



CONSORZIO DI BONIFICA PIANURA DI FERRARA

Sede legale e recapito postale:

44121 Ferrara - Via Borgo dei Leoni, 28 - C.F. 93076450381

web: www.bonificaferrara.it - e-mail: info@bonificaferrara.it

pec: posta.certificata@pec.bonificaferrara.it

aderente all'

Associazione Nazionale Bonifiche, Irrigazioni e Miglioramenti Fondiari

IMPIANTO IDROVORO CITTADINO PROGETTO ESECUTIVO



Finanziato
dall'Unione europea
NextGenerationEU



Piano nazionale di ripresa e resilienza disciplinato dal Regolamento del Parlamento Europeo (UE) 2021/241 del 12 febbraio 2021, relativo al dispositivo per la ripresa e la resilienza (Next Generation UE), all'attuazione e rendicontazione degli interventi dell'investimento M2C4 2.1a per le più urgenti necessità, segnalati dalle regioni Emilia-Romagna, Toscana e Marche, per la gestione del rischio alluvioni e per la riduzione del rischio idrogeologico. Ordinanza n. 35/2024 del Commissario straordinario alla ricostruzione nel territorio delle regioni Emilia-Romagna, Toscana e Marche.

ID INTERVENTO ER-UBIS-000109

CUP J78H24000430007

TITOLO INTERVENTO "Messa in sicurezza impianto idrovoro cittadino per la laminazione delle portate di piena del reticolo idraulico di bonifica"

RELAZIONE GEOTECNICA

Data: **30.04.2025**

ELABORATO:

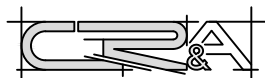
ALL.4

Rev.:

1

IL PROGETTISTA GENERALE

(Ing. Alessio Colombi)



Ing. A. Colombi Ing. M. Roversi Ing. O. Vitarelli
Colombi Roversi & Associati
Studio di Ingegneria
Via Piangipane, 141 int.6
44121 FERRARA



COLOMBI

ALESSIO

Ordine degli
Ingegneri della
Provincia di
Ferrara
Ingegnere
09.05.2025
18:56:27
GMT+02:00

IL RESPONSABILE UNICO DEL PROGETTO

(Ing. Alessandro Buzzoni)



IL DIRETTORE AREA TERRITORIO
Ing. Alessandro Buzzoni

Rev.	Descrizione	Redatto	Data	Codice Intervento
00	Progetto Esecutivo		31/03/2025	OC174
01	Revisione 1		30/04/2025	

 Colombi Roversi & Associati Studio di Ingegneria	Comune	FERRARA (FE)	Comm. n°	Revisioni				
	Progetto	ORD.35/2024 - INVESTIMENTO PNRR M2C4 2.1.a FINANZIATO NEXTGENERATION EU MESSA IN SICUREZZA IMPIANTO IDROVORO CITTADINO PER LA LAMINAZIONE DELLE PORTATE DI PIENA DEL RETICOLO IDRAULICO DI BONIFICA ID INTERVENTO ER-UBIS-000109 CUP J78H24000430007	CRA25003	0				
			Doc. n°	ALL. 4				
RELAZIONE GEOTECNICA, SIMICA, VERIFICA OPERE DI FONDAZIONE			Fg.	Di	Compilato	Data		
			2	74	A.C.	APR.2025		

INDICE

1. DOCUMENTI DI RIFERIMENTO	3
2. INTRODUZIONE E INDAGINI DI RIFERIMENTO	4
3. DEFINIZIONE DEI CARATTERI SISMICI DI BASE DELL'AREA	
MAGNITUDO DI PROGETTO.....	8
4. DEFINIZIONE DEI CARATTERI SISMICI DI BASE DELL'AREA	
ACCELERAZIONE AL SUOLO DI PROGETTO	11
5. DEFINIZIONE DEL PROFILO GEOTECNICO DI PROGETTO	13
6. CLASSIFICAZIONE SISMICA DEL SITO.....	25
7. VALUTAZIONI EFFETTI SISMICI DI SITO	
VERIFICA A LIQUEFAZIONE DEI TERRENI.....	29
8. VALUTAZIONI EFFETTI SISMICI DI SITO	
STIMA DEI CEDIMENTI POST-SISMICI DEI TERRENI	34
9. VERIFICHE DI STABILITA'	37
10. DIMENSIONAMENTO FONDAZIONI PROFONDE SELLE	65
11. VERIFICA A SIFONAMENTO DURANTE LA FASE DI CANTIERE.....	73

 Colombi Roversi &Associati Studio di Ingegneria	Comune	FERRARA (FE)	Comm. n° CRA25003		Revisioni			
	Progetto	ORD.35/2024 - INVESTIMENTO PNRR M2C4 2.1.a FINANZIATO NEXTGENERATION EU MESSA IN SICUREZZA IMPIANTO IDROVORO CITTADINO PER LA LAMINAZIONE DELLE PORTATE DI PIENA DEL RETICOLO IDRAULICO DI BONIFICA ID INTERVENTO ER-UBIS-000109 CUP J78H24000430007	Doc. n°		0			
			ALL. 4					
RELAZIONE GEOTECNICA, SIMICA, VERIFICA OPERE DI FONDAZIONE			Fg. 3	Di 74	Compilato A.C.	Data APR.2025		

1. DOCUMENTI DI RIFERIMENTO

Normative, raccomandazioni e pubblicazioni di riferimento:

1. D.M. 17 Gennaio 2018 - Norme Tecniche per le Costruzioni. (NTC18);
2. Circ. Min. Infrastrutture e Trasporti 21 gennaio 2019 n. 7 - Istruzioni per l'applicazione dell'«Aggiornamento delle "Norme tecniche per le costruzioni"» di cui al decreto ministeriale 17 gennaio 2018;
3. UNI ENV 1997-1 (2006) Eurocodice 7: Progettazione geotecnica – Parte 1: Regole generali.
4. UNI ENV 1997-2 (2007) Eurocodice 7: Progettazione geotecnica – Parte 2: Indagini e prove nel sottosuolo.
5. UNI ENV 1998-1 (2005) Eurocodice 8 - Progettazione delle strutture per la resistenza sismica - Parte 1: Regole generali, azioni sismiche e regole per gli edifici
6. UNI ENV 1998-5 (2005) Eurocodice 8 - Progettazione delle strutture per la resistenza sismica - Parte 5: Fondazioni, strutture di contenimento ed aspetti geotecnici.
7. AGI (2005). Linee Guida "Aspetti geotecnici della progettazione in zona sismica", Patron, Bologna.

Documenti tecnici di riferimento:

- a. DOTT. GEOL. THOMAS VERONESE – Relazione di modellazione geologica, sismica e geotecnica sulle indagini (NOVEMBRE 2024).
- b. ISMGEO SRL (07/01/2025). Prove geotecniche di laboratorio. Prog. L001; Doc. RAT 002/2025.

 Colombi Roversi &Associati Studio di Ingegneria	Comune	FERRARA (FE)	Comm. n°		Revisioni				
	Progetto	ORD.35/2024 - INVESTIMENTO PNRR M2C4 2.1.a FINANZIATO NEXTGENERATION EU MESSA IN SICUREZZA IMPIANTO IDROVORO CITTADINO PER LA LAMINAZIONE DELLE PORTATE DI PIENA DEL RETICOLO IDRAULICO DI BONIFICA ID INTERVENTO ER-UBIS-000109 CUP J78H24000430007	CRA25003		0				
			Doc. n°		ALL. 4				
RELAZIONE GEOTECNICA, SIMICA, VERIFICA OPERE DI FONDAZIONE			Fg.	Di	Compilato		Data		
			4	74	A.C.		APR.2025		

2. INTRODUZIONE E INDAGINI DI RIFERIMENTO

Nel presente allegato sono contenute le seguenti valutazioni:

- Definizione dei parametri inerenti la sismicità di base dell'area (accelerazione al suolo e magnitudo di progetto)
- Caratterizzazione geotecnica in campo statico (definizione del profilo geotecnico di progetto)
- Caratterizzazione geotecnica in campo sismico:
 - Classificazione sismica del sito
 - Valutazione degli effetti sismici di sito: potenziale suscettibilità a liquefazione
 - Valutazione degli effetti sismici di sito: previsione cedimenti post sismici
- valutazione geotecnica del palancolato
- valutazione geotecnica del consolidamento delle fondazioni

Per le valutazioni geotecniche e sismiche discusse nel presente allegato si è fatto riferimento alle seguenti indagini effettuate in sito:

- una prova penetrometrica statica con punta elettrica e piezocono **CPTU1** con rif. U72-24, spinta fino alla profondità di -40,0 m da p.c. eseguita sulla sommità dell'argine;
- una prova penetrometrica statica con punta elettrica e piezocono sismico **SCPTU1** con rif. U72-24, spinta fino alla profondità di -35,6 m da p.c. eseguita sulla sommità dell'argine;
- una prova penetrometrica statica con punta elettrica e piezocono sismico **SCPTU2** con rif. U72-24, spinta fino alla profondità di -19,8 m da p.c.;
- un sondaggio geognostico a carotaggio continuo S1, spinto a -30,00 m da p.c. con prelievo di campioni indisturbati da sottoporre ad analisi di laboratorio geotecnico, eseguito sulla sommità dell'argine

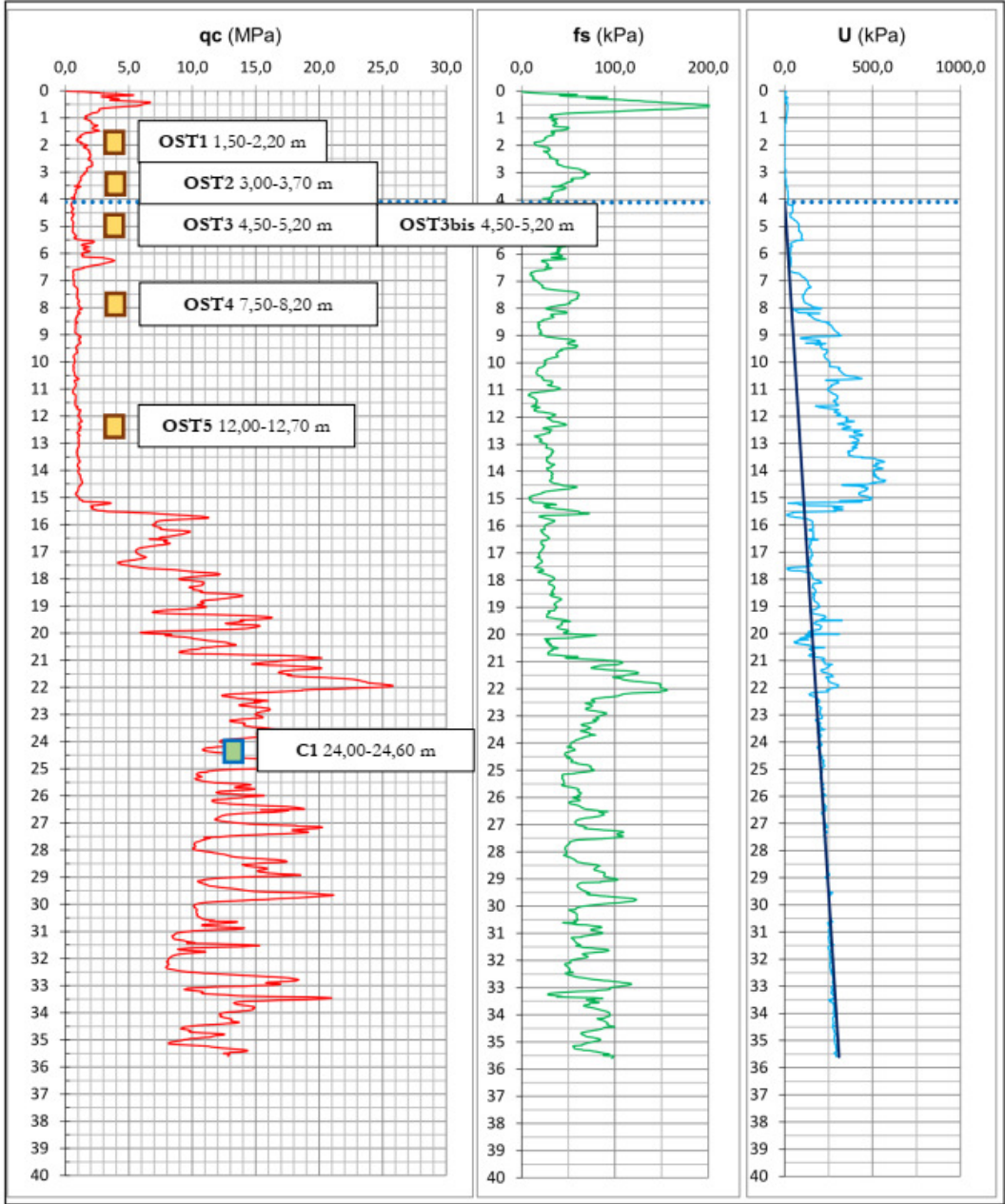
 Colombi Roversi &Associati Studio di Ingegneria	Comune	FERRARA (FE)	Comm. n°		Revisioni			
	Progetto	ORD.35/2024 - INVESTIMENTO PNRR M2C4 2.1.a FINANZIATO NEXTGENERATION EU MESSA IN SICUREZZA IMPIANTO IDROVORO CITTADINO PER LA LAMINAZIONE DELLE PORTATE DI PIENA DEL RETICOLO IDRAULICO DI BONIFICA ID INTERVENTO ER-UBIS-000109 CUP J78H24000430007	CRA25003		0			
			Doc. n°		ALL. 4			
RELAZIONE GEOTECNICA, SIMICA, VERIFICA OPERE DI FONDAZIONE			Fg.	Di	Compilato		Data	
			5	74	A.C.		APR.2025	



Ortofoto con ubicazione sondaggio e prove CPTU eseguite in sito (da Relazione Geologica Geol. T. Veronese)

Nel sito è stato realizzato un sondaggio a carotaggio continuo con il prelievo di n. 5 campioni indisturbati e n. 1 campione rimaneggiato da sottoporre a specifiche prove di laboratorio geotecnico, presso il laboratorio ISMGEO S.r.l. di Bergamo.

 Colombi Roversi & Associati Studio di Ingegneria	Comune	FERRARA (FE)	Comm. n°	Revisioni				
	Progetto	ORD.35/2024 - INVESTIMENTO PNRR M2C4 2.1.a FINANZIATO NEXTGENERATION EU MESSA IN SICUREZZA IMPIANTO IDROVORO CITTADINO PER LA LAMINAZIONE DELLE PORTATE DI PIENA DEL RETICOLO IDRAULICO DI BONIFICA ID INTERVENTO ER-UBIS-000109 CUP J78H24000430007	CRA25003	0				
			Doc. n° ALL. 4					
RELAZIONE GEOTECNICA, SIMICA, VERIFICA OPERE DI FONDAZIONE			Fg. 6	Di 74	Compilato A.C.		Data APR.2025	



Campioni prelevati in sito (da Relazione Geologica Geol. T. Veronese)

Sui campioni prelevati sono state eseguite le seguenti indagini di laboratorio.

 Colombi Roversi & Associati Studio di Ingegneria	Comune	FERRARA (FE)	Comm. n°		Revisioni				
	Progetto	ORD.35/2024 - INVESTIMENTO PNRR M2C4 2.1.a FINANZIATO NEXTGENERATION EU MESSA IN SICUREZZA IMPIANTO IDROVORO CITTADINO PER LA LAMINAZIONE DELLE PORTATE DI PIENA DEL RETICOLO IDRAULICO DI BONIFICA ID INTERVENTO ER-UBIS-000109 CUP J78H24000430007	CRA25003	0					
			Doc. n° ALL. 4						
RELAZIONE GEOTECNICA, SIMICA, VERIFICA OPERE DI FONDAZIONE			Fg.	Di	Compilato		Data		
			7	74	A.C.		APR.2025		

Sondaggio	Campione	Apertura e descrizione campione	Analisi granulometrica per vagliatura	Analisi granulometrica per sedimentazione	Limite liquido e plastico	Prova di taglio diretto	Triassiale consolidata drenata CID	Triassiale consolidata non drianata CIU
S1	OST1	1	1	1	1			
S1	OST2	1	1	1	1			1
S1	OST3	1		1	1	1		
S1	OST3BIS	1	1	1	1			1
S1	OST4	1						
S1	OST5	1		1	1			1

- Per la classificazione sismica del sito sono state eseguite le seguenti indagini:
- piezocono sismico SCPTU1 con rif. U72-24, spinta fino alla profondità di -35,00 m da p.c.
 - indagine sismica di superficie consistente in una prova E.S.A.C. e n. 2 prove dei microtemori H.V.S.R.



Ubicazione prove ESAC+HVS-R (da Relazione Geologica Geol. T. Veronese)

 Colombi Roversi & Associati Studio di Ingegneria	Comune	FERRARA (FE)	Comm. n°		Revisioni			
	Progetto	ORD.35/2024 - INVESTIMENTO PNRR M2C4 2.1.a FINANZIATO NEXTGENERATION EU MESSA IN SICUREZZA IMPIANTO IDROVORO CITTADINO PER LA LAMINAZIONE DELLE PORTATE DI PIENA DEL RETICOLO IDRAULICO DI BONIFICA ID INTERVENTO ER-UBIS-000109 CUP J78H24000430007	CRA25003		0			
			Doc. n°		ALL. 4			
RELAZIONE GEOTECNICA, SIMICA, VERIFICA OPERE DI FONDAZIONE			Fg.	Di	Compilato	Data		
			8	74	A.C.	APR.2025		

3 DEFINIZIONE DEI CARATTERI SISMICI DI BASE DELL'AREA: MAGNITUDO DI PROGETTO

Come mostrato in figura 3.1 il sito ricade all'interno della zona sismogenetica denominata ZS912 (Dorsale Ferrarese) della zonazione ZS9 dell'INGV.

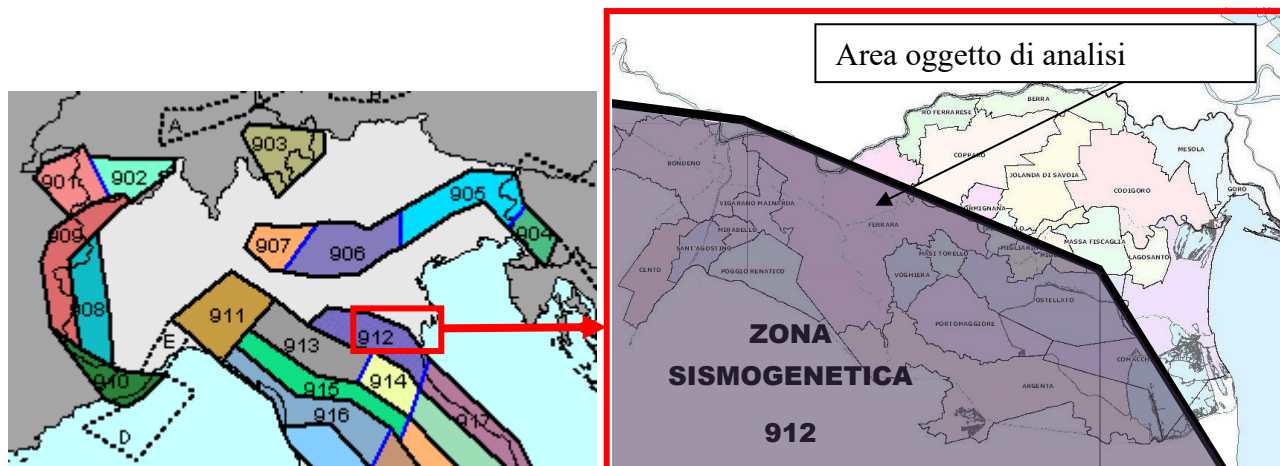


Figura 3.1. Definizione della zona sismogenetica dell'area (da rapporto INGV)

Una zona sismogenetica è una area di territorio definita da uniformi caratteristiche sismologiche, tettoniche e geologiche, per la quale è possibile assegnare un'unica relazione di ricorrenza tra magnitudo e frequenza di occorrenza alle sorgenti di sismicità.

La zona sismogenetica ZS912 è caratterizzata da un meccanismo focale prevalente del tipo a fogliazione inversa e da un intervallo di profondità nel quale viene rilasciato il maggior numero di terremoti compreso tra 5 e 8 km.

Sulla base dei terremoti riportati nel catalogo parametrico CPTI04 e riportati in tabella 4.1, coerente con la zonazione ZS9, è stata applicata la legge di regressione di Gutenberg e Richter (1944) in accordo alle indicazioni riportate nelle recenti Linee Guida AGI (2005) per ottenere informazioni in merito alla magnitudo da considerare nelle successive valutazioni.

Nella tabella 4.1 sono riportate sia le magnitudo di momento sismico M_w che la magnitudo delle onde di superficie M_s .

 Colombi Roversi &Associati Studio di Ingegneria	Comune	FERRARA (FE)	Comm. n°	Revisioni				
	Progetto	ORD.35/2024 - INVESTIMENTO PNRR M2C4 2.1.a FINANZIATO NEXTGENERATION EU MESSA IN SICUREZZA IMPIANTO IDROVORO CITTADINO PER LA LAMINAZIONE DELLE PORTATE DI PIENA DEL RETICOLO IDRAULICO DI BONIFICA ID INTERVENTO ER-UBIS-000109 CUP J78H24000430007	CRA25003	0				
			Doc. n°	ALL. 4				
RELAZIONE GEOTECNICA, SIMICA, VERIFICA OPERE DI FONDAZIONE			Fg. 9	Di 74	Compilato A.C.	Data APR.2025		

Anno	AE	Mw	Ms
725	Classe-Ravenna	5.57	5.40
1234	FERRARA	5.17	4.80
1249	Modena	5.03	4.60
1285	FERRARA	5.03	4.60
1345	CASTELNUOVO	4.63	4.00
1346	Ferrara	5.81	5.75
1410	FERRARA	5.03	4.60
1425	FERRARA SUD	4.83	4.30
1474	MODENA	4.89	4.39
1483	FERRARA	4.63	4.00
1483	Romagna meridionale	5.67	5.54
1508	FERRARA SUD	4.83	4.30
1561	Ferrara	4.63	4.00
1570	Ferrara	5.48	5.27
1574	FINALE EMILIA	5.12	4.73
1591	FORLI'	5.24	4.91
1624	Argenta	5.43	5.19
1660	MODENA	4.63	4.00
1671	RUBIERA	5.34	5.06
1688	ROMAGNA	5.88	5.85
1688	FUSIGNANO	5.17	4.80
1689	FUSIGNANO	4.83	4.30
1695	FERRARA	4.63	4.00
1743	FERRARA	5.03	4.60
1780	Bolognese	4.85	4.32
1780	RAVENNA	5.03	4.60
1787	Ferrara	4.63	4.00
1796	Emilia orientale	5.63	5.48
1806	NOVELLARA	5.26	4.93
1810	NOVELLARA	5.28	4.97
1831	Reggiano	5.48	5.27
1834	Bologna	4.63	4.00
1850	MODENA	4.83	4.30
1891	LUGO	4.83	4.30
1895	COMACCHIO	4.83	4.30
1895	COMACCHIO	4.83	4.30
1898	Romagna settent.	5.03	4.60
1908	FINALE EMILIA SUI	4.83	4.30
1909	BASSA PADANA	5.53	5.33
1922	CENTO	4.50	3.81
1928	CARPI	4.85	4.32
1950	REGGIANO	4.46	3.74
1965	RUSSI	4.95	4.47
1967	CORREGGIO	4.71	4.12
1967	BASSA PADANA	5.36	5.09
1968	RUSSI	4.58	3.92
1969	RUSSI	4.63	4.00
1978	RAVENNA S.O.	4.76	4.20
1986	BONDENO	4.56	4.30
1987	REGGIANO	5.05	4.79
1996	CORREGGIO	5.44	5.09
2000	REGGIANO	4.46	4.17

Mw: magnitudo momento

Ms: magnitudo calcolata sulle onde di superficie

AE: denominazione dell'area dei maggiori effetti

Tabella 3.1. Catalogo dei terremoti relativi alla ZS912.

La figura 4.2 mostra la regressione condotta utilizzando l'approccio di Gutenberg-Richter ai valori di magnitudo di momento dei terremoti definiti in tabella 3.1. Tale approccio ha lo scopo di definire una legge che leghi la frequenza media annuale di occorrenza di un terremoto al corrispondente valore di magnitudo M_w per la zona sismogenetica considerata.

 Colombi Roversi & Associati Studio di Ingegneria	Comune FERRARA (FE)	Comm. n° CRA25003	Revisioni			
	Progetto ORD.35/2024 - INVESTIMENTO PNRR M2C4 2.1.a FINANZIATO NEXTGENERATION EU MESSA IN SICUREZZA IMPIANTO IDROVORO CITTADINO PER LA LAMINAZIONE DELLE PORTATE DI PIENA DEL RETICOLO IDRAULICO DI BONIFICA ID INTERVENTO ER-UBIS-000109 CUP J78H24000430007	Doc. n° ALL. 4	0			
RELAZIONE GEOTECNICA, SIMICA, VERIFICA OPERE DI FONDAZIONE		Fg. 10	Di 74	Compilato A.C.	Data APR.2025	

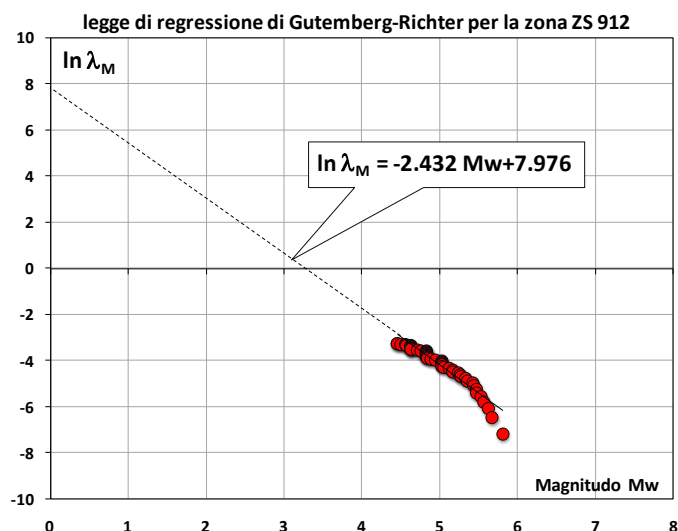


Figura 3.2. Retta di regressione della magnitudo di momento M_w secondo la legge di Gutenberg-Richter per la zona ZS912.

($\lambda_M = 1/Tr$ rappresenta l'inverso del periodo di ritorno ovvero la frequenza media annuale di eccedenza di un particolare valore di magnitudo)

Ai fini della progettazione allo stato limite ultimo, il tempo di ritorno considerato per gli eventi naturali è stato riferito ad una probabilità di superamento del 10% in 50 anni (vita utile dell'opera) che corrisponde ad un tempo di ritorno $Tr = 475$ anni.

Sulla base dei parametri ottenuti dalla legge di regressione mostrata in figura 4.2 la magnitudo di riferimento risulta pari a:

$$M_{w,gr} = \frac{\ln(e^{7.976}) + \ln 475}{2.432} = \mathbf{5.814}$$

Poiché però i cataloghi sismici ottenuti a partire da analisi storiche possono essere influenzati da errori dovuti alla non completezza delle informazioni contenute negli archivi utilizzati per la compilazione del catalogo, il rapporto dell'INGV definisce una magnitudo massima attesa per ogni zona sismogenetica stabilita sulla base di analisi di completezza effettuate sia su base storica che statistica. Per la zona ZS912 la magnitudo massima attesa ottenuta dalle analisi di completezza risulta pari a:

$$\mathbf{M_{w,max} = 6.14}$$

Le analisi sismiche influenzate dall'entità della magnitudo sono state effettuate utilizzando il valore massimo $M_{w,max}$ definito sulla base della zona sismogenetica pari a 6.14.

