



# COMUNE DI JOLANDA DI SAVOIA

## PROVINCIA DI FERRARA

### INTERVENTI STRUTTURALI DI MESSA IN SICUREZZA GENERALE E ADEGUAMENTO SISMICO ISTITUTO DON CHENDI - INFANZIA, PRIMARIA, MEDIA



## PROGETTO ESECUTIVO

CUP: C96F18000030005

Elaborato

**R-RGT**

**PROGETTO STRUTTURALE**

Data 09/04/2019

Oggetto Elaborato:

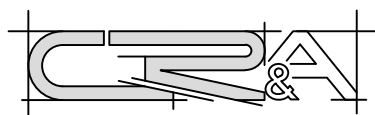
Relazione geotecnica, sismica, verifica opere di fondazione

Il Responsabile Unico del Procedimento

Geom. Luca Zannicolò

Progettista:  
Ing. Ottavia Vitarelli

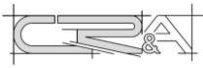
Gruppo di lavoro:  
Ing. Marco Roversi  
Ing. Alessio Colombi



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

Coordinamento Sicurezza:

Geom. Andrea Guidi  
Via IV Novembre, 54  
44021 Codigoro (FE)

 <b>Colombi Roversi &amp; Associati</b> <b>Studio di Ingegneria</b>	Comune	<b>JOLANDA DI SAVOIA (FE)</b>	Comm. n°		Revisioni			
	Progetto	<b>INTERVENTI STRUTTURALI DI MESSA IN SICUREZZA GENERALE E ADEGUAMENTO SISMICO ISTITUTO "DON CHENDI" - INFANZIA, PRIMARIA, MEDIA</b>	<b>CRA18022</b>		0			
			Doc. n°		<b>RGT</b>			
<b>RELAZIONE GEOTECNICA, SISMICA, CALCOLO DELLE OPERE DI FONDAZIONE</b>			Fg.	Di	Compilato	Data		
			<b>2</b>	<b>57</b>	<b>A.C.</b>	<b>MAR.2019</b>		

## 1. DOCUMENTI DI RIFERIMENTO

Normative e raccomandazioni:

1. D.M. 17 gennaio 2018 – Aggiornamento delle 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 D.M. 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.
8. Gruppo di Lavoro MPS (2004). Redazione della Mappa di Pericolosità Sismica prevista dall'Ordinanza PCM 3274 del 20 marzo. Rapporto Conclusivo per il Dipartimento della Protezione Civile, INGV, Milano-Roma, aprile 2004.
9. Gruppo di lavoro CPTI (2004). Catalogo Parametrico dei Terremoti Italiani, versione 2004 (CPTI04), INGV, Bologna.
10. Stucchi et al. (2007). DBMI04, il database delle osservazioni macrosismiche dei terremoti italiani utilizzate per la compilazione del catalogo parametrico CPTI04. Quaderni di Geofisica, INGV.

Documenti tecnici di riferimento:

- a. Geol. Thomas Veronese (Settembre 2014). Modellazione geologica e geotecnica.

 <b>Colombi Roversi &amp; Associati</b> <b>Studio di Ingegneria</b>	Comune	<b>JOLANDA DI SAVOIA (FE)</b>	Comm. n°	Revisioni			
	Progetto	<b>INTERVENTI STRUTTURALI DI MESSA IN SICUREZZA GENERALE E ADEGUAMENTO SISMICO ISTITUTO "DON CHENDI" - INFANZIA, PRIMARIA, MEDIA</b>	<b>CRA18022</b>	0			
			Doc. n°	<b>RGT</b>			
<b>RELAZIONE GEOTECNICA, SISMICA, CALCOLO DELLE OPERE DI FONDAZIONE</b>			Fg.	Di	Compilato	Data	
			<b>3</b>	<b>57</b>	<b>A.C.</b>	<b>MAR.2019</b>	

## **2. INTRODUZIONE**

### ***Descrizione del progetto***

La presente relazione prende in esame la caratterizzazione geotecnica e sismica del sito ed il progetto delle opere di fondazione del nuovo fabbricato che si intende realizzare.

### ***Classe della costruzione***

Il fabbricato in oggetto è classificato di classe IV, vita utile 50 anni, Coefficiente d'uso  $C_u=2$ , vita di riferimento  $V_R = 50 \times 2 = 100$  anni.

## **3 CARATTERIZZAZIONE GEOTECNICA E SISMICA DEL SITO**

### **3.1 Indagini di riferimento**

Le indagini in sito effettuate sono consistite nell'esecuzione di una verticale penetrometrica con punta elettrica e piezocono spinta fino alla profondità di 30m eseguita nel 2014 nell'area cortiliva del complesso oggetto di valutazione.

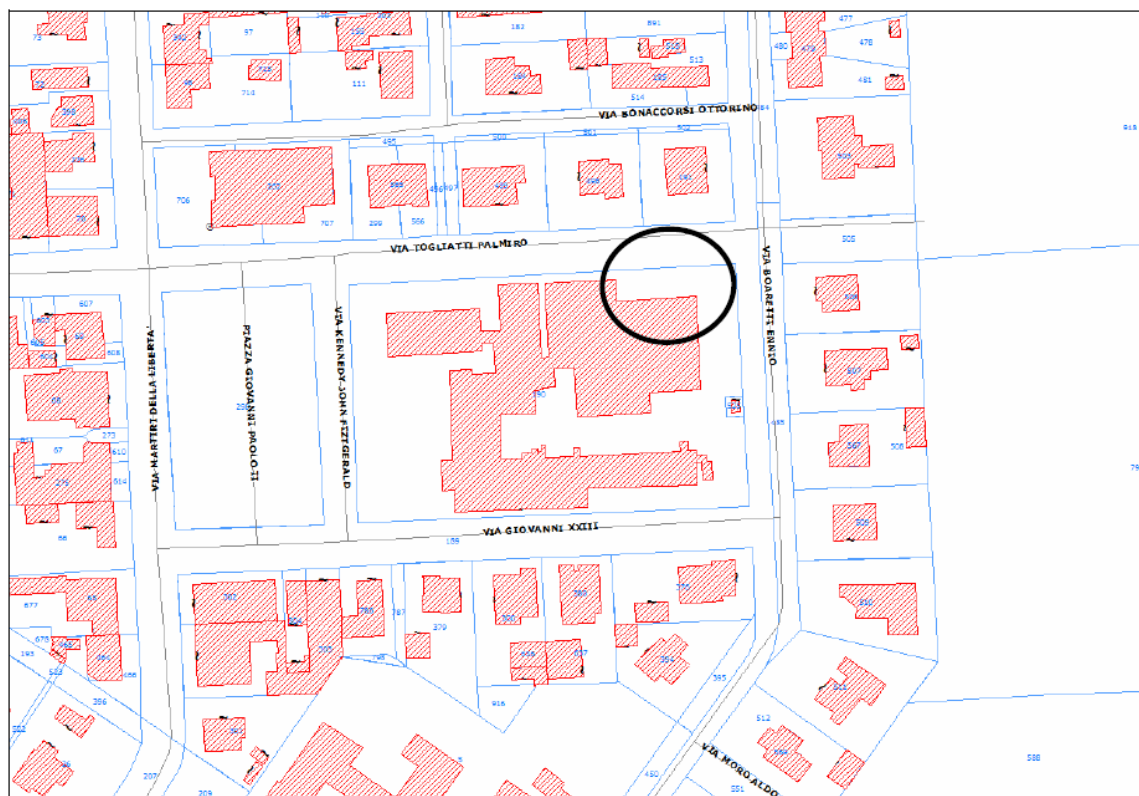
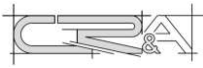


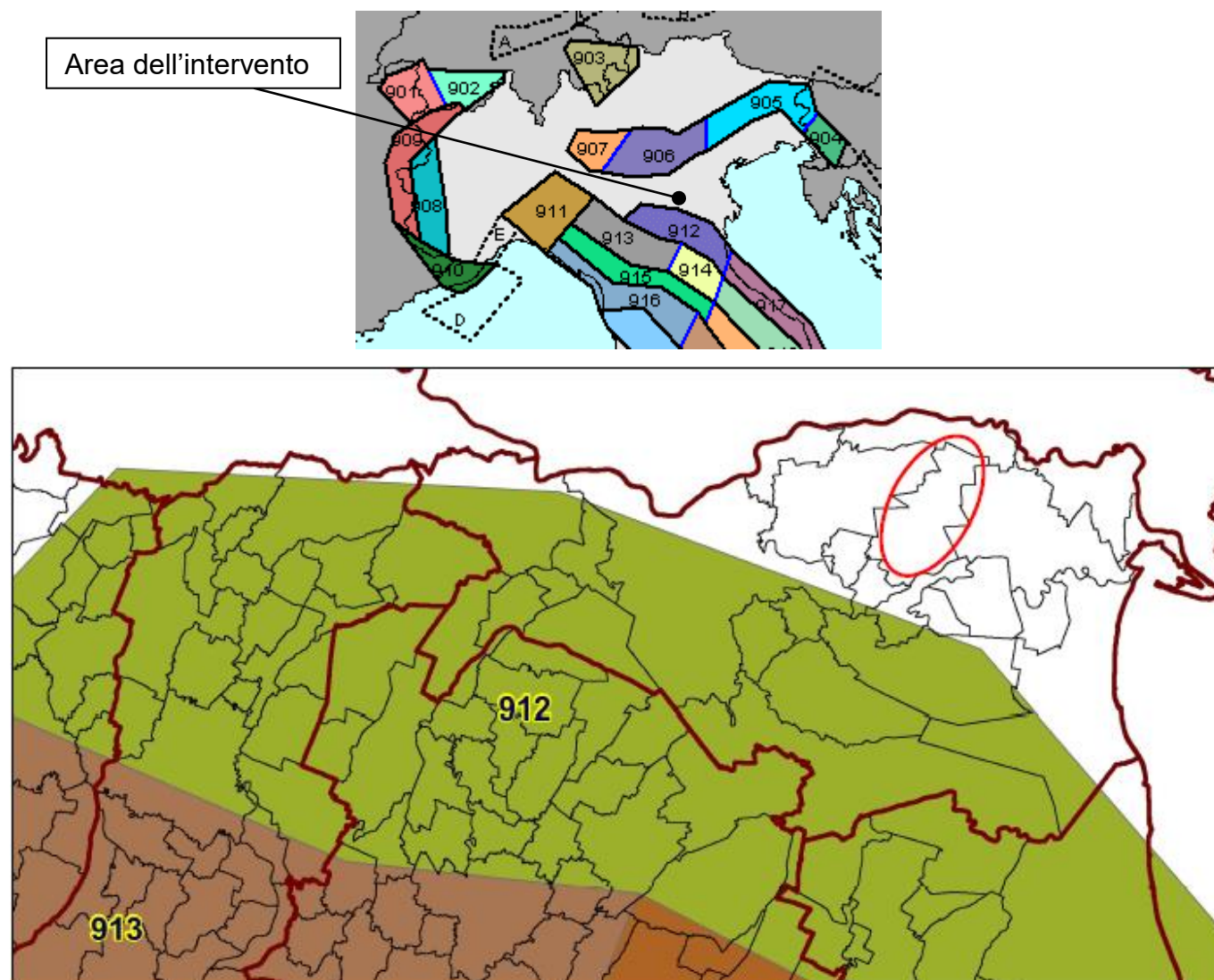
Figura 3.1.1. Ubicazione della verticale di indagine (tratta da Geol. Veronese)

 <b>Colombi Roversi &amp; Associati</b> <b>Studio di Ingegneria</b>	Comune	<b>JOLANDA DI SAVOIA (FE)</b>	Comm. n°	Revisioni			
	Progetto	<b>INTERVENTI STRUTTURALI DI MESSA IN SICUREZZA GENERALE E ADEGUAMENTO SISMICO ISTITUTO "DON CHENDI" - INFANZIA, PRIMARIA, MEDIA</b>	<b>CRA18022</b>	0			
<b>RELAZIONE GEOTECNICA, SISMICA, CALCOLO DELLE OPERE DI FONDAZIONE</b>			Doc. n°	<b>RGT</b>			
			Fg. 4	Di 57	Compilato A.C.	Data MAR.2019	

### 3.2 Definizione dei caratteri sismici di base dell'area

#### **Definizione della Magnitudo di progetto**

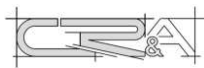
Come mostrato in figura 3.2.1 il sito ricade all'esterno del confine con la zona sismogenetica denominata ZS912 (Dorsale Ferrarese) della zonazione ZS9 dell'INGV.



*Figura 3.2.1. Definizione della zona sismogenetica dell'area*

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.

 Colombi Roversi & Associati Studio di Ingegneria	Comune	<b>JOLANDA DI SAVOIA (FE)</b>		Comm. n°		Revisioni				
	Progetto	<b>INTERVENTI STRUTTURALI DI MESSA IN SICUREZZA GENERALE E ADEGUAMENTO SISMICO ISTITUTO "DON CHENDI" - INFANZIA, PRIMARIA, MEDIA</b>		<b>CRA18022</b>		0				
				Doc. n°		<b>RGT</b>				
<b>RELAZIONE GEOTECNICA, SISMICA, CALCOLO DELLE OPERE DI FONDAZIONE</b>				Fg.	Di	Compilato	Data			
				<b>5</b>	<b>57</b>	<b>A.C.</b>	<b>MAR.2019</b>			

Sulla base dei terremoti riportati nel catalogo parametrico CPTI04 e riportati in tabella 3.2.1, 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 3.2.1 sono riportate sia le magnitudo di momento sismico  $M_w$  che la magnitudo delle onde di superficie  $M_s$ .

La figura 3.2.2 mostra la regressione condotta utilizzando l'approccio di Gutenberg-Richter ai valori di magnitudo di momento dei terremoti definiti in tabella 3.2.1. Tale approccio ha lo scopo di definire una legge che legghi 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	JOLANDA DI SAVOIA (FE)	Comm. n°		Revisioni				
	Progetto	INTERVENTI STRUTTURALI DI MESSA IN SICUREZZA GENERALE E ADEGUAMENTO SISMICO ISTITUTO "DON CHENDI" - INFANZIA, PRIMARIA, MEDIA	CRA18022		0				
			Doc. n°  RGT						
RELAZIONE GEOTECNICA, SISMICA, CALCOLO DELLE OPERE DI FONDAZIONE			Fg.	Di	Compilato	Data			
			6	57	A.C.	MAR.2019			

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 SUD	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 3.2.1. Catalogo dei terremoti relativi alla ZS912.

 <b>Colombi Roversi &amp; Associati</b> <b>Studio di Ingegneria</b>	Comune	<b>JOLANDA DI SAVOIA (FE)</b>	Comm. n°	Revisioni			
	Progetto	<b>INTERVENTI STRUTTURALI DI MESSA IN SICUREZZA GENERALE E ADEGUAMENTO SISMICO ISTITUTO "DON CHENDI" - INFANZIA, PRIMARIA, MEDIA</b>	<b>CRA18022</b>	0			
<b>RELAZIONE GEOTECNICA, SISMICA, CALCOLO DELLE OPERE DI FONDAZIONE</b>			Doc. n°	<b>RGT</b>			
			Fg. 7	Di 57	Compilato A.C.	Data MAR.2019	

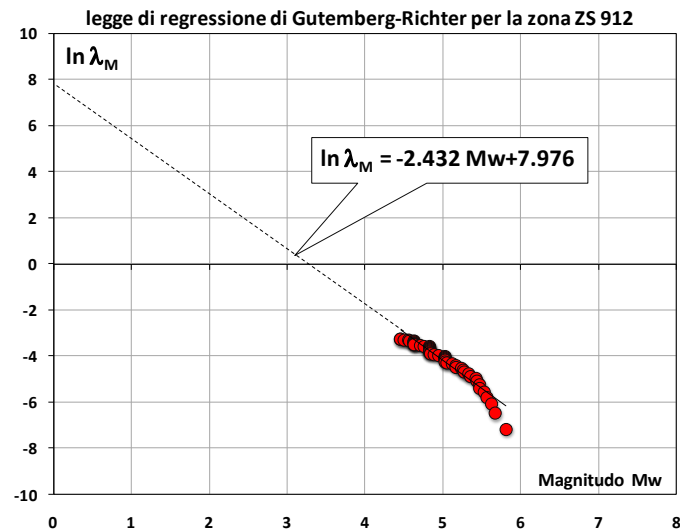


Figura 3.2.2. Retta di regressione della magnitudo di momento  $M_w$  secondo la legge di Gutenberg-Richter per la zona ZS912.

( $\lambda_M = 1/Tr$  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.

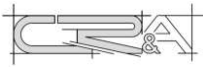
Sulla base dei parametri ottenuti dalla legge di regressione mostrata in figura 3.2.2 la magnitudo di riferimento risulta pari a:

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

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:

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



 <b>Colombi Roversi &amp; Associati</b> <b>Studio di Ingegneria</b>	Comune	<b>JOLANDA DI SAVOIA (FE)</b>	Comm. n°	Revisioni				
	Progetto	<b>INTERVENTI STRUTTURALI DI MESSA IN SICUREZZA GENERALE E ADEGUAMENTO SISMICO ISTITUTO "DON CHENDI" - INFANZIA, PRIMARIA, MEDIA</b>	<b>CRA18022</b>	0				
			Doc. n°	<b>RGT</b>				
<b>RELAZIONE GEOTECNICA, SISMICA, CALCOLO DELLE OPERE DI FONDAZIONE</b>			Fg.	Di	Compilato	Data		
			<b>8</b>	<b>57</b>	<b>A.C.</b>	<b>MAR.2019</b>		

Poiché l'area risulta esterna dalla zona sismogenetica come da relazione geologica si assumerà nelle valutazioni anche una magnitudo pari a 5.5.

### Definizione dell'accelerazione al suolo di progetto

In accordo al D.M. 17.01.2018 l'accelerazione del sito di interesse può essere ricavata per interpolazione dei valori del reticolo di riferimento utilizzando i valori di latitudine e longitudine corrispondenti.

Di seguito vengono riportati i parametri sismici corrispondenti al sito indagato in base alle corrispondenti coordinate geografiche e alla vita di riferimento definita precedentemente.

Sito in esame.

latitudine: 44,885073

longitudine: 11,981662

Classe: 4

Vita nominale:50

Siti di riferimento

Sito 1 ID: 15185 Lat: 44,8748 Lon: 11,9389 Distanza: 3554,306

Sito 2 ID: 15186 Lat: 44,8757 Lon: 12,0094 Distanza: 2421,999

Sito 3 ID: 14964 Lat: 44,9257 Lon: 12,0082 Distanza: 4975,900

Sito 4 ID: 14963 Lat: 44,9248 Lon: 11,9377 Distanza: 5613,196

Parametri sismici

Categoria sottosuolo: D

Categoria topografica: T1

Periodo di riferimento: 100anni

Coefficiente cu: 2

Operatività (SLO):

Probabilità di superamento: 81 %

Tr: 60 [anni]

ag: 0,039 g



 Colombi Roversi & Associati Studio di Ingegneria	Comune	JOLANDA DI SAVOIA (FE)	Comm. n°		Revisioni			
	Progetto	INTERVENTI STRUTTURALI DI MESSA IN SICUREZZA GENERALE E ADEGUAMENTO SISMICO ISTITUTO "DON CHENDI" - INFANZIA, PRIMARIA, MEDIA	CRA18022		0			
			Doc. n°		RGT			
RELAZIONE GEOTECNICA, SISMICA, CALCOLO DELLE OPERE DI FONDAZIONE			Fg.	Di	Compilato	Data		
			9	57	A.C.	MAR.2019		

Fo: 2,565

Tc\*: 0,280 [s]

Danno (SLD):

Probabilità di superamento: 63 %

Tr: 101 [anni]

ag: 0,046 g

Fo: 2,564

Tc\*: 0,302 [s]

Salvaguardia della vita (SLV):

Probabilità di superamento: 10 %

Tr: 949 [anni]

ag: 0,102 g

Fo: 2,602

Tc\*: 0,334 [s]

Prevenzione dal collasso (SLC):

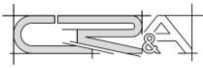
Probabilità di superamento: 5 %

Tr: 1950 [anni]

ag: 0,127 g

Fo: 2,623

Tc\*: 0,339 [s]

 <b>Colombi Roversi &amp; Associati</b> <b>Studio di Ingegneria</b>	Comune	<b>JOLANDA DI SAVOIA (FE)</b>	Comm. n°	Revisioni				
	Progetto	<b>INTERVENTI STRUTTURALI DI MESSA IN SICUREZZA GENERALE E ADEGUAMENTO SISMICO ISTITUTO "DON CHENDI" - INFANZIA, PRIMARIA, MEDIA</b>	<b>CRA18022</b>	0				
			Doc. n°	<b>RGT</b>				
<b>RELAZIONE GEOTECNICA, SISMICA, CALCOLO DELLE OPERE DI FONDAZIONE</b>			Fg. <b>10</b>	Di <b>57</b>	Compilato <b>A.C.</b>	Data <b>MAR.2019</b>		

### **3.3 Caratterizzazione geotecnica e sismica dei siti indagati**

#### 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 ai tipi litologici da valori di letteratura in base alle indicazioni fornite da Robertson (1990).

#### 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)

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

 <b>Colombi Roversi &amp; Associati</b> <b>Studio di Ingegneria</b>	Comune	<b>JOLANDA DI SAVOIA (FE)</b>	Comm. n°	Revisioni				
	Progetto	<b>INTERVENTI STRUTTURALI DI MESSA IN SICUREZZA GENERALE E ADEGUAMENTO SISMICO ISTITUTO "DON CHENDI" - INFANZIA, PRIMARIA, MEDIA</b>	<b>CRA18022</b>	0				
			Doc. n°	<b>RGT</b>				
<b>RELAZIONE GEOTECNICA, SISMICA, CALCOLO DELLE OPERE DI FONDAZIONE</b>			Fg. <b>11</b>	Di <b>57</b>	Compilato <b>A.C.</b>	Data <b>MAR.2019</b>		

- Resistenza al taglio non drenata in funzione della resistenza alla punta in base alla relazione  $c_u = (q_c - \sigma_{v0}) / N_k$ , con  $\sigma_{v0}$  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 Lunne et al (1997)
- 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  $RR=0.01$ .

### Classificazione sismica del sito

La classificazione sismica del sito, in ottemperanza a quanto previsto dal DM 14.01.2008, è stata fatta sulla base della determinazione della velocità di propagazione delle onde taglio equivalente nei primi 30 m di profondità avendo a disposizione le misure dirette del cono sismico.

Noto l'andamento di  $V_s$  in base alla correlazione indicata è stato ricavato il valore di  $V_{s,30}$  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

### Verifica a liquefazione

 <b>Colombi Roversi &amp; Associati</b> <b>Studio di Ingegneria</b>	Comune	<b>JOLANDA DI SAVOIA (FE)</b>	Comm. n°		Revisioni			
	Progetto	<b>INTERVENTI STRUTTURALI DI MESSA IN SICUREZZA GENERALE E ADEGUAMENTO SISMICO ISTITUTO "DON CHENDI" - INFANZIA, PRIMARIA, MEDIA</b>	<b>CRA18022</b>		0			
			Doc. n°		<b>RGT</b>			
<b>RELAZIONE GEOTECNICA, SISMICA, CALCOLO DELLE OPERE DI FONDAZIONE</b>			Fg.	Di	Compilato	Data		
			<b>12</b>	<b>57</b>	<b>A.C.</b>	<b>MAR.2019</b>		

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, fondamentale 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

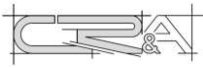
$\sigma_v$  = tensione totale alla profondità considerata

$\sigma'_v$  = 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. (200).

