

REGIONE VENETO

PROVINCIA DI VICENZA

**PROGETTO DI OTTIMIZZAZIONE DEL FRONTE PERIMETRALE E COMPLETAMENTO
DEL SEDIME DELLA DISCARICA DI GRUMOLO DELLE ABBADESSE CON
INCREMENTO DEI VOLUMI DI CONFERIMENTO**

PROGETTO DEFINITIVO

Descrizione Elaborato

FASCICOLO DI ANALISI E CALCOLI

Edizione 01	Data: 30.04.2021	Rev.00	Data 30.04.2021
-------------	------------------	--------	-----------------

Ruolo	Tecnico	Ente / Società
Coordinamento Generale Progetto	Ing. Ruggero Casolin	Società Intercomunale Ambiente s.r.l.
Coordinamento Tecnico Progetto	Ing. Stefano Busana	Studio Tecnico Ing. Stefano Busana
Collaboratori:	Ing. Giulia Dal Corso	Valore Ambiente s.r.l.
	Geom. Gianluca Meneghin	
Coordinamento Sicurezza per la Progettazione:	Ing. Mauro Sofia	Studio di Progettazione Ing. Mauro Sofia
Coordinamento Studio di Impatto Ambientale:	Arch. Maria Dei Svaldi	Desam Ingegneria e ambiente s.r.l.
Estensori Studio di Impatto Ambientale:	Ing. Francesco Bertin	Desam Ingegneria e ambiente s.r.l.
	Ing. Andrea dei Svaldi	
	Dott. Paolo Criscione	
	Dott. Marco Zanta	
	Dott.ssa Bianca Pusterla	
Studio LCA Analisi Alternative	Dott. Alex Zabeo	
	Dott. Michele Molon	
Studio di Impatto odorigeno	Ing. Andrea Dian	Umwelt s.r.l.
	Ing. Alessandro Ramon	
Studio di Impatto Acustico (integrazione)	p.i. Antonio Trivellato	

Cod. file: FAC.pdf	Data emissione: 30.04.2021	Controllato:
--------------------	----------------------------	--------------

Società Intercomunale Ambiente s.r.l.

Via Quadri snc
Grumolo delle Abbadesse (VI)
t. +39.0444.583558 | info@sia.vi.it



SOMMARIO

1	PREMESSA	4
2	BARRIERE E DRENAGGI DI FONDO	6
2.1	GENERALITÀ.....	6
2.2	DIAFRAMMA PLASTICO PERIMETRALE [PUNTO 6.3.2.2]	6
2.3	IMPERMEABILIZZAZIONE ARTIFICIALE DELLE SPONDE [SOTTOPAR. 6.3.4]	7
2.4	DRENAGGIO DELLE SPONDE [PUNTO 6.3.7.3].....	10
2.4.1	<i>Generalità</i>	10
2.4.2	<i>Lineamenti teorici e criteri progettuali</i>	11
2.4.3	<i>Verifica dell'equivalenza fra strato granulare e geocomposito drenante</i>	18
3	COMPLETAMENTO DELLA COPERTURA FINALE	22
3.1	GENERALITÀ.....	22
3.2	DRENAGGIO IPODERMICO DELLE ACQUE METEORICHE [SOTTOPAR. 8.4.3].....	22
3.2.1	<i>Criteri di scelta – Lineamenti teorici</i>	22
3.2.1.1	Determinazione della portata di progetto del drenaggio ipodermico	22
3.2.1.2	Verifica del GCD sottoposto alla portata di progetto.....	27
3.3	DRENAGGIO DEL BIOGAS: ASPETTI TEORICI ED ANALISI DEL FLUSSO [PAR. 3.7 DELLE SPECIFICHE TECNICHE] .	32
3.3.1	<i>Generalità</i>	32
3.3.2	<i>Stima della produzione massima di biogas</i>	33
3.3.3	<i>Lineamenti del modello – Flusso del biogas di progetto</i>	35
3.3.4	<i>Valutazione della pressione instabilizzante</i>	39
3.3.5	<i>Correlazione fra pressione del biogas e permeabilità dello strato drenante</i>	42
3.3.6	<i>Correlazione fra permeabilità dello strato drenante e fattore di sicurezza della copertura</i>	48
3.3.7	<i>Caratteristiche granulometriche indicative del mezzo poroso</i>	51
3.4	DRENAGGI GRANULARI: VERIFICHE GRANULOMETRICHE [SOTTOPARR. 3.6.3 E 3.7.3 DELLE SPECIFICHE TECNICHE]	52
4	ANALISI E CALCOLI DEL MURO [PAR. 7.2 – SOTTOPAR. 7.3.2]	55
4.1	GENERALITÀ.....	55
4.2	TERRA RINFORZATA: PRINCIPI DI FUNZIONAMENTO E MATERIALI.....	55
4.3	SEZIONI DI PROGETTO DEL MURO.....	58
4.4	ANALISI DI STABILITÀ DEL MURO: IMPOSTAZIONE DEI CALCOLI	62
4.4.1	<i>Parametri geotecnici</i>	62
4.4.1.1	Parametri dei terreni di fondazione.....	63
4.4.1.2	Parametri del terreno del Muro	64
4.4.1.3	Parametri geodinamici.....	64

4.4.1.4	Parametri geotecnici assunti nei modelli di calcolo.....	65
4.4.2	<i>Normativa di riferimento</i>	65
4.4.3	<i>Modelli geotecnici impiegati</i>	66
4.4.4	<i>Sezioni di calcolo</i>	71
4.5	ANALISI CON MODELLO SPEDITIVO GRETA.....	72
4.5.1	<i>Richiami teorici alla base del Modello</i>	72
4.5.1.1	Calcolo della spinta sulla parete.....	72
4.5.1.2	Verifiche.....	75
4.5.2	<i>Esiti dell'analisi H = 4,10 m</i>	81
4.5.2.1	Dati.....	82
4.5.2.2	Risultati.....	86
4.5.3	<i>Esiti dell'analisi H = 4,60 m</i>	92
4.5.3.1	Dati.....	93
4.5.3.2	Risultati.....	97
4.5.4	<i>Esiti dell'analisi H = 5,10 m</i>	103
4.5.4.1	Dati.....	104
4.5.4.2	Risultati.....	108
4.5.5	<i>Esiti dell'analisi H = 4,8 m</i>	120
4.5.5.1	Dati.....	121
4.5.5.2	Risultati.....	125
4.6	ANALISI CON MODELLO FEM PLAXIS.....	134
4.6.1	<i>Richiami teorici</i>	134
4.6.2	<i>Dati di input</i>	135
4.6.3	<i>Esiti dell'analisi</i>	142
4.6.3.1	Sezione H = 4,10 m.....	144
4.6.3.2	Sezione H = 4,60 m.....	147
4.6.3.3	Sezione H = 5,10 m.....	151
4.6.3.4	Sezione H = 4,80 m.....	155
4.6.4	<i>Verifiche</i>	159
4.6.4.1	Verifiche di stabilità globale.....	159
4.6.4.2	Verifiche dei rinforzi.....	160
4.6.4.3	Valutazioni e conclusioni.....	162
4.7	STRATI DI TENUTA [SOTTOPAR. 7.3.2].....	162
5	STIMA DEI CEDIMENTI DEL CORPO RIFIUTI [CAP.10 DEL PIANO DI GESTIONE OPERATIVA]	165
5.1	GENERALITÀ.....	165
5.2	ASPETTI TEORICI DELL'ASSESTAMENTO DEI RSU IN DISCARICA.....	165
5.2.1	<i>Premessa</i>	165
5.2.2	<i>Modelli per il calcolo dei cedimenti</i>	167
5.3	STIMA DELL'ASSESTAMENTO DEI RSU IN DISCARICA.....	169

5.4	DEDUZIONI DAI DATI DI GESTIONE	171
5.4.1	<i>Procedura di tracciamento dell'ubicazione dei rifiuti</i>	171
5.4.2	<i>Ricostruzione dei flussi di rifiuti nelle ribaulature</i>	171
5.4.3	<i>Quantificazione dei cedimenti nella "vecchia" discarica</i>	172
6	MODELLO DI PRODUZIONE DEL BIOGAS [PAR. 11.3]	173
6.1	GENERALITÀ SUL MODELLO IMPIEGATO	173
6.2	DATI DI INPUT	173
6.2.1	<i>Previsione delle quantità e qualità dei rifiuti da conferire</i>	174
6.3	MODELLO STECHIOMETRICO	175
6.4	MODELLO CINETICO	179
6.5	CURVE DI PRODUZIONE DEL BIOGAS	182
6.6	MATRICI DEI DATI	183
7	RICONFIGURAZIONE DELLA RETE DI ASPIRAZIONE DEL BIOGAS [PAR. 11.4]	188
7.1	GENERALITÀ	188
7.2	SCHEMA DI CALCOLO	188
7.3	CALCOLO FLUODINAMICO DELLA PREVALENZA	192
7.4	CONFRONTI CON LE DOTAZIONI DEL <i>PROGETTO DEL 2011</i>	193

1 PREMESSA

Il presente elaborato, denominato *Fascicolo di analisi e calcoli*, contiene gli approfondimenti analitici e i calcoli relativi a vari passaggi della *Relazione tecnico-illustrativa*, seguendone la sequenza dell'esposizione.

La gran parte delle analisi sono riferite a studi e ricerche di letteratura. Ciò nondimeno, taluni modelli sono originali, messi a punto specificamente nei casi trattati; in questi casi, la trattazione sarà giocoforza più estesa, per dar conto dei fondamenti teorici dei modelli.

Parimenti estesa sarà la trattazione nel caso di utilizzo di modelli di calcolo non particolarmente invalsi, come espressamente richiesto dalle NTC 2018.