 Colombi Roversi & Associati Studio di Ingegneria	Comune	FERRARA (FE)	Comm. n°	Revisioni				
	Progetto	ORD.35/2024 - INVESTIMENTO PNRR M2C4 2.1.a FINANZIATO NEXTGENERATION EU MESSA IN SICUREZZA IMPIANTO IDROVORO CITTADINO PER LA LAMINAZIONE DELLE PORTATE DI PIENA DEL RETICOLO IDRAULICO DI BONIFICA ID INTERVENTO ER-UBIS-000109 CUP J78H24000430007	CRA25003	0				
			Doc. n°	ALL. 4				
RELAZIONE GEOTECNICA, SIMICA, VERIFICA OPERE DI FONDAZIONE			Fg. 11	Di 74	Compilato A.C.	Data APR.2025		

4 DEFINIZIONE DEI CARATTERI SISMICI DI BASE DELL'AREA: ACCELERAZIONE AL SUOLO DI PROGETTO

Di seguito vengono riportati i parametri sismici corrispondenti al sito indagato in base alle corrispondenti coordinate geografiche

Parametri sismici

Sito in esame.

latitudine: 44,853886
longitudine: 11,597298
Classe: 4
Vita nominale: 50

Siti di riferimento

Sito 1 ID: 15180 Lat: 44,8697 Lon: 11,5867 Distanza: 1948,439
Sito 2 ID: 15181 Lat: 44,8708 Lon: 11,6571 Distanza: 5074,379
Sito 3 ID: 15403 Lat: 44,8208 Lon: 11,6586 Distanza: 6072,484
Sito 4 ID: 15402 Lat: 44,8197 Lon: 11,5883 Distanza: 3866,442

Parametri sismici

Categoria sottosuolo: C
Categoria topografica: T1
Periodo di riferimento: 100anni
Coefficiente cu: 2

Operatività (SLO):

Probabilità di superamento: 81 %
Tr: 60 [anni]
ag: 0,049 g
Fo: 2,498
Tc*: 0,278 [s]

Danno (SLD):

Probabilità di superamento: 63 %
Tr: 101 [anni]
ag: 0,063 g
Fo: 2,512
Tc*: 0,284 [s]

 Colombi Roversi &Associati Studio di Ingegneria	Comune	FERRARA (FE)	Comm. n°		Revisioni				
	Progetto	ORD.35/2024 - INVESTIMENTO PNRR M2C4 2.1.a FINANZIATO NEXTGENERATION EU MESSA IN SICUREZZA IMPIANTO IDROVORO CITTADINO PER LA LAMINAZIONE DELLE PORTATE DI PIENA DEL RETICOLO IDRAULICO DI BONIFICA ID INTERVENTO ER-UBIS-000109 CUP J78H24000430007	CRA25003		0				
			Doc. n°		ALL. 4				
RELAZIONE GEOTECNICA, SIMICA, VERIFICA OPERE DI FONDAZIONE			Fg.	Di	Compilato		Data		
			12	74	A.C.		APR.2025		

Salvaguardia della vita (SLV):

Probabilità di superamento: 10 %

Tr: 949 [anni]

ag: 0,172 g

Fo: 2,559

Tc*: 0,280 [s]

Prevenzione dal collasso (SLC):

Probabilità di superamento: 5 %

Tr: 1950 [anni]

ag: 0,227 g

Fo: 2,499

Tc*: 0,288 [s]

 Colombi Roversi &Associati Studio di Ingegneria	Comune	FERRARA (FE)	Comm. n°		Revisioni				
	Progetto	ORD.35/2024 - INVESTIMENTO PNRR M2C4 2.1.a FINANZIATO NEXTGENERATION EU MESSA IN SICUREZZA IMPIANTO IDROVORO CITTADINO PER LA LAMINAZIONE DELLE PORTATE DI PIENA DEL RETICOLO IDRAULICO DI BONIFICA ID INTERVENTO ER-UBIS-000109 CUP J78H24000430007	CRA25003		0				
			Doc. n°		ALL. 4				
RELAZIONE GEOTECNICA, SIMICA, VERIFICA OPERE DI FONDAZIONE			Fg.	Di	Compilato		Data		
			13	74	A.C.		APR.2025		

5 DEFINIZIONE DEL PROFILO GEOTECNICO DI PROGETTO

Sequenza litostratigrafica

La sequenza lito-stratigrafica dei terreni attraversati è stata elaborata utilizzando correlazioni semi-empiriche di letteratura, a partire dai risultati di resistenza alla punta e laterale misurati dalla prova penetrometrica. In particolare si è utilizzata la correlazione proposta da Robertson (1990), che utilizza le informazioni derivanti dai valori normalizzati con lo stato tensionale delle resistenze misurate, q_c ed f_s e della pressione neutra u (denominati rispettivamente Q_t , F_r e B_q).

I pesi per unità di volume dei terreni indagati sono stati ricavati in base a correlazioni dai risultati della prova CPTU seguendo diverse correlazioni da letteratura (Robertson 2010, Mayne et Al. 2010).

Parametri geotecnici idraulici e meccanici

In base alle indicazioni di Robertson (1990) in funzione del tipo litologico è stato determinato il coefficiente di conducibilità idraulica dei terreni attraversati. In base alle indicazioni di Jamiolkowski et Al. (1985), assumendo un rapporto tra permeabilità orizzontale e verticale pari a 5, è stato ricavato il coefficiente di conducibilità idraulica orizzontale dei terreni.

I terreni a matrice granulare sono stati caratterizzati in termini di parametri geotecnici utilizzando le seguenti correlazioni:

- Angolo di resistenza a taglio di picco con la correlazione di Kulhawy e Mayne (1990) per sabbie contenenti frazioni limose
- Angolo di resistenza a taglio in condizioni di stato critico in base alla relazione di Bolton (1986)
- Densità relativa attraverso la correlazione di Robertson (2009)
- Modulo di Young drenato attraverso la correlazione di Baldi et al (1989)
- Modulo di taglio a piccole deformazioni G_0 con la correlazione di Robertson (2009)

 Colombi Roversi &Associati Studio di Ingegneria	Comune	FERRARA (FE)	Comm. n°		Revisioni				
	Progetto	ORD.35/2024 - INVESTIMENTO PNRR M2C4 2.1.a FINANZIATO NEXTGENERATION EU MESSA IN SICUREZZA IMPIANTO IDROVORO CITTADINO PER LA LAMINAZIONE DELLE PORTATE DI PIENA DEL RETICOLO IDRAULICO DI BONIFICA ID INTERVENTO ER-UBIS-000109 CUP J78H24000430007	CRA25003		0				
			Doc. n°		ALL. 4				
RELAZIONE GEOTECNICA, SIMICA, VERIFICA OPERE DI FONDAZIONE			Fg.	Di	Compilato		Data		
			14	74	A.C.		APR.2025		

I terreni a matrice fine sono stati caratterizzati in termini di parametri meccanici, utilizzando le seguenti correlazioni:

- Resistenza al taglio non drenata in funzione della resistenza alla punta in base alla relazione $c_u = (q_c - \sigma_{v0}) / N_k$, con σ_{v0} tensione totale ed N_k fattore di cono assunto pari a 15.
- Angolo di taglio drenato in base alla correlazione proposta da Mayne e Campanella (2005)
- Modulo di Young attraverso la correlazione di Duncan e Buchignani (1976)
- Modulo edometrico ricavato in base alla correlazione di Gottardi (2011)
- Grado di sovraconsolidazione OCR in base alla correlazione di Gottardi (2011)
- Coefficiente di consolidazione verticale ottenuto sulla base dei valori del modulo edometrico e del coefficiente di conducibilità idraulica
- Coefficiente di consolidazione orizzontale ottenuto sulla base della correlazione di Robertson (2009) adottando un valore del rapporto di ricomprensione $RR=0.01$.
- Modulo di taglio a piccole deformazioni G_0 con la correlazione di Robertson (2009)

 Colombi Roversi &Associati Studio di Ingegneria	Comune	FERRARA (FE)	Comm. n°	Revisioni			
	Progetto	ORD.35/2024 - INVESTIMENTO PNRR M2C4 2.1.a FINANZIATO NEXTGENERATION EU MESSA IN SICUREZZA IMPIANTO IDROVORO CITTADINO PER LA LAMINAZIONE DELLE PORTATE DI PIENA DEL RETICOLO IDRAULICO DI BONIFICA ID INTERVENTO ER-UBIS-000109 CUP J78H24000430007	CRA25003	0			
			Doc. n°	ALL. 4			
RELAZIONE GEOTECNICA, SIMICA, VERIFICA OPERE DI FONDAZIONE			Fg. 15	Di 74	Compilato A.C.	Data APR.2025	

Sequenza litostratigrafica

Nelle figure 5.1 sono riportati i risultati di resistenza alla punta, di resistenza per attrito laterale, andamento della variazione di pressione neutra e il rapporto di attrito con la profondità misurati nella verticali penetrometriche.

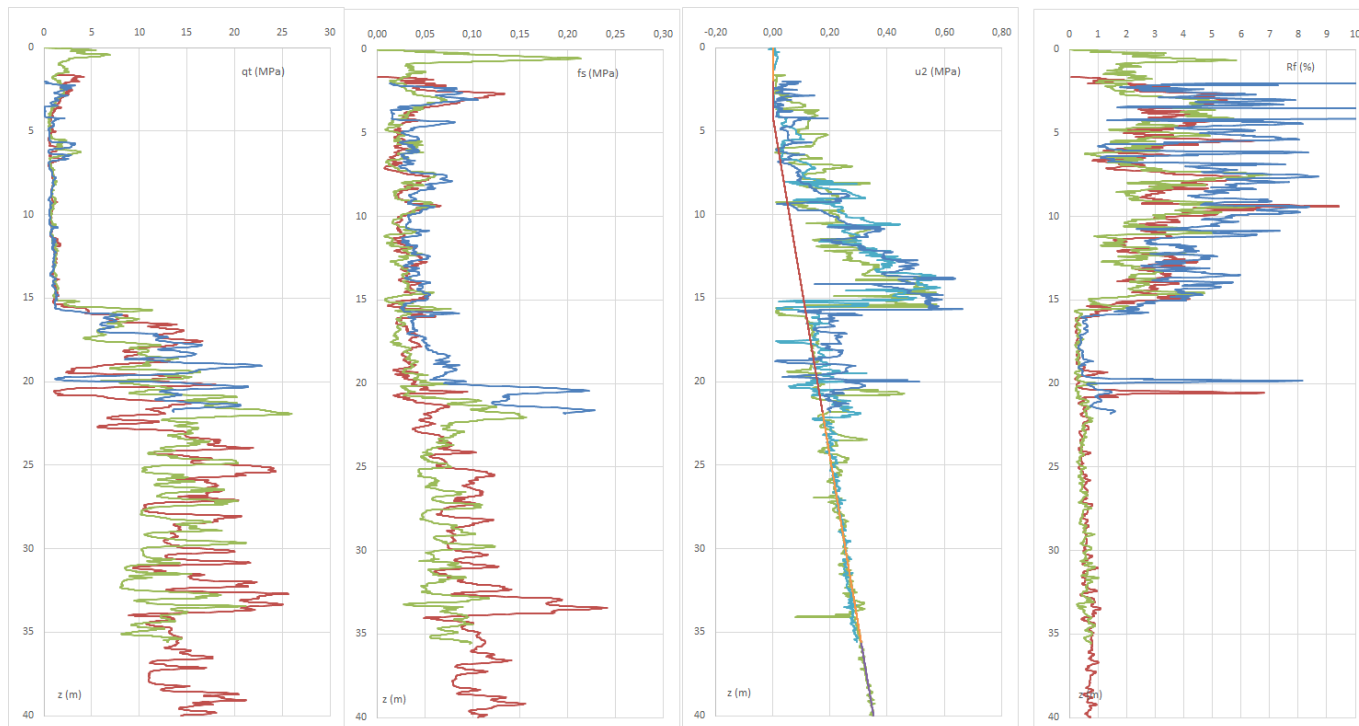


Figura 5.1. Risultati della verticale penetrometrica

La falda è stata individuata circa a quota 4.1 m di profondità da dalla sommità arginale

 Colombi Roversi &Associati Studio di Ingegneria	Comune	FERRARA (FE)	Comm. n°		Revisioni				
	Progetto	ORD.35/2024 - INVESTIMENTO PNRR M2C4 2.1.a FINANZIATO NEXTGENERATION EU MESSA IN SICUREZZA IMPIANTO IDROVORO CITTADINO PER LA LAMINAZIONE DELLE PORTATE DI PIENA DEL RETICOLO IDRAULICO DI BONIFICA ID INTERVENTO ER-UBIS-000109 CUP J78H24000430007	CRA25003		0				
			Doc. n°		ALL. 4				
RELAZIONE GEOTECNICA, SIMICA, VERIFICA OPERE DI FONDAZIONE			Fg.	Di	Compilato		Data		
			16	74	A.C.		APR.2025		

La classificazione dei terreni ottenuta dalle prove penetrometriche mediante la correlazione adottata (Robertson, 1990) è riportata in dettaglio in figura 5.2 e 5.3.

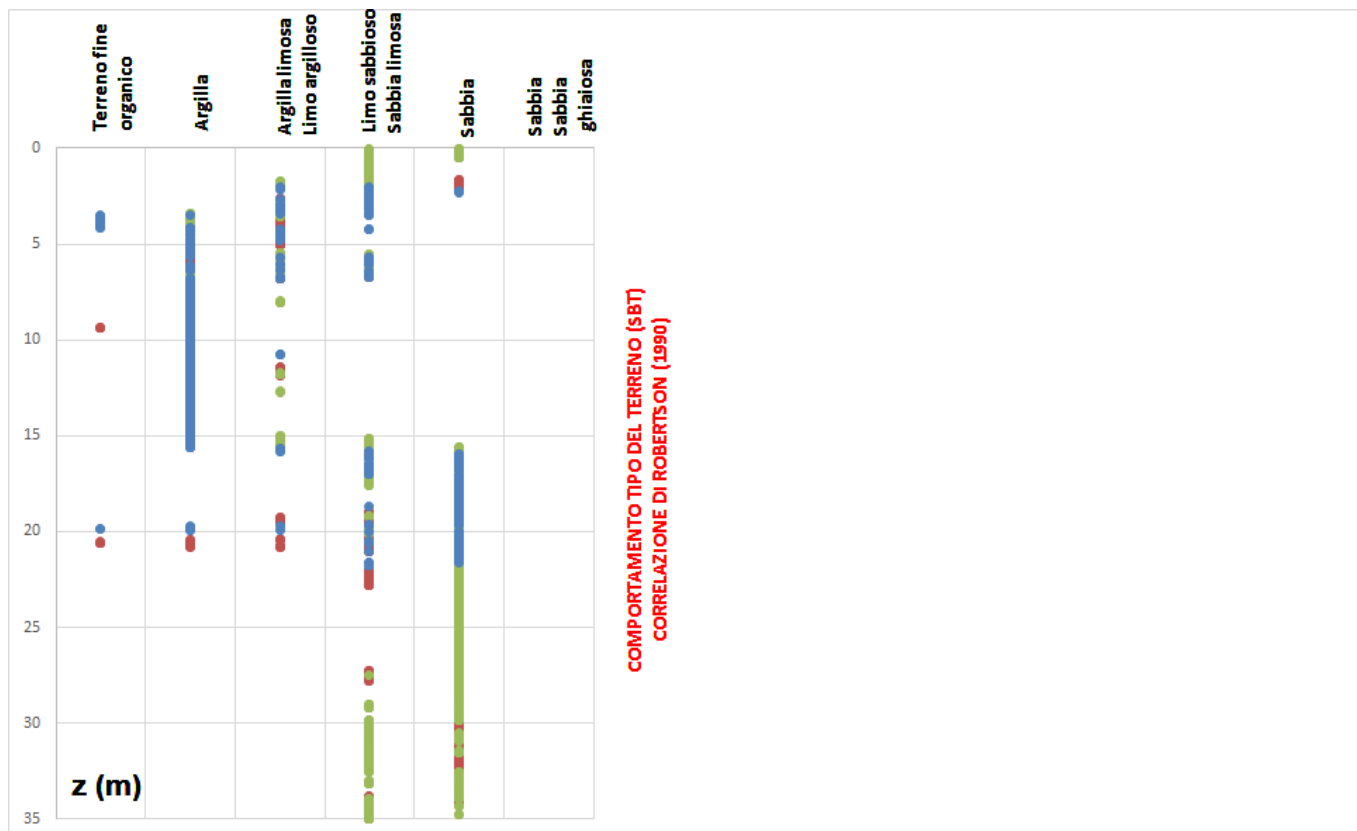
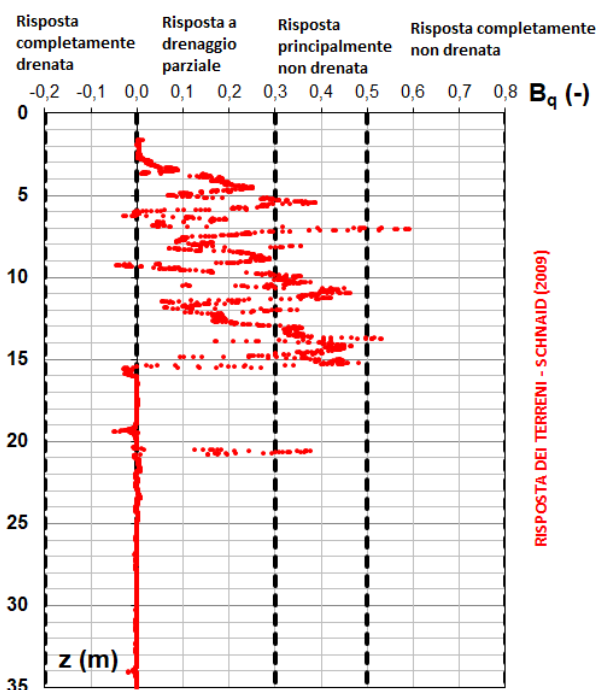


Figura 5.2. Classificazione dei terreni in base alla correlazione di Robertson (1990).



 Colombi Roversi & Associati Studio di Ingegneria	Comune	FERRARA (FE)	Comm. n°		Revisioni				
	Progetto	ORD.35/2024 - INVESTIMENTO PNRR M2C4 2.1.a FINANZIATO NEXTGENERATION EU MESSA IN SICUREZZA IMPIANTO IDROVORO CITTADINO PER LA LAMINAZIONE DELLE PORTATE DI PIENA DEL RETICOLO IDRAULICO DI BONIFICA ID INTERVENTO ER-UBIS-000109 CUP J78H24000430007	CRA25003		0				
			Doc. n°		ALL. 4				
RELAZIONE GEOTECNICA, SIMICA, VERIFICA OPERE DI FONDAZIONE			Fg. 17	Di 74	Compilato A.C.		Data APR.2025		

Figura 5.3. Classificazione dei terreni in base alla correlazione di Robertson (1990).

I pesi per unità di volume dei terreni indagati sono riportati nella figura sottostante.

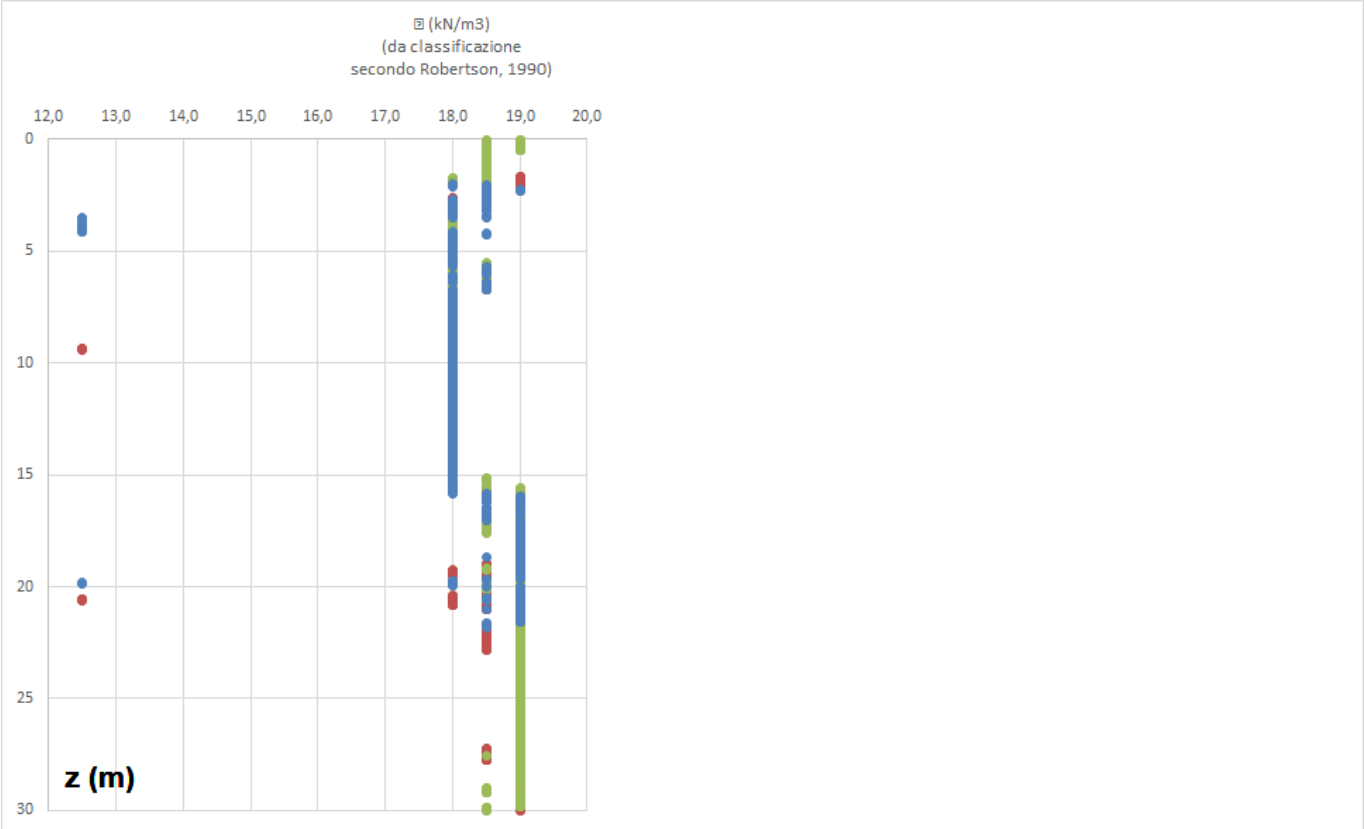


Figura 5.4. Peso per unità di volume dei terreni.

 Colombi Roversi &Associati Studio di Ingegneria	Comune	FERRARA (FE)	Comm. n°		Revisioni				
	Progetto	ORD.35/2024 - INVESTIMENTO PNRR M2C4 2.1.a FINANZIATO NEXTGENERATION EU MESSA IN SICUREZZA IMPIANTO IDROVORO CITTADINO PER LA LAMINAZIONE DELLE PORTATE DI PIENA DEL RETICOLO IDRAULICO DI BONIFICA ID INTERVENTO ER-UBIS-000109 CUP J78H24000430007	CRA25003	0					
			Doc. n° ALL. 4						
RELAZIONE GEOTECNICA, SIMICA, VERIFICA OPERE DI FONDAZIONE			Fg. 18	Di 74	Compilato A.C.		Data APR.2025		

Parametri meccanici ed idraulici ottenuti dall'interpretazione di CPTu1 e SCPTU1

Nelle figure che seguono sono riportati i parametri meccanici dei terreni ottenuti in base alle correlazioni descritte precedentemente con i risultati delle due verticali CPTU1 e SCPTU1.

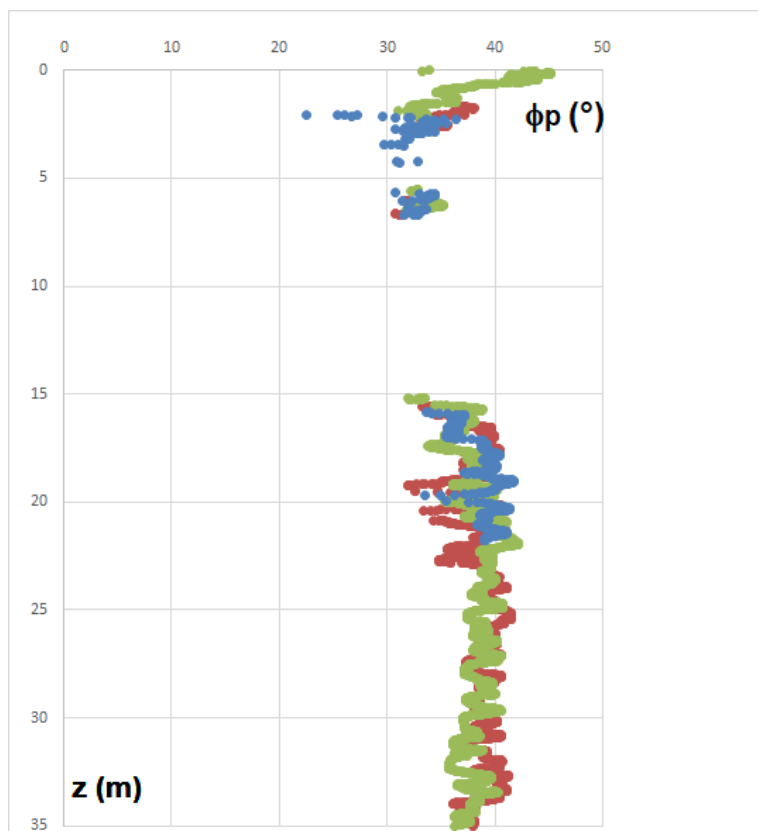


Figura 5.5. Terreni a grana grossa: andamento dei valori di angolo di resistenza a taglio di picco con la profondità (Kulhawy & Mayne 1990).

 Colombi Roversi & Associati Studio di Ingegneria	Comune	FERRARA (FE)	Comm. n°		Revisioni			
	Progetto	ORD.35/2024 - INVESTIMENTO PNRR M2C4 2.1.a FINANZIATO NEXTGENERATION EU MESSA IN SICUREZZA IMPIANTO IDROVORO CITTADINO PER LA LAMINAZIONE DELLE PORTATE DI PIENA DEL RETICOLO IDRAULICO DI BONIFICA ID INTERVENTO ER-UBIS-000109 CUP J78H24000430007	CRA25003	0				
			Doc. n°		ALL. 4			
RELAZIONE GEOTECNICA, SIMICA, VERIFICA OPERE DI FONDAZIONE			Fg. 19	Di 74	Compilato A.C.		Data APR.2025	

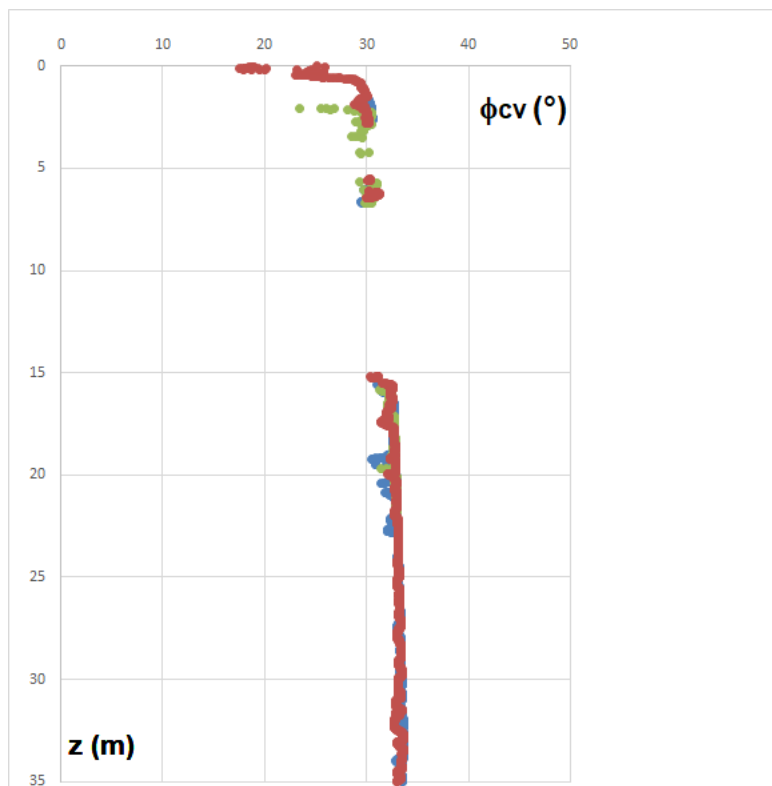


Figura 5.6. Terreni a grana grossa: andamento dei valori di angolo di resistenza a taglio a volume costante con la profondità (Bolton 1986).

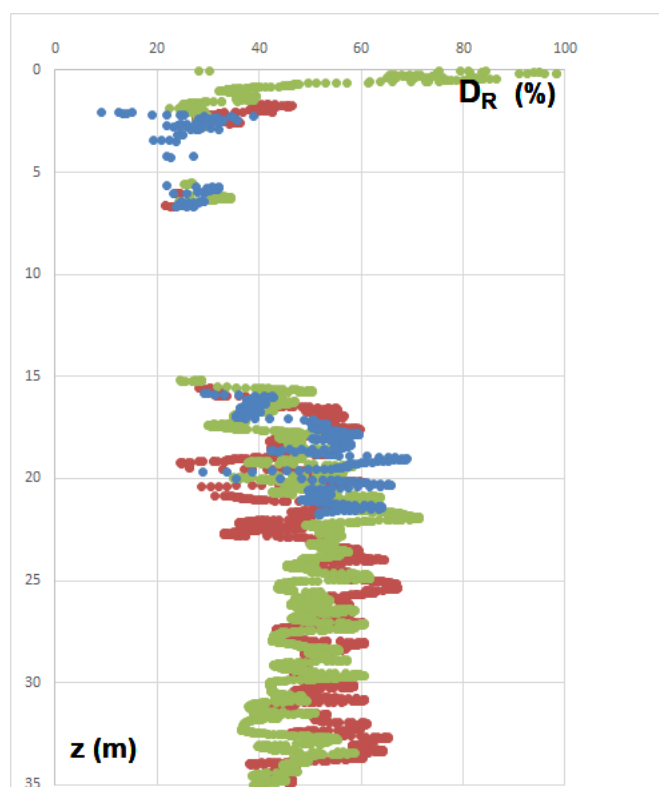


Figura 5.8. Terreni a grana grossa: andamento dei valori di densità relativa con la profondità.