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  $K_\alpha$  e  $K_\sigma$  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 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).

 <b>Colombi Roversi &amp; Associati</b> <b>Studio di Ingegneria</b>	Comune	<b>JOLANDA DI SAVOIA (FE)</b>	Comm. n°	Revisioni			
	Progetto	<b>INTERVENTI STRUTTURALI DI MESSA IN SICUREZZA GENERALE E ADEGUAMENTO SISMICO ISTITUTO "DON CHENDI" - INFANZIA, PRIMARIA, MEDIA</b>	<b>CRA18022</b>	0			
<b>RELAZIONE GEOTECNICA, SISMICA, CALCOLO DELLE OPERE DI FONDAZIONE</b>			Doc. n°	<b>RGT</b>			
			Fg. 13	Di 57	Compilato A.C.	Data MAR.2019	

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 precedentemente.

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:

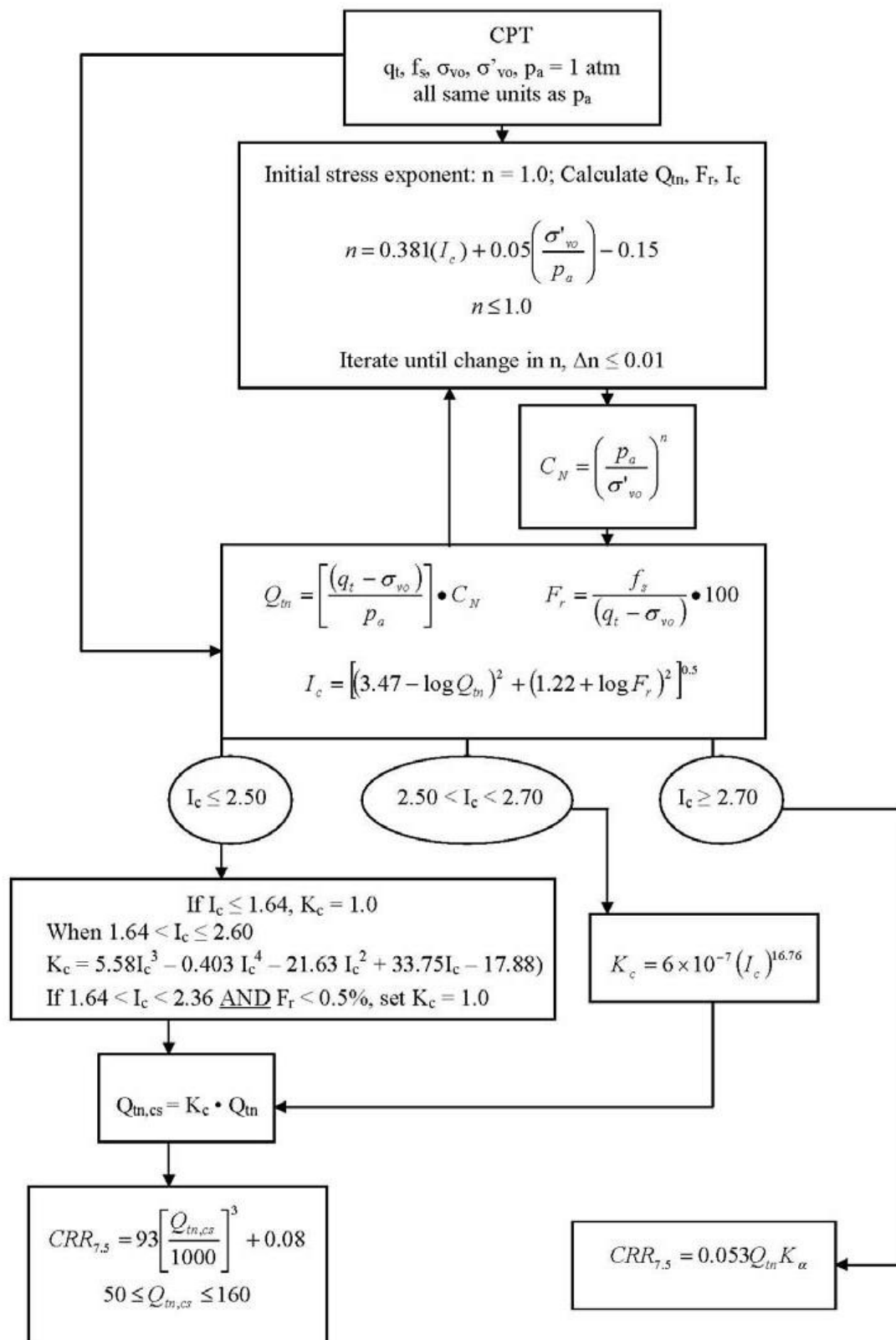
1. Il profilo con la profondità della resistenza a liquefazione espressa in termini di indice di resistenza ciclica (CRR).
2. Il profilo con la profondità del fattore di sicurezza a liquefazione FSL per terremoti per le magnitudo considerate.

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  $I_c < 2.6$ )
- 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).

 <b>Colombi Roversi &amp; Associati</b> <b>Studio di Ingegneria</b>	Comune	<b>JOLANDA DI SAVOIA (FE)</b>	Comm. n°	Revisioni			
	Progetto	<b>INTERVENTI STRUTTURALI DI MESSA IN SICUREZZA GENERALE E ADEGUAMENTO SISMICO ISTITUTO "DON CHENDI" - INFANZIA, PRIMARIA, MEDIA</b>	<b>CRA18022</b>	0			
<b>RELAZIONE GEOTECNICA, SISMICA, CALCOLO DELLE OPERE DI FONDAZIONE</b>			Doc. n°	<b>RGT</b>			
			Fg. 14	Di 57	Compilato A.C.	Data MAR.2019	



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

 <b>Colombi Roversi &amp; Associati</b> <b>Studio di Ingegneria</b>	Comune	<b>JOLANDA DI SAVOIA (FE)</b>	Comm. n°	Revisioni			
	Progetto	<b>INTERVENTI STRUTTURALI DI MESSA IN SICUREZZA GENERALE E ADEGUAMENTO SISMICO ISTITUTO "DON CHENDI" - INFANZIA, PRIMARIA, MEDIA</b>	<b>CRA18022</b>	0			
			Doc. n°	<b>RGT</b>			
<b>RELAZIONE GEOTECNICA, SISMICA, CALCOLO DELLE OPERE DI FONDAZIONE</b>			Fg.	Di	Compilato	Data	
			<b>15</b>	<b>57</b>	<b>A.C.</b>	<b>MAR.2019</b>	

## Calcolo dei cedimenti post-sismici

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*

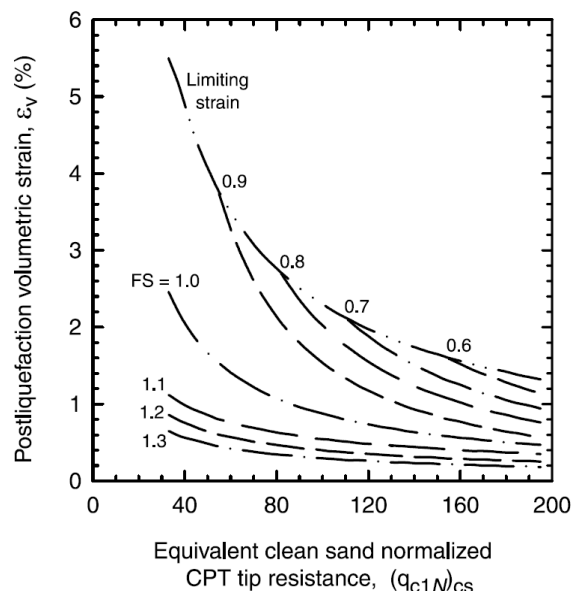
Il calcolo del cedimento post-sismico dei terreni granulari riguarda la valutazione dell'addensamento degli strati liquefacibili compresi nei primi 20m di profondità. I cedimenti sono stati valutati in accordo a Robertson (2009) attraverso la metodologia elaborata da Zhang et Al. (2002). Sulla base della 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:

$\varepsilon_v$  : deformazione post sismica indotta

$\Delta H$  : spessore iniziale dello strato





 <b>Colombi Roversi &amp; Associati</b> <b>Studio di Ingegneria</b>	Comune	<b>JOLANDA DI SAVOIA (FE)</b>	Comm. n°		Revisioni			
	Progetto	<b>INTERVENTI STRUTTURALI DI MESSA IN SICUREZZA GENERALE E ADEGUAMENTO SISMICO ISTITUTO "DON CHENDI" - INFANZIA, PRIMARIA, MEDIA</b>	<b>CRA18022</b>		0			
			Doc. n°		<b>RGT</b>			
<b>RELAZIONE GEOTECNICA, SISMICA, CALCOLO DELLE OPERE DI FONDAZIONE</b>			Fg.	Di	Compilato	Data		
			<b>16</b>	<b>57</b>	<b>A.C.</b>	<b>MAR.2019</b>		

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

#### *Terreni fini*

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)

$K_{\alpha}$ =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 pari a 5.81 e 6.14 ( $MSF=1$  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.

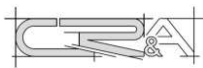
il cedimento corrispondente è stato ricavato applicando la seguente formula (Robertson, 2009):

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

Dove:

$\varepsilon_v$  : deformazione post sismica indotta

$\Delta H$  : spessore iniziale dello strato

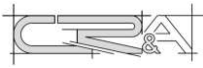
 Colombi Roversi & Associati Studio di Ingegneria	Comune	JOLANDA DI SAVOIA (FE)	Comm. n°		Revisioni				
	Progetto	INTERVENTI STRUTTURALI DI MESSA IN SICUREZZA GENERALE E ADEGUAMENTO SISMICO ISTITUTO "DON CHENDI" - INFANZIA, PRIMARIA, MEDIA	CRA18022		0				
			Doc. n°		RGT				
			RELAZIONE GEOTECNICA, SISMICA, CALCOLO DELLE OPERE DI FONDAZIONE		Fg.	Di	Compilato	Data	
			17	57	A.C.	MAR.2019			

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

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

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

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

 <b>Colombi Roversi &amp; Associati</b> <b>Studio di Ingegneria</b>	Comune	<b>JOLANDA DI SAVOIA (FE)</b>	Comm. n°	Revisioni				
	Progetto	<b>INTERVENTI STRUTTURALI DI MESSA IN SICUREZZA GENERALE E ADEGUAMENTO SISMICO ISTITUTO "DON CHENDI" - INFANZIA, PRIMARIA, MEDIA</b>	<b>CRA18022</b>	0				
<b>RELAZIONE GEOTECNICA, SISMICA, CALCOLO DELLE OPERE DI FONDAZIONE</b>			Doc. n°	<b>RGT</b>				
			Fg. 18	Di 57	Compilato A.C.	Data MAR.2019		

### 3.3.1 Risultati

#### Sequenza litostratigrafica

Nella figura 3.3.1.1 sono riportati i risultati di resistenza alla punta, di resistenza per attrito laterale, di variazione delle pressioni neutre e il rapporto di attrito con la profondità misurati nella verticale penetrometrica.

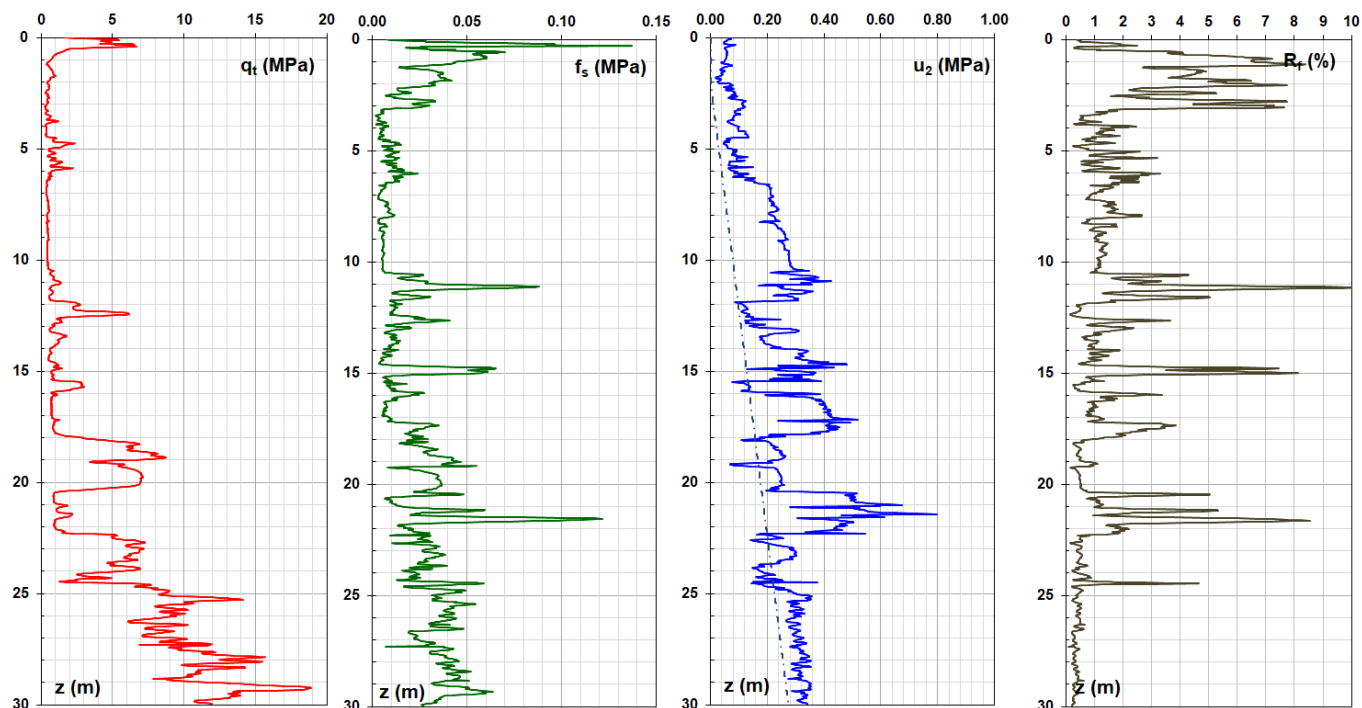


Figura 3.3.1.1. Andamento di  $q_c$  e  $f_s$  ed  $u$ .

La classificazione dei terreni ottenuta dalla prova penetrometrica mediante la correlazione adottata (Robertson, 1990) è riportata in dettaglio in figura 3.3.1.2.

 <b>Colombi Roversi &amp; Associati</b> Studio di Ingegneria	Comune	<b>JOLANDA DI SAVOIA (FE)</b>	Comm. n°	Revisioni			
	Progetto	<b>INTERVENTI STRUTTURALI DI MESSA IN SICUREZZA GENERALE E ADEGUAMENTO SISMICO ISTITUTO "DON CHENDI" - INFANZIA, PRIMARIA, MEDIA</b>	<b>CRA18022</b>	Doc. n°	<b>RGT</b>		
<b>RELAZIONE GEOTECNICA, SISMICA, CALCOLO DELLE OPERE DI FONDAZIONE</b>			Fg.	Di	Compilato	Data	
			<b>19</b>	<b>57</b>	<b>A.C.</b>	<b>MAR.2019</b>	

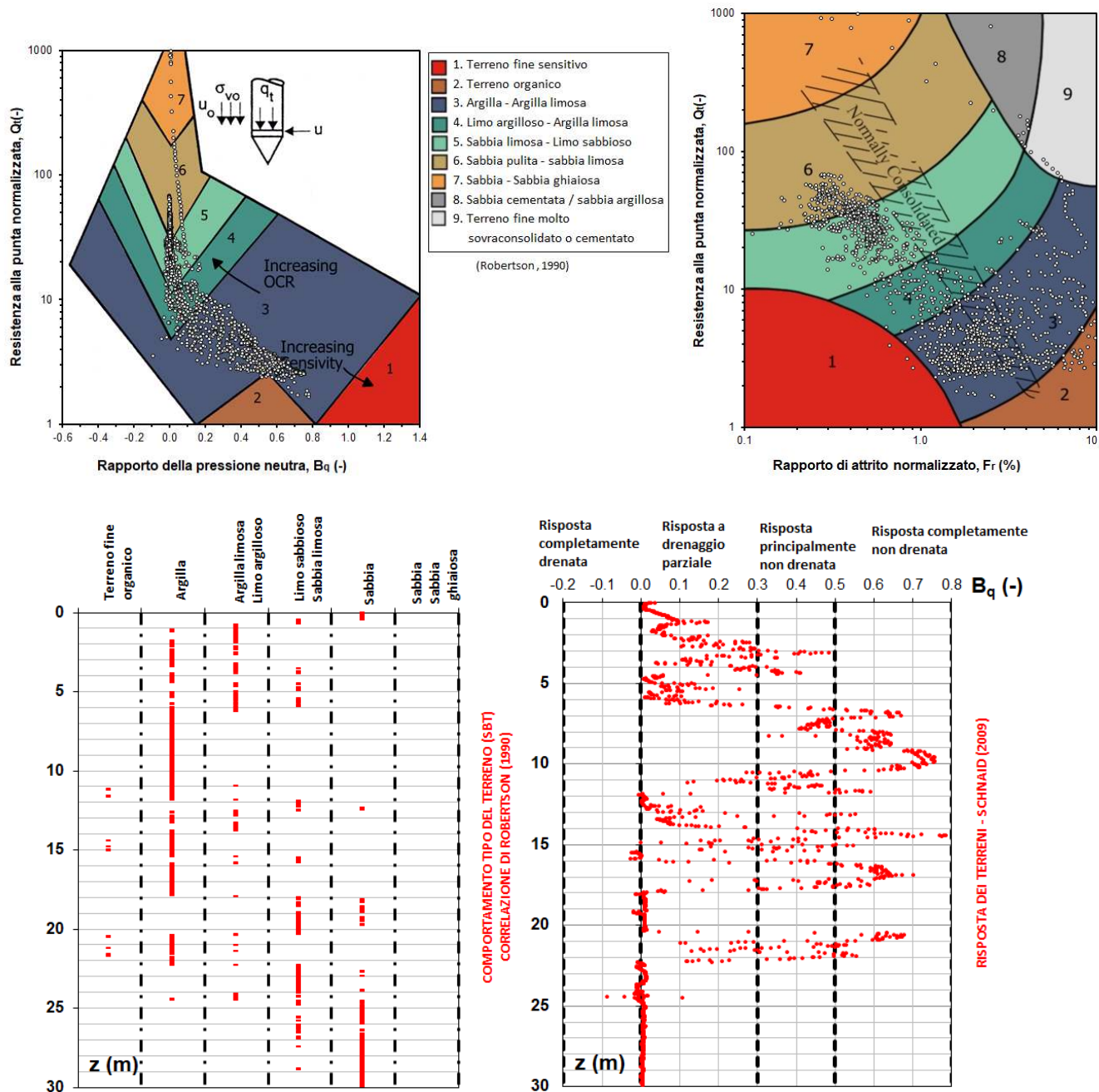


Figura 3.3.1.2. Classificazione dei terreni in base alla correlazione di Robertson (1990).

La falda freatica è stata individuata circa a quota 2 m di profondità da p.c. in base alle misure effettuate nel foro della prova penetrometrica.

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

 Colombi Roversi & Associati Studio di Ingegneria	Comune	JOLANDA DI SAVOIA (FE)	Comm. n°	Revisioni				
	Progetto	INTERVENTI STRUTTURALI DI MESSA IN SICUREZZA GENERALE E ADEGUAMENTO SISMICO ISTITUTO "DON CHENDI" - INFANZIA, PRIMARIA, MEDIA	CRA18022	0				
			Doc. n°  RGT					
RELAZIONE GEOTECNICA, SISMICA, CALCOLO DELLE OPERE DI FONDAZIONE			Fg. 20	Di 57	Compilato A.C.	Data MAR.2019		

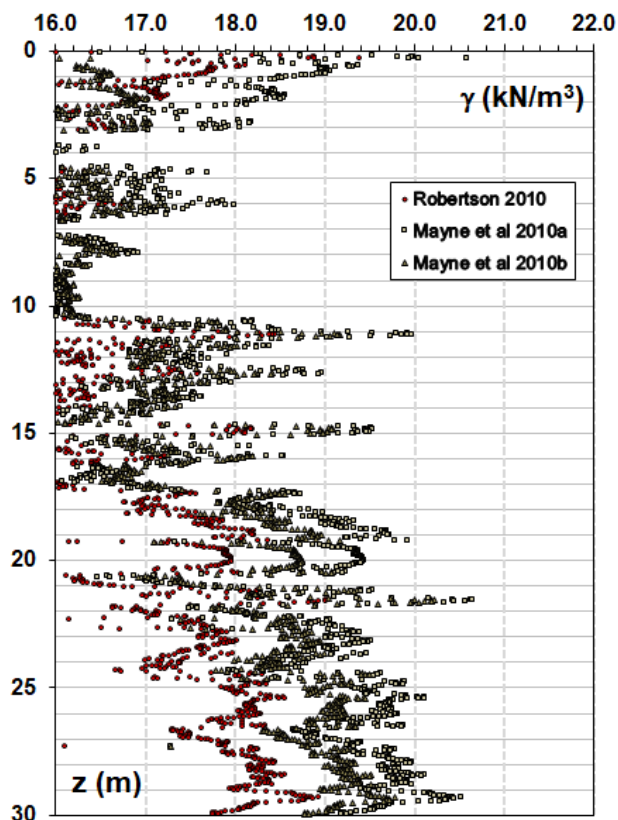
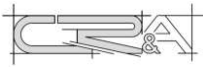


Figura 3.3.1.3. Peso per unità di volume dei terreni.

 <b>Colombi Roversi &amp; Associati</b> <b>Studio di Ingegneria</b>	Comune	<b>JOLANDA DI SAVOIA (FE)</b>	Comm. n°	Revisioni			
	Progetto	<b>INTERVENTI STRUTTURALI DI MESSA IN SICUREZZA GENERALE E ADEGUAMENTO SISMICO ISTITUTO "DON CHENDI" - INFANZIA, PRIMARIA, MEDIA</b>	<b>CRA18022</b>	0			
<b>RELAZIONE GEOTECNICA, SISMICA, CALCOLO DELLE OPERE DI FONDAZIONE</b>			Doc. n°	<b>RGT</b>			
			Fg. 21	Di 57	Compilato A.C.	Data MAR.2019	

### Parametri meccanici ed idraulici ottenuti dall'interpretazione della CPTu

Nelle figure che seguono sono riportati i parametri idraulici e meccanici dei terreni ottenuti in base alle correlazioni descritte precedentemente con i risultati della corrispondente verticale penetrometrica.