Nei titoli sono richiamati i riferimenti di provenienza della *Relazione tecnico-illustrativa*

Nel testo sono utilizzate le seguenti principali abbreviazioni dei termini più frequentemente utilizzati:

- Il presente *Progetto definitivo* = **Progetto**;
- Società Intercomunale Ambiente S.r.l. = **SIA SRL**;
- Consorzio per l'Igiene dell'Ambiente e del Territorio di Vicenza = **CIAT**;
- Discarica per rifiuti non pericolosi/urbani di Grumolo delle Abbadesse = **Discarica**;
- Rifiuti solidi urbani = **RSU**;
- Progetto definitivo di ampliamento della discarica di cui al Decreto di approvazione della Giunta provinciale n.149 del 27 aprile 2010, inizialmente intestato al *CIAT* e successivamente volturato a *SIA SRL* con deliberazione della Giunta Provinciale n.75 del 5 aprile 2011, così come emendato dalle modifiche introdotte dal *Progetto esecutivo di ampliamento e piano economico finanziario e tariffario a valere dal 01 gennaio 2012* e dal *Progetto esecutivo della finitura a verde* = **Progetto del 2011**;
- Decreto Legislativo 36/2003, così come riconfigurato dal D.Lgs 121/2020 = **Nuovo D.Lgs 36/2003**;
- Autorizzazione Integrata Ambientale = **AIA**;
- Argine perimetrale in terra rinforzata = **Muro**;
- Geocomposito drenante = **GCD**;
- Polietilene ad alta densità/Polietilene a bassa densità = **HDPE/LDPE**;
- Metodo di calcolo agli Elementi Finiti = **FEM**;
- Norme Tecniche per le Costruzioni = **NTC**.

L'elaborato è articolato nella seguente gerarchia, denominazione e formattazione dei titoli:

X CAPITOLO

X.X PARAGRAFO

x.x.x Sottoparagrafo

x.x.x.x Punto

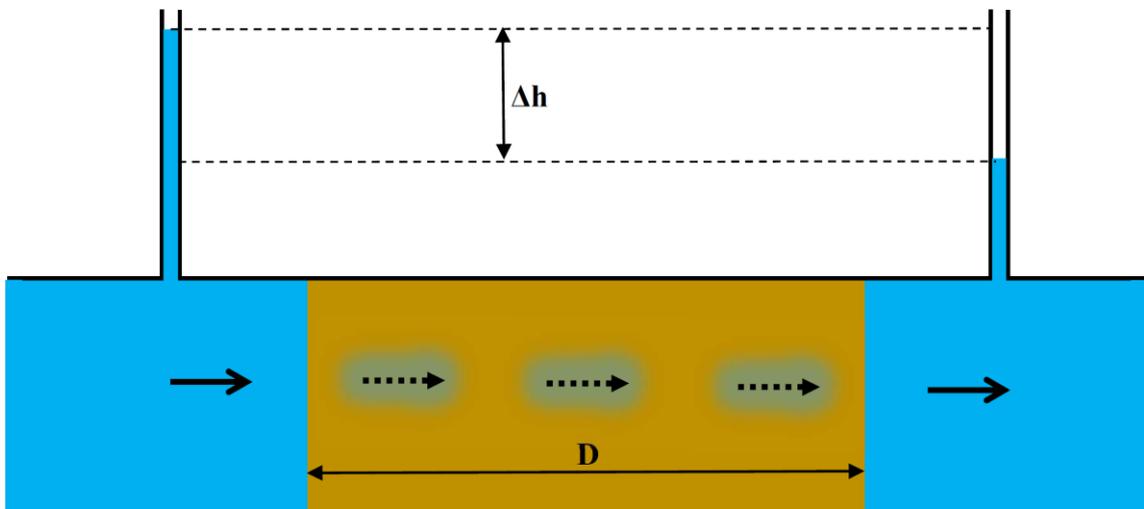
2 BARRIERE E DRENAGGI DI FONDO

2.1 Generalità

Nel presente capitolo saranno sviluppate le analisi e i calcoli relativi agli argomenti trattati nel par.6.3 della *Relazione tecnico-illustrativa*, riguardante le barriere e lo strato drenante di fondo.

2.2 Diaframma plastico perimetrale [punto 6.3.2.2]

Il tempo di attraversamento T_a del setto perimetrale di spessore minimo 0,25 m, assumendo la permeabilità massima di $5 \cdot 10^{-11}$ m/s, con il carico idraulico indicato dal *Nuovo D.Lgs 36/2003* pari a 0,30 m, deriva dal calcolo sotto riportato, basato sul seguente schema:



<i>Coefficiente di permeabilità k (m/s)</i>	5,00E-11	
<i>Spessore barriera D (m)</i>	0,25	
<i>Battente sulla barriera Δh (m)</i>	0,30	
	Equazioni	Valori
<i>Velocità v (Darcy) (m/s)</i>	$v = k \cdot i$	
<i>Gradiente i (m/m)</i>	$i = \frac{\Delta h}{D}$	1,20
	<i>da cui:</i> $v = k \cdot \frac{\Delta h}{D}$	6,00E-11
<i>Tempo di attraversamento t_s (s)</i>	$t_s = \frac{D}{v}$	
	<i>da cui:</i> $t_s = \frac{D^2}{k \cdot \Delta h}$	4,17E+09
<i>Tempo di attraversamento t_a (anni)</i>	$t_a = \frac{t_s}{3600 \cdot 24 \cdot 365}$	132,12
<i>Fattore di sicurezza Nuovo D.Lgs 36/2003 (25 anni)</i>		5,28

A fronte di un tempo di attraversamento di 132,12 anni il fattore di sicurezza è pari a 5,28; in altri termini, la **“soluzione equivalente” costituita dall’“integrazione della barriera geologica” con l’esistente diaframma perimetrale garantisce una protezione maggiore di oltre 5 volte la minima richiesta dal Nuovo D.Lgs 36/2003.**

2.3 Impermeabilizzazione artificiale delle sponde [sottopar. 6.3.4]

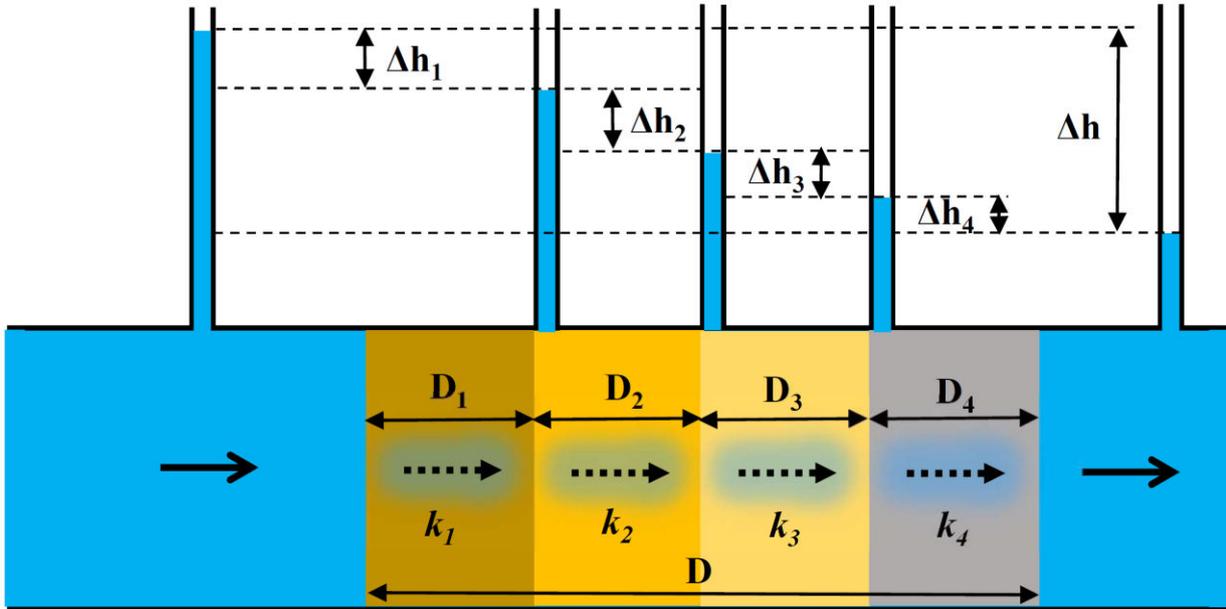
Il calcolo del tempo di attraversamento T_a del pacchetto di tre geocompositi bentonitici e del succitato terreno rullato di sponda (D_4 e k_4) richiede dapprima il calcolo del coefficiente di permeabilità equivalente.

Con riferimento allo schema seguente, i gradienti parziali, assumendo la legge di Darcy sono i seguenti:

$$i_1 = \frac{\Delta h_1}{D_1} \quad i_2 = \frac{\Delta h_2}{D_2} \quad i_3 = \frac{\Delta h_3}{D_3} \quad i_4 = \frac{\Delta h_3}{D_4}$$

e:

$$\Delta h = \Delta h_1 + \Delta h_2 + \Delta h_3 + \Delta h_4$$



da cui:

$$\Delta h = D_1 \cdot i_1 + D_2 \cdot i_2 + D_3 \cdot i_3 + D_4 \cdot i_4$$

$$v_1 = k_1 \cdot i_1 \quad v_2 = k_2 \cdot i_2 \quad v_3 = k_3 \cdot i_3 \quad v_4 = k_4 \cdot i_4$$

$$v = v_1 = v_2 = v_3 = v_4$$

Tenendo conto che:

$$D = D_1 + D_2 + D_3 + D_4$$

con evidenti passaggi si giunge all'equazione rappresentativa della permeabilità equivalente:

$$k = \frac{D}{\frac{D_1}{k_1} + \frac{D_2}{k_2} + \frac{D_3}{k_3} + \frac{D_4}{k_4}}$$

Introducendo nell'equazione i valori numerici si perviene al seguente quadro:

Coefficiente di permeabilità k_1 (m/s)	1,00E-11
Spessore barriera D_1 (m)	0,006
Coefficiente di permeabilità k_2 (m/s)	5,00E-13
Spessore barriera D_2 (m)	0,006
Coefficiente di permeabilità k_3 (m/s)	1,00E-11
Spessore barriera D_3 (m)	0,006
Coefficiente di permeabilità k_4 (m/s)	1,00E-07
Spessore barriera D_4 (m)	0,30
Spessore complessivo D (m)	0,318
k equivalente (m/s)	2,41E-11

Noto il Coefficiente di permeabilità equivalente k , pari a $2,41 \cdot 10^{-11}$ m/s è ora possibile calcolare il tempo di attraversamento T_a del pacchetto di barriera sottoposto a un carico idraulico di 0,30 m, con le medesime modalità seguite nel par.2.2:

	Equazioni	Valori
Velocità v (Darcy) (m/s)	$v = k \cdot i$	
Gradiente i (m/m)	$i = \frac{\Delta h}{D}$	0,94
	da cui: $v = k \cdot \frac{\Delta h}{D}$	2,27E-11
Tempo di attraversamento t_s (s)	$t_s = \frac{D}{v}$	
	da cui: $t_s = \frac{D^2}{k \cdot \Delta h}$	1,40E+10
Tempo di attraversamento t_a (anni)	$t_a = \frac{t_s}{3600 \cdot 24 \cdot 365}$	443,78
Fattore di sicurezza Nuovo D.Lgs 36/2003 (25 anni)		17,75

Anche la sola “integrazione” costituita dai tre strati di geocompositi bentonitici è comunque in grado di ottemperare alle condizioni poste dal Nuovo D.Lgs 36/2003.

Seguendo il medesimo procedimento testè esposto per i soli tre strati in oggetto si perviene alla consueta equazione della permeabilità equivalente:

$$k = \frac{D}{\frac{D_1}{k_1} + \frac{D_2}{k_2} + \frac{D_3}{k_3}}$$

Introducendo nell'equazione i valori numerici si perviene al seguente quadro:

Coefficiente di permeabilità k_1 (m/s)	1,00E-11
Spessore barriera D_1 (m)	0,006
Coefficiente di permeabilità k_2 (m/s)	5,00E-13
Spessore barriera D_2 (m)	0,006
Coefficiente di permeabilità k_3 (m/s)	1,00E-11
Spessore barriera D_3 (m)	0,006
Spessore complessivo D (m)	0,018
k equivalente (m/s)	1,36E-12

Nota il Coefficiente di permeabilità equivalente k , pari a $1,36 \cdot 10^{-12}$ m/s è ora possibile calcolare il tempo di attraversamento T_a del pacchetto di barriera sottoposto a un carico idraulico di 0,30 m, con le medesime modalità:

	Equazioni	Valori
Velocità v (Darcy) (m/s)	$v = k \cdot i$	
Gradiente i (m/m)	$i = \frac{\Delta h}{D}$	16,67
	da cui: $v = k \cdot \frac{\Delta h}{D}$	2,27E-11
Tempo di attraversamento t_s (s)	$t_s = \frac{D}{v}$	
	da cui: $t_s = \frac{D^2}{k \cdot \Delta h}$	7,92E+08
Tempo di attraversamento t_a (anni)	$t_a = \frac{t_s}{3600 \cdot 24 \cdot 365}$	25,11

2.4 Drenaggio delle sponde [punto 6.3.7.3]

2.4.1 Generalità

La scelta del geocomposito drenante (GCD) in oggetto è basata sulla condizione di "equivalenza prestazionale" con lo strato granulare di fondo.

Tale condizione si esplicita valutando, dapprima, la portata massima di percolato ammissibile nello strato granulare e verificando, successivamente, se tale portata fluirà in sicurezza nel GCD.

Non prima, però, di aver tracciato i lineamenti teorici del problema. All'uopo si ricorrerà a una serie di Studi¹ specificamente condotti sui drenaggi ipodermici di coperture di discarica, alcuni dei quali hanno recepito risultanze di appositi campi-prova realizzati sia in drenaggi granulari, sia in GCD.

Nel seguito saranno riassunti detti lineamenti teorici e le evidenze sperimentali, propedeutici alla progettazione di tali importanti componenti, cui seguiranno i calcoli di progetto.

2.4.2 Lineamenti teorici e criteri progettuali

Lo strato drenante del percolato ha il compito di smaltire per gravità il liquido infiltratosi attraverso i rifiuti, verso un collettore.

I materiali utilizzati in questi casi sono generalmente materiali granulari o geocompositi drenanti. Questi ultimi sono costituiti dall'accoppiamento di più elementi, in genere una georete in polietilene ad alta densità [HDPE] con funzione drenante, compresa tra due strati filtranti di geotessile (tessuto, o non tessuto). Un'altra soluzione piuttosto diffusa considera l'impiego di una geomembrana cuspidata, in HDPE, sovrastata da un geotessile con funzione di separazione e filtro. In tal caso, alla funzione drenante, il GCD unisce quella impermeabilizzante, migliorando la tenuta complessiva della barriera minerale. Lo spessore complessivo dei GCD varia, di norma, tra 5 e 30 mm.

Il modello teorico ritenuto più interessante dagli scriventi per la progettazione degli strati drenanti in esame è quello derivato dalla trattazione di Giroud et al.² basata sulle seguenti ipotesi:

- ⇒ Il flusso all'interno dello strato è considerato stazionario e in regime laminare; si accetta pertanto che il numero di Reynolds sia molto piccolo e quindi prevalgano le forze viscosive su quelle inerziali; tale ipotesi è normalmente verificata poichè il liquido che attraversa un mezzo poroso (come può essere uno strato drenante granulare o GCD) fluisce in una rete di canalicoli irregolari e molto piccoli. È quindi possibile applicare la legge di Darcy, valida per mezzi porosi, omogenei e isotropi.

$$v = k \cdot i$$

¹ Trattazione ricavata dai seguenti Studi:

«*Il drenaggio delle acque meteoriche nel sistema di copertura delle discariche controllate alla luce del D.Lgs. n.36/2003*», dell'Allievo Ing. Chiara Squizzato; Relatore Prof. Ing. Marco Favaretti; Correlatore Dott. Ing. Stefano Busana – Facoltà di Ingegneria dell'Università di Padova – 15 dicembre 2004;

«*Sull'efficienza teorica e sperimentale del drenaggio granulare delle acque meteoriche del sistema di copertura della discarica di Arzignano (VI)*», dell'Allievo Ing. Valeria Bastianon; Relatore Prof. Ing. Marco Favaretti; Correlatore Dott. Ing. Stefano Busana – Facoltà di Ingegneria dell'Università di Padova – aprile 2006;

«*Sull'efficienza teorica e sperimentale del drenaggio geocomposito delle acque meteoriche del sistema di copertura della discarica di Lonigo (VI)*», dell'Allievo Ing. Erika Picello; Relatore Prof. Ing. Marco Favaretti; Correlatore Dott. Ing. Stefano Busana – Facoltà di Ingegneria dell'Università di Padova – aprile 2006;

«*Criteri di progettazione di strati drenanti nella copertura delle discariche: confronto tra i risultati derivati da modelli teorici e prove sperimentali in situ*», dell'Allievo Ing. Alessia Fiorin; Relatore Prof. Ing. Marco Favaretti; Correlatore Dott. Ing. Stefano Busana – Facoltà di Ingegneria dell'Università di Padova – dicembre 2008.

² Giroud, Zornberg, Zhao (2000). *Hydraulic Design of Geosynthetic and Granular Liquid Collection Layers*. Geosynthetics International, Special Issue on Liquid Collection System, vol.7.

con:

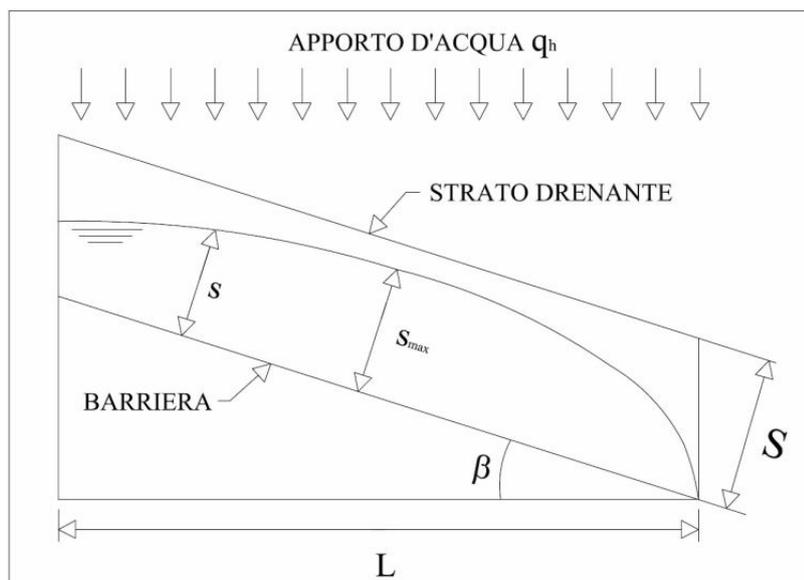
- v : velocità di flusso;
- k : coefficiente di conducibilità (permeabilità) idraulica;
- i : gradiente idraulico o pendenza della linea piezometrica, definito come il rapporto tra la perdita di carico e la lunghezza del flusso, $i = \Delta h/L$;

⇒ L'apporto di liquido³ è ipotizzato costante per unità di lunghezza e distribuito uniformemente lungo tutta la lunghezza dello strato drenante. L'aliquota d'acqua che giunge allo strato drenante, q_h , è quella che si infiltra attraverso il corpo rifiuti:

$$q_h = \frac{Q_h}{A_h}$$

con Q_h la portata complessiva che fluisce attraverso la sezione orizzontale A_h .

In tale scenario, come già accennato, il moto è di tipo permanente o stazionario, indipendente dal tempo ma non dallo spazio, ed è "gradualmente vario", cioè la portata aumenta uniformemente lungo il percorso.