 Colombi Roversi &Associati Studio di Ingegneria	Comune	FERRARA (FE)	Comm. n°		Revisioni			
	Progetto	ORD.35/2024 - INVESTIMENTO PNRR M2C4 2.1.a FINANZIATO NEXTGENERATION EU MESSA IN SICUREZZA IMPIANTO IDROVORO CITTADINO PER LA LAMINAZIONE DELLE PORTATE DI PIENA DEL RETICOLO IDRAULICO DI BONIFICA ID INTERVENTO ER-UBIS-000109 CUP J78H24000430007	CRA25003	0				
			Doc. n°		ALL. 4			
RELAZIONE GEOTECNICA, SIMICA, VERIFICA OPERE DI FONDAZIONE			Fg. 20	Di 74	Compilato A.C.		Data APR.2025	

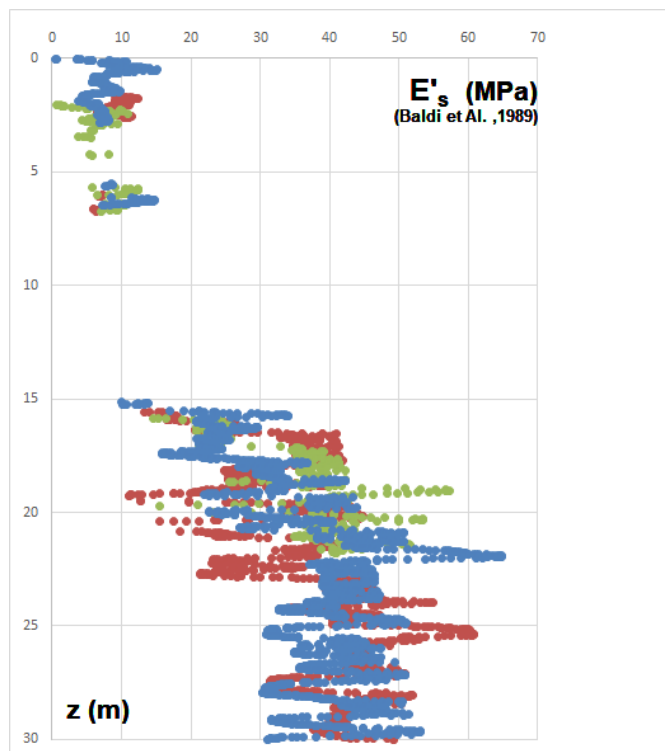


Figura 5.9. Terreni a grana grossa: andamento dei valori di modulo di Young drenato con la profondità.

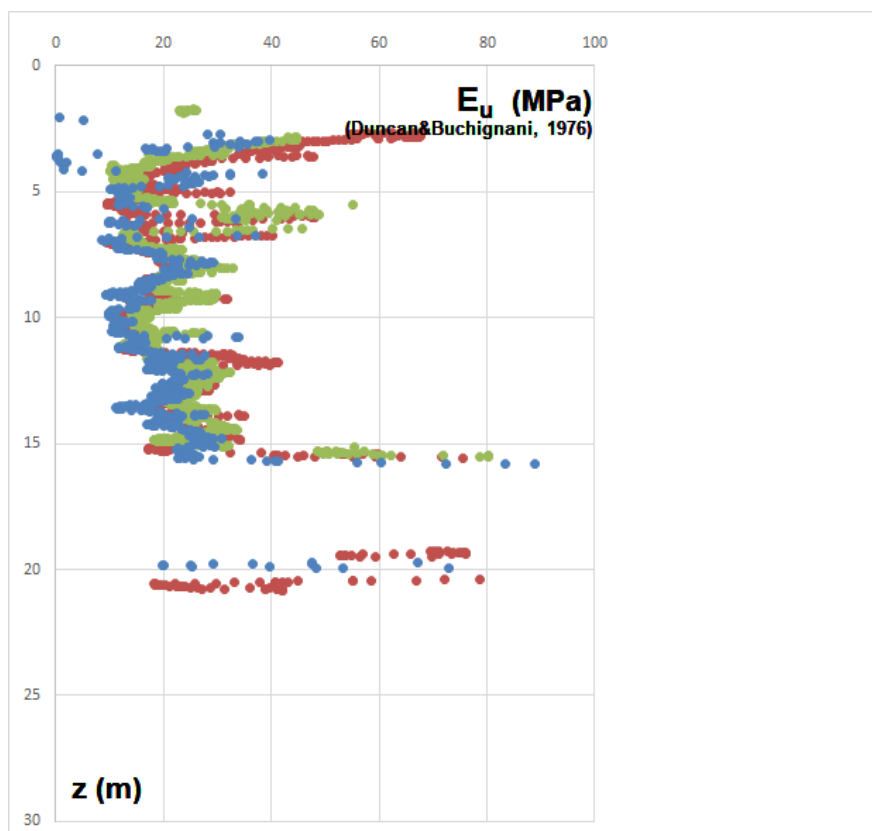


Figura 5.10. Terreni a grana fine: andamento dei valori di modulo di Young non drenato con la profondità.

 Colombi Roversi &Associati Studio di Ingegneria	Comune	FERRARA (FE)	Comm. n°		Revisioni			
	Progetto	ORD.35/2024 - INVESTIMENTO PNRR M2C4 2.1.a FINANZIATO NEXTGENERATION EU MESSA IN SICUREZZA IMPIANTO IDROVORO CITTADINO PER LA LAMINAZIONE DELLE PORTATE DI PIENA DEL RETICOLO IDRAULICO DI BONIFICA ID INTERVENTO ER-UBIS-000109 CUP J78H24000430007	CRA25003	0				
			Doc. n°		ALL. 4			
RELAZIONE GEOTECNICA, SIMICA, VERIFICA OPERE DI FONDAZIONE			Fg. 21	Di 74	Compilato A.C.		Data APR.2025	

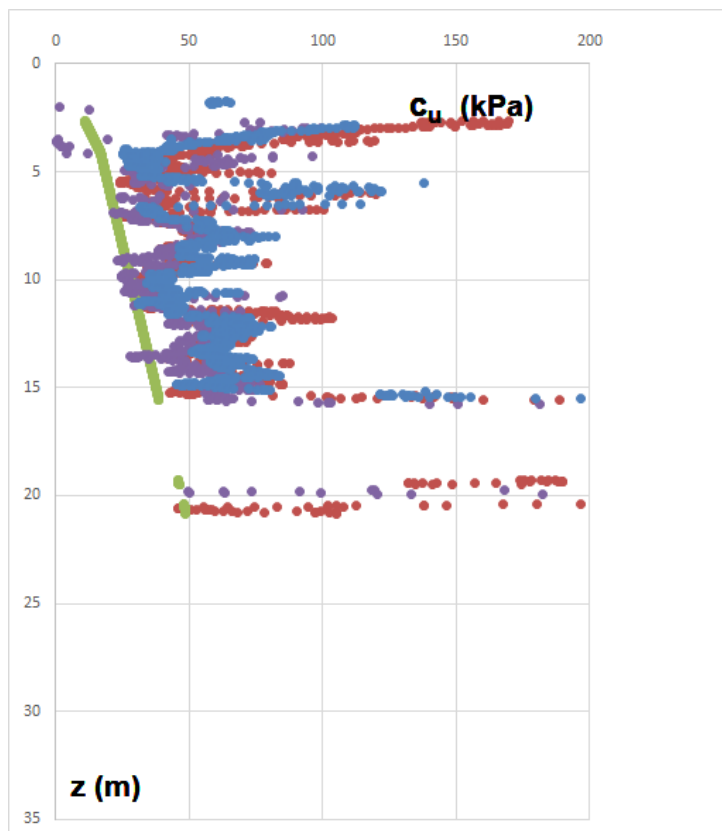
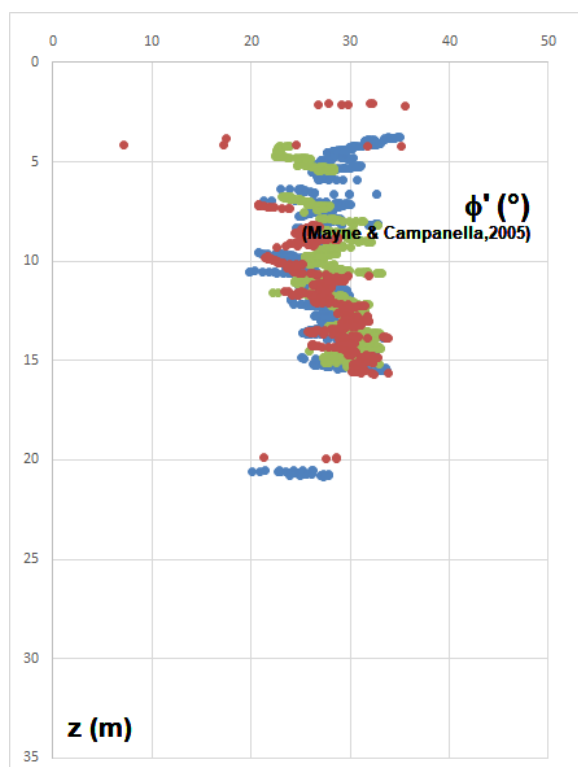


Figura 5.11. Terreni a grana fine: andamento dei valori di resistenza a taglio non drenata con la profondità.



 Colombi Roversi &Associati Studio di Ingegneria	Comune	FERRARA (FE)	Comm. n°	Revisioni				
	Progetto	ORD.35/2024 - INVESTIMENTO PNRR M2C4 2.1.a FINANZIATO NEXTGENERATION EU MESSA IN SICUREZZA IMPIANTO IDROVORO CITTADINO PER LA LAMINAZIONE DELLE PORTATE DI PIENA DEL RETICOLO IDRAULICO DI BONIFICA ID INTERVENTO ER-UBIS-000109 CUP J78H24000430007	CRA25003	0				
			Doc. n°	ALL. 4				
RELAZIONE GEOTECNICA, SIMICA, VERIFICA OPERE DI FONDAZIONE			Fg. 22	Di 74	Compilato A.C.	Data APR.2025		

Figura 5.12. Terreni a grana fine: andamento dei valori dell'angolo di resistenza a taglio.

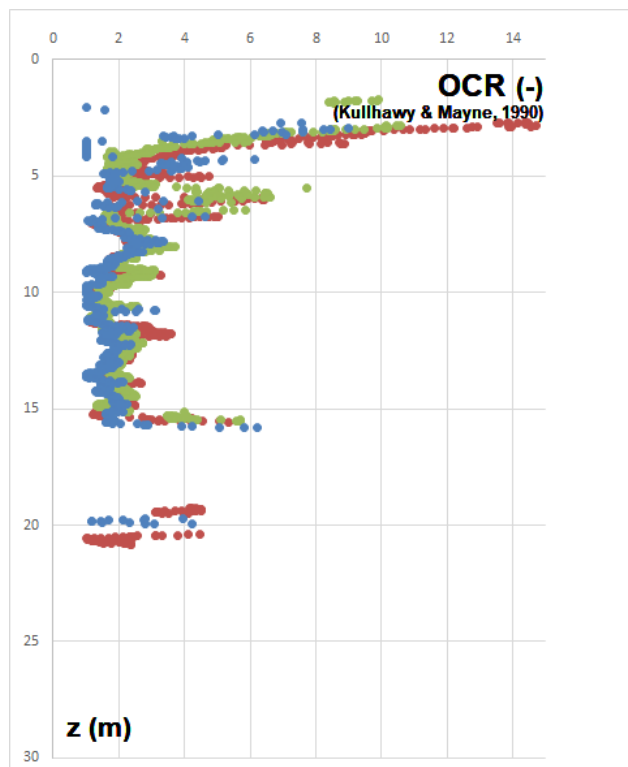
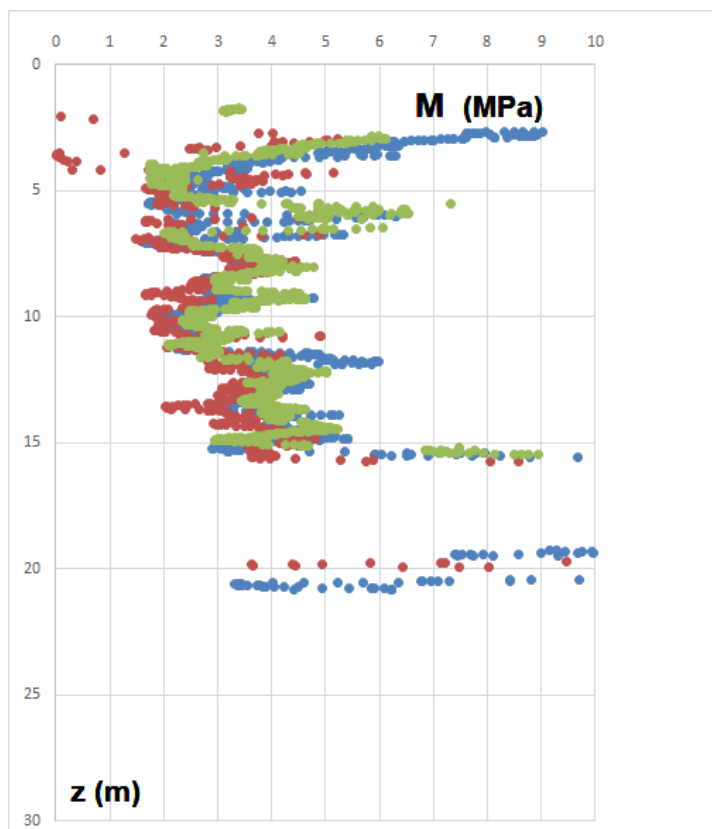


Figura 5.13. Terreni a grana fine: andamento grado di sovraconsolidazione con la profondità.



 Colombi Roversi &Associati Studio di Ingegneria	Comune	FERRARA (FE)	Comm. n°		Revisioni			
	Progetto	ORD.35/2024 - INVESTIMENTO PNRR M2C4 2.1.a FINANZIATO NEXTGENERATION EU MESSA IN SICUREZZA IMPIANTO IDROVORO CITTADINO PER LA LAMINAZIONE DELLE PORTATE DI PIENA DEL RETICOLO IDRAULICO DI BONIFICA ID INTERVENTO ER-UBIS-000109 CUP J78H24000430007	CRA25003	0				
			Doc. n° ALL. 4					
RELAZIONE GEOTECNICA, SIMICA, VERIFICA OPERE DI FONDAZIONE			Fg. 23	Di 74	Compilato A.C.	Data APR.2025		

Figura 5.12. Terreni a grana fine: andamento dei valori di modulo edometrico con la profondità (Tonni Gottardi 2011).

L'interpretazione delle prove di laboratorio (documento tecnico di riferimento [b]) fornisce i seguenti valori in termini di parametri fisici e parametri meccanici

SONDAGGIO CAMPIONE	Profondità	GHIAIA	SABBIA	LIMO	ARGILLA	LITOLOGIA	LL (%)	LP (%)	IP (%)	Peso
-	(m)	%	%	%	%		%	%	%	kN/m3
S1 OST1	1,66 - 1,85	3	24	55	18	Limo sabbioso e argilloso	44,5	25,4	19,1	
S1 OST2	3.00 - 3.70	1	13	68	18	Limo argilloso sabbioso	35,8	20,5	15,3	
S1 OST3bis	4.50 - 5.20	0	39	53	7	Limo con sabbia	51	23,1	27,9	
S1 OST4	7.50 -8.20	0	1	49	50	Argilla con limo	61,1	24,2	36,9	
S1 OST5	12.00 -12.70	0	2	72	26	Limo argilloso	41	21,5	19,6	

Riassunto dei parametri fisici ottenuti nei campioni prelevati

SONDAGGIO CAMPIONE	Profondità	LITOLOGIA	Peso	DS		TXCID		TXCIU		EDO	
				ϕ' picco	c'	ϕ' CV	c'	cu	ϕ'_{su}	M	cv
-	(m)		kN/m3	(°)	(kPa)	(°)	(kPa)	(kPa)	(°)	(MPa)	(m2/s)
S1 OST1	1,66 - 1,85	Limo sabbioso e argilloso									
S1 OST2	3.00 - 3.70	Limo argilloso sabbioso	18,6					60	36,2		
S1 OST3bis	4.50 - 5.20	Limo con sabbia	18					50	30,1		
S1 OST4	7.50 -8.20	Argilla con limo	17,2	31,2	10						
S1 OST5	12.00 -12.70	Limo argilloso	18,5					90	20,1		

Riassunto dei parametri meccanici ottenuti nei campioni prelevati

 Colombi Roversi &Associati Studio di Ingegneria	Comune	FERRARA (FE)	Comm. n°		Revisioni			
	Progetto	ORD.35/2024 - INVESTIMENTO PNRR M2C4 2.1.a FINANZIATO NEXTGENERATION EU MESSA IN SICUREZZA IMPIANTO IDROVORO CITTADINO PER LA LAMINAZIONE DELLE PORTATE DI PIENA DEL RETICOLO IDRAULICO DI BONIFICA ID INTERVENTO ER-UBIS-000109 CUP J78H24000430007	CRA25003		0			
			Doc. n°		ALL. 4			
RELAZIONE GEOTECNICA, SIMICA, VERIFICA OPERE DI FONDAZIONE			Fg. 24	Di 74	Compilato A.C.		Data APR.2025	

Nelle tabelle seguenti viene riportata la sequenza litologica di progetto con la suddivisione del terreno indagato in unità litologiche a comportamento meccanico omogeneo.

Nella tabella 5.1 sono indicati i valori caratteristici, scelti in base ad una stima cautelativa, dei principali parametri geotecnici dei terreni granulari per ciascuna unità litologica ricavati dalle correlazioni sopra indicate. Nella tabella 5.2 sono indicati i valori caratteristici, scelti in base ad una stima cautelativa, dei principali parametri geotecnici dei terreni fini per ciascuna unità litologica ricavati dalle correlazioni sopra indicate.

(quote dalla sommità arginale)

Unità	Prof da p.c. (m)	Tipo Litol.	Parametri geotecnici					
			γ (kN/m ³)	ϕ'_p (°)	ϕ'_{cv} (°)	D_R (%)	E'_s (MPa)	q_c (MPa)
A	0÷2	Limo	18.5	34	29	40	8.5	2.5
		sabbioso						
C	15÷40	argilloso	19	38	32	50	40	13.8
		Sabbia						

Tabella 5.1. Terreni a grana grossa: valori per ciascuna unità litologica.

Unità	Prof da p.c. (m)	Tipo Litol.	Parametri geotecnici				
			γ (kN/m ³)	c_u (kPa)	E_u (MPa)	ϕ' (°)	M (MPa)
B1	2÷11.5	Limo argilloso	18	35	12	26	2
		sabbioso					
B1	11.5÷15	Argilla con limo- Limo argilloso	18	60	23	27	3.5

Tabella 5.2. Terreni a grana fine: valori per ciascuna unità litologica.

 Colombi Roversi &Associati Studio di Ingegneria	Comune	FERRARA (FE)	Comm. n°		Revisioni			
	Progetto	ORD.35/2024 - INVESTIMENTO PNRR M2C4 2.1.a FINANZIATO NEXTGENERATION EU MESSA IN SICUREZZA IMPIANTO IDROVORO CITTADINO PER LA LAMINAZIONE DELLE PORTATE DI PIENA DEL RETICOLO IDRAULICO DI BONIFICA ID INTERVENTO ER-UBIS-000109 CUP J78H24000430007	CRA25003		0			
			Doc. n°		ALL. 4			
RELAZIONE GEOTECNICA, SIMICA, VERIFICA OPERE DI FONDAZIONE			Fg.	Di	Compilato		Data	
			25	74	A.C.		APR.2025	

6. CLASSIFICAZIONE SISMICA DEL SITO

La classificazione sismica del sito è stata fatta sulla base della determinazione di valori di V_s per i terreni presenti nei primi 30 m di profondità effettuata attraverso la misura con la prova SCPTU.

Noto l'andamento di V_s è stato ricavato il valore di $V_{s,30}$ in accordo a quanto riportato nel DM 17/01/18, utilizzando la seguente espressione:

$$V_{s,30} = \frac{30}{\sum_{i=1,N} \frac{h_i}{V_{s,i}}}$$

Con:

h_i : spessore dello strato i-esimo compreso nei primi 30m di profondità

$v_{s,i}$ = velocità delle onde di taglio nello strato i-esimo

N = numero di strati compresi nei primi 30m di profondità

In base ai risultati ottenuti con il calcolo di V_s , il valore di $V_{s,30}$ è risultato pari a:

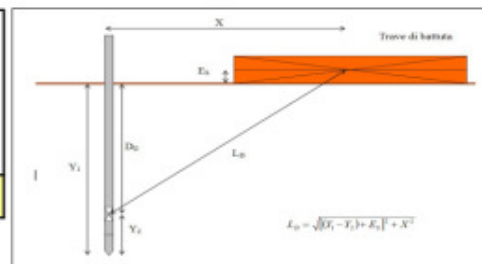
$$\mathbf{V_{s,30} = 197 \text{ m/s}}$$

Essendo il valore di $180\text{m/s} < V_{s,30} < 360 \text{ m/s}$ il sito è da classificare come **categoria C** (depositi di terreni a grana grossa mediamente addensati o di terreni a grana fina mediamente consistenti).

 Colombi Roversi & Associati Studio di Ingegneria	Comune	FERRARA (FE)	Comm. n°	Revisioni				
	Progetto	ORD.35/2024 - INVESTIMENTO PNRR M2C4 2.1.a FINANZIATO NEXTGENERATION EU MESSA IN SICUREZZA IMPIANTO IDROVORO CITTADINO PER LA LAMINAZIONE DELLE PORTATE DI PIENA DEL RETICOLO IDRAULICO DI BONIFICA ID INTERVENTO ER-UBIS-000109 CUP J78H24000430007	CRA25003	0				
			Doc. n°	ALL. 4				
RELAZIONE GEOTECNICA, SIMICA, VERIFICA OPERE DI FONDAZIONE			Fg.	Di	Compilato	Data		
			26	74	A.C.	APR.2025		

Peso mazza battente: 5Kg
 Ricevitore Down Hole: G1-cpl2IN
 Equipaggiamento di registrazione: D1-SISMI USB
 Distanza centro sorgente-verticale X: 0,25 m
 Distanza punta-accelerometro Y₂: 0,20 m

V_{s30} = 197 m/sec Categoria suolo di fondazione = C



Profondità (m)	Velocità onde S dello strato (m/sec)
1,500	167
2,500	170
3,500	169
4,500	171
5,500	169
6,500	161
7,500	175
8,500	160
9,500	135
10,500	132
11,500	145
12,500	147
13,500	174
14,500	184
15,500	243
16,500	244
17,500	241
18,500	292
19,500	275
20,500	244
21,500	241
22,500	249
23,500	254
24,500	282
25,500	242
26,500	249
27,500	280
28,500	295
29,500	260
30,500	255
31,500	263
32,500	252
33,500	248
34,500	236
35,500	

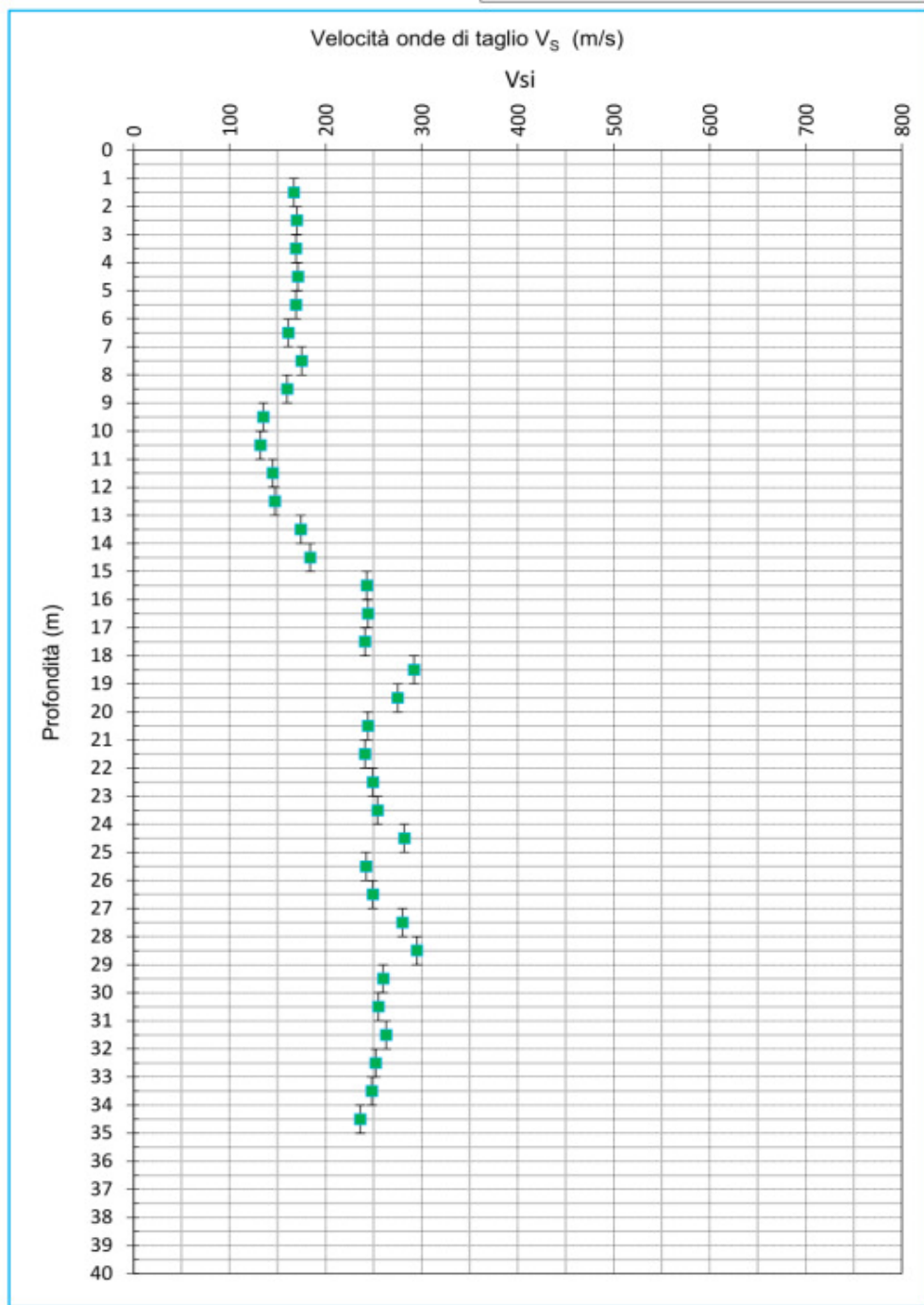


Figura 6.1. Andamento profilo della velocità di propagazione delle onde di taglio Vs

 Colombi Roversi &Associati Studio di Ingegneria	Comune	FERRARA (FE)	Comm. n°		Revisioni				
	Progetto	ORD.35/2024 - INVESTIMENTO PNRR M2C4 2.1.a FINANZIATO NEXTGENERATION EU MESSA IN SICUREZZA IMPIANTO IDROVORO CITTADINO PER LA LAMINAZIONE DELLE PORTATE DI PIENA DEL RETICOLO IDRAULICO DI BONIFICA ID INTERVENTO ER-UBIS-000109 CUP J78H24000430007	CRA25003		0				
			Doc. n°		ALL. 4				
RELAZIONE GEOTECNICA, SIMICA, VERIFICA OPERE DI FONDAZIONE			Fg.	Di	Compilato		Data		
			27	74	A.C.		APR.2025		

Risultano pertanto i seguenti valori dei coefficienti sismici:

Coefficienti Sismici Stabilità dei pendii

SLO:

Ss: 1,500
 Cc: 1,600
 St: 1,000
 Kh: 0,015
 Kv: 0,007
 Amax: 0,727
 Beta: 0,200

SLD:

Ss: 1,500
 Cc: 1,590
 St: 1,000
 Kh: 0,019
 Kv: 0,010
 Amax: 0,934
 Beta: 0,200

SLV:

Ss: 1,440
 Cc: 1,600
 St: 1,000
 Kh: 0,059
 Kv: 0,030
 Amax: 2,426
 Beta: 0,240

SLC:

Ss: 1,360
 Cc: 1,580
 St: 1,000
 Kh: 0,087
 Kv: 0,043
 Amax: 3,031
 Beta: 0,280

Nello studio geologico del Dott. Veronese è stata effettuata una analisi di Risposta sismica locale i cui principali risultati in termini di spettri risultanti agli stati SLV sono riportati nelle seguenti figure

 Colombi Roversi &Associati Studio di Ingegneria	Comune	FERRARA (FE)	Comm. n°		Revisioni				
	Progetto	ORD.35/2024 - INVESTIMENTO PNRR M2C4 2.1.a FINANZIATO NEXTGENERATION EU MESSA IN SICUREZZA IMPIANTO IDROVORO CITTADINO PER LA LAMINAZIONE DELLE PORTATE DI PIENA DEL RETICOLO IDRAULICO DI BONIFICA ID INTERVENTO ER-UBIS-000109 CUP J78H24000430007	CRA25003		0				
			Doc. n°		ALL. 4				
RELAZIONE GEOTECNICA, SIMICA, VERIFICA OPERE DI FONDAZIONE			Fg.	Di	Compilato		Data		
			28	74	A.C.		APR.2025		

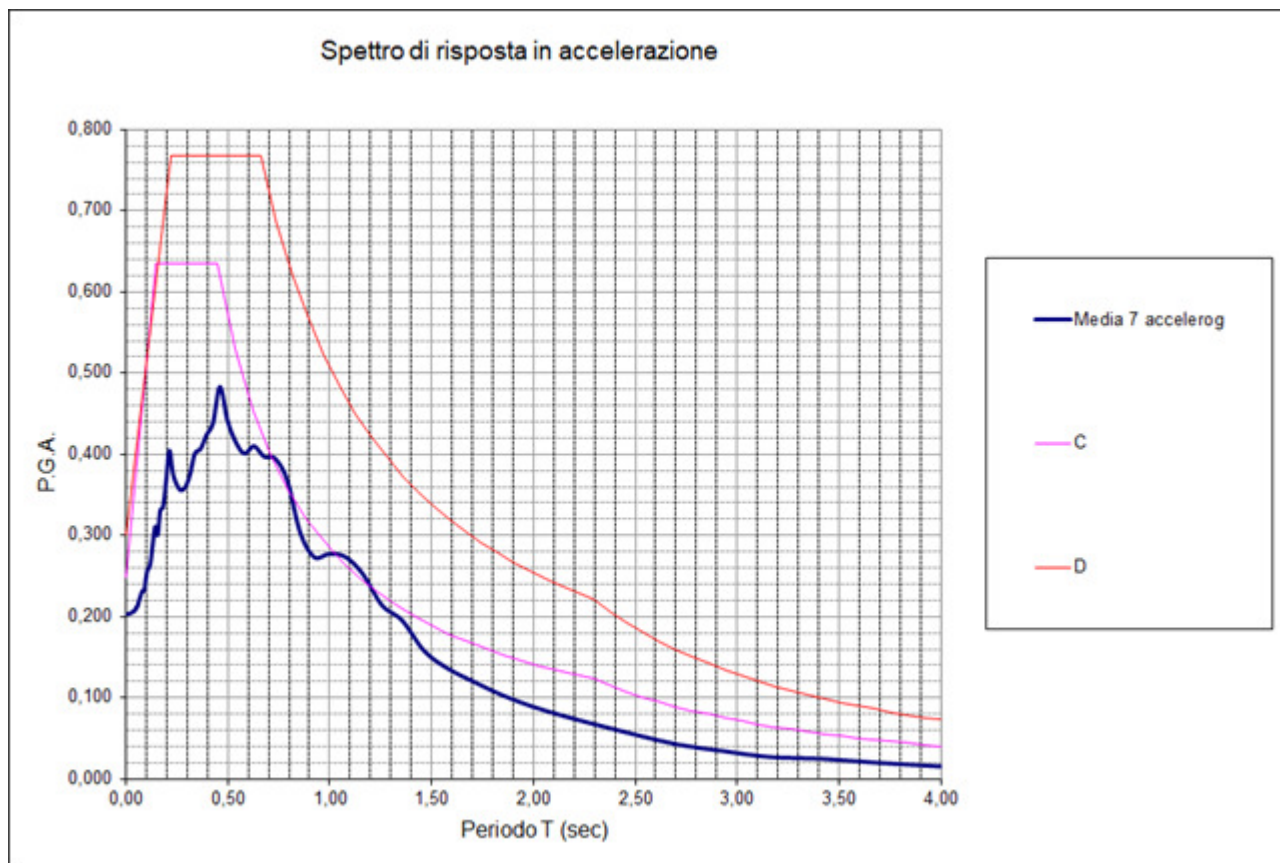


Figura 6.2. Analisi di RSL spettro di risposta stato limite SLV (Da Dott. Veronese)

Si evince che l'adozione di uno spettro da normativa con terreno tipo C risulta una assunzione cautelativa.