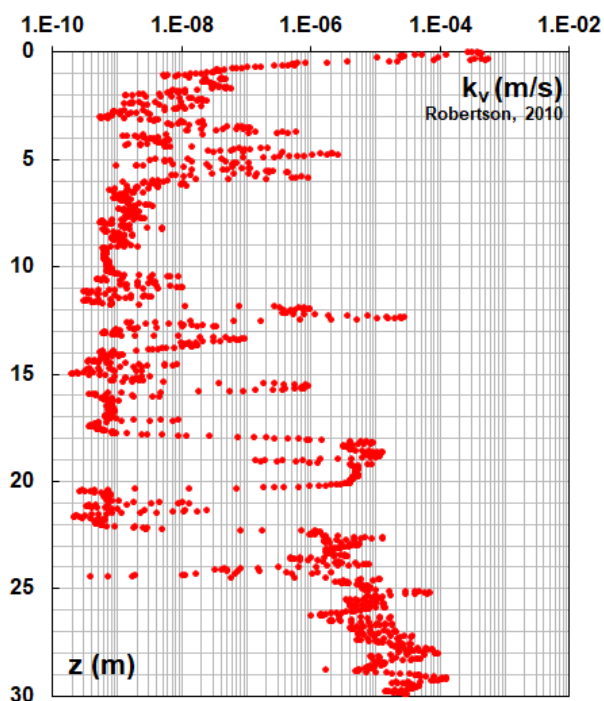
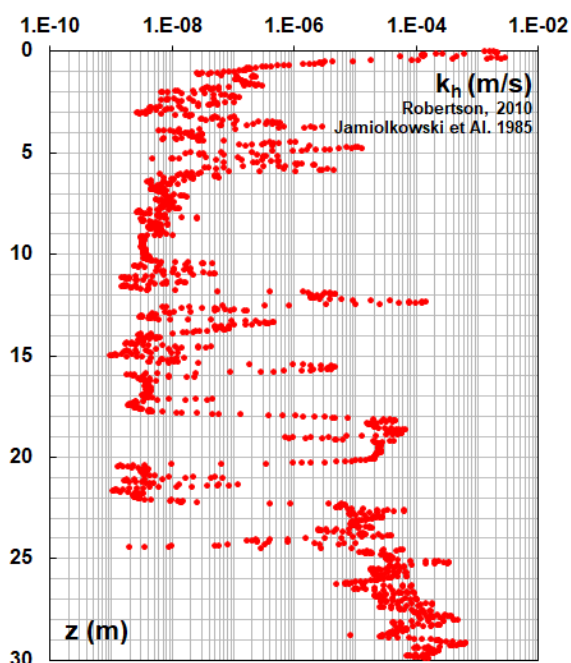


Figura 3.3.1.3. Andamento dei valori del coefficiente di conducibilità idraulica verticale con la profondità.



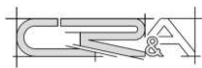
 Colombi Roversi & Associati Studio di Ingegneria	Comune	JOLANDA DI SAVOIA (FE)	Comm. n°	Revisioni				
	Progetto	INTERVENTI STRUTTURALI DI MESSA IN SICUREZZA GENERALE E ADEGUAMENTO SISMICO ISTITUTO "DON CHENDI" - INFANZIA, PRIMARIA, MEDIA	CRA18022	0				
			Doc. n°  RGT					
RELAZIONE GEOTECNICA, SISMICA, CALCOLO DELLE OPERE DI FONDAZIONE			Fg.	Di	Compilato	Data		
			22	57	A.C.	MAR.2019		

Figura 3.3.1.4. Andamento dei valori del coefficiente di conducibilità idraulica orizzontale con la profondità.

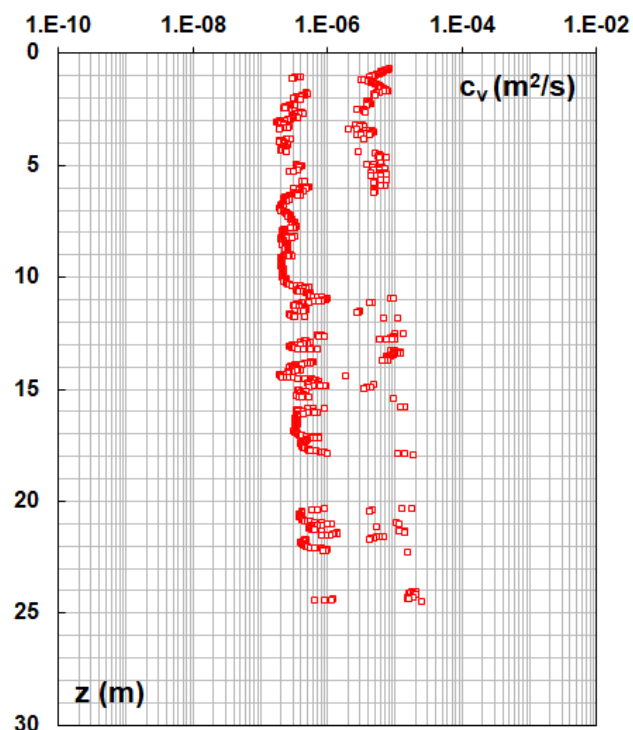
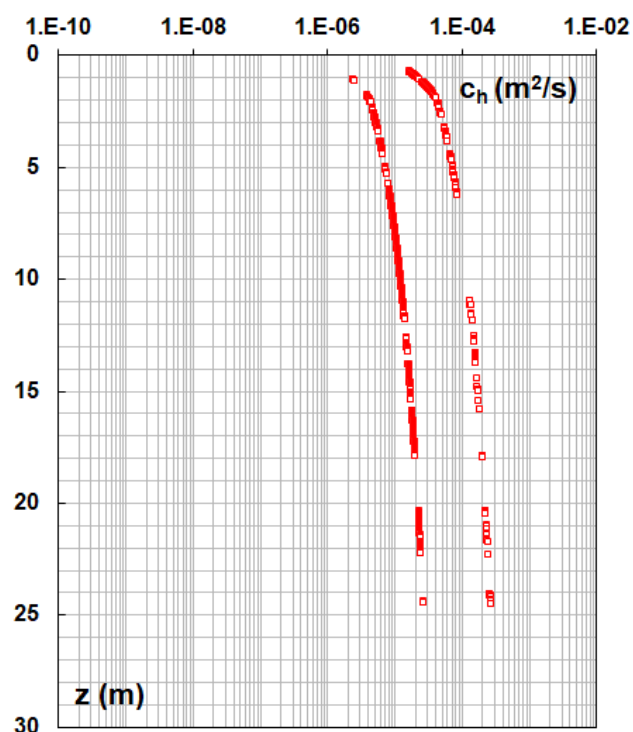


Figura 3.3.1.5. Andamento dei valori del coefficiente di consolidazione verticale con la profondità.





 Colombi Roversi & Associati Studio di Ingegneria	Comune	JOLANDA DI SAVOIA (FE)	Comm. n°		Revisioni				
	Progetto	INTERVENTI STRUTTURALI DI MESSA IN SICUREZZA GENERALE E ADEGUAMENTO SISMICO ISTITUTO "DON CHENDI" - INFANZIA, PRIMARIA, MEDIA	CRA18022		0				
			Doc. n°		RGT				
RELAZIONE GEOTECNICA, SISMICA, CALCOLO DELLE OPERE DI FONDAZIONE			Fg.	Di	Compilato	Data			
			23	57	A.C.	MAR.2019			

Figura 3.3.1.6. Andamento dei valori del coefficiente di consolidazione orizzontale con la profondità.

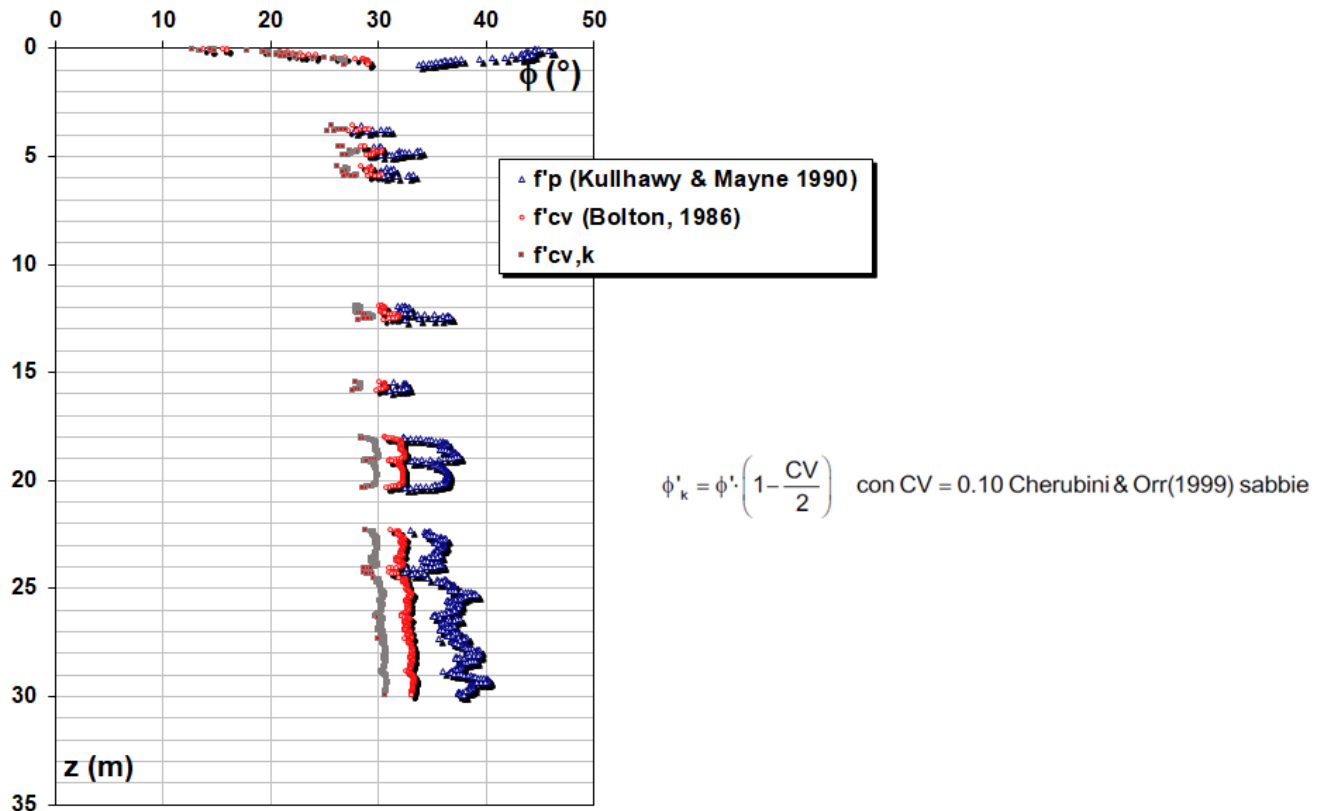
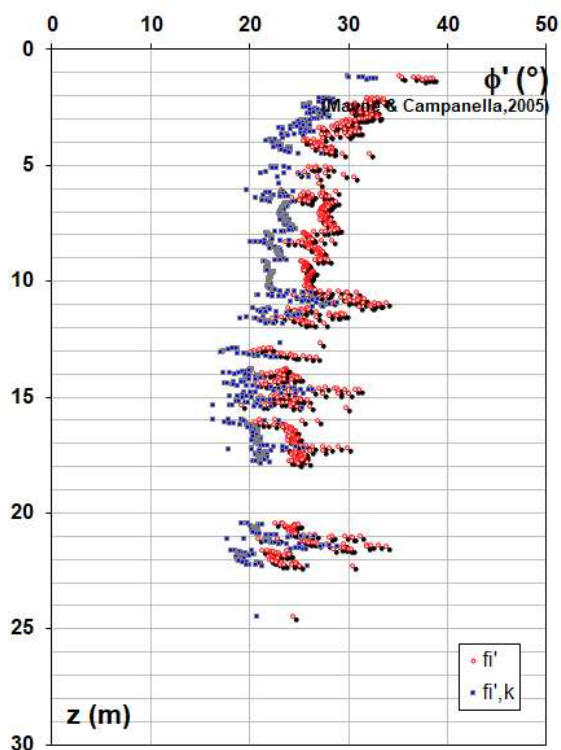


Figura 3.3.1.7. Terreni a grana grossa: andamento dei valori di angolo di resistenza a taglio di picco e a volume costante con la profondità.



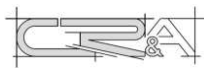
 Colombi Roversi & Associati Studio di Ingegneria	Comune	<b>JOLANDA DI SAVOIA (FE)</b>		Comm. n°		Revisioni				
	Progetto	<b>INTERVENTI STRUTTURALI DI MESSA IN SICUREZZA GENERALE E ADEGUAMENTO SISMICO ISTITUTO "DON CHENDI" - INFANZIA, PRIMARIA, MEDIA</b>		<b>CRA18022</b>		0				
				Doc. n°		<b>RGT</b>				
<b>RELAZIONE GEOTECNICA, SISMICA, CALCOLO DELLE OPERE DI FONDAZIONE</b>				Fg.	Di	Compilato		Data		
				<b>24</b>	<b>57</b>	<b>A.C.</b>		<b>MAR.2019</b>		

Figura 3.3.1.8. Terreni a grana fine: andamento dei valori di angolo di resistenza a taglio con la profondità.

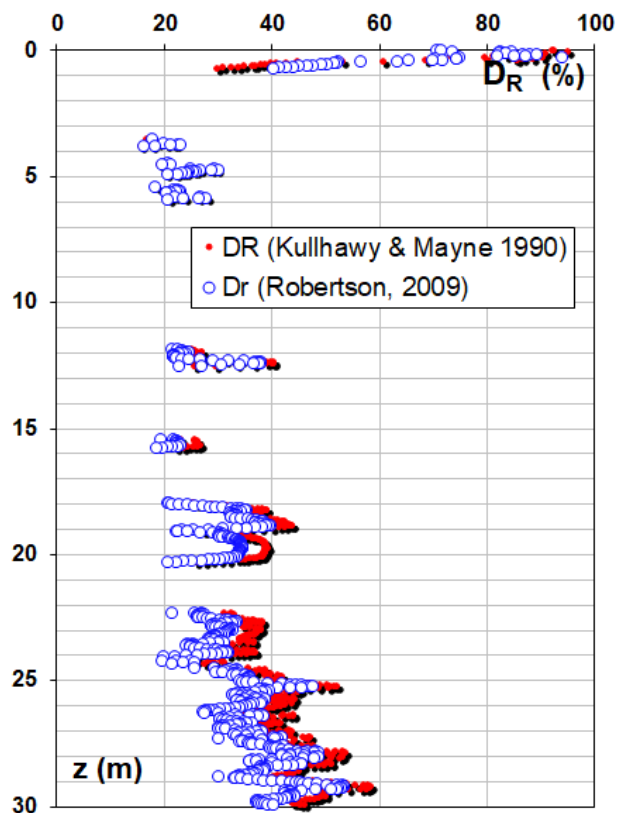
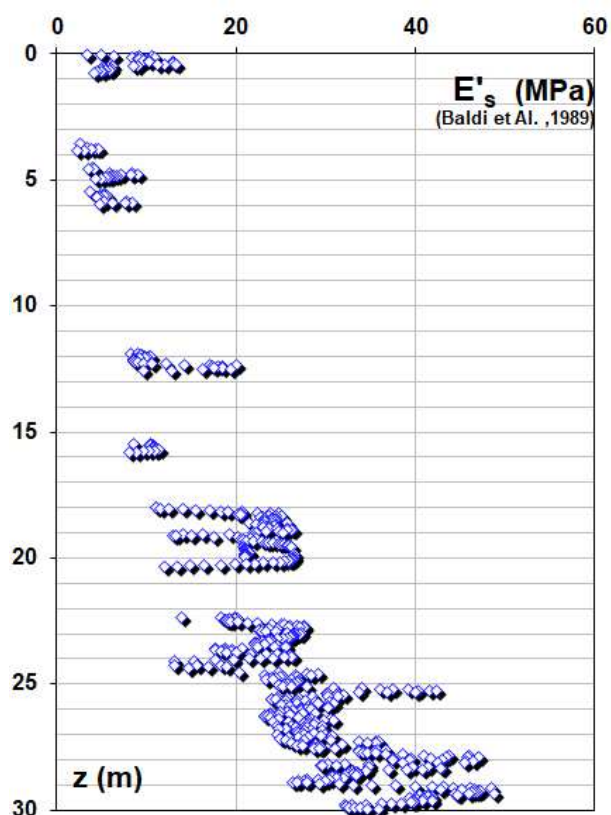


Figura 3.3.1.9. Terreni a grana grossa: andamento dei valori di densità relativa con la profondità.



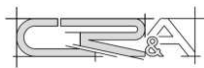
 Colombi Roversi & Associati Studio di Ingegneria	Comune	<b>JOLANDA DI SAVOIA (FE)</b>		Comm. n°		Revisioni				
	Progetto	<b>INTERVENTI STRUTTURALI DI MESSA IN SICUREZZA GENERALE E ADEGUAMENTO SISMICO ISTITUTO "DON CHENDI" - INFANZIA, PRIMARIA, MEDIA</b>		<b>CRA18022</b>		0				
				Doc. n°		<b>RGT</b>				
<b>RELAZIONE GEOTECNICA, SISMICA, CALCOLO DELLE OPERE DI FONDAZIONE</b>				Fg.	Di	Compilato		Data		
				<b>25</b>	<b>57</b>	<b>A.C.</b>		<b>MAR.2019</b>		

Figura 3.3.1.10. Terreni a grana grossa: andamento dei valori di modulo di Young con la profondità.

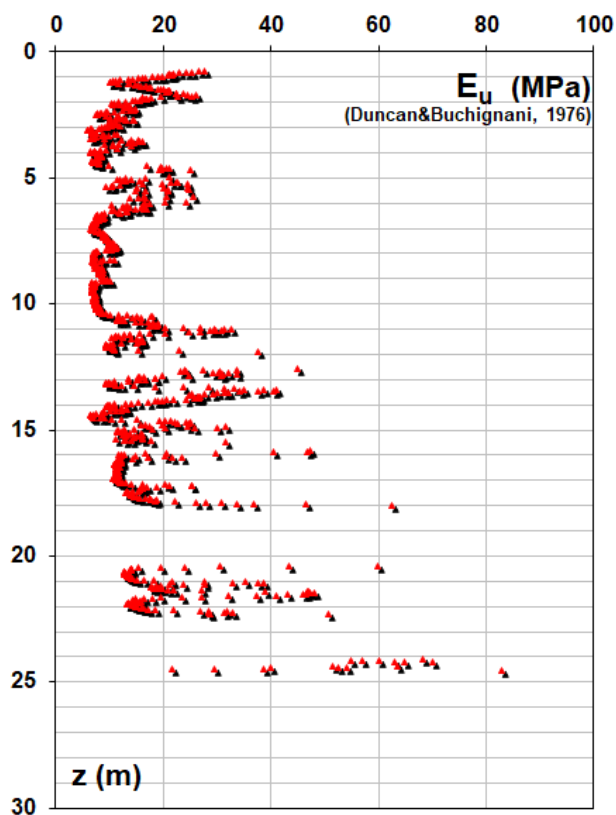
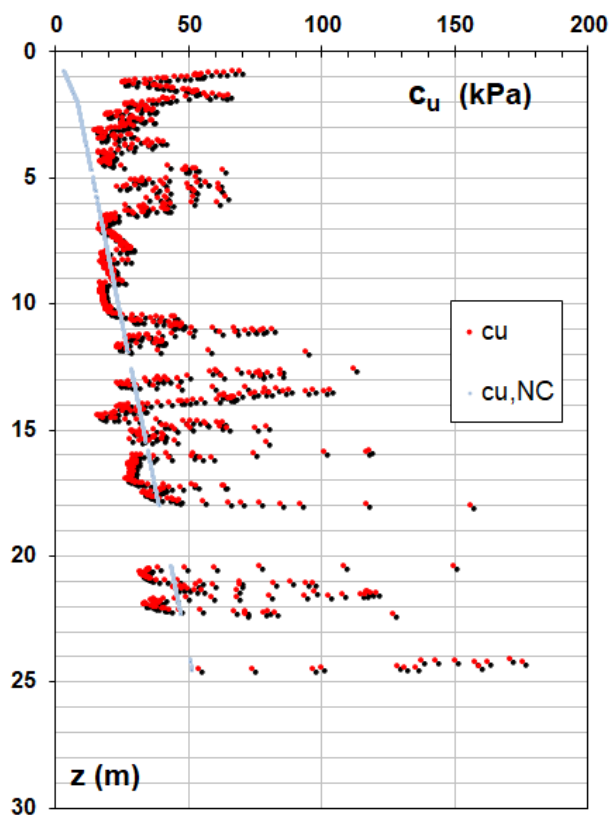


Figura 3.3.1.11. Terreni a grana fine: andamento dei valori di modulo di Young con la profondità.



 Colombi Roversi & Associati Studio di Ingegneria	Comune	JOLANDA DI SAVOIA (FE)	Comm. n°		Revisioni			
	Progetto	INTERVENTI STRUTTURALI DI MESSA IN SICUREZZA GENERALE E ADEGUAMENTO SISMICO ISTITUTO "DON CHENDI" - INFANZIA, PRIMARIA, MEDIA	CRA18022		0			
			Doc. n°  RGT					
RELAZIONE GEOTECNICA, SISMICA, CALCOLO DELLE OPERE DI FONDAZIONE			Fg.	Di	Compilato	Data		
			26	57	A.C.	MAR.2019		

Figura 3.3.1.12. Terreni a grana fine: andamento dei valori di resistenza a taglio non drenata con la profondità.

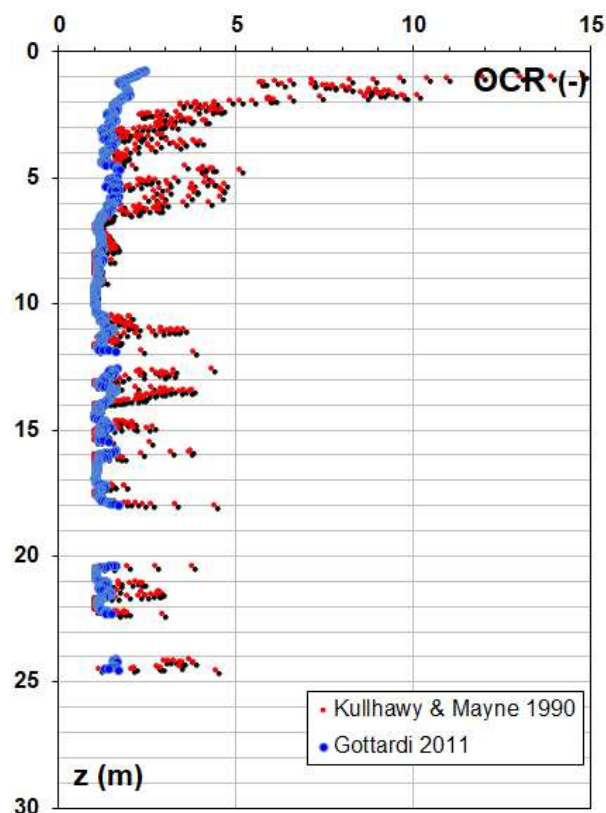
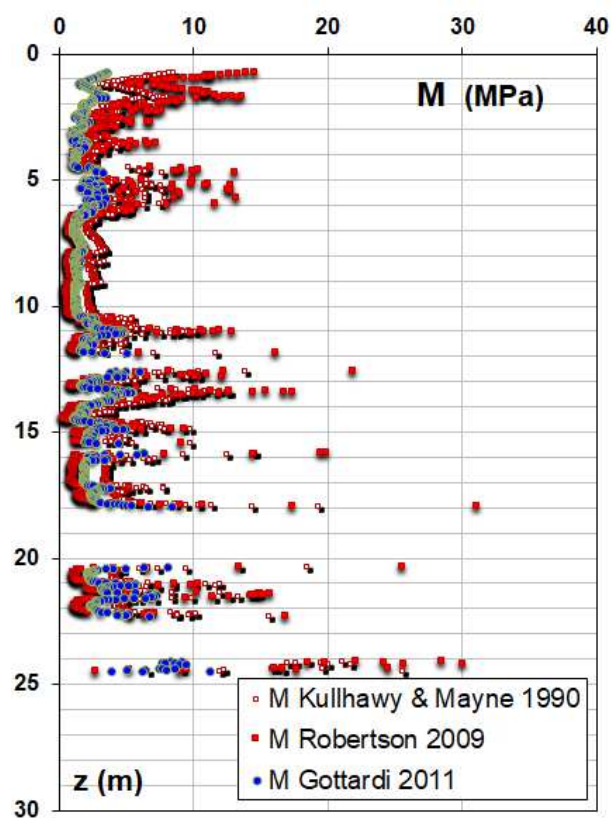


Figura 3.3.1.13. Terreni a grana fine: andamento grado di sovraconsolidazione con la profondità.