Distribuzione uniforme dell'acqua nello strato drenante (Giroud et al.)

Il parametro caratteristico più importante degli strati drenanti granulari è il coefficiente di conducibilità (o permeabilità) idraulica, k , che ha le dimensioni di una velocità (m/s) e dipende principalmente dalla natura del mezzo poroso e dal fluido. Il suo campo di variazione, per miscele di sabbie e ghiaie, è compreso tra 10^{-5} e 10^{-1} m/s, come illustrato nella sottostante tabella.

³ Il percolato è assimilato ad acqua.

k [m/s]	1	10 ⁻¹	10 ⁻²	10 ⁻³	10 ⁻⁴	10 ⁻⁵	10 ⁻⁶	10 ⁻⁷	10 ⁻⁸	10 ⁻⁹	10 ⁻¹⁰	10 ⁻¹¹
Drenaggio	BUONO				POVERO				PRATICAMENTE IMPERMEABILE			
	ghiaia pulita	sabbia pulita e miscele di sabbia e ghiaia pulita			sabbia fine, limi organici e inorganici, miscele di sabbia, limo e argilla, depositi di argilla stratificati			terreni impermeabili, argille omogenee sotto la zona alterata degli agenti atmosferici				
				terreni impermeabili modificati dagli effetti della vegetazione nel tempo								

Campo di variazione per il coefficiente di conducibilità idraulica per i vari tipi di terreno

La diminuzione della capacità di flusso di un drenaggio granulare può essere espressa analiticamente attraverso l'utilizzo di fattori di riduzione della conducibilità idraulica:

$$k_{LT} = \frac{k_i}{\prod(RF)} = \frac{k_i}{RF_{PC} \times RF_{CC} \times RF_{BC}}$$

dove:

k_{LT} : conducibilità idraulica a lungo termine del materiale granulare, potenzialmente soggetto a parziale intasamento durante la vita utile dello strato drenante;

k_i : conducibilità idraulica "iniziale" (a breve termine) del materiale granulare;

$\prod (RF)$: prodotto dei fattori di riduzione corrispondenti ai vari meccanismi di riduzione della conducibilità idraulica di un materiale granulare:

- RF_{PC} : fattore di riduzione per intasamento (clogging);
- RF_{CC} : fattore di riduzione per degradazione chimica del materiale granulare;
- RF_{BC} : fattore di riduzione per intasamento biologico, generalmente causato dallo sviluppo di microrganismi.

Nel caso di strato drenante granulare non si verificano particolari meccanismi di riduzione dello spessore, poiché i materiali granulari, se posti correttamente in opera, non manifestano significative deformazioni, né istantanee per compressione, né dilazionate nel tempo per creep.

Anche la diminuzione della capacità di flusso dovuta all'eventuale intrusione del geotessile nello strato granulare sottostante è irrilevante, data la notevole differenza di spessore tra lo strato drenante e il filtro geotessile.

La degradazione chimica può essere evitata attraverso un'appropriata scelta della natura del materiale granulare.

Alla luce di ciò, l'unico significativo, potenziale, meccanismo di riduzione della capacità di flusso è la riduzione della conducibilità idraulica dovuta all'intasamento (clogging), che si innesca qualora i pori del materiale più grossolano vengano gradualmente occlusi dalla migrazione di particelle fini. Per questo motivo è necessario progettare correttamente il drenaggio, prevedendo il giusto assortimento fra le classi granulometriche che compongono lo strato e, nel caso di drenaggio di copertura, proteggendo le interfaccia con idonei geotessili filtranti.

Oltre ai fattori di riduzione testé delineati, è bene considerare anche un fattore di sicurezza FS che tenga conto delle approssimazioni del modello e della valutazione del coefficiente di conducibilità idraulica del drenaggio. Tale fattore di sicurezza, usualmente assunto pari a 2÷3, può essere applicato alternativamente al massimo spessore liquido, FS_s , o alle caratteristiche idrauliche dello strato, FS_H .

Nel caso di GCD è più opportuno esprimere la capacità drenante in funzione della trasmissività idraulica θ , espressa come prodotto della propria conducibilità idraulica k per il suo spessore S :

$$\theta = k \cdot S$$

Anche la capacità drenante di un GCD può diminuire nel tempo: analogamente a quanto sopra illustrato per il drenaggio granulare, tale fenomeno viene considerato analiticamente nel calcolo della trasmissività di progetto θ_{LT} :

$$\theta_{LT} = \frac{\theta_i}{\prod(RF)}$$

dove si sono indicati con:

θ_{LT} = trasmissività a lungo termine

θ_i = trasmissività iniziale

$\prod(RF)$ = prodotto dei fattori di riduzione

Se per il drenaggio granulare si è visto che la riduzione dell'efficienza è ascrivibile al solo intasamento (clogging), nel caso di GCD i fattori che influenzano la riduzione nel tempo della capacità drenante sono molteplici: i carichi applicati, l'invecchiamento (aging), l'interazione con i geotessili di confinamento, la

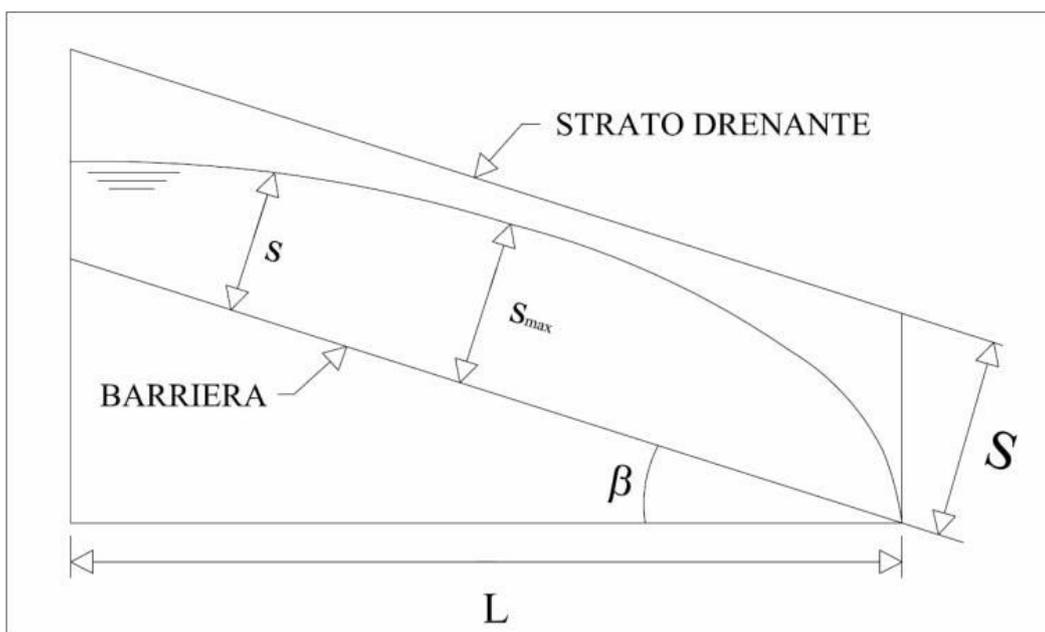
degradazione chimica del polimero e l'interazione con sostanze che possono generare attività biologica. Ovviamente, anche nel GCD si possono verificare fenomeni di clogging per effetto di particelle fini bloccate dall'anima interna trasmissiva. I carichi normali, inoltre, riducono lo spessore dell'anima, sia a breve termine, in regime elastico, sia a lungo termine per creep.

Per tutti questi motivi è assai importante individuare prodotti affidabili e collaudati, caratterizzati da materiali resistenti, durabili e inerti dal punto di vista chimico.

In tutti i casi, gli strati drenanti richiedono un'accurata progettazione, che privilegi soluzioni conservative, stante il delicato ruolo svolto da tali componenti nella riduzione della produzione di percolato, soprattutto nella gestione post-operativa delle discariche.

Riprendendo la trattazione delle caratteristiche del moto, è opportuno che negli strati drenanti di una discarica il flusso liquido mantenga un funzionamento a pelo libero, non confinato, per evitare che si possano generare pressioni instabilizzanti, segnatamente in copertura, per il sovrastante strato di finitura vegetale, e/o infiltrazioni nello strato argilloso sottostante (nel caso in esame, tuttavia, è presente anche la geomembrana).

In genere, in uno strato drenante omogeneo e isotropo lo spessore liquido varia lungo il flusso e raggiunge il suo valore massimo, s_{max} , in una specifica sezione trasversale; si impone quindi che s_{max} sia $\leq S$.



Flusso non confinato (Giroud et al.)

Il profilo della superficie liquida in questo caso può assumere diverse configurazioni in funzione del valore del parametro adimensionale λ , che è una caratteristica intrinseca dello stato drenante e della portata che lo attraversa:

$$\lambda = \frac{q_h}{k \cdot \tan^2 \beta}$$

Quando $\lambda \approx 0$, la pendenza della superficie liquida risulta costante e circa uguale a β e lo spessore tende a zero. In questo caso il massimo spessore liquido si raggiunge in prossimità della sezione terminale del pendio.