 Colombi Roversi & Associati Studio di Ingegneria	Comune	FERRARA (FE)	Comm. n°	Revisioni				
	Progetto	ORD.35/2024 - INVESTIMENTO PNRR M2C4 2.1.a FINANZIATO NEXTGENERATION EU MESSA IN SICUREZZA IMPIANTO IDROVORO CITTADINO PER LA LAMINAZIONE DELLE PORTATE DI PIENA DEL RETICOLO IDRAULICO DI BONIFICA ID INTERVENTO ER-UBIS-000109 CUP J78H24000430007	CRA25003	0				
			Doc. n°	ALL. 4				
RELAZIONE GEOTECNICA, SIMICA, VERIFICA OPERE DI FONDAZIONE			Fg. 29	Di 74	Compilato A.C.	Data APR.2025		

7. VALUTAZIONI EFFETTI SISMICI DI SITO: VERIFICA A LIQUEFAZIONE DEI TERRENI

La verifica della suscettibilità a liquefazione dei terreni è stata condotta con un metodo che utilizza le misure di resistenza alla punta e laterale effettuate dalla prova penetrometrica condotta.

La procedura semplificata, inizialmente proposta da Seed e Idriss (1971) per valutare la resistenza a liquefazione, fondamentalmente implica il calcolo di due parametri: il livello di sollecitazione ciclica del suolo causato dal sisma, espresso come indice di sollecitazione ciclica CSR (Cyclic Stress Ratio) e la resistenza del suolo alla liquefazione espressa come indice di resistenza ciclica CRR (Cyclic Resistance Ratio) (calcolato solo per gli strati aventi indice di classificazione $I_c < 2.6$).

Il rapporto di sforzo ciclico CSR è stato determinato come segue (Seed e Idriss, 1971):

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

Dove:

$a_{\max}$ = accelerazione orizzontale massima in superficie

g = accelerazione di gravità

σ_v = tensione totale alla profondità considerata

σ'_v = tensione efficace alla profondità considerata

r_d = coefficiente di riduzione degli sforzi di taglio con la profondità per tenere conto della deformabilità del terreno calcolato con le espressioni proposte da Youd et Al. (2004).

La verifica a liquefazione è condotta in condizione di free-field ovvero di piano di campagna orizzontale ed in assenza di sforzi di taglio antecedenti il sisma (fattori K_α e K_σ assunti pari ad 1).

La verifica del pericolo di liquefazione è in realtà una verifica di resistenza e come tale richiede il calcolo ed il confronto di due grandezze: la sollecitazione agente indotta dal sisma di progetto e la resistenza limite alla sollecitazione ciclica che il terreno è in grado di opporre. Il fattore di resistenza ciclica CRR è stato determinato con l'espressione ricavata originariamente per un terremoto di riferimento avente magnitudo $M=7.5$. Per terremoti con magnitudo attesa differente occorre correggere il CRR (o analogamente il fattore di sicurezza) con un opportuno

 Colombi Roversi &Associati Studio di Ingegneria	Comune	FERRARA (FE)	Comm. n°		Revisioni				
	Progetto	ORD.35/2024 - INVESTIMENTO PNRR M2C4 2.1.a FINANZIATO NEXTGENERATION EU MESSA IN SICUREZZA IMPIANTO IDROVORO CITTADINO PER LA LAMINAZIONE DELLE PORTATE DI PIENA DEL RETICOLO IDRAULICO DI BONIFICA ID INTERVENTO ER-UBIS-000109 CUP J78H24000430007	CRA25003		0				
			Doc. n°		ALL. 4				
RELAZIONE GEOTECNICA, SIMICA, VERIFICA OPERE DI FONDAZIONE			Fg.	Di	Compilato		Data		
			30	74	A.C.		APR.2025		

fattore di scala MSF (Magnitude Scaling Factor) che è funzione della magnitudo di progetto del terremoto, per il quale, nelle verifiche condotte, è stata adottata l'espressione proposta da Robertson (2009).

Si definisce quindi un fattore di sicurezza nei confronti della liquefazione come segue:

$$F_{SL} = \frac{CRR_{M=7.5}}{CSR} \cdot MSF$$

Con MSF calcolato per i due valori di Magnitudo (MSF=1 per M=7.5) definiti nel precedente.

Si applicherà la procedura di verifica proposta originariamente da Robertson e Wride (1997), nella sua versione recentemente aggiornata (Robertson, 2009).

Per tutte le verticali indagate è stato determinato:

1. Il profilo con la profondità della resistenza a liquefazione espressa in termini di indice di resistenza ciclica (CRR).
2. Il profilo con la profondità del fattore di sicurezza a liquefazione FSL per terremoti con la magnitudo di progetto.

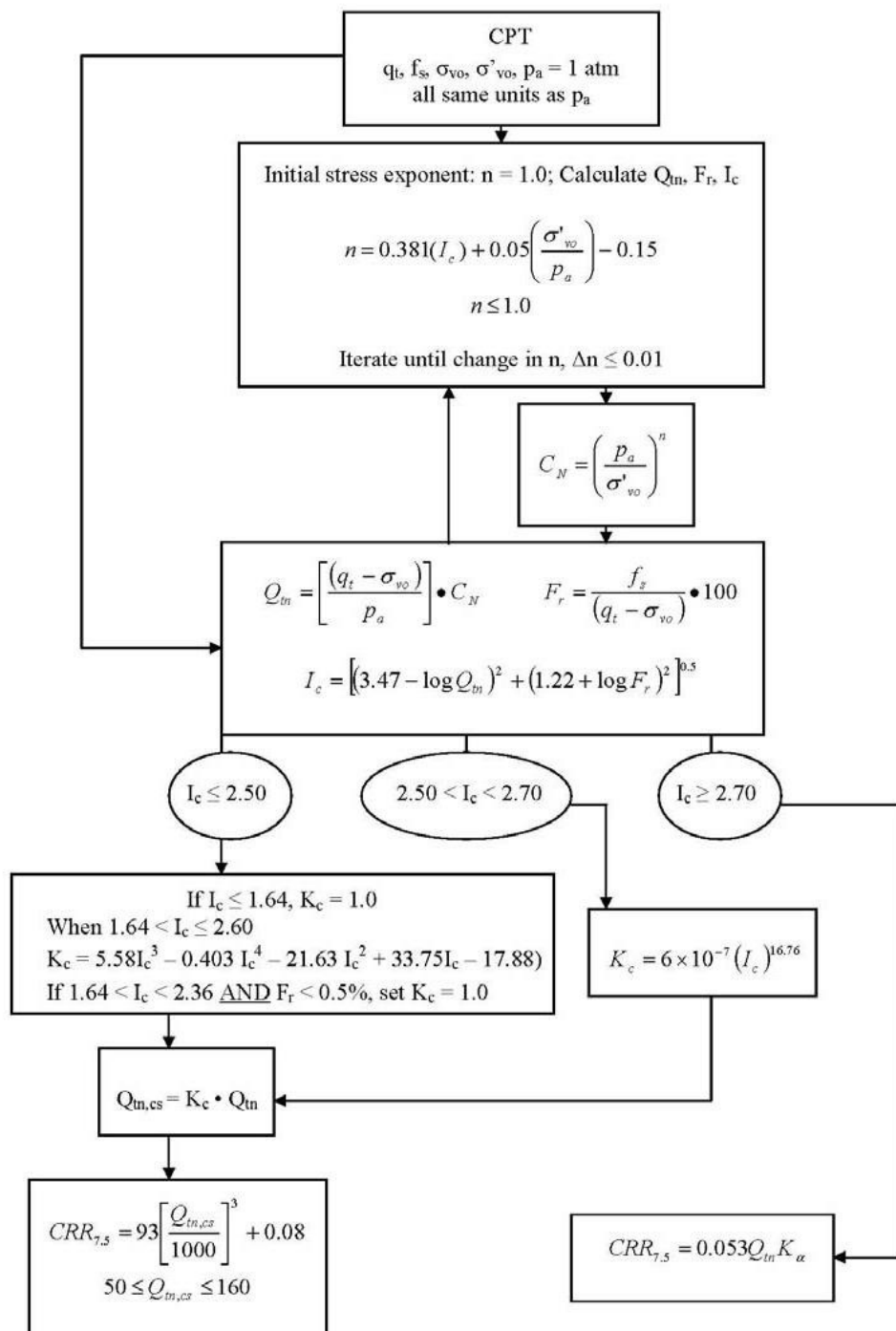
La procedura da applicare viene schematicamente riassunta di seguito:

- Normalizzazione della resistenza alla punta e laterale con lo stato tensionale mediante un metodo iterativo di calcolo.
- Determinazione dell'indice di classificazione del terreno I_c che è funzione delle resistenze normalizzate determinate al passo precedente. Il valore di $I_c = 2.6$ rappresenta, nel metodo proposto da Robertson e Wride (1997), una prima soglia di distinzione tra i terreni considerati non potenzialmente liquefacibili ($I_c > 2.6$) ed i terreni potenzialmente liquefacibili ($I_c < 2.6$).
- Stima del contenuto di fine a partire dal valore di I_c .
- Definizione di una resistenza alla punta normalizzata per tenere in conto del contenuto di fine ($(q_{c1N})_{cs}$) (calcolata solo per terreni aventi $I_c < 2.6$).
- Determinazione con la profondità del rapporto CRR (calcolato solo per terreni aventi $I_c < 2.6$)

 Colombi Roversi & Associati Studio di Ingegneria	Comune	FERRARA (FE)	Comm. n°	Revisioni				
	Progetto	ORD.35/2024 - INVESTIMENTO PNRR M2C4 2.1.a FINANZIATO NEXTGENERATION EU MESSA IN SICUREZZA IMPIANTO IDROVORO CITTADINO PER LA LAMINAZIONE DELLE PORTATE DI PIENA DEL RETICOLO IDRAULICO DI BONIFICA ID INTERVENTO ER-UBIS-000109 CUP J78H24000430007	CRA25003	0				
			Doc. n°	ALL. 4				
RELAZIONE GEOTECNICA, SIMICA, VERIFICA OPERE DI FONDAZIONE			Fg.	Di	Compilato	Data		
			31	74	A.C.	APR.2025		

- Determinazione di un profilo del fattore di sicurezza FSL con la profondità (calcolato solo per terreni aventi $I_c < 2.6$).

Nella figura seguente è mostrata la procedura di calcolo (Robertson 2009).



Valutazione del rapporto di resistenza ciclica CRR (metodo proposto da Robertson, 2009)

 Colombi Roversi &Associati Studio di Ingegneria	Comune	FERRARA (FE)	Comm. n°		Revisioni				
	Progetto	ORD.35/2024 - INVESTIMENTO PNRR M2C4 2.1.a FINANZIATO NEXTGENERATION EU MESSA IN SICUREZZA IMPIANTO IDROVORO CITTADINO PER LA LAMINAZIONE DELLE PORTATE DI PIENA DEL RETICOLO IDRAULICO DI BONIFICA ID INTERVENTO ER-UBIS-000109 CUP J78H24000430007	CRA25003		0				
			Doc. n°		ALL. 4				
RELAZIONE GEOTECNICA, SIMICA, VERIFICA OPERE DI FONDAZIONE			Fg.	Di	Compilato		Data		
			32	74	A.C.		APR.2025		

In letteratura scientifica esistono alcune metodologie semplificate che consentono, anche se con marcate approssimazioni, di valutare il livello di rischio connesso al verificarsi del fenomeno della liquefazione. Il metodo di Iwasaki et al. (1982), introdotto dagli Indirizzi regionali, permette tale stima attraverso l'introduzione dell'indice del potenziale di liquefazione I_L definito dalla seguente relazione:

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

in cui z profondità dal piano campagna in metri;

$$w(z) = 10 - 0.5z,$$

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

$$F(z) = 0 \text{ se } F_L > 1;$$

F_L coefficiente di sicurezza alla liquefazione.

La valutazione viene estesa fino a 20 m di profondità dal piano campagna, soglia al di sotto della quale si possono considerare nulli o trascurabili gli effetti della liquefazione.

Una valutazione del pericolo di liquefazione viene associata ad intervalli di I_L :

Potenziale Liquefazione I_{FL}	Classificazione
$I_{FL} = 0$	<i>Non liquefacibile</i>
$0 < I_{FL} \leq 2$	<i>Basso</i>
$2 < I_{FL} \leq 5$	<i>Moderato</i>
$5 < I_{FL} \leq 15$	<i>Alto</i>
$I_{FL} \geq 15$	<i>Molto Alto</i>

 Colombi Roversi &Associati Studio di Ingegneria	Comune	FERRARA (FE)	Comm. n°		Revisioni			
	Progetto	ORD.35/2024 - INVESTIMENTO PNRR M2C4 2.1.a FINANZIATO NEXTGENERATION EU MESSA IN SICUREZZA IMPIANTO IDROVORO CITTADINO PER LA LAMINAZIONE DELLE PORTATE DI PIENA DEL RETICOLO IDRAULICO DI BONIFICA ID INTERVENTO ER-UBIS-000109 CUP J78H24000430007	CRA25003		0			
			Doc. n°		ALL. 4			
RELAZIONE GEOTECNICA, SIMICA, VERIFICA OPERE DI FONDAZIONE			Fg. 33	Di 74	Compilato A.C.		Data APR.2025	

Risultati elaborazioni prova CPTU1

I risultati delle analisi di suscettibilità a liquefare dei terreni condotte portano ai seguenti potenziali di liquefazione

Prove	Potenziale Liquefazione I _{PL}
CPTU1	0,27
SCPTU1	0,70
SCPTU2	0,71

Indici del potenziale a liquefazione dei terreni (da Relazione Geologica Geol. T. Veronese)

Ovvero il rischio a liquefazione dei terreni è basso.

 Colombi Roversi & Associati Studio di Ingegneria	Comune	FERRARA (FE)	Comm. n°	Revisioni				
	Progetto	ORD.35/2024 - INVESTIMENTO PNRR M2C4 2.1.a FINANZIATO NEXTGENERATION EU MESSA IN SICUREZZA IMPIANTO IDROVORO CITTADINO PER LA LAMINAZIONE DELLE PORTATE DI PIENA DEL RETICOLO IDRAULICO DI BONIFICA ID INTERVENTO ER-UBIS-000109 CUP J78H24000430007	CRA25003	0				
			Doc. n°	ALL. 4				
RELAZIONE GEOTECNICA, SIMICA, VERIFICA OPERE DI FONDAZIONE			Fg. 34	Di 74	Compilato A.C.	Data APR.2025		

8. VALUTAZIONI EFFETTI SISMICI DI SITO: STIMA DEI CEDIMENTI POST-SISMICI DEI TERRENI

Il calcolo dei cedimenti post-sismici è stato effettuato in base al metodo proposto da Robertson (2009). Il metodo consiste nella valutazione dei cedimenti attesi in base a correlazioni con i risultati di prove penetrometriche statiche. Il calcolo è condotto in maniera distinta per terreni granulari e per terreni fini.

Terreni granulari

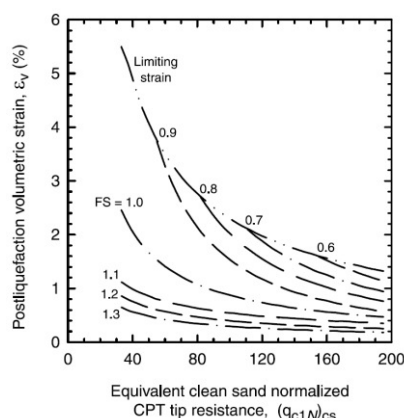
Il calcolo del cedimento post-sismico dei terreni granulari riguarda la valutazione dell'addensamento degli strati liquefacibili compresi nei primi 20m di profondità. I cedimenti sono stati valutati in accordo a Robertson (2009) attraverso la metodologia elaborata da Zhang et Al. (2002). Sulla base della verticale penetrometrica è stato definito il valore alla punta normalizzata $q_{c1N,cs}$, il valore del fattore di sicurezza a liquefazione FS , e attraverso le funzioni riportate da Zhang et Al. (2002) si sono valutate le deformazioni volumetriche post sismiche indotte. Noto lo spessore di partenza dello strato, il cedimento corrispondente è stato ricavato applicando la seguente formula (Robertson, 2009):

$$s = \varepsilon_v \cdot \Delta H$$

Dove:

ε_v : deformazione post sismica indotta

ΔH : spessore iniziale dello strato



Valutazione delle def. post-sismiche indotte negli strati granulari.(metodo proposto da Zhang et Al., 2002)

Terreni fini

 Colombi Roversi &Associati Studio di Ingegneria	Comune	FERRARA (FE)	Comm. n°		Revisioni				
	Progetto	ORD.35/2024 - INVESTIMENTO PNRR M2C4 2.1.a FINANZIATO NEXTGENERATION EU MESSA IN SICUREZZA IMPIANTO IDROVORO CITTADINO PER LA LAMINAZIONE DELLE PORTATE DI PIENA DEL RETICOLO IDRAULICO DI BONIFICA ID INTERVENTO ER-UBIS-000109 CUP J78H24000430007	CRA25003		0				
			Doc. n°		ALL. 4				
RELAZIONE GEOTECNICA, SIMICA, VERIFICA OPERE DI FONDAZIONE			Fg.	Di	Compilato		Data		
			35	74	A.C.		APR.2025		

In base alle indicazioni riportate nelle Linee Guida AGI (2005), il cedimento dei terreni fini è dovuto a fenomeni di riconsolidazione conseguenti alla dissipazione delle pressioni interstiziali accumulate durante il terremoto.

Il metodo proposto da Robertson (2009) prevede la definizione di un Rapporto di Resistenza ciclica ($CRR_{\gamma=3\%}$) che valuta la resistenza dei terreni fini a manifestare deformazioni se soggetti a sollecitazioni sismiche, in base alla seguente espressione:

$$CRR_{M=7.5} = 0.053 \cdot Q_{tn} \cdot K_{\alpha}$$

Con:

Q_{tn} =resistenza alla punta penetrometrica normalizzata e corretta in base alla procedura di Robertson (2009)

K_{α} =fattore che considera l'inclinazione del piano campagna (pari ad 1 per piano di campagna orizzontale)

Si definisce quindi un fattore di sicurezza nei confronti della deformazione post-sismica dei terreni fini come segue:

$$F_{S,\gamma=3\%} = \frac{CRR_{M=7.5}}{CSR} \cdot MSF$$

Con MSF calcolato per i due valori di Magnitudo di progetto ($MSF=1$ per $M=7.5$) in base all'espressione di Boulanger & Idriss (2005) valida per terreni fini e differente dal fattore di scala della magnitudo valevole per i terreni granulari.

il cedimento corrispondente è stato ricavato applicando la seguente formula (Robertson, 2009):

$$s = \varepsilon_{vol} \cdot \Delta H$$

Dove:

ε_v : deformazione post sismica indotta

ΔH : spessore iniziale dello strato

$$\text{se } FS_{\gamma=3\%} > 0.84$$

$$\varepsilon_{vol} = \frac{[0.8 - 2.66 \log(FS_{\gamma=3\%})]}{[0.33 \cdot (10 - 9 \log(0.33 \cdot Q_{tn})) \cdot (Q_{tn})^3]}$$

$$\text{se } FS_{\gamma=3\%} \leq 0.84$$

$$\varepsilon_{vol} = \frac{1}{Q_{tn}^2} \leq 1\%$$

8.1 Risultati elaborazioni prova

 Colombi Roversi &Associati Studio di Ingegneria	Comune	FERRARA (FE)	Comm. n°		Revisioni				
	Progetto	ORD.35/2024 - INVESTIMENTO PNRR M2C4 2.1.a FINANZIATO NEXTGENERATION EU MESSA IN SICUREZZA IMPIANTO IDROVORO CITTADINO PER LA LAMINAZIONE DELLE PORTATE DI PIENA DEL RETICOLO IDRAULICO DI BONIFICA ID INTERVENTO ER-UBIS-000109 CUP J78H24000430007	CRA25003		0				
			Doc. n°		ALL. 4				
RELAZIONE GEOTECNICA, SIMICA, VERIFICA OPERE DI FONDAZIONE			Fg.	Di	Compilato		Data		
			36	74	A.C.		APR.2025		

I risultati delle valutazioni dei cedimenti post sismici portano ai seguenti risultati

Prove	Cedimenti postsismici (cm)
CPTU1	<i>5,94</i>
SCPTU1	<i>10,41</i>
SCPTU2	<i>4,33</i>

Cedimenti post sismici(da Relazione Geologica Geol. T. Veronese)

 Colombi Roversi & Associati Studio di Ingegneria	Comune	FERRARA (FE)	Comm. n°		Revisioni				
	Progetto	ORD.35/2024 - INVESTIMENTO PNRR M2C4 2.1.a FINANZIATO NEXTGENERATION EU MESSA IN SICUREZZA IMPIANTO IDROVORO CITTADINO PER LA LAMINAZIONE DELLE PORTATE DI PIENA DEL RETICOLO IDRAULICO DI BONIFICA ID INTERVENTO ER-UBIS-000109 CUP J78H24000430007	CRA25003		0				
			Doc. n°		ALL. 4				
RELAZIONE GEOTECNICA, SIMICA, VERIFICA OPERE DI FONDAZIONE			Fg.	Di	Compilato		Data		
			37	74	A.C.		APR.2025		

9. VERIFICHE DI STABILITA'

Le verifiche riportate sono inerenti alla stabilità della scarpata di cava per fornire le valutazioni circa la geometria stabile del profilo di scavo previsto.

Per le analisi è stato utilizzato un codice di calcolo numerico all'equilibrio limite in cui il sisma è simulato con un approccio pseudostatico.

Le analisi sono state condotte in condizioni statiche e sismiche; per il calcolo si è adottato l'approccio agli stati limite come richiesto dal D.M. 17.01.2018 attraverso l'utilizzo dei coefficienti parziali di sicurezza applicati alle azioni ed ai parametri di resistenza dei terreni in base all'approccio di progetto 1 con la combinazione 2 (DA1-C2 Paragrafo 6.8 DM 17.01.18) secondo il quale il set di fattori parziali di sicurezza da adottare sono quelli definiti come A2+M2+R2 (Tabelle 6.2.I, 6.2.II, 6.8.I DM 17.01.2018).

In particolare per costruzioni in materiali sciolti il decreto stabilisce di utilizzare un coefficiente parziale di sicurezza sulla resistenza a taglio non drenata pari a $\gamma_{cu}=1.4$, sulla tangente dell'angolo di resistenza al taglio pari a $\gamma_{tanq}=1.25$ e sulla coesione efficace pari a $\gamma_{c'}=1.25$; è richiesto di adottare un fattore unitario sul peso per unità di volume dei terreni ($\gamma_\gamma=1.0$) ed un fattore incrementale delle azioni variabili sfavorevoli pari a $\gamma_Q=1.3$ mentre è richiesto unitario quello da applicare ai carichi permanenti ($\gamma_G=1.0$). Nel caso in esame i carichi derivanti da azioni variabili sono nulli.

Con l'adozione dei fattori parziali di sicurezza il fattore globale, come da D.M. 17.01.2018, deve essere garantito pari a $\gamma_R=1.1$ (Tabella 6.8.I DM 17.01.2018).

Le verifiche sismiche sono state condotte con un approccio pseudostatico; nei metodi pseudo statici l'azione sismica è rappresentata da un'azione statica equivalente, costante nello spazio e nel tempo, proporzionale al peso W del volume di terreno potenzialmente instabile. Tale forza dipende dalle caratteristiche del moto sismico atteso nel volume di terreno potenzialmente instabile e dalla capacità di tale volume di subire spostamenti senza significative riduzioni di resistenza. Nelle verifiche allo stato limite ultimo le componenti orizzontale e verticale di tale forza possono esprimersi come $F_h = k_h \times W$ ed $F_v = k_v \times W$, con k_h e k_v rispettivamente pari ai coefficienti sismici orizzontale e verticale calcolati secondo DM 17.01.2018 (Paragrafi 7.11.3 e 7.11.4) come segue:

 Colombi Roversi &Associati Studio di Ingegneria	Comune	FERRARA (FE)	Comm. n°		Revisioni				
	Progetto	ORD.35/2024 - INVESTIMENTO PNRR M2C4 2.1.a FINANZIATO NEXTGENERATION EU MESSA IN SICUREZZA IMPIANTO IDROVORO CITTADINO PER LA LAMINAZIONE DELLE PORTATE DI PIENA DEL RETICOLO IDRAULICO DI BONIFICA ID INTERVENTO ER-UBIS-000109 CUP J78H24000430007	CRA25003		0				
			Doc. n°		ALL. 4				
RELAZIONE GEOTECNICA, SIMICA, VERIFICA OPERE DI FONDAZIONE			Fg.	Di	Compilato		Data		
			38	74	A.C.		APR.2025		

$$k_h = \beta_s \cdot \frac{a_{max}}{g}$$

$$k_v = \pm 0.5 \cdot k_h$$

dove:

β_s = coefficiente di riduzione dell'accelerazione massima attesa al sito;

a_{max} = accelerazione orizzontale massima attesa al sito;

g = accelerazione di gravità.

