

Regione Emilia-Romagna
Direzione Generale Cura del Territorio e dell'Ambiente

IDROVIA FERRARESE - 1° LOTTO 1° STRALCIO
DEMOLIZIONE E RICOSTRUZIONE BOTTE SIFONE DEL CANALE CITTADINO
ALL'ATTRAVERSAMENTO DEL CANALE BOICELLI

PROGETTO ESECUTIVO

RUP:

Dott. Claudio Miccoli
REGIONE EMILIA-ROMAGNA
AGENZIA REGIONALE PER LA SICUREZZA TERRITORIALE E LA PROTEZIONE CIVILE
SERVIZIO AREA RENO PO DI VOLANO - SEDE DI FERRARA

PROGETTAZIONE:

 Via Francesco Zanardi 157/6 - 40131 Bologna (I)
MC Engineering Srl 
Tel +39 051 4211945 - info@studio-chinni.it

Direttore tecnico:
Ing. Mario Chinni
(Albo Ingegneri Bologna nr. 4776/A)

Gruppo di lavoro:
Ing. Giorgio Fantini
Ing. Cristina Osti
Geom. Dario Calvanese




Titolo:

RELAZIONE GEOTECNICA

Codice elaborato


1 3 1 6 R 6 0 1 0 E 1

Data	04/06/2018	Archivio	1316_R_6010_E_1.pdf	Scala	-
01	04/06/2018	Aggiornamento per passaggio competenza RER		MC	GF MC
00	30/09/2016	Emissione		MC	GF MC
Rev.	Data	Oggetto		Redatto	Controllato Approvato

 Via Francesco Zanardi 157/6 - 40131 Bologna (I) MC Engineering Srl Tel +39 051 4211945 - info@studio-chinni.it <small>ISO 9001 392876</small>	Cliente: REGIONE EMILIA ROMAGNA	Codice: 1316-R-6010-E-1 Data: 04/06/2018
	Demolizione e ricostruzione della botte sifone del canale Cittadino all'attraversamento del canale Boicelli	Relazione geotecnica

INDICE

1	INTRODUZIONE	2
2	NORME DI RIFERIMENTO	4
3	INQUADRAMENTO geologico, GEOMORFOLOGICO, IDROLOGICO	5
3.1	Geologia	5
3.2	Geomorfologia e idrogeologia.....	6
3.3	Inquadramento strutturale e sismico.....	7
4	INDAGINI GEOGNOSTICHE	9
5	INTERAZIONE TERRENO STRUTTURA IN PROSPETTIVA SISMICA.....	9
5.1	Categoria stratigrafica del suolo	9
5.2	Liquefazione	10
5.3	Spostamenti verticali a seguito del sisma di progetto per liquefazione del terreno.....	12
6	MODELLO STRATIGRAFICO E PARAMETRI CARATTERISTICI.....	14
6.1	Parametri di resistenza	14
6.2	Modulo del terreno.....	14
6.3	Moduli di reazione.....	15
6.4	Parametri di resistenza della scogliera	16
7	INTERVENTI DI CONSOLIDAMENTO	18
8	PALI DI FONDAZIONE	20
8.1	Resistenza SLU	20
8.1.1	<i>Combinazioni ed approcci di carico</i>	20
8.1.2	<i>Modalità di determinazione della resistenza di calcolo</i>	20
8.2	Curve di trasferimento del carico (SLE).....	22
9	VERIFICHE DI STABILITA'	25
9.1	Scavo per la condotta di collegamento della botte sifone.....	25
9.2	Scogliera di protezione argine	27
	APPENDICE A – ANALISI PROVE CPTU	29
	APPENDICE B – RESISTENZA DEI PALI ISOLATI	40
	APPENDICE C – TABULATI SLIDE	57

 Via Francesco Zanardi 157/6 - 40131 Bologna (I) MC Engineering Srl Tel +39 051 4211945 - info@studio-chinni.it <small>ISO 9001 392876</small>	Cliente: REGIONE EMILIA ROMAGNA	Codice: 1316-R-6010-E-1 Data: 04/06/2018
	Demolizione e ricostruzione della botte sifone del canale Cittadino all'attraversamento del canale Boicelli	Relazione geotecnica

1 INTRODUZIONE

Il presente rapporto tratta degli aspetti geotecnici e delle indagini geognostiche eseguite per il progetto di demolizione e ricostruzione della botte sifone del canale cittadino in corrispondenza dell'interferenza con il canale Boicelli a Ferrara (FE) in prossimità del ponte di Via Michelini. Il progetto prevede quindi l'adeguamento della nuova botte sifone ai pescaggi richiesti dalle imbarcazioni della V classe europea che interferiscono con la botte sifone esistente. In figura 1.1 viene individuata l'area di intervento.




Fig. 1.1 – Stralcio aereo

Le principali opere previste risultano quindi descritte da:

- 1) Condotta in cls armato della botte sifone caratterizzata da una lunghezza di circa 57 m.
- 2) Opere provvisoriale di contenimento dello scavo formate da palancole combinate con puntello nella zona sommitale a formare un perimetro chiuso impermeabile.
- 3) Formazione di colonne di terreno consolidato per contrastare i fenomeni di sifonamento e sollevamento del fondo scavo durante il transitorio di esecuzione e garantire un adeguato sedime al cunicolo della botte sifone.


La presente relazione integra, relativamente al tratto di interesse, gli elaborati compresi nella "Progettazione Preliminare, Definitiva ed Esecutiva del nuovo tratto di Idrovia per l'attraversamento della città di Ferrara, dalla conca di Pontelagoscuro all'abitato di Baura (FE)": Progetto definitivo - 1 Lotto - 1 Stralcio: dalla conca di Pontelagoscuro alla

 Via Francesco Zanardi 157/6 - 40131 Bologna (I) MC Engineering Srl Tel +39 051 4211945 - info@studio-chinni.it <small>ISO 9001 392876</small>	Cliente: REGIONE EMILIA ROMAGNA	Codice: 1316-R-6010-E-1 Data: 04/06/2018	
	Demolizione e ricostruzione della botte sifone del canale Cittadino all'attraversamento del canale Boicelli	Relazione geotecnica	

confluenza con il Canale Burana – redatto nell'aprile 2009 da C.Lotti e Associati SpA - CNR - CESI - RPA - S.TE.P, (denominato da ora PD09) con particolare riferimento a:


- Elaborato 1.2.1 – Relazione Geologica
- Elaborato 1.3.1 – Relazione Geotecnica
- Elaborato 1.4 – Indagini geognostiche

La presente relazione tratta gli argomenti generali relativi agli aspetti geotecnici rimandando per quelli specifici agli elaborati dedicati al calcolo dei manufatti.

 Via Francesco Zanardi 157/6 - 40131 Bologna (I) MC Engineering Srl Tel +39 051 4211945 - info@studio-chinni.it <small>ISO 9001 392876</small>	Cliente: REGIONE EMILIA ROMAGNA	Codice: 1316-R-6010-E-1 Data: 04/06/2018
	Demolizione e ricostruzione della botte sifone del canale Cittadino all'attraversamento del canale Boicelli	Relazione geotecnica

2 NORME DI RIFERIMENTO

- Decreto Ministero delle Infrastrutture del 14 gennaio 2008. - *Norme Tecniche per le Costruzioni* (G.U. n. 29 del 04/02/2008 - Suppl. Ordinario n.30)
- CSLPP - Circolare 2 febbraio 2009, n.617. – Nuova Circolare delle Norme Tecniche per le Costruzioni (G.U. n. 27 del 26/02/2009 – Suppl. Ordinario n. 27)
- UNI EN 1997-1 – Eurocodice 7 “Progettazione geotecnica. Parte 1: Regole Generali”
- UNI EN 1998-5 – Eurocodice 8 “Progettazione delle strutture per la resistenza sismica. Parte 5: Fondazioni, strutture di contenimento ed aspetti geotecnici”

 Via Francesco Zanardi 157/6 - 40131 Bologna (I) MC Engineering Srl Tel +39 051 4211945 - info@studio-chinni.it <small>ISO 9001 392876</small>	Cliente: REGIONE EMILIA ROMAGNA	Codice: 1316-R-6010-E-1 Data: 04/06/2018
	Demolizione e ricostruzione della botte sifone del canale Cittadino all'attraversamento del canale Boicelli	Relazione geotecnica

3 INQUADRAMENTO GEOLOGICO, GEOMORFOLOGICO, IDROLOGICO

3.1 Geologia

Il territorio comunale di Ferrara ricade in un'area caratterizzata in superficie dall'affioramento dei depositi olocenici della piana deltizia del fiume Po (fig.3.1). Questi depositi rappresentano lo stadio attuale del progressivo colmamento che ha interessato i bacini sedimentari plio-pleistocenici dell'avampese padano-adriatico.

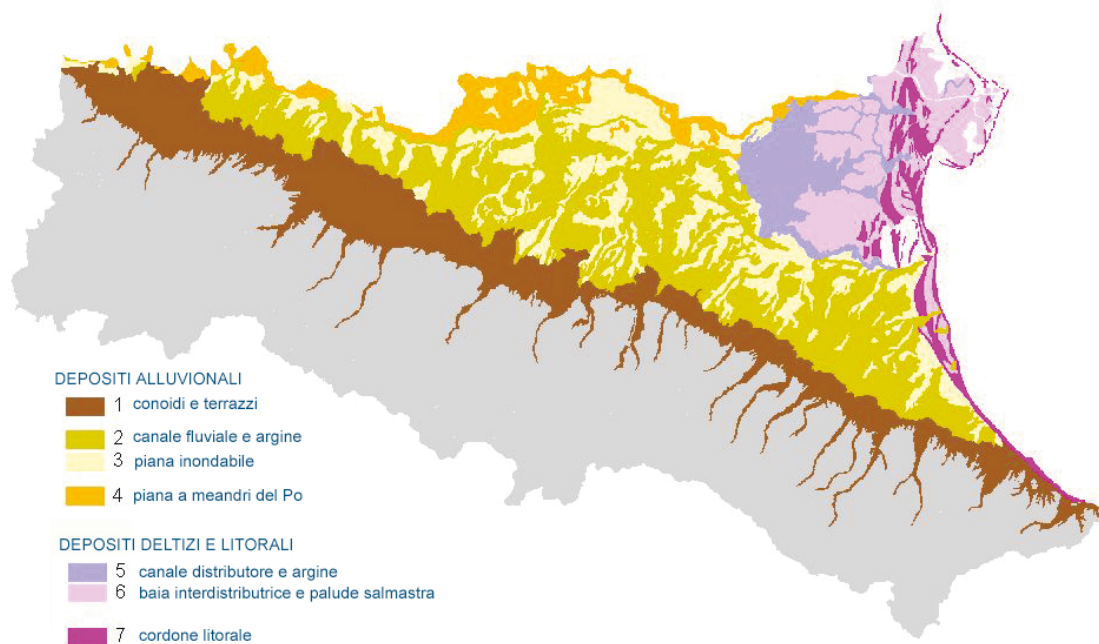



Fig. 3.1 Estratto Carta Geologica di Pianura - scala 1:250.000, sintesi dei sistemi deposizionali (Servizio Geologico, Sismico e dei Suoli, ambiente.regione.emilia-romagna.it)

I depositi che formano l'ossatura della Pianura Padana costituiscono il riempimento del bacino e sono rappresentati da una successione di depositi marini, deltizi, lagunari, palustri e alluvionali poggianti su un substrato caratterizzato da una complessa configurazione a pieghe con assi tettonici paralleli ai principali allineamenti strutturali appenninici (NW-SE). La successione stratigrafica dell'area è il risultato di alterne vicende legate all'avanzamento e all'arretramento della linea di costa in concomitanza alle fluttuazioni climatiche ed eustatiche ed agli accentuati fenomeni tettonici e di subsidenza che interessano il territorio in esame sin dai tempi geologici remoti. La pluralità degli ambienti deposizionali, sia a livello spaziale che temporale, causa un'elevata variabilità litologica degli strati costituiti da sabbie, limi e argille. In particolare la frequenza di queste variazioni litologiche risulta più evidente nella parte finale del Quaternario, in concomitanza con la glaciazione Würmiana (60-75 kanni) quando il livello del mare si è abbassato di circa 100 m rispetto all'attuale con deposizione di sedimenti prevalentemente continentali, costituiti da argille alluvionali con intercalazioni di corpi sabbiosi irregolari che rappresentano i depositi fluviali di alveo o di esondazione, e con la successiva fase trasgressiva Flandriana

 Via Francesco Zanardi 157/6 - 40131 Bologna (I) MC Engineering Srl Tel +39 051 4211945 - info@studio-chinni.it <small>ISO 9001 392876</small>	Cliente: REGIONE EMILIA ROMAGNA	Codice: 1316-R-6010-E-1 Data: 04/06/2018
	Demolizione e ricostruzione della botte sifone del canale Cittadino all'attraversamento del canale Boicelli	Relazione geotecnica

(ca 17 anni) caratterizzata dalla deposizione di sabbie fini con frequenti intercalazioni limoso-argillose tipiche di ambiente litorale e sedimenti di bassa consistenza con lenti di sabbia fine tipici di un ambiente marino poco profondo. Terminata la trasgressione Flandriana la linea di costa è rimasta nella stessa posizione per alcune migliaia di anni fino a raggiungere l'attuale posizione durante la fase regressiva Olocenica.

I depositi rinvenibili nell'area risultano appartenere sia ai depositi di argine, canale e rotta fluviale sia ai depositi di piana a meandri del Po. In particolare, i depositi presenti nell'area progettuale sono riconducibili a terreni sabbioso-argillosi (contenenti dal 25 al 40% di materiali argillosi). L'area oggetto di caratterizzazione si colloca in corrispondenza dei depositi argillosi e sabbiosi riconducibili al settore di piana alluvionale (passante a deltizio) dell'Unità di Modena (AES8_a), che caratterizzano i primi 5-6 m di sequenza deposizionale; al di sotto di questo si ritrovano poi termini comunque coesivi e talvolta limo-sabbiosi associabili al Subsistema di Ravenna (AES8), affiorante diffusamente nel territorio ferrarese.


3.2 Geomorfologia e idrogeologia

L'assetto topografico delle pianure alluvionali è funzione dei processi, lenti, di subsidenza e deposizione, gli stessi che rendono la Pianura Padana in continuo stato di dinamicità. La deposizione è operata chiaramente dai corsi d'acqua ed è un processo naturale di apporto di sedimenti, mentre la subsidenza, ovvero la progressiva contrazione delle sequenze deposizionali, può avere concause antropiche, quali il massiccio emungimento di acqua dal sottosuolo.

Dal punto di vista geomorfologico, il sito di progetto si inserisce nel sistema della pianura padana, ad una quota altimetrica di circa 6 m s.l.m.. In generale, le vicende e quindi le caratteristiche geomorfologiche della pianura emiliano romagnola sono strettamente legate all'evoluzione ed alla dinamica evolutiva del Fiume Po, del suo delta e della costa adriatica. In superficie affiorano in modo uniforme depositi alluvionali, che tuttavia presentano granulometrie diversificate, in genere più ghiaiose verso il margine appenninico e via via più fini, fino ai limi e alle argille, verso il mare. Più in profondità, questi sedimenti continuano per varie decine di metri, ma con spessori anche notevolmente diversi da luogo a luogo e in corpi prevalentemente lentiformi. Successivamente si rinvergono depositi marini, sia di spiaggia che di mare profondo, e infine la roccia vera e propria, variamente deformata e fratturata.

Con riferimento alle caratteristiche idrogeologiche dell'area di intervento, sulla base di dati di carattere bibliografico può essere definita, dall'alto verso il basso, la sequenza stratigrafica di seguito descritta (per gli aspetti locali, desunti dalle indagini integrative, si rimanda all'elaborato 1316-G-6010-D (Ubicazione indagini e profilo stratigrafico).

- Livello 1, eterogeneo, costituito da terreni a granulometria prevalentemente fine (limi, argille, limi sabbiosi con tutti i termini intermedi) di spessore variabile ma mediamente compreso tra 5 e 7.5 metri. Localmente in superficie sono presenti materiali di riporto, per uno spessore generalmente non superiore al metro. Sono inoltre presenti livelli più o meno continui di litologia relativamente permeabile (sabbie fini e sabbie limose), sede della falda freatica con caratteristiche di permeabilità fortemente eterogenee. I termini sabbiosi, sede dell'acquifero freatico, sono spesso direttamente affioranti, e comunque sempre molto superficiali. Relativamente al fiume Po, non sembra essere presente alcuna connessione idraulica con l'acquifero freatico.


 Via Francesco Zanardi 157/6 - 40131 Bologna (I) MC Engineering Srl Tel +39 051 4211945 - info@studio-chinni.it <small>ISO 9001 392876</small>	Cliente: REGIONE EMILIA ROMAGNA	Codice: 1316-R-6010-E-1 Data: 04/06/2018
	Demolizione e ricostruzione della botte sifone del canale Cittadino all'attraversamento del canale Boicelli	Relazione geotecnica

- Livello 2, prevalentemente argilloso, costituito da termini granulometricamente fini di colore grigio, con locale aumento della componente limosa, alternati a locali livelletti centimetrici sabbiosi. Sono spesso presenti residui vegetali e livelletti torbosi di spessore da centimetrico a decimetrico. Lo spessore complessivo del livello, generalmente non inferiore ai 5 metri, mediamente si attesta sui 10 metri. L'orizzonte separa l'acquifero freatico superficiale dal primo acquifero in pressione sottostante.
- Livello 3, prevalentemente sabbioso, di granulometria variabile ma generalmente grossolana, in cui si rinvencono locali e subordinate intercalazioni limose e limoso-argillose. Tale orizzonte permeabile si rinviene generalmente a profondità superiori ai 12 metri e mediamente dell'ordine dei 20 metri, con spessori medi dell'ordine dei 20 metri e mai inferiori ai 6 metri. Le profondità massime raggiunte da tale livello sono dell'ordine dei 40-45 metri. Tale livello è sede del primo acquifero in pressione, il più importante serbatoio sotterraneo d'acqua dolce utilizzato per scopi privati e industriali. In funzione della sua profondità e delle caratteristiche litologiche dei terreni sovrastanti, per tale corpo sabbioso si possono escludere relazioni idrodinamiche con i corpi idrici superficiali, con esclusione del fiume Po.
- Livello 4, prevalentemente argilloso, si rinviene a profondità sempre superiori ai 30-35 metri. L'orizzonte separa il primo acquifero in pressione, presente nel livello 3, dal secondo acquifero in pressione sottostante.

La falda in pressione è stata rilevata a profondità variabili da 1.50 m slm a 5.00 m slm. La piezometria locale è fortemente influenzata dal regime dei prelievi attuato all'interno dei complessi industriali e dalla regolazione dei canali. Durante l'esecuzione della campagna di indagini del marzo 2014, i livelli rilevati in foro durante l'esecuzione delle CPTU sono risultati a profondità di 1.50 m dal piano di indagine (4.60 m slm).

3.3 **Inquadramento strutturale e sismico**

In riferimento allo schema tettonico riportato di seguito (figura 3.2) si nota che l'assetto strutturale del bacino Padano è dato da una serie di pieghe e thrust ad andamento parallelo con orientazione NW-SE. In particolare la zona di interesse ricade in un'area caratterizzata da una fascia di pieghe e sovrascorrimenti con forma arcuata ("pieghe ferraresi").

 Via Francesco Zanardi 157/6 - 40131 Bologna (I) MC Engineering Srl Tel +39 051 4211945 - info@studio-chinni.it	Cliente: REGIONE EMILIA ROMAGNA	Codice: 1316-R-6010-E-1 Data: 04/06/2018
	Demolizione e ricostruzione della botte sifone del canale Cittadino all'attraversamento del canale Boicelli	Relazione geotecnica

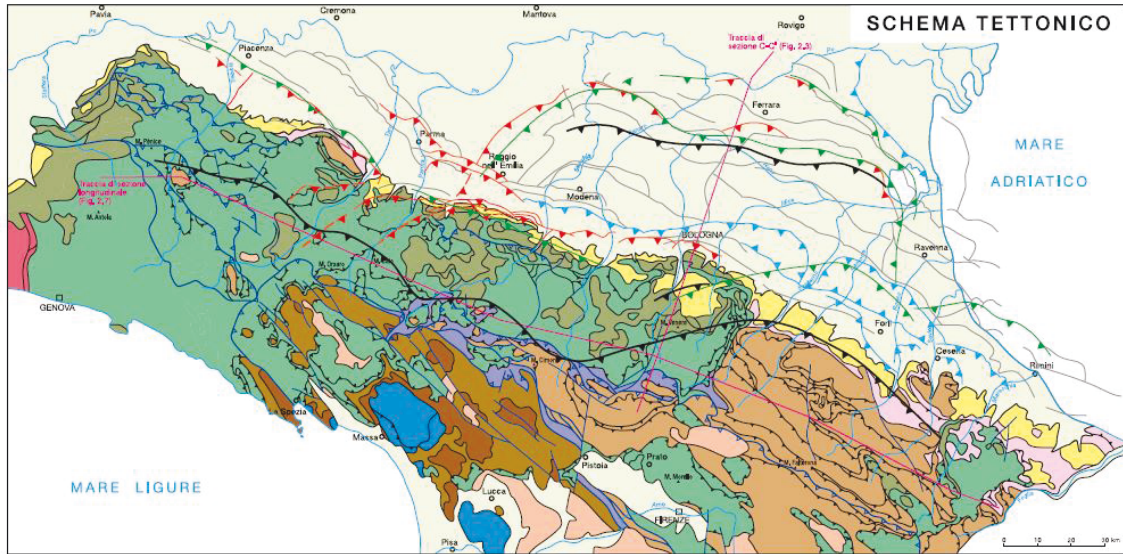



Fig 3.4 – Schema Tettonico dell'Emilia Romagna
 (“Carta Sismotettonica della Regione Emilia-Romagna” Martelli, L e Boccaletti, M, 2004)

 Via Francesco Zanardi 157/6 - 40131 Bologna (I) MC Engineering Srl Tel +39 051 4211945 - info@studio-chinni.it <small>ISO 9001 392876</small>	Cliente: REGIONE EMILIA ROMAGNA	Codice: 1316-R-6010-E-1 Data: 04/06/2018
	Demolizione e ricostruzione della botte sifone del canale Cittadino all'attraversamento del canale Boicelli	Relazione geotecnica

4 INDAGINI GEOGNOSTICHE

Per la caratterizzazione stratigrafica, geomeccanica e sismica dell'area di intervento è stata predisposta una campagna integrativa di indagini geognostiche, effettuata nel marzo 2014, a quella eseguita nel 2004, comprendente:

- n° 2 CPTU fino alla profondità di 30 e 35 m da piano campagna (6 m slm);
- 2 letture a stazione singola (HVSr);
- 1 profilo sismici con tecnica MASW;

L'ubicazione delle indagini geognostiche in sito è riportata nell'elaborato grafico 1316-G-6010-D (Ubicazione indagini e profilo stratigrafico).

Le prove CPTU hanno evidenziato una stratigrafia caratterizzata da una alternanza di depositi limo argillosi e sabbie con consistenza crescente con la profondità, in particolare:

- Da 0.00 a 12.00÷15.00 m dal pc è stata riscontrata la presenza di strati limo argillosi e argille limose di modesta consistenza. La storia tensionale del deposito superficiale rileva gradi di sovraconsolidazione modesti ($OCR = 2\div 4$). La velocità delle onde di taglio presenta valori attestati a 160 m/s e la resistenza alla penetrazione (CPTU) mostra valori di 1 MPa.
- Oltre i 12.00÷15.00 m dal pc è presente uno strato di sabbia mediamente densa con valori di resistenza alla punta superiori a 8 MPa (tra i 16 e 17 m dal pc è rilevabile uno strato di argilla limosa in entrambe le CPTU). La velocità delle onde di taglio presenta valori compresi tra 240 m/s e 300 m/s.

Il livello di falda è risultato a profondità di 1.5 m dal pc (marzo 2014).