In letteratura sono disponibili vari metodi per il calcolo dello spessore liquido massimo. In questa sede, come accennato, si considerano l'equazione modificata di Giroud (*), utilizzata nel caso dello strato drenante granulare, e la soluzione approssimata (sempre della medesima trattazione) in cui si pone s_{max} coincidente con s_{lim} (**), utilizzabile nel caso di GCD:

$$s_{max} = j \cdot \frac{\sqrt{\tan^2 \beta + 4q_h / k} - \tan \beta}{2 \cos \beta} \cdot L \quad (*)$$

$$= j \cdot \frac{\sqrt{1 + 4\lambda} - 1}{2(\cos \beta / \tan \beta)} \cdot L$$

con:

$$j = 1 - 0.12 \exp \left\{ - \left[\log \left(\frac{8(q_h / k)}{5 \tan^2 \beta} \right)^{\frac{5}{8}} \right]^2 \right\}$$

$$= 1 - 0.12 \exp \left\{ - \left[\log \left(\frac{8\lambda}{5} \right)^{\frac{5}{8}} \right]^2 \right\}$$

$$s_{max} = s_{lim} = \frac{q_h \cdot L}{k \cdot \sin \beta} \quad (**)$$

Le relazioni testé proposte consentono di verificare se il massimo spessore liquido sia inferiore all'ammissibile:

$$s_{max} < S$$

dove:

s_{max} : massimo spessore liquido calcolato

S : spessore del drenaggio

Come accennato in precedenza, nel caso di drenaggio granulare il valore di S si ritiene costante nel tempo, giacché, di norma, non si riscontrano nel tempo apprezzabili fenomeni di riduzione dello spessore dello strato.

Nel caso di GCD, invece, il valore di S rappresenta lo spessore a lungo termine dell'anima trasmissiva, influenzato soprattutto dai carichi normali, che possono ridurlo anche sensibilmente.

Il fattore di sicurezza si può determinare confrontando lo spessore del drenaggio S con il massimo spessore liquido s_{max} calcolato assumendo la conducibilità idraulica a lungo termine, k_{LT} , del materiale costituente lo strato drenante:

$$FS_T = \frac{S}{s_{max}(k_{LT})}$$

L'analisi teorica di Giroud⁴ dimostra altresì un aspetto fondamentale della trattazione in oggetto: **nel caso di moto a pelo libero, l'uguaglianza tra le trasmissività di uno strato drenante granulare e uno GCD non è un criterio sufficiente a garantire l'equivalenza funzionale tra i due strati** (tale asserto risulta confermato solo nel caso di flusso confinato e funzionamento in pressione); è necessario, invece, valutare l'effettiva equivalenza idraulica dei drenaggi a confronto, che si esplica attraverso tre funzioni fondamentali: la raccolta del liquido, lo scarico e l'abbattimento delle sovrappressioni.

Premesse tali condizioni di "equivalenza effettiva", dal momento che la portata trasportata nello strato drenante risulta proporzionale alla portata specifica affluente q_h , è possibile fornire un'ulteriore definizione di equivalenza: **uno strato drenante è equivalente a un altro di riferimento se, a parità di inclinazione e di lunghezza, l'alimentazione q_h massima, fluente in condizioni di sicurezza, è la medesima in ambedue i drenaggi.**

Ricorrendo alle espressioni per il calcolo dello spessore liquido massimo, e, segnatamente, all'equazione modificata di Giroud per gli strati granulari e a quella del s_{lim} nel caso di GCD, è possibile ricavare la seguente relazione:

$$\theta_{GCD} = E \cdot \theta_{gran}$$

con:

- θ_{GCD} trasmissività idraulica del GCD
- θ_{gran} trasmissività idraulica dello strato drenante granulare:

$$\theta_{gran} = k \cdot S$$

- E fattore di equivalenza:

⁴ Giroud, Zhao, Bonaparte (2000). *The Myth of Hydraulic Transmissivity Equivalency Between Geosynthetic And Granular Liquid Collection Layers. Geosynthetics International, Special Issue on Liquid Collection System, vol.7.*

$$E = \frac{1}{j_{gran}} \cdot \left[1 + \left(\frac{S}{j_{gran} \cdot L} \right) \left(\frac{\cos \beta}{\tan \beta} \right) \right]$$

Il *fattore di equivalenza E* dipende dal valore di j_{gran} , che Giroud ha valutato compreso tra 0,88 e 1,00. I valori del fattore di equivalenza variano in funzione dell'angolo di inclinazione del pendio, β , e della lunghezza dello strato, L . Ad esempio, in uno strato con pendenza $\beta = 4\%$ e lunghezza $L = 20$ m si ottiene un valore di E circa pari a 2: **l'errore che si commetterebbe eguagliando le trasmissività sarebbe dell'ordine del 100%**.

Ciò significa che per ottenere l'equivalenza funzionale fra i due strati sarebbe necessario che la *trasmissività idraulica* del GCD fosse pari a due volte quella dello strato granulare. Tali considerazioni sono di estrema importanza nella corretta progettazione di un drenaggio ipodermico proprio per evitare la sottostima dello strato GCD. Purtroppo, tali argomenti non sono sempre noti ai progettisti e, talora, finanche in testi e manuali specifici si trovano riferimenti all'equivalenza delle trasmissività come criterio di progettazione dei GCD "equivalenti".

Riprendendo i ragionamenti svolti a proposito della valutazione delle portate massime ammissibili in un GCD, va aggiunto che la specificità di questi prodotti rende non sempre affidabile l'approccio teorico ora proposto, anche perché in essi non è sempre garantita la condizione di moto laminare, soprattutto nel caso di GCD di spessore rilevante. Inoltre, il parametro *conducibilità idraulica equivalente* non è sempre di immediata determinazione. Per questo motivo è necessario verificare le previsioni dei suddetti modelli **tramite l'impiego degli abachi forniti dai produttori dei GCD**. Tali abachi derivano in genere da sperimentazioni di laboratorio su drenaggi sottoposti ai carichi di esercizio.

2.4.3 Verifica dell'equivalenza fra strato granulare e geocomposito drenante

Come argomentato nel precedente sottoparagrafo, l'equivalenza fra i drenaggi in esame si verifica **a parità di prestazioni**, ovvero, a parità di portata fluente.

La prima fase della verifica consiste nel calcolo della portata massima fluente nello strato granulare, ipotizzando una lunghezza di 100 m.

A fronte dei seguenti dati:

Coefficiente di permeabilità [m/s]	1,00E-03
Spessore dello strato granulare [m]	0,50
Pendenza del drenaggio [%]	5%
Lunghezza del drenaggio [m]	100,00

è possibile, utilizzando la formula (*), con calcolo iterativo, determinare la portata massima fluente entro lo spessore dello strato, **ipotizzando, cautelativamente, che questo sia pulito, vale a dire, con fattore di riduzione della portata nullo:**

Portata unitaria istantanea di deflusso da drenare q_h [$m^3/s/m^2$]	3,08E-07
Portata da drenare sulla lunghezza L [$m^3/s/m$]	3,08E-05

Nota la portata di riferimento, è ora possibile valutare se questa può fluire in sicurezza nel GCD. Quello adottato è descritto nel sottopar. 2.6.3 delle *Specifiche tecniche*.

Parimenti al precedente calcolo, si considera una striscia di GCD di larghezza unitaria di 1 m e lunghezza 100 m. L'inclinazione è quella delle sponde, pari a 3:2.

La portata idraulica di un GCD è usualmente determinata tramite prove di laboratorio seguendo lo standard della normativa EN - ISO12958. Le prove vengono effettuate sotto diversi carichi e sotto alcuni gradienti idraulici caratteristici, ad es, 0,10, 0,50 e 1,00 m/m.

I risultati delle prove sono successivamente raccolti in diagrammi nei quali, normalmente, in ascissa viene indicata la pressione normale, in ordinata la portata idraulica unitaria misurata dall'apparecchiatura di prova.

I risultati delle prove effettuate per carichi diversi e per gradienti diversi sono indicati nelle schede tecniche del prodotto. Nel caso in esame si assumono i valori limite riportati nelle *Specifiche tecniche* (Cfr. sottopar. 2.6.3 delle *Specifiche tecniche*).

Se il gradiente di progetto $i_{PROGETTO}$ è indicato nel diagramma si può allora scegliere quel GCD che, sotto un carico verticale σ_v e un gradiente $i_{PROGETTO}$ abbia una portata maggiore o uguale a $(Q_{ULT})_{i_{PROGETTO}}$.

Qualora invece il valore $i_{PROGETTO}$ sia differente dai valori indicati nel diagramma, è possibile calcolare la portata specifica per il gradiente immediatamente superiore a quello reale, $i > i_{PROGETTO}$, mediante la relazione sperimentale:

$$[(Q_{ULT})_i]_{CALCOLATA} = (Q_{ULT})_{i_{PROGETTO}} \cdot \sqrt{\frac{i}{i_{PROGETTO}}}$$

con:

$[(Q_{ULT})_i]_{CALCOLATA}$ = portata specifica per il gradiente i riportato nel diagramma, immediatamente superiore al gradiente reale $i_{PROGETTO}$ [$m^3/s/m$];

$(Q_{ULT})_{i_{PROGETTO}}$ = portata specifica per il gradiente $i_{PROGETTO}$ [$m^3/s/m$];

i = gradiente idraulico, presente nel diagramma, immediatamente superiore a quello di progetto [m/m];

$i_{PROGETTO}$ = gradiente di progetto [m/m].

Si ricorda che il pedice "ULT" si riferisce ai valori a "breve termine" delle caratteristiche idrauliche, determinati tramite prove di laboratorio.

Il valore a breve termine della portata $(Q_{ULT})_{i_{PROGETTO}}$, da inserire nella precedente equazione, viene calcolato a partire dalla portata richiesta (valore a lungo termine) che tiene conto del comportamento del

geocomposito drenante in condizioni di esercizio e, quindi, nel lungo termine, applicando opportuni fattori di sicurezza riduttivi, secondo la consueta relazione, già incontrata in precedenza nel caso del drenaggio granulare:

$$(Q_{ULT})_{i_{PROGETTO}} = Q_{RICHIESTA} \cdot \Pi(RF)$$

Adattando al GCD i fattori riduttivi si ha:

$$\Pi(RF) = RF_{IN} \times RF_{CR} \times RF_{BC} \times RF_{CC}$$

con:

RF_{IN} : Fattore di riduzione per deformazioni elastiche o intrusione del geotessile;

RF_{CR} : Fattore di riduzione per le deformazioni di creep subite, nel tempo, dall'anima drenante;

RF_{BC} : Fattore di riduzione per intrusione di materiale biologico o per intrusione della frazione più fine dei rifiuti;

RF_{CC} : Fattore di riduzione per intasamento chimico dell'anima drenante;

$\Pi(RF)$: Fattore di riduzione totale.