 <b>Colombi Roversi &amp; Associati</b> <b>Studio di Ingegneria</b>	Comune	<b>JOLANDA DI SAVOIA (FE)</b>	Comm. n°	Revisioni			
	Progetto	<b>INTERVENTI STRUTTURALI DI MESSA IN SICUREZZA GENERALE E ADEGUAMENTO SISMICO ISTITUTO "DON CHENDI" - INFANZIA, PRIMARIA, MEDIA</b>	<b>CRA18022</b>	0			
<b>RELAZIONE GEOTECNICA, SISMICA, CALCOLO DELLE OPERE DI FONDAZIONE</b>			Doc. n°	<b>RGT</b>			
			Fg. 27	Di 57	Compilato A.C.	Data MAR.2019	

Figura 3.3.1.14. Terreni a grana fine: andamento dei valori di modulo edometrico con la profondità.

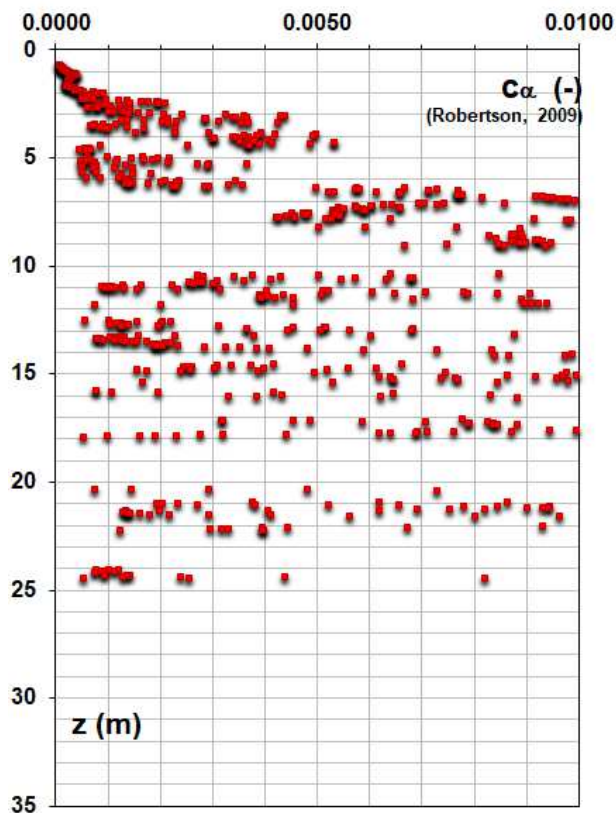
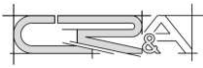


Figura 3.3.1.15. Terreni a grana fine: andamento dei valori del coefficiente di consolidazione secondaria con la profondità.

Nella tabella sono indicati i valori medi, scelti in base ad una stima cautelativa, dei principali parametri geotecnici dei terreni per ciascuna unità litologica.

Spessore strato [m]	Peso unità di volume [kN/m³]	Peso unità di volume saturo [kN/m³]	Angolo di attrito [°]	Coesione [kN/m²]	Coesione non drenata [kN/m²]	Modulo Elastico [kN/m²]	Modulo Edometrico [kN/m²]	Poisson	Coeff. consolid. az. primaria [cmq/s]	Coeff. consolidazione secondaria	Descrizione
5.0	16.5	17.0	24.0	0.0	30.0	9000.0	1000.0	0.0	0.0	0.0	A
6.0	16.5	17.0	22.0	0.0	20.0	9000.0	1200.0	0.0	0.0	0.0	B
7.0	16.5	17.0	21.0	0.0	30.0	12500.0	1800.0	0.0	0.0	0.0	C
2.0	17.0	17.5	30.0	0.0	0.0	24000.0	0.0	0.0	0.0	0.0	D
2.0	16.5	17.0	20.0	0.0	40.0	15000.0	2300.0	0.0	0.0	0.0	E
8.0	17.5	18.0	30.0	0.0	0.0	27000.0	0.0	0.0	0.0	0.0	F

 <b>Colombi Roversi &amp; Associati</b> <b>Studio di Ingegneria</b>	Comune	<b>JOLANDA DI SAVOIA (FE)</b>	Comm. n°	Revisioni			
	Progetto	<b>INTERVENTI STRUTTURALI DI MESSA IN SICUREZZA GENERALE E ADEGUAMENTO SISMICO ISTITUTO "DON CHENDI" - INFANZIA, PRIMARIA, MEDIA</b>	<b>CRA18022</b>	0			
			Doc. n°	<b>RGT</b>			
<b>RELAZIONE GEOTECNICA, SISMICA, CALCOLO DELLE OPERE DI FONDAZIONE</b>			Fg. 28	Di 57	Compilato A.C.	Data MAR.2019	

### Classificazione sismica

Nella figura seguente è riportato il profilo di Vs riportato nella relazione geologica.

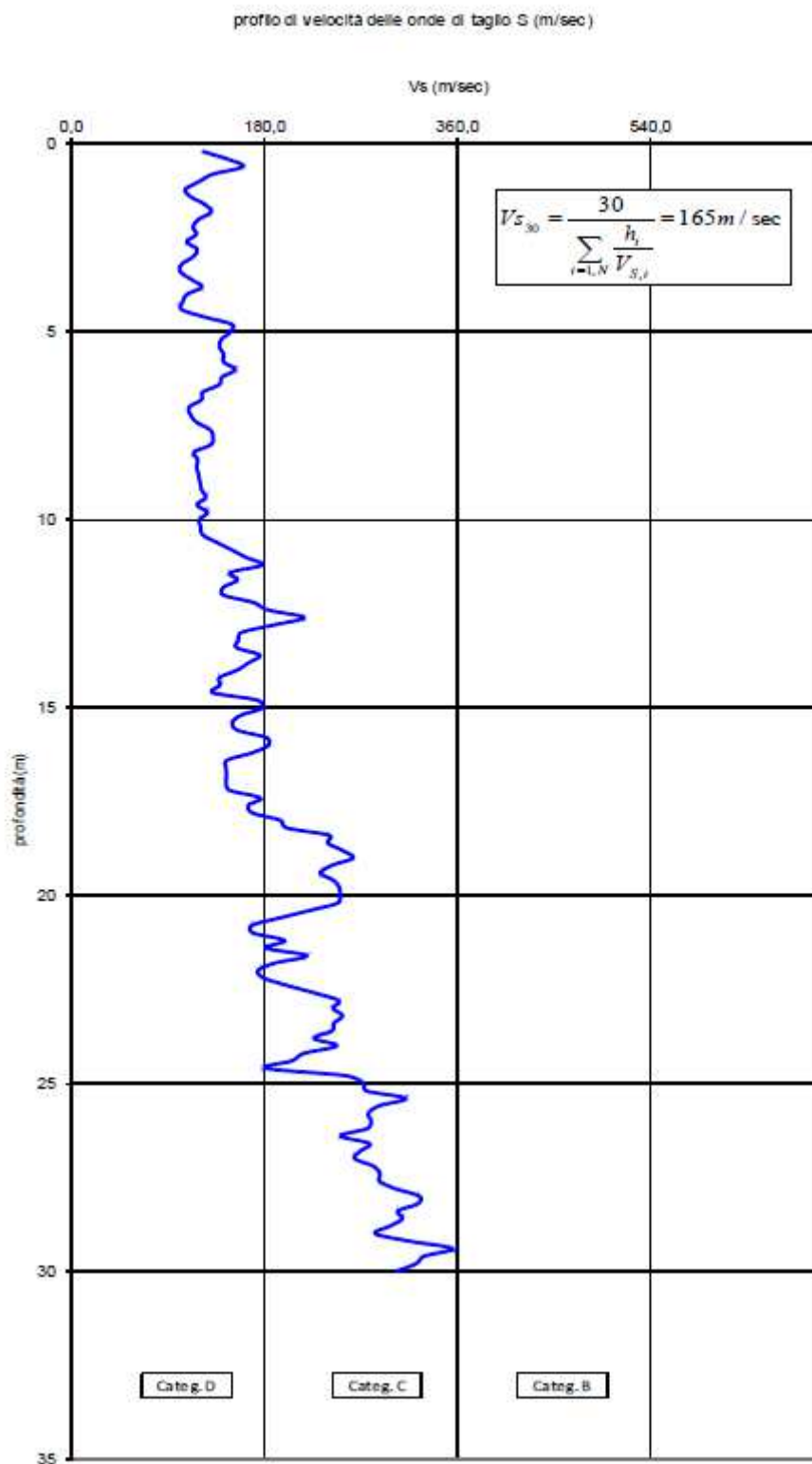
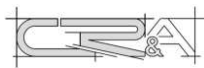


Figura 3.3.1.16. Andamento profilo della velocità di propagazione delle onde di taglio  $V_s$  con la profondità misurato (tratto da [a])

 Colombi Roversi & Associati Studio di Ingegneria	Comune	<b>JOLANDA DI SAVOIA (FE)</b>		Comm. n°		Revisioni				
	Progetto	<b>INTERVENTI STRUTTURALI DI MESSA IN SICUREZZA GENERALE E ADEGUAMENTO SISMICO ISTITUTO "DON CHENDI" - INFANZIA, PRIMARIA, MEDIA</b>		<b>CRA18022</b>		0				
				Doc. n°		<b>RGT</b>				
<b>RELAZIONE GEOTECNICA, SISMICA, CALCOLO DELLE OPERE DI FONDAZIONE</b>				Fg.	Di	Compilato		Data		
				<b>29</b>	<b>57</b>	<b>A.C.</b>		<b>MAR.2019</b>		

Il valore di  $V_{s,30}$  è risultato pari a:

$$V_{s,30} = \frac{30}{\sum_{i=1,N} \frac{h_i}{V_{s,i}}} = 165 \text{ m/s}$$

in base ai risultati mostrati il sito è da classificare come di **categoria D**.

Pertanto i coefficienti sismici per la progettazione risultano i seguenti:

Coefficienti Sismici

SLO:

Ss: 1,800  
 Cc: 2,360  
 St: 1,000  
 Kh: 0,014  
 Kv: 0,007  
 Amax: 0,685  
 Beta: 0,200

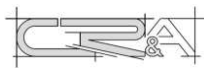
SLD:

Ss: 1,800  
 Cc: 2,280  
 St: 1,000  
 Kh: 0,017  
 Kv: 0,008  
 Amax: 0,818  
 Beta: 0,200

SLV:

Ss: 1,800  
 Cc: 2,160  
 St: 1,000  
 Kh: 0,044  
 Kv: 0,022  
 Amax: 1,804  
 Beta: 0,240



 Colombi Roversi & Associati Studio di Ingegneria	Comune	<b>JOLANDA DI SAVOIA (FE)</b>		Comm. n°		Revisioni				
	Progetto	<b>INTERVENTI STRUTTURALI DI MESSA IN SICUREZZA GENERALE E ADEGUAMENTO SISMICO ISTITUTO "DON CHENDI" - INFANZIA, PRIMARIA, MEDIA</b>		<b>CRA18022</b>		0				
				Doc. n°		<b>RGT</b>				
<b>RELAZIONE GEOTECNICA, SISMICA, CALCOLO DELLE OPERE DI FONDAZIONE</b>				Fg.	Di	Compilato	Data			
				<b>30</b>	<b>57</b>	<b>A.C.</b>	<b>MAR.2019</b>			

SLC:

Ss: 1,800

Cc: 2,150

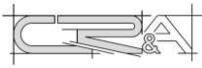
St: 1,000

Kh: 0,055

Kv: 0,027

Amax: 2,241

Beta: 0,240

 <b>Colombi Roversi &amp; Associati</b> Studio di Ingegneria	Comune	<b>JOLANDA DI SAVOIA (FE)</b>	Comm. n°	Revisioni			
	Progetto	<b>INTERVENTI STRUTTURALI DI MESSA IN SICUREZZA GENERALE E ADEGUAMENTO SISMICO ISTITUTO "DON CHENDI" - INFANZIA, PRIMARIA, MEDIA</b>	<b>CRA18022</b>	0			
<b>RELAZIONE GEOTECNICA, SISMICA, CALCOLO DELLE OPERE DI FONDAZIONE</b>			Doc. n°	<b>RGT</b>			
			Fg. 31	Di 57	Compilato A.C.	Data MAR.2019	

### Verifica a liquefazione

Nelle figure seguenti sono mostrati i risultati delle elaborazioni descritte nella parte introduttiva del paragrafo.

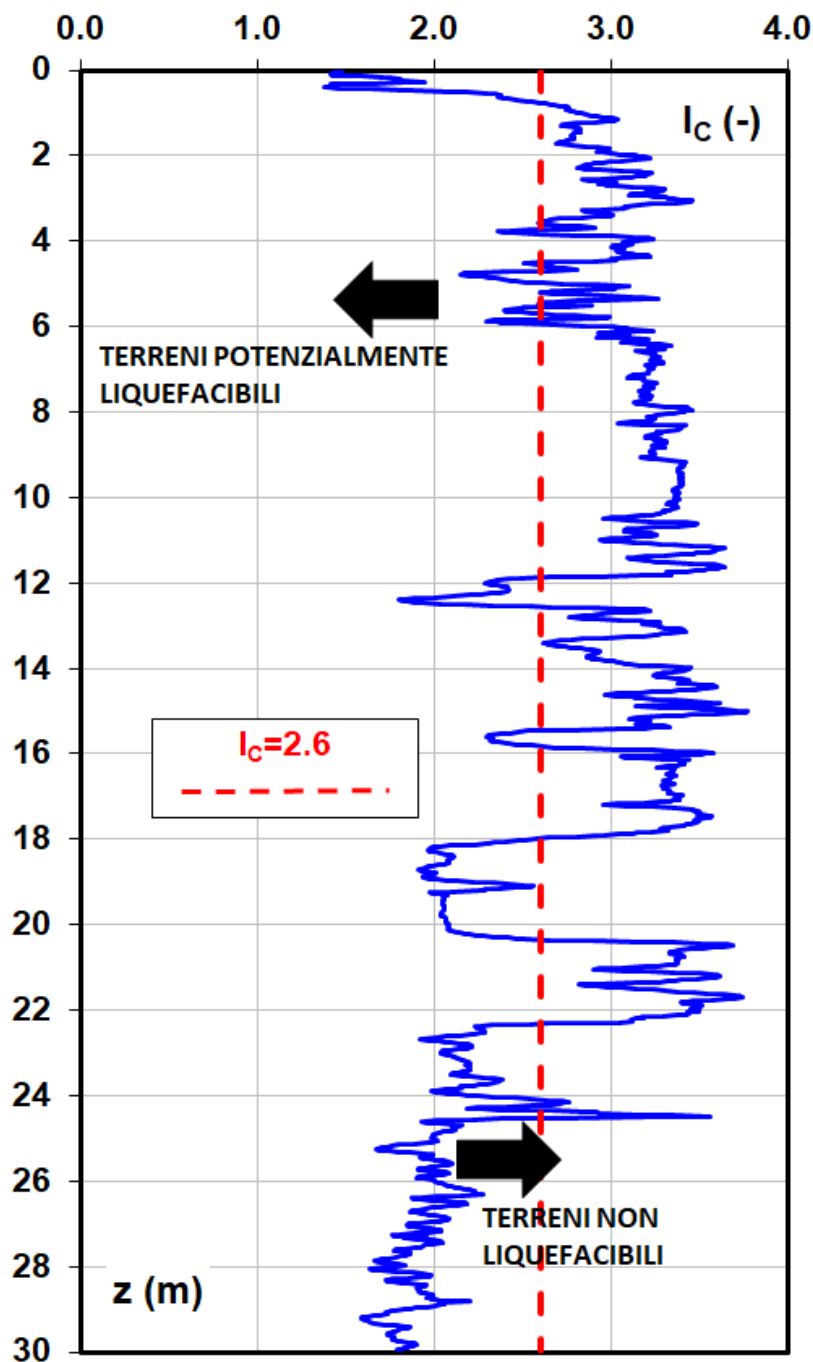


Figura 3.3.1.17. Risultati del metodo di Robertson (2009): Profilo dell'Indice di classificazione  $I_c$ ;

 <b>Colombi Roversi &amp; Associati</b> <b>Studio di Ingegneria</b>	Comune	<b>JOLANDA DI SAVOIA (FE)</b>	Comm. n°	Revisioni			
	Progetto	<b>INTERVENTI STRUTTURALI DI MESSA IN SICUREZZA GENERALE E ADEGUAMENTO SISMICO ISTITUTO "DON CHENDI" - INFANZIA, PRIMARIA, MEDIA</b>	<b>CRA18022</b>	0			
<b>RELAZIONE GEOTECNICA, SISMICA, CALCOLO DELLE OPERE DI FONDAZIONE</b>			Doc. n°	<b>RGT</b>			
			Fg. 32	Di 57	Compilato A.C.	Data MAR.2019	

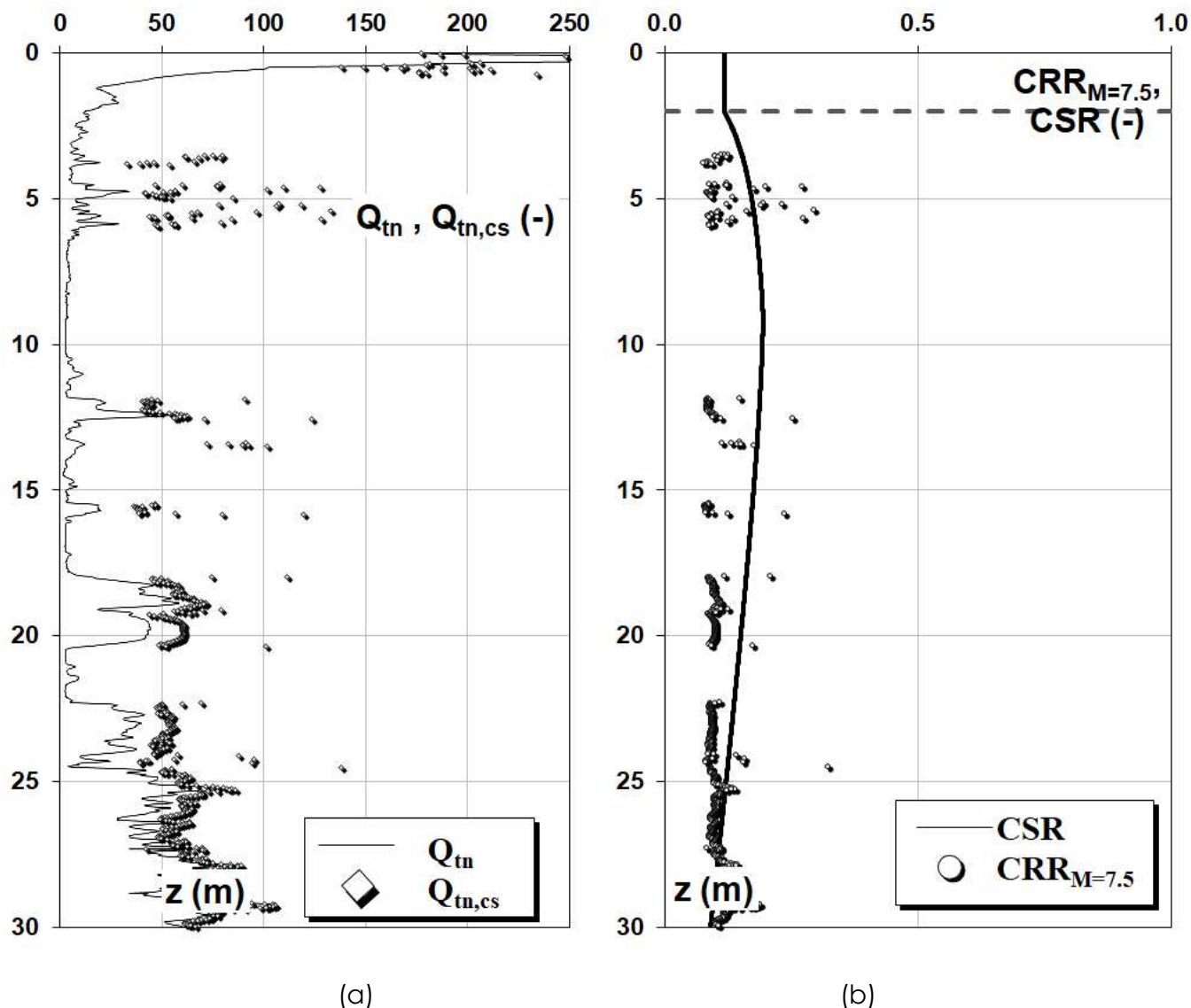
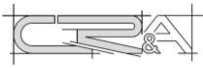


Figura 3.3.1.18. Risultati del metodo di Robertson (2009): (a) valori normalizzati della resistenza alla punta; (b) profilo con la profondità di  $CRR_{M=7.5}$  e  $CSR$

 <b>Colombi Roversi &amp; Associati</b> Studio di Ingegneria	Comune	<b>JOLANDA DI SAVOIA (FE)</b>	Comm. n°	Revisioni			
	Progetto	<b>INTERVENTI STRUTTURALI DI MESSA IN SICUREZZA GENERALE E ADEGUAMENTO SISMICO ISTITUTO "DON CHENDI" - INFANZIA, PRIMARIA, MEDIA</b>	<b>CRA18022</b>	0			
<b>RELAZIONE GEOTECNICA, SISMICA, CALCOLO DELLE OPERE DI FONDAZIONE</b>			Doc. n°	<b>RGT</b>			
			Fg. 33	Di 57	Compilato A.C.	Data MAR.2019	