La prova CPTU e la caratterizzazione litologica eseguita sulla base dei dati registrati hanno trovato pieno riscontro nei sondaggi disponibili per la campagna di indagine 2004. Sono inoltre riportati, in appendice A, oltre ai resoconti stratigrafici, i parametri derivati dalla prova CPTU (Robertson e Cabal, 2012)¹.

5 INTERAZIONE TERRENO STRUTTURA IN PROSPETTIVA SISMICA

5.1 Categoria stratigrafica del suolo

Considerando il piano di imposta della fondazione della botte sifone (11.35 m da piano indagine), la velocità mediata sui primi 30 m dal piano di imposta di fondazione (da 11.35 a 41.35 m dal pc) risulta (cfr relazione sismica 1316-R-6020-D):

¹ Robertson, PK & Cabal, KL (2012) Guide to Cone Penetration Testing For Geotechnical Engineering. Gregg Drilling & Testing Inc., 5th ed

 Via Francesco Zanardi 157/6 - 40131 Bologna (I) MC Engineering Srl Tel +39 051 4211945 - info@studio-chinni.it <small>ISO 9001 392876</small>	Cliente: REGIONE EMILIA ROMAGNA	Codice: 1316-R-6010-E-1 Data: 04/06/2018
	Demolizione e ricostruzione della botte sifone del canale Cittadino all'attraversamento del canale Boicelli	Relazione geotecnica

$$V_{s30} = 30 / \sum(H_j / V_{sj}) = 214 \text{ m/s}$$

Il terreno, dai dati stratigrafici e dalle risultanze delle indagini geofisiche, risulta pertanto in categoria stratigrafica

Categoria	Descrizione	N _{SPT,30}	c _{u,30} (kPa)	V _{s,30} (m/s)
C	Depositi di terreni a grana grossa mediamente addensati o terreni a grana fine mediamente consistenti con spessori superiori a 30 m, caratterizzati da un graduale miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità	15+50	70+250	180+360

Il dato è confermato dalle elaborazioni delle CPTU (cfr Appendice A)

5.2 Liquefazione

La suscettibilità alla liquefazione della zona in esame è stata valutata sulla base delle prove penetrometriche in sito (CPTU) essendo presenti livelli sabbiosi saturi nei primi 20 m di profondità dal p.c., profondità potenzialmente interessata dalla liquefazione.

Per le verticali indagate è stato valutato l'indice del potenziale di liquefazione I_L , definito dall'integrale sviluppato nei primi 20 metri di profondità (z) dal piano campagna (Iwasaki et al., 1982)²:

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

Dove $w(z)$ è funzione della profondità ed è espressa come: $w(z) = 10 - 0.5 z$ mentre $F(z)$ è un fattore dipendente dal fattore di sicurezza alla liquefazione (F_L) ed assume i valori:

$$F(z) = 1 - F_L \quad \text{se } F_L \leq 1.0$$


$$F(z) = 0 \quad \text{se } F_L > 1.0$$

Il coefficiente di sicurezza alla liquefazione viene definito dal rapporto:

$$F_L = (\text{CRR}_{7.5} / \text{CSR}) \text{ MSF}$$

Essendo CSR lo sforzo ciclico tangenziale normalizzato:

² Iwasaki, T., K. Tokida, F. Tatsuoka, S. Watanabe, S. Yasuda, and H. Sato (1982). Microzonation for soil liquefaction potential using simplified methods, in 3rd International Earthquake Microzonation Conference, Seattle, p. 1319-1330.

 Via Francesco Zanardi 157/6 - 40131 Bologna (I) MC Engineering Srl Tel +39 051 4211945 - info@studio-chinni.it <small>ISO 9001 392876</small>	Cliente: REGIONE EMILIA ROMAGNA	Codice: 1316-R-6010-E-1 Data: 04/06/2018
	Demolizione e ricostruzione della botte sifone del canale Cittadino all'attraversamento del canale Boicelli	Relazione geotecnica

$$CSR = 0.65 (a_{max} / g) (\sigma_v / \sigma'_v) r_d$$

con r_d fattore di riduzione descritto dalle espressioni:

$$r_d = 1 - 0.00765 z \quad (z < 9.15 \text{ m})$$

$$r_d = 1 - 0.02670 z \quad (z \geq 9.15 \text{ m}).$$

$CRR_{7.5}$ è il rapporto di resistenza ciclica per sisma di magnitudo 7.5 (funzione della resistenza alla punta normalizzata rapportata a sabbia pulita) ed è ottenuta da prove CPTU (Robertson e Wride, 1998³), per le sabbie:

$$CRR_{7.5} = a [(Q_{tn})_{cs}]^b + c$$

con a , b e c fattori dipendenti dal valore di $(Q_{tn})_{cs}$.

Nel caso delle argille, il rapporto di resistenza ciclica per fluidificazione può essere definita dall'espressione:

$$CRR_{7.5} = a (Q_{tn}) K_\alpha$$

Con $a = 0.053$ e K_α funzione dell'importanza dell'intervento.

MSF è il fattore di scala della magnitudo e può essere definito come (Youd e Idriss, 2001)⁴:

$$MSF = (7.5 / M)^{2.56}.$$


Il valore di accelerazione attesa al sito, corrispondente ad un periodo di ritorno di 712 anni (10% di probabilità di superamento in 75 anni) in corrispondenza del piano di imposta delle fondazioni risulta:

$$a_{max} = 0.225 \text{ g (cfr relazione sismica - 1316-R-6020-D)}.$$

Il Comune di Ferrara ricade in Zona Sismogenetica 912 (ZS9). La legge di ricorrenza di Gutenberg Richter (1944)⁵ per tale sorgente risulta descritta dall'espressione (Fioravante, V e Giretti, D – Valutazione del Rischio Sismico per le aree edificate ed edificabili del PSC del Comune di Ferrara), in termini esponenziali: $\lambda_M = 27.058 e^{-1.6271M}$

³ Robertson, PK e Wride, CE (1998) "Evaluating cyclic liquefaction potential using the cone penetration test". Can. Geotech. Journal N 35 pp 442459

⁴ Youd, TL e Idriss, IM (2001) "Liquefaction Resistance of Soils: Summary Report from the 1996 NCEER and 1998 NCERR/NSF Workshop on Evaluation of Liquefaction Resistance of Soils". Journal of Geotechn. And Geoenvironmental Eng. Vol 127, No 4 pp 297-313

 Via Francesco Zanardi 157/6 - 40131 Bologna (I) MC Engineering Srl Tel +39 051 4211945 - info@studio-chinni.it <small>ISO 9001 392876</small>	Cliente: REGIONE EMILIA ROMAGNA	Codice: 1316-R-6010-E-1 Data: 04/06/2018
	Demolizione e ricostruzione della botte sifone del canale Cittadino all'attraversamento del canale Boicelli	Relazione geotecnica

Per il periodo di ritorno di progetto ($T_R = 1 / \lambda_M = 712$ anni) la ricorrenza risulta $\lambda_M = 0.0014$ (eventi/anno) che corrisponde ad una magnitudo $M = 6.064$.

Vengono quindi definite le seguenti soglie di rischio:

$0 < I_L \leq 5$	Rischio di liquefazione basso
$5 < I_L \leq 15$	Rischio di liquefazione elevato
$I_L > 15$	Rischio di liquefazione estremamente elevato

I valori di I_L ottenuti evidenziano alti potenziali di liquefazione. I valori del potenziale di liquefazione ottenuti dalle prove in sito sono riportati nella tabella 5.3 rimandando all'Appendice A per i dettagli analitici del calcolo e la riproduzione del dettaglio dei parametri derivati dalle CPTU con la profondità.

Prova	I_L	Rischio liquefazione	Area	Categoria stratigrafica	Profondità
CPTU 01 2014	0.33	Basso	Sx Boicelli	C	da 15 m a 16.5 m a 17 m
CPTU 02 2014	1.27	Basso	Dx Boicelli	C	da 13 m a 14.5 m da 15.5 m a 16.5 m

Tab. 5.3 – Potenziale di liquefazione ottenuto dalle prove in sito

Il rischio di liquefazione risulta modesto e trascurabile.

5.3 Spostamenti verticali a seguito del sisma di progetto per liquefazione del terreno

Gli spostamenti vengono calcolati utilizzando i risultati delle prove CPTU seguendo le indicazioni di Zhang et al (2002)⁶.

Il valore di cedimento atteso (s) risulta dato dall'espressione:


$$s = \sum_j \varepsilon_{vj} \Delta z_j$$

dove ε_{vj} rappresenta la deformata di volume post sismica dello strato j -esimo e Δz_j lo spessore dello strato. La deformazione specifica in termini percentuali risulta dall'espressione:

$$\varepsilon_v = \alpha (Q_{tn})_{cs}^\beta$$

⁵ Gutenberg, B and Richter, CF (1944) "Frequency of Earthquakes in California" Bull. Of the Seismological Society of America, Vol. 32, pp 1985-1988

⁶ Zhang, G, Robertson, PK, Brachman RWI (2002) "Estimating liquefaction-induced ground settlements from CPT for level ground". Can. Geotech. J, N 39, pp 1168-1180


 Via Francesco Zanardi 157/6 - 40131 Bologna (I) MC Engineering Srl Tel +39 051 4211945 - info@studio-chinni.it <small>ISO 9001 392876</small>	Cliente: REGIONE EMILIA ROMAGNA	Codice: 1316-R-6010-E-1 Data: 04/06/2018
	Demolizione e ricostruzione della botte sifone del canale Cittadino all'attraversamento del canale Boicelli	Relazione geotecnica

con α e β fattori variabili in funzione della resistenza alla punta normalizzata e del coefficiente di sicurezza alla liquefazione, $(Q_{tn})_{cs}$ è la resistenza alla punta normalizzata corretta alla sabbia pulita. I valori di cedimento atteso a seguito del sisma sono riportati in tabella 5.4 mentre l'andamento delle deformazioni specifiche e dello spostamento sono riportate nei diagrammi in Appendice A.

Prova	I_L	Rischio liquefazione	Area	Spostamento atteso (cm)
CPTU 01 2014	0.33	Basso	Sx Boicelli	3.29
CPTU 02 2014	1.27	Basso	Dx Boicelli	9.04

Tab. 5.4 – Spostamenti verticali attesi post sisma

I valori stimati sono modesti e la loro comparsa è collegata all'insorgere di fenomeni di liquefazione la cui probabilità è molto bassa (cfr diagramma cedimenti in appendice A).

 Via Francesco Zanardi 157/6 - 40131 Bologna (I) MC Engineering Srl Tel +39 051 4211945 - info@studio-chinni.it <small>ISO 9001 392876</small>	Cliente: REGIONE EMILIA ROMAGNA	Codice: 1316-R-6010-E-1 Data: 04/06/2018
	Demolizione e ricostruzione della botte sifone del canale Cittadino all'attraversamento del canale Boicelli	Relazione geotecnica

6 MODELLO STRATIGRAFICO E PARAMETRI CARATTERISTICI

6.1 Parametri di resistenza

Dall'analisi dei dati di laboratorio (PD09) e dalle indagini in sito si ritiene ragionevolmente rappresentativo dei litotipi riscontrati il modello stratigrafico ed i parametri di resistenza riportati in tabella 6.1.

Litotipo	da m da pc	a m da pc	γ_n (kN/m ³)	c' (kPa)	ϕ_k' (°)	cu
Fill - siCl	0 (6 m slm)	17	17	5	25	50
siSa / Sa	17	35	17	--	35	--

Tab 6.1 – Quadro sinottico parametri di resistenza caratteristici

La stratigrafia sulla sezione di intervento è riportata nell'elaborato grafico 1316-G-6010-D (Ubicazione indagini e profilo stratigrafico).

6.2 Modulo del terreno


Il modulo di taglio a piccolissime deformazioni G_0 ($\gamma \leq 10^{-6}$) viene derivato dalle prospezioni geofisiche. Il modulo di taglio operativo G_s viene valutato nel campo di deformazione tagliante (γ) atteso per le strutture: $\gamma = 10^{-3}$ (0.1%) utilizzando l'espressione di decadimento del modulo: $G/G_0 = 1/[1 + (\gamma/\gamma_r)^{0.919}]$ essendo γ_r la distorsione definita da Darendeli (2001)⁷:

$$\gamma_r = (\sigma'_0 / p_{ref})^{0.3483} (0.0352 + 0.001 PI OCR^{0.3246})$$

Dove σ'_0 è la pressione media (nella stessa grandezza della pressione di riferimento), p_{ref} è la pressione di riferimento (100 kPa), PI è l'indice plastico e OCR il grado di sovraconsolidazione. γ_r è espresso in %.

Il valore del modulo operativo risulta dal taglio operativo: $E_s = 2(1+\nu)G_s$. Nella tabella 6.2 vengono definiti, sulla base delle risultanze dell'indagine geofisica, i valori dei moduli operativi per i diversi sismo strati (coeff. di Poisson $\nu = 0.45$ per le argille, $\nu = 0.35$ per le sabbie).

⁷ Darendeli, M. B. (2001). "Development of a new family of normalized modulus reduction and material damping curves," Ph. D., University of Texas at Austin, Austin.

 Via Francesco Zanardi 157/6 - 40131 Bologna (I) MC Engineering Srl Tel +39 051 4211945 - info@studio-chinni.it <small>ISO 9001 392876</small>	Cliente: REGIONE EMILIA ROMAGNA	Codice: 1316-R-6010-E-1 Data: 04/06/2018
	Demolizione e ricostruzione della botte sifone del canale Cittadino all'attraversamento del canale Boicelli	Relazione geotecnica

V_s	σ'_v	K_0	$\sigma'_{0.1}$	IP	G_{max}	γ_r	$G_{0.1\%}/G_{max}$	$E_{0.1\%}$
(m/s)	(kPa)	(-)	(kPa)	(%)	(MPa)	(%)	(-)	(MPa)
150	21.25	0.577	15.26	25	38.25	0.031	0.256	28.37
160	41.69	0.577	29.94	25	43.52	0.040	0.299	37.73
180	86.65	0.577	62.24	25	55.08	0.051	0.350	55.94
240	151.40	0.426	93.50	0	97.92	0.034	0.273	72.09
300	208.95	0.426	129.05	0	153.00	0.038	0.294	121.29
340	435.56	0.426	269.01	0	196.52	0.050	0.345	182.85

Tab 6.2 – Stima dei moduli operativi

In figura 6.1 viene mostrata la variazione del modulo con la profondità ed individuata una espressione esponenziale di correlazione tra modulo e tensione litostatica efficace normalizzata alla pressione atmosferica (100 kPa).

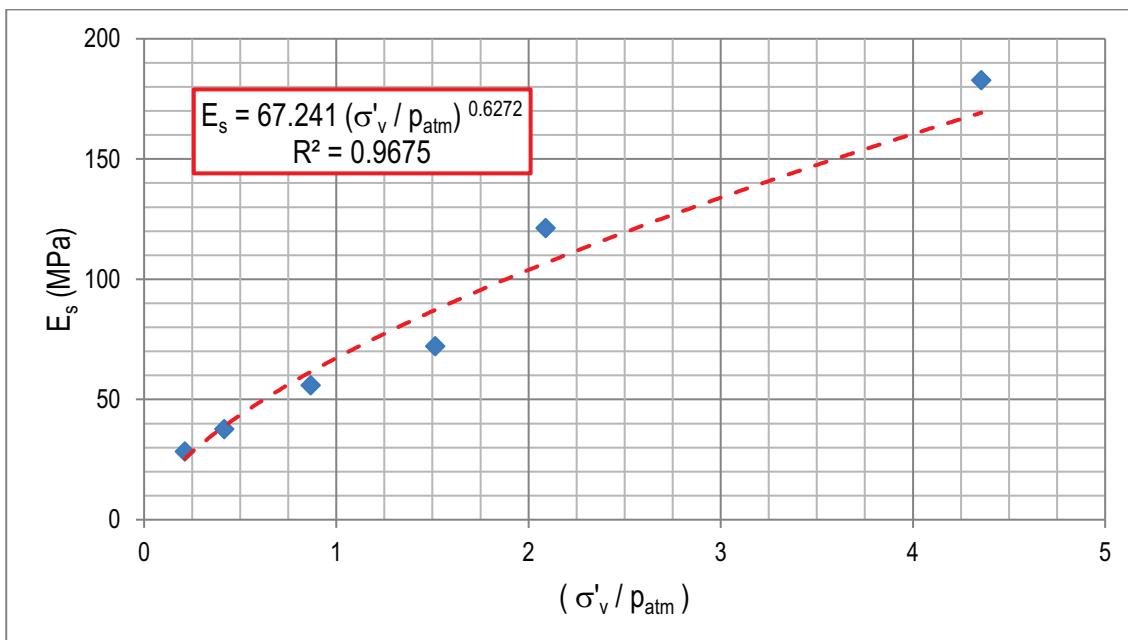



Fig. 6.1 – Variazione del modulo con la tensione litostatica efficace

6.3 Moduli di reazione

I moduli di reazione del terreno a comportamento liquido vengono valutati sulla base seguendo l'indirizzo indicato da Bowles (1988)⁸ considerando ragionevole, per azioni orizzontali che coinvolgono la resistenza passiva, il valore secante in corrispondenza di uno spostamento orizzontale di 50 mm mentre per il valore del modulo verticale e la resistenza limite della fondazione, il valore secante in corrispondenza di uno spostamento di 25 mm.

Il modulo di reazione secante orizzontale risulta determinato dall'espressione:

⁸ Bowles, JE (1988) "Foundation Analysis and Design", 4th ed, McGraw-Hill, NY

 Via Francesco Zanardi 157/6 - 40131 Bologna (I) MC Engineering Srl Tel +39 051 4211945 - info@studio-chinni.it <small>ISO 9001 392876</small>	Cliente: REGIONE EMILIA ROMAGNA	Codice: 1316-R-6010-E-1 Data: 04/06/2018
	Demolizione e ricostruzione della botte sifone del canale Cittadino all'attraversamento del canale Boicelli	Relazione geotecnica

$$k_s = q_{LIM} / 0.05 \text{ m} \quad (k_s = 20 q_{LIM})$$

quello verticale dall'espressione:

$$k_s = q_{LIM} / 0.025 \text{ m} \quad (k_s = 40 q_{LIM})$$

essendo k_s espresso in kN/m^3 e q_{LIM} in kPa .

Tali valori risultano rilevanti per il calcolo strutturale della botte sifone, considerando la quota di imposta della fondazione a circa 7.0 m dal piano del fondo canale e a 5.5 m la profondità della quota media delle pareti laterali, i moduli di reazione risultano, in termini di tensioni totali:

Per modulo laterale

$$k_s \approx 20 (q + N_{ch} c_{u,k}) = 3800 \text{ kN/m}^3 \quad (c_{u,k} = 50 \text{ kPa}, N_{ch} = 2, q = 90 \text{ kPa})$$

Per modulo alla base (si considera la presenza ed il contributo del jet grouting in grado di fornire una resistenza al taglio in termini di tensioni totali di almeno 3 volte quella del terreno di base)

$$k_s \approx 40 (N_c c_{u,k} + q) = 35640 \text{ kN/m}^3 \quad (c_{u,k} = 150 \text{ kPa}, N_c = 2+\pi, q = 120 \text{ kN})$$


6.4 Parametri di resistenza della scogliera

La scogliera è formata da elementi litici calcarei di peso non inferiore a 500 kg, intasati con terreno. La parametrizzazione di tali elementi viene definita ragionevolmente e cautelativamente seguendo la modellazione di un ammasso roccioso equivalente disgregato ($GSI = \text{Geological Strength Index} = 15$. cfr fig. 6.2) e la modellazione di Hoek-Brown (1988)⁹ per la determinazione dei parametri di stato limite c' e φ' , limitatamente allo strato composto da elementi litici.

Utilizzando il software RocData della canadese rocscience (www.rocscience.com), partendo dai dati di ingresso di letteratura per il campione integro del calcare, si ottengono i valori evidenziati in fig. 6.3 finalizzati al calcolo di stabilità dei pendii.

$$c_k' = 43 \text{ kPa}, \varphi_k' = 49^\circ$$

⁹ Hoek, E, Brown, ET (1988) "The Hoek-Brown Failure Criterion – a 1988 Update", 15th Canadian Rock Mechanics Symposium, University of Toronto.

 Via Francesco Zanardi 157/6 - 40131 Bologna (I) MC Engineering Srl Tel +39 051 4211945 - info@studio-chinni.it <small>ISO 9001 392876</small>	Cliente: REGIONE EMILIA ROMAGNA	Codice: 1316-R-6010-E-1 Data: 04/06/2018
	Demolizione e ricostruzione della botte sifone del canale Cittadino all'attraversamento del canale Boicelli	Relazione geotecnica

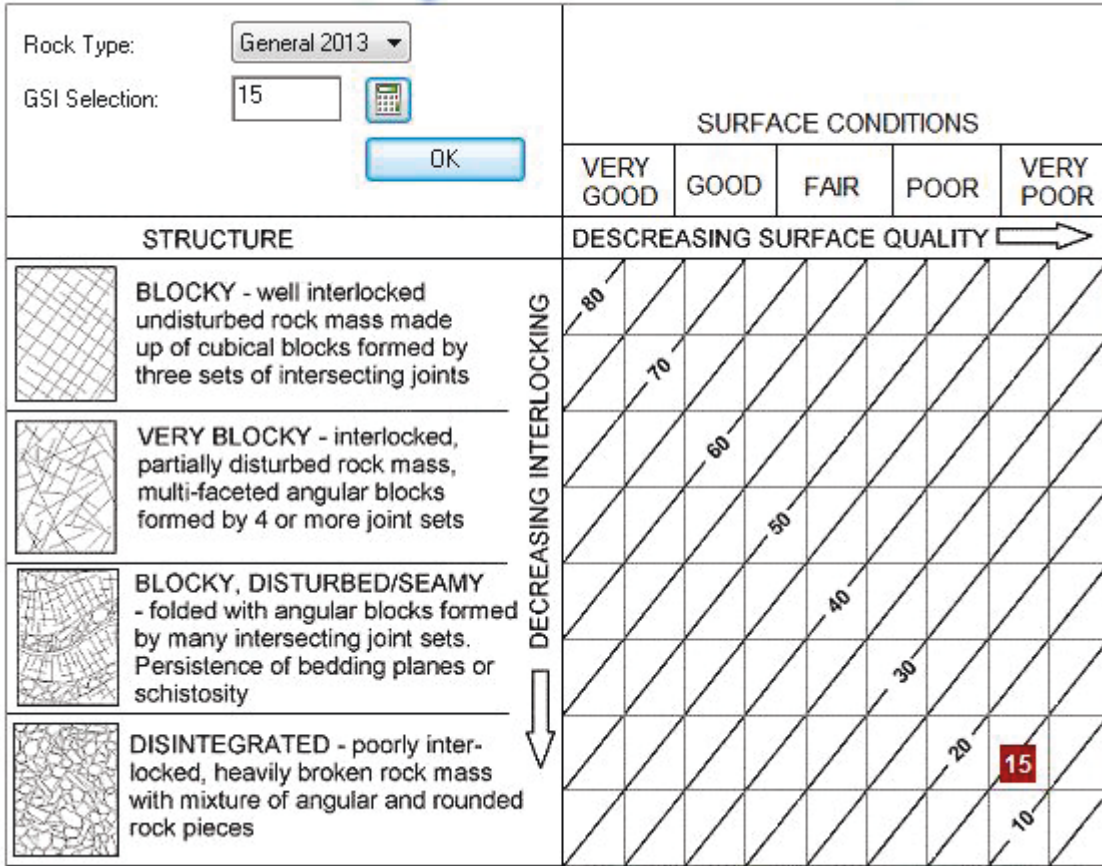


Fig. 6.2 – Determinazione e descrizione dell'indice qualitativo degli ammassi (GSI)

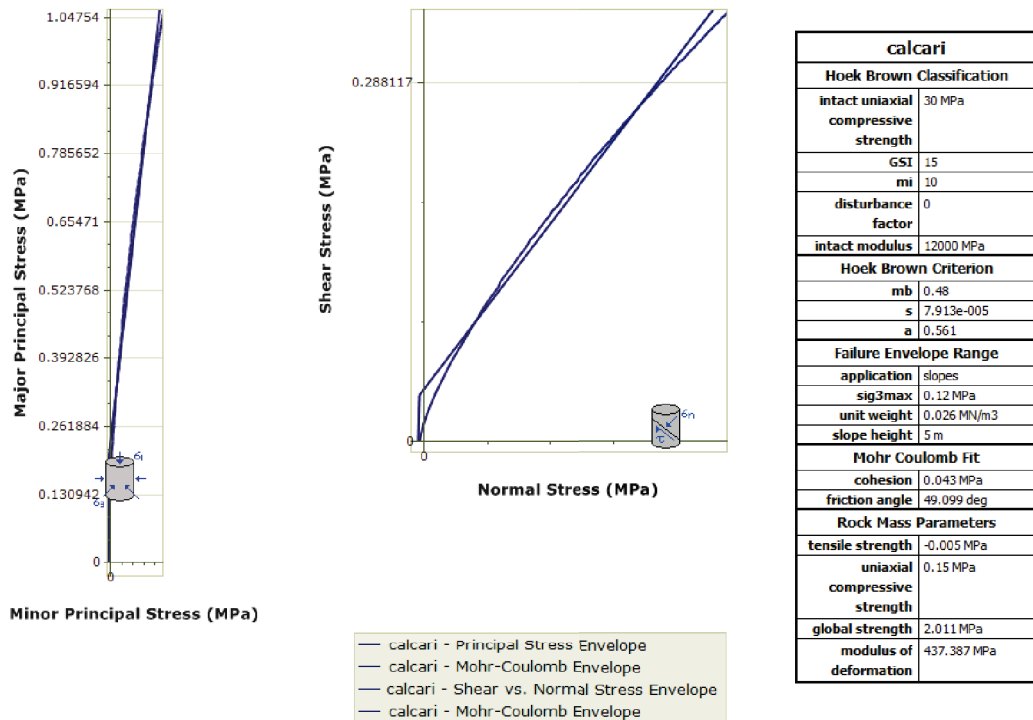



Fig. 6.2 – Determinazione parametri di stato limite

 Via Francesco Zanardi 157/6 - 40131 Bologna (I) MC Engineering Srl Tel +39 051 4211945 - info@studio-chinni.it <small>ISO 9001 392876</small>	Cliente: REGIONE EMILIA ROMAGNA	Codice: 1316-R-6010-E-1 Data: 04/06/2018	
	Demolizione e ricostruzione della botte sifone del canale Cittadino all'attraversamento del canale Boicelli	Relazione geotecnica	

7 INTERVENTI DI CONSOLIDAMENTO

Al fine di limitare il rischio di sifonamento del fondo scavo durante le fasi di scavo delle aree di lavoro interne alle palancole ed al fine di garantire una adeguata resistenza al terreno di sedime della botte sifone, ritiene necessario consolidare il terreno al fine di garantire maggiori caratteristiche di resistenza e minore permeabilità.