I valori di β_s sono riportati nella Tab. 7.11.I (DM 17.01.2018) e sono funzione dell'accelerazione a_g e della categoria di sottosuolo. I parametri sismici per la verifica condotta sono riportati al precedente capitolo 6.

La condizione di stato limite in condizione sismica deve essere valutata con riferimento ai valori caratteristici dei parametri geotecnici (ovvero adottando fattori di sicurezza parziali unitari) e riferita alla superficie di scorrimento critica, caratterizzata dal minore margine di sicurezza. Il fattore di sicurezza globale che deve essere garantito in condizioni sismiche è pari a $\gamma_R=1.2$ ovvero pari a quello indicato nel paragrafo 7.11.4 (DM 17.01.2018).

La direzione del coefficiente sismico orizzontale è stata presa uscente dal pendio (ovvero la situazione maggiormente gravosa ai fini dell'equilibrio) mentre il coefficiente verticale è stato considerato sia diretto verso l'alto ($+k_v$) sia verso il basso ($-k_v$) in quanto non è nota a priori quale delle due situazioni di sollecitazione risulta essere più gravosa ai fini delle verifiche di stabilità.

Natura e proprietà dei terreni impiegati nel calcolo rispecchiano quelle indicate nel capitolo 5.

Le analisi sono state condotte impiegando il metodo di Morgenstern&Price (1965).

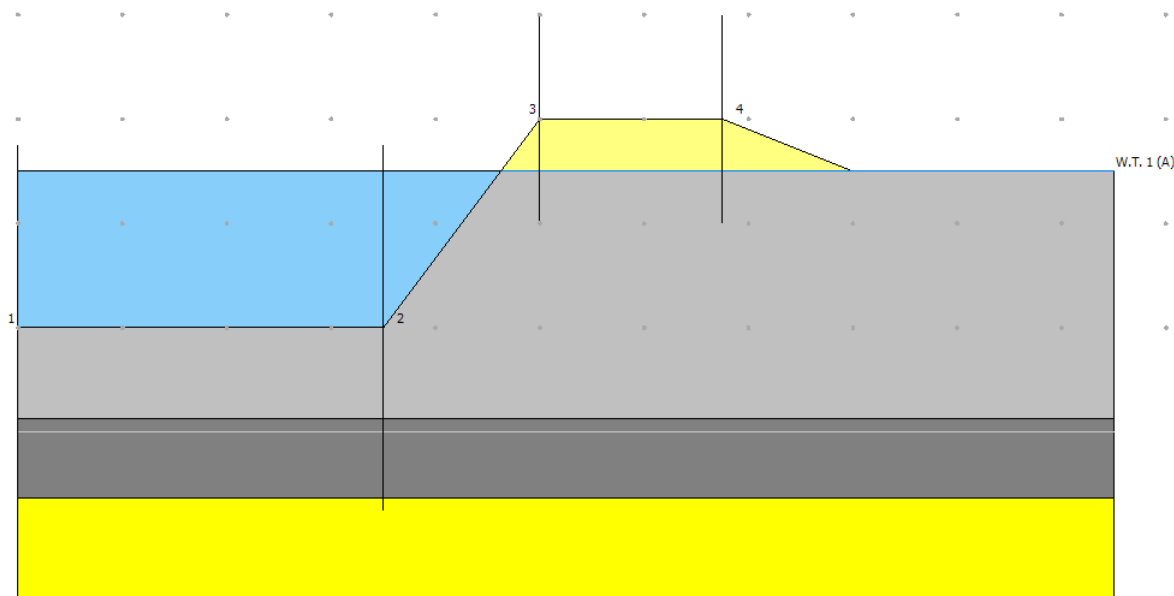
La verifica in condizioni statiche significativa per il problema in esame è stata condotta in condizione drenate stante la natura dei terreni presenti nel volume significativo delle superfici di rottura e data la modalità di realizzazione dell'ampliamento della cava che prevede una escavazione progressiva diluita nel tempo.

Tutti i valori riportati sono poi stati fattorizzati con i fattori parziali di sicurezza previsti dall'approccio di progetto scelto.

Stante la natura delle opere, ovvero manufatti di appoggio di tubazione interrata, si è convenuto di concerto con la stazione appaltante che gli interventi possano essere assimilabili a Interventi privi di rilevanza ai fini sismici (Punto B.8.1 DGR 2272/2016, con similitudine riferita agli interventi A.2.4). Si riportano pertanto le verifiche solo agli SLU

 Colombi Roversi &Associati Studio di Ingegneria	Comune	FERRARA (FE)	Comm. n°	Revisioni				
	Progetto	ORD.35/2024 - INVESTIMENTO PNRR M2C4 2.1.a FINANZIATO NEXTGENERATION EU MESSA IN SICUREZZA IMPIANTO IDROVORO CITTADINO PER LA LAMINAZIONE DELLE PORTATE DI PIENA DEL RETICOLO IDRAULICO DI BONIFICA ID INTERVENTO ER-UBIS-000109 CUP J78H24000430007	CRA25003	0				
			Doc. n°	ALL. 4				
RELAZIONE GEOTECNICA, SIMICA, VERIFICA OPERE DI FONDAZIONE			Fg. 39	Di 74	Compilato A.C.	Data APR.2025		

Nell'immagine seguente è riportato il modello implementato nel codice di calcolo. Il codice impiegato è il programma Slope-Geostru distribuito da EngSoft Srl, dotato della documentazione di validazione secondo quanto prescritto dalle Nuove Norme Tecniche per le Costruzioni (NTC18), al punto 10.2.



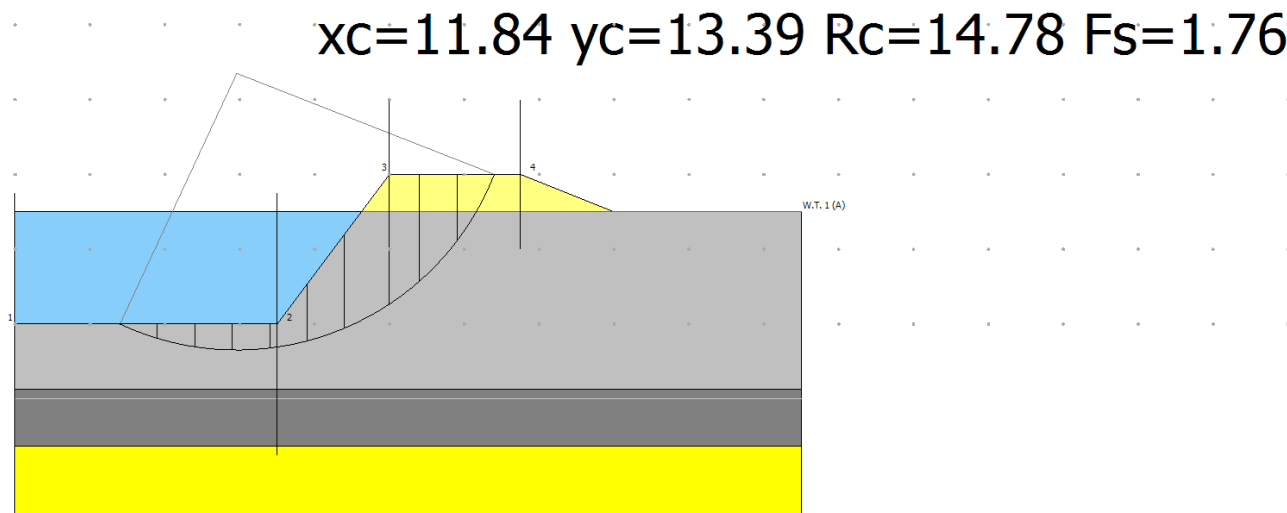
Modello implementato nel programma per le analisi di stabilità

Nelle analisi per i terreni granulari è stato assunto cautelativamente come angolo di resistenza a taglio lungo le superfici di rottura quello in condizioni di stato critico.

Di seguito si riportano gli esiti delle differenti verifiche effettuate: come si può notare dalle seguenti figure, tutte le verifiche risultano soddisfatte.

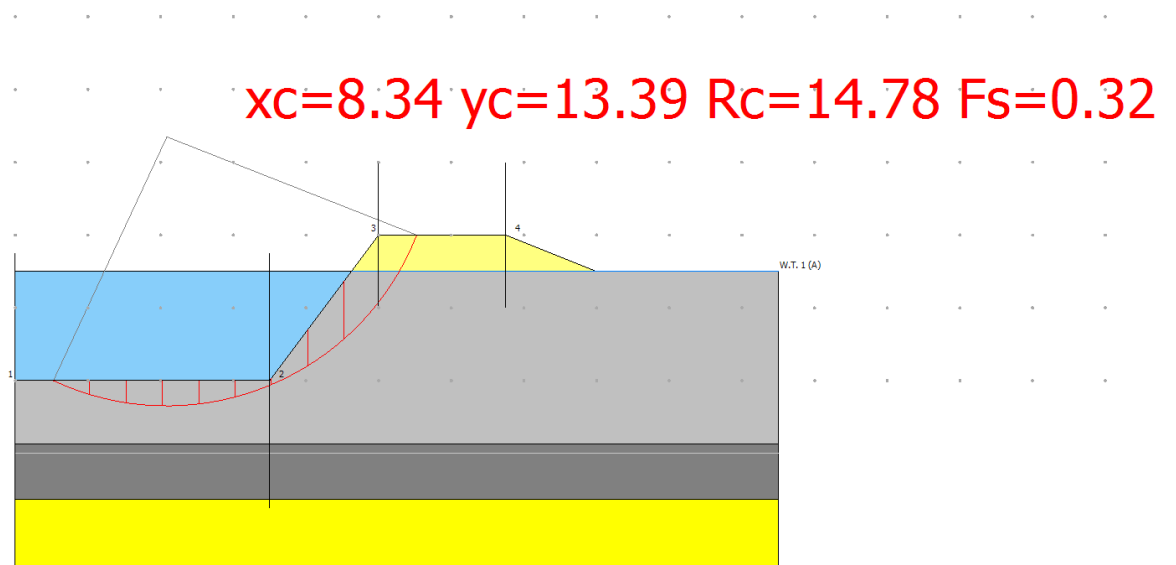
 Colombi Roversi &Associati Studio di Ingegneria	Comune	FERRARA (FE)	Comm. n°		Revisioni			
	Progetto	ORD.35/2024 - INVESTIMENTO PNRR M2C4 2.1.a FINANZIATO NEXTGENERATION EU MESSA IN SICUREZZA IMPIANTO IDROVORO CITTADINO PER LA LAMINAZIONE DELLE PORTATE DI PIENA DEL RETICOLO IDRAULICO DI BONIFICA ID INTERVENTO ER-UBIS-000109 CUP J78H24000430007	CRA25003	0				
			Doc. n° ALL. 4					
RELAZIONE GEOTECNICA, SIMICA, VERIFICA OPERE DI FONDAZIONE			Fg. 40	Di 74	Compilato A.C.		Data APR.2025	

Verifica di stabilità in condizioni drenate (lungo termine)



Complesso delle superfici analizzate (Tot 63) (mostrata la superficie a fattore di sicurezza minimo paria $F_s=1.76>1.1$)

Verifica di stabilità in condizioni non drenate (breve termine)



Complesso delle superfici analizzate (Tot 63) (mostrata la superficie a fattore di sicurezza minimo paria $F_s=0.32<1.1$)

 Colombi Roversi &Associati Studio di Ingegneria	Comune	FERRARA (FE)	Comm. n° CRA25003		Revisioni				
	Progetto	ORD.35/2024 - INVESTIMENTO PNRR M2C4 2.1.a FINANZIATO NEXTGENERATION EU MESSA IN SICUREZZA IMPIANTO IDROVORO CITTADINO PER LA LAMINAZIONE DELLE PORTATE DI PIENA DEL RETICOLO IDRAULICO DI BONIFICA ID INTERVENTO ER-UBIS-000109 CUP J78H24000430007	Doc. n°		0				
			ALL. 4						
RELAZIONE GEOTECNICA, SIMICA, VERIFICA OPERE DI FONDAZIONE			Fg. 41	Di 74	Compilato A.C.		Data APR.2025		

In condizioni non drenate (breve termine) si possono formare instabilità di sponda che potrebbero essere state all'origine dei movimenti delle selle di appoggio delle tubazioni lato canale.

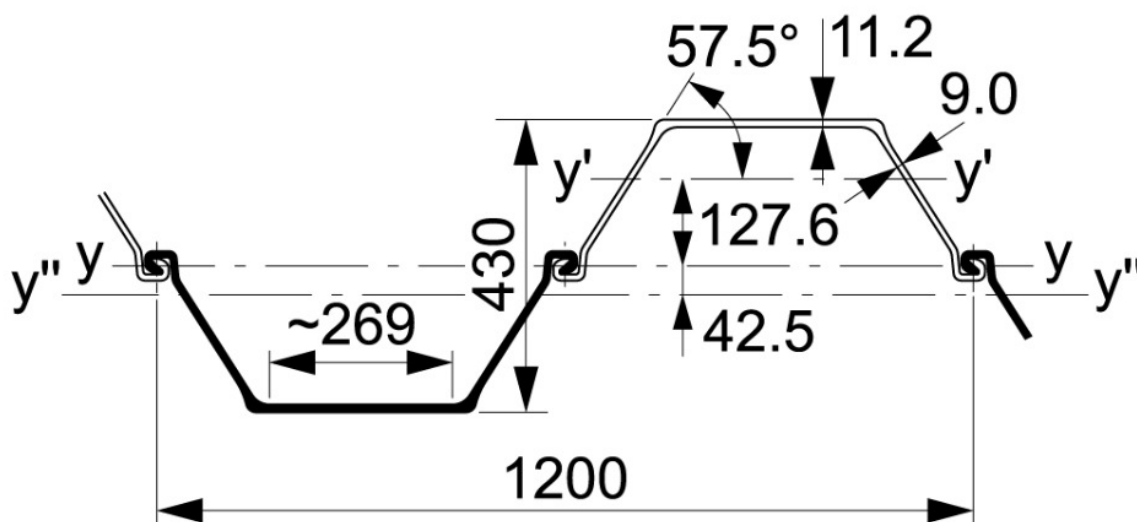
Si procede pertanto al dimensionamento del palancolato di sostegno.

Dai risultati del calcolo, illustrati nel seguito e riportati in dettaglio negli allegati è risultata idonea una palancola tipo **Arcelor Mittal PU 18** avente le seguenti caratteristiche:

- Peso $p=128.2 \text{ kg/m}^2$
- Area $A=163.3 \text{ cm}^2/\text{m}$
- Momento d'inerzia: $J=38650 \text{ cm}^4/\text{m}$
- Modulo di resistenza: $W=1800 \text{ cm}^3/\text{m}$

I risultati che sono riportati nel seguito mostra che la lunghezza complessiva della palancola derivante dal calcolo è pari a 12 m complessivi.

 Colombi Roversi & Associati Studio di Ingegneria	Comune	FERRARA (FE)	Comm. n°	Revisioni				
	Progetto	ORD.35/2024 - INVESTIMENTO PNRR M2C4 2.1.a FINANZIATO NEXTGENERATION EU MESSA IN SICUREZZA IMPIANTO IDROVORO CITTADINO PER LA LAMINAZIONE DELLE PORTATE DI PIENA DEL RETICOLO IDRAULICO DI BONIFICA ID INTERVENTO ER-UBIS-000109 CUP J78H24000430007	CRA25003	0				
			Doc. n°	ALL. 4				
RELAZIONE GEOTECNICA, SIMICA, VERIFICA OPERE DI FONDAZIONE			Fg. 42	Di 74	Compilato A.C.	Data APR.2025		



	Sectional area (cm ²)	Mass per m (kg/m)	Moment of inertia (cm ⁴)	Elastic section modulus (cm ³)	Radius of gyration (cm)	Coating area* (m ² /m)
Per S	98.0	76.9	7220	484	8.58	0.87
Per D	196.0	153.8	46380	2160	15.38	1.72
Per T	294.0	230.7	64240	2495	14.78	2.58
Per m of wall	163.3	128.2	38650	1800	15.38	1.43

- Acciaio per palancole laminate a caldo S270GP (UNI EN 10248-1)

Grado dell'acciaio	EN 10248		
	Limite di snervamento	Carico limite di rottura a trazione	Allungamento minimo
	R _{eH}	R _m	L ₀ =5,65√S ₀
	MPa	MPa	%
S 270 GP	270	410	24

Per le palancole la normativa di riferimento come indicato al §11.3.4.1 delle NTC2018 è la UNI EN 10248-1. I prodotti piani realizzati ai sensi della norma UNI EN 10248-1, che non ha lo status di norma armonizzata, non richiedono la marcatura CE; la loro commercializzazione per uso strutturale è consentita però solo con il benestare del CSLP Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici mediante il rilascio del relativo Attestato di Qualificazione.

 Colombi Roversi & Associati Studio di Ingegneria	Comune	FERRARA (FE)	Comm. n°		Revisioni				
	Progetto	ORD.35/2024 - INVESTIMENTO PNRR M2C4 2.1.a FINANZIATO NEXTGENERATION EU MESSA IN SICUREZZA IMPIANTO IDROVORO CITTADINO PER LA LAMINAZIONE DELLE PORTATE DI PIENA DEL RETICOLO IDRAULICO DI BONIFICA ID INTERVENTO ER-UBIS-000109 CUP J78H24000430007		CRA25003		0			
			Doc. n°		ALL. 4				
RELAZIONE GEOTECNICA, SIMICA, VERIFICA OPERE DI FONDAZIONE			Fg.	Di	Compilato	Data			
			43	74	A.C.	APR.2025			

Pertanto, per le palancole laminate a caldo prodotte secondo EN 10248, essendo norma europea non armonizzata, l'utilizzo e l'accettazione ad uso strutturale è possibile in Italia solo previa marcatura CE volontaria effettuata dal produttore sulla base di una valutazione tecnica europea (ETA), oppure attraverso una qualificazione nazionale conforme alle NTC, ovvero il produttore deve essere in possesso di specifico Attestato di Qualificazione rilasciato dal Servizio Tecnico Centrale del CSLP.

Risultati del calcolo: fondamenti teorici

Introduzione.

Le paratie sono opere di ingegneria civile che trovano molta applicazione in problemi legati alla stabilizzazione di versanti o al sostegno di rilevati di terreno. Tuttavia è anche facile sentire parlare di paratie che sono utilizzate per l'ormeggio di grandi imbarcazioni, o per puntellare pareti di trincee e altri scavi o per realizzare cassoni a tenuta stagna per lavori subacquei. Come si può quindi intuire grande importanza deve essere data alla progettazione di una simile opera, soprattutto per quanto riguarda il progetto strutturale e geotecnico. Per quanto riguarda l'aspetto del calcolo vale la pena sottolineare che non esistono, ad oggi, metodi esatti, e questo è anche dovuto alla complessa interazione tra la profondità di scavo, la rigidità del materiale costituente la paratia e la resistenza dovuta alla pressione passiva. In ogni caso, i metodi correntemente utilizzati possono essere classificati in due categorie:

1. Metodi che si basano su una discretizzazione del modello di paratia (si parla di differenze finite o di elementi finiti);
2. Metodi che si basano su congetture di tipo semplicistico, al fine di poter affrontare il problema con il semplice studio dell'equilibrio di un corpo rigido.

Tra le due classi di metodi esposti all'elenco precedente, quello degli elementi finiti è quello che più di tutti risulta razionale, in quanto basato su considerazioni che coinvolgono sia la statica del problema (equilibrio) sia la cinematica (congruenza).

Tipi di paratie.

I tipi di paratie maggiormente utilizzate allo stato attuale possono essere classificati come segue:

- a) Paratie in calcestruzzo armato, costruite per mezzo di pali o per mezzo di setti (entrambi armati);
- b) Paratie di legno;
- c) Paratie in acciaio.

Analisi della paratia.

Alcune considerazioni preliminari.

Gli elementi che concorrono al calcolo di una paratia sono vari. Si coinvolgono infatti concetti legati alla flessibilità dei pali, al calcolo della spinta del terrapieno, alla rigidità del terreno ecc.

Si vede che le pressioni laterali che sono chiamate a concorrere nell'equilibrio sono la pressione attiva sviluppata a tergo della paratia e la pressione passiva che si sviluppa nella parte anteriore della paratia (Parte di valle della paratia). Il calcolo, sia nell'ambito dei metodi semplificati che nell'ambito di metodi numerici, della spinta a tergo ed a valle della paratia viene solitamente condotto sia con il metodo di Rankine che con il metodo di Coulomb. Si rileva però che il metodo di Coulomb fornisce risultati più accurati in quanto essendo la paratia un'opera solitamente flessibile, e manifestando quindi spostamenti maggiori si generano fenomeni di attrito all'interfaccia paratia-terreno che possono essere tenuti in conto solo attraverso i coefficienti di spinta di Coulomb. Nell'utilizzo del metodo degli elementi finiti si deve calcolare anche un coefficiente di reazione

 Colombi Roversi & Associati Studio di Ingegneria	Comune	FERRARA (FE)	Comm. n°	Revisioni				
	Progetto	ORD.35/2024 - INVESTIMENTO PNRR M2C4 2.1.a FINANZIATO NEXTGENERATION EU MESSA IN SICUREZZA IMPIANTO IDROVORO CITTADINO PER LA LAMINAZIONE DELLE PORTATE DI PIENA DEL RETICOLO IDRAULICO DI BONIFICA ID INTERVENTO ER-UBIS-000109 CUP J78H24000430007	CRA25003	0				
			Doc. n°	ALL. 4				
RELAZIONE GEOTECNICA, SIMICA, VERIFICA OPERE DI FONDAZIONE			Fg. 44	Di 74	Compilato A.C.	Data APR.2025		

del terreno k_s , oltre che la spinta attiva e passiva del terreno. Se si parla di analisi in condizioni non drenate è inoltre necessario conoscere il valore della coesione non drenata. E' inoltre opportuno considerare che se si vuole tenere debitamente in conto l'attrito tra terreno e opera si deve essere a conoscenza dell'angolo di attrito tra terreno e opera (appunto). In conclusione i parametri (in termini di proprietà del terreno) di cui si deve disporre per effettuare l'analisi sono i seguenti:

- Angolo di attrito interno del terreno;
- Coesione del terreno;
- Peso dell'unità di volume del terreno;
- Angolo di attrito tra il terreno ed il materiale che costituisce l'opera.

Calcolo delle spinte.

Come accennato in uno dei paragrafi precedenti, deve in ogni caso essere effettuato il calcolo della spinta attiva e passiva. Si espone quindi in questa sezione il calcolo delle spinte con il metodo di Coulomb.

Calcolo della spinta attiva.

La spinta attiva può essere calcolata con il metodo di Coulomb o alternativamente utilizzando la Teoria di Caquot.

Metodo di Coulomb.

Il metodo di Coulomb è capace di tenere in conto le variabili più significative, soprattutto con riguardo al fenomeno attritivo che si genera all'interfaccia paratia-terreno. Per terreno omogeneo ed asciutto il diagramma delle pressioni si presenta lineare con distribuzione (valutata alla profondità z):

$$\sigma_h(z) = k_a \cdot \gamma_t \cdot z$$

La spinta totale, che è l'integrale della relazione precedente su tutta l'altezza, è applicata ad $1/3$ di H e si calcola con la seguente espressione:

$$S_t(z) = \frac{1}{2} k_a \cdot \gamma_t \cdot H^2$$

Avendo indicato con k_a il valore del coefficiente di pressione attiva, determinabile con la seguente relazione:

$$\left\{ \begin{array}{l} k_a = \frac{\sin^2(\phi + \beta)}{\sin^2 \beta \cdot \sin(\beta - \delta) \cdot \left[1 + \sqrt{\frac{\sin(\phi + \delta) \cdot \sin(\phi - \varepsilon)}{\sin(\beta - \delta) \cdot \sin(\beta + \varepsilon)}} \right]^2} \\ \text{con } \delta < (\beta - \phi - \varepsilon) \text{ secondo Muller - Breslau} \end{array} \right.$$

γ_t = Peso unità di volume del terreno;

β = Inclinazione della parete interna rispetto al piano orizzontale passante per il piede;

ϕ = Angolo di resistenza al taglio del terreno;

δ = Angolo di attrito terreno-paratia positivo se antiorario;

ε = Inclinazione del piano campagna rispetto al piano orizzontale positiva se antioraria;

 Colombi Roversi & Associati Studio di Ingegneria	Comune	FERRARA (FE)	Comm. n°		Revisioni				
	Progetto	ORD.35/2024 - INVESTIMENTO PNRR M2C4 2.1.a FINANZIATO NEXTGENERATION EU MESSA IN SICUREZZA IMPIANTO IDROVORO CITTADINO PER LA LAMINAZIONE DELLE PORTATE DI PIENA DEL RETICOLO IDRAULICO DI BONIFICA ID INTERVENTO ER-UBIS-000109 CUP J78H24000430007		CRA25003		0			
			Doc. n°		ALL. 4				
RELAZIONE GEOTECNICA, SIMICA, VERIFICA OPERE DI FONDAZIONE			Fg.	Di	Compilato	Data			
			45	74	A.C.	APR.2025			

Metodo di Caquot.

Il metodo di Coulomb risulta essere un metodo sufficientemente accurato per la valutazione dei coefficienti di pressione allo stato limite. Tuttavia soffre dell'ipotesi riguardante la planarità della superficie di scorrimento. Tale ipotesi è rimossa applicando la teoria di Caquot la quale si basa sull'utilizzo di una superficie di scorrimento a forma di spirale logaritmica. Secondo questa teoria il coefficiente di pressione attiva si determina utilizzando la seguente formula:

$$K_a = \rho \cdot K_a^{\text{Coulomb}}$$

Dove i simboli hanno il seguente significato:

- K_a^{Coulomb} è il coefficiente di pressione attiva calcolato con la teoria di Coulomb;
- ρ è un coefficiente moltiplicativo calcolato con la seguente formula:

$$\rho = \left[(1 - 0.9 \cdot \lambda^2 - 0.1 \cdot \lambda) \cdot (1 - 0.3 \cdot \lambda^3) \right]^{-n}$$

Dove i simboli sono calcolati con le seguenti formule:

$$\lambda = \frac{\Delta + \beta - \Gamma}{4 \cdot \varphi - 2 \cdot \pi \cdot (\Delta + \beta - \Gamma)}$$

$$\Delta = 2 \cdot \tan^{-1} \left(\frac{|\cot(\delta)| - \sqrt{\cot^2(\delta) - \cot^2(\varphi)}}{1 + \operatorname{cosec}(\varphi)} \right)$$

$$\Gamma = \sin^{-1} \left(\frac{\sin(\beta)}{\sin(\varphi)} \right)$$

Dove i simboli hanno il seguente significato (vedere anche figura seguente):

- β è l'inclinazione del profilo di monte misurata rispetto all'orizzontale;
- φ è l'angolo di attrito interno del terreno spingente;
- δ è l'angolo di attrito all'interfaccia opera-terreno;

Carico uniforme sul terrapieno

Un carico Q , uniformemente distribuito sul piano campagna induce delle pressioni costanti pari:

$$\sigma_q(z) = k_a \cdot Q \cdot \frac{\sin(\beta)}{\sin(\beta + \varepsilon)}$$

Integrando la tensione riportata alla formula precedente si ottiene la spinta totale dovuta al sovraccarico:

$$S_q = k_a \cdot Q \cdot \frac{\sin(\beta)}{\sin(\beta + \varepsilon)} \cdot H$$

Con punto di applicazione ad $H/2$ (essendo la distribuzione delle tensioni costante). Nelle precedenti formule i simboli hanno il seguente significato:

β = Inclinazione della parete interna rispetto al piano orizzontale passante per il piede

ε = Inclinazione del piano campagna rispetto al piano orizzontale positiva se antioraria

k_a = Coefficiente di pressione attiva calcolato al paragrafo precedente

 Colombi Roversi &Associati Studio di Ingegneria	Comune	FERRARA (FE)	Comm. n°		Revisioni				
	Progetto	ORD.35/2024 - INVESTIMENTO PNRR M2C4 2.1.a FINANZIATO NEXTGENERATION EU MESSA IN SICUREZZA IMPIANTO IDROVORO CITTADINO PER LA LAMINAZIONE DELLE PORTATE DI PIENA DEL RETICOLO IDRAULICO DI BONIFICA ID INTERVENTO ER-UBIS-000109 CUP J78H24000430007	CRA25003		0				
			Doc. n°		ALL. 4				
RELAZIONE GEOTECNICA, SIMICA, VERIFICA OPERE DI FONDAZIONE			Fg.	Di	Compilato		Data		
			46	74	A.C.		APR.2025		

Striscia di carico su pc inclinato

Il carico agente viene decomposto in un carico ortogonale ed in uno tangenziale al terrapieno, le pressioni indotte sulla parete saranno calcolate come illustrato nei due paragrafi che seguono.