Il campo di variazione dei suddetti fattori dipende dalla collocazione del GCD: in copertura, con acqua e carico modesto, e sul fondo, con percolato e carico rilevante.

Giroud, Zornberg, Zhao, (2000)⁵ hanno fornito i seguenti campi di variazione:

	<i>acqua e carico basso</i>		<i>percolato e carico alto</i>	
	min	max	min	max
RF_{IN}	1,0	1,2	1,0	1,2
RF_{CR}	1,1	1,4	1,4	2,0
RF_{BC}	1,2	1,5	1,5	2,0
RF_{CC}	1,0	1,2	1,5	2,0

Una volta calcolata la portata $[(Q_{ULT})_i]_{CALCOLATA}$, occorre confrontarla con la portata specifica $[(Q_{ULT})_i]_{LETTA}$ riportata nel diagramma in corrispondenza del gradiente immediatamente superiore a quello di progetto, $i > i_{PROGETTO}$.

Affinché il GCD riesca a smaltire la portata di progetto, bisogna verificare che $[(Q_{ULT})_i]_{LETTA} > [(Q_{ULT})_i]_{CALCOLATA}$, valutando, al contempo, il fattore di sicurezza.

⁵ Giroud, Zornberg, Zhao, (2000). *Hydraulic Design of Geosynthetic and Granular Liquid Collection Layers. Geosynthetics International, Special Issue on Liquid Collection System, vol.7.*

Per quanto attiene il carico, assumendo un'altezza dei rifiuti di 20 m e un peso di volume di 9 kN/m^3 , la pressione pseudo-geostatica è dell'ordine di 180 kPa.

Pertanto, può essere assunto un carico di 200 kPa.

Assumendo altresì i valori più cautelativi dei fattori di riduzione della portata, trattandosi di GCD del percolato e sottoposto a un carico rilevante, a fronte della medesima portata massima fluente nello strato granulare e con la stessa lunghezza, sono stati svolti i calcoli di verifica con il procedimento sopra illustrato.

Questi sono riassunti nella seguente tabella:

Spessore minimo del GCD [mm]	7
Portata unitaria istantanea di deflusso da drenare q_h [$\text{m}^3/\text{s}/\text{m}^2$]	3,08E-07
Lunghezza del drenaggio L [m]	100,00
Portata da drenare sulla lunghezza L - $Q_{RICHIESTA} = q_h \cdot L$ [$\text{m}^3/\text{s}/\text{m}$]	3,08E-05
Pendenza del drenaggio [%]	66,67%
Gradiente idraulico di progetto $i_{progetto}$ [m/m]	0,67
<i>Fattori di riduzione</i>	
RF_{IN} (intrusione geotessile nel tempo)	1,2
RF_{CR} (creep)	2,0
RF_{BC} (intasamento materiale fine - biologico)	2,0
RF_{CC} (intasamento materiale fine - chimico)	2,0
$\Pi(RF)$ Fattore di riduzione totale	9,60
Portata specifica per il gradiente $i_{PROGETTO}$ (Q_{ULT}) $i_{PROGETTO}$ [$\text{m}^3/\text{s}/\text{m}$]	2,95E-04
<i>Geocomposito da specifica (sottopar. 2.6.3 delle Specifiche tecniche)</i>	
i presente nel diagramma e immediatamente superiore a quello di progetto [m/m]	1,00
Portata specifica per il gradiente i [$(Q_{ULT})_i$] $i_{CALCOLATA}$ [$\text{m}^3/\text{s}/\text{m}$]	3,62E-04
Carico normale σ_v [KPa]	200,00
Portata letta per gradiente i e carico 200 KPa [$(Q_{ULT})_i$] i_{LETTA} [$\text{m}^3/\text{s}/\text{m}$]	1,00E-03
Fattore di Sicurezza	2,76

Il GCD prescelto evidenzia prestazioni assai migliori di quelle garantite dallo strato granulare di fondo, evidenziando un fattore di sicurezza maggiore di 2, pur a fronte di una portata di riferimento più elevata rispetto a quella massima effettivamente fluente nel drenaggio granulare (calcolata con un fattore di sicurezza, comprensivo dei fattori di riduzione, di 1).

3 COMPLETAMENTO DELLA COPERTURA FINALE

3.1 Generalità

Nel presente capitolo saranno sviluppati le analisi e i calcoli relativi agli argomenti trattati nel par. 8.4 della *Relazione tecnico-illustrativa*, riguardante il completamento della copertura finale.

Nei titoli sono richiamati i riferimenti di provenienza della *Relazione tecnico-illustrativa*.

3.2 Drenaggio ipodermico delle acque meteoriche [sottopar. 8.4.3]

3.2.1 Criteri di scelta – Lineamenti teorici

La scelta del geocomposito drenante (GCD) in oggetto è basata sulla condizione di “equivalenza prestazionale” con lo strato granulare all’uopo prospettato dal *Nuovo D.Lgs 36/2003*:

«2. strato drenante di materiale granulare con spessore $s \geq 0,5$ m di idonea trasmissività e permeabilità ($k > 10^{-5}$ m/s) [comunque] in grado di drenare nel suo piano la portata meteorica di progetto, valutata con un tempo di ritorno pari ad almeno 30 anni. In ogni caso lo strato drenante va protetto con un idoneo filtro naturale o di geotessile per prevenire eventuali intasamenti connessi al trascinarsi del materiale fine dello strato superficiale di copertura;»

Il passo non è affatto chiaro, poiché non si comprende l’indicazione del valore minimo del coefficiente di permeabilità del materiale granulare se poi vengono correttamente esplicitate le condizioni di progetto (la *portata meteorica di progetto*⁶), che dovrebbero valere per entrambe le tipologie di drenaggio).

Il procedimento qui seguito consiste nella valutazione della portata ipodermica da drenare, intendendo con tale termine la portata massima che potenzialmente può infiltrarsi nello strato esterno vegetale nella fase successiva al completamento della ricomposizione finale (gestione post-operativa).

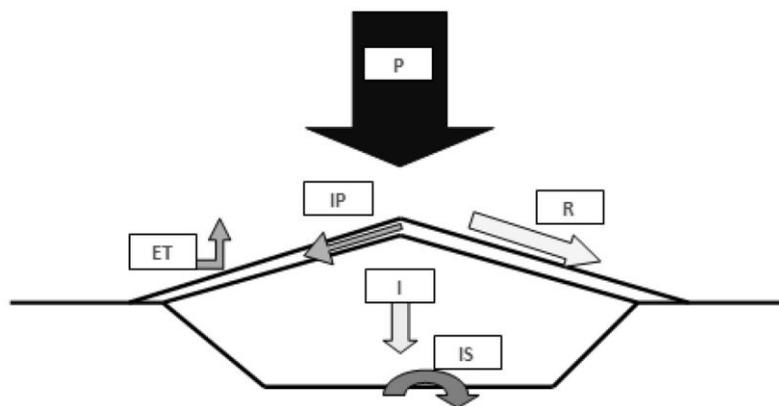
Seguirà il dimensionamento del drenaggio granulare così come prospettato dal *Nuovo D.Lgs 36/2003*, per poi proporre una soluzione equivalente in GCD.

I lineamenti teorici del problema sono già stati esposti nel sottopar. 2.4.2, cui si rimanda per i dettagli.

3.2.1.1 Determinazione della portata di progetto del drenaggio ipodermico

La portata di progetto del drenaggio delle acque meteoriche della copertura di una discarica in gestione post-operativa deriva essenzialmente da un bilancio idrologico, i cui termini principali, ancorchè relativi a un approccio essenziale, sono riportati nello schema di figura.

⁶ La norma non fornisce alcuna indicazione sulla genesi di tale portata che, com’è noto, non scaturisce dal ruscellamento superficiale, bensì dal moto di filtrazione nell’ambito dello strato vegetale.



P: Afflusso meteorico
R: Deflusso per ruscellamento superficiale
ET: Deflusso per evapotraspirazione
IP: Deflusso ipodermico
I: Deflusso per infiltrazione dalla barriera del capping
IS: Deflusso per infiltrazione dal fondo

$$R+ET+IP+I+IS \approx P$$

Bilancio idrologico semplificato di una discarica in fase post-operativa

Il deflusso ipodermico IP è la portata d'acqua meteorica, depurata dalle perdite per ruscellamento R e per evapotraspirazione ET, che, infiltrandosi attraverso lo strato vegetale, giunge effettivamente allo strato drenante.

Da indagini sperimentali condotte su discariche di RSU chiuse, la percentuale di precipitazione meteorica che effettivamente giunge allo strato drenante è compreso nella forbice 20÷35% del piovuto⁷. Tale riscontro sperimentale, pertanto, richiede necessariamente all'adozione di un modello che consideri una cospicua portata di infiltrazione.

In merito all'apporto uniforme d'acqua, considerato nell'analisi teorica svolta nel sottopar. 2.4.2 attraverso il sovrastante strato vegetale di spessore minimo pari a 1 m, occorre far presente che se quest'ultimo, per ipotesi di scuola, fosse completamente integro l'infiltrazione, con un battente costante di un metro e conducibilità idraulica k da limo argillo-sabbioso (dell'ordine di $1 \cdot 10^{-8}$ m/s), impiegherebbe tempi dell'ordine di qualche anno per giungere al drenaggio. Siffatti battenti, peraltro, anche a fronte di un ridotto ruscellamento superficiale, appaiono improbabili.

Pertanto, lo schema più verosimile di strato vegetale in grado di ammettere la rilevante portata che potenzialmente potrebbe infiltrarsi nella succitata, assai conservativa misura, dovrebbe considerare fessure diffuse e passanti in tutta l'estensione dello strato di copertura.