La tecnica proposta è quella delle iniezioni ad elevata pressione (jet grouting bi-fluido) la cui esecuzione dovrà essere conforme alle indicazioni di cui alla UNI EN 12716 - "Esecuzione di Lavori Geotecnici Speciali: Getti per Iniezione (Jet Grouting)". Le colonne consolidate avranno estensione dalla quota di base delle palancole al piano di imposta della fondazione del sifone. Le colonne saranno disposte a quinconce con diametro di 1.20 m al fine di garantire la completa copertura dello scavo. In figura 7.1 è mostrata la disposizione tipica delle colonne consolidate tra le palancole combinate.

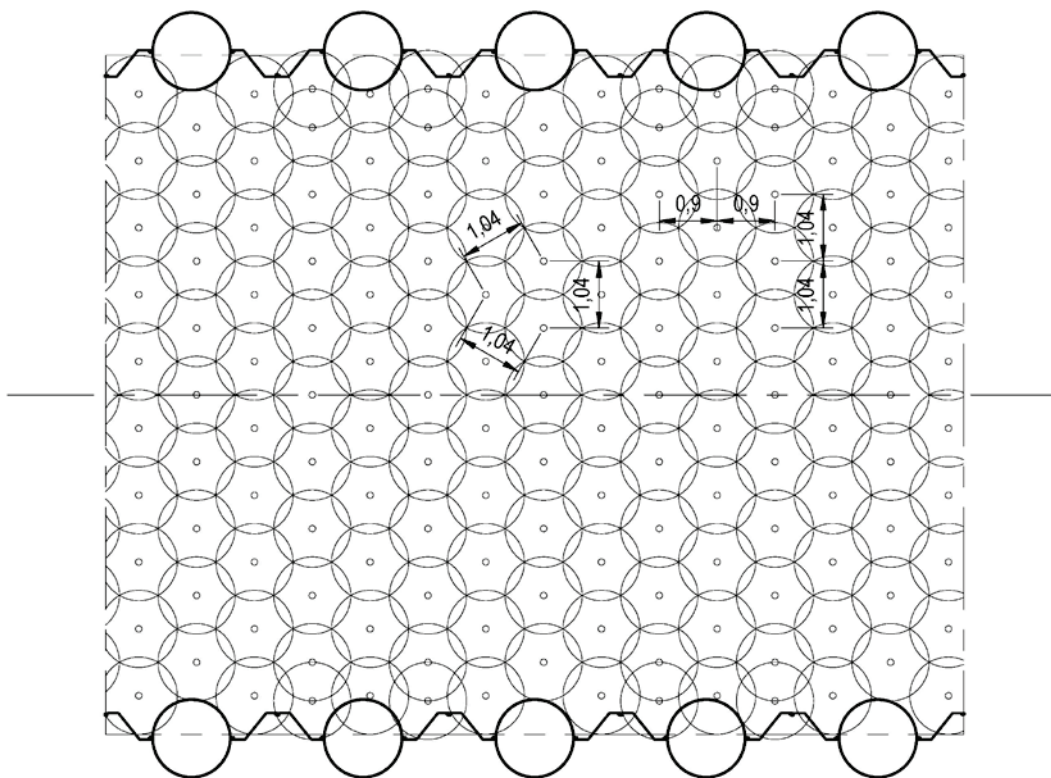



Fig. 7.1 – Disposizione tipica delle colonne consolidate Ø120 cm

La maglia delle colonne consolidate sarà disposta in modo tale da coprire tutta la superficie contenuta tra le palancole. Di norma esse saranno disposte con distanza angolare di 60° in maniera tale che le aste formano un triangolo equilatero di lato 104 cm.

 Via Francesco Zanardi 157/6 - 40131 Bologna (I) MC Engineering Srl Tel +39 051 4211945 - info@studio-chinni.it <small>ISO 9001 392876</small>	Cliente: REGIONE EMILIA ROMAGNA	Codice: 1316-R-6010-E-1 Data: 04/06/2018
	Demolizione e ricostruzione della botte sifone del canale Cittadino all'attraversamento del canale Boicelli	Relazione geotecnica

I valori del terreno consolidato, interno allo scavo, sono da ritenersi soddisfatti qualora, su campioni indisturbati estratti mediante carotaggio continuo eseguito sul terreno miscelato a 14 gg di maturazione, la resistenza a compressione non confinata risulti:


$$|q_c| \geq 2 c' \cos(\varphi') / [1 - \sin(\varphi')] \approx 400 \text{ kPa}$$

e contestualmente la prova di trazione indiretta (brasiliana) confermi un risultato non inferiore a:

$$|q_t| \geq 2 c' \cos(\varphi') / [3 - \sin(\varphi')] \approx 50 \text{ kPa}$$

La permeabilità in direzione verticale del terreno consolidato deve essere non superiore a $K_v = 10^{-9} \text{ m/s}$.

Tali valori dovranno essere verificati prima dell'intervento con apposito campo prove eseguito esternamente all'area di lavoro, formato da almeno 6 colonne consolidate con percentuale variabile di cemento, prelevando mediante carotiere almeno 18 campioni (3 per colonna) a quota inferiore a -5.15 m slm. Il modulo di taglio a piccolissime deformazioni (G_{max}) deve risultare non inferiore a 3 volte il modulo di taglio del terreno interessato dalle iniezioni non ancora trattato da valutarsi mediante prove down hole eseguite in almeno 3 fori di perforazione eseguiti sulle colonne del campo prove a coprire l'intera lunghezza della colonna consolidata. Le colonne dovranno essere eseguite alle medesime profondità operative delle colonne di consolidamento in esercizio.

 Via Francesco Zanardi 157/6 - 40131 Bologna (I) MC Engineering Srl Tel +39 051 4211945 - info@studio-chinni.it <small>ISO 9001 392876</small>	Cliente: REGIONE EMILIA ROMAGNA	Codice: 1316-R-6010-E-1 Data: 04/06/2018
	Demolizione e ricostruzione della botte sifone del canale Cittadino all'attraversamento del canale Boicelli	Relazione geotecnica

8 PALI DI FONDAZIONE

Viene riportato il calcolo dei pali per la fondazione delle gru previste in cantiere per la movimentazione e scavo dei materiali. L'analisi viene eseguita su pali trivellati Ø800 di lunghezze variabili tra 15 e 24 m.

8.1 Resistenza SLU

8.1.1 Combinazioni ed approcci di carico

Le verifiche seguono le combinazioni di carico STR e GEO stabilite dalle NTC08 che prevedono:

Approccio 1

- Combinazione 1 A1+M1+R1
- Combinazione 2 A2+M1+R2

Approccio 2

- Combinazione 1 A1+M1+R3

8.1.2 Modalità di determinazione della resistenza di calcolo

La resistenza del palo isolato viene stabilita sulla base dei dati di indagine geotecnica disponibili, in funzione del numero di verticali indagate. I coefficienti di correlazione risultano quelli riportati in tabella 8.1. Basandosi sui valori caratteristici attribuiti agli strati si considera il fattore di correlazione su una sola verticale indagata.

N.ro di verticali indagate	1	2	3	4	5	7	≥ 10
ξ_3	1.70	1.65	1.60	1.55	1.50	1.45	1.40
ξ_4	1.70	1.55	1.48	1.42	1.34	1.28	1.21


Tab. 8.1 – Coefficienti di correlazione per numero di verticali

La resistenza caratteristica viene definita mediante l'espressione:

$$R_{c,k} = \min \left\{ \frac{R_{c,mean}}{\xi_3}, \frac{R_{c,min}}{\xi_4} \right\}$$

Il valore della resistenza di progetto viene quindi definito dall'espressione:

$$R_{c,d} = \frac{R_{c,k}}{\gamma_R}$$

 Via Francesco Zanardi 157/6 - 40131 Bologna (I) MC Engineering Srl Tel +39 051 4211945 - info@studio-chinni.it <small>ISO 9001 392876</small>	Cliente: REGIONE EMILIA ROMAGNA	Codice: 1316-R-6010-E-1 Data: 04/06/2018
	Demolizione e ricostruzione della botte sifone del canale Cittadino all'attraversamento del canale Boicelli	Relazione geotecnica

Essendo γ_R il coefficiente di sicurezza riportato, per pali trivellati, in tabella 8.2.

Resistenza	Simbolo	Set		
		R1	R2	R3
Laterale	γ_s	1.00	1.70	1.35
Base	γ_b	1.00	1.45	1.15
Trazione	$\gamma_{s,t}$	1.00	1.60	1.25

Tab. 8.2 – Coefficienti di sicurezza parziali per pali trivellati

La resistenza del palo isolato viene definita dalla somma del contributo della resistenza che si sviluppa lungo il fusto e quella che si sviluppa alla base del palo (per i diaframmi si considera l'azione resistente per unità di sviluppo delle due facce eliminando la faccia interna della cameretta per una altezza di 5 m). L'approccio è quello in termini di tensioni efficaci. La resistenza specifica laterale può essere determinata mediante l'espressione, in termini di tensioni efficaci:

$$\tau_s = \beta \sigma'_v$$

dove β è un coefficiente che assume, per pali trivellati, la forma: $\beta = K_0 \tan(\varphi')$; dove $K_0 = 1 - \sin(\varphi')$ è il coefficiente di spinta a riposo NC e σ'_v è la tensione litostatica efficace. La resistenza specifica alla punta, in termini di tensioni efficaci, viene definita mediante l'espressione:

$$q_b = N_t \sigma'_v$$


dove N_t è il fattore di capacità portante valutato con l'espressione riportata in Vesic (1975)¹⁰ che si ritiene ragionevolmente cautelativa.

La resistenza di progetto del palo isolato viene quindi determinata, per integrazione delle precedenti espressioni, mediante la formula (nel caso di resistenza a trazione si considera il solo apporto della resistenza laterale al 90% del valore caratteristico):

$$R_{cd} = R_{sk} / \gamma_s + R_{bk} / \gamma_b \quad R_{td} = 0.9 R_{sk} / \gamma_{st}$$

I valori di resistenza caratteristica sono valutati, ritenendo tale modo ragionevolmente cautelativo, considerando i valori caratteristici quali valori medi dei valori di resistenza al taglio (si considerano i valori rappresentative di 3 verticali indagate) passando attraverso i coefficienti di correlazione di tabella 8.1.

¹⁰ Vesic, AS (1975) "Bearing Capacity of shallow foundation". Foundation engineering Handbook, Winterkom & Fangs Edt, Van Nostrand Reinhold.

 Via Francesco Zanardi 157/6 - 40131 Bologna (I) MC Engineering Srl Tel +39 051 4211945 - info@studio-chinni.it <small>ISO 9001 392876</small>	Cliente: REGIONE EMILIA ROMAGNA	Codice: 1316-R-6010-E-1 Data: 04/06/2018
	Demolizione e ricostruzione della botte sifone del canale Cittadino all'attraversamento del canale Boicelli	
	Relazione geotecnica	

In appendice B sono riportati gli sviluppi analitici dei calcoli della resistenza dei pali per i diversi approcci richiamati al § 8.1.1. La stratigrafia di progetto prevede 17 metri di argille limose (si trascura in questo caso il valore di coesione efficace) ed a seguire lo strato di sabbia. In tabella 8.3 sono riportati i valori delle resistenze di progetto dei pali trivellati di grande diametro per lunghezze variabili tra 15 e 24 m, considerando il piano di imposta della fondazione a -1.00 dal pc.

L palo (m)	R _{bk} (kN)	R _{sk} (kN)	compressione		trazione		compressione		trazione	
			A1M1R1 (kN)		A2M1R2 (kN)		A1M1R3 (kN)			
15	452	260	712	407	465	254	586	326		
18	633	661	1293	570	825	356	1040	456		
21	848	755	1602	763	1028	477	1296	610		
24	1091	849	1940	982	1252	614	1577	786		

Tab. 5.3 – Resistenze di progetto palo singolo (Ø800)

8.2 Curve di trasferimento del carico (SLE)

Il cedimento del palo singolo viene valutato considerando che il comportamento del palo sia assimilabile ad una curva con andamento iperbolico come indicato da Fleming (1992)¹¹ basata sui valori di calcolo delle resistenze del palo.

La determinazione della curva parte dal considerare il cedimento come contributo di quello elastico (strutturale) e quello rigido (geotecnico) del palo. Il cedimento elastico viene definito dalle espressioni:

$$w_E = \begin{cases} \frac{Q \cdot (L_0 + K_e \cdot L_a)}{E_p \cdot A_p} \Rightarrow Q \leq R_s \\ \frac{Q \cdot (L_0 + L_a) - R_s \cdot L_a \cdot (1 - K_e)}{E_p \cdot A_p} \Rightarrow Q > R_s \end{cases}$$

dove: L_a è la lunghezza attiva del palo e L_0 è la porzione libera a resistenza laterale nulla (e quindi detta L la lunghezza complessiva del palo $L_a = L - L_0$). E_p e A_p sono rispettivamente il modulo elastico e la sezione del palo. Il coefficiente K_e dipende dalla distribuzione delle tensioni laterali sul fusto del palo ed è variabile tra 0.45÷0.50.


Il cedimento rigido del palo può essere calcolato considerando che il carico generico Q sul palo è dato dalla somma:

$$Q = Q_S + Q_B$$

ovvero dalla somma dei contributi del carico agente lateralmente (Q_S) e quello alla base (Q_B). Poiché il cedimento geotecnico del palo è di moto rigido i cedimenti della base (w_B) e laterale (w_S) coincidono:

$$w_R = w_S = w_B$$

¹¹ Fleming, W.G.K. (1992) "A new method for single pile settlement prediction and analysis". Géotechnique 42, No. 3, 411-425

 Via Francesco Zanardi 157/6 - 40131 Bologna (I) MC Engineering Srl Tel +39 051 4211945 - info@studio-chinni.it <small>ISO 9001 392876</small>	Cliente: REGIONE EMILIA ROMAGNA	Codice: 1316-R-6010-E-1 Data: 04/06/2018
	Demolizione e ricostruzione della botte sifone del canale Cittadino all'attraversamento del canale Boicelli	Relazione geotecnica

I cedimenti laterale e di base sono dati rispettivamente dalle espressioni:

$$w_s = \frac{M_s \cdot D_s \cdot Q_s}{(R_s - Q_s)}$$

Derivabile dall'assunto di comportamento iperbolico del legame carico deformazioni.

$$w_B = \frac{0.6 \cdot R_B \cdot Q_B}{D_B \cdot E_B \cdot (R_B - Q_B)}$$

Legata alla teoria elastica per carico circolare.

dove: il coefficiente M_s è un fattore adimensionale di flessibilità e sperimentalmente ha mostrato valore compreso nell'intervallo $0.0010 \div 0.0015$, D_s e D_B sono rispettivamente il diametro laterale ed il diametro alla base del palo, E_B è il modulo secante del terreno alla base del palo corrispondente al 25% del carico limite alla base i cui valori per pali trivellati e diverse tipologie di terreni possono essere reperiti in Azizi (2000)¹². Nel caso in esame, per argille e limi si considera il valore $E_B = 5$ MPa, mentre per le sabbie $E_B = 50$ MPa.

R_B e R_s sono i valori asintotici di resistenza limite rispettivamente di base e laterale che si assumono tali per cui il valore di resistenza limite del palo sia dato da:

$$Q_U = \rho_s R_s + R_B$$


essendo ρ_s il rapporto tra il valore asintotico teorico ed il valore limite di calcolo che coincide con il valore caratteristico del palo ($\rho_s = 0.889$).

Il cedimento del palo per dato carico Q viene determinato dalla somma dei contributi $w_E + w_R$ con w_R , Q_s e Q_B determinabili mettendo a sistema le equazioni precedentemente riportate.

In pratica si ottiene una equazione di secondo grado in w_R che porta ad una forma determinata (scegliendo ovviamente la soluzione positiva) che riassumo sinteticamente, a meno delle costanti e geometrie definite a priori (M_s , D_s , D_B) in:

$$w_R = f(E_B, R_s, R_B, Q)$$


¹² Azizi, F (2000) "Applied Analysis in geotechnics". E & FN SPON, NY.

 Via Francesco Zanardi 157/6 - 40131 Bologna (I) MC Engineering Srl Tel +39 051 4211945 - info@studio-chinni.it <small>ISO 9001 392876</small>	Cliente: REGIONE EMILIA ROMAGNA	Codice: 1316-R-6010-E-1 Data: 04/06/2018
	Demolizione e ricostruzione della botte sifone del canale Cittadino all'attraversamento del canale Boicelli	Relazione geotecnica

essendo il valore Q il valore del carico totale. Determinato quindi w_R per dato valore di Q è possibile risalire ai valori di Q_S e Q_B . Il cedimento complessivo risulta dato dalla somma:

$$W_T = W_E + W_R$$

In appendice B sono riportate le curve carico cedimento teoriche.

 Via Francesco Zanardi 157/6 - 40131 Bologna (I) MC Engineering Srl Tel +39 051 4211945 - info@studio-chinni.it <small>ISO 9001 392876</small>	Cliente: REGIONE EMILIA ROMAGNA	Codice: 1316-R-6010-E-1 Data: 04/06/2018
	Demolizione e ricostruzione della botte sifone del canale Cittadino all'attraversamento del canale Boicelli	Relazione geotecnica

9 VERIFICHE DI STABILITA'

Il regime di verifica è quello statico, trattandosi di configurazioni di scavo limitate temporalmente sotto i 2 anni. L'approccio di verifica è quello 1 combinazione 2 (A2+M2+R2) stabilito dalle NTC08 (EC7). In tabella 9.1 e 9.2 sono riportati rispettivamente i coefficienti parziali dei carichi ed i coefficienti parziali dei parametri del terreno relativi all'approccio 1 combinazione 2.

Carichi	Condizione	Simbolo	Combinazione SLU	Combinazione EQK
Permanente (G1)	Favorevole	γ_{G1}	1.0	1.0
	Sfavorevole		1.0	1.0
Permanente portato (G2)	Favorevole	γ_{G2}	1.0	1.0
	Sfavorevole		0.0	0.0
Accidentale (Q)	Favorevole	γ_Q	1.3	0.0
	Sfavorevole		0.0	0.0
Sisma (EQK)	Favorevole	γ_E	0.0	1.0
	Sfavorevole		0.0	0.0

Tab. 9.1 – Coefficienti parziali dei carichi (set A2)

Parametro	coesione efficace c'_{k}	angolo d'attrito $\tan(\varphi'_{k})$	coesione non drenata $c_{u,k}$
Coefficiente parziale	1.25	1.25	1.40


Tab. 9.2 – Coefficienti parziali dei parametri del terreno (set M2)

Le verifiche vengono eseguite con il metodo dell'equilibrio limite, in regime di deformazione piana, implementato nel programma SLIDE v 6.0 della canadese Rocscience (www.rocscience.com: si rimanda al sito web per i dati concernenti la validazione del programma). La verifica viene effettuata utilizzando il metodo di Spencer (1967)¹³, che prevede il soddisfacimento di tutte le condizioni di equilibrio dei singoli conci (traslazione e rotazione). La ricerca delle superfici viene eseguita con metodologia casuale vincolando i limiti di ricerca a monte a valle su segmenti ragionevolmente definiti in funzione della probabile formazione delle nicchie di distacco. Le superfici generate, formate da una serie di segmenti consecutivi, sono 5000. Le verifiche vengono svolte in termini di tensioni efficaci

9.1 Scavo per la condotta di collegamento della botte sifone

Con riferimento ai parametri caratteristici di tab. 6.1 e considerando un sovraccarico accidentale costruttivo, conseguente alle movimentazioni dei mezzi d'opera, di 10 kPa posto a 1.5 m dal ciglio, si riportano le verifiche di stabilità delle fasi di fondo scavo (scarpata con pendenza 2/3)

¹³ Spencer, E (1967) "A method of Analysis of the stability of embankments assuming parallel inter-slice forces", Geotechnique, 17, pp 11-26

 Via Francesco Zanardi 157/6 - 40131 Bologna (I) MC Engineering Srl Tel +39 051 4211945 - info@studio-chinni.it <small>ISO 9001 392876</small>	Cliente: REGIONE EMILIA ROMAGNA	Codice: 1316-R-6010-E-1 Data: 04/06/2018
	Demolizione e ricostruzione della botte sifone del canale Cittadino all'attraversamento del canale Boicelli	Relazione geotecnica

eseguite per l'inserimento del tombino di collegamento, in sponda sx del Canale Boicelli, tra la botte sifone e il Canale Cittadino, considerando l'aggettamento della falda (posta a quota di 1.5 m da pc) a fondo scavo (la permeabilità dello strato superficiale per lo strato di argille limose viene determinata in 10^{-8} m/s).

In figura 9.1 viene riportato l'andamento delle piezometriche ed in figura 9.2 il risultato dell'analisi di stabilità ($\gamma_R = 1.170 > 1.10$). Si rimanda all'Appendice C per i dettagli di calcolo.