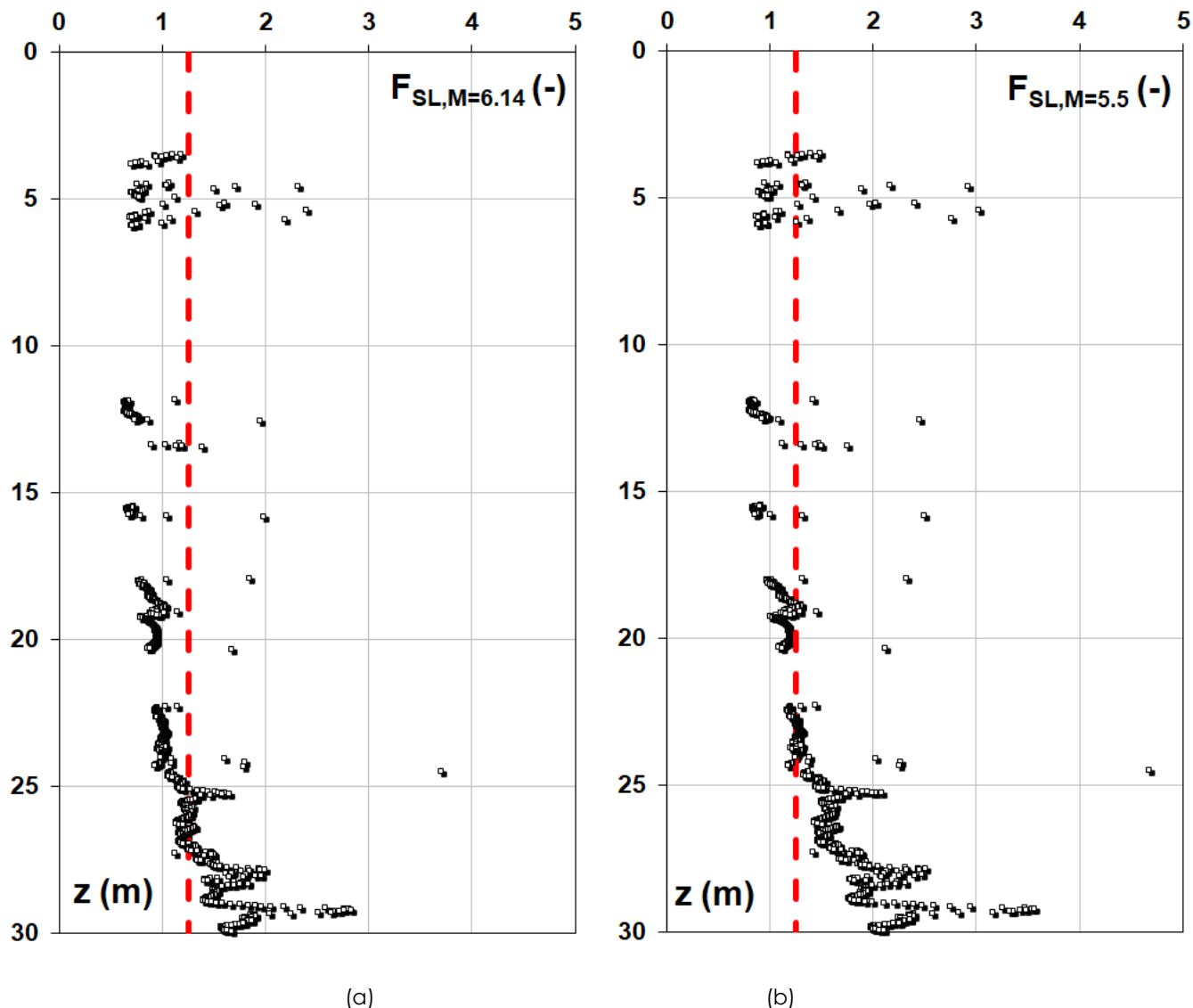


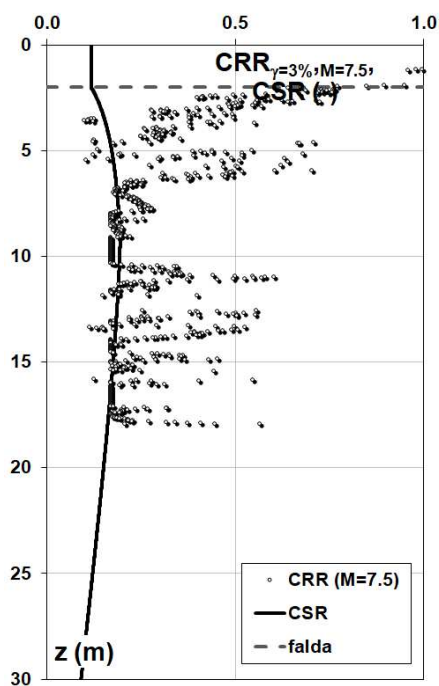
Figura 3.3.1.19. Risultati del metodo di Robertson (2009): (a) Profilo del fattore di sicurezza per eventi con magnitudo  $M=6.14$ ; (b) Profilo del fattore di sicurezza per eventi con magnitudo  $M=5.00$

I profili del fattore di sicurezza a liquefazione mostrano per entrambe le magnitudo considerate straterelli centimetrici o decimetrici in modeste quantità che potenzialmente possono liquefare ma all'interno di terreni non liquefacibili e pertanto non significativi ai fini degli effetti sulla sovrastruttura.

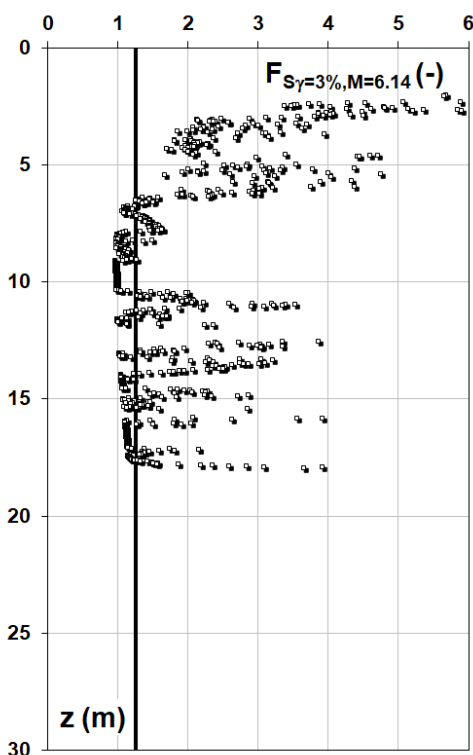
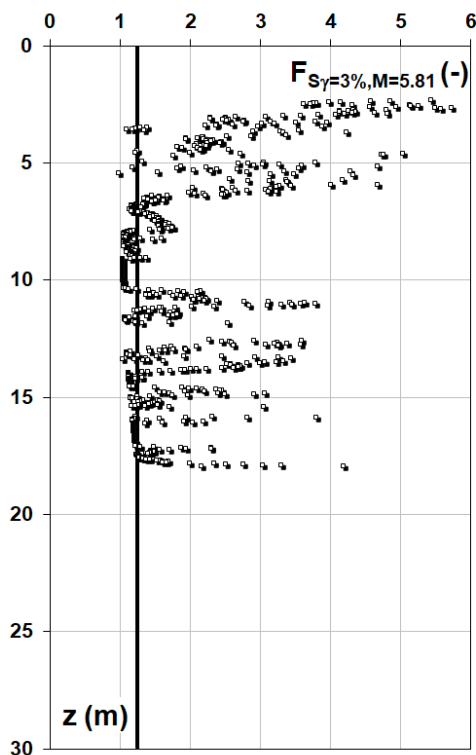
 Colombi Roversi & Associati Studio di Ingegneria	Comune	JOLANDA DI SAVOIA (FE)	Comm. n°		Revisioni			
	Progetto	INTERVENTI STRUTTURALI DI MESSA IN SICUREZZA GENERALE E ADEGUAMENTO SISMICO ISTITUTO "DON CHENDI" - INFANZIA, PRIMARIA, MEDIA	CRA18022		0			
			Doc. n°  RGT					
RELAZIONE GEOTECNICA, SISMICA, CALCOLO DELLE OPERE DI FONDAZIONE			Fg. 34	Di 57	Compilato A.C.	Data MAR.2019		

### Calcolo dei cedimenti post-sismici

Nelle figure seguenti sono mostrati i risultati delle elaborazioni descritte nella parte introduttiva del paragrafo.



(a)



(b)

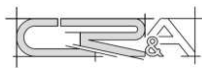
 Colombi Roversi & Associati Studio di Ingegneria	Comune	JOLANDA DI SAVOIA (FE)	Comm. n°	Revisioni				
	Progetto	INTERVENTI STRUTTURALI DI MESSA IN SICUREZZA GENERALE E ADEGUAMENTO SISMICO ISTITUTO "DON CHENDI" - INFANZIA, PRIMARIA, MEDIA	CRA18022	0				
			Doc. n°  RGT					
RELAZIONE GEOTECNICA, SISMICA, CALCOLO DELLE OPERE DI FONDAZIONE			Fg. 35	Di 57	Compilato A.C.	Data MAR.2019		

Figura 3.3.1.20. Risultati del metodo di Robertson (2009) per terreni fini: (a) Andamento della resistenza ciclica a deformazione con la profondità; (b) Profilo del fattore di sicurezza per eventi con magnitudo  $M=6.14$  e  $5.00$

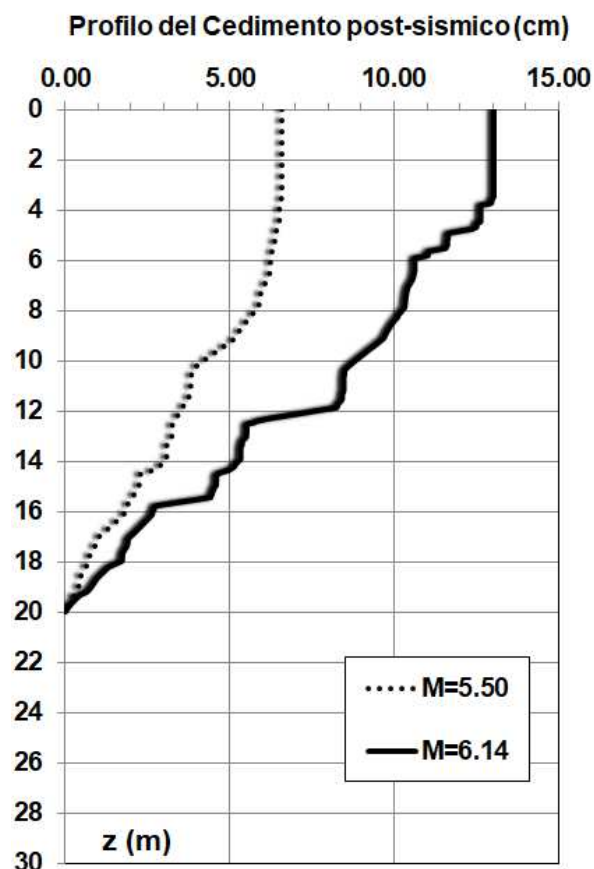


Figura 3.3.1.21. Risultati del metodo di Robertson (2009): profilo del cedimento post sismico atteso con la profondità (terreni fini e granulari) per le due magnitudo di progetto considerate

 <b>Colombi Roversi &amp; Associati</b> <b>Studio di Ingegneria</b>	Comune	<b>JOLANDA DI SAVOIA (FE)</b>	Comm. n°	Revisioni			
	Progetto	<b>INTERVENTI STRUTTURALI DI MESSA IN SICUREZZA GENERALE E ADEGUAMENTO SISMICO ISTITUTO "DON CHENDI" - INFANZIA, PRIMARIA, MEDIA</b>	<b>CRA18022</b>	0			
			Doc. n°	<b>RGT</b>			
<b>RELAZIONE GEOTECNICA, SISMICA, CALCOLO DELLE OPERE DI FONDAZIONE</b>			Fg. <b>36</b>	Di <b>57</b>	Compilato <b>A.C.</b>	Data <b>MAR.2019</b>	

## 4 VERIFICA GEOTECNICA DELLE FONDAZIONI

### CARICO LIMITE DI FONDAZIONI SU TERRENI

Il carico limite di una fondazione superficiale può essere definito con riferimento a quel valore massimo del carico per il quale in nessun punto del sottosuolo si raggiunge la condizione di rottura (metodo di Frolich), oppure con riferimento a quel valore del carico, maggiore del precedente, per il quale il fenomeno di rottura si è esteso ad un ampio volume del suolo (metodo di Prandtl e successivi).

**Prandtl** ha studiato il problema della rottura di un semispazio elastico per effetto di un carico applicato sulla sua superficie con riferimento all'acciaio, caratterizzando la resistenza a rottura con una legge del tipo:

$$\tau = c + \sigma \times \operatorname{tg} \varphi \quad \text{valida anche per i terreni.}$$

Le ipotesi e le condizioni introdotte dal Prandtl sono le seguenti:

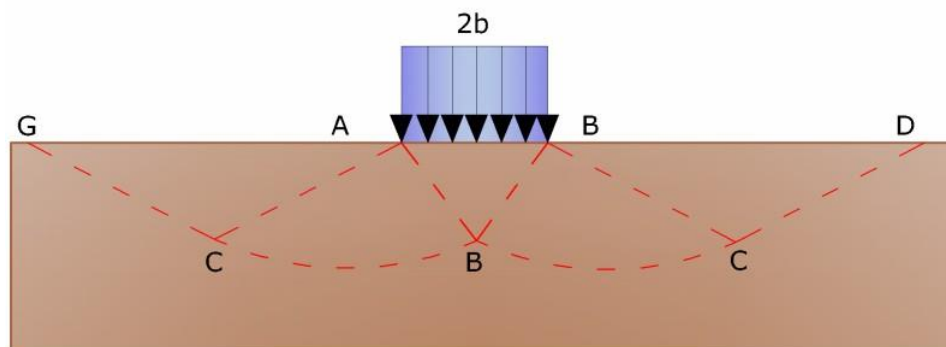
- Materiale privo di peso e quindi  $\gamma=0$
- Comportamento rigido - plastico
- Resistenza a rottura del materiale esprimibile con la relazione  $\tau=c + \sigma \times \operatorname{tg} \varphi$
- Carico uniforme, verticale ed applicato su una striscia di lunghezza infinita e di larghezza  $2b$  (stato di deformazione piana)
- Tensioni tangenziali nulle al contatto fra la striscia di carico e la superficie limite del semispazio.

All'atto della rottura si verifica la plasticizzazione del materiale racchiuso fra la superficie limite del semispazio e la superficie *GFBCD*.

Nel triangolo *AEB* la rottura avviene secondo due famiglie di segmenti rettilinei ed inclinati di  $45^\circ + \varphi/2$  rispetto all'orizzontale.

Nelle zone *ABF* e *EBC* la rottura si produce lungo due famiglie di linee, l'una costituita da segmenti rettilinei passanti rispettivamente per i punti *A* ed *E* e l'altra da archi di due famiglie di spirali logaritmiche.

I poli di queste sono i punti *A* ed *E*. Nei triangoli *AFG* e *ECD* la rottura avviene su segmenti inclinati di  $\pm(45^\circ + \varphi/2)$  rispetto alla verticale.



*Meccanismo di rottura di Prandtl*

Individuato così il volume di terreno portato a rottura dal carico limite, questo può essere calcolato scrivendo la condizione di equilibrio fra le forze agenti su qualsiasi volume di terreno delimitato in basso da una qualunque delle superfici di scorrimento.

Si arriva quindi ad una equazione  $q = B \times c$ , dove il coefficiente *B* dipende soltanto dall'angolo di attrito  $\varphi$  del terreno.

$$B = \cot g \varphi \left[ e^{\pi \operatorname{tg} \varphi} \operatorname{tg}^2 (45^\circ + \varphi/2) - 1 \right]$$

Per  $\varphi=0$  il coefficiente *B* risulta pari a 5.14, quindi  $q=5.14 \times c$ .

Nell'altro caso particolare di terreno privo di coesione ( $c=0$ ,  $\gamma \neq 0$ ) risulta  $q=0$ , secondo la teoria di **Prandtl**, non sarebbe dunque possibile applicare nessun carico sulla superficie limite di un terreno incoerente.



 <b>Colombi Roversi &amp; Associati</b> <b>Studio di Ingegneria</b>	Comune	<b>JOLANDA DI SAVOIA (FE)</b>	Comm. n°	Revisioni				
	Progetto	<b>INTERVENTI STRUTTURALI DI MESSA IN SICUREZZA GENERALE E ADEGUAMENTO SISMICO ISTITUTO "DON CHENDI" - INFANZIA, PRIMARIA, MEDIA</b>	<b>CRA18022</b>	0				
			Doc. n°	<b>RGT</b>				
<b>RELAZIONE GEOTECNICA, SISMICA, CALCOLO DELLE OPERE DI FONDAZIONE</b>			Fg. <b>37</b>	Di <b>57</b>	Compilato <b>A.C.</b>	Data <b>MAR.2019</b>		

Da questa teoria, anche se non applicabile praticamente, hanno preso le mosse tutte le ricerche ed i metodi di calcolo successivi.

Infatti *Caquot* si pose nelle stesse condizioni di *Prandtl* ad eccezione del fatto che la striscia di carico non è più applicata sulla superficie limite del semispazio, ma a una profondità  $h$ , con  $h \leq 2b$ ; il terreno compreso tra la superficie e la profondità  $h$  ha le seguenti caratteristiche:  $\gamma \neq 0$ ,  $\varphi = 0$ ,  $c = 0$  e cioè sia un mezzo dotato di peso ma privo di resistenza.

Risolvendo le equazioni di equilibrio si arriva all'espressione:

$$q = A \times \gamma l + B \times c$$

che è sicuramente un passo avanti rispetto a *Prandtl*, ma che ancora non rispecchia la realtà.

### Metodo di Terzaghi (1955)

**Terzaghi**, proseguendo lo studio di *Caquot*, ha apportato alcune modifiche per tenere conto delle effettive caratteristiche dell'insieme opera di fondazione-terreno.

Sotto l'azione del carico trasmesso dalla fondazione il terreno che si trova a contatto con la fondazione stessa tende a sfuggire lateralmente, ma ne è impedito dalle resistenze tangenziali che si sviluppano fra la fondazione ed il terreno. Ciò comporta una modifica dello stato tensionale nel terreno posto direttamente al di sotto della fondazione; per tenerne conto **Terzaghi** assegna ai lati AB ed EB del cuneo di *Prandtl* una inclinazione  $\psi$  rispetto all'orizzontale, scegliendo il valore di  $\psi$  in funzione delle caratteristiche meccaniche del terreno al contatto terreno-opera di fondazione. L'ipotesi  $\gamma_2 = 0$  per il terreno sotto la fondazione viene così superata ammettendo che le superfici di rottura restino inalterate, l'espressione del carico limite è quindi:

$$q = A \times \gamma \times h + B \times c + C \times \gamma \times b$$

in cui  $C$  è un coefficiente che risulta funzione dell'angolo di attrito  $\varphi$  del terreno posto al di sotto del piano di posa e dell'angolo  $\varphi$  prima definito;  $b$  è la semilarghezza della striscia.

Inoltre, basandosi su dati sperimentali, **Terzaghi** passa dal problema piano al problema spaziale introducendo dei fattori di forma.

Un ulteriore contributo è stato apportato da **Terzaghi** sull'effettivo comportamento del terreno.

Nel metodo di *Prandtl* si ipotizza un comportamento del terreno rigido-plastico, **Terzaghi** invece ammette questo comportamento nei terreni molto compatti.

In essi, infatti, la curva carichi-cedimenti presenta un primo tratto rettilineo, seguito da un breve tratto curvilineo (comportamento elasto-plastico); la rottura è istantanea ed il valore del carico limite risulta chiaramente individuato (rottura generale).

In un terreno molto sciolto invece la relazione carichi-cedimenti presenta un tratto curvilineo accentuato fin dai carichi più bassi per effetto di una rottura progressiva del terreno (rottura locale); di conseguenza l'individuazione del carico limite non è così chiara ed evidente come nel caso dei terreni compatti.

Per i terreni molto sciolti, **Terzaghi** consiglia di prendere in considerazione il carico limite il valore che si calcola con la formula precedente introducendo però dei valori ridotti delle caratteristiche meccaniche del terreno e precisamente:

$$tg \varphi_{rid} = 2/3 \times tg \varphi \text{ e } c_{rid} = 2/3 \times c$$

Esplicitando i coefficienti della formula precedente, la formula di **Terzaghi** può essere scritta:

$$q_{ult} = c \times N_c \times s_c + \gamma \times D \times N_q + 0.5 \times \gamma \times B \times N_\gamma \times s_\gamma$$

dove:

 Colombi Roversi & Associati Studio di Ingegneria	Comune	JOLANDA DI SAVOIA (FE)	Comm. n°		Revisioni				
	Progetto	INTERVENTI STRUTTURALI DI MESSA IN SICUREZZA GENERALE E ADEGUAMENTO SISMICO ISTITUTO "DON CHENDI" - INFANZIA, PRIMARIA, MEDIA	CRA18022		0				
			Doc. n°		RGT				
RELAZIONE GEOTECNICA, SISMICA, CALCOLO DELLE OPERE DI FONDAZIONE			Fg.	Di	Compilato	Data			
			38	57	A.C.	MAR.2019			

$$N_q = \frac{a^2}{2 \cos^2 (45 + \varphi / 2)}$$

$$a = e^{(0.75\pi - \varphi / 2) \tan \varphi}$$

$$N_c = (N_q - 1) \cot \varphi$$

$$N_\gamma = \frac{\tan \varphi}{2} \left( \frac{K p \gamma}{\cos^2 \varphi} - 1 \right)$$

### Formula di Meyerhof (1963)

Meyerhof propose una formula per il calcolo del carico limite simile a quella di Terzaghi.; le differenze consistono nell'introduzione di ulteriori coefficienti di forma.

Egli introdusse un coefficiente  $s_q$  che moltiplica il fattore  $N_q$ , fattori di profondità  $d_i$  e di pendenza  $i_j$  per il caso in cui il carico trasmesso alla fondazione è inclinato sulla verticale.

I valori dei coefficienti  $N$  furono ottenuti da Meyerhof ipotizzando vari archi di prova BF (v. meccanismo Prandtl), mentre il taglio lungo i piani AF aveva dei valori approssimati.

I fattori di forma tratti da Meyerhof sono di seguito riportati, insieme all'espressione della formula.

$$\begin{aligned} \text{Carico verticale} \quad q_{ult} &= c \times N_c \times s_c \times d_c + \gamma \times D \times N_q \times s_q \times d_q + 0.5 \times \gamma \times B \times N_\gamma \times s_\gamma \times d_\gamma \\ \text{Carico inclinato} \quad q_{ul\ i} &= c \times N_c \times i_c \times d_c + \gamma \times D \times N_q \times i_q \times d_q + 0.5 \times \gamma \times B \times N_\gamma \times i_\gamma \times d_\gamma \end{aligned}$$

$$N_q = e^{\pi \tan \varphi} \tan^2 (45 + \varphi / 2)$$

$$N_c = (N_q - 1) \cot \varphi$$

$$N_\gamma = (N_q - 1) \tan (1.4 \varphi)$$

fattore di forma:

$$s_c = 1 + 0.2 k_p \frac{B}{L} \quad \text{per } \varphi > 10$$

$$s_q = s_\gamma = 1 + 0.1 k_p \frac{B}{L} \quad \text{per } \varphi = 0$$

fattore di profondità:

$$d_c = 1 + 0.2 \sqrt{k_p} \frac{D}{B}$$

$$d_q = d_\gamma = 1 + 0.1 \sqrt{k_p} \frac{D}{B} \quad \text{per } \varphi > 10$$

$$d_q = d_\gamma = 1 \quad \text{per } \varphi = 0$$

inclinazione:

 Colombi Roversi & Associati Studio di Ingegneria	Comune	JOLANDA DI SAVOIA (FE)	Comm. n°		Revisioni				
	Progetto	INTERVENTI STRUTTURALI DI MESSA IN SICUREZZA GENERALE E ADEGUAMENTO SISMICO ISTITUTO "DON CHENDI" - INFANZIA, PRIMARIA, MEDIA	CRA18022		0				
			Doc. n°		RGT				
RELAZIONE GEOTECNICA, SISMICA, CALCOLO DELLE OPERE DI FONDAZIONE			Fg.	Di	Compilato	Data			
			39	57	A.C.	MAR.2019			

$$i_c = i_\gamma = \left(1 - \frac{\theta}{90}\right)^2$$

$$i_\gamma = \left(1 - \frac{\theta}{\varphi}\right)^2 \quad \text{per } \varphi > 0$$

$$i_\gamma = 0 \quad \text{per } \varphi = 0$$

dove :

$$K_p = \tan^2(45^\circ + \varphi/2)$$

$\theta$  = Inclinazione della risultante sulla verticale.