Striscia di carico ortogonale al piano di azione

Un carico ripartito in modo parziale di ascissa iniziale x1 ed ascissa finale x2 genera un diagramma di pressioni sulla parete i cui valori sono stati determinati secondo la formulazione di Terzaghi, che esprime la pressione alla generica profondità z come segue:

$$\sigma_q(z) = \frac{Q}{2\pi \times (2\Delta\theta + A)}$$

$$\tau_{xz} = -\frac{Q}{2\pi B}$$

Con:

$$\Delta\theta = \theta_1 - \theta_2;$$

$$A = \sin(2\theta_1) - \sin(2\theta_2)$$

$$B = \cos(2\theta_1) - \cos(2\theta_2)$$

$$\theta_1 = \arctg(z/x_1)$$

$$\theta_2 = \arctg(z/x_2)$$

Per integrazione si otterrà la risultante ed il relativo braccio.

Striscia di carico tangenziale al p.c.

$$\sigma_x = \frac{t}{2\pi \times (D - 2E)}$$

T= Intensità del carico [F/L²]

$$D = 4 \cdot \log[\sin\theta_1 / \sin\theta_2]$$

$$E = \sin^2\theta_1 - \sin^2\theta_2$$

Linee di carico sul terrapieno

Le linee di carico generano un incremento di pressioni sulla parete che secondo BOUSSINESQ, alla profondità z, possono essere espresse come segue:

$$\sigma_x(x, z) = \frac{2V}{\pi \cdot x^2 \cdot z \cdot (x^2 + z^2)^2}$$

$$\tau_{xz}(x, z) = \frac{2V}{\pi \cdot x \cdot z^2 \cdot (x^2 + z^2)^2}$$

Dove i simboli hanno il seguente significato:

 Colombi Roversi &Associati Studio di Ingegneria	Comune	FERRARA (FE)	Comm. n°		Revisioni				
	Progetto	ORD.35/2024 - INVESTIMENTO PNRR M2C4 2.1.a FINANZIATO NEXTGENERATION EU MESSA IN SICUREZZA IMPIANTO IDROVORO CITTADINO PER LA LAMINAZIONE DELLE PORTATE DI PIENA DEL RETICOLO IDRAULICO DI BONIFICA ID INTERVENTO ER-UBIS-000109 CUP J78H24000430007	CRA25003		0				
			Doc. n°		ALL. 4				
RELAZIONE GEOTECNICA, SIMICA, VERIFICA OPERE DI FONDAZIONE			Fg.	Di	Compilato		Data		
			47	74	A.C.		APR.2025		

V = Intensità del carico espressa in [F/L];

X = Distanza, in proiezione orizzontale, del punto di applicazione del carico dalla parete;

Se il piano di azione è inclinato di ε viene ruotato il sistema di riferimento xz in XZ , attraverso la seguente trasformazione:

$$\begin{cases} X = x \cdot \cos(\varepsilon) - z \cdot \sin(\varepsilon) \\ Z = z \cdot \cos(\varepsilon) + x \cdot \sin(\varepsilon) \end{cases}$$

Spinta in presenza di falda acquifera

La falda con superficie distante H_w dalla base della struttura, induce delle pressioni idrostatiche normali alla parete che, alla profondità z sono espresse come segue:

$$u(z) = \gamma_w \cdot z$$

La spinta idrostatica totale si ottiene per integrazione su tutta l'altezza della relazione precedente:

$$S_w = \frac{1}{2} \gamma_w \cdot H^2$$

Avendo indicato con H l'altezza totale di spinta e con γ_w il peso dell'unità di volume dell'acqua. La spinta del terreno immerso si ottiene sostituendo γ_t con γ'_t ($\gamma'_t = \gamma_{\text{saturo}} - \gamma_w$), peso specifico del materiale immerso in acqua. In condizioni sismiche la sovraspinta esercitata dall'acqua viene valutata nel seguente modo:

$$\Delta S_w = \frac{7}{12} \gamma_w \cdot H_w^2 \cdot C$$

applicata a 2/3 dell'altezza della falda H_w [Matsuo O'Hara (1960) *Geotecnica*, R. Lancellotta]

Effetto dovuto alla presenza di coesione

La coesione induce delle pressioni negative costanti pari a:

$$P_c = -\frac{2 \cdot c}{\sqrt{k_a}}$$

Non essendo possibile stabilire a priori quale sia il decremento indotto della spinta per effetto della coesione. E' stata calcolata l'altezza critica Z_c come segue:

$$Z_c = \frac{2c}{\gamma_t \cdot \sqrt{k_a}} - \left\{ \frac{\left[Q \cdot \frac{\sin \beta}{\sin(\beta + \varepsilon)} \right]}{\gamma_t} \right\}$$

Dove i simboli hanno il seguente significato

Q = Carico agente sul terrapieno eventualmente presente.

γ_t = Peso unità di volume del terreno

β = Inclinazione della parete interna rispetto al piano orizzontale passante per il piede

ε = Inclinazione del piano campagna rispetto al piano orizzontale positiva se antioraria

 Colombi Roversi &Associati Studio di Ingegneria	Comune	FERRARA (FE)	Comm. n°		Revisioni				
	Progetto	ORD.35/2024 - INVESTIMENTO PNRR M2C4 2.1.a FINANZIATO NEXTGENERATION EU MESSA IN SICUREZZA IMPIANTO IDROVORO CITTADINO PER LA LAMINAZIONE DELLE PORTATE DI PIENA DEL RETICOLO IDRAULICO DI BONIFICA ID INTERVENTO ER-UBIS-000109 CUP J78H24000430007	CRA25003		0				
			Doc. n°		ALL. 4				
RELAZIONE GEOTECNICA, SIMICA, VERIFICA OPERE DI FONDAZIONE			Fg.	Di	Compilato		Data		
			48	74	A.C.		APR.2025		

C= Coesione del materiale

k_a = Coefficiente di pressione attiva, come calcolato ai passi precedenti

Nel caso in cui si verifichi la circostanza che la Z_c , calcolata con la formula precedente, sia minore di zero è possibile sovrapporre direttamente gli effetti dei diagrammi, imponendo un decremento al diagramma di spinta originario valutato come segue:

$$S_c = P_c \cdot H$$

Dove si è indicata con il simbolo H l'altezza totale di spinta.

Sisma

Spinta attiva in condizioni sismiche

In presenza di sisma la forza di calcolo esercitata dal terrapieno sulla parete è data da:

$$E_d = \frac{1}{2} \gamma \cdot (1 \pm k_v) K H^2 + E_{ws} + E_{wd}$$

Dove i simboli hanno il seguente significato:

H= altezza di scavo

k_v = coefficiente sismico verticale

γ = peso per unità di volume del terreno

K= coefficienti di spinta attiva totale (statico + dinamico) (vedi Mononobe & Okabe)

E_{ws} = spinta idrostatica dell'acqua

E_{wd} = spinta idrodinamica.

Per terreni impermeabili la spinta idrodinamica $E_{wd} = 0$, ma viene effettuata una correzione sulla valutazione dell'angolo β della formula di Mononobe & Okabe così come di seguito:

$$\tan \theta = \frac{\gamma_{sat}}{\gamma_{sat} - \gamma_w} \frac{k_h}{1 \mp k_v}$$

Nei terreni ad elevata permeabilità in condizioni dinamiche continua a valere la correzione di cui sopra, ma la spinta idrodinamica assume la seguente espressione:

$$E_{wd} = \frac{7}{12} k_h \gamma_w H^2$$

Con H' altezza del livello di falda (riportata nella sezione relativa al calcolo della spinta idrostatica).

Resistenza passiva

Anche per il calcolo della resistenza passiva si possono utilizzare i due metodi usati nel calcolo della pressione allo stato limite attivo (metodo di Coulomb e metodo di Caquot).

Metodo di Coulomb

Per terreno omogeneo il diagramma delle pressioni in condizioni di stato limite passivo risulta lineare con legge del tipo del tipo:

$$\sigma_p(z) = k_p \cdot \gamma_t \cdot z$$

 Colombi Roversi &Associati Studio di Ingegneria	Comune	FERRARA (FE)	Comm. n°		Revisioni				
	Progetto	ORD.35/2024 - INVESTIMENTO PNRR M2C4 2.1.a FINANZIATO NEXTGENERATION EU MESSA IN SICUREZZA IMPIANTO IDROVORO CITTADINO PER LA LAMINAZIONE DELLE PORTATE DI PIENA DEL RETICOLO IDRAULICO DI BONIFICA ID INTERVENTO ER-UBIS-000109 CUP J78H24000430007	CRA25003		0				
			Doc. n°		ALL. 4				
RELAZIONE GEOTECNICA, SIMICA, VERIFICA OPERE DI FONDAZIONE			Fg.	Di	Compilato		Data		
			49	74	A.C.		APR.2025		

Ancora una volta integrando la precedente relazione sull'altezza di spinta (che per le paratie deve essere valutata attentamente) si ottiene la spinta passiva totale:

$$S_t = \frac{1}{2} k_p \cdot \gamma_t \cdot H^2$$

Avendo indicato al solito con H l'altezza di spinta, γ_t il peso dell'unità di volume di terreno e con k_p il coefficiente di pressione passiva (in condizioni di stato limite passivo). Il valore di questo coefficiente è determinato con la seguente formula:

$$k_p = \frac{\sin^2(\beta - \phi)}{\sin^2 \beta \cdot \sin(\beta + \delta) \cdot \left[1 - \sqrt{\frac{\sin(\phi + \delta) \cdot \sin(\phi + \varepsilon)}{\sin(\beta + \delta) \cdot \sin(\beta + \varepsilon)}} \right]^2}$$

con $\delta < \beta - \phi - \varepsilon$ secondo Muller - Breslau

con valori limite pari a: $\delta < \beta - \phi - \varepsilon$ (Muller-Breslau).

Metodo di Caquot

Il metodo di Caquot differisce dal metodo di Coulomb per il calcolo del coefficiente di pressione allo stato limite passivo. Il coefficiente di pressione passiva viene calcolato, con questo metodo, interpolando i valori della seguente tabella:

Coefficient of passive earth pressure K_p for $\delta = -\phi$											
α [°]	ϕ [°]	K_p when β°									
		0	5	10	15	20	25	30	35	40	45
	10	1,17	1,41	1,53							
	15	1,30	1,70	1,92	2,08						
	20	1,71	2,08	2,42	2,71	2,92					
	25	2,14	2,81	2,98	3,88	4,22	4,43				
-30	30	2,78	3,42	4,18	5,01	5,98	8,94	7,40			
	35	3,75	4,73	5,87	7,21	8,78	10,80	12,50	13,80		
	40	5,31	8,87	8,77	11,00	13,70	17,20	24,80	25,40	28,40	
	45	8,05	10,70	14,20	18,40	23,80	90,60	38,90	49,10	60,70	69,10
	10	1,36	1,58	1,70							
	15	1,68	1,97	2,20	2,38						
	20	2,13	2,52	2,92	3,22	3,51					
	25	2,78	3,34	3,99	4,80	5,29	5,57				
-20	30	3,78	4,81	8,58	8,81	7,84	9,12	9,77			
	35	5,38	8,89	8,28	10,10	12,20	14,80	17,40	19,00		
	40	8,07	10,40	12,00	18,50	20,00	25,50	38,50	37,80	42,20	
	45	13,2	17,50	22,90	29,80	38,30	48,90	82,30	78,80	97,30	111,04
	10	1,52	1,72	1,83							
	15	1,95	2,23	2,57	2,88						
	20	2,57	2,98	3,42	3,75	4,09					
	25	3,50	4,14	4,90	5,82	8,45	8,81				

 Colombi Roversi &Associati Studio di Ingegneria	Comune	FERRARA (FE)	Comm. n°		Revisioni			
	Progetto	ORD.35/2024 - INVESTIMENTO PNRR M2C4 2.1.a FINANZIATO NEXTGENERATION EU MESSA IN SICUREZZA IMPIANTO IDROVORO CITTADINO PER LA LAMINAZIONE DELLE PORTATE DI PIENA DEL RETICOLO IDRAULICO DI BONIFICA ID INTERVENTO ER-UBIS-000109 CUP J78H24000430007	CRA25003	0				
			Doc. n°		ALL. 4			
RELAZIONE GEOTECNICA, SIMICA, VERIFICA OPERE DI FONDAZIONE			Fg. 50	Di 74	Compilato A.C.		Data APR.2025	

-10	30	4,98	8,01	7,19	8,51	10,10	11,70	12,80			
	35	7,47	9,24	11,30	13,80	18,70	20,10	23,70	26,00		
	40	12,0	15,40	19,40	24,10	29,80	37,10	53,20	55,10	61,80	
	45	21,2	27,90	38,50	47,20	80,80	77,30	908,20	124,00	153,00	178,00
	10	1,84	1,81	1,93							
	15	2,19	2,46	2,73	2,91						
	20	3,01	3,44	3,91	4,42	4,66					
	25	4,28	5,02	5,81	8,72	7,71	8,16				
0	30	8,42	7,69	9,19	10,80	12,70	14,80	15,90			
	35	10,2	12,60	15,30	18,80	22,30	28,90	31,70	34,90		
	40	17,5	22,30	28,00	34,80	42,90	53,30	78,40	79,10	88,70	
	45	33,5	44,10	57,40	74,10	94,70	120,00	153,00	174,00	240,00	275,00
	10	1,73	1,87	1,98							
	15	2,40	2,65	2,93	3,12						
	20	3,45	3,90	4,40	4,96	5,23					
10	25	5,17	5,99	6,90	7,95	9,11	9,67				
	30	8,17	9,69	11,40	13,50	15,90	18,50	19,90			
	35	13,8	16,90	20,50	24,80	29,80	35,80	42,30	46,60		
	40	25,5	32,20	40,40	49,90	61,70	76,40	110,00	113,00	127,00	
	45	52,9	69,40	90,90	116,00	148,00	188,00	239,00	303,00	375,00	431,00
	10	1,78	1,89 I	2,01							
	15	2,58	2,821	3,11	3,30						
	20	3,90	4,38	4,92	5,53	5,83					
20	25	6,18	7,12	8,17	9,39	10,70	11,40				
	30	10,4	12,30	14,40	16,90	20,00	23,20	25,00			
	35	18,7	22,80	27,60	33,30	40,00	48,00	56,80	62,50		
	40	37,2	46,90	58,60	72,50	89,30	111,00	158,00	164,00	185,00	
	45	84,0	110,00	143,00	184,00	234,00	297,00	378,00	478,00	592,00	680,00

Tabella: Valutazione del coefficiente di pressione passiva con la teoria di Caquot

Carico uniforme sul terrapieno

La resistenza indotta da un carico uniformemente distribuito S_q vale:

$$S_q = k_p \cdot Q \cdot H \cdot \frac{\sin \beta}{\sin(\beta + \varepsilon)}$$

Con punto di applicazione pari a $H/2$ (essendo il diagramma delle tensioni orizzontali costante per tutta l'altezza). Nella precedente formula k_p è il coefficiente di spinta passiva valutato al paragrafo precedente.

Coesione

La coesione determina un incremento di resistenza pari a:

 Colombi Roversi &Associati Studio di Ingegneria	Comune	FERRARA (FE)	Comm. n°		Revisioni				
	Progetto	ORD.35/2024 - INVESTIMENTO PNRR M2C4 2.1.a FINANZIATO NEXTGENERATION EU MESSA IN SICUREZZA IMPIANTO IDROVORO CITTADINO PER LA LAMINAZIONE DELLE PORTATE DI PIENA DEL RETICOLO IDRAULICO DI BONIFICA ID INTERVENTO ER-UBIS-000109 CUP J78H24000430007	CRA25003		0				
			Doc. n°		ALL. 4				
RELAZIONE GEOTECNICA, SIMICA, VERIFICA OPERE DI FONDAZIONE			Fg. 51	Di 74	Compilato A.C.		Data APR.2025		

$$P_c = 2c \cdot \sqrt{k_p}$$

Tale incremento va a sommarsi direttamente al diagramma principale di spinta.

Metodo dell'equilibrio limite (LEM)

Il metodo dell'equilibrio limite consiste nel ricercare soluzioni, al problema di verifica o di progetto, che siano compatibili con il solo aspetto statico del problema. In sostanza si ragiona in termini di equilibrio di un corpo rigido, senza preoccuparsi della congruenza cinematica degli spostamenti. I principali schemi di calcolo cui si farà riferimento sono i seguenti:

1. Paratia a sbalzo;
2. Paratia tirantata ad estremo libero;
3. Paratia tirantata ad estremo fisso;

Paratia a sbalzo: calcolo della profondità d'infissione limite

Per paratia non tirantata, la stabilità è assicurata dalla resistenza passiva del terreno che si trova a valle della stessa; dall'equilibrio dei momenti rispetto al centro di rotazione si ottiene:

$$S_m \cdot B_m - R_v \cdot B_v = 0$$

Dove i simboli hanno il seguente significato:

S_m = componente orizzontale della spinta attiva;

B_m = braccio di S_m rispetto ad O centro di rotazione;

R_v = componente orizzontale della resistenza passiva;

B_v = braccio di R_v rispetto ad O centro di rotazione;

ogni termine risulta funzione di t dove t è la profondità del centro di rotazione rispetto al piano di riferimento di valle (piano campagna a valle). La lunghezza necessaria per assicurare l'equilibrio alla traslazione orizzontale si ottiene aumentando t come segue:

$$t' = a \cdot t \quad d = t \cdot (1 + a) \quad \text{dove } a = 0.2 \text{ (Metodo di Blum)}$$

Coefficiente di sicurezza sulla resistenza passiva

La lunghezza d'infissione d come sopra determinata è relativa alla condizione limite di incipiente collasso, tramite un coefficiente F . E' possibile introdurre un margine di sicurezza sulle resistenze passive; la riduzione si effettua come segue:

$$S_m \cdot B_m - \frac{R_v}{F} \cdot B_v = 0$$

Paratia tirantata ad estremo libero: calcolo della profondità d'infissione limite

La stabilità dell'opera è assicurata anche dai tiranti ancorati sulla paratia. Per utilizzare lo schema di calcolo ad estremo libero, la paratia deve essere sufficientemente corta e rigida. La lunghezza di infissione, sarà determinata imponendo l'equilibrio alla rotazione sull'origine del tirante indicato B1

$$S_m \cdot (H + t - B_m - t_m) - R_v \cdot (H + t - B_v - t_m) = 0$$

Dove i simboli hanno il seguente significato:

S_m = componente orizzontale spinta attiva;

H = altezza terreno da sostenere;

t = profondità di infissione calcolata;

 Colombi Roversi &Associati Studio di Ingegneria	Comune	FERRARA (FE)	Comm. n°		Revisioni				
	Progetto	ORD.35/2024 - INVESTIMENTO PNRR M2C4 2.1.a FINANZIATO NEXTGENERATION EU MESSA IN SICUREZZA IMPIANTO IDROVORO CITTADINO PER LA LAMINAZIONE DELLE PORTATE DI PIENA DEL RETICOLO IDRAULICO DI BONIFICA ID INTERVENTO ER-UBIS-000109 CUP J78H24000430007	CRA25003		0				
			Doc. n°		ALL. 4				
RELAZIONE GEOTECNICA, SIMICA, VERIFICA OPERE DI FONDAZIONE			Fg.	Di	Compilato		Data		
			52	74	A.C.		APR.2025		

B_m = braccio di S_m rispetto alla base della paratia;

P_m = ordinata del punto di applicazione del tirante a monte;

R_v = componente orizzontale della resistenza passiva;

B_v = braccio di R_v .

Noto t , si determinano S_m ed R_v ed il relativo sforzo del tirante.

Coefficiente di sicurezza F sulle resistenze passive

La lunghezza d'infissione sarà ulteriormente aumentata per avere margine di sicurezza in condizioni di esercizio tramite il coefficiente di sicurezza F :

$$S_m \cdot (H + t - B_m - t_m) - \frac{R_v}{F} \cdot (H + t - B_v - t_m) = 0$$

Paratia tirantata ad estremo fisso: calcolo della profondità d'infissione limite

Se la sezione più profonda della paratia non trasla e non ruota può essere assimilata ad un incastro, in tal caso la paratia si definisce ad estremo fisso. Un procedimento elaborato da BLUM consente di ricavare la profondità d'infissione ($t+t'$), imponendo le condizioni cinematiche di spostamenti nulli alla base dell'opera ed all'origine del tirante ($B1$), e le condizioni statiche di momento e taglio nullo alla base della paratia. Si perviene ad una equazione di 5° grado in ($t+t'$) che può essere risolta in modo agevole.

Coefficiente di sicurezza F sulle resistenze

Per aumentare il fattore di sicurezza sono stati introdotti negli sviluppi numerici, valori delle resistenze passive ridotte.

 Colombi Roversi & Associati Studio di Ingegneria	Comune	FERRARA (FE)	Comm. n°		Revisioni				
	Progetto	ORD.35/2024 - INVESTIMENTO PNRR M2C4 2.1.a FINANZIATO NEXTGENERATION EU MESSA IN SICUREZZA IMPIANTO IDROVORO CITTADINO PER LA LAMINAZIONE DELLE PORTATE DI PIENA DEL RETICOLO IDRAULICO DI BONIFICA ID INTERVENTO ER-UBIS-000109 CUP J78H24000430007		CRA25003		0			
			Doc. n°		ALL. 4				
RELAZIONE GEOTECNICA, SIMICA, VERIFICA OPERE DI FONDAZIONE			Fg.	Di	Compilato	Data			
			53	74	A.C.	APR.2025			

Metodo degli elementi finiti (FEM)

Il metodo degli elementi finiti è il metodo che più di tutti si fonda su basi teoriche solide e razionali. Di fatti tutto il metodo presuppone che il problema sia affrontato tenendo in conto sia l'aspetto statico (e quindi l'equilibrio del problema, sia l'aspetto cinematica (e quindi la congruenza degli spostamenti o meglio delle deformazioni). In questo approccio la paratia è modellata come un insieme di travi, con vincolo di continuità tra loro (elementi beam) vincolati al terreno mediante molle elastiche, la cui rigidezza è valutata in funzione delle proprietà elastiche del terreno. Nella figura che segue è mostrato schematicamente il modello utilizzato per l'analisi ad elementi finiti:

Vari aspetti hanno importanza centrale in questo metodo di calcolo. Si riportano nel seguito gli aspetti essenziali.

Calcolo del modulo di rigidezza K_s del terreno

Come già detto in precedenza, il terreno viene schematizzato con delle molle di rigidezza K_s applicate sui nodi dei conci compresi tra il nodo di fondo scavo e l'estremità di infissione. La stima della rigidezza K_s è stata effettuata sulla base della capacità portante delle fondazioni secondo la seguente formula:

$$k_s = A_s + B_s \cdot z^n$$

Dove i simboli hanno il seguente significato:

A_s = costante, calcolata come segue $A_s = C \cdot (c \cdot N_c + 0.5 \cdot G \cdot B \cdot N_g)$

B_s = coefficiente funzione della profondità $B_s = C \cdot G \cdot N_q$

Z = Profondità in esame

C = 40 nel sistema internazionale SI

n = $\pi \cdot \tan \phi$

N_q = $\exp[n \cdot (\tan^2(45^\circ + \phi/2))]$

N_c = $(N_q - 1) \cdot \cot \phi$

N_g = $1.5 \cdot (N_q - 1) \cdot \tan \phi$

Tiranti

I tiranti vengono schematizzati come elementi elastici, con sezione trasversale di area pari ad A modulo di elasticità E e lunghezza L . Per un tratto di paratia di larghezza unitaria, l'azione dei tiranti inclinati di un angolo β vale:

$$F = \frac{A \cdot E}{S \cdot L} \cdot \cos(\beta)$$

Calcolo del carico limite laterale

Il metodo utilizzato per il calcolo della capacità portante laterale è il metodo A, proposto da Tomlinson (1971). La resistenza laterale viene calcolata con la seguente relazione:

$$Q_L = (\alpha c + \sigma K \tan \delta) \cdot A_L \cdot f_w$$

dove:

A_L = superficie laterale del palo;

f_w = fattore di correzione legato alla tronco-conicità del palo, ossia la diminuzione percentuale del diametro del palo

con

 Colombi Roversi &Associati Studio di Ingegneria	Comune	FERRARA (FE)	Comm. n°		Revisioni				
	Progetto	ORD.35/2024 - INVESTIMENTO PNRR M2C4 2.1.a FINANZIATO NEXTGENERATION EU MESSA IN SICUREZZA IMPIANTO IDROVORO CITTADINO PER LA LAMINAZIONE DELLE PORTATE DI PIENA DEL RETICOLO IDRAULICO DI BONIFICA ID INTERVENTO ER-UBIS-000109 CUP J78H24000430007	CRA25003		0				
			Doc. n°		ALL. 4				
RELAZIONE GEOTECNICA, SIMICA, VERIFICA OPERE DI FONDAZIONE			Fg.	Di	Compilato		Data		
			54	74	A.C.		APR.2025		

c = valore medio della coesione (o della resistenza a taglio in condizioni non drenate);

σ = pressione verticale efficace del terreno;

K = coefficiente di spinta orizzontale;

δ = attrito palo-terreno funzione della scabrezza della superficie del palo;

α = coefficiente d'adesione.

Nel calcolo si pone $\alpha = K=1$ e $\tan \delta = \tan \varphi$

Calcolo del carico limite di punta (metodo di Berezantzev)

Fondamentalmente Berezantzev fa riferimento ad una superficie di scorrimento "alla Terzaghi" che si arresta sul piano di posa (punta del palo); tuttavia egli considera che il cilindro di terreno coassiale al palo ed avente diametro pari all'estensione in sezione della superficie di scorrimento, sia in parte "sostenuto" per azione tangenziale dal rimanente terreno lungo la superficie laterale. Ne consegue un valore della pressione alla base inferiore a γD , è tanto minore quanto più questo "effetto silo" è marcato, cioè quanto più grande è il rapporto D/B ; di ciò tiene conto il coefficiente N_q , che quindi è funzione decrescente di D/B .

La resistenza unitaria Q_p alla punta, per il caso di terreno dotato di attrito (φ) e di coesione (c), è data dall'espressione:

$$Q_p = cN_c + \gamma L N_q$$

avendo indicato con:

γ = peso unità di volume del terreno;

L = lunghezza del palo;

N_c e N_q = sono i fattori di capacità portante già comprensivi dell'effetto forma (circolare).

Sifonamento

Il sifonamento è un fenomeno che in una fase iniziale si localizza al piede della paratia, e poi rapidamente si estende nell'intorno del volume resistente. Si verifica quando, per una elevata pressione idrodinamica o di infiltrazione, si annullano le pressioni passive efficaci, con la conseguente perdita di resistenza del terreno. Si assume di norma un fattore di sicurezza $F_{sif} = 3.5-4$

Indicando con:

i_c = Gradiente Idraulico critico;

i_e = Gradiente Idraulico in condizioni di esercizio;

Il margine di sicurezza è definito come rapporto tra i_c ed i_e , se $i_e < i_c$ la paratie è stabile.

Verifica di sollevamento del fondo scavo.

Nel caso di un diaframma infisso nel terreno, la presenza della falda in posizioni tali da innescare un moto di filtrazione comporta l'instaurarsi di una forza di filtrazione che, se diretta verso l'alto, può annullare il peso del terreno il quale, in assenza di coesione, può essere trascinato dal flusso dell'acqua e compromettere la stabilità dell'opera. Il fenomeno della stabilità del fondo scavo, analogo a quello del sifonamento, è stato affrontato per la prima volta da Terzaghi (1943). A differenza del sifonamento, che è un fenomeno localizzato nel punto di sbocco della prima linea di flusso, quello del sollevamento del fondo scavo si estende per una profondità pari a quella d'infissione della paratia per una larghezza pari a metà di tale infissione.