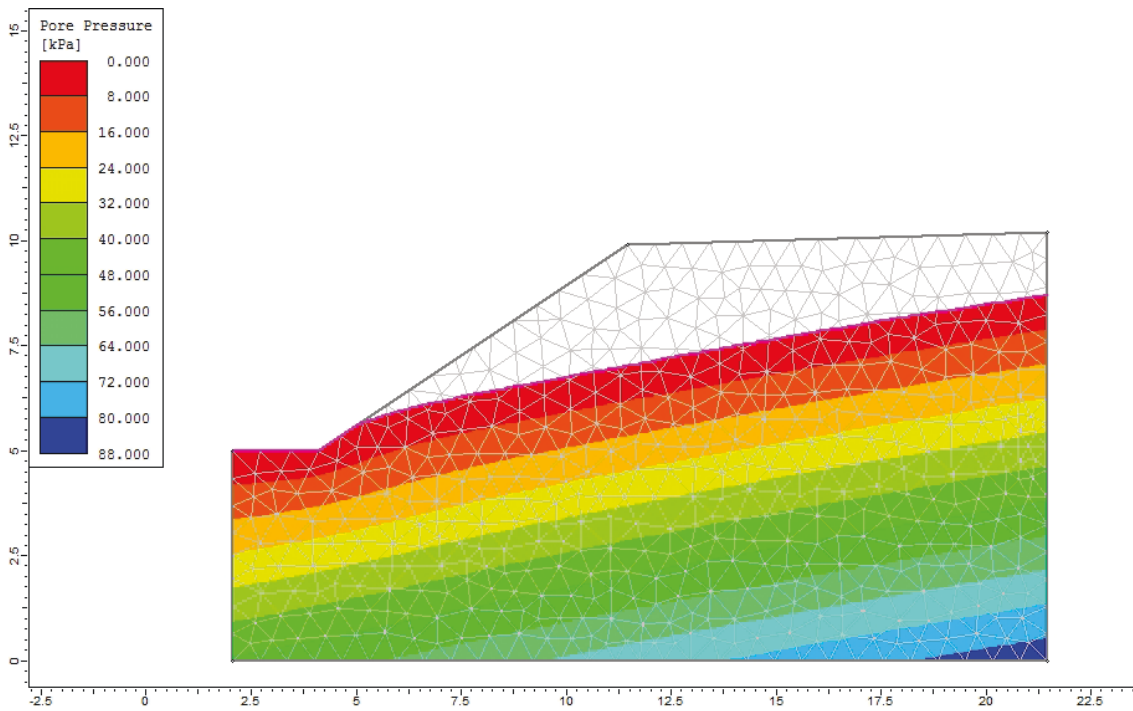
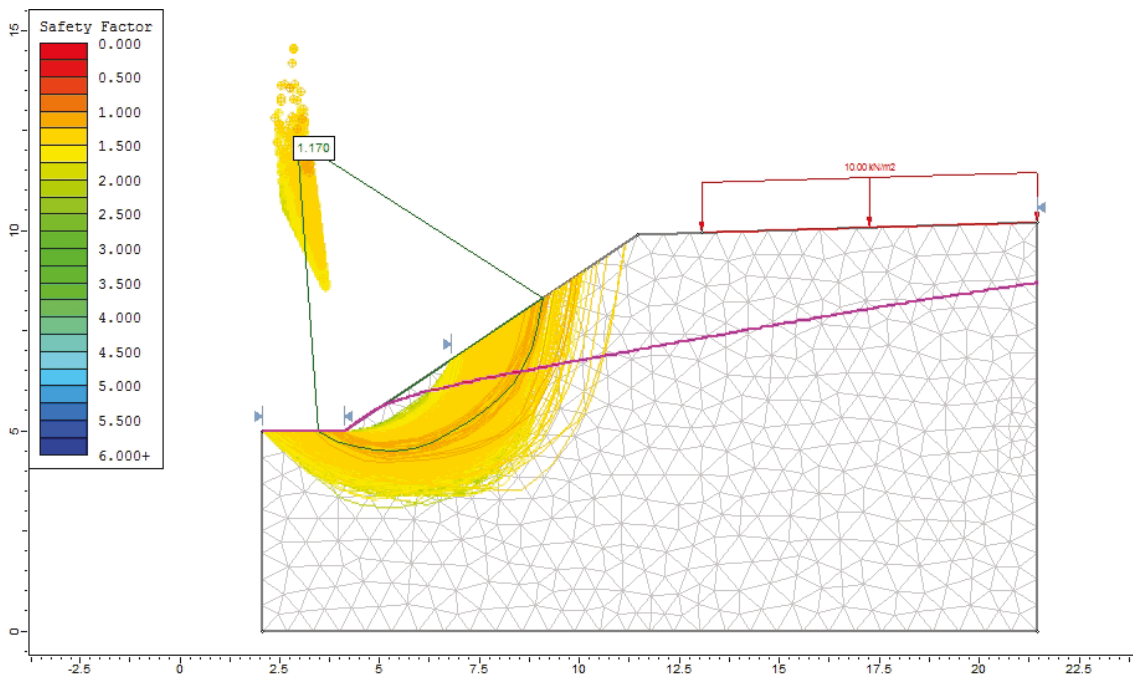


Fig. 9.1 – Piezometriche del fronte di scavo




 Via Francesco Zanardi 157/6 - 40131 Bologna (I) MC Engineering Srl Tel +39 051 4211945 - info@studio-chinni.it	Cliente: REGIONE EMILIA ROMAGNA	Codice: 1316-R-6010-E-1 Data: 04/06/2018
	Demolizione e ricostruzione della botte sifone del canale Cittadino all'attraversamento del canale Boicelli	Relazione geotecnica

Fig. 9.2 – Superfici di scorrimento

9.2 Scogliera di protezione argine

Si considera la stabilità della scogliera in condizioni di rapido svasso (fasi costruttive finali con palancolato di protezione) valutando la situazione in sponda dx, quella con maggiore sviluppo in altezza.

I parametri del terreno e della scogliera sono quelli indicati al § 6. Per la scogliera si considera un valore di permeabilità idraulica $k = 10^{-4}$ m/s (in assenza di intasamento). In figura 9.3 viene riportato l'andamento delle piezometriche ed in figura 9.4 il risultato dell'analisi di stabilità ($\gamma_R = 1.10 \leq 1.10$). Si rimanda all'Appendice C per i dettagli.

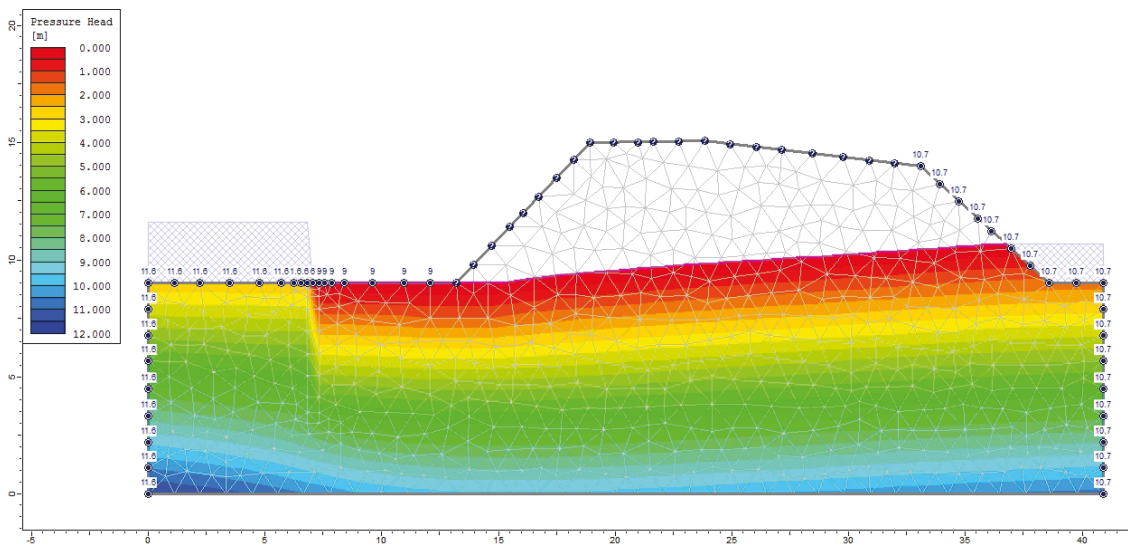


Fig. 9.3 – Piezometriche del fronte di scavo

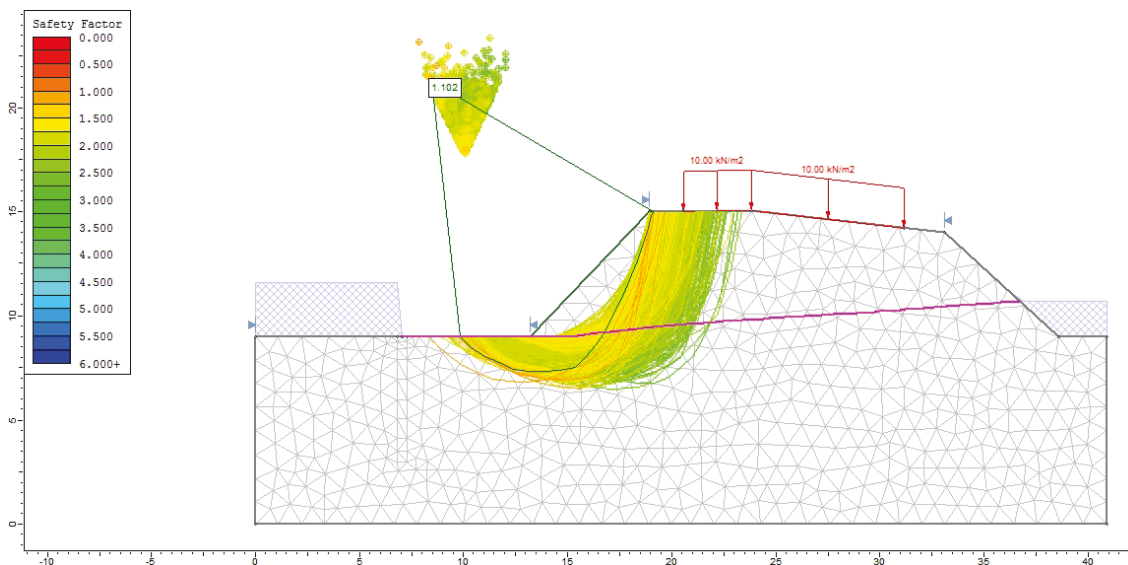





Fig. 9.4 – Superfici di scorrimento

 <p>Via Francesco Zanardi 157/6 - 40131 Bologna (I)</p> <p>MC Engineering Srl</p> <p>Tel +39 051 4211945 - info@studio-chinni.it</p> <p>ISO 9001 392876</p>	<p>Cliente:</p> <p>REGIONE EMILIA ROMAGNA</p>	<p>Codice: 1316-R-6010-E-1</p>
	<p>Demolizione e ricostruzione della botte sifone del canale Cittadino all'attraversamento del canale Boicelli</p>	<p>Data: 04/06/2018</p>
	<p>Relazione geotecnica</p>	

 Via Francesco Zanardi 157/6 - 40131 Bologna (I) MC Engineering Srl Tel +39 051 4211945 - info@studio-chinni.it <small>ISO 9001 392876</small>	Cliente: REGIONE EMILIA ROMAGNA	Codice: 1316-R-6010-E-1 Data: 04/06/2018
	Demolizione e ricostruzione della botte sifone del canale Cittadino all'attraversamento del canale Boicelli	Relazione geotecnica

APPENDICE A – ANALISI PROVE CPTU

 Via Francesco Zanardi 157/6 - 40131 Bologna (I) MC Engineering Srl Tel +39 051 4211945 - info@studio-chinni.it <small>ISO 9001 392876</small>	Cliente: REGIONE EMILIA ROMAGNA	Codice: 1316-R-6010-E-1 Data: 04/06/2018
	Demolizione e ricostruzione della botte sifone del canale Cittadino all'attraversamento del canale Boicelli	Relazione geotecnica

CPTU ANALYZER by Mario Chinni (mchinni1965@gmail.com) - 2013-2014

User: MC Engineering Srl

Reference: Robertson, P.K. & Cabal, K.L. (2012) Guide to Cone Penetration Testing
For Geotechnical Engineering. Gregg Drilling & Testing Inc., 5th ed

Project: Botte Sifone Cittadino

Ground test: CPTU 01/2014

Number of acquired points.... = 1697
 Starting investigation depth. = 1.04 m
 Ending investigation depth... = 35.06 m
 Total investigated length.... = 34.02 m
 Acquisition step..... = 0.02 m

Groundwater depth..... = 1.50 m
 Foundation depth..... = 5.00 m
 PGA for liquefaction analysis = 0.23 g
 Local Magnitude..... = 6.00

Weighted Vs [Vs30]..... = 192.74 m/s

Seismic Ground Soil Classification (Ref EN1998-1)


Ground Type C: Deep deposits of dense or medium dense sand, gravel or stiff clay with
thickness from several tens to many hundreds of metres (Vs30 180-360 m/s)

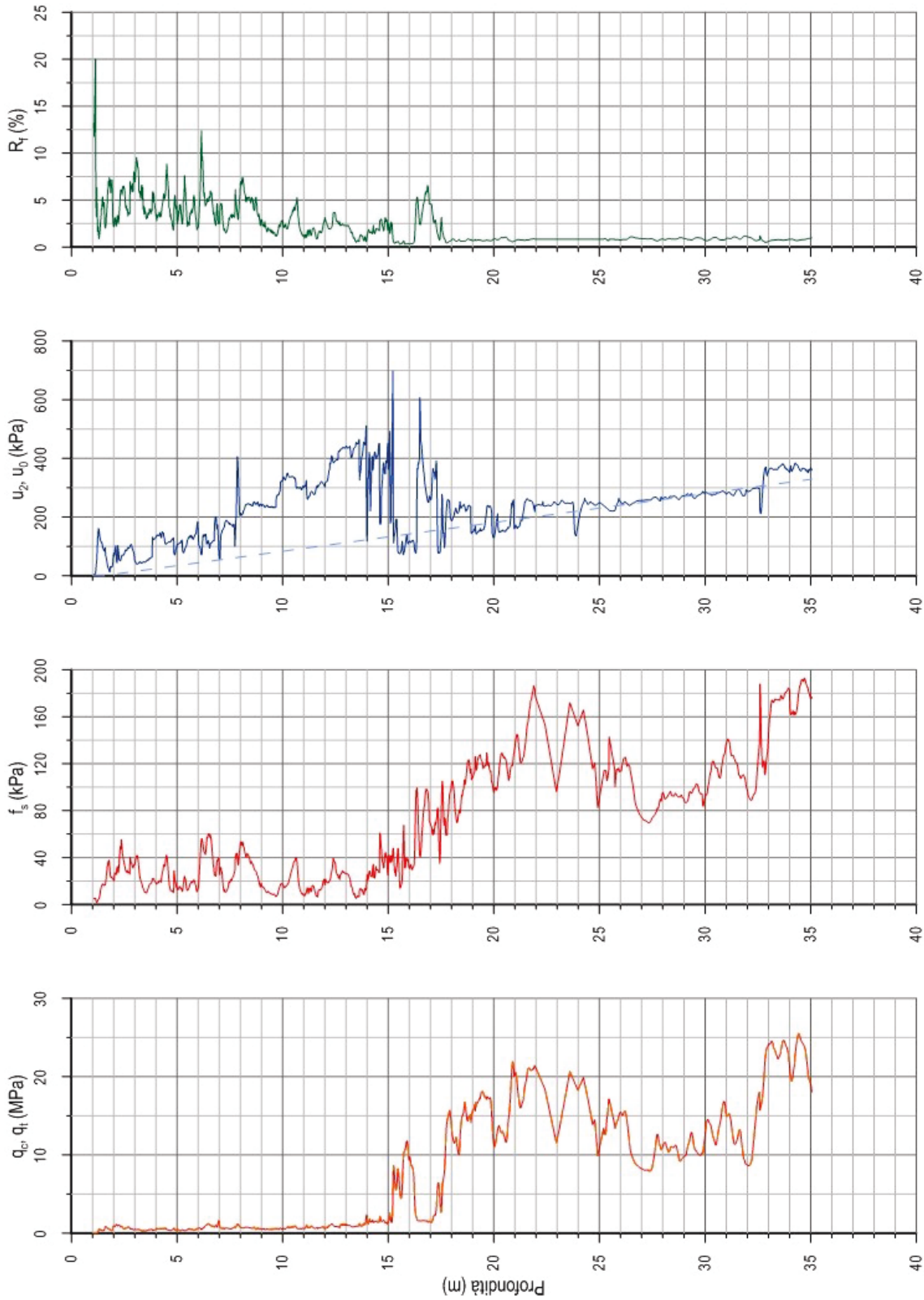
Liquefaction Index up to 20 m = 0.33


Reference: Iwasaki et al (1982)

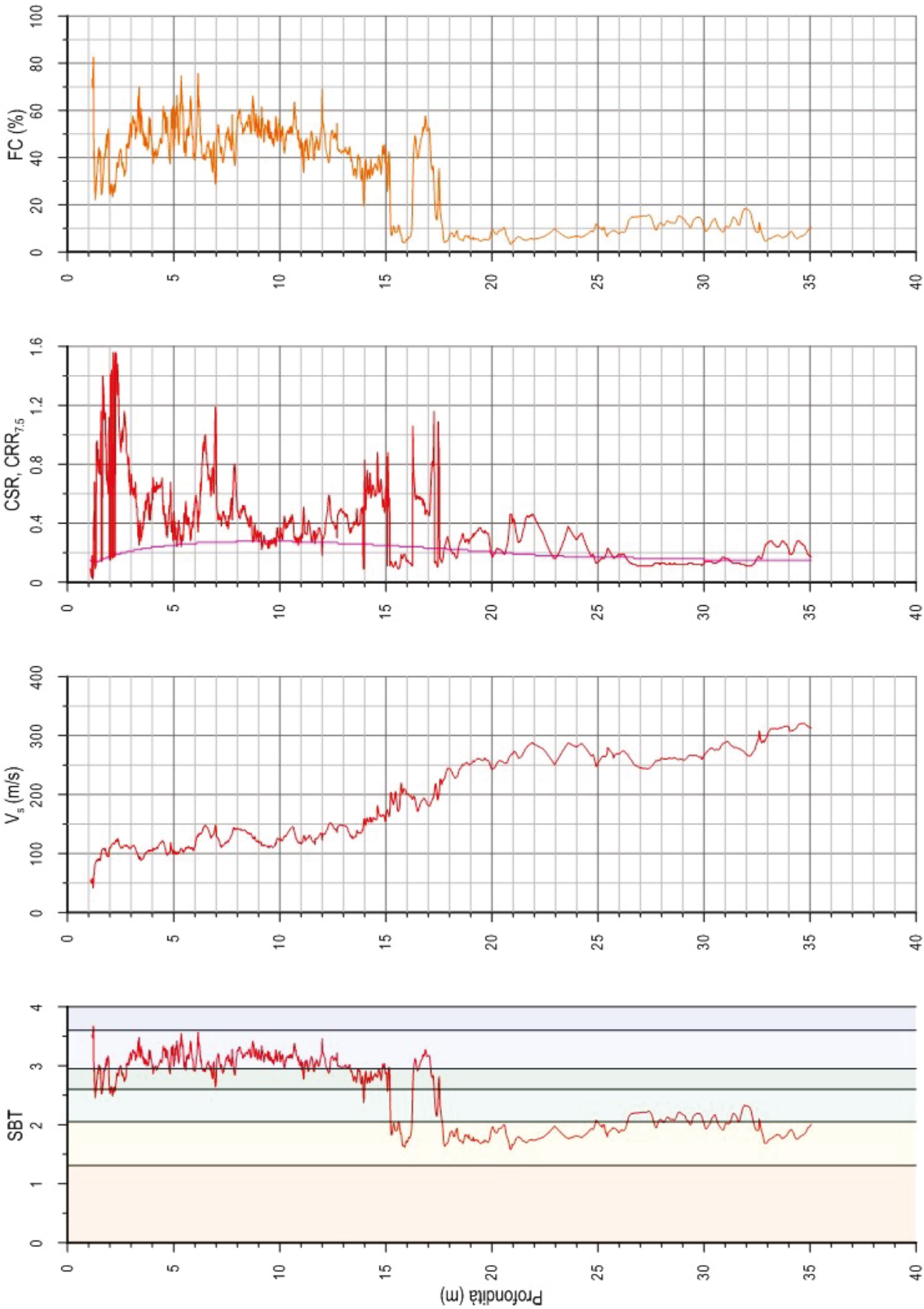
Liquefaction Hazard: Very Low


Post Eqk settlements..... = 3.29 cm

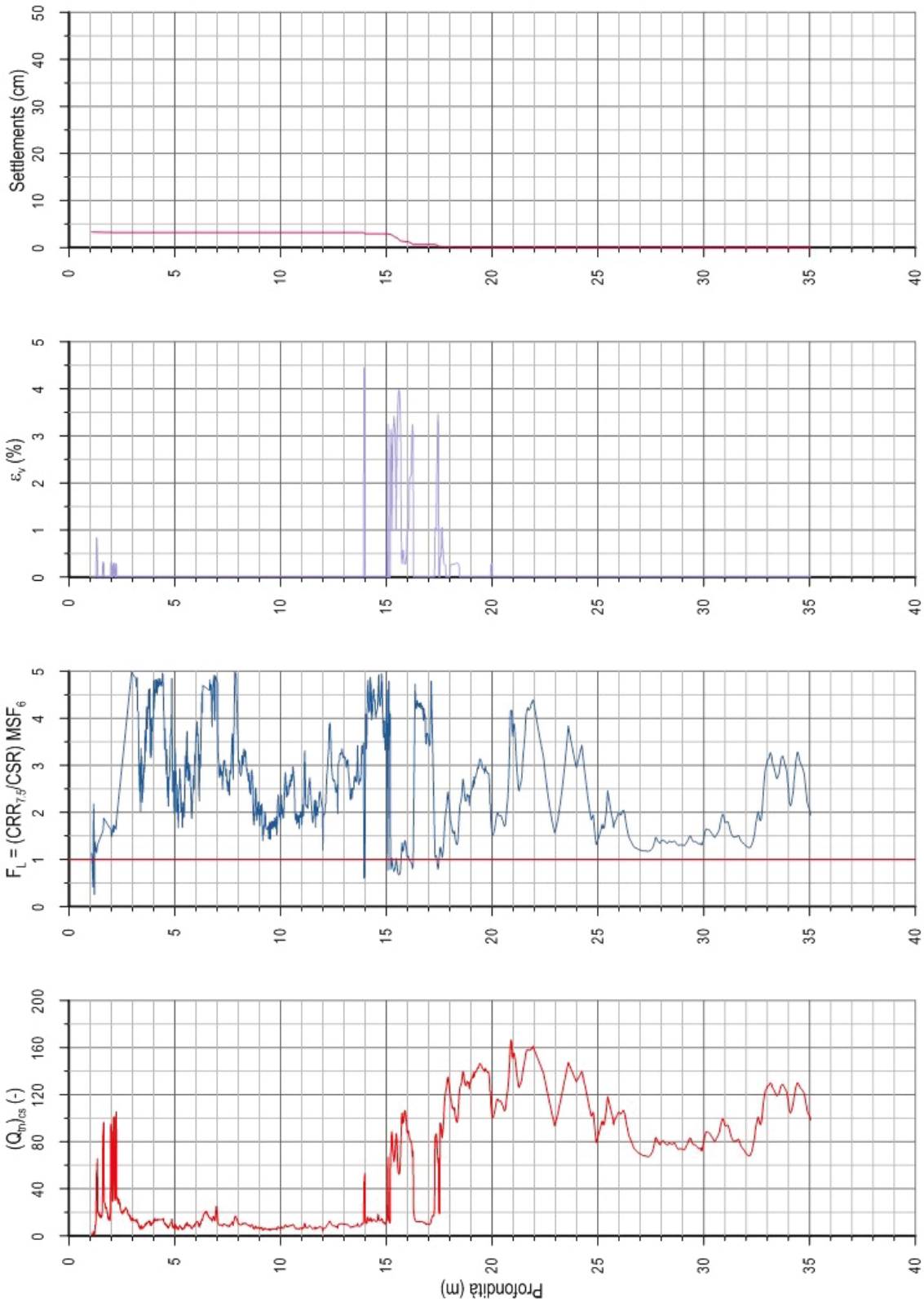
 Via Francesco Zanardi 157/6 - 40131 Bologna (I) MC Engineering Srl Tel +39 051 4211945 - info@studio-chinni.it <small>ISO 9001 392876</small>	Cliente: REGIONE EMILIA ROMAGNA	Codice: 1316-R-6010-E-1 Data: 04/06/2018
	Demolizione e ricostruzione della botte sifone del canale Cittadino all'attraversamento del canale Boicelli	Relazione geotecnica