### Formula di Hansen (1970)

E' una ulteriore estensione della formula di *Meyerhof*; le estensioni consistono nell'introduzione di  $b_i$  che tiene conto della eventuale inclinazione sull'orizzontale del piano di posa e un fattore  $g_i$  per terreno in pendenza.

La formula di Hansen vale per qualsiasi rapporto  $D/B$ , quindi sia per fondazioni superficiali che profonde, ma lo stesso autore introdusse dei coefficienti per meglio interpretare il comportamento reale della fondazione, senza di essi, infatti, si avrebbe un aumento troppo forte del carico limite con la profondità.

Per valori di  $D/B < 1$

$$d_c = 1 + 0.4 \frac{D}{B}$$

$$d_q = 1 + 2 \tan \varphi (1 - \sin \varphi) \frac{D}{B}$$

Per valori  $D/B > 1$ :

$$d_c = 1 + 0.4 \tan^{-1} \frac{D}{B}$$

$$d_q = 1 + 2 \tan \varphi (1 - \sin \varphi) \tan^{-1} \frac{D}{B}$$

Nel caso  $\varphi = 0$

$D/B$	0	1	1.1	2	5	10	20	100
$d'_c$	0	0.40	0.33	0.44	0.55	0.59	0.61	0.62

Nei fattori seguenti le espressioni con apici (') valgono quando  $\varphi=0$ .

Fattore di forma:

$$s'_c = 0.2 \frac{B}{L}$$

$$s_c = 1 + \frac{N_q}{N_c} \frac{B}{L}$$

$$s_c = 1 \quad \text{per fondazioni a strapieno}$$

$$s_q = 1 + \frac{B}{L} \tan \varphi$$

$$s_\gamma = 1 - 0.4 \frac{B}{L}$$

 Colombi Roversi & Associati Studio di Ingegneria	Comune	JOLANDA DI SAVOIA (FE)	Comm. n°		Revisioni				
	Progetto	INTERVENTI STRUTTURALI DI MESSA IN SICUREZZA GENERALE E ADEGUAMENTO SISMICO ISTITUTO "DON CHENDI" - INFANZIA, PRIMARIA, MEDIA	CRA18022		0				
			Doc. n°						
			RGT						
RELAZIONE GEOTECNICA, SISMICA, CALCOLO DELLE OPERE DI FONDAZIONE			Fg.	Di	Compilato		Data		
			40	57	A.C.		MAR.2019		

*Fattori di inclinazione del carico*

$$i'_c = 0.5 - 0.5 \sqrt{1 - \frac{H}{A_f c_a}}$$

$$i_c = i_q - \frac{1 - i_q}{N_q - 1}$$

$$i_q = \left( 1 - \frac{0.5H}{V + A_f c_a \cot \varphi} \right)^5$$

$$i_\gamma = \left( 1 - \frac{0.7H}{V + A_f c_a \cot \varphi} \right)^5 \quad (\eta = 0)$$

$$i_\gamma = \left( 1 - \frac{(0.7 - \eta/450)H}{V + A_f c_a \cot \varphi} \right)^5 \quad (\eta > 0)$$

*Fattori di inclinazione del terreno (fondazione su pendio):*

$$g'_c = \frac{\beta}{147}$$

$$g_c = 1 - \frac{\beta}{147}$$

$$g_q = g_\gamma = (1 - 0.5 \tan \beta)^5$$

Fattori di inclinazione del piano di fondazione (base inclinata)

$$b'_c = \frac{\eta^\circ}{147^\circ}$$

$$b_c = 1 - \frac{\eta^\circ}{147^\circ}$$

$$b_q = \exp(-2\eta \tan \varphi)$$

### Formula di Vesic (1975)

La formula di Vesic è analoga alla formula di Hansen, con  $N_q$  ed  $N_c$  come per la formula di Meyerhof ed  $N_\gamma$  come sotto riportato:

$$N_\gamma = 2(N_q + 1) \times \tan(\varphi)$$

I fattori di forma e di profondità che compaiono nelle formule del calcolo della capacità portante sono uguali a quelli proposti da Hansen; alcune differenze sono invece riportate nei fattori di inclinazione del carico, del terreno (fondazione su pendio) e del piano di fondazione (base inclinata).

### Formula Brich-Hansen (EC 7 – EC 8)

Affinché una fondazione possa resistere il carico di progetto con sicurezza nei riguardi della rottura generale, per tutte le combinazioni di carico relative allo SLU (stato limite ultimo), deve essere soddisfatta la seguente disuguaglianza:

$$V_d \leq R_d$$

 Colombi Roversi & Associati Studio di Ingegneria	Comune	JOLANDA DI SAVOIA (FE)	Comm. n°		Revisioni				
	Progetto	INTERVENTI STRUTTURALI DI MESSA IN SICUREZZA GENERALE E ADEGUAMENTO SISMICO ISTITUTO "DON CHENDI" - INFANZIA, PRIMARIA, MEDIA	CRA18022		0				
			Doc. n°		RGT				
RELAZIONE GEOTECNICA, SISMICA, CALCOLO DELLE OPERE DI FONDAZIONE			Fg.	Di	Compilato	Data			
			41	57	A.C.	MAR.2019			

Dove  $V_d$  è il carico di progetto allo SLU, normale alla base della fondazione, comprendente anche il peso della fondazione stessa; mentre  $R_d$  è il carico limite di progetto della fondazione nei confronti di carichi normali, tenendo conto anche dell'effetto di carichi inclinati o eccentrici.

Nella valutazione analitica del carico limite di progetto  $R_d$  si devono considerare le situazioni a breve e a lungo termine nei terreni a grana fine.

Il carico limite di progetto in condizioni non drenate si calcola come:

$$R/A' = (2 + \pi) c_u s_c i_c + q$$

Dove:

$A' = B' L'$  area della fondazione efficace di progetto, intesa, in caso di carico eccentrico, come l'area ridotta al cui centro viene applicata la risultante del carico.

$c_u$  Coesione non drenata.

$q$  pressione litostatica totale sul piano di posa.

$s_c$  Fattore di forma

$$s_c = 1 + 0,2 (B'/L') \quad \text{per fondazioni rettangolari}$$

$$s_c = 1,2 \quad \text{Per fondazioni quadrate o circolari.}$$

$i_c$  Fattore correttivo per l'inclinazione del carico dovuta ad un carico H.

$$i_c = 0,5 \left( 1 + \sqrt{1 - H/A' c_u} \right)$$

Per le condizioni drenate il carico limite di progetto è calcolato come segue.

$$R/A' = c' N_c s_c i_c + q' N_q s_q i_q + 0,5 \gamma' B' N_\gamma s_\gamma i_\gamma$$

Dove:

$$N_q = e^{\pi \tan \phi'} \tan^2 (45 + \phi' / 2)$$

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

$$N_\gamma = 2 \cdot (N_q - 1) \tan \phi'$$

#### Fattori di forma

$$s_q = 1 + (B'/L') \cdot \sin \phi' \quad \text{per forma rettangolare}$$

$$s_q = 1 + \sin \phi' \quad \text{per forma quadrata o circolare}$$

$$s_\gamma = 1 - 0,3 (B'/L') \quad \text{per forma rettangolare}$$

$$s_\gamma = 0,7 \quad \text{per forma quadrata o circolare}$$

$$s_c = (s_q \cdot N_q - 1) / (N_q - 1) \quad \text{per forma rettangolare, quadrata o circolare.}$$

#### Fattori inclinazione risultante dovuta ad un carico orizzontale H

$$i_q = [1 - H / (V + A' \cdot c' \cdot \cot \phi')]^m$$

$$i_\gamma = [1 - H / (V + A' \cdot c' \cdot \cot \phi')]^{m+1}$$

$$i_c = (i_q \cdot N_q - 1) / (N_q - 1)$$

Dove:

 Colombi Roversi & Associati Studio di Ingegneria	Comune	<b>JOLANDA DI SAVOIA (FE)</b>		Comm. n°		Revisioni				
	Progetto	<b>INTERVENTI STRUTTURALI DI MESSA IN SICUREZZA GENERALE E ADEGUAMENTO SISMICO ISTITUTO "DON CHENDI" - INFANZIA, PRIMARIA, MEDIA</b>		<b>CRA18022</b>		0				
				<b>RGT</b>						
<b>RELAZIONE GEOTECNICA, SISMICA, CALCOLO DELLE OPERE DI FONDAZIONE</b>				Fg.	Di	Compilato	Data			
				<b>42</b>	<b>57</b>	<b>A.C.</b>	<b>MAR.2019</b>			

$$m = m_B = \frac{\left[ 2 + \left( \frac{B'}{L'} \right) \right]}{\left[ 1 + \left( \frac{B'}{L'} \right) \right]} \quad \text{con } H/B'$$

$$m = m_L = \frac{\left[ 2 + \left( \frac{L'}{B'} \right) \right]}{\left[ 1 + \left( \frac{L'}{B'} \right) \right]} \quad \text{con } H/L'$$

Se H forma un angolo  $\theta$  con la direzione di L', l'esponente "m" viene calcolato con la seguente espressione:

$$m = m_\theta = m_L \cos^2 \theta + m_B \sin^2 \theta$$

Oltre ai fattori correttivi di cui sopra sono considerati quelli complementari della profondità del piano di posa e dell'inclinazione del piano di posa e del piano campagna (Hansen).

#### Metodo di Richards et. Al.

Richards, Helm e Budhu (1993) hanno sviluppato una procedura che consente, in condizioni sismiche, di valutare sia il carico limite sia i cedimenti indotti, e quindi di procedere alle verifiche di entrambi gli stati limite (ultimo e di danno). La valutazione del carico limite viene perseguita mediante una semplice estensione del problema del carico limite al caso della presenza di forze di inerzia nel terreno di fondazione dovute al sisma, mentre la stima dei cedimenti viene ottenuta mediante un approccio alla Newmark (cfr. Appendice H di "Aspetti geotecnici della progettazione in zona sismica" – Associazione Geotecnica Italiana). Gli autori hanno esteso la classica formula trinomia del carico limite:

$$q_L = N_q \cdot q + N_c \cdot c + 0.5 N_\gamma \cdot \gamma \cdot B$$

Dove i fattori di capacità portante vengono calcolati con le seguenti formule:

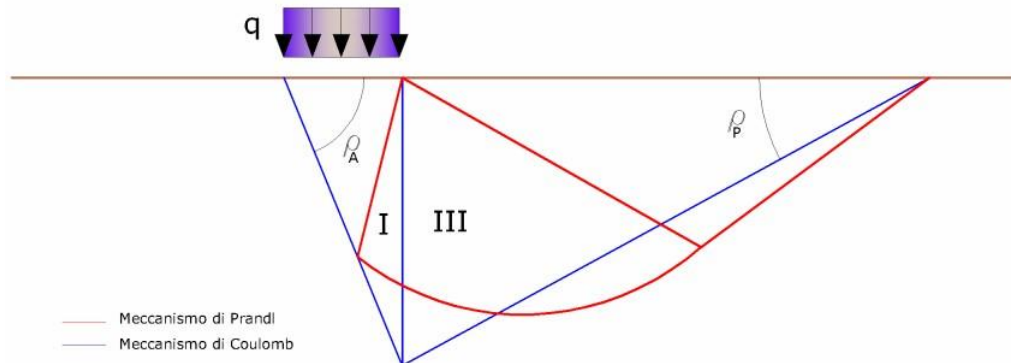
$$N_c = (N_q - 1) \cdot \cot(\phi)$$

$$N_q = \frac{K_{pE}}{K_{AE}}$$

$$N_\gamma = \left( \frac{K_{pE}}{K_{AE}} - 1 \right) \cdot \tan(\rho_{AE})$$

Esaminando con un approccio da equilibrio limite, un meccanismo alla Coulomb e portando in conto le forze d'inerzia agenti sul volume di terreno a rottura. In campo statico, il classico meccanismo di Prandtl può essere infatti approssimato come mostrato nella figura che segue, eliminando la zona di transizione (ventaglio di Prandtl) ridotta alla sola linea AC, che viene riguardata come una parete ideale in equilibrio sotto l'azione della spinta attiva e della spinta passiva che riceve dai cunei I e III:

 <b>Colombi Roversi &amp; Associati</b> <b>Studio di Ingegneria</b>	Comune	<b>JOLANDA DI SAVOIA (FE)</b>	Comm. n°	Revisioni			
	Progetto	<b>INTERVENTI STRUTTURALI DI MESSA IN SICUREZZA GENERALE E ADEGUAMENTO SISMICO ISTITUTO "DON CHENDI" - INFANZIA, PRIMARIA, MEDIA</b>	<b>CRA18022</b>	0			
<b>RELAZIONE GEOTECNICA, SISMICA, CALCOLO DELLE OPERE DI FONDAZIONE</b>			Doc. n°	<b>RGT</b>			
			Fg. <b>43</b>	Di <b>57</b>	Compilato <b>A.C.</b>	Data <b>MAR.2019</b>	



*Schema di calcolo del carico limite ( $qL$ )*

Gli autori hanno ricavato le espressioni degli angoli  $\rho_A$  e  $\rho_P$  che definiscono le zone di spinta attiva e passiva, e dei coefficienti di spinta attiva e passiva  $K_A$  e  $K_P$  in funzione dell'angolo di attrito interno  $\varphi$  del terreno e dell'angolo di attrito  $\delta$  terreno – parete ideale:

$$\rho_A = \varphi + \tan^{-1} \cdot \left\{ \frac{\sqrt{\tan(\varphi) \cdot (\tan(\varphi) \cdot \cot(\varphi)) \cdot (1 + \tan(\delta) \cdot \cot(\varphi))} - \tan(\varphi)}{1 + \tan(\delta) \cdot (\tan(\varphi) + \cot(\varphi))} \right\}$$

$$\rho_P = -\varphi + \tan^{-1} \cdot \left\{ \frac{\sqrt{\tan(\varphi) \cdot (\tan(\varphi) \cdot \cot(\varphi)) \cdot (1 + \tan(\delta) \cdot \cot(\varphi))} + \tan(\varphi)}{1 + \tan(\delta) \cdot (\tan(\varphi) + \cot(\varphi))} \right\}$$

$$K_A = \frac{\cos^2(\varphi)}{\cos(\delta) \left\{ 1 + \sqrt{\frac{\sin(\varphi + \delta) \cdot \sin(\varphi)}{\cos(\delta)}} \right\}^2}$$

$$K_P = \frac{\cos^2(\varphi)}{\cos(\delta) \left\{ 1 - \sqrt{\frac{\sin(\varphi + \delta) \cdot \sin(\varphi)}{\cos(\delta)}} \right\}^2}$$

E' comunque da osservare che l'impiego delle precedenti formule assumendo  $\phi=0.5\delta$ , conduce a valore dei coefficienti di carico limite molto prossimi a quelli basati su un analisi alla Prandtl. Richards et. Al. hanno quindi esteso l'applicazione del meccanismo di Coulomb al caso sismico, portando in conto le forze d'inerzia agenti sul volume di terreno a rottura. Tali forze di massa, dovute ad accelerazioni  $k_h g$  e  $k_v g$ , agenti rispettivamente in direzione orizzontale e verticale, sono a loro volta pari a  $k_h \gamma$  e  $k_v \gamma$ . Sono state così ottenute le estensioni delle espressioni di  $\rho_A$  e  $\rho_P$ , nonché di  $K_A$  e  $K_P$ , rispettivamente indicate come  $\rho_{AE}$  e  $\rho_{PE}$  e come  $K_{AE}$  e  $K_{PE}$  per denotare le condizioni sismiche:

$$\rho_{AE} = (\varphi - \vartheta) + \tan^{-1} \cdot \left\{ \frac{\sqrt{(1 + \tan^2(\varphi - \vartheta)) \cdot [1 + \tan(\delta + \vartheta) \cdot \cot(\varphi - \vartheta)]} - \tan(\varphi - \vartheta)}{1 + \tan(\delta + \vartheta) \cdot (\tan(\varphi - \vartheta) + \cot(\varphi - \vartheta))} \right\}$$

$$\rho_{PE} = -(\varphi - \vartheta) + \tan^{-1} \cdot \left\{ \frac{\sqrt{(1 + \tan^2(\varphi - \vartheta)) \cdot [1 + \tan(\delta + \vartheta) \cdot \cot(\varphi - \vartheta)]} - \tan(\varphi - \vartheta)}{1 + \tan(\delta + \vartheta) \cdot (\tan(\varphi - \vartheta) + \cot(\varphi - \vartheta))} \right\}$$

 <b>Colombi Roversi &amp; Associati</b> <b>Studio di Ingegneria</b>	Comune	<b>JOLANDA DI SAVOIA (FE)</b>	Comm. n°	Revisioni			
	Progetto	<b>INTERVENTI STRUTTURALI DI MESSA IN SICUREZZA GENERALE E ADEGUAMENTO SISMICO ISTITUTO "DON CHENDI" - INFANZIA, PRIMARIA, MEDIA</b>	<b>CRA18022</b>	0			
			Doc. n°	<b>RGT</b>			
<b>RELAZIONE GEOTECNICA, SISMICA, CALCOLO DELLE OPERE DI FONDAZIONE</b>			Fg. <b>44</b>	Di <b>57</b>	Compilato <b>A.C.</b>	Data <b>MAR.2019</b>	

$$K_{AE} = \frac{\cos^2(\varphi - \vartheta)}{\cos(\vartheta) \cdot \cos(\delta + \vartheta) \left\{ 1 + \sqrt{\frac{\sin(\varphi + \delta) \cdot \sin(\varphi - \vartheta)}{\cos(\delta + \vartheta)}} \right\}^2}$$

$$K_{PE} = \frac{\cos^2(\varphi - \vartheta)}{\cos(\vartheta) \cdot \cos(\delta + \vartheta) \left\{ 1 - \sqrt{\frac{\sin(\varphi + \delta) \cdot \sin(\varphi - \vartheta)}{\cos(\delta + \vartheta)}} \right\}^2}$$

I valori di  $N_q$  e  $N_\gamma$  sono determinabili ancora avvalendosi delle formule precedenti, impiegando naturalmente le espressioni degli angoli  $\rho_{AE}$  e  $\rho_{PE}$  e dei coefficienti  $K_{AE}$  e  $K_{PE}$  relative al caso sismico. In tali espressioni compare l'angolo  $\theta$  definito come:

$$\tan(\theta) = \frac{k_h}{1 - k_v}$$

Nella tabella che segue sono mostrati i fattori di capacità portante calcolati per i seguenti valori dei parametri:

$$\phi = 30^\circ \quad \delta = 15^\circ$$

Per diversi valori dei coefficienti di spinta sismica:

$k_h/(1-k_v)$	$N_q$	$N_\gamma$	$N_c$
0	16.51037	23.75643	26.86476
0.087	13.11944	15.88906	20.9915
0.176	9.851541	9.465466	15.33132
0.268	7.297657	5.357472	10.90786
0.364	5.122904	2.604404	7.141079
0.466	3.216145	0.879102	3.838476
0.577	1.066982	1.103E-03	0.1160159

*Tabella dei fattori di capacità portante per  $\phi=30^\circ$*

## VERIFICA A SLITTAMENTO

In conformità con i criteri di progetto allo SLU, la stabilità di un plinto di fondazione deve essere verificata rispetto al collasso per slittamento oltre a quello per rottura generale. Rispetto al collasso per slittamento la resistenza viene valutata come somma di una componente dovuta all'adesione e una dovuta all'attrito fondazione-terreno; la resistenza laterale derivante dalla spinta passiva del terreno può essere messa in conto secondo una percentuale indicata dall'utente.

La resistenza di calcolo per attrito ed adesione è valutata secondo l'espressione:

$$F_{Rd} = N_{sd} \tan \delta + c_a A'$$

Nella quale  $N_{sd}$  è il valore di calcolo della forza verticale,  $\delta$  è l'angolo di resistenza a taglio alla base del plinto,  $c_a$  è l'adesione plinto-terreno e  $A'$  è l'area della fondazione efficace, intesa, in caso di carichi eccentrici, come area ridotta al centro della quale è applicata la risultante.

## FATTORI CORRETTIVI SISMICI: PAOLUCCI E PECKER

Per tener conto degli effetti inerziali indotti dal sisma sulla determinazione del  $q_{lim}$  vengono introdotti i fattori correttivi  $z$ :



 Colombi Roversi & Associati Studio di Ingegneria	Comune	JOLANDA DI SAVOIA (FE)	Comm. n°		Revisioni				
	Progetto	INTERVENTI STRUTTURALI DI MESSA IN SICUREZZA GENERALE E ADEGUAMENTO SISMICO ISTITUTO "DON CHENDI" - INFANZIA, PRIMARIA, MEDIA	CRA18022		0				
			Doc. n°		RGT				
RELAZIONE GEOTECNICA, SISMICA, CALCOLO DELLE OPERE DI FONDAZIONE			Fg.	Di	Compilato	Data			
			45	57	A.C.	MAR.2019			

$$z_q = \left(1 - \frac{k_h}{tg \phi}\right)^{0,35}$$

$$z_c = 1 - 0,32 \cdot k_h$$

$$z_\gamma = z_q$$

Dove  $k_h$  è il coefficiente sismico orizzontale.

### Calcolo coefficienti sismici

Le **NTC 2008** calcolano i coefficienti  $k_h$  e  $k_v$  in dipendenza di vari fattori:

$$k_h = \beta \times (a_{\max}/g)$$

$$k_v = \pm 0,5 \times k_h$$

$\beta$  Coefficiente di riduzione accelerazione massima attesa al sito;

$a_{\max}$  Accelerazione orizzontale massima attesa al sito;

$g$  Accelerazione di gravità;

Tutti i fattori presenti nelle precedenti formule dipendono dall'accelerazione massima attesa sul sito di riferimento rigido e dalle caratteristiche geomorfologiche del territorio.

$$a_{\max} = S_S S_T a_g$$

$S_S$  (effetto di amplificazione stratigrafica):  $0.90 \leq S_S \leq 1.80$ ; è funzione di  $F_0$  (Fattore massimo di amplificazione dello spettro in accelerazione orizzontale) e della categoria di suolo (A, B, C, D, E).

$S_T$  (effetto di amplificazione topografica) per fondazioni in prossimità di pendii.