Per semplificare il problema della determinazione dell'effettivo andamento della pressione interstiziale nel punto A, si assume che il valore della sovrappressione al piede del diaframma sia costante sulla lunghezza $D/2$ e pari a $\gamma_w x H_c$. Per determinare H_c si ricorre all'espressione del gradiente di efflusso i_E :

$$i_E = \frac{H_c}{D} = \frac{H}{H + 2D}$$

Da cui si ottiene:

 Colombi Roversi & Associati Studio di Ingegneria	Comune	FERRARA (FE)	Comm. n°		Revisioni				
	Progetto	ORD.35/2024 - INVESTIMENTO PNRR M2C4 2.1.a FINANZIATO NEXTGENERATION EU MESSA IN SICUREZZA IMPIANTO IDROVORO CITTADINO PER LA LAMINAZIONE DELLE PORTATE DI PIENA DEL RETICOLO IDRAULICO DI BONIFICA ID INTERVENTO ER-UBIS-000109 CUP J78H24000430007	CRA25003		0				
			Doc. n°		ALL. 4				
RELAZIONE GEOTECNICA, SIMICA, VERIFICA OPERE DI FONDAZIONE			Fg.	Di	Compilato		Data		
			55	74	A.C.		APR.2025		

$$H_c = \frac{H \cdot D}{H + 2D}$$

La forza di filtrazione S_w che tende a sollevare il blocco di terreno coinvolto è pari a:

$$S_w = H_c \cdot \gamma_w \cdot \frac{D}{2}$$

Le condizioni limite di stabilità vengono raggiunte quando S_w uguaglia il peso efficace del blocco, pertanto il fattore di sicurezza a sollevamento del fondo scavo si definisce come il rapporto tra il peso efficace del blocco e la forza di filtrazione:

$$F_s = \frac{W'}{S_w} = \frac{\gamma' \cdot \frac{D}{2}}{H_c \cdot \gamma_w \cdot \frac{D}{2}} = \frac{\gamma' \cdot D}{H_c \cdot \gamma_w}$$

Verifica delle sezioni e calcolo armature

Il calcolo delle armature e le verifiche a presso-flessione e taglio della paratia soggetta alle sollecitazioni N, M e T , si effettuano sulla sezione maggiormente sollecitata. Le sollecitazioni di calcolo sono ottenute come prodotto tra le sollecitazioni ottenute con un calcolo a metro lineare e l'interasse tra i pali (o larghezza dei setti se la paratia è costituita da setto):

$$N_d = N' \cdot i; M_d = M' \cdot i; T_d = T' \cdot i$$

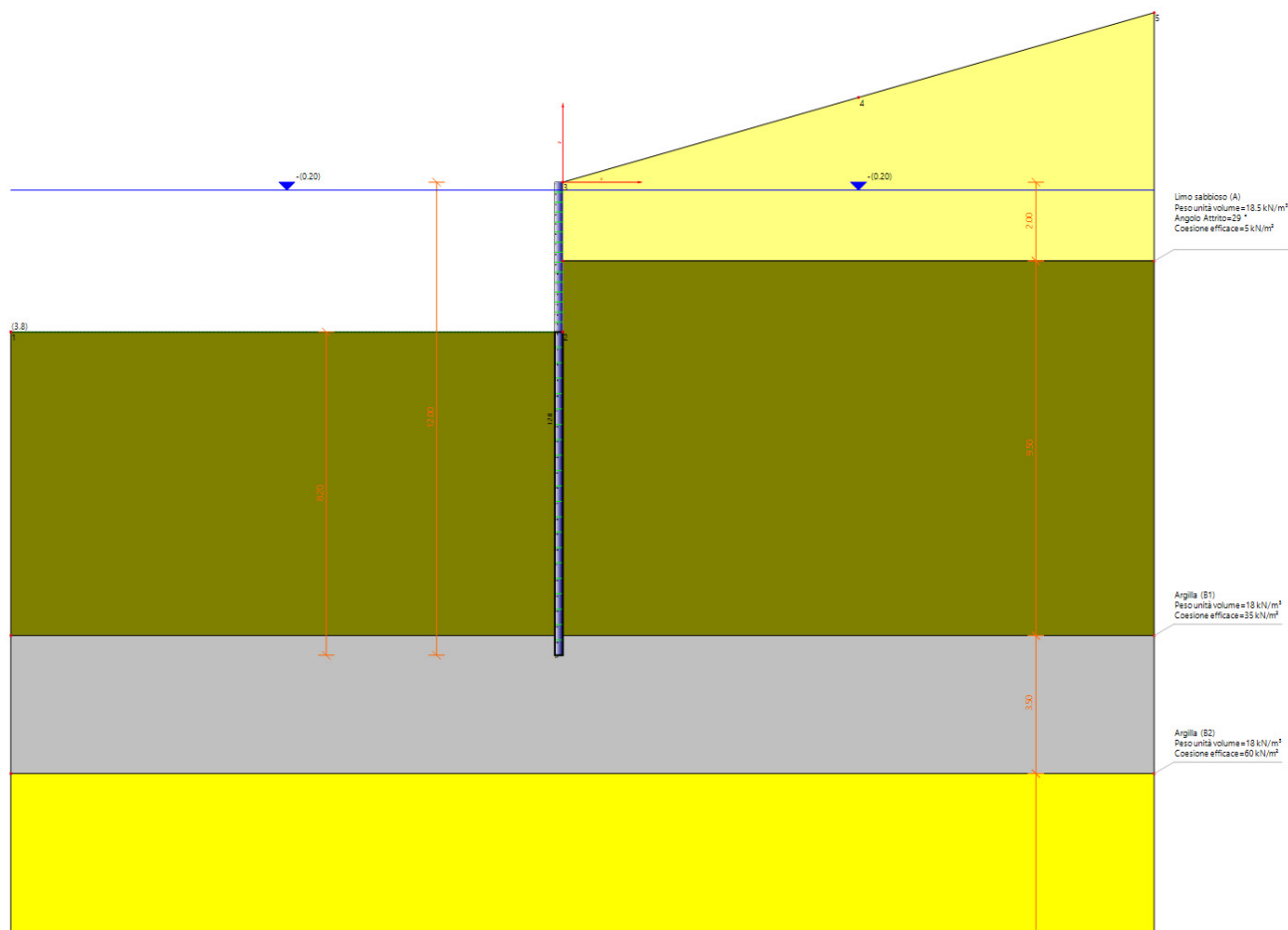
Dove M', M', T' rappresentano il momento il taglio e lo sforzo normale relativi ad una striscia unitaria di calcolo mentre i è l'interasse tra i pali per paratia costituita da pali o micropali (o larghezza setti per paratia costituita da setti).

 Colombi Roversi &Associati Studio di Ingegneria	Comune	FERRARA (FE)	Comm. n°		Revisioni			
	Progetto	ORD.35/2024 - INVESTIMENTO PNRR M2C4 2.1.a FINANZIATO NEXTGENERATION EU MESSA IN SICUREZZA IMPIANTO IDROVORO CITTADINO PER LA LAMINAZIONE DELLE PORTATE DI PIENA DEL RETICOLO IDRAULICO DI BONIFICA ID INTERVENTO ER-UBIS-000109 CUP J78H24000430007	CRA25003	0				
			Doc. n°		ALL. 4			
RELAZIONE GEOTECNICA, SIMICA, VERIFICA OPERE DI FONDAZIONE			Fg. 56	Di 74	Compilato A.C.		Data APR.2025	

 Colombi Roversi &Associati Studio di Ingegneria	Comune	FERRARA (FE)	Comm. n°		Revisioni				
	Progetto	ORD.35/2024 - INVESTIMENTO PNRR M2C4 2.1.a FINANZIATO NEXTGENERATION EU MESSA IN SICUREZZA IMPIANTO IDROVORO CITTADINO PER LA LAMINAZIONE DELLE PORTATE DI PIENA DEL RETICOLO IDRAULICO DI BONIFICA ID INTERVENTO ER-UBIS-000109 CUP J78H24000430007	CRA25003		0				
			Doc. n°		ALL. 4				
RELAZIONE GEOTECNICA, SIMICA, VERIFICA OPERE DI FONDAZIONE			Fg.	Di	Compilato		Data		
			57	74	A.C.		APR.2025		

Risultati del calcolo:

In tale tratto la parete di rilevato da sostenere risulta pari a circa 3.8m.



Geometria utilizzata per il dimensionamento del palancolato di sostegno nel programma (altezza di sostegno 3.8 m)

Il calcolo è stato eseguito in condizioni non drenate (breve termine) e drenate (lungo termine)

La palancola risulta di lunghezza complessiva pari a 12m

 Colombi Roversi & Associati Studio di Ingegneria	Comune	FERRARA (FE)	Comm. n°	Revisioni			
	Progetto	ORD.35/2024 - INVESTIMENTO PNRR M2C4 2.1.a FINANZIATO NEXTGENERATION EU MESSA IN SICUREZZA IMPIANTO IDROVORO CITTADINO PER LA LAMINAZIONE DELLE PORTATE DI PIENA DEL RETICOLO IDRAULICO DI BONIFICA ID INTERVENTO ER-UBIS-000109 CUP J78H24000430007	CRA25003	0			
Doc. n°			ALL. 4				
RELAZIONE GEOTECNICA, SIMICA, VERIFICA OPERE DI FONDAZIONE			Fg. 58	Di 74	Compilato A.C.	Data APR.2025	

FASI COSTRUTTIVE

FASE COSTRUTTIVA 1

A1+M1+R1

A2+M2+R1

A_unitari+M1+R3

Fase costruttiva...1

Stati limite

S.L.U.

Nome combinazione

A1+M1+R1

Coefficiente sismici

Kh

0

Kv

0

Tipo

☐ GEO

☒ STR

☐ UPL, HYD

Nr.	Azioni	Fattori combinazioni [A]
1	Peso proprio	1
2	Spinta terreno	1.3
3	Spinta falda	1.5
4	Spinta sismica x	1.5
5	Spinta sismica y	1

Nr.	Parametro	Coeff. Parziali [M]
	Tangente angolo res. taglio	1
	Coesione efficace	1
	Resistenza non drenata	1
	Peso unità volume	1
	Angolo di attrito terra parete	1

Nr	Capacità portante	Coefficienti resistenze [R]
1	Punta	1
2	Laterale compressione	1
3	Totale	1
4	Laterale trazione	1
5	Orizzontale	1

Sintesi risultati

Profondità di infissione

8.20

[m]

Pressione massima terreno

13.23

[kPa]

Momento massimo

20.35

[kNm/m]

Taglio massimo

12.90

[kN/m]

Spostamento massimo

H

0.49

[cm]

Spostamento massimo

V

0.38

[cm]

Numero di iterazioni eseguite

1 < 1

Carico limite verticale

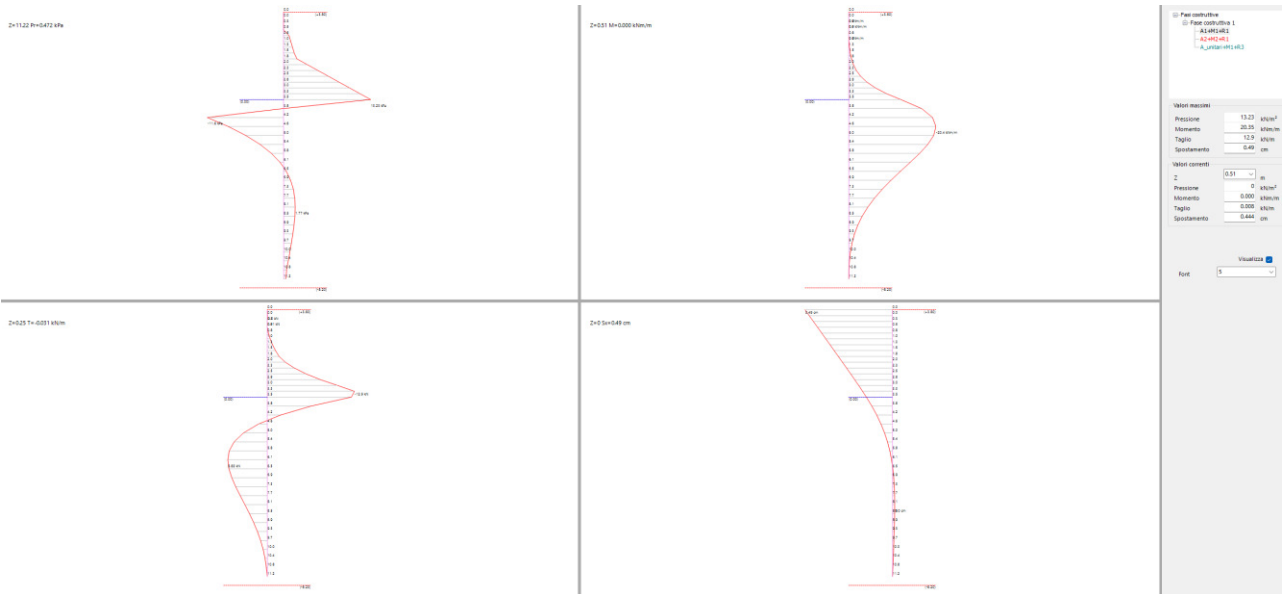
kN, F

Rd=-- Fv=--

--

Fattore sicurezza sollevamento

--



Principali risultati del calcolo condizioni non drenate - Condizione SLU STR A1+M1+R1

 Colombi Roversi & Associati Studio di Ingegneria	Comune	FERRARA (FE)	Comm. n°		Revisioni			
	Progetto	ORD.35/2024 - INVESTIMENTO PNRR M2C4 2.1.a FINANZIATO NEXTGENERATION EU MESSA IN SICUREZZA IMPIANTO IDROVORO CITTADINO PER LA LAMINAZIONE DELLE PORTATE DI PIENA DEL RETICOLO IDRAULICO DI BONIFICA ID INTERVENTO ER-UBIS-000109 CUP J78H24000430007	CRA25003	0				
			Doc. n° ALL. 4					
RELAZIONE GEOTECNICA, SIMICA, VERIFICA OPERE DI FONDAZIONE			Fg. 59	Di 74	Compilato A.C.	Data APR.2025		

FASI COSTRUTTIVE

FASE COSTRUTTIVA 1

A1+M1+R1

A2+M2+R1

A_unitari+M1+R3

Sintesi risultati

Profondità di infissione

8.20

[m]

Pressione massima terreno

19.48

[kPa]

Momento massimo

38.43

[kNm/m]

Taglio massimo

22.37

[kN/m]

Spostamento massimo

H

0.98

[cm]

Spostamento massimo

V

0.76

[cm]

Numero di iterazioni eseguite

1<1

Carico limite verticale

kN, F

Rd= --

Fv= --

--

Fattore sicurezza sollevamento

--

Fase costruttiva...1

Stati limite

S.L.U.

Nome combinazione

A2+M2+R1

Coefficiente sismici

Kh

0

Kv

0

...

Tipo

☒ GEO

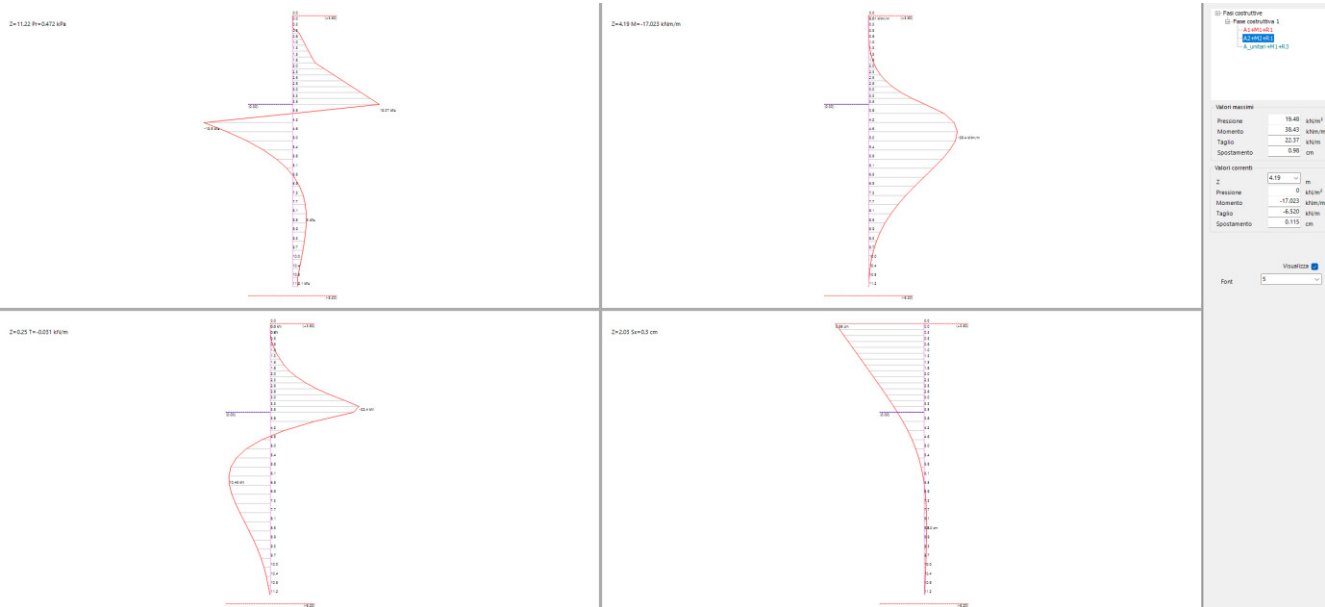
☐ STR

☐ UPL, HYD

Nr.	Azioni	Fattori combinazioni [A]
1	Peso proprio	1
2	Spinta terreno	1.3
3	Spinta falda	1.3
4	Spinta sismica x	1.3
5	Spinta sismica y	1

Nr.	Parametro	Coeff. Parziali [M]
	Tangente angolo res. taglio	1.25
	Coesione efficace	1.25
	Resistenza non drenata	1.4
	Peso unità volume	1
	Angolo di attrito terra parete	1

Nr	Capacità portante	Coefficienti resistenze [R]
1	Punta	1
2	Laterale compressione	1
3	Totale	1
4	Laterale trazione	1
5	Orizzontale	1



 Colombi Roversi &Associati Studio di Ingegneria	Comune	FERRARA (FE)	Comm. n°		Revisioni			
	Progetto	ORD.35/2024 - INVESTIMENTO PNRR M2C4 2.1.a FINANZIATO NEXTGENERATION EU MESSA IN SICUREZZA IMPIANTO IDROVORO CITTADINO PER LA LAMINAZIONE DELLE PORTATE DI PIENA DEL RETICOLO IDRAULICO DI BONIFICA ID INTERVENTO ER-UBIS-000109 CUP J78H24000430007	CRA25003	0				
			Doc. n° ALL. 4					
RELAZIONE GEOTECNICA, SIMICA, VERIFICA OPERE DI FONDAZIONE			Fg. 60	Di 74	Compilato A.C.		Data APR.2025	

Principali risultati del calcolo condizioni non drenate - Condizione SLU GEO A2+M2+R1

Valori massimi		
Pressione	13.23	kN/m ²
Momento	20.35	kNm/m
Taglio	12.9	kN/m
Spostamento	0.49	cm

Valori massimi		
Pressione	19.48	kN/m ²
Momento	38.43	kNm/m
Taglio	22.37	kN/m
Spostamento	0.98	cm

 Colombi Roversi & Associati Studio di Ingegneria	Comune	FERRARA (FE)	Comm. n°	Revisioni				
	Progetto	ORD.35/2024 - INVESTIMENTO PNRR M2C4 2.1.a FINANZIATO NEXTGENERATION EU MESSA IN SICUREZZA IMPIANTO IDROVORO CITTADINO PER LA LAMINAZIONE DELLE PORTATE DI PIENA DEL RETICOLO IDRAULICO DI BONIFICA ID INTERVENTO ER-UBIS-000109 CUP J78H24000430007	CRA25003	0				
			Doc. n°	ALL. 4				
RELAZIONE GEOTECNICA, SIMICA, VERIFICA OPERE DI FONDAZIONE			Fg.	Di	Compilato	Data		
			61	74	A.C.	APR.2025		

FASI COSTRUTTIVE

FASE COSTRUTTIVA 1

A1+M1+R1

A2+M2+R1

A_unitari+M1+R3

Fase costruttiva...1

Stati limite

S.L.U.

Nome combinazione

A1+M1+R1

Coefficiente sismici

Kh 0 Kv 0

Tipo

☐ GEO
 ☒ STR
 ☐ UPL, HYD

Nr.	Azioni	Fattori combinazioni [A]
1	Peso proprio	1
2	Spinta terreno	1.3
3	Spinta falda	1.5
4	Spinta sismica x	1.5
5	Spinta sismica y	1

Nr.	Parametro	Coeff. Parziali [M]
	Tangente angolo res. taglio	1
	Coesione efficace	1
	Resistenza non drenata	1
	Peso unità volume	1
	Angolo di attrito terra parete	1

Nr	Capacità portante	Coefficienti resistenze [R]
1	Punta	1
2	Laterale compressione	1
3	Totale	1
4	Laterale trazione	1
5	Orizzontale	1

Sintesi risultati

Profondità di infissione

8.20

[m]

Pressione massima terreno

14.24

[kPa]

Momento massimo

22.47

[kNm/m]

Taglio massimo

14.58

[kN/m]

Spostamento massimo

H 0.43

[cm]

Spostamento massimo

V 0.49

[cm]

Numero di iterazioni eseguite

1 < 1

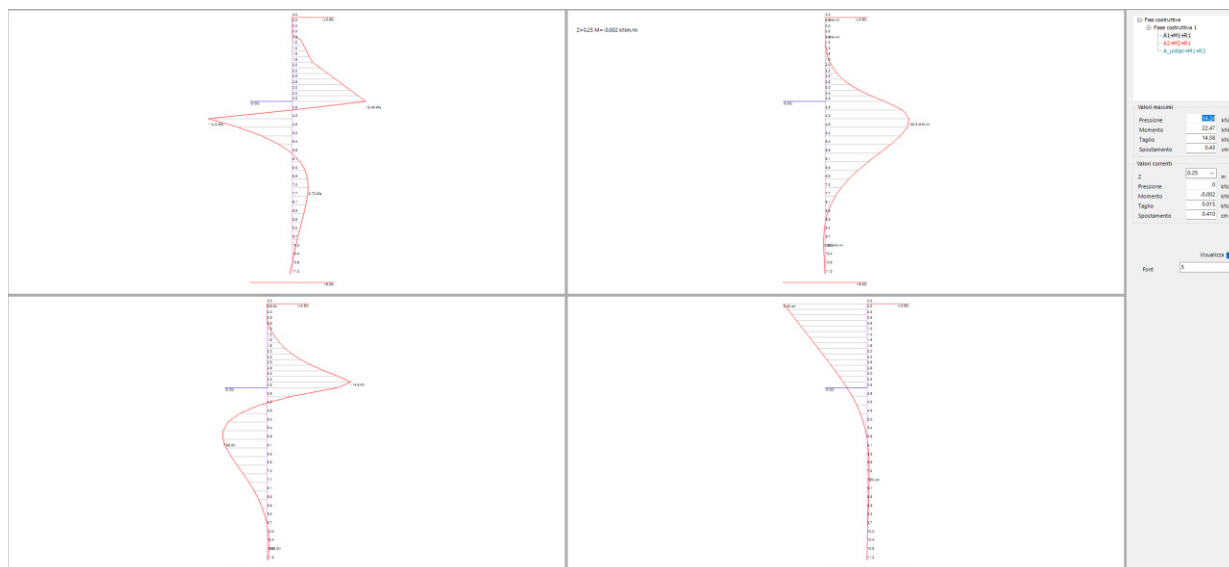
Carico limite verticale

kN, F Rd=-- Fv=--

--

Fattore sicurezza sollevamento

--



Principali risultati del calcolo condizioni drenate - Condizione SLU STR A1+M1+R1

 Colombi Roversi & Associati Studio di Ingegneria	Comune	FERRARA (FE)	Comm. n°	Revisioni			
	Progetto	ORD.35/2024 - INVESTIMENTO PNRR M2C4 2.1.a FINANZIATO NEXTGENERATION EU MESSA IN SICUREZZA IMPIANTO IDROVORO CITTADINO PER LA LAMINAZIONE DELLE PORTATE DI PIENA DEL RETICOLO IDRAULICO DI BONIFICA ID INTERVENTO ER-UBIS-000109 CUP J78H24000430007	CRA25003	0			
			Doc. n°	ALL. 4			
RELAZIONE GEOTECNICA, SIMICA, VERIFICA OPERE DI FONDAZIONE			Fg.	Di	Compilato	Data	
			62	74	A.C.	APR.2025	

FASI COSTRUTTIVE

FASE COSTRUTTIVA 1

A1+M1+R1

A2+M2+R1

A_unitari+M1+R3

Fase costruttiva...1

Stati limite

S.L.U.

Nome combinazione

A2+M2+R1

Coefficiente sismici

Kh

0

Kv

0

Tipo

☒ GEO

☐ STR

☐ UPL, HYD

Nr.	Azioni	Fattori combinazioni [A]
1	Peso proprio	1
2	Spinta terreno	1.3
3	Spinta falda	1.3
4	Spinta sismica x	1.3
5	Spinta sismica y	1

Nr.	Parametro	Coeff. Parziali [M]
	Tangente angolo res. taglio	1.25
	Coesione efficace	1.25
	Resistenza non drenata	1.4
	Peso unità volume	1
	Angolo di attrito terra parete	1

Nr	Capacità portante	Coefficienti resistenze [R]
1	Punta	1
2	Laterale compressione	1
3	Totale	1
4	Laterale trazione	1
5	Orizzontale	1

Sintesi risultati

Profondità di infissione

8.20

[m]

Pressione massima terreno

22.39

[kPa]

Momento massimo

42.20

[kNm/m]

Taglio massimo

24.53

[kN/m]

Spostamento massimo

H

0.97

[cm]

Spostamento massimo

V

1.16

[cm]

Numero di iterazioni eseguite

1<1

Carico limite verticale

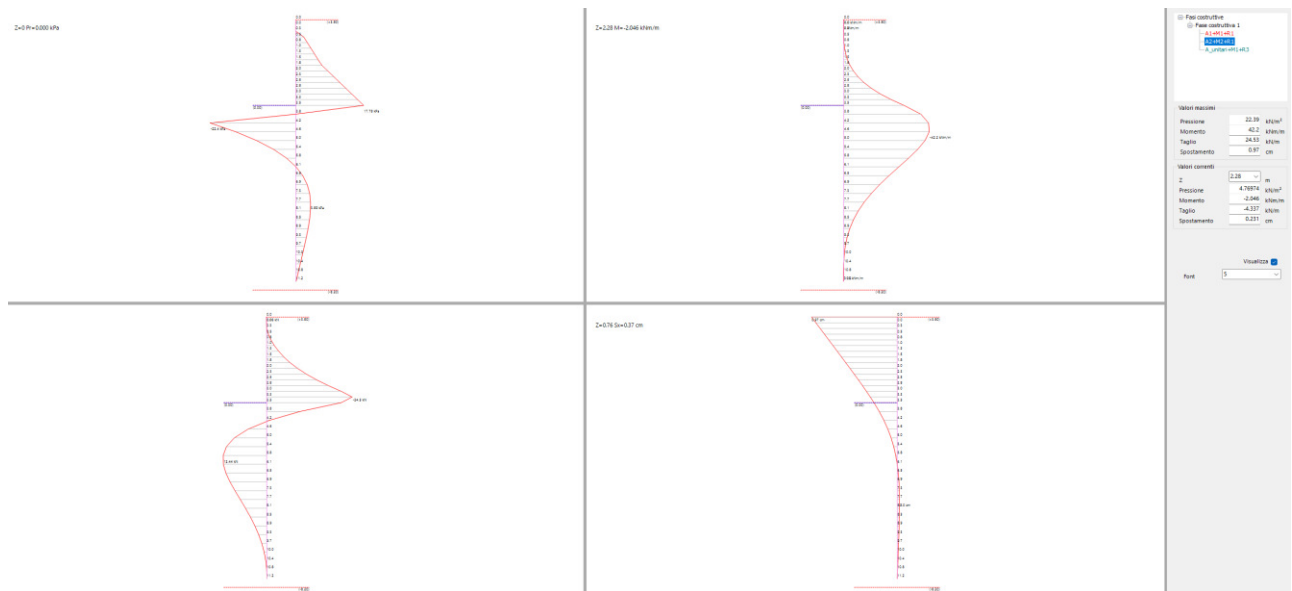
kN, F

Rd=-- Fv=--

--

Fattore sicurezza sollevamento

--



 Colombi Roversi &Associati Studio di Ingegneria	Comune	FERRARA (FE)	Comm. n°		Revisioni				
	Progetto	ORD.35/2024 - INVESTIMENTO PNRR M2C4 2.1.a FINANZIATO NEXTGENERATION EU MESSA IN SICUREZZA IMPIANTO IDROVORO CITTADINO PER LA LAMINAZIONE DELLE PORTATE DI PIENA DEL RETICOLO IDRAULICO DI BONIFICA ID INTERVENTO ER-UBIS-000109 CUP J78H24000430007	CRA25003		0				
			Doc. n°		ALL. 4				
RELAZIONE GEOTECNICA, SIMICA, VERIFICA OPERE DI FONDAZIONE			Fg. 63	Di 74	Compilato A.C.		Data APR.2025		

Valori massimi		
Pressione	14.24	kN/m ²
Momento	22.47	kNm/m
Taglio	14.58	kN/m
Spostamento	0.43	cm

Valori massimi		
Pressione	22.39	kN/m ²
Momento	42.2	kNm/m
Taglio	24.53	kN/m
Spostamento	0.97	cm

Si ottengono pertanto i seguenti risultati massimi di sollecitazione:

$$M_{\max} = 42.2 \text{ kN m/m}$$

$$T_{\max} = 24.53 \text{ kN/m}$$

$$S_{\max} = 0.97 \text{ cm (in testa alla palancola)}$$

Lo stato tensionale indotto sulla palancola è pari a:

$$\sigma_M = \frac{M_{\max}}{W}$$

$$\tau_T = \frac{T_{\max}}{A}$$

$$\sigma_{id} = \sqrt{\sigma_M^2 + 3 \cdot \tau_T^2} = 3.502 \text{ MPa} < 270 \text{ MPa (acciaio S270GP)}$$

 Colombi Roversi &Associati Studio di Ingegneria	Comune	FERRARA (FE)	Comm. n° CRA25003		Revisioni				
	Progetto	ORD.35/2024 - INVESTIMENTO PNRR M2C4 2.1.a FINANZIATO NEXTGENERATION EU MESSA IN SICUREZZA IMPIANTO IDROVORO CITTADINO PER LA LAMINAZIONE DELLE PORTATE DI PIENA DEL RETICOLO IDRAULICO DI BONIFICA ID INTERVENTO ER-UBIS-000109 CUP J78H24000430007			0				
			Doc. n° ALL. 4						
RELAZIONE GEOTECNICA, SIMICA, VERIFICA OPERE DI FONDAZIONE			Fg. 64	Di 74	Compilato A.C.		Data APR.2025		

10. DIMENSIONAMENTO FONDAZIONI PROFONDE SELLE

La procedura di dimensionamento agli Stati Limite seguita nel calcolo è quella riportata nel D.M.17/01/18 a cui si rimanda per i dettagli. Sono previsti pali IGU.