Talune fessure possono effettivamente verificarsi nel tempo, a causa dei fenomeni di assestamento del corpo rifiuti non adeguatamente assorbiti dalla scarsa plasticità dei terreni usualmente impiegati per lo strato vegetale; **nondimeno, appare assai improbabile che ciò possa verificarsi con un numero e una larghezza delle fessure tali da assicurare che una notevole percentuale di afflusso meteorico intenso possa infiltrarsi nel drenaggio in oggetto.**

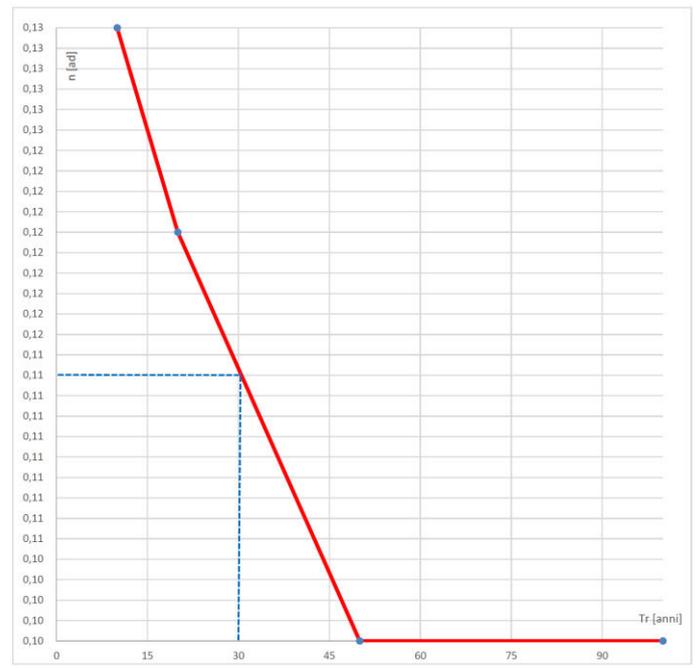
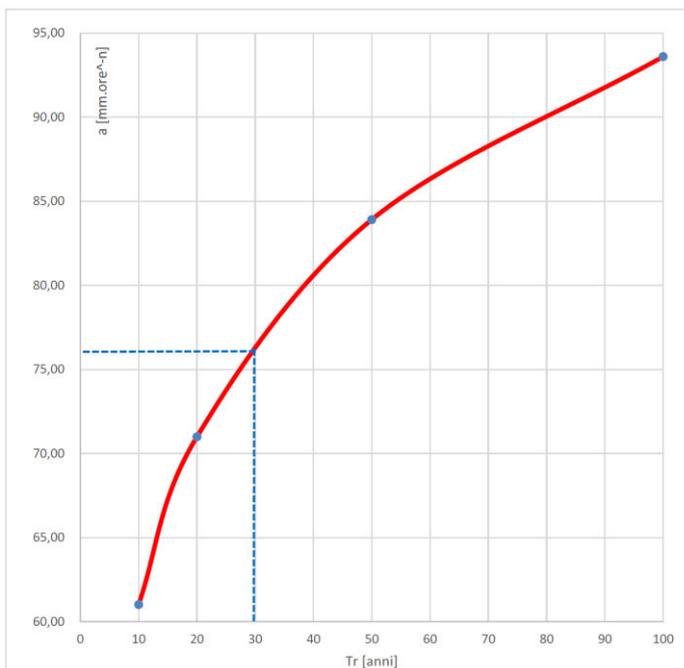
Il modello testé definito non è di norma messo in crisi da precipitazioni brevi e intense (quelle, per intenderci, che più cimentano le opere di scarico delle acque di ruscellamento superficiale R – Cfr. *Relazione idraulica*), bensì da eventi meteorici intensi di più lunga durata.

⁷ D.E. Daniel (1993). *Geotechnical Practice for Waste Disposal*. Chapman & Hall.

Considerando la precipitazione critica di durata pari a 24 ore, dal par.3.2 della *Relazione idraulica* si evince che, per durate di pioggia superiori a un'ora, i parametri delle curve di possibilità pluviometrica in funzione del tempo di ritorno sono i seguenti:

<i>Tr</i> [anni]	<i>a</i> [mm.ore ⁻ⁿ]	<i>n</i> [ad]
10	61,02	0,13
20	70,99	0,12
50	83,91	0,10
100	93,60	0,10

Nei seguenti grafici sono rappresentati tali valori, da qui si possono trarre i parametri per il tempo di ritorno di 30 anni richiesto dalla norma.



La curva segnalatrice $h = a \cdot \tau^n$ per $Tr = 30$ anni è ricostruita nella seguente tabella.

<i>Tr</i> [anni]	30
<i>a</i> [mm · ore ⁻ⁿ]	76
<i>n</i> [ad.]	0,11

Tramite tale relazione è possibile determinare l'altezza di pioggia relativa a un evento di durata di 24 ore, pari a 107,8 mm.

Altresì, assumendo cautelativamente una percentuale d'infiltrazione pari al 35%, la massima portata specifica istantanea, q_h del deflusso ipodermico IP è desumibile dalla seguente tabella:

Precipitazione max giornaliera [mm]	107,80
Coefficiente di infiltrazione [%]	35%
Deflusso da drenare - 24 ore [mm]	37,73
Portata unitaria giornaliera di deflusso da drenare [m ³ /giorno/m ²]	0,0377
Portata unitaria istantanea di deflusso da drenare q_h [m ³ /s/m ²]	4,37E-07

La portata di dimensionamento dello strato drenante è funzione anche della geometria del drenaggio, in particolare della lunghezza della "falda critica" da drenare.

Nel caso in esame, si considera la lunghezza della "falda critica"⁸ L , dell'ordine di 150 m.

La pendenza del drenaggio corrisponde alla minima della copertura, pari al 5%, come illustrato nel par.8.2 della *Relazione tecnico-illustrativa*.

I parametri di calcolo sono riassunti nella seguente tabella:

Portata unitaria istantanea di deflusso da drenare q_h [m ³ /s/m ²]	4,37E-07
Lunghezza massima del drenaggio L [m]	150,00
Portata da drenare sulla lunghezza L [m ³ /s/m]	6,55E-05
Pendenza minima del drenaggio [%]	5%

A fronte di uno spessore dello strato granulare di 0,5 m, il massimo spessore liquido nel drenaggio può essere determinato tramite l'equazione modificata di Giroud (*), che però richiede preventivamente la determinazione del parametro λ , a sua volta funzione di k (Cfr. sottopar. 2.4.2).

Negli studi citati (Cfr. nota a p.p.n.1) viene suggerito un procedimento iterativo in cui il valore k di tentativo è dato da:

$$k_{measured} = FS \cdot \Pi(RF) \cdot \frac{q_h \cdot L}{s_{gran} \cdot \sin \beta}$$

con:

⁸ In corrispondenza della maggior lunghezza di scolo della copertura (Cfr. *Relazione idraulica*).

$k_{measured}$ = conducibilità idraulica “misurata a breve tramite prove specifiche” nel materiale granulare prima della posa in opera [m/s]

$\Pi(RF)$ = prodotto dei fattori di riduzione corrispondenti ai vari meccanismi di riduzione della conducibilità idraulica di un materiale granulare = $RF_{PC} \cdot RF_{CC} \cdot RF_{BC}$ (Cfr. sottopar. 2.4.3)

FS = fattore di sicurezza

s_{gran} = spessore dello strato granulare

Nel nostro caso si considera: $FS = 2,5$ e $\Pi(RF) = 1$, dal momento che si ipotizza che lo strato drenante sia protetto da eventuali intasamenti, stante la presenza del geotessile filtrante ($RF_{PC} = 1$), la vegetazione in superficie non sia trattata con diserbanti ($RF_{CC} = 1$) e che il drenaggio sia attraversato solo da acqua e non da percolato ($RF_{BC} = 1$).

Come riferito nel sottopar. 2.4.3, nel caso di strato drenante granulare non si verificano particolari meccanismi di riduzione dello spessore, né istantanee per compressione, né dilazionate nel tempo per creep.

Alla luce di ciò, l'unico significativo, potenziale, meccanismo di riduzione della capacità di flusso è la riduzione della conducibilità idraulica dovuta all'intasamento (clogging), che si innesca qualora i pori del materiale più grossolano vengano gradualmente occlusi dalla migrazione di particelle fini. Per questo motivo è necessario progettare correttamente il drenaggio, prevedendo il giusto assortimento fra le classi granulometriche che compongono lo strato e proteggendo le due interfaccia con geotessili filtranti idonei.

Con tali assunzioni, noti gli altri termini dell'equazione, $k_{measured}$ di tentativo è pari a **6,56·10⁻³ m/s**.

Il parametro adimensionale $\lambda = \frac{q_h}{k_{measured} \cdot \tan^2 \beta}$ risulta pari a **0,027**.

Applicando la succitata equazione modificata di Giroud (*):

$$s_{max} = j \cdot \frac{\sqrt{1+4\lambda} - 1}{2 \cos \beta / \tan \beta} \cdot L$$

$$\text{dove } j = 1 - 0.12 \exp \left\{ - \left[\log_{10} \left(\frac{8\lambda}{5} \right)^{\frac{5}{8}} \right]^2 \right\}$$

si giunge alla determinazione del massimo spessore liquido “a breve termine”, vale a dire con $k = k_{measured}$, **$s_{max} = 0,184$ m**.

Applicando i consueti fattori di riduzione $\Pi(RF) = 1$ e $FS = 2,5$, si perviene allo spessore di sicurezza dello strato drenante, pari a:

$$0,184 \cdot 1 \cdot 2,5 = \mathbf{0,459 \text{ m}}$$

confermando così la convergenza dell'iterazione.

I calcoli hanno dimostrato che uno strato drenante ipodermico realizzato in materiale granulare, nelle condizioni in esame, richiederebbe un coefficiente di conducibilità idraulica $k_{measured} > 6,56 \cdot 10^{-3} \text{ m/s}$.