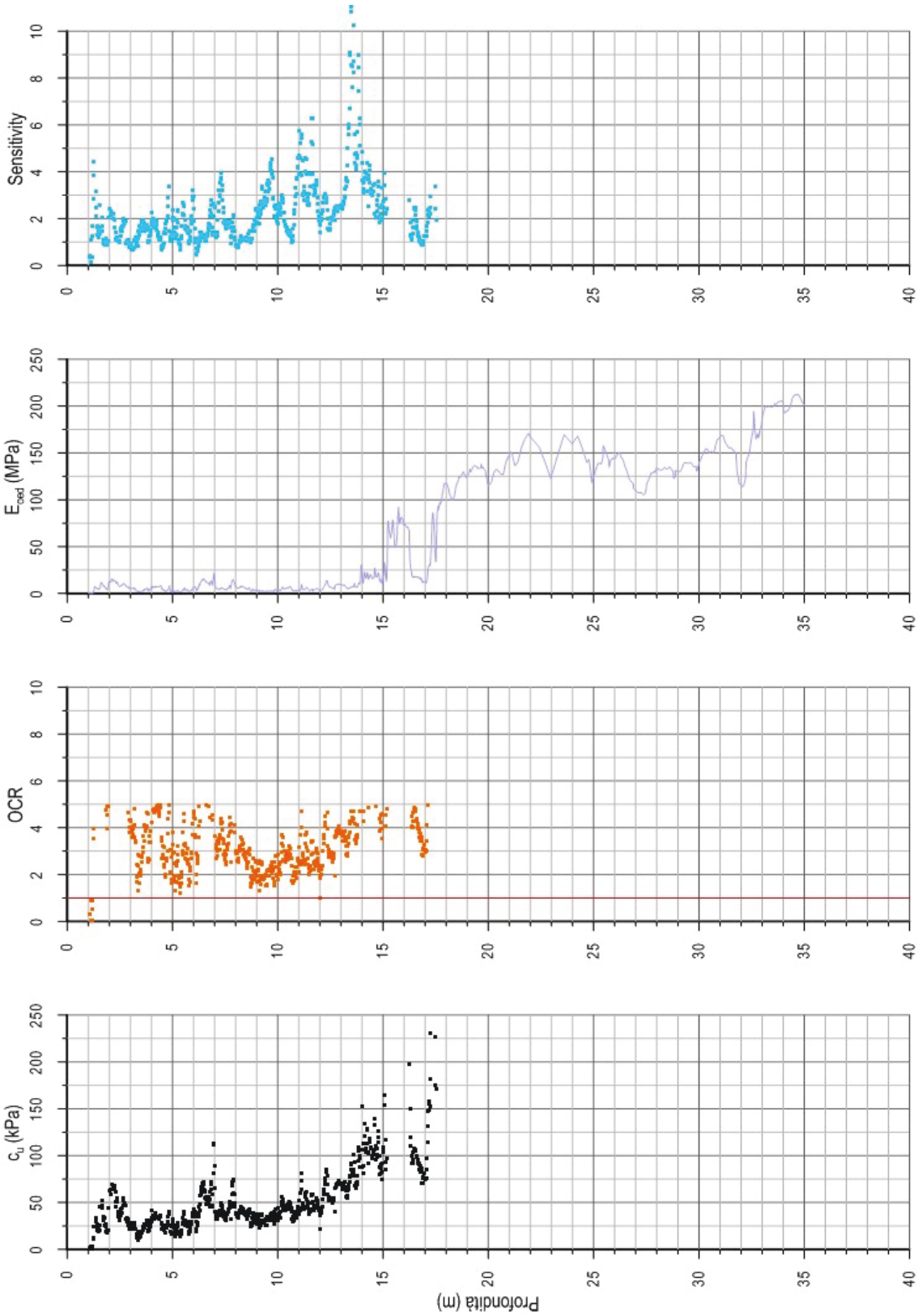
 Via Francesco Zanardi 157/6 - 40131 Bologna (I) MC Engineering Srl Tel +39 051 4211945 - info@studio-chinni.it <small>ISO 9001 392876</small>	Cliente: REGIONE EMILIA ROMAGNA	Codice: 1316-R-6010-E-1 Data: 04/06/2018
	Demolizione e ricostruzione della botte sifone del canale Cittadino all'attraversamento del canale Boicelli	Relazione geotecnica




 Via Francesco Zanardi 157/6 - 40131 Bologna (I) MC Engineering Srl Tel +39 051 4211945 - info@studio-chinni.it <small>ISO 9001 392876</small>	Cliente: REGIONE EMILIA ROMAGNA	Codice: 1316-R-6010-E-1 Data: 04/06/2018
	Demolizione e ricostruzione della botte sifone del canale Cittadino all'attraversamento del canale Boicelli	Relazione geotecnica



 Via Francesco Zanardi 157/6 - 40131 Bologna (I) MC Engineering Srl Tel +39 051 4211945 - info@studio-chinni.it <small>ISO 9001 392876</small>	Cliente: REGIONE EMILIA ROMAGNA	Codice: 1316-R-6010-E-1 Data: 04/06/2018
	Demolizione e ricostruzione della botte sifone del canale Cittadino all'attraversamento del canale Boicelli	Relazione geotecnica



 Via Francesco Zanardi 157/6 - 40131 Bologna (I) MC Engineering Srl Tel +39 051 4211945 - info@studio-chinni.it <small>ISO 9001 392876</small>	Cliente: REGIONE EMILIA ROMAGNA	Codice: 1316-R-6010-E-1 Data: 04/06/2018
	Demolizione e ricostruzione della botte sifone del canale Cittadino all'attraversamento del canale Boicelli	Relazione geotecnica

CPTU ANALYZER by Mario Chinni (mchinni1965@gmail.com) - 2013-2014

User: MC Engineering Srl

Reference: Robertson, P.K. & Cabal, K.L. (2012) Guide to Cone Penetration Testing
For Geotechnical Engineering. Gregg Drilling & Testing Inc., 5th ed

Project: Botte Sifone Cittadino

Ground test: CPTU 02/2014

Number of acquired points.... = 1430
 Starting investigation depth. = 1.06 m
 Ending investigation depth... = 29.64 m
 Total investigated length.... = 28.58 m
 Acquisition step..... = 0.02 m

Groundwater depth..... = 1.50 m
 Foundation depth..... = 5.00 m
 PGA for liquefaction analysis = 0.23 g
 Local Magnitude..... = 6.00

Warning! Weighted Vs evaluation is limited up to 24.64 m from starting depth

Weighted Vs [Vs30]..... = 194.27 m/s
 Weighted Vs Represent Only 24.64 m of Ground Depth


Seismic Ground Soil Classification (Ref EN1998-1)

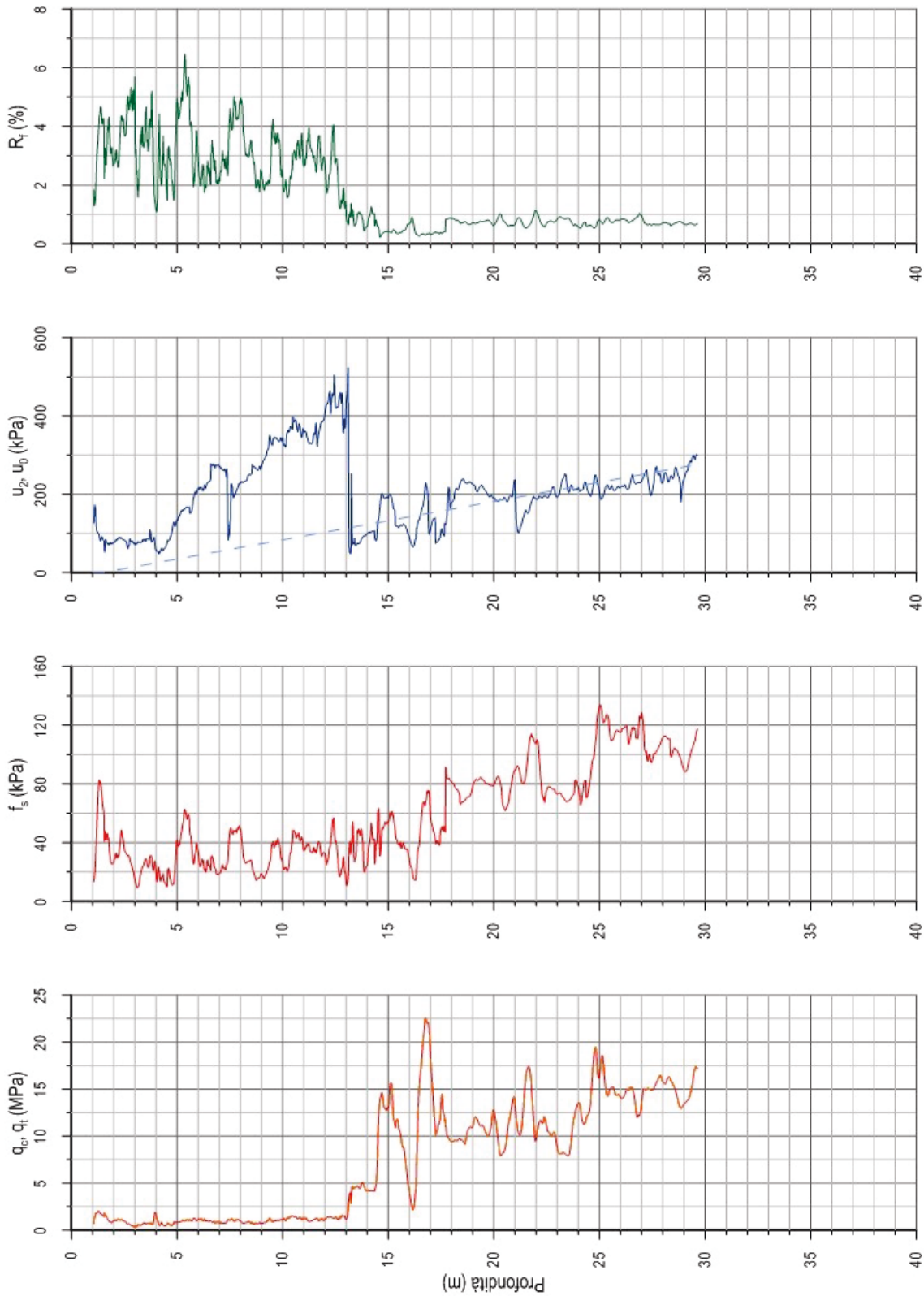
Ground Type C: Deep deposits of dense or medium dense sand, gravel or stiff clay with
thickness from several tens to many hundreds of metres (Vs30 180-360 m/s)


Liquefaction Index up to 20 m = 1.27
 Reference: Iwasaki et al (1982)

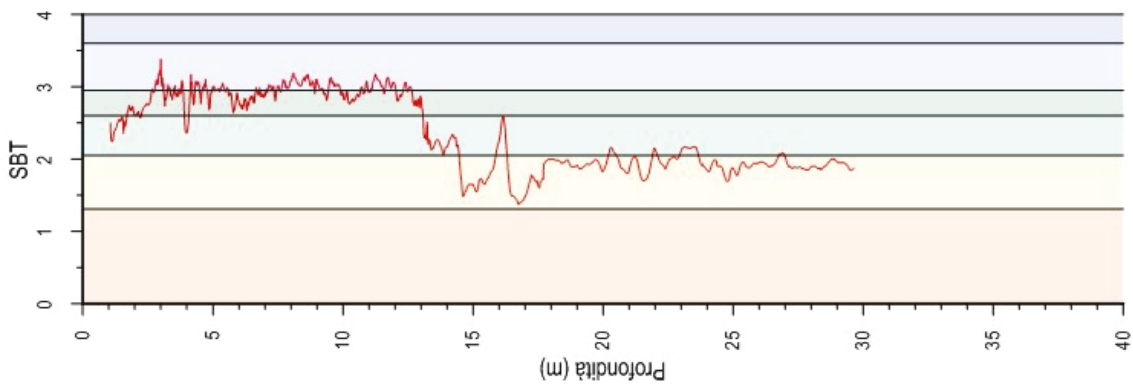
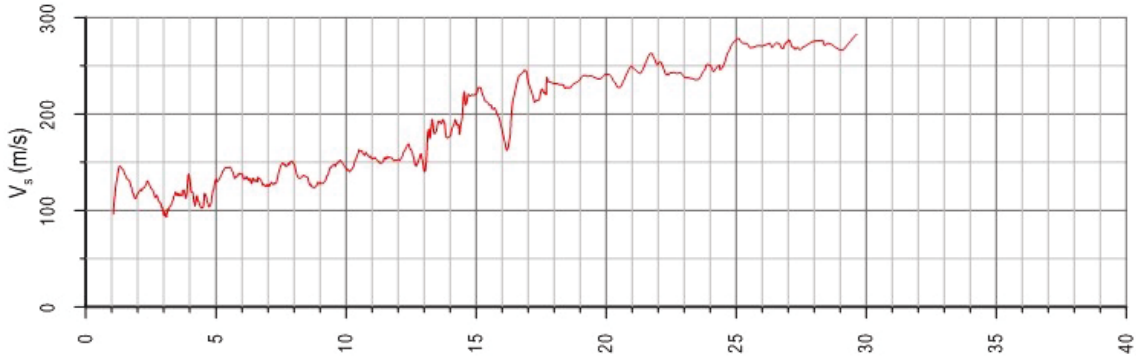
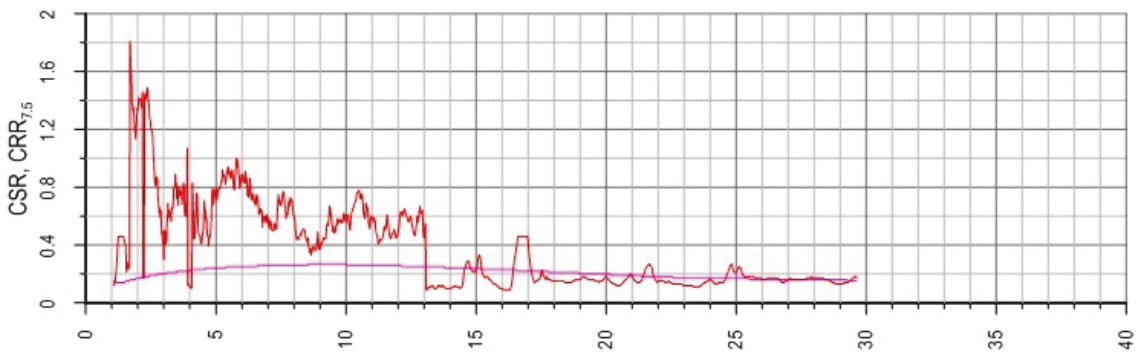
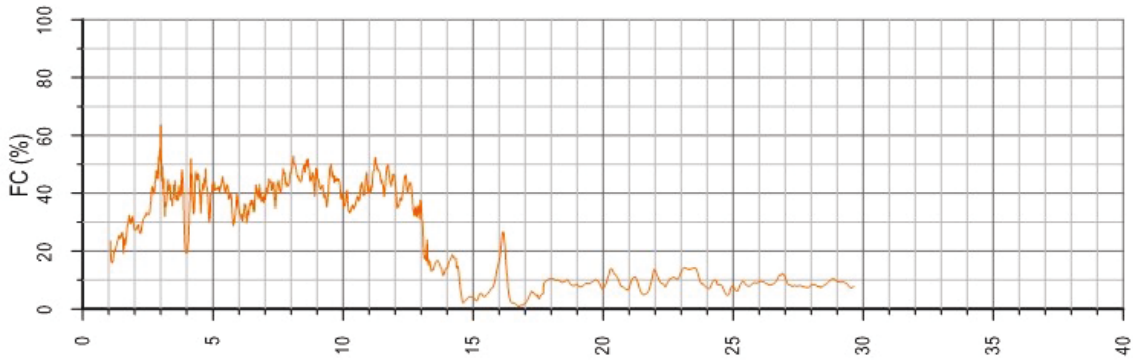
Liquefaction Hazard: Very Low


Post Eqk settlements..... = 9.04 cm

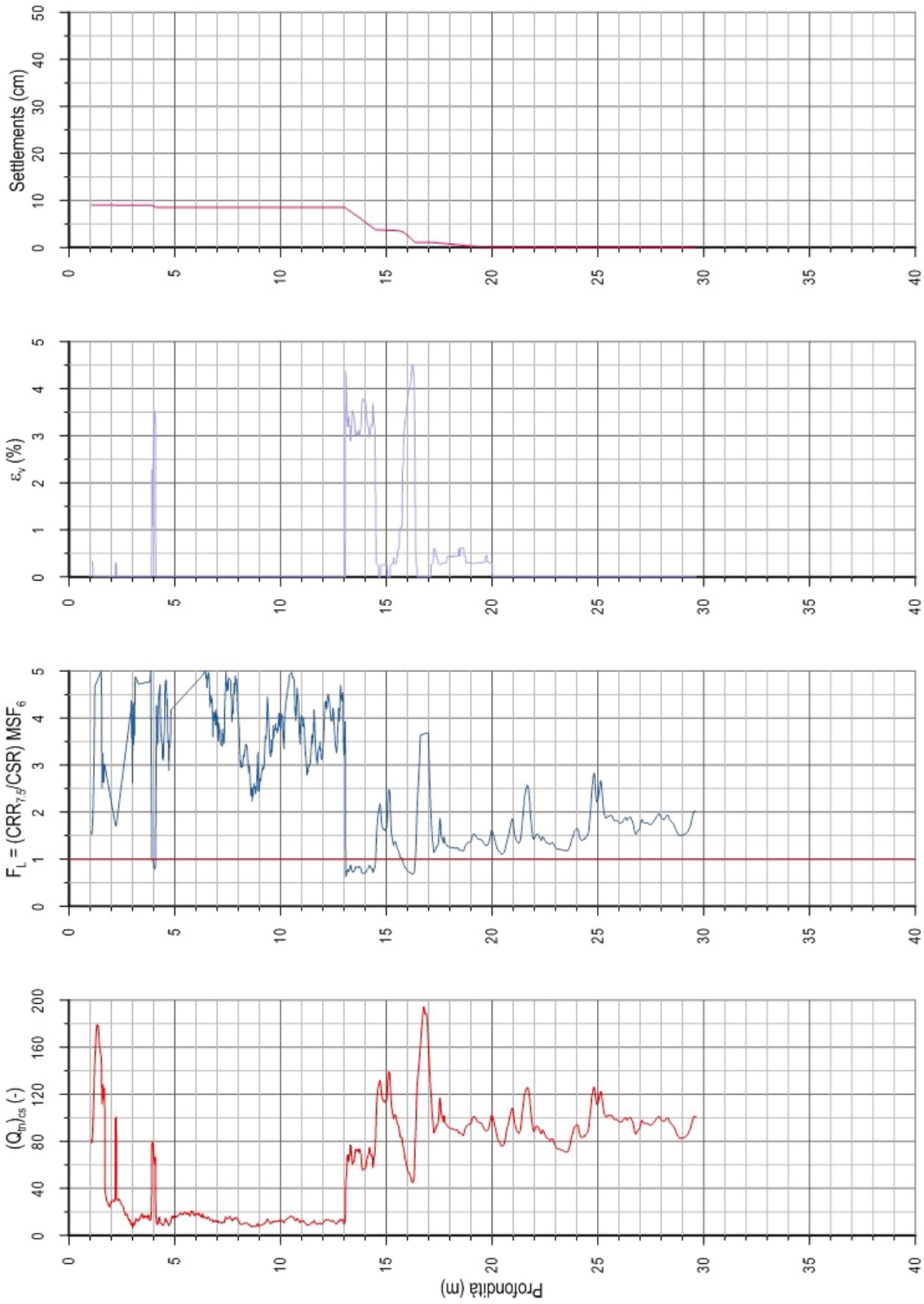
 Via Francesco Zanardi 157/6 - 40131 Bologna (I) MC Engineering Srl Tel +39 051 4211945 - info@studio-chinni.it <small>ISO 9001 392876</small>	Cliente: REGIONE EMILIA ROMAGNA	Codice: 1316-R-6010-E-1 Data: 04/06/2018
	Demolizione e ricostruzione della botte sifone del canale Cittadino all'attraversamento del canale Boicelli	Relazione geotecnica




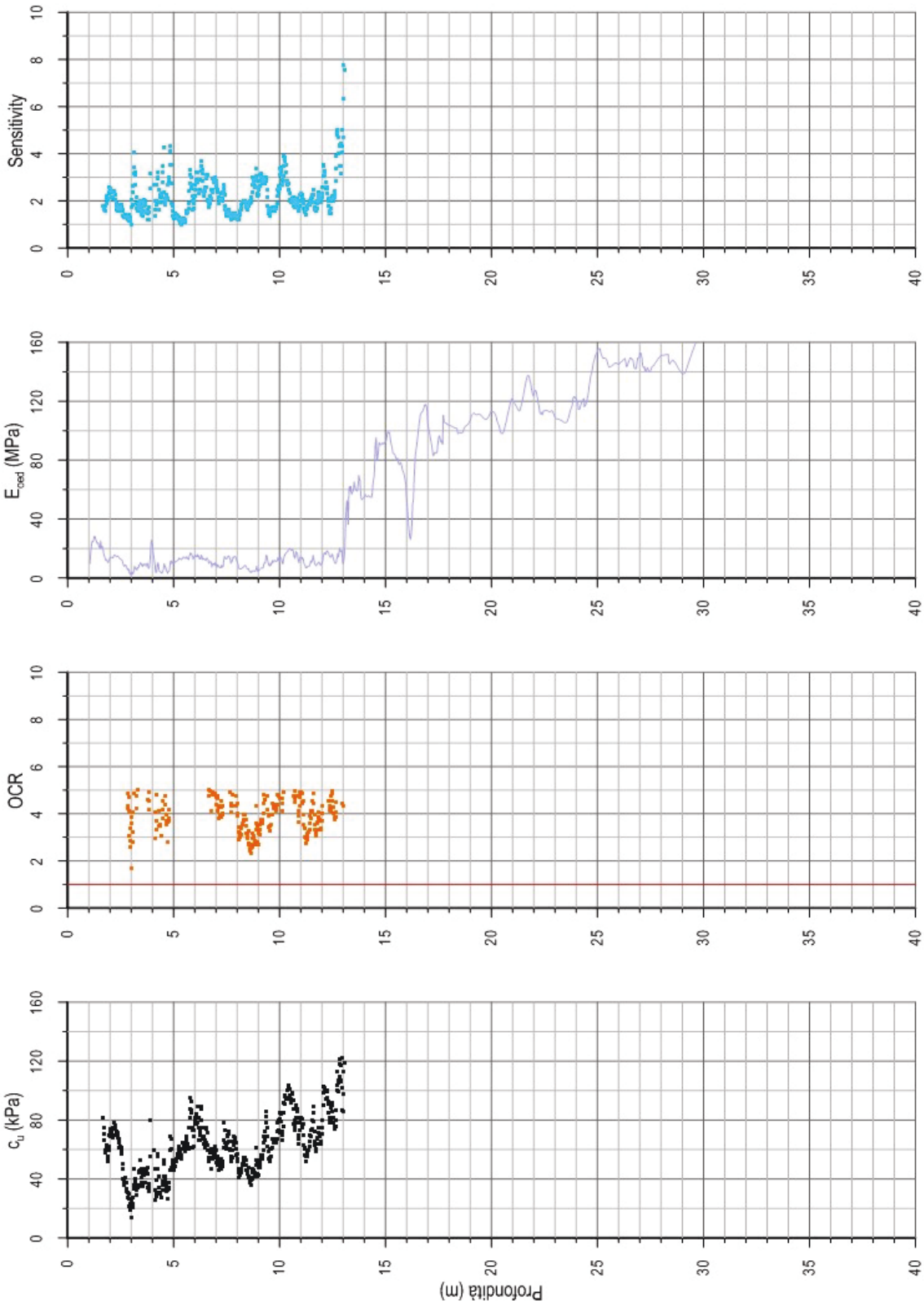
 Via Francesco Zanardi 157/6 - 40131 Bologna (I) MC Engineering Srl Tel +39 051 4211945 - info@studio-chinni.it <small>ISO 9001 392876</small>	Cliente: REGIONE EMILIA ROMAGNA	Codice: 1316-R-6010-E-1 Data: 04/06/2018
	Demolizione e ricostruzione della botte sifone del canale Cittadino all'attraversamento del canale Boicelli	Relazione geotecnica