Adottando il metodo di calcolo di Bustamante e Doix (1985) sono stati calcolati i valori di resistenza laterale e di punta del micropalo a partire dai valori medi di resistenza dei terreni attraversati distinti per ciascun profilo geotecnico di progetto.

Il metodo prevede la definizione del carico limite unitario laterale sulla base dei seguenti diagrammi:

 Colombi Roversi & Associati Studio di Ingegneria	Comune	FERRARA (FE)	Comm. n°	Revisioni				
	Progetto	ORD.35/2024 - INVESTIMENTO PNRR M2C4 2.1.a FINANZIATO NEXTGENERATION EU MESSA IN SICUREZZA IMPIANTO IDROVORO CITTADINO PER LA LAMINAZIONE DELLE PORTATE DI PIENA DEL RETICOLO IDRAULICO DI BONIFICA ID INTERVENTO ER-UBIS-000109 CUP J78H24000430007	CRA25003	0				
			Doc. n°	ALL. 4				
RELAZIONE GEOTECNICA, SIMICA, VERIFICA OPERE DI FONDAZIONE			Fg. 65	Di 74	Compilato A.C.	Data APR.2025		

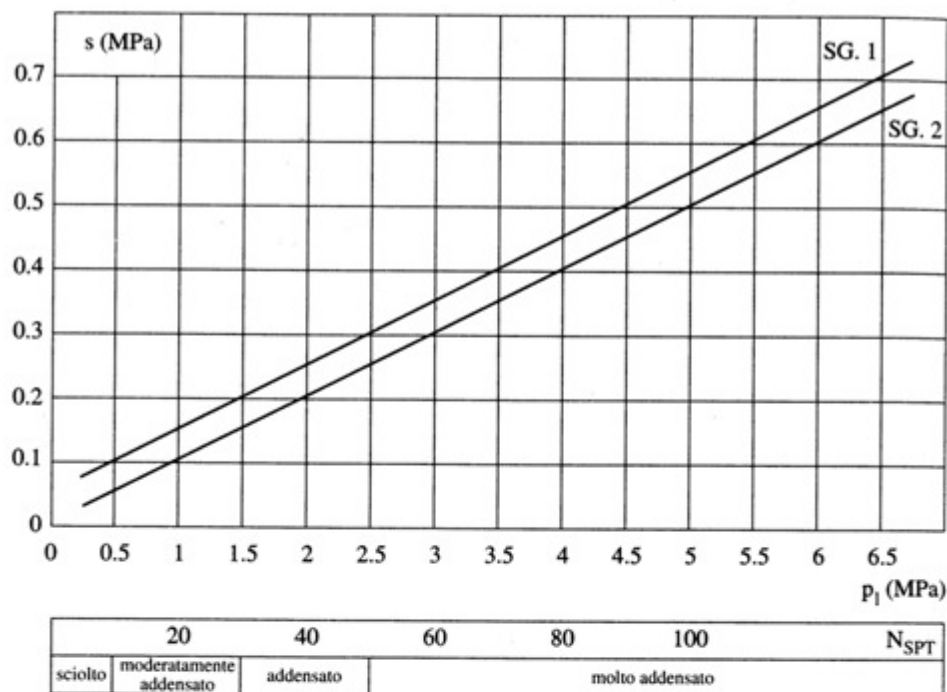


Fig. 13.16. Abaco per il calcolo di s per sabbie e ghiaie

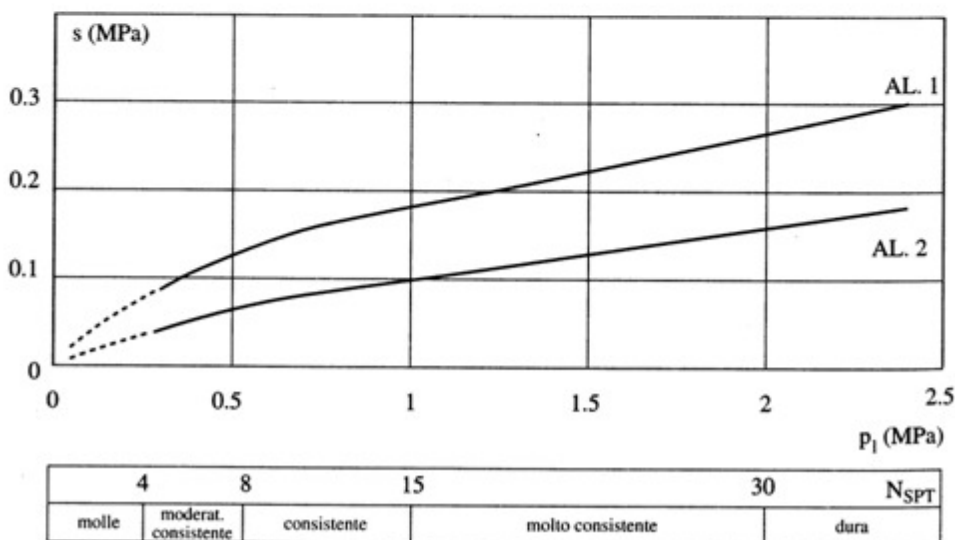


Fig. 13.17. Abaco per il calcolo di s per argille e limi

Figura 12.1. Abachi per il calcolo del carico limite unitario laterale.

La portata per attrito laterale dell' i -esimo strato di terreno è fornita dalla relazione seguente:

 Colombi Roversi & Associati Studio di Ingegneria	Comune	FERRARA (FE)	Comm. n°		Revisioni				
	Progetto	ORD.35/2024 - INVESTIMENTO PNRR M2C4 2.1.a FINANZIATO NEXTGENERATION EU MESSA IN SICUREZZA IMPIANTO IDROVORO CITTADINO PER LA LAMINAZIONE DELLE PORTATE DI PIENA DEL RETICOLO IDRAULICO DI BONIFICA ID INTERVENTO ER-UBIS-000109 CUP J78H24000430007	CRA25003		0				
			Doc. n°		ALL. 4				
RELAZIONE GEOTECNICA, SIMICA, VERIFICA OPERE DI FONDAZIONE			Fg.	Di	Compilato		Data		
			66	74	A.C.		APR.2025		

$$Q_{s,cal}^i = q_{s,i} \cdot A_{s,i}$$

con

$$A_{s,i} = \pi \cdot D \cdot L_i$$

dove $A_{s,i}$ rappresenta l'area laterale del palo nello strato i-esimo e L_i la lunghezza del tratto di fusto del palo che attraversa lo strato i-esimo;

$q_{s,i}$ è il valore di resistenza unitaria laterale determinata per ciascuno strato con il metodo di Bustamante e Doix (1985).

La portata laterale totale di calcolo ($Q_{s,cal}$) è semplicemente ottenuta dalla somma delle portate i-esime determinate per ogni singolo strato attraversato dal palo:

$$Q_{s,cal} = \sum_i Q_{s,cal}^i$$

La capacità portante unitaria critica di punta è stata calcolata pari al 15% della portata laterale secondo le indicazioni della letteratura specifica di settore (Viggiani 1999, Russo et. Al 2011).

La procedura di dimensionamento agli Stati Limite seguita nel calcolo è quella riportata nel D.M.17.01.18 a cui si rimanda per i dettagli. La metodologia consiste nel calcolare la resistenza a compressione del palo applicando dei coefficienti di correlazione per considerare la variabilità della resistenza del palo (per i diversi profili indagati) ed ottenere la resistenza caratteristica. Utilizzando i coefficienti parziali di sicurezza si ottengono quindi i valori di progetto. Nel presente progetto è stato adottato l'approccio alla progettazione della norma:

(A1+M1+R3)

Approccio alla progettazione (set di fattori parziali A1+M1+R3)

 Colombi Roversi & Associati Studio di Ingegneria	Comune	FERRARA (FE)	Comm. n°		Revisioni				
	Progetto	ORD.35/2024 - INVESTIMENTO PNRR M2C4 2.1.a FINANZIATO NEXTGENERATION EU MESSA IN SICUREZZA IMPIANTO IDROVORO CITTADINO PER LA LAMINAZIONE DELLE PORTATE DI PIENA DEL RETICOLO IDRAULICO DI BONIFICA ID INTERVENTO ER-UBIS-000109 CUP J78H24000430007	CRA25003		0				
			Doc. n°		ALL. 4				
RELAZIONE GEOTECNICA, SIMICA, VERIFICA OPERE DI FONDAZIONE			Fg.	Di	Compilato		Data		
			67	74	A.C.		APR.2025		

In questo Approccio alla progettazione i valori di calcolo della portata di base e laterale del palo sono ottenuti applicando i fattori di sicurezza parziali sulle azioni e sui parametri di resistenza del terreno così definiti (si riportano quelli significativi utilizzati):

Set A1 (fattori parziali di sicurezza sulle azioni)

(Tabella 6.2.I DM 17.01.18)

Carichi Permanenti (sfavorevoli): $\gamma_{G1}=1.3$

Carichi Variabili (sfavorevoli): $\gamma_{Qi}=1.5$

Set M1 (fattori parziali di sicurezza sui parametri geotecnici del terreno)

(Tabella 6.2.II DM 17.01.18)

Tangente dell'angolo di resistenza a taglio: $\gamma_{\phi'}=1.0$

Resistenza non drenata: $\gamma_{cu}=1.0$

Peso dell'unità di volume: $\gamma_r=1.0$

Il valore caratteristico delle resistenze si ottiene applicando i coefficienti di correlazione (Tabella 6.4.IV del DM 17.01.18) ξ_3 e ξ_4 applicati rispettivamente ai valori medi ed ai valori minimi delle resistenze di calcolo. Tali coefficienti di correlazione dipendono dal numero di verticali indagate. Poiché per ciascuna spalla sono state utilizzate le informazioni derivate dall'interpretazione di una verticale penetrometrica, si è adottato come numero di verticali per la definizione dei fattori di correlazione il valore $n=1$ in quanto si è adottato un unico profilo geotecnico di progetto derivato dalle diverse verticali indagate, per il quale:

$n=1 \Rightarrow \xi_3 = 1.7; \xi_4 = 1.7$ (Tabella 6.4.IV DM 17.01.18)

Il valore caratteristico delle resistenze (laterale e di base) è ottenuto a partire dai valori di calcolo in base alle seguenti espressioni:

$$Q_{s,k} = \frac{Q_{s,cal}}{\xi_3}$$

$$Q_{b,k} = \frac{Q_{b,cal}}{\xi_3}$$

 Colombi Roversi &Associati Studio di Ingegneria	Comune	FERRARA (FE)	Comm. n°		Revisioni				
	Progetto	ORD.35/2024 - INVESTIMENTO PNRR M2C4 2.1.a FINANZIATO NEXTGENERATION EU MESSA IN SICUREZZA IMPIANTO IDROVORO CITTADINO PER LA LAMINAZIONE DELLE PORTATE DI PIENA DEL RETICOLO IDRAULICO DI BONIFICA ID INTERVENTO ER-UBIS-000109 CUP J78H24000430007	CRA25003		0				
			Doc. n°		ALL. 4				
RELAZIONE GEOTECNICA, SIMICA, VERIFICA OPERE DI FONDAZIONE			Fg.	Di	Compilato		Data		
			68	74	A.C.		APR.2025		

Il valore limite di progetto del carico del palo si ottiene applicando i fattori parziali di sicurezza (Tabella 6.4.II DM 17.01.18) γ_s e γ_b del set R3 rispettivamente applicati alla resistenza laterale (in compressione) e a quella di base corrispondenti a pali trivellati.

Laterale, Pali trivellati, carico di compressione $\Rightarrow \gamma_s = 1.15$ (Tabella 6.4.II DM 17.01.18)

Base, Pali trivellati $\Rightarrow \gamma_b = 1.35$ (Tabella 6.4.II DM 17.01.18)

Laterale, Pali trivellati, carico di trazione $\Rightarrow \gamma_s = 1.25$ (Tabella 6.4.II DM 17.01.18)

I valori di progetto della portata laterale e di base valgono pertanto:

$$Q_{s,d} = \frac{Q_{s,k}}{\gamma_s}$$

$$Q_{b,d} = \frac{Q_{b,k}}{\gamma_b}$$

La capacità portante totale secondo l'approccio agli Stati Limite vale pertanto:

Carico di compressione

$$Q_{tot,d} = Q_{s,d} + Q_{b,d} - W_p \cdot \gamma_{G1}$$

con

W_p : peso del palo di calcolo

Carico di trazione

$$Q_{tot,d} = Q_{s,d} + W_p \cdot 1$$

 Colombi Roversi & Associati Studio di Ingegneria	Comune	FERRARA (FE)	Comm. n°	Revisioni				
	Progetto	ORD.35/2024 - INVESTIMENTO PNRR M2C4 2.1.a FINANZIATO NEXTGENERATION EU MESSA IN SICUREZZA IMPIANTO IDROVORO CITTADINO PER LA LAMINAZIONE DELLE PORTATE DI PIENA DEL RETICOLO IDRAULICO DI BONIFICA ID INTERVENTO ER-UBIS-000109 CUP J78H24000430007	CRA25003	0				
			Doc. n°	ALL. 4				
RELAZIONE GEOTECNICA, SIMICA, VERIFICA OPERE DI FONDAZIONE			Fg. 69	Di 74	Compilato A.C.	Data APR.2025		

CALCOLO MICROPALI IGU:

Le caratteristiche geometriche dei pali progettati sono:

Diametro della perforazione: $d_f = 0.200\text{m}$

Lunghezza del palo: $L = 15\text{ m}$

Il metodo di calcolo adottato è quello proposto da Bustamante e Doix (1985). Secondo tale metodo il diametro effettivo del micropalo IGU installato in terreni argillosi e limosi è pari a:

Diametro di progetto del palo $D = d_f \times 1.2 = 0.240\text{ m}$

I valori di portata laterale e di base derivanti dal calcolo secondo quanto descritto prima sono riportati nella seguente tabella:

Strato	Spessore	cu kPa	Nspt	qs,i kPa	Qs,i kN
A	9,5	35		46,6	333,43
B	3,5	60		73,2	193,17
C	2			60,0	90,48
0	0	0		0,0	0,00
0	0	0		0,0	0,00
Portata laterale di calcolo				Qs,cla	617,08 kN
Portata di base di calcolo				Qb,cal	92,56 kN

 Colombi Roversi & Associati Studio di Ingegneria	Comune	FERRARA (FE)	Comm. n°	Revisioni				
	Progetto	ORD.35/2024 - INVESTIMENTO PNRR M2C4 2.1.a FINANZIATO NEXTGENERATION EU MESSA IN SICUREZZA IMPIANTO IDROVORO CITTADINO PER LA LAMINAZIONE DELLE PORTATE DI PIENA DEL RETICOLO IDRAULICO DI BONIFICA ID INTERVENTO ER-UBIS-000109 CUP J78H24000430007	CRA25003	0				
			Doc. n°	ALL. 4				
RELAZIONE GEOTECNICA, SIMICA, VERIFICA OPERE DI FONDAZIONE			Fg.	Di	Compilato	Data		
			70	74	A.C.	APR.2025		

Metodo di installazione		DM 17.01.2018	
Micropalo tipo IGU		Fattori parziali sui parametri del terreno (M)	
Caratteristiche del palo			
D	0,24 m	$\gamma_{\phi'}$	1 (angolo di resistenza a taglio)
L	15 m	γ_{cu}	1 (resistenza a taglio non drenata)
γ_{cis}	25 kN/m ³		
		Fattori parziali sulle resistenze (R)	
Ab	0,0452 m ²	γ_b	1,35 (portata base)
		γ_s	1,15 (portata laterale)
		γ_{st}	1,25 (portata laterale trazione)
		Fattori parziali sulle azioni (A)	
<u>Approccio alla progettazione</u>		γ_{G1}	1,3 sfav
DA2		γ_{Q1}	1,5
<u>Set Fattori parziali</u>		γ_{G1}	1 fav
A1+M1+R3		N. verticali indagate 1	
		Fattori di correlazione	
		ξ_{-3}	1,7
		ξ_{-4}	1,7

Portata laterale caratteristica	Q _{s,k}	363,0 kN
Portata di base caratteristica	Q _{b,k}	54,4 kN
Portata laterale di progetto (compressione)	Q _{s,c,d}	315,6 kN
Portata laterale di progetto (trazione)	Q _{s,t,d}	290,4 kN
Portata di base di progetto	Q _{b,d}	40,3 kN
Peso proprio del palo di progetto	W _{p,d}	22,1 kN
PORTATA TOTALE DI PROGETTO (compressione) (depurata del peso proprio del palo)	Q_{tot,c,d}	327,3 kN
PORTATA TOTALE DI PROGETTO (trazione) (compreso contributo del peso proprio del palo)	Q_{tot,t,d}	305,7 kN

CALCOLO CHIODATURA AUTOPERFORANTE TIPO SIRIVE R38 :

Le caratteristiche geometriche della chiodatura progettati sono:

Diametro reso: $d_f = 0.150\text{m}$

Lunghezza: $L = 15\text{ m}$

Il metodo di calcolo adottato è quello proposto da Bustamante e Doix (1985). Secondo tale metodo il diametro effettivo del micropalo IGU installato in terreni argillosi e limosi è pari a:

 Colombi Roversi & Associati Studio di Ingegneria	Comune	FERRARA (FE)	Comm. n°		Revisioni			
	Progetto	ORD.35/2024 - INVESTIMENTO PNRR M2C4 2.1.a FINANZIATO NEXTGENERATION EU MESSA IN SICUREZZA IMPIANTO IDROVORO CITTADINO PER LA LAMINAZIONE DELLE PORTATE DI PIENA DEL RETICOLO IDRAULICO DI BONIFICA ID INTERVENTO ER-UBIS-000109 CUP J78H24000430007	CRA25003	0				
			Doc. n° ALL. 4					
RELAZIONE GEOTECNICA, SIMICA, VERIFICA OPERE DI FONDAZIONE			Fg. 71	Di 74	Compilato A.C.		Data APR.2025	

Diametro di progetto del palo $D = 0.150\text{ m}$

I valori di portata laterale e di base derivanti dal calcolo secondo quanto descritto prima sono riportati nella seguente tabella:

Strato	Spessore	cu kPa	Nspt	qs,i kPa	Qs,i kN
A	9,5	35		46,6	208,39
B	3,5	60		73,2	120,73
C	2			60,0	56,55
0	0	0		0,0	0,00
0	0	0		0,0	0,00
Portata laterale di calcolo				Qs,cla	385,67 kN
Portata di base di calcolo				Qb,cal	57,85 kN

Metodo di installazione	DM 17.01.2018		
Micropalo tipo IGU	Fattori parziali sui parametri del terreno (M)		
Caratteristiche del palo			
D	0,15 m	γ_{ψ}	1 (angolo di resistenza a taglio)
L	15 m	γ_{cu}	1 (resistenza a taglio non drenata)
γ_{ds}	25 kN/m ³		
		Fattori parziali sulle resistenze (R)	
Ab	0,0177 m ²	γ_b	1,35 (portata base)
		γ_s	1,15 (portata laterale)
		γ_{st}	1,25 (portata laterale trazione)
		Fattori parziali sulle azioni (A)	
Approccio alla progettazione		γ_{G1}	1,3 sfav
DA2		γ_{Q1}	1,5
Set Fattori parziali		γ_{G1}	1 fav
A1+M1+R3		N. verticali indagate 1	
		Fattori di correlazione	
		ξ_{-3}	1,7
		ξ_{-4}	1,7

Portata laterale caratteristica	Qs,k	226,9 kN
Portata di base caratteristica	Qb,k	34,0 kN
Portata laterale di progetto (compressione)	Qs,c,d	197,3 kN
Portata laterale di progetto (trazione)	Qs,t,d	181,5 kN
Portata di base di progetto	Qb,d	25,2 kN
Peso proprio del palo di progetto	Wp,d	8,6 kN
PORTATA TOTALE DI PROGETTO (compressione) (depurata del peso proprio del palo)	Qtot,c,d	211,3 kN
PORTATA TOTALE DI PROGETTO (trazione) (compreso contributo del peso proprio del palo)	Qtot,t,d	187,5 kN

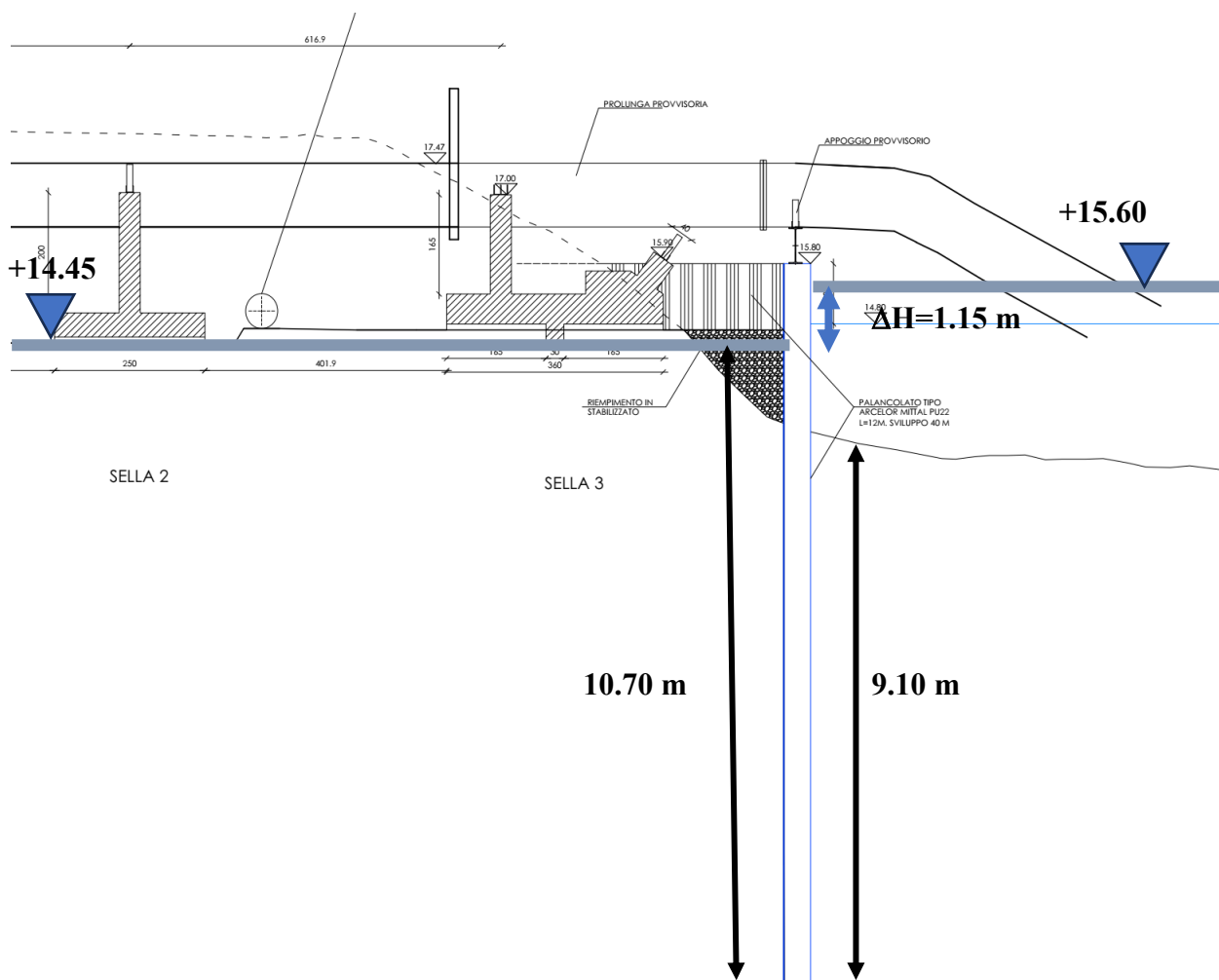
 Colombi Roversi & Associati Studio di Ingegneria	Comune	FERRARA (FE)	Comm. n°	Revisioni				
	Progetto	ORD.35/2024 - INVESTIMENTO PNRR M2C4 2.1.a FINANZIATO NEXTGENERATION EU MESSA IN SICUREZZA IMPIANTO IDROVORO CITTADINO PER LA LAMINAZIONE DELLE PORTATE DI PIENA DEL RETICOLO IDRAULICO DI BONIFICA ID INTERVENTO ER-UBIS-000109 CUP J78H24000430007	CRA25003	0				
			Doc. n°	ALL. 4				
RELAZIONE GEOTECNICA, SIMICA, VERIFICA OPERE DI FONDAZIONE			Fg. 72	Di 74	Compilato A.C.	Data APR.2025		

11. VERIFICA A SIFONAMENTO DURANTE LA FASE DI CANTIERE

Per la verifica a sifonamento durante la fase provvisoria di scavo si è valutata la condizione più sfavorevole ovvero:

- Livello pelo libero nel Boicelli a quota +15.60 (massima piena)
- Livello falda assunta cautelativamente a fondo scavo (nelle indagini è risultata in realtà 50 cm sotto il livello di fondo scavo)
- Percorso di filtrazione minimo lungo il palancoato pari a 19.8m (AB)
- Differenza di carico idraulico pari a 1.15 m (ΔH)

La seguente immagine mostra la geometria della sezione utilizzata per il calcolo



Geometria della sezione utilizzata per il calcolo delle analisi di filtrazione

 Colombi Roversi &Associati Studio di Ingegneria	Comune	FERRARA (FE)	Comm. n°		Revisioni				
	Progetto	ORD.35/2024 - INVESTIMENTO PNRR M2C4 2.1.a FINANZIATO NEXTGENERATION EU MESSA IN SICUREZZA IMPIANTO IDROVORO CITTADINO PER LA LAMINAZIONE DELLE PORTATE DI PIENA DEL RETICOLO IDRAULICO DI BONIFICA ID INTERVENTO ER-UBIS-000109 CUP J78H24000430007	CRA25003		0				
			Doc. n°		ALL. 4				
RELAZIONE GEOTECNICA, SIMICA, VERIFICA OPERE DI FONDAZIONE			Fg.	Di	Compilato		Data		
			73	74	A.C.		APR.2025		

Il gradiente idraulico critico è pari a:

$$i_c = \frac{\gamma'}{\gamma_w} = \frac{\gamma - \gamma_w}{\gamma_w}$$

Dove:

γ' = peso alleggerito per unità di volume del terreno per il quale si sta valutando il gradiente idraulico

γ_w = peso per unità di volume dell'acqua

Ovvero:

$$i_c = \frac{\gamma'}{\gamma_w} = \frac{18.5 \frac{kN}{m^3} - 9.81 \frac{kN}{m^3}}{9.81 \frac{kN}{m^3}} = 0.89$$

Il gradiente di efflusso è pari a:

$$i_e = \frac{\Delta H}{\overline{AB}} = \frac{1.15}{19.8} = 0.058 \quad (1)$$

Dove:

ΔH : differenza di carico piezometrico (1.15m)

$\overline{AB}$: percorso di filtrazione (19.8m)

Il fattore di sicurezza a sifonamento, valutato al disotto del fondo scavo, si ottiene dai seguenti rapporti:

$$FS_I = \frac{i_c}{i_e} = \frac{0.89}{0.058} = 15.3$$

Affinché sia garantito un adeguato margine di sicurezza nei confronti dei fenomeni di sifonamento, ai sensi della normativa vigente, il FS deve risultare maggiore a 2 dato che un eventuale collasso dovuto a sifonamento può manifestarsi in maniera improvvisa e senza consentire quindi adeguate misure di messa in sicurezza.

 Colombi Roversi &Associati Studio di Ingegneria	Comune	FERRARA (FE)	Comm. n°		Revisioni			
	Progetto	ORD.35/2024 - INVESTIMENTO PNRR M2C4 2.1.a FINANZIATO NEXTGENERATION EU MESSA IN SICUREZZA IMPIANTO IDROVORO CITTADINO PER LA LAMINAZIONE DELLE PORTATE DI PIENA DEL RETICOLO IDRAULICO DI BONIFICA ID INTERVENTO ER-UBIS-000109 CUP J78H24000430007	CRA25003	0				
			Doc. n°		ALL. 4			
RELAZIONE GEOTECNICA, SIMICA, VERIFICA OPERE DI FONDAZIONE			Fg. 74	Di 74	Compilato A.C.		Data APR.2025	

La verifica a sifonamento risulta soddisfatta con ampio margine di sicurezza.