Il valore di  $S_T$  varia con il variare delle quattro categorie topografiche introdotte:

$$T1 (S_T = 1.0) \quad T2 (S_T = 1.20) \quad T3 (S_T = 1.20) \quad T4 (S_T = 1.40).$$

Questi valori sono calcolati come funzione del punto in cui si trova il sito oggetto di analisi. Il parametro di entrata per il calcolo è il tempo di ritorno dell'evento sismico che è valutato come segue:

$$T_R = -V_R / \ln(1 - PVR)$$

Con  $V_R$  vita di riferimento della costruzione e  $PVR$  probabilità di superamento, nella vita di riferimento, associata allo stato limite considerato. La vita di riferimento dipende dalla vita nominale della costruzione e dalla classe d'uso della costruzione (in linea con quanto previsto al punto 2.4.3 delle NTC). In ogni caso  $V_R$  dovrà essere maggiore o uguale a 35 anni.

Per l'applicazione dell'**Eurocodice 8** (progettazione geotecnica in campo sismico) il coefficiente sismico orizzontale viene così definito:

$$k_h = a_{gR} \gamma_I S / (g)$$

$a_{gR}$  : accelerazione di picco di riferimento su suolo rigido affiorante,

$\gamma_I$ : fattore di importanza,

$S$ : soil factor e dipende dal tipo di terreno (da A ad E).

$$a_g = a_{gR} \gamma_I$$

è la "design ground acceleration on type A ground".

Il coefficiente sismico verticale  $k_v$  è definito in funzione di  $k_h$ , e vale:

$$k_v = \pm 0.5 k_h$$

 <b>Colombi Roversi &amp; Associati</b> <b>Studio di Ingegneria</b>	Comune	<b>JOLANDA DI SAVOIA (FE)</b>	Comm. n°	Revisioni				
	Progetto	<b>INTERVENTI STRUTTURALI DI MESSA IN SICUREZZA GENERALE E ADEGUAMENTO SISMICO ISTITUTO "DON CHENDI" - INFANZIA, PRIMARIA, MEDIA</b>	<b>CRA18022</b>	0				
			Doc. n°	<b>RGT</b>				
<b>RELAZIONE GEOTECNICA, SISMICA, CALCOLO DELLE OPERE DI FONDAZIONE</b>			Fg.	Di	Compilato	Data		
			<b>46</b>	<b>57</b>	<b>A.C.</b>	<b>MAR.2019</b>		

## 4.1 Verifica fondazione rappresentativa Blocco A-US1

### DATI GENERALI

Azione sismica	NTC 2018
Larghezza fondazione	1.2 m
Lunghezza fondazione	20.0 m
Profondità piano di posa	0.45 m
Altezza di incastro	0.45 m
Profondità falda	2.0

### SISMA

Accelerazione massima (ag/g)	0.183
Effetto sismico secondo	Paolucci e Pecker (1997)
Coefficiente sismico orizzontale	0.0441

### Coefficienti sismici [N.T.C.]

#### Dati generali

Tipo opera:	2 - Opere ordinarie
Classe d'uso:	Classe IV
Vita nominale:	50.0 [anni]
Vita di riferimento:	100.0 [anni]

#### Parametri sismici su sito di riferimento

Categoria sottosuolo:	D
Categoria topografica:	T1

S.L. Stato limite	TR Tempo ritorno [anni]	ag [m/s <sup>2</sup> ]	F0 [-]	TC* [sec]
S.L.O.	60.0	0.38	2.57	0.28
S.L.D.	101.0	0.45	2.56	0.3
S.L.V.	949.0	1.0	2.6	0.33
S.L.C.	1950.0	1.25	2.62	0.34

### Coefficienti sismici orizzontali e verticali

Opera: Stabilità dei pendii e Fondazioni

S.L. Stato limite	amax [m/s <sup>2</sup> ]	beta [-]	kh [-]	kv [sec]
S.L.O.	0.684	0.2	0.014	0.007
S.L.D.	0.81	0.2	0.0165	0.0083
S.L.V.	1.8	0.24	0.0441	0.022
S.L.C.	2.25	0.24	0.0551	0.0275

### STRATIGRAFIA TERRENO

Spessore strato [m]	Peso unità di volume [kN/m <sup>3</sup> ]	Peso unità di volume saturato	Angolo di attrito [°]	Coesione [kN/m <sup>2</sup> ]	Coesione non drenata [kN/m <sup>2</sup> ]	Modulo Elastico [kN/m <sup>2</sup> ]	Modulo Edometri co [kN/m <sup>2</sup> ]	Poisson	Coeff. consolid az. primaria	Coeff. consolid azione secondar	Descrizi one
---------------------------	--	--	-----------------------------	----------------------------------	--	--	--	---------	---------------------------------------	--	-----------------

 Colombi Roversi & Associati Studio di Ingegneria	Comune	JOLANDA DI SAVOIA (FE)	Comm. n°		Revisioni				
	Progetto	INTERVENTI STRUTTURALI DI MESSA IN SICUREZZA GENERALE E ADEGUAMENTO SISMICO ISTITUTO "DON CHENDI" - INFANZIA, PRIMARIA, MEDIA	CRA18022		0				
			Doc. n°						
			RGT						
RELAZIONE GEOTECNICA, SISMICA, CALCOLO DELLE OPERE DI FONDAZIONE			Fg.	Di	Compilato	Data			
			47	57	A.C.	MAR.2019			

		[kN/m³]							[cmq/s]	ia	
5.0	16.5	17.0	24.0	0.0	30.0	9000.0	1000.0	0.0	0.0	0.0	A
6.0	16.5	17.0	22.0	0.0	20.0	9000.0	1200.0	0.0	0.0	0.0	B
7.0	16.5	17.0	21.0	0.0	30.0	12500.0	1800.0	0.0	0.0	0.0	C
2.0	17.0	17.5	30.0	0.0	0.0	24000.0	0.0	0.0	0.0	0.0	D
2.0	16.5	17.0	20.0	0.0	40.0	15000.0	2300.0	0.0	0.0	0.0	E
8.0	17.5	18.0	30.0	0.0	0.0	27000.0	0.0	0.0	0.0	0.0	F

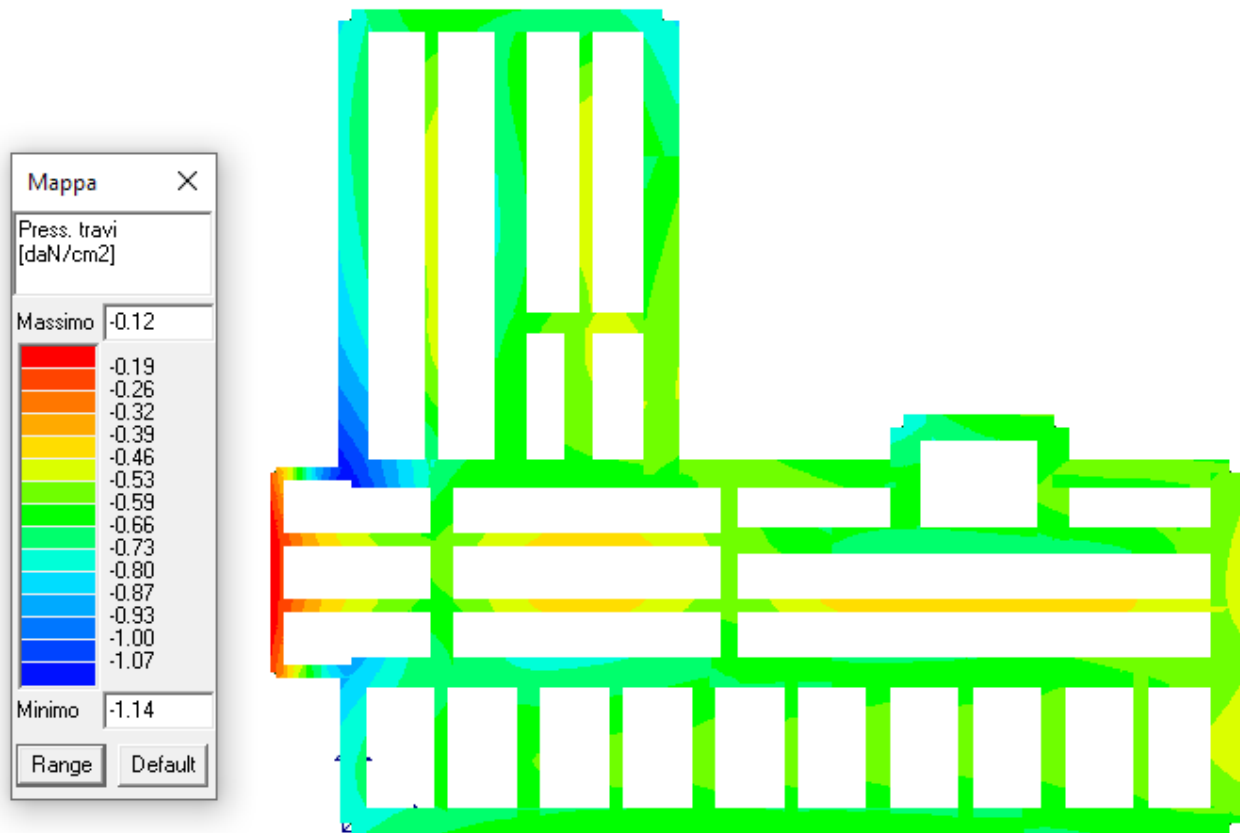
Carichi di progetto agenti sulla fondazione

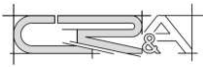
Nr.	Nome combinazione	Pressione normale di progetto [kN/m²]	N [kN]	Mx [kN·m]	My [kN·m]	Hx [kN]	Hy [kN]	Tipo
1	A1+M1+R3	65.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	Progetto
2	Sisma	65.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	Progetto
3	S.L.E.	60.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	Servizio

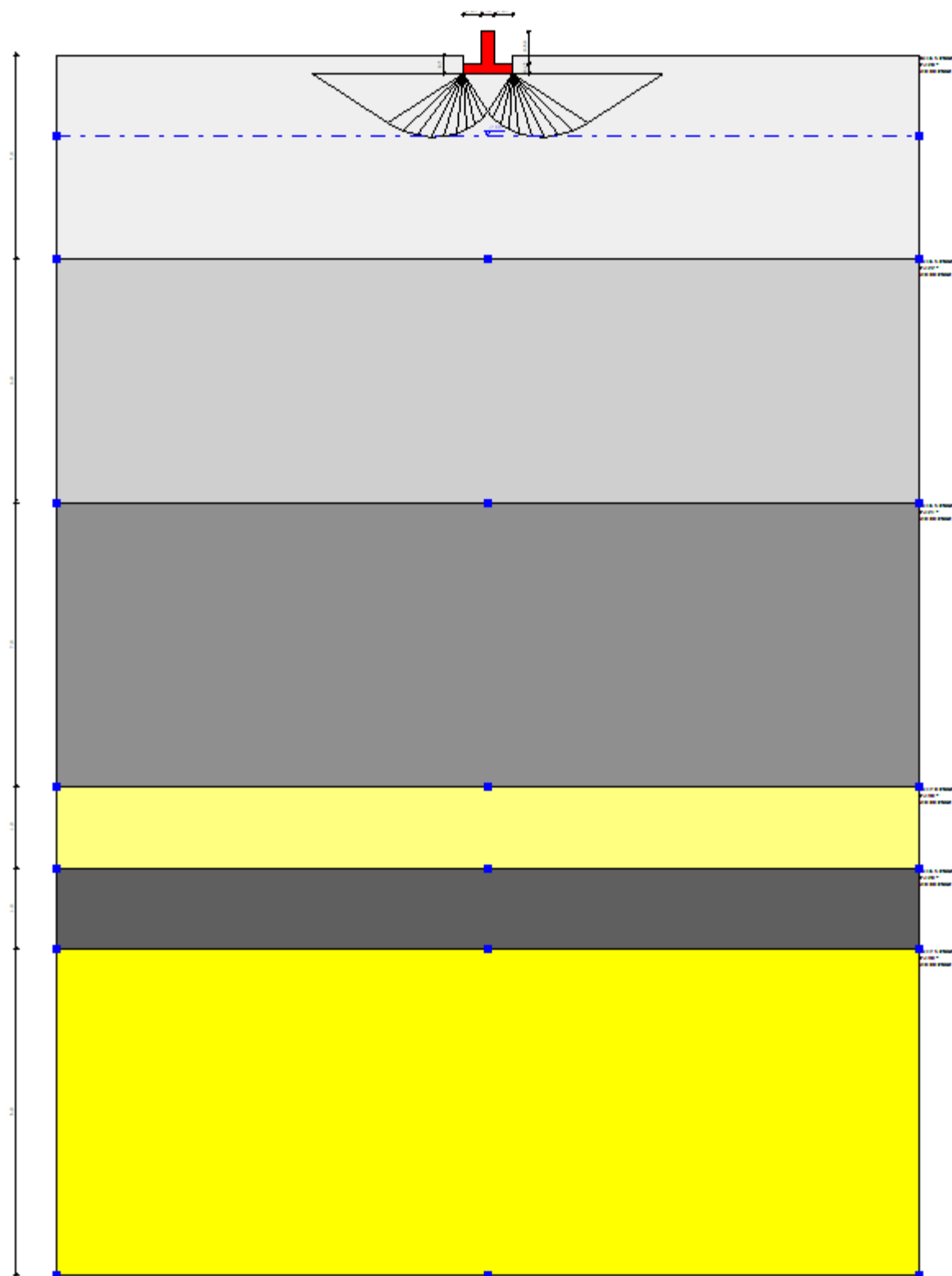
Sisma + Coeff. parziali parametri geotecnici terreno + Resistenze

Nr	Correzione Sismica	Tangente angolo di resistenza al taglio	Coesione efficace	Coesione non drenata	Peso Unità volume in fondazione	Peso unità volume copertura	Coef. Rid. Capacità portante verticale	Coef.Rid.Ca pacità portante orizzontale
1	No	1	1	1	1	1	2.3	1.1
2	Si	1	1	1	1	1	2.3	1.1
3	No	1	1	1	1	1	1	1

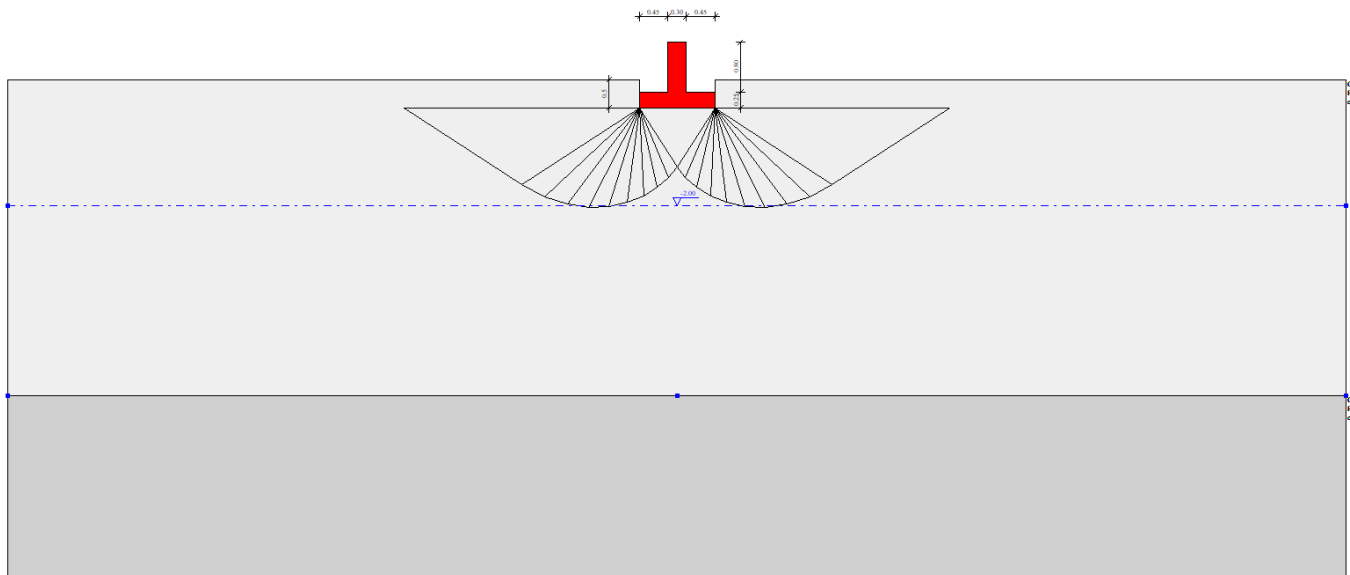
Azioni derivanti dal modello numerico strutturale



 <b>Colombi Roversi &amp; Associati</b> <b>Studio di Ingegneria</b>	Comune	<b>JOLANDA DI SAVOIA (FE)</b>	Comm. n°	Revisioni			
	Progetto	<b>INTERVENTI STRUTTURALI DI MESSA IN SICUREZZA GENERALE E ADEGUAMENTO SISMICO ISTITUTO "DON CHENDI" - INFANZIA, PRIMARIA, MEDIA</b>	<b>CRA18022</b>	0			
			Doc. n°	<b>RGT</b>			
<b>RELAZIONE GEOTECNICA, SISMICA, CALCOLO DELLE OPERE DI FONDAZIONE</b>			Fg. <b>48</b>	Di <b>57</b>	Compilato <b>A.C.</b>	Data <b>MAR.2019</b>	



 <b>Colombi Roversi &amp; Associati</b> <b>Studio di Ingegneria</b>	Comune	<b>JOLANDA DI SAVOIA (FE)</b>	Comm. n°	Revisioni				
	Progetto	<b>INTERVENTI STRUTTURALI DI MESSA IN SICUREZZA GENERALE E ADEGUAMENTO SISMICO ISTITUTO "DON CHENDI" - INFANZIA, PRIMARIA, MEDIA</b>	<b>CRA18022</b>	0				
<b>RELAZIONE GEOTECNICA, SISMICA, CALCOLO DELLE OPERE DI FONDAZIONE</b>			Doc. n°	<b>RGT</b>				
			Fg. 49	Di 57	Compilato A.C.	Data MAR.2019		



Stratigrafia modellata con ingrandimento zona fondazione

#### CARICO LIMITE FONDAZIONE COMBINAZIONE...Sisma

Autore: Brinch - Hansen 1970

Carico limite [Qult]	150.51 kN/m <sup>2</sup>
Resistenza di progetto[Rd]	65.44 kN/m <sup>2</sup>
Tensione [Ed]	65.0 kN/m <sup>2</sup>
Fattore sicurezza [Fs=Qult/Ed]	2.32
Condizione di verifica [Ed<=Rd]	Verificata

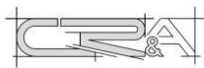
#### COEFFICIENTE DI SOTTOFONDAZIONE BOWLES (1982)

Costante di Winkler 6020.49 kN/m<sup>3</sup>

#### A1+M1+R3

Autore: Brinch - Hansen 1970 (Condizione drenata)

Fattore [Nq]	9.6
Fattore [Nc]	19.32
Fattore [Ng]	7.66
Fattore forma [Sc]	1.03
Fattore profondità [Dc]	1.13
Fattore inclinazione carichi [Ic]	1.0
Fattore inclinazione pendio [Gc]	1.0
Fattore inclinazione base [Bc]	1.0
Fattore forma [Sq]	1.02
Fattore profondità [Dq]	1.12
Fattore inclinazione carichi [Iq]	1.0
Fattore inclinazione pendio [Gq]	1.0
Fattore inclinazione base [Bq]	1.0
Fattore forma [Sg]	0.98
Fattore profondità [Dg]	1.0
Fattore inclinazione carichi [Ig]	1.0
Fattore inclinazione pendio [Gg]	1.0
Fattore inclinazione base [Bg]	1.0
Fattore correzione sismico inerziale [zq]	1.0
Fattore correzione sismico inerziale [zg]	1.0
Fattore correzione sismico inerziale [zc]	1.0

 Colombi Roversi & Associati Studio di Ingegneria	Comune	JOLANDA DI SAVOIA (FE)	Comm. n°		Revisioni				
	Progetto	INTERVENTI STRUTTURALI DI MESSA IN SICUREZZA GENERALE E ADEGUAMENTO SISMICO ISTITUTO "DON CHENDI" - INFANZIA, PRIMARIA, MEDIA	CRA18022		0				
			Doc. n°  RGT						
RELAZIONE GEOTECNICA, SISMICA, CALCOLO DELLE OPERE DI FONDAZIONE			Fg.	Di	Compilato	Data			
			50	57	A.C.	MAR.2019			

=====

Carico limite	156.11 kN/m <sup>2</sup>
Resistenza di progetto	67.87 kN/m <sup>2</sup>

Condizione di verifica [Ed<=Rd]                      Verificata

=====

### Sisma

Autore: Brinch - Hansen 1970 (Condizione drenata)

=====

Fattore [Nq]	9.6
Fattore [Nc]	19.32
Fattore [Ng]	7.66
Fattore forma [Sc]	1.03
Fattore profondità [Dc]	1.13
Fattore inclinazione carichi [Ic]	1.0
Fattore inclinazione pendio [Gc]	1.0
Fattore inclinazione base [Bc]	1.0
Fattore forma [Sq]	1.02
Fattore profondità [Dq]	1.12
Fattore inclinazione carichi [Iq]	1.0
Fattore inclinazione pendio [Gq]	1.0
Fattore inclinazione base [Bq]	1.0
Fattore forma [Sg]	0.98
Fattore profondità [Dg]	1.0
Fattore inclinazione carichi [Ig]	1.0
Fattore inclinazione pendio [Gg]	1.0
Fattore inclinazione base [Bg]	1.0
Fattore correzione sismico inerziale [zq]	0.96
Fattore correzione sismico inerziale [zg]	0.96
Fattore correzione sismico inerziale [zc]	0.99

=====

Carico limite	150.51 kN/m <sup>2</sup>
Resistenza di progetto	65.44 kN/m <sup>2</sup>

Condizione di verifica [Ed<=Rd]                      Verificata

=====

### CARICO LIMITE FONDAZIONE COMBINAZIONE...A1+M1+R3

Autore: Brinch - Hansen 1970

Carico limite [Qult]	163.48 kN/m <sup>2</sup>
Resistenza di progetto[Rd]	71.08 kN/m <sup>2</sup>
Tensione [Ed]	65.0 kN/m <sup>2</sup>
Fattore sicurezza [Fs=Qult/Ed]	2.52
Condizione di verifica [Ed<=Rd]	Verificata

### COEFFICIENTE DI SOTTOFONDAZIONE BOWLES (1982)

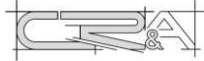
Costante di Winkler	6539.02 kN/m <sup>3</sup>
---------------------	---------------------------

### A1+M1+R3

Autore: Brinch - Hansen 1970 (Condizione non drenata)

=====

Fattore [Nq]	1.0
Fattore [Nc]	5.14
Fattore [Ng]	0.0
Fattore forma [Sc]	1.01

 Colombi Roversi & Associati Studio di Ingegneria	Comune	<b>JOLANDA DI SAVOIA (FE)</b>		Comm. n°		Revisioni				
	Progetto	<b>INTERVENTI STRUTTURALI DI MESSA IN SICUREZZA GENERALE E ADEGUAMENTO SISMICO ISTITUTO "DON CHENDI" - INFANZIA, PRIMARIA, MEDIA</b>		<b>CRA18022</b>		0				
				Doc. n°		<b>RGT</b>				
<b>RELAZIONE GEOTECNICA, SISMICA, CALCOLO DELLE OPERE DI FONDAZIONE</b>				Fg.	Di	Compilato		Data		
				<b>51</b>	<b>57</b>	<b>A.C.</b>		<b>MAR.2019</b>		