 Via Francesco Zanardi 157/6 - 40131 Bologna (I) MC Engineering Srl Tel +39 051 4211945 - info@studio-chinni.it <small>ISO 9001 392876</small>	Cliente: REGIONE EMILIA ROMAGNA	Codice: 1316-R-6010-E-1 Data: 04/06/2018
	Demolizione e ricostruzione della botte sifone del canale Cittadino all'attraversamento del canale Boicelli	Relazione geotecnica




 Via Francesco Zanardi 157/6 - 40131 Bologna (I) MC Engineering Srl Tel +39 051 4211945 - info@studio-chinni.it <small>ISO 9001 392876</small>	Cliente: REGIONE EMILIA ROMAGNA	Codice: 1316-R-6010-E-1 Data: 04/06/2018
	Demolizione e ricostruzione della botte sifone del canale Cittadino all'attraversamento del canale Boicelli	Relazione geotecnica



 Via Francesco Zanardi 157/6 - 40131 Bologna (I) MC Engineering Srl Tel +39 051 4211945 - info@studio-chinni.it <small>ISO 9001 392876</small>	Cliente: REGIONE EMILIA ROMAGNA	Codice: 1316-R-6010-E-1 Data: 04/06/2018
	Demolizione e ricostruzione della botte sifone del canale Cittadino all'attraversamento del canale Boicelli	Relazione geotecnica

APPENDICE B – RESISTENZA DEI PALI ISOLATI

 Via Francesco Zanardi 157/6 - 40131 Bologna (I) MC Engineering Srl Tel +39 051 4211945 - info@studio-chinni.it <small>ISO 9001 392876</small>	Cliente: REGIONE EMILIA ROMAGNA	Codice: 1316-R-6010-E-1 Data: 04/06/2018
	Demolizione e ricostruzione della botte sifone del canale Cittadino all'attraversamento del canale Boicelli	Relazione geotecnica

Palo Trivellato (D800mmL24m), NTC08

Diametro del fusto	Ds := 0.8-m	Diametro della base	Db := 0.8-m	Sezione del palo	$A_p := \pi \cdot \frac{D_s^2}{4} = 0.503 \text{ m}^2$
Quota testa palo	zt := 1.0-m	Lunghezza del palo	Lp := 15-m	Profondità della falda	zw := 1.5-m

Dati del terreno

Pesi di volume terreno / acqua $\gamma_w := 9.806 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}^3}$

Determinazione angolo d'attrito efficace caratteristico

$$\phi_k(z) := \begin{cases} 25^\circ & \text{if } z \leq 17\text{-m} \\ (35^\circ) & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$\gamma(z) := 17 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}^3}$$

$$\sigma_{tot}(z) := \gamma(z) \cdot z$$

Numero di verticali indagate 1

Coefficienti di correlazione $\xi_3 := 1.7$

Coefficiente di capacità portante

$$N_k(z) := 1.3 \left(\frac{1 + \sin(\phi_k(z))}{1 - \sin(\phi_k(z))} \right) \cdot e^{-\pi \cdot \tan(\phi_k(z))} \cdot 0.2 \cdot \frac{3 \cdot \tan(\phi_k(z))}{\pi}$$

$$N_k(zt + Lp) = 6.769$$


$$u(z) := \text{if}[z \leq zw, 0, \gamma_w \cdot (z - zw)]$$

$$\sigma_{eff}(z) := \sigma_{tot}(z) - u(z)$$

$$\beta(z) := \text{if}[z \geq 0\text{-m}, \tan(\phi_k(z)) \cdot (1 - \sin(\phi_k(z))), 0]$$

$$\tau_s(z) := \frac{(\beta(z) \cdot \sigma_{eff}(z))}{\xi_3}$$

$$q_b(z) := \frac{(N_k(z) \cdot \sigma_{eff}(z))}{\xi_3}$$

 Via Francesco Zanardi 157/6 - 40131 Bologna (I) MC Engineering Srl Tel +39 051 4211945 - info@studio-chinni.it <small>ISO 9001 392876</small>	Cliente: REGIONE EMILIA ROMAGNA	Codice: 1316-R-6010-E-1 Data: 04/06/2018
	Demolizione e ricostruzione della botte sifone del canale Cittadino all'attraversamento del canale Boicelli	Relazione geotecnica

Resistenza del palo

$$Q_s := \pi \cdot D_s \int_{z_t}^{z_t + L_p} \tau_s(z) dz \quad \boxed{Q_s = 452 \text{ kN}}$$

$$Q_b := q_b(z_t + L_p) \cdot A_p \quad \boxed{Q_b = 260 \text{ kN}}$$

$$Q_t := 0.9 \cdot Q_s \quad \boxed{Q_t = 407 \text{ kN}}$$

$$Q_c := Q_s + Q_b \quad \boxed{Q_c = 712 \text{ kN}}$$

Cedimento del palo singolo

Modulo elastico del palo $E_p := 30 \text{ GPa}$

Modulo tangente del terreno alla punta $E_b := 50 \text{ MPa}$

Lunghezza libera del palo $L_0 := 0$ Lunghezza vincolata $L_a := L_p - L_0 = 15 \text{ m}$

Rapporto di lunghezza attiva $ke := 0.475$ Rapporto di flessibilità $Ms := 0.00125$


Correttivi asintotici $\eta_s := \frac{1}{0.889}$ $\eta_b := 1$

Cedimento elastico $Se(F_p) := \text{if} \left[F_p \leq \eta_s \cdot Q_s, \frac{F_p \cdot (L_0 + ke \cdot L_a)}{E_p \cdot A_p}, \frac{[F_p \cdot L_a - \eta_s \cdot Q_s \cdot (1 - ke) \cdot L_a]}{E_p \cdot A_p} \right]$

$$f_0(F_p) := D_b \cdot E_b \cdot (F_p - \eta_s \cdot Q_s) - D_b \cdot E_b \cdot \eta_b \cdot Q_b$$

$$g_0(F_p) := F_p \cdot (0.6 \cdot \eta_b \cdot Q_b + Ms \cdot D_s \cdot D_b \cdot E_b) - \eta_s \cdot Q_s \cdot 0.6 \cdot \eta_b \cdot Q_b - D_s \cdot D_b \cdot E_b \cdot \eta_b \cdot Q_b \cdot Ms$$

$$h_0(F_p) := Ms \cdot D_s \cdot 0.6 \cdot \eta_b \cdot Q_b \cdot F_p$$

 Via Francesco Zanardi 157/6 - 40131 Bologna (I) MC Engineering Srl Tel +39 051 4211945 - info@studio-chinni.it <small>ISO 9001 392876</small>	Cliente: REGIONE EMILIA ROMAGNA	Codice: 1316-R-6010-E-1 Data: 04/06/2018
	Demolizione e ricostruzione della botte sifone del canale Cittadino all'attraversamento del canale Boicelli	Relazione geotecnica

cedimento rigido

$$St(Fp) := \frac{-g(Fp) - \sqrt{g(Fp)^2 - 4 \cdot f(Fp) \cdot h(Fp)}}{2 \cdot f(Fp)}$$

Cedimento totale

$$Stot(Fp) := St(Fp) + Se(Fp)$$

$$Quota\ carico\ laterale \quad Fs(Fp) := \frac{\eta_s \cdot Q_s \cdot St(Fp)}{Ms \cdot D_s + St(Fp)}$$

Cedimento per Q laterale

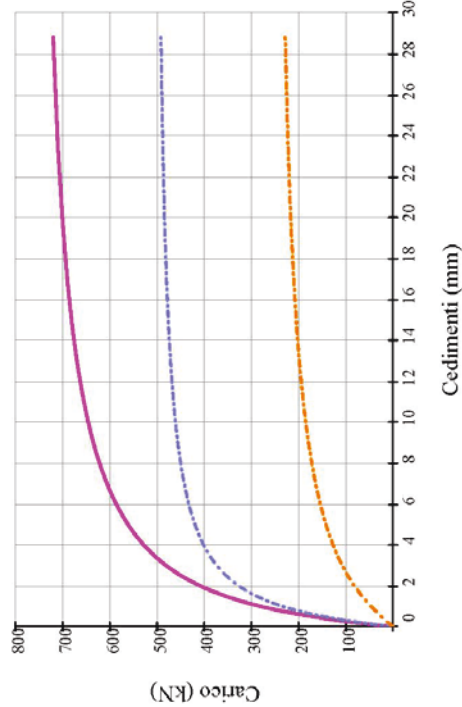
$$Ss(Fp) := \frac{Ms \cdot D_s \cdot Fs(Fp)}{(\eta_s \cdot Q_s - Fs(Fp))}$$

$$Quota\ carico\ di\ punta \quad Fb(Fp) := \frac{Db \cdot Eb \cdot \eta_b \cdot Q_b \cdot St(Fp)}{0.6 \cdot \eta_b \cdot Q_b + St(Fp) \cdot Db \cdot Eb}$$

Cedimento per Q alla base

$$Sb(Fp) := \frac{0.6 \cdot \eta_b \cdot Q_b \cdot Fb(Fp)}{Db \cdot Eb \cdot (\eta_b \cdot Q_b - Fb(Fp))}$$

$$Fp := 0 \cdot kN, 10 \cdot kN, 1.02(Q_s + Q_b)$$



Cedimento di riferimento per la rigidità secante
 $\delta_0 := 10 \cdot mm$
 Given



$Q_{ref} := 90\% \cdot Q_s$
 $Q_{ref} = 407 \cdot kN$

$$Stot(Q_{ref}) - \delta_0 = 0$$

$$w_0 := F_{ind}(\delta_0) = 1.97 \cdot mm \quad \text{cedimento in corrispondenza di } Q_{ref}$$

Rigidità secante del palo singolo

$$K_{pile} := \frac{Q_{ref}}{w_0} = 206.58 \frac{MN}{m}$$

 Via Francesco Zanardi 157/6 - 40131 Bologna (I) MC Engineering Srl Tel +39 051 4211945 - info@studio-chinni.it 	Cliente: REGIONE EMILIA ROMAGNA	Codice: 1316-R-6010-E-1 Data: 04/06/2018
	Demolizione e ricostruzione della botte sifone del canale Cittadino all'attraversamento del canale Boicelli	Relazione geotecnica

RESISTENZE DI PROGETTO (PALI TRIVELLATI)

$L_p = 15\text{ m}$

$$\gamma_b(\text{Rtype}) := \begin{cases} 1.00 & \text{if Rtype} = \text{"R1"} \\ 1.70 & \text{if Rtype} = \text{"R2"} \\ 1.35 & \text{if Rtype} = \text{"R3"} \end{cases}$$

$$\gamma_s(\text{Rtype}) := \begin{cases} 1.00 & \text{if Rtype} = \text{"R1"} \\ 1.45 & \text{if Rtype} = \text{"R2"} \\ 1.15 & \text{if Rtype} = \text{"R3"} \end{cases}$$

$$\gamma_{st}(\text{Rtype}) := \begin{cases} 1.00 & \text{if Rtype} = \text{"R1"} \\ 1.60 & \text{if Rtype} = \text{"R2"} \\ 1.25 & \text{if Rtype} = \text{"R3"} \end{cases}$$

$$\text{Red}(\text{Rtype}) := \frac{Q_s}{\gamma_s(\text{Rtype})} + \frac{Q_b}{\gamma_b(\text{Rtype})}$$

Resistenza di progetto a compressione



$$\text{Rtd}(\text{Rtype}) := \frac{Q_t}{\gamma_{st}(\text{Rtype})}$$

Resistenza di progetto a trazione

Set A1M1R1 $\text{Red}(\text{"R1"}) = 712\text{ kN}$ $\text{Rtd}(\text{"R1"}) = 407\text{ kN}$

Set A2M1R2 $\text{Red}(\text{"R2"}) = 465\text{ kN}$ $\text{Rtd}(\text{"R2"}) = 254\text{ kN}$

Set A1M1R3 $\text{Red}(\text{"R3"}) = 586\text{ kN}$ $\text{Rtd}(\text{"R3"}) = 326\text{ kN}$

 Via Francesco Zanardi 157/6 - 40131 Bologna (I) MC Engineering Srl Tel +39 051 4211945 - info@studio-chinni.it 	Cliente: REGIONE EMILIA ROMAGNA	Codice: 1316-R-6010-E-1 Data: 04/06/2018
	Demolizione e ricostruzione della botte sifone del canale Cittadino all'attraversamento del canale Boicelli	Relazione geotecnica

Palo Trivellato (D800mmL24m), NTC08

Diametro del fusto $D_s := 0.8\text{-m}$ Diametro della base $D_b := 0.8\text{-m}$ Sezione del palo $A_p := \pi \cdot \frac{D_s^2}{4} = 0.503\text{ m}^2$
 Quota testa palo $z_t := 1.0\text{-m}$ Lunghezza del palo $L_p := 18\text{-m}$ Profondità della falda $z_w := 1.5\text{-m}$

Dati del terreno

Pesì di volume terreno / acqua $\gamma_w := 9.806 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}^3}$
 $\gamma(z) := 17 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}^3}$

Determinazione angolo d'attrito efficace caratteristico

$$\phi_k(z) := \begin{cases} 25^\circ & \text{if } z \leq 17\text{-m} \\ 35^\circ & \text{otherwise} \end{cases}$$

Numero di verticali indagate 1

Coefficienti di correlazione $\xi_3 := 1.7$

Coefficiente di capacità portante

$$N_k(z) := 1.3 \left(\frac{1 + \sin(\phi_k(z))}{1 - \sin(\phi_k(z))} \right)^{\xi_3} \cdot e^{-\pi \cdot \tan(\phi_k(z)) \cdot 0.2} \cdot \frac{3 \cdot \tan(\phi_k(z))}{\pi}$$

$N_k(z_t + L_p) = 14.756$


$$u(z) := \text{if}[z \leq z_w, 0, \gamma_w \cdot (z - z_w)]$$

$$\sigma_{\text{eff}}(z) := \sigma_{\text{tot}}(z) - u(z)$$

$$\beta(z) := \text{if}[z \geq 0\text{-m}, \tan(\phi_k(z)) \cdot (1 - \sin(\phi_k(z))), 0]$$

$$\tau_s(z) := \frac{(\beta(z) \cdot \sigma_{\text{eff}}(z))}{\xi_3}$$

$$q_b(z) := \frac{(N_k(z) \cdot \sigma_{\text{eff}}(z))}{\xi_3}$$

 Via Francesco Zanardi 157/6 - 40131 Bologna (I) MC Engineering Srl Tel +39 051 4211945 - info@studio-chinni.it <small>ISO 9001 392876</small>	Cliente: REGIONE EMILIA ROMAGNA	Codice: 1316-R-6010-E-1 Data: 04/06/2018
	Demolizione e ricostruzione della botte sifone del canale Cittadino all'attraversamento del canale Boicelli	Relazione geotecnica

Resistenza del palo

$$Q_s := \pi \cdot D_s \int_{z_t}^{z_t + L_p} \tau_s(z) dz \quad \boxed{Q_s = 633 \cdot kN}$$

$$Q_b := q_b(z_t + L_p) \cdot A_p \quad \boxed{Q_b = 661 \cdot kN}$$

$$Q_t := 0.9 \cdot Q_s \quad \boxed{Q_t = 570 \cdot kN}$$

$$Q_c := Q_s + Q_b \quad \boxed{Q_c = 1293 \cdot kN}$$

Cedimento del palo singolo

Modulo elastico del palo $E_p := 30 \cdot GPa$

Modulo tangente del terreno alla punta $E_b := 50 \cdot MPa$

Lunghezza libera del palo $L_0 := 0$ Lunghezza vincolata $L_a := L_p - L_0 = 18 \text{ m}$

Rapporto di lunghezza attiva $ke := 0.475$ Rapporto di flessibilità $M_s := 0.00125$



Correttivi asintotici $\eta_s := \frac{1}{0.889}$ $\eta_b := 1$

Cedimento elastico $S_e(F_p) := \text{if} \left[F_p \leq \eta_s \cdot Q_s, \frac{F_p \cdot (L_0 + ke \cdot L_a)}{E_p \cdot A_p}, \frac{[F_p \cdot L_a - \eta_s \cdot Q_s \cdot (1 - ke) \cdot L_a]}{E_p \cdot A_p} \right]$

$$f_0(F_p) := D_b \cdot E_b \cdot (F_p - \eta_s \cdot Q_s) - D_b \cdot E_b \cdot \eta_b \cdot Q_b$$

$$g_0(F_p) := F_p \cdot (0.6 \cdot \eta_b \cdot Q_b + M_s \cdot D_s \cdot D_b \cdot E_b) - \eta_s \cdot Q_s \cdot 0.6 \cdot \eta_b \cdot Q_b - D_s \cdot D_b \cdot E_b \cdot \eta_b \cdot Q_b \cdot M_s$$

$$h_0(F_p) := M_s \cdot D_s \cdot 0.6 \cdot \eta_b \cdot Q_b \cdot F_p$$

 Via Francesco Zanardi 157/6 - 40131 Bologna (I) MC Engineering Srl Tel +39 051 4211945 - info@studio-chinni.it 	Cliente: REGIONE EMILIA ROMAGNA	Codice: 1316-R-6010-E-1 Data: 04/06/2018
	Demolizione e ricostruzione della botte sifone del canale Cittadino all'attraversamento del canale Boicelli	Relazione geotecnica

cedimento rigido

$$S_t(F_p) := \frac{-g_0(F_p) - \sqrt{g_0(F_p)^2 - 4 \cdot f_0(F_p) \cdot h_0(F_p)}}{2 \cdot f_0(F_p)}$$

Cedimento totale

$$S_{tot}(F_p) := S_t(F_p) + S_e(F_p)$$

$$F_{s(F_p)} := \frac{\eta_s \cdot Q_s \cdot S_t(F_p)}{M_s \cdot D_s + S_t(F_p)}$$

Cedimento per Q laterale

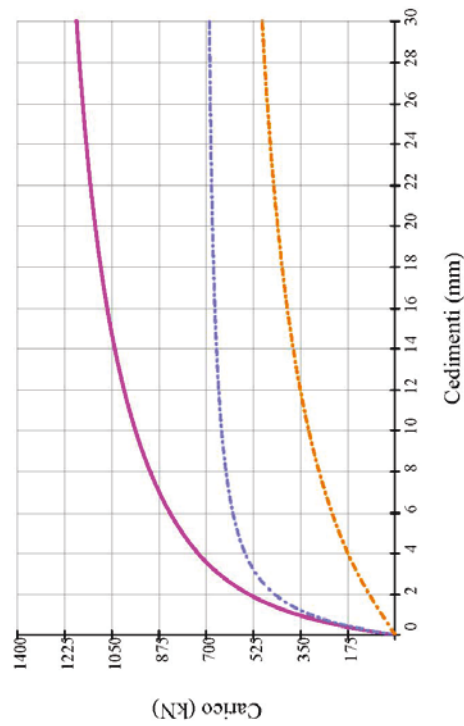
$$S_s(F_p) := \frac{M_s \cdot D_s \cdot F_{s(F_p)}}{(\eta_s \cdot Q_s - F_{s(F_p)})}$$

$$F_b(F_p) := \frac{D_b \cdot E_b \cdot \eta_b \cdot Q_b \cdot S_t(F_p)}{0.6 \cdot \eta_b \cdot Q_b + S_t(F_p) \cdot D_b \cdot E_b}$$

Cedimento per Q alla base

$$S_b(F_p) := \frac{0.6 \cdot \eta_b \cdot Q_b \cdot F_b(F_p)}{D_b \cdot E_b \cdot (\eta_b \cdot Q_b - F_b(F_p))}$$

$F_p := 0 \text{ kN}, 10 \text{ kN}, \dots, 1.02(Q_s + Q_b)$



Cedimento di riferimento per la rigidità secante
 $\delta_0 := 10 \text{ mm}$
 Given



$Q_{ref} := 90\% \cdot Q_s$
 $Q_{ref} = 570 \text{ kN}$

$S_{tot}(Q_{ref}) - \delta_0 = 0$

$w_0 := F_{ind}(\delta_0) = 2.2 \text{ mm}$ cedimento in corrispondenza di Q_{ref}

$$K_{pile} := \frac{Q_{ref}}{w_0} = 258.97 \frac{\text{MN}}{\text{m}}$$

Rigidità secante del palo singolo

 Via Francesco Zanardi 157/6 - 40131 Bologna (I) MC Engineering Srl Tel +39 051 4211945 - info@studio-chinni.it 	Cliente: REGIONE EMILIA ROMAGNA	Codice: 1316-R-6010-E-1 Data: 04/06/2018
	Demolizione e ricostruzione della botte sifone del canale Cittadino all'attraversamento del canale Boicelli	Relazione geotecnica

RESISTENZE DI PROGETTO (PALI TRIVELLATI)

$L_p = 18 \text{ m}$

$$\gamma_b(\text{Rtype}) := \begin{cases} 1.00 & \text{if Rtype} = \text{"R1"} \\ 1.70 & \text{if Rtype} = \text{"R2"} \\ 1.35 & \text{if Rtype} = \text{"R3"} \end{cases} \quad \gamma_s(\text{Rtype}) := \begin{cases} 1.00 & \text{if Rtype} = \text{"R1"} \\ 1.45 & \text{if Rtype} = \text{"R2"} \\ 1.15 & \text{if Rtype} = \text{"R3"} \end{cases} \quad \gamma_{st}(\text{Rtype}) := \begin{cases} 1.00 & \text{if Rtype} = \text{"R1"} \\ 1.60 & \text{if Rtype} = \text{"R2"} \\ 1.25 & \text{if Rtype} = \text{"R3"} \end{cases}$$

$$R_{cd}(\text{Rtype}) := \frac{Q_s}{\gamma_s(\text{Rtype})} + \frac{Q_b}{\gamma_b(\text{Rtype})}$$

Resistenza di progetto a compressione



$$R_{td}(\text{Rtype}) := \frac{Q_t}{\gamma_{st}(\text{Rtype})}$$

Resistenza di progetto a trazione

Set A1M1R1 $R_{cd}(\text{"R1"}) = 1293 \text{ kN}$ $R_{td}(\text{"R1"}) = 570 \text{ kN}$

Set A2M1R2 $R_{cd}(\text{"R2"}) = 825 \text{ kN}$ $R_{td}(\text{"R2"}) = 356 \text{ kN}$

Set A1M1R3 $R_{cd}(\text{"R3"}) = 1040 \text{ kN}$ $R_{td}(\text{"R3"}) = 456 \text{ kN}$

 Via Francesco Zanardi 157/6 - 40131 Bologna (I) MC Engineering Srl Tel +39 051 4211945 - info@studio-chinni.it 	Cliente: REGIONE EMILIA ROMAGNA	Codice: 1316-R-6010-E-1 Data: 04/06/2018
	Demolizione e ricostruzione della botte sifone del canale Cittadino all'attraversamento del canale Boicelli	Relazione geotecnica

