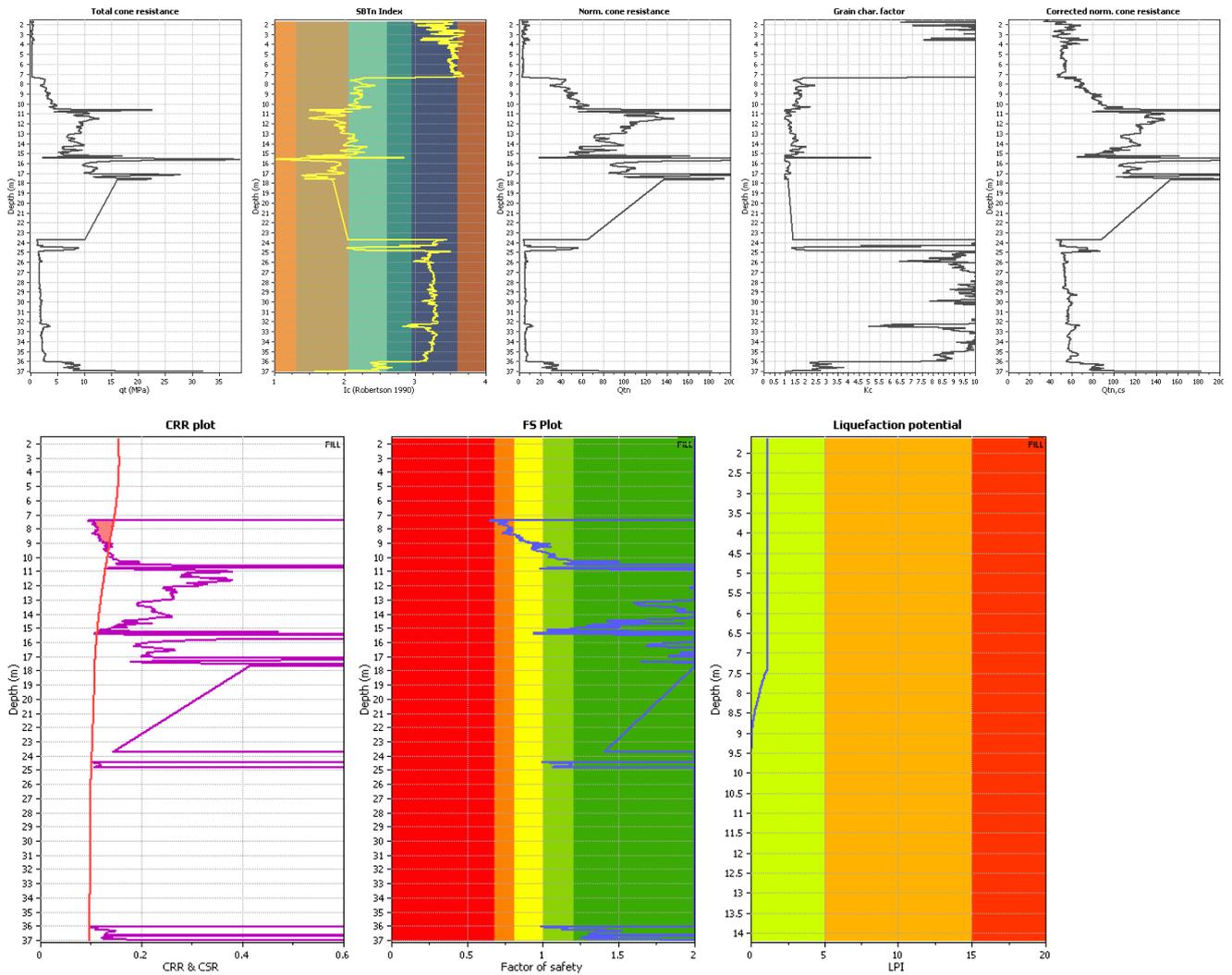
Progetto di fattibilità tecnico economica

Elaborato:

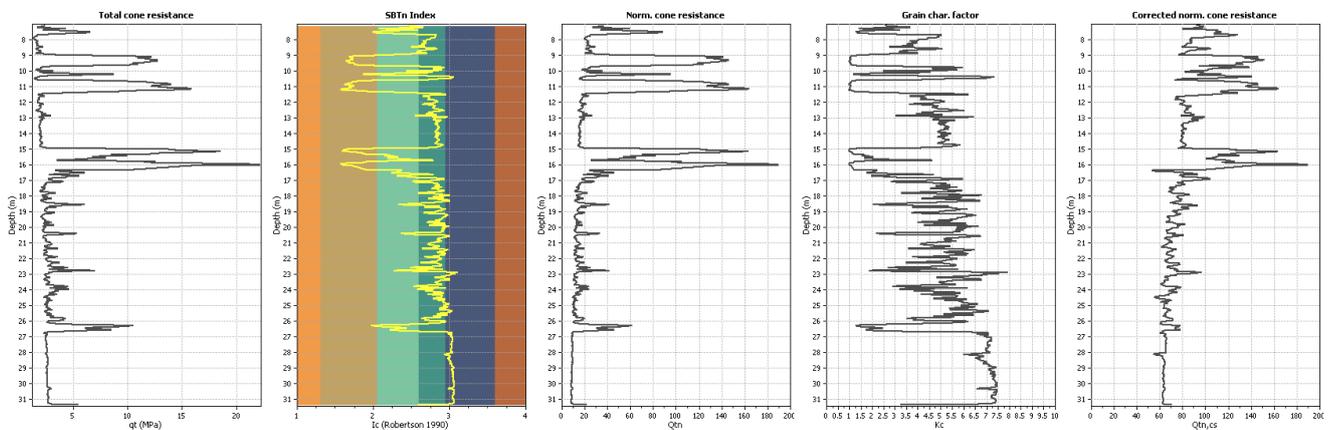
GEOLOGIA E GEOTECNICA

1233\_PP-B-004\_0.docx

### 8.2.7 ID48\_CPTU23



### 8.2.8 ID55\_CPTU26



Progetto:

Progettazione preliminare e definitiva delle opere marittime di difesa e dei dragaggi previsti nella nuova prima fase di attuazione della Piattaforma Europa, compreso lo studio di impatto ambientale e la valutazione di incidenza ambientale

Livello progettazione:

Progetto di fattibilità tecnico economica

Elaborato:

GEOLOGIA E GEOTECNICA

1233\_PP-B-004\_0.docx