Fattore profondità [Dc]	1.0
Fattore inclinazione carichi [Ic]	1.0
Fattore inclinazione pendio [Gc]	1.0
Fattore inclinazione base [Bc]	1.0
Fattore correzione sismico inerziale [zq]	1.0
Fattore correzione sismico inerziale [zg]	1.0
Fattore correzione sismico inerziale [zc]	1.0

Carico limite	163.48 kN/m²
Resistenza di progetto	71.08 kN/m²

Condizione di verifica [Ed<=Rd] Verificata

### Sisma

Autore: Brinch - Hansen 1970 (Condizione non drenata)

Fattore [Nq]	1.0
Fattore [Nc]	5.14
Fattore [Ng]	0.0
Fattore forma [Sc]	1.01
Fattore profondità [Dc]	1.0
Fattore inclinazione carichi [Ic]	1.0
Fattore inclinazione pendio [Gc]	1.0
Fattore inclinazione base [Bc]	1.0
Fattore correzione sismico inerziale [zq]	1.0
Fattore correzione sismico inerziale [zg]	1.0
Fattore correzione sismico inerziale [zc]	1.0

Carico limite	163.48 kN/m²
Resistenza di progetto	71.08 kN/m²

Condizione di verifica [Ed<=Rd] Verificata

 <b>Colombi Roversi &amp; Associati</b> <b>Studio di Ingegneria</b>	Comune	<b>JOLANDA DI SAVOIA (FE)</b>	Comm. n°	Revisioni				
	Progetto	<b>INTERVENTI STRUTTURALI DI MESSA IN SICUREZZA GENERALE E ADEGUAMENTO SISMICO ISTITUTO "DON CHENDI" - INFANZIA, PRIMARIA, MEDIA</b>	<b>CRA18022</b>	0				
			Doc. n°	<b>RGT</b>				
<b>RELAZIONE GEOTECNICA, SISMICA, CALCOLO DELLE OPERE DI FONDAZIONE</b>			Fg.	Di	Compilato	Data		
			<b>52</b>	<b>57</b>	<b>A.C.</b>	<b>MAR.2019</b>		

## 4.2 Verifica fondazione rappresentativa Blocco B-US3

### DATI GENERALI

Azione sismica	NTC 2018
Larghezza fondazione	1.2 m
Lunghezza fondazione	30.9 m
Profondità piano di posa	0.45 m
Altezza di incastro	0.45 m
Profondità falda	2.0

### SISMA

Accelerazione massima (ag/g)	0.183
Effetto sismico secondo	Paolucci e Pecker (1997)
Coefficiente sismico orizzontale	0.0441

### Coefficienti sismici [N.T.C.]

#### Dati generali

Tipo opera:	2 - Opere ordinarie
Classe d'uso:	Classe IV
Vita nominale:	50.0 [anni]
Vita di riferimento:	100.0 [anni]

#### Parametri sismici su sito di riferimento

Categoria sottosuolo:	D
Categoria topografica:	T1

S.L. Stato limite	TR Tempo ritorno [anni]	ag [m/s <sup>2</sup> ]	F0 [-]	TC* [sec]
S.L.O.	60.0	0.38	2.57	0.28
S.L.D.	101.0	0.45	2.56	0.3
S.L.V.	949.0	1.0	2.6	0.33
S.L.C.	1950.0	1.25	2.62	0.34

### Coefficienti sismici orizzontali e verticali

Opera: Stabilità dei pendii e Fondazioni

S.L. Stato limite	amax [m/s <sup>2</sup> ]	beta [-]	kh [-]	kv [sec]
S.L.O.	0.684	0.2	0.014	0.007
S.L.D.	0.81	0.2	0.0165	0.0083
S.L.V.	1.8	0.24	0.0441	0.022
S.L.C.	2.25	0.24	0.0551	0.0275

### STRATIGRAFIA TERRENO

Spessore strato [m]	Peso unità di volume [kN/m <sup>3</sup> ]	Peso unità di volume saturato	Angolo di attrito [°]	Coesione [kN/m <sup>2</sup> ]	Coesione non drenata [kN/m <sup>2</sup> ]	Modulo Elastico [kN/m <sup>2</sup> ]	Modulo Edometri co [kN/m <sup>2</sup> ]	Poisson	Coeff. consolid az. primaria	Coeff. consolid azione secondar	Descrizi one
---------------------------	--	--	-----------------------------	----------------------------------	--	--	--	---------	---------------------------------------	--	-----------------



 Colombi Roversi & Associati Studio di Ingegneria	Comune	JOLANDA DI SAVOIA (FE)	Comm. n°		Revisioni				
	Progetto	INTERVENTI STRUTTURALI DI MESSA IN SICUREZZA GENERALE E ADEGUAMENTO SISMICO ISTITUTO "DON CHENDI" - INFANZIA, PRIMARIA, MEDIA	CRA18022		0				
			Doc. n°						
			RGT						
RELAZIONE GEOTECNICA, SISMICA, CALCOLO DELLE OPERE DI FONDAZIONE			Fg.	Di	Compilato		Data		
			53	57	A.C.		MAR.2019		

		[kN/m <sup>3</sup> ]							[cmq/s]	ia	
5.0	16.5	17.0	24.0	0.0	30.0	9000.0	1000.0	0.0	0.0	0.0	A
6.0	16.5	17.0	22.0	0.0	20.0	9000.0	1200.0	0.0	0.0	0.0	B
7.0	16.5	17.0	21.0	0.0	30.0	12500.0	1800.0	0.0	0.0	0.0	C
2.0	17.0	17.5	30.0	0.0	0.0	24000.0	0.0	0.0	0.0	0.0	D
2.0	16.5	17.0	20.0	0.0	40.0	15000.0	2300.0	0.0	0.0	0.0	E
8.0	17.5	18.0	30.0	0.0	0.0	27000.0	0.0	0.0	0.0	0.0	F

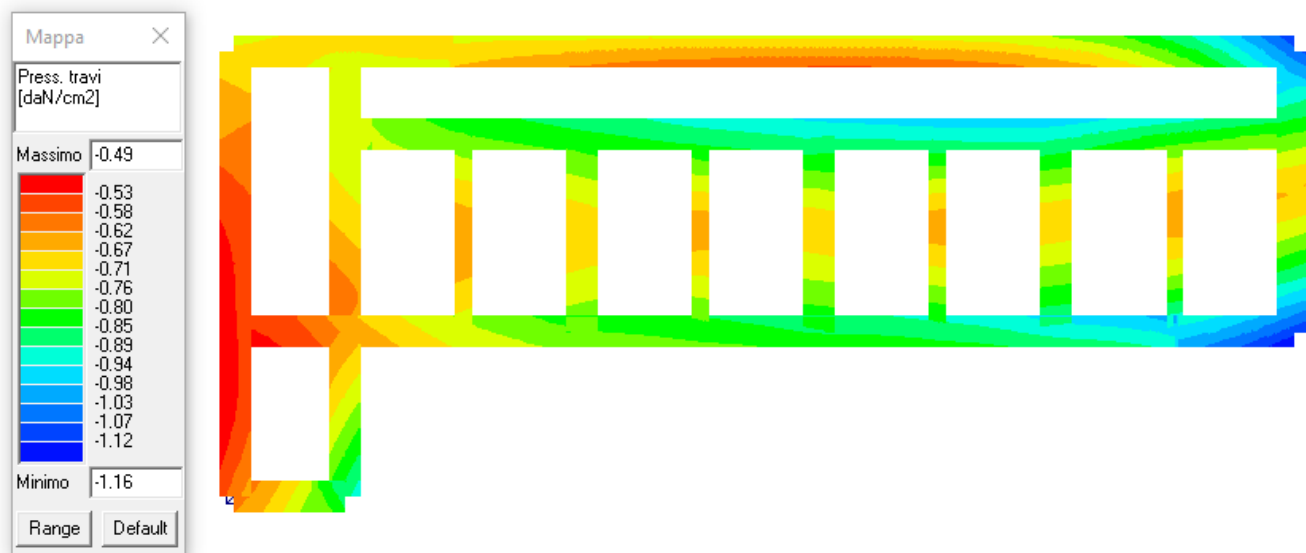
Carichi di progetto agenti sulla fondazione

Nr.	Nome combinazioni	Pressione normale di progetto [kN/m <sup>2</sup> ]	N [kN]	Mx [kN·m]	My [kN·m]	Hx [kN]	Hy [kN]	Tipo
1	A1+M1+R3	62.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	Progetto
2	Sisma	62.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	Progetto
3	S.L.E.	54.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	Servizio

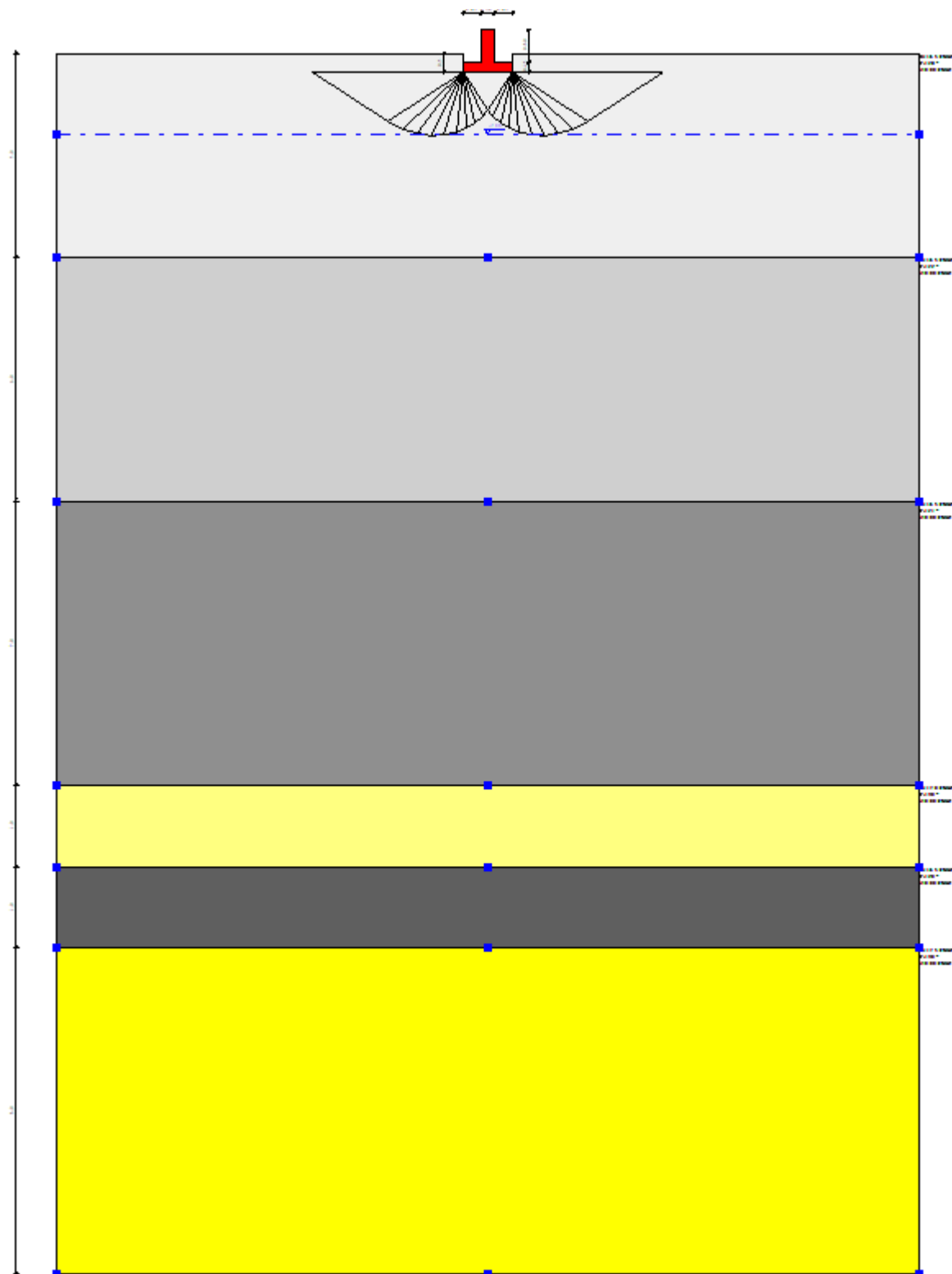
Sisma + Coeff. parziali parametri geotecnici terreno + Resistenze

Nr	Correzione Sismica	Tangente angolo di resistenza al taglio	Coesione efficace	Coesione non drenata	Peso Unità volume in fondazione	Peso unità volume copertura	Coef. Rid. Capacità portante verticale	Coef. Rid. Ca pacità portante orizzontale
1	No	1	1	1	1	1	2.3	1.1
2	Si	1	1	1	1	1	2.3	1.1
3	No	1	1	1	1	1	1	1

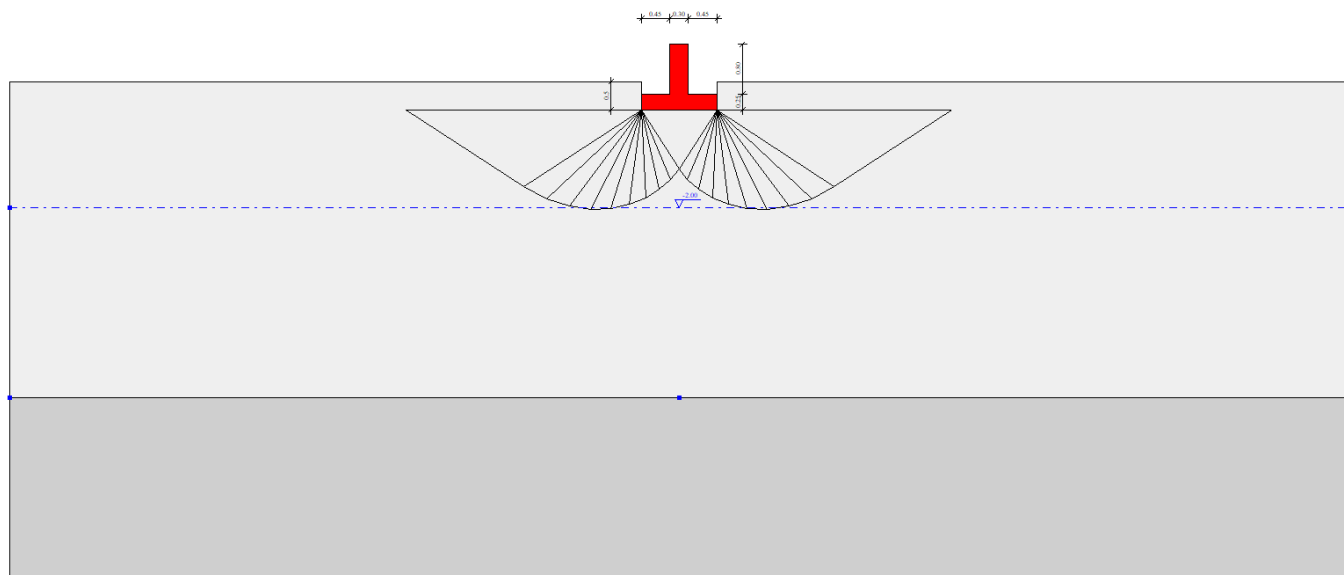
Azioni derivanti dal modello numerico strutturale



 <b>Colombi Roversi &amp; Associati</b> <b>Studio di Ingegneria</b>	Comune	<b>JOLANDA DI SAVOIA (FE)</b>	Comm. n°	Revisioni			
	Progetto	<b>INTERVENTI STRUTTURALI DI MESSA IN SICUREZZA GENERALE E ADEGUAMENTO SISMICO ISTITUTO "DON CHENDI" - INFANZIA, PRIMARIA, MEDIA</b>	<b>CRA18022</b>	0			
			Doc. n°	<b>RGT</b>			
<b>RELAZIONE GEOTECNICA, SISMICA, CALCOLO DELLE OPERE DI FONDAZIONE</b>			Fg. 54	Di 57	Compilato A.C.	Data <b>MAR.2019</b>	



 <b>Colombi Roversi &amp; Associati</b> <b>Studio di Ingegneria</b>	Comune	<b>JOLANDA DI SAVOIA (FE)</b>	Comm. n°	Revisioni				
	Progetto	<b>INTERVENTI STRUTTURALI DI MESSA IN SICUREZZA GENERALE E ADEGUAMENTO SISMICO ISTITUTO "DON CHENDI" - INFANZIA, PRIMARIA, MEDIA</b>	<b>CRA18022</b>	0				
			Doc. n°	<b>RGT</b>				
<b>RELAZIONE GEOTECNICA, SISMICA, CALCOLO DELLE OPERE DI FONDAZIONE</b>			Fg.	Di	Compilato	Data		
			<b>55</b>	<b>57</b>	<b>A.C.</b>	<b>MAR.2019</b>		



Stratigrafia modellata con ingrandimento zona fondazione

#### CARICO LIMITE FONDAZIONE COMBINAZIONE...A1+M1+R3

Autore: Brinch - Hansen 1970

Carico limite [Qult]	162.82 kN/m <sup>2</sup>
Resistenza di progetto[Rd]	70.79 kN/m <sup>2</sup>
Tensione [Ed]	62.0 kN/m <sup>2</sup>
Fattore sicurezza [Fs=Qult/Ed]	2.63
Condizione di verifica [Ed<=Rd]	Verificata

#### COEFFICIENTE DI SOTTOFONDAZIONE BOWLES (1982)

Costante di Winkler 6512.91 kN/m<sup>3</sup>

#### A1+M1+R3

Autore: Brinch - Hansen 1970 (Condizione non drenata)

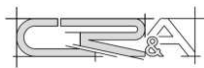
Fattore [Nq]	1.0
Fattore [Nc]	5.14
Fattore [Ng]	0.0
Fattore forma [Sc]	1.01
Fattore profondità [Dc]	1.0
Fattore inclinazione carichi [Ic]	1.0
Fattore inclinazione pendio [Gc]	1.0
Fattore inclinazione base [Bc]	1.0
Fattore correzione sismico inerziale [zq]	1.0
Fattore correzione sismico inerziale [zg]	1.0
Fattore correzione sismico inerziale [zc]	1.0

Carico limite	162.82 kN/m <sup>2</sup>
Resistenza di progetto	70.79 kN/m <sup>2</sup>

Condizione di verifica [Ed<=Rd] Verificata

#### Sisma

Autore: Brinch - Hansen 1970 (Condizione non drenata)

 Colombi Roversi & Associati Studio di Ingegneria	Comune	JOLANDA DI SAVOIA (FE)	Comm. n°		Revisioni				
	Progetto	INTERVENTI STRUTTURALI DI MESSA IN SICUREZZA GENERALE E ADEGUAMENTO SISMICO ISTITUTO "DON CHENDI" - INFANZIA, PRIMARIA, MEDIA	CRA18022		0				
			Doc. n°  RGT						
RELAZIONE GEOTECNICA, SISMICA, CALCOLO DELLE OPERE DI FONDAZIONE			Fg.	Di	Compilato	Data			
			56	57	A.C.	MAR.2019			

Fattore [Nq]	1.0
Fattore [Nc]	5.14
Fattore [Ng]	0.0
Fattore forma [Sc]	1.01
Fattore profondità [Dc]	1.0
Fattore inclinazione carichi [Ic]	1.0
Fattore inclinazione pendio [Gc]	1.0
Fattore inclinazione base [Bc]	1.0
Fattore correzione sismico inerziale [zq]	1.0
Fattore correzione sismico inerziale [zg]	1.0
Fattore correzione sismico inerziale [zc]	1.0
Carico limite	162.82 kN/m <sup>2</sup>
Resistenza di progetto	70.79 kN/m <sup>2</sup>

Condizione di verifica [Ed<=Rd] Verificata

CARICO LIMITE FONDAZIONE COMBINAZIONE...Sisma  
Autore: Brinch - Hansen 1970

Carico limite [Qult]	150.32 kN/m <sup>2</sup>
Resistenza di progetto[Rd]	65.35 kN/m <sup>2</sup>
Tensione [Ed]	62.0 kN/m <sup>2</sup>
Fattore sicurezza [Fs=Qult/Ed]	2.42
Condizione di verifica [Ed<=Rd]	Verificata

COEFFICIENTE DI SOTTOFONDAZIONE BOWLES (1982)  
Costante di Winkler 6012.61 kN/m<sup>3</sup>

### A1+M1+R3

Autore: Brinch - Hansen 1970 (Condizione drenata)

Fattore [Nq]	9.6
Fattore [Nc]	19.32
Fattore [Ng]	7.66
Fattore forma [Sc]	1.02
Fattore profondità [Dc]	1.13
Fattore inclinazione carichi [Ic]	1.0
Fattore inclinazione pendio [Gc]	1.0
Fattore inclinazione base [Bc]	1.0
Fattore forma [Sq]	1.02
Fattore profondità [Dq]	1.12
Fattore inclinazione carichi [Iq]	1.0
Fattore inclinazione pendio [Gq]	1.0
Fattore inclinazione base [Bq]	1.0
Fattore forma [Sg]	0.99
Fattore profondità [Dg]	1.0
Fattore inclinazione carichi [Ig]	1.0
Fattore inclinazione pendio [Gg]	1.0
Fattore inclinazione base [Bg]	1.0
Fattore correzione sismico inerziale [zq]	1.0
Fattore correzione sismico inerziale [zg]	1.0
Fattore correzione sismico inerziale [zc]	1.0

Carico limite 155.9 kN/m<sup>2</sup>

 Colombi Roversi & Associati Studio di Ingegneria	Comune	JOLANDA DI SAVOIA (FE)	Comm. n°		Revisioni				
	Progetto	INTERVENTI STRUTTURALI DI MESSA IN SICUREZZA GENERALE E ADEGUAMENTO SISMICO ISTITUTO "DON CHENDI" - INFANZIA, PRIMARIA, MEDIA	CRA18022		0				
			Doc. n°  RGT						
RELAZIONE GEOTECNICA, SISMICA, CALCOLO DELLE OPERE DI FONDAZIONE			Fg.	Di	Compilato	Data			
			57	57	A.C.	MAR.2019			

Resistenza di progetto 67.78 kN/m²

Condizione di verifica [Ed<=Rd] Verificata

=====

### Sisma

Autore: Brinch - Hansen 1970 (Condizione drenata)

=====

Fattore [Nq]	9.6
Fattore [Nc]	19.32
Fattore [Ng]	7.66
Fattore forma [Sc]	1.02
Fattore profondità [Dc]	1.13
Fattore inclinazione carichi [Ic]	1.0
Fattore inclinazione pendio [Gc]	1.0
Fattore inclinazione base [Bc]	1.0
Fattore forma [Sq]	1.02
Fattore profondità [Dq]	1.12
Fattore inclinazione carichi [Iq]	1.0
Fattore inclinazione pendio [Gq]	1.0
Fattore inclinazione base [Bq]	1.0
Fattore forma [Sg]	0.99
Fattore profondità [Dg]	1.0
Fattore inclinazione carichi [Ig]	1.0
Fattore inclinazione pendio [Gg]	1.0
Fattore inclinazione base [Bg]	1.0
Fattore correzione sismico inerziale [zq]	0.96
Fattore correzione sismico inerziale [zg]	0.96
Fattore correzione sismico inerziale [zc]	0.99

=====

Carico limite	150.32 kN/m²
Resistenza di progetto	65.35 kN/m²

Condizione di verifica [Ed<=Rd] Verificata

=====