Palo Trivellato (D800mmL24m), NTC08

Diametro del fusto $D_s := 0.8\text{-m}$ Diametro della base $D_b := 0.8\text{-m}$ Sezione del palo $A_p := \pi \cdot \frac{D_s^2}{4} = 0.503\text{ m}^2$
 Quota testa palo $z_t := 1.0\text{-m}$ Lunghezza del palo $L_p := 21\text{-m}$ Profondità della falda $z_w := 1.5\text{-m}$

Dati del terreno

Pesì di volume terreno / acqua $\gamma_w := 9.806 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}^3}$
 $\gamma(z) := 17 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}^3}$

Determinazione angolo d'attrito efficace caratteristico

$$\phi_k(z) := \begin{cases} 25^\circ & \text{if } z \leq 17\text{-m} \\ 35^\circ & \text{otherwise} \end{cases}$$

Numero di verticali indagate 1

Coefficienti di correlazione $\xi_3 := 1.7$

Coefficiente di capacità portante

$$N_k(z) := 1.3 \left(\frac{1 + \sin(\phi_k(z))}{1 - \sin(\phi_k(z))} \right) \cdot e^{-\pi \cdot \tan(\phi_k(z)) \cdot 0.2} \cdot \frac{3 \cdot \tan(\phi_k(z))}{\pi}$$

$N_k(z_t + L_p) = 14.756$


$$u(z) := \text{if}[z \leq z_w, 0, \gamma_w \cdot (z - z_w)]$$

$$\sigma_{\text{eff}}(z) := \sigma_{\text{tot}}(z) - u(z)$$

$$\beta(z) := \text{if}[z \geq 0\text{-m}, \tan(\phi_k(z)) \cdot (1 - \sin(\phi_k(z))), 0]$$

$$\tau_s(z) := \frac{(\beta(z) \cdot \sigma_{\text{eff}}(z))}{\xi_3}$$

$$q_b(z) := \frac{(N_k(z) \cdot \sigma_{\text{eff}}(z))}{\xi_3}$$

 Via Francesco Zanardi 157/6 - 40131 Bologna (I) MC Engineering Srl Tel +39 051 4211945 - info@studio-chinni.it <small>ISO 9001 392876</small>	Cliente: REGIONE EMILIA ROMAGNA	Codice: 1316-R-6010-E-1 Data: 04/06/2018
	Demolizione e ricostruzione della botte sifone del canale Cittadino all'attraversamento del canale Boicelli	Relazione geotecnica

Resistenza del palo

$$Q_s := \pi \cdot D_s \int_{z_t}^{z_t + L_p} \tau_s(z) dz \quad \boxed{Q_s = 848 \text{ kN}}$$

$$Q_b := q_b(z_t + L_p) \cdot A_p \quad \boxed{Q_b = 755 \text{ kN}}$$

$$Q_t := 0.9 \cdot Q_s \quad \boxed{Q_t = 763 \text{ kN}}$$

$$Q_c := Q_s + Q_b \quad \boxed{Q_c = 1602 \text{ kN}}$$

Cedimento del palo singolo

Modulo elastico del palo $E_p := 30 \text{ GPa}$

Modulo tangente del terreno alla punta $E_b := 50 \text{ MPa}$

Lunghezza libera del palo $L_0 := 0$ Lunghezza vincolata $L_a := L_p - L_0 = 21 \text{ m}$

Rapporto di lunghezza attiva $ke := 0.475$ Rapporto di flessibilità $Ms := 0.00125$


Correttivi asintotici $\eta_s := \frac{1}{0.889}$ $\eta_b := 1$

Cedimento elastico $S_e(F_p) := \text{if} \left[F_p \leq \eta_s \cdot Q_s, \frac{F_p \cdot (L_0 + ke \cdot L_a)}{E_p \cdot A_p}, \frac{[F_p \cdot L_a - \eta_s \cdot Q_s \cdot (1 - ke) \cdot L_a]}{E_p \cdot A_p} \right]$

$$f_0(F_p) := D_b \cdot E_b \cdot (F_p - \eta_s \cdot Q_s) - D_b \cdot E_b \cdot \eta_b \cdot Q_b$$

$$g_0(F_p) := F_p \cdot (0.6 \cdot \eta_b \cdot Q_b + Ms \cdot D_s \cdot D_b \cdot E_b) - \eta_s \cdot Q_s \cdot 0.6 \cdot \eta_b \cdot Q_b - D_s \cdot D_b \cdot E_b \cdot \eta_b \cdot Q_b \cdot Ms$$

$$h_0(F_p) := Ms \cdot D_s \cdot 0.6 \cdot \eta_b \cdot Q_b \cdot F_p$$

 Via Francesco Zanardi 157/6 - 40131 Bologna (I) MC Engineering Srl Tel +39 051 4211945 - info@studio-chinni.it <small>ISO 9001 392876</small>	Cliente: REGIONE EMILIA ROMAGNA	Codice: 1316-R-6010-E-1 Data: 04/06/2018
	Demolizione e ricostruzione della botte sifone del canale Cittadino all'attraversamento del canale Boicelli	Relazione geotecnica

cedimento rigido

$$S_t(F_p) := \frac{-g_0(F_p) - \sqrt{g_0(F_p)^2 - 4 \cdot f_0(F_p) \cdot h_0(F_p)}}{2 \cdot f_0(F_p)}$$

Cedimento totale

$$S_{tot}(F_p) := S_t(F_p) + S_e(F_p)$$

$$F_{s}(F_p) := \frac{\eta_s \cdot Q_s \cdot S_t(F_p)}{M_s \cdot D_s + S_t(F_p)}$$

Cedimento per Q laterale

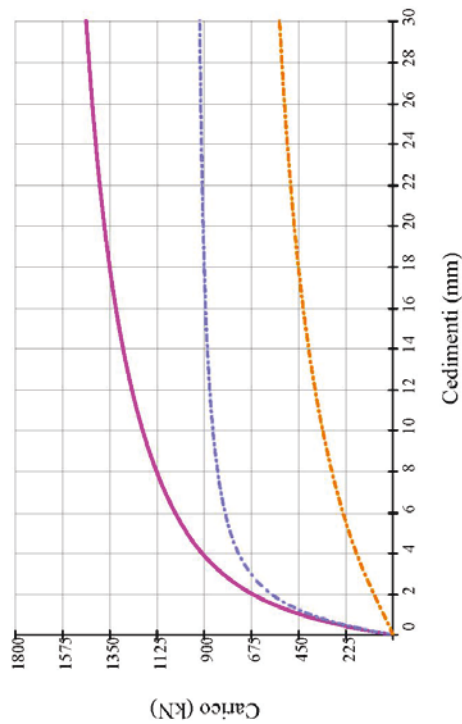
$$S_s(F_p) := \frac{M_s \cdot D_s \cdot F_s(F_p)}{(\eta_s \cdot Q_s - F_s(F_p))}$$

$$F_b(F_p) := \frac{D_b \cdot E_b \cdot \eta_b \cdot Q_b \cdot S_t(F_p)}{0.6 \cdot \eta_b \cdot Q_b + S_t(F_p) \cdot D_b \cdot E_b}$$

Cedimento per Q alla base

$$S_b(F_p) := \frac{0.6 \cdot \eta_b \cdot Q_b \cdot F_b(F_p)}{D_b \cdot E_b \cdot (\eta_b \cdot Q_b - F_b(F_p))}$$

$$F_p := 0 \text{ kN}, 10 \text{ kN}, \dots, 1.02(Q_s + Q_b)$$



Cedimento di riferimento per la rigidità secante
 $\delta_0 := 10 \text{ mm}$
 Given



$Q_{ref} := 90\% \cdot Q_s$
 $Q_{ref} = 763 \text{ kN}$

$$S_{tot}(Q_{ref}) - \delta_0 = 0$$

$w_0 := F_{ind}(\delta_0) = 2.6 \text{ mm}$
 cedimento in corrispondenza di Q_{ref}

$$K_{pile} := \frac{Q_{ref}}{w_0} = 293.73 \frac{\text{MN}}{\text{m}}$$

Rigidità secante del palo singolo

 Via Francesco Zanardi 157/6 - 40131 Bologna (I) MC Engineering Srl Tel +39 051 4211945 - info@studio-chinni.it 	Cliente: REGIONE EMILIA ROMAGNA	Codice: 1316-R-6010-E-1 Data: 04/06/2018
	Demolizione e ricostruzione della botte sifone del canale Cittadino all'attraversamento del canale Boicelli	Relazione geotecnica

RESISTENZE DI PROGETTO (PALI TRIVELLATI)

L_p = 21 m

$$\gamma_b(Rtype) := \begin{cases} 1.00 & \text{if } Rtype = "R1" \\ 1.70 & \text{if } Rtype = "R2" \\ 1.35 & \text{if } Rtype = "R3" \end{cases}$$

$$\gamma_s(Rtype) := \begin{cases} 1.00 & \text{if } Rtype = "R1" \\ 1.45 & \text{if } Rtype = "R2" \\ 1.15 & \text{if } Rtype = "R3" \end{cases}$$

$$\gamma_{st}(Rtype) := \begin{cases} 1.00 & \text{if } Rtype = "R1" \\ 1.60 & \text{if } Rtype = "R2" \\ 1.25 & \text{if } Rtype = "R3" \end{cases}$$

$$R_{cd}(Rtype) := \frac{Q_s}{\gamma_s(Rtype)} + \frac{Q_b}{\gamma_b(Rtype)}$$

Resistenza di progetto a compressione



$$R_{td}(Rtype) := \frac{Q_t}{\gamma_{st}(Rtype)}$$

Resistenza di progetto a trazione

Set A1M1R1 R_{cd}("R1") = 1602·kN R_{td}("R1") = 763·kN

Set A2M1R2 R_{cd}("R2") = 1028·kN R_{td}("R2") = 477·kN

Set A1M1R3 R_{cd}("R3") = 1296·kN R_{td}("R3") = 610·kN

 Via Francesco Zanardi 157/6 - 40131 Bologna (I) MC Engineering Srl Tel +39 051 4211945 - info@studio-chinni.it 	Cliente: REGIONE EMILIA ROMAGNA	Codice: 1316-R-6010-E-1 Data: 04/06/2018
	Demolizione e ricostruzione della botte sifone del canale Cittadino all'attraversamento del canale Boicelli	Relazione geotecnica

Palo Trivellato (D800mmL24m), NTC08

Diametro del fusto $D_s := 0.8\text{-m}$ Diametro della base $D_b := 0.8\text{-m}$ Sezione del palo $A_p := \pi \cdot \frac{D_s^2}{4} = 0.503\text{ m}^2$
 Quota testa palo $z_t := 1.0\text{-m}$ Lunghezza del palo $L_p := 24\text{-m}$ Profondità della falda $z_w := 1.5\text{-m}$

Dati del terreno

Pesì di volume terreno / acqua $\gamma_w := 9.806 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}^3}$
 $\gamma(z) := 17 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}^3}$

Determinazione angolo d'attrito efficace caratteristico

$$\phi_k(z) := \begin{cases} 25^\circ & \text{if } z \leq 17\text{-m} \\ 35^\circ & \text{otherwise} \end{cases}$$

Numero di verticali indagate 1

Coefficienti di correlazione $\xi_3 := 1.7$

Coefficiente di capacità portante

$$N_k(z) := 1.3 \left(\frac{1 + \sin(\phi_k(z))}{1 - \sin(\phi_k(z))} \right)^{\xi_3} \cdot e^{-\pi \cdot \tan(\phi_k(z)) \cdot 0.2} \cdot \frac{3 \cdot \tan(\phi_k(z))}{\pi}$$

$N_k(z_t + L_p) = 14.756$


$$u(z) := \text{if}[z \leq z_w, 0, \gamma_w \cdot (z - z_w)]$$

$$\sigma_{\text{eff}}(z) := \sigma_{\text{tot}}(z) - u(z)$$

$$\beta(z) := \text{if}[z \geq 0\text{-m}, \tan(\phi_k(z)) \cdot (1 - \sin(\phi_k(z))), 0]$$

$$\tau_s(z) := \frac{(\beta(z) \cdot \sigma_{\text{eff}}(z))}{\xi_3}$$

$$q_b(z) := \frac{(N_k(z) \cdot \sigma_{\text{eff}}(z))}{\xi_3}$$

 Via Francesco Zanardi 157/6 - 40131 Bologna (I) MC Engineering Srl Tel +39 051 4211945 - info@studio-chinni.it <small>ISO 9001 392876</small>	Cliente: REGIONE EMILIA ROMAGNA	Codice: 1316-R-6010-E-1 Data: 04/06/2018
	Demolizione e ricostruzione della botte sifone del canale Cittadino all'attraversamento del canale Boicelli	Relazione geotecnica

Resistenza del palo

$$Q_s := \pi \cdot D_s \int_{z_t}^{z_t+L_p} \tau_s(z) dz \quad \boxed{Q_s = 1091 \text{ kN}}$$

$$Q_b := q_b(z_t + L_p) \cdot A_p \quad \boxed{Q_b = 849 \text{ kN}}$$

$$Q_t := 0.9 \cdot Q_s \quad \boxed{Q_t = 982 \text{ kN}}$$

$$Q_c := Q_s + Q_b \quad \boxed{Q_c = 1940 \text{ kN}}$$

Cedimento del palo singolo

Modulo elastico del palo $E_p := 30 \text{ GPa}$

Modulo tangente del terreno alla punta $E_b := 50 \text{ MPa}$

Lunghezza libera del palo $L_0 := 0$ Lunghezza vincolata $L_a := L_p - L_0 = 24 \text{ m}$

Rapporto di lunghezza attiva $ke := 0.475$ Rapporto di flessibilità $Ms := 0.00125$


Correttivi asintotici $\eta_s := \frac{1}{0.889}$ $\eta_b := 1$

Cedimento elastico $S_e(F_p) := \text{if} \left[F_p \leq \eta_s \cdot Q_s, \frac{F_p \cdot (L_0 + ke \cdot L_a)}{E_p \cdot A_p}, \frac{[F_p \cdot L_a - \eta_s \cdot Q_s \cdot (1 - ke) \cdot L_a]}{E_p \cdot A_p} \right]$

$$f_0(F_p) := D_b \cdot E_b \cdot (F_p - \eta_s \cdot Q_s) - D_b \cdot E_b \cdot \eta_b \cdot Q_b$$

$$g_0(F_p) := F_p \cdot (0.6 \cdot \eta_b \cdot Q_b + Ms \cdot D_s \cdot D_b \cdot E_b) - \eta_s \cdot Q_s \cdot 0.6 \cdot \eta_b \cdot Q_b - D_s \cdot D_b \cdot E_b \cdot \eta_b \cdot Q_b \cdot Ms$$

$$h_0(F_p) := Ms \cdot D_s \cdot 0.6 \cdot \eta_b \cdot Q_b \cdot F_p$$

 Via Francesco Zanardi 157/6 - 40131 Bologna (I) MC Engineering Srl Tel +39 051 4211945 - info@studio-chinni.it <small>ISO 9001 392876</small>	Cliente: REGIONE EMILIA ROMAGNA	Codice: 1316-R-6010-E-1 Data: 04/06/2018
	Demolizione e ricostruzione della botte sifone del canale Cittadino all'attraversamento del canale Boicelli	Relazione geotecnica

cedimento rigido

$$S_t(F_p) := \frac{-g(F_p) - \sqrt{g(F_p)^2 - 4 \cdot f(F_p) \cdot h(F_p)}}{2 \cdot f(F_p)}$$

Cedimento totale

$$S_{tot}(F_p) := S_t(F_p) + S_e(F_p)$$

$$F_s(F_p) := \frac{\eta_s \cdot Q_s \cdot S_t(F_p)}{M_s \cdot D_s + S_t(F_p)}$$

Cedimento per Q laterale

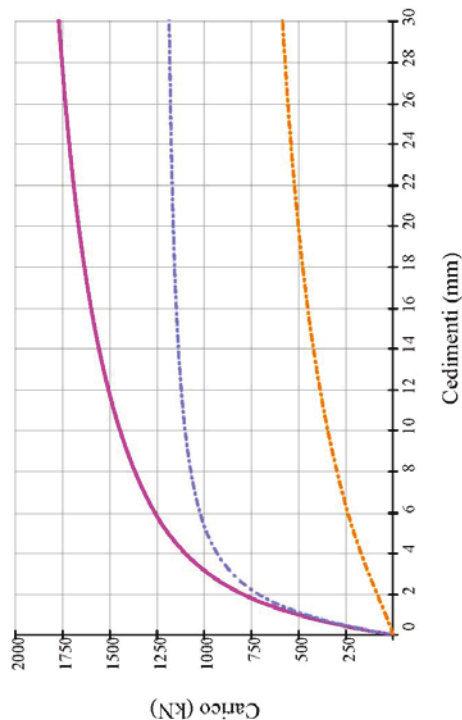
$$S_s(F_p) := \frac{M_s \cdot D_s \cdot F_s(F_p)}{(\eta_s \cdot Q_s - F_s(F_p))}$$

$$F_b(F_p) := \frac{D_b \cdot E_b \cdot \eta_b \cdot Q_b \cdot S_t(F_p)}{0.6 \cdot \eta_b \cdot Q_b + S_t(F_p) \cdot D_b \cdot E_b}$$

Cedimento per Q alla base

$$S_b(F_p) := \frac{0.6 \cdot \eta_b \cdot Q_b \cdot F_b(F_p)}{D_b \cdot E_b \cdot (\eta_b \cdot Q_b - F_b(F_p))}$$

$$F_p := 0 \text{ kN}, 10 \text{ kN}, \dots, 1.02(Q_s + Q_b)$$



Cedimento di riferimento per la rigidità secante $Q_{ref} := 90\% \cdot Q_s$

$$Q_{ref} = 982 \text{ kN}$$

$\delta_0 := 10 \text{ mm}$



Given

$$S_{tot}(Q_{ref}) - \delta_0 = 0$$

$w_0 := F_{ind}(\delta_0) = 3.02 \text{ mm}$ cedimento in corrispondenza di Q_{ref}

$$K_{pile} := \frac{Q_{ref}}{w_0} = \frac{324.94 \text{ MN}}{\text{m}}$$

Rigidità secante del palo singolo

 Via Francesco Zanardi 157/6 - 40131 Bologna (I) MC Engineering Srl Tel +39 051 4211945 - info@studio-chinni.it 	Cliente: REGIONE EMILIA ROMAGNA	Codice: 1316-R-6010-E-1 Data: 04/06/2018
	Demolizione e ricostruzione della botte sifone del canale Cittadino all'attraversamento del canale Boicelli	Relazione geotecnica

RESISTENZE DI PROGETTO (PALI TRIVELLATI)

L_p = 24 m

$$\gamma_b(\text{Rtype}) := \begin{cases} 1.00 & \text{if Rtype} = \text{"R1"} \\ 1.70 & \text{if Rtype} = \text{"R2"} \\ 1.35 & \text{if Rtype} = \text{"R3"} \end{cases}$$

$$\gamma_s(\text{Rtype}) := \begin{cases} 1.00 & \text{if Rtype} = \text{"R1"} \\ 1.45 & \text{if Rtype} = \text{"R2"} \\ 1.15 & \text{if Rtype} = \text{"R3"} \end{cases}$$

$$\gamma_{st}(\text{Rtype}) := \begin{cases} 1.00 & \text{if Rtype} = \text{"R1"} \\ 1.60 & \text{if Rtype} = \text{"R2"} \\ 1.25 & \text{if Rtype} = \text{"R3"} \end{cases}$$

$$R_{cd}(\text{Rtype}) := \frac{Q_s}{\gamma_s(\text{Rtype})} + \frac{Q_b}{\gamma_b(\text{Rtype})}$$

Resistenza di progetto a compressione


$$R_{td}(\text{Rtype}) := \frac{Q_t}{\gamma_{st}(\text{Rtype})}$$

Resistenza di progetto a trazione


Set A1M1R1 R_{cd}("R1") = 1940 kN R_{td}("R1") = 982 kN

Set A2M1R2 R_{cd}("R2") = 1252 kN R_{td}("R2") = 614 kN

Set A1M1R3 R_{cd}("R3") = 1577 kN R_{td}("R3") = 786 kN

 Via Francesco Zanardi 157/6 - 40131 Bologna (I) MC Engineering Srl Tel +39 051 4211945 - info@studio-chinni.it <small>ISO 9001 392876</small>	Cliente: REGIONE EMILIA ROMAGNA	Codice: 1316-R-6010-E-1 Data: 04/06/2018
	Demolizione e ricostruzione della botte sifone del canale Cittadino all'attraversamento del canale Boicelli	Relazione geotecnica

APPENDICE C – TABULATI SLIDE

 Via Francesco Zanardi 157/6 - 40131 Bologna (I) MC Engineering Srl Tel +39 051 4211945 - info@studio-chinni.it <small>ISO 9001 392876</small>	Cliente: REGIONE EMILIA ROMAGNA	Codice: 1316-R-6010-E-1 Data: 04/06/2018
	Demolizione e ricostruzione della botte sifone del canale Cittadino all'attraversamento del canale Boicelli	Relazione geotecnica

Slide Analysis Information

SLIDE - An Interactive Slope Stability Program

Project Summary

- File Name: condotta.slim
- Slide Modeler Version: 6.035
- Project Title: SLIDE - An Interactive Slope Stability Program
- Date Created: 11/06/2015, 11:31:57


General Settings

- Units of Measurement: Metric Units
- Time Units: days
- Permeability Units: meters/second
- Failure Direction: Right to Left
- Data Output: Standard
- Maximum Material Properties: 20
- Maximum Support Properties: 20

Design Standard

- Selected Type: Eurocode 7 - Design Approach 1, Combination 2

Type	Partial Factor
Permanent Actions: Unfavourable	1
Permanent Actions: Favourable	1
Variable Actions: Unfavourable	1.3
Variable Actions: Favourable	0
Effective cohesion	1.25
Coefficient of shearing resistance	1.25
Undrained strength	1.4
Weight density	1
Shear strength (other models)	1.25
Earth resistance	1
Tensile and plate strength	1.1
Shear strength	1.1
Compressive strength	1.1
Bond strength	1.1
Seismic Coefficient	1

 Via Francesco Zanardi 157/6 - 40131 Bologna (I) MC Engineering Srl Tel +39 051 4211945 - info@studio-chinni.it <small>ISO 9001 392876</small>	Cliente: REGIONE EMILIA ROMAGNA	Codice: 1316-R-6010-E-1 Data: 04/06/2018
	Demolizione e ricostruzione della botte sifone del canale Cittadino all'attraversamento del canale Boicelli	Relazione geotecnica

Analysis Options

Analysis Methods Used

- Spencer
- ▢ Number of slices: 25
- ▢ Tolerance: 0.005
- ▢ Maximum number of iterations: 50
- ▢ Check malpha < 0.2: Yes
- ▢ Initial trial value of FS: 1
- ▢ Steffensen Iteration: Yes

Groundwater Analysis

- ▢ Groundwater Method: Steady State FEA
- ▢ Pore Fluid Unit Weight: 9.81 kN/m3
- ▢ Tolerance: 1e-006
- ▢ Maximum number of iterations: 500
- ▢ Advanced Groundwater Method: None
- ▢ Mesh Element Type: 6 noded triangles
- ▢ Number of Elements: 956
- ▢ Number of Nodes: 1999

Random Numbers

- ▢ Pseudo-random Seed: 10116
- ▢ Random Number Generation Method: Park and Miller v.3

Surface Options


- ▢ Surface Type: Non-Circular Path Search
- ▢ Number of Surfaces: 5000
- ▢ Pseudo-Random Surfaces: Enabled
- ▢ Convex Surfaces Only: Enabled
- ▢ Segment Length: 0.5
- ▢ Minimum Elevation: Not Defined
- ▢ Minimum Depth: Not Defined
- ▢ Upper Angle: Auto Defined
- ▢ Lower Angle: Auto Defined

Loading


- ▢ 1 Distributed Load present

Distributed Load 1

- Distribution: Constant
- Magnitude [kPa]: 10
- Orientation: Vertical
- Load Action: Variable

 Via Francesco Zanardi 157/6 - 40131 Bologna (I) MC Engineering Srl Tel +39 051 4211945 - info@studio-chinni.it <small>ISO 9001 392876</small>	Cliente: REGIONE EMILIA ROMAGNA	Codice: 1316-R-6010-E-1 Data: 04/06/2018
	Demolizione e ricostruzione della botte sifone del canale Cittadino all'attraversamento del canale Boicelli	Relazione geotecnica


Material Properties

Property	argilla limosa
Color	
Strength Type	Mohr-Coulomb
Unit Weight [kN/m ³]	17
Cohesion [kPa]	5
Friction Angle [deg]	25
Unsaturated Shear Strength Angle [deg]	0
Air Entry Value [kPa]	0
Ks [meters/second]	1.0e-008
K2/K1	1
K Angle [deg]	0
Groundwater Model	Simple
GW Model Properties	Soil Type: General

Global Minimums

Method: spencer


- FS: 1.169740
- Axis Location: 2.948, 12.275
- Left Slip Surface Endpoint: 3.457, 5.000
- Right Slip Surface Endpoint: 9.073, 8.318
- Resisting Moment=451.832 kN-m
- Driving Moment=386.266 kN-m
- Resisting Horizontal Force=45.6037 kN
- Driving Horizontal Force=38.9861 kN
- Total Slice Area=7.17197 m²

 Via Francesco Zanardi 157/6 - 40131 Bologna (I) MC Engineering Srl Tel +39 051 4211945 - info@studio-chinni.it <small>ISO 9001 392876</small>	Cliente: REGIONE EMILIA ROMAGNA	Codice: 1316-R-6010-E-1 Data: 04/06/2018
	Demolizione e ricostruzione della botte sifone del canale Cittadino all'attraversamento del canale Boicelli	Relazione geotecnica

Global Minimum Coordinates

Method: spencer


X	Y
3.45732	5
3.89067	4.75058
4.36966	4.60719
4.86077	4.51328
5.36047	4.49591
5.85751	4.55017
6.33108	4.71058
6.76486	4.95924
7.18892	5.22416
7.6086	5.49594
7.98695	5.82282
8.34367	6.17318
8.58997	6.60831
8.80834	7.0581
8.93611	7.5415
9.02509	8.03352
9.07324	8.31775

 Via Francesco Zanardi 157/6 - 40131 Bologna (I) MC Engineering Srl Tel +39 051 4211945 - info@studio-chinni.it <small>ISO 9001 392876</small>	Cliente: REGIONE EMILIA ROMAGNA	Codice: 1316-R-6010-E-1 Data: 04/06/2018
	Demolizione e ricostruzione della botte sifone del canale Cittadino all'attraversamento del canale Boicelli	
	Relazione geotecnica	

Slice Data

▣ Global Minimum Query (spencer) - Safety Factor: 1.16974


Slice Number	Width [m]	Weight [kN]	Base Material	Base Cohesion [kPa]	Base Friction Angle [degrees]	Shear Stress [kPa]	Shear Strength [kPa]	Base Normal Stress [kPa]	Pore Pressure [kPa]	Effective Normal Stress [kPa]
1	0.216672	0.229684	argilla limosa	4	20.4579	5.1096	5.9769	6.0722	0.772857	5.29934
2	0.216672	0.689053	argilla limosa	4	20.4579	5.47493	6.40425	8.87656	2.43167	6.44489
3	0.239499	1.16664	argilla limosa	4	20.4579	4.684	5.47906	7.98624	4.02141	3.96483
4	0.239499	1.86058	argilla limosa	4	20.4579	5.26172	6.15485	11.4468	5.67046	5.77638
5	0.245551	2.83062	argilla limosa	4	20.4579	5.80622	6.79177	14.7261	7.24238	7.4837
6	0.245551	3.71043	argilla limosa	4	20.4579	6.68181	7.81598	18.8809	8.65167	10.2292
7	0.249849	4.59541	argilla limosa	4	20.4579	6.83058	7.99	20.455	9.75927	10.6957
8	0.249849	5.34026	argilla limosa	4	20.4579	7.56537	8.84952	23.6666	10.6668	12.9998
9	0.497046	12.5364	argilla limosa	4	20.4579	7.88523	9.22367	25.5872	11.5845	14.0027
10	0.236785	6.6868	argilla limosa	4	20.4579	7.69582	9.00211	25.3973	11.9885	13.4088
11	0.236785	6.9998	argilla limosa	4	20.4579	8.11238	9.48937	26.581	11.866	14.715
12	0.216892	6.59262	argilla limosa	4	20.4579	7.55836	8.84132	24.4701	11.4923	12.9778
13	0.216892	6.6677	argilla limosa	4	20.4579	7.83018	9.15928	24.6943	10.8642	13.8301
14	0.212027	6.57106	argilla limosa	4	20.4579	7.91066	9.25342	24.2644	10.1819	14.0825
15	0.212027	6.60348	argilla limosa	4	20.4579	8.16487	9.55077	24.312	9.4324	14.8796
16	0.209841	6.55874	argilla limosa	4	20.4579	8.33484	9.74959	24.069	8.65648	15.4125
17	0.209841	6.57335	argilla limosa	4	20.4579	8.58637	10.0438	24.0404	7.83909	16.2013
18	0.189177	5.87275	argilla limosa	4	20.4579	8.08224	9.45412	21.4794	6.85897	14.6205
19	0.189177	5.753	argilla limosa	4	20.4579	8.25118	9.65174	20.8687	5.71849	15.1502
20	0.356716	10.3943	argilla limosa	4	20.4579	8.13293	9.51341	18.6353	3.85583	14.7794
21	0.246297	6.37455	argilla limosa	4	20.4579	6.66658	7.79816	10.9299	0.748409	10.1815
22	0.218376	4.58474	argilla limosa	4	20.4579	5.67006	6.6325	7.05678	-2.97908	7.05678
23	0.127767	1.91975	argilla limosa	4	20.4579	3.71825	4.34938	0.93657	-7.06988	0.93657
24	0.0889808	0.70859	argilla limosa	4	20.4579	2.65679	3.10775	-2.3918	-11.5215	-2.3918
25	0.0481525	0.103186	argilla limosa	4	20.4579	2.1927	2.56489	-3.84699	-14.9956	-3.84699

 Via Francesco Zanardi 157/6 - 40131 Bologna (I) MC Engineering Srl Tel +39 051 4211945 - info@studio-chinni.it <small>ISO 9001 392876</small>	Cliente: REGIONE EMILIA ROMAGNA	Codice: 1316-R-6010-E-1 Data: 04/06/2018
	Demolizione e ricostruzione della botte sifone del canale Cittadino all'attraversamento del canale Boicelli	
	Relazione geotecnica	

Interslice Data

▣ Global Minimum Query (spencer) - Safety Factor: 1.16974

Slice Number	X coordinate [m]	Y coordinate - Bottom [m]	Interslice Normal Force [kN]	Interslice Shear Force [kN]	Interslice Force Angle [degrees]
1	3.45732	5	0	0	0
2	3.67399	4.87529	1.86802	0.452814	13.6259
3	3.89067	4.75058	4.16521	1.00966	13.6259
4	4.13017	4.67888	5.86328	1.42127	13.6258
5	4.36966	4.60719	7.94828	1.92668	13.6258
6	4.61522	4.56023	10.0701	2.44102	13.6258
7	4.86077	4.51328	12.6028	3.05494	13.6258
8	5.11062	4.50459	14.4927	3.51306	13.6258
9	5.36047	4.49591	16.5947	4.02259	13.6258
10	5.85751	4.55017	19.1384	4.63919	13.6258
11	6.0943	4.63038	18.9296	4.58858	13.6258
12	6.33108	4.71058	18.7248	4.53894	13.6258
13	6.54797	4.83491	17.3272	4.20015	13.6258
14	6.76486	4.95924	15.9608	3.86894	13.6258
15	6.97689	5.0917	14.4297	3.49779	13.6258
16	7.18892	5.22416	12.9463	3.13821	13.6258
17	7.39876	5.36005	11.4302	2.77072	13.6259
18	7.6086	5.49594	9.97103	2.417	13.6258
19	7.79778	5.65938	7.99446	1.93788	13.6258
20	7.98695	5.82282	6.14977	1.49072	13.6258
21	8.34367	6.17318	2.53136	0.613608	13.6258
22	8.58997	6.60831	-0.577205	-0.139916	13.6258
23	8.80834	7.0581	-2.509	-0.608188	13.6258
24	8.93611	7.5415	-2.48511	-0.602396	13.6258
25	9.02509	8.03352	-1.07112	-0.259643	13.6259
26	9.07324	8.31775	0	0	0

 Via Francesco Zanardi 157/6 - 40131 Bologna (I) MC Engineering Srl Tel +39 051 4211945 - info@studio-chinni.it <small>ISO 9001 392876</small>	Cliente: REGIONE EMILIA ROMAGNA	Codice: 1316-R-6010-E-1 Data: 04/06/2018
	Demolizione e ricostruzione della botte sifone del canale Cittadino all'attraversamento del canale Boicelli	Relazione geotecnica


List Of Coordinates

Distributed Load

X	Y
13.0517	9.95616
21.46	10.2

External Boundary

X	Y
2.05	0
21.46	0
21.46	10.2
11.46	9.91
4.1	5
2.05	5

 Via Francesco Zanardi 157/6 - 40131 Bologna (I) MC Engineering Srl Tel +39 051 4211945 - info@studio-chinni.it <small>ISO 9001 392876</small>	Cliente: REGIONE EMILIA ROMAGNA	Codice: 1316-R-6010-E-1 Data: 04/06/2018
	Demolizione e ricostruzione della botte sifone del canale Cittadino all'attraversamento del canale Boicelli	Relazione geotecnica

Slide Analysis Information
SLIDE - An Interactive Slope Stability Program

Project Summary

- ▣ File Name: scogliera.slim
- ▣ Slide Modeler Version: 6.035
- ▣ Project Title: SLIDE - An Interactive Slope Stability Program
- ▣ Date Created: 12/06/2015, 11:48:46

General Settings

- ▣ Units of Measurement: Metric Units
- ▣ Time Units: days
- ▣ Permeability Units: meters/second
- ▣ Failure Direction: Right to Left
- ▣ Data Output: Standard
- ▣ Maximum Material Properties: 20
- ▣ Maximum Support Properties: 20

Design Standard


- ▣ Selected Type: Eurocode 7 - Design Approach 1, Combination 2

Type	Partial Factor
Permanent Actions: Unfavourable	1
Permanent Actions: Favourable	1
Variable Actions: Unfavourable	1.3
Variable Actions: Favourable	0
Effective cohesion	1.25
Coefficient of shearing resistance	1.25
Undrained strength	1.4
Weight density	1
Shear strength (other models)	1.25
Earth resistance	1
Tensile and plate strength	1.1
Shear strength	1.1
Compressive strength	1.1
Bond strength	1.1
Seismic Coefficient	1

Analysis Options

Analysis Methods Used

- Spencer
- ▣ Number of slices: 25
- ▣ Tolerance: 0.005
- ▣ Maximum number of iterations: 50

 Via Francesco Zanardi 157/6 - 40131 Bologna (I) MC Engineering Srl Tel +39 051 4211945 - info@studio-chinni.it <small>ISO 9001 392876</small>	Cliente: REGIONE EMILIA ROMAGNA	Codice: 1316-R-6010-E-1 Data: 04/06/2018
	Demolizione e ricostruzione della botte sifone del canale Cittadino all'attraversamento del canale Boicelli	Relazione geotecnica

- ☐ Check malpha < 0.2: Yes
- ☐ Initial trial value of FS: 1
- ☐ Steffensen Iteration: Yes

Groundwater Analysis

- ☐ Groundwater Method: Steady State FEA
- ☐ Pore Fluid Unit Weight: 9.81 kN/m3
- ☐ Tolerance: 1e-006
- ☐ Maximum number of iterations: 500
- ☐ Advanced Groundwater Method: None
- ☐ Mesh Element Type: 3 noded triangles
- ☐ Number of Elements: 1134
- ☐ Number of Nodes: 618

Random Numbers

- ☐ Pseudo-random Seed: 10116
- ☐ Random Number Generation Method: Park and Miller v.3

Surface Options

- ☐ Surface Type: Non-Circular Path Search
- ☐ Number of Surfaces: 5000
- ☐ Pseudo-Random Surfaces: Enabled
- ☐ Convex Surfaces Only: Enabled
- ☐ Segment Length: 0.75
- ☐ Minimum Elevation: Not Defined
- ☐ Minimum Depth: Not Defined
- ☐ Upper Angle: Auto Defined
- ☐ Lower Angle: Auto Defined

Loading


- ☐ 2 Distributed Loads present


Distributed Load 1

- Distribution: Constant
- Magnitude [kPa]: 10
- Orientation: Vertical
- Load Action: Variable




Distributed Load 2

- Distribution: Constant
- Magnitude [kPa]: 10
- Orientation: Vertical
- Load Action: Variable

 <p>Via Francesco Zanardi 157/6 - 40131 Bologna (I)</p> <p>MC Engineering Srl</p> <p>Tel +39 051 4211945 - info@studio-chinni.it</p> <p>ISO 9001 392876</p>	<p>Cliente:</p> <p>REGIONE EMILIA ROMAGNA</p>	<p>Codice: 1316-R-6010-E-1</p>
	<p>Demolizione e ricostruzione della botte sifone del canale Cittadino all'attraversamento del canale Boicelli</p>	<p>Data: 04/06/2018</p>
	<p>Relazione geotecnica</p>	

 Via Francesco Zanardi 157/6 - 40131 Bologna (I) MC Engineering Srl Tel +39 051 4211945 - info@studio-chinni.it <small>ISO 9001 392876</small>	Cliente: REGIONE EMILIA ROMAGNA	Codice: 1316-R-6010-E-1 Data: 04/06/2018
	Demolizione e ricostruzione della botte sifone del canale Cittadino all'attraversamento del canale Boicelli	Relazione geotecnica

Material Properties

Property	argilla limosa	Scogliera	palancolato
Color			
Strength Type	Mohr-Coulomb	Mohr-Coulomb	Infinite strength
Unit Weight [kN/m ³]	17	24	20
Cohesion [kPa]	5	49	
Friction Angle [deg]	25	49	
Unsaturated Shear Strength Angle [deg]	0	0	0
Air Entry Value [kPa]	0	0	0
Ks [meters/second]	1e-008	1e-006	1e-020
K2/K1	1	1	1
K Angle [deg]	0	0	0
Groundwater Model	Simple	Simple	Simple
GW Model Properties	Soil Type: General Soil Type: General Soil Type: General		

Global Minimums


Method: spencer

- FS: 1.102370
- Axis Location: 8.462, 21.243
- Left Slip Surface Endpoint: 9.844, 9.000
- Right Slip Surface Endpoint: 19.086, 15.003
- Resisting Moment=2867.22 kN-m
- Driving Moment=2600.95 kN-m
- Resisting Horizontal Force=146.219 kN
- Driving Horizontal Force=132.64 kN
- Total Slice Area=19.8034 m²


Global Minimum Coordinates

Method: spencer

X	Y
9.84416	9
10.3745	8.46969
11.0167	8.08224
11.6926	7.75715
12.3694	7.43411
13.1126	7.33294
13.8625	7.34059
14.6111	7.38686
15.3491	7.52073
15.8765	8.05391
16.3597	8.62757
16.7673	9.25712
17.1316	9.91268
17.4585	10.5877

 Via Francesco Zanardi 157/6 - 40131 Bologna (I) MC Engineering Srl Tel +39 051 4211945 - info@studio-chinni.it <small>ISO 9001 392876</small>	Cliente: REGIONE EMILIA ROMAGNA	Codice: 1316-R-6010-E-1 Data: 04/06/2018
	Demolizione e ricostruzione della botte sifone del canale Cittadino all'attraversamento del canale Boicelli	Relazione geotecnica


17.765	11.2722
18.0506	11.9657
18.331	12.6613
18.5766	13.37
18.8021	14.0852
19.0267	14.8009
19.0858	15.003

 Via Francesco Zanardi 157/6 - 40131 Bologna (I) MC Engineering Srl Tel +39 051 4211945 - info@studio-chinni.it <small>ISO 9001 392876</small>	Cliente: REGIONE EMILIA ROMAGNA	Codice: 1316-R-6010-E-1 Data: 04/06/2018
	Demolizione e ricostruzione della botte sifone del canale Cittadino all'attraversamento del canale Boicelli	
	Relazione geotecnica	

Slice Data

Global Minimum Query (spencer) - Safety Factor: 1.10237


Slice Number	Width [m]	Weight [kN]	Base Material	Base Cohesion [kPa]	Base Friction Angle [degrees]	Shear Stress [kPa]	Shear Strength [kPa]	Base Normal Stress [kPa]	Pore Pressure [kPa]	Effective Normal Stress [kPa]
1	0.530349	2.39062	argilla limosa	4	20.4579	5.61539	6.19024	8.71952	2.84829	5.87123
2	0.642173	7.90424	argilla limosa	4	20.4579	5.92561	6.53222	14.4291	7.64115	6.78792
3	0.675882	12.4127	argilla limosa	4	20.4579	6.63191	7.31082	19.9381	11.063	8.87513
4	0.37056	8.38638	argilla limosa	4	20.4579	7.37086	8.12541	24.2612	13.2025	11.0587
5	0.16825	5.89487	Scogliera	39.2	42.6232	73.8137	81.37	60.2055	14.383	45.8225
6	0.138054	5.04724	argilla limosa	4	20.4579	11.744	12.9462	39.1339	15.1523	23.9816
7	0.743145	28.2247	argilla limosa	4	20.4579	10.9914	12.1166	37.8576	16.1	21.7576
8	0.374981	15.7402	argilla limosa	4	20.4579	11.7727	12.9778	40.7149	16.6485	24.0664
9	0.374981	19.1903	argilla limosa	4	20.4579	14.7892	16.3032	49.5909	16.6105	32.9804
10	0.748571	48.0403	argilla limosa	4	20.4579	18.9063	20.8417	61.4884	16.342	45.1464
11	0.737956	50.5074	argilla limosa	4	20.4579	19.8917	21.928	63.998	15.9396	48.0584
12	0.527466	39.0475	argilla limosa	4	20.4579	18.9816	20.9248	58.8885	13.5193	45.3692
13	0.483128	35.5629	argilla limosa	4	20.4579	19.4439	21.4344	55.1112	8.376	46.7352
14	0.407649	29.0678	argilla limosa	4	20.4579	18.8333	20.7613	47.6816	2.75066	44.9309
15	0.364334	24.5013	argilla limosa	4	20.4579	17.5856	19.3858	41.2437	-3.31882	41.2437
16	0.326904	20.297	argilla limosa	4	20.4579	15.647	17.2488	35.5152	-9.64312	35.5152
17	0.306443	17.2117	argilla limosa	4	20.4579	13.9257	15.3513	30.4287	-16.8087	30.4287
18	0.285618	14.2007	argilla limosa	4	20.4579	12.1296	13.3713	25.1209	-24.1163	25.1209
19	0.280366	12.0407	argilla limosa	4	20.4579	10.6144	11.701	20.6436	-31.4163	20.6436
20	0.153247	5.69055	argilla limosa	4	20.4579	8.79396	9.6942	15.2641	-37.3908	15.2641
21	0.0924198	3.02218	Scogliera	39.2	42.6232	16.4326	18.1148	-22.9114	-41.0272	-22.9114
22	0.225514	5.61769	Scogliera	39.2	42.6232	13.2149	14.5677	-26.7657	-45.8195	-26.7657
23	0.224512	2.80457	Scogliera	39.2	42.6232	10.1286	11.1655	-30.4625	-52.8183	-30.4625
24	0.0208295	0.0653149	Scogliera	39.2	42.6232	7.26199	8.0054	-33.8964	-56.6698	-33.8964
25	0.0383616	0.0424972	argilla limosa	4	20.4579	1.49675	1.64997	-6.29958	-57.5865	-6.29958

 Via Francesco Zanardi 157/6 - 40131 Bologna (I) MC Engineering Srl Tel +39 051 4211945 - info@studio-chinni.it <small>ISO 9001 392876</small>	Cliente: REGIONE EMILIA ROMAGNA		Codice: 1316-R-6010-E-1
			Data: 04/06/2018
	Demolizione e ricostruzione della botte sifone del canale Cittadino all'attraversamento del canale Boicelli		Relazione geotecnica

Interslice Data

Global Minimum Query (spencer) - Safety Factor: 1.10237

Slice Number	X coordinate [m]	Y coordinate - Bottom [m]	Interslice Normal Force [kN]	Interslice Shear Force [kN]	Interslice Force Angle [degrees]
1	9.84416	9	0	0	0
2	10.3745	8.46969	7.60213	-0.760213	-5.71059
3	11.0167	8.08224	16.9978	-1.69978	-5.71059
4	11.6926	7.75715	27.9618	-2.79618	-5.71059
5	12.0631	7.5803	34.9838	-3.49838	-5.71059
6	12.2314	7.5	52.2373	-5.22373	-5.71059
7	12.3694	7.43411	56.437	-5.6437	-5.71059
8	13.1126	7.33294	68.4351	-6.84351	-5.71059
9	13.4875	7.33677	72.6939	-7.26939	-5.71059
10	13.8625	7.34059	78.05	-7.805	-5.71059
11	14.6111	7.38686	89.357	-8.9357	-5.71059
12	15.3491	7.52073	95.4687	-9.54687	-5.71059
13	15.8765	8.05391	74.0825	-7.40825	-5.71059
14	16.3597	8.62757	51.8611	-5.18611	-5.71059
15	16.7673	9.25712	29.5208	-2.95208	-5.71059
16	17.1316	9.91268	8.88994	-0.888994	-5.71059
17	17.4585	10.5877	-9.96805	0.996805	-5.71059
18	17.765	11.2722	-26.5303	2.65303	-5.71059
19	18.0506	11.9657	-40.4869	4.04869	-5.71059
20	18.331	12.6613	-51.8712	5.18712	-5.71059
21	18.4842	13.1034	-57.2709	5.72709	-5.71059
22	18.5766	13.37	-49.6444	4.96444	-5.71059
23	18.8021	14.0852	-27.519	2.7519	-5.71059
24	19.0267	14.8009	-3.44585	0.344585	-5.71059
25	19.0475	14.872	-0.883953	0.0883953	-5.71059
26	19.0858	15.003	0	0	0

 Via Francesco Zanardi 157/6 - 40131 Bologna (I) MC Engineering Srl Tel +39 051 4211945 - info@studio-chinni.it <small>ISO 9001 392876</small>	Cliente: REGIONE EMILIA ROMAGNA	Codice: 1316-R-6010-E-1 Data: 04/06/2018
	Demolizione e ricostruzione della botte sifone del canale Cittadino all'attraversamento del canale Boicelli	Relazione geotecnica

List Of Coordinates

Distributed Load

X	Y
23.8359	15.0832
20.5486	15.0277

Distributed Load

X	Y
23.8359	15.0832
31.1778	14.223

External Boundary


X	Y
40.8918	9
38.5864	9
33.0805	14
23.8359	15.0832
18.9135	15
13.18	9
12.0631	9
7.29616	9
7.04616	9
6.79616	9
0	9
0	0
40.8918	0

Material Boundary

X	Y
12.0631	9
12.0631	7.5
14.5631	7.5
14.5631	9
19.6364	14.3092
18.9135	15

Material Boundary

X	Y
6.79616	3
6.79616	9

 Via Francesco Zanardi 157/6 - 40131 Bologna (I) MC Engineering Srl Tel +39 051 4211945 - info@studio-chinni.it <small>ISO 9001 392876</small>	Cliente: REGIONE EMILIA ROMAGNA	Codice: 1316-R-6010-E-1 Data: 04/06/2018
	Demolizione e ricostruzione della botte sifone del canale Cittadino all'attraversamento del canale Boicelli	Relazione geotecnica

Material Boundary

X	Y
7.29616	3
7.29616	9

Material Boundary

X	Y
6.79616	3
7.29616	3