Con ciò è confermata la succitata inopportunità dell'indicazione di un $k > 10^{-5} \text{ m/s}$ nel Nuovo D.Lgs 36/2003, che può generare equivoci, confusione, e, nel caso di pedissequa applicazione, finanche di grossolani sottodimensionamenti della capacità drenante dello strato.

3.2.1.2 Verifica del GCD sottoposto alla portata di progetto

È stato dimostrato che l'equivalenza fra le trasmissività non costituisce un criterio corretto nella progettazione di un drenaggio in GCD "equivalente" a uno strato drenante granulare (Cfr. par. 2.4). L'applicazione di tale criterio potrebbe portare a un sottodimensionamento particolarmente pesante del geocomposito, come si è visto, nel caso di falde corte e poco pendenti.

Il criterio più corretto di progettazione è invece quello dell'equivalenza delle portate fluenti in condizioni di sicurezza, nei due strati drenanti posti a confronto.

Carichi sul GCD

Nel par. 2.4 è stato evidenziato che i GCD sono più vulnerabili ai carichi verticali, rispetto ai drenaggi granulari, che potrebbero ridurre lo spessore dell'anima drenante, sia per reazione elastica a breve termine, sia per la deformazione da creep nel medio-lungo termine.

In riferimento alla valutazione dei carichi sul GCD, va osservato che la loro corretta valutazione è fondamentale per la valutazione della trasmissività nel tempo: il carico permanente, dovuto allo strato sovrastante, condiziona la deformazione di breve termine dell'anima del GCD e la deformazione per creep a medio-lungo termine, mentre il più cimentante carico temporaneo dei mezzi d'opera e/o di manutenzione della copertura non attiva fenomeni di creep.

In tal senso, pertanto, la trasmissività è condizionata dai soli carichi permanenti.

Ciò nondimeno, a favore della sicurezza, si valuterà un carico di progetto comprensivo di sovraccarico temporaneo.

Nel caso in esame, si considera lo spessore dello strato vegetale di copertura pari a 1,20 m⁹; la sollecitazione permanente massima sul GCD è pertanto pari al peso del terreno ivi gravante: a fronte di un peso di volume medio di tale terreno stimato in 18 kN/m³, è valutata in 21,6 kPa.

⁹ Si tiene conto, con questa assunzione cautelativa, di un sovrasspessore medio di 20 cm, rispetto ai 100 cm minimi previsti per tale strato.

Le sollecitazioni temporanee sono invece generate dalle operazioni di stesa del terreno sovrastante il GCD, nonché dal successivo passaggio di mezzi d'opera sulla copertura nella fase operativa e post-operativa (legato alla gestione e alla manutenzione del verde).

Le azioni che i sovraccarichi verticali trasmettono al GCD sono essenzialmente di due tipi: concentrate o distribuite; applicate con modalità statica (lentamente) oppure dinamica: il rapido passaggio di un veicolo, ad esempio.

Il carico esterno, concentrato o distribuito, si diffonde nel terreno e sollecita lo strato drenante con una pressione, a parità di ogni altra condizione, tanto minore quanto più elevato è lo spessore dello strato sovrastante. Le modalità di diffusione del carico, e quindi la frazione che di esso sollecita il geocomposito, dipendono anche dal tipo di carico, alla distribuzione dei carichi concentrati - l'interasse delle ruote, ad esempio, per un carico mobile - e dall'estensione del carico se distribuito; ciò, è legato alla determinazione dell'area interessata dal carico.

In definitiva, i carichi considerati sono: carico concentrato da mezzo d'opera e carico uniformemente distribuito dovuto al terreno di finitura sovrastante.

La tensione verticale può essere determinata ricorrendo alla teoria dell'elasticità, con il metodo di Boussinesq (1885), che assimila il terreno a un mezzo semi-infinito elastico, omogeneo ed isotropo. Le relative formule consentono la determinazione delle tensioni verticali che agiscono sul geocomposito, a seguito di una forza puntiforme P che agisce normalmente alla superficie sommitale. Fissato l'asse verticale z di riferimento coincidente con la retta di azione del carico P , il valore della tensione di compressione σ_z alla profondità z sulla circonferenza di raggio r è pari a:

$$\sigma_z = \frac{3P}{2\pi} \frac{z^3}{(z^2 + r^2)^{\frac{5}{2}}} = \frac{P}{z^2} I_\sigma$$

Si può osservare che il coefficiente I_σ è funzione solo del rapporto r/z e che l'aumento della profondità concorra in modo notevole a diminuire la pressione.

Il metodo più completo e conservativo per lo svolgimento di siffatte analisi è quello di Steinbrenner (1934)¹⁰, che suddivide l'impronta di un carico in areole di estensione limitata, ciascuna di esse può essere trattata come una forza concentrata secondo la relazione di Boussinesq sopra riportata.

Stante l'ipotesi di linearità elastica del mezzo, è possibile operare la sovrapposizione degli effetti per stimare la pressione a una certa profondità: in questo modo è possibile simulare qualsiasi forma della fondazione e qualsiasi distribuzione delle tensioni sul piano di posa.

Nel seguito, si riporta l'analisi con il metodo di Steinbrenner per il caso di sovraccarico concentrato su un'area quadrata, volta a simulare l'effetto di un convoglio LT (DIN 1072) di classe 12, con carico sulla ruota anteriore pari a $P_a = 20$ kN e su quella posteriore pari a $P_p = 40$ kN.

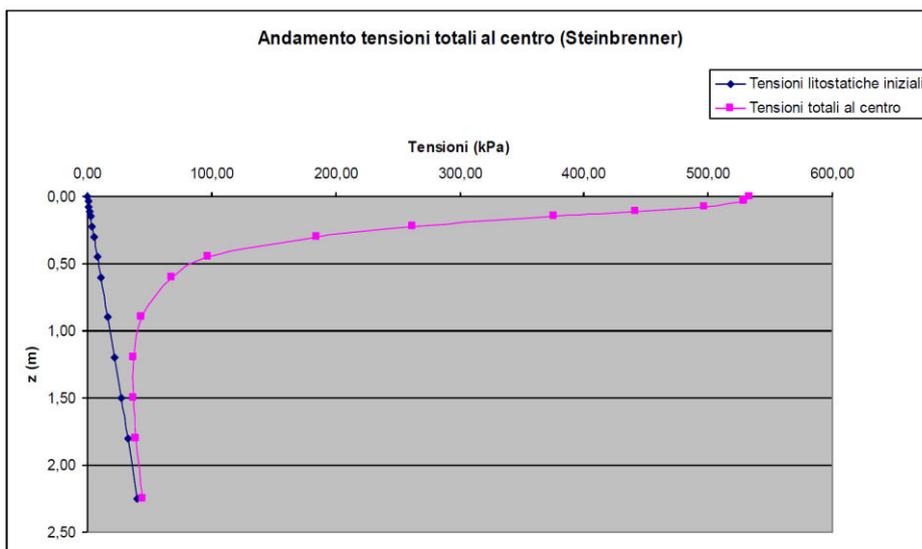
¹⁰ Trattazione desunta dalla Tesi di Laurea: "Sull'efficienza teorica e sperimentale del drenaggio geocomposito delle acque meteoriche del sistema di copertura della discarica di Lonigo (VI)", dell'Allievo Ing. Erika Picello – Relatore Prof. Ing. Marco Favaretti; Correlatore Dott.Ing. Stefano Busana – Facoltà di Ingegneria dell'Università di Padova – aprile 2006.

Ogni ruota presenta un'area di appoggio pari a 30 cm x 30 cm, talchè, applicando un fattore di sicurezza sul carico di 1,2, si avranno pressioni massime in superficie di circa 533 kPa per la ruota posteriore

Applicando la sovrapposizione degli effetti delle tensioni geostatiche (denominate - impropriamente in questo caso - anche "litostatiche") e di quelle dovute al sovraccarico testè definito è possibile determinare la pressione verticale al variare della profondità, atteso che tali tensioni sono massime in corrispondenza del centro dell'impronta.

Nella successiva tabella e nel grafico sono riportati detti valori.

Tensioni geostatiche + sovratensioni (al centro)		
z [m]	$\sigma_{v,0}$ [kPa]	σ_v [kPa]
0,00	0,00	533,33
0,04	0,68	529,32
0,08	1,35	497,35
0,11	2,03	441,49
0,15	2,70	376,46
0,23	4,05	262,18
0,30	5,40	184,60
0,45	8,10	97,06
0,60	10,80	68,40
0,90	16,20	43,29
1,20	21,60	37,17
1,50	27,00	37,24
1,80	32,40	39,44
2,25	40,50	44,98



Si noti come la pressione massima sul GCD a copertura completata sia pari a 58,77 kPa, mentre per limitare la pressione a 100 kPa in fase di realizzazione sarà necessario disporre di uno strato di almeno 50 cm sopra il GCD.

Quest'ultima pressione sarà assunta a riferimento nella scelta del GCD, le cui caratteristiche sono riportate nel par. 3.2 delle *Specifiche tecniche*.

Verifica della portata fluente nel GCD

Riprendendo le fila della trattazione d'inizio punto, la portata massima q_h fluente entro lo spessore dello strato granulare calcolata nel precedente punto è pari a $3,08 \cdot 10^{-07} \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$.

Nota la portata di riferimento, è ora possibile valutare se questa può fluire in sicurezza nel GCD in esame.

Parimenti al calcolo dello strato granulare, si considera una striscia di GCD di larghezza unitaria di 1 m, lunghezza 150 m e pendenza del 5%, talchè i parametri di calcolo sono riassunti nella seguente tabella:

Portata unitaria istantanea di deflusso da drenare q_n [$m^3/s/m^2$]	4,37E-07
Lunghezza massima del drenaggio L [m]	150,00
Portata da drenare sulla lunghezza L [$m^3/s/m$]	6,55E-05
Pendenza minima del drenaggio [%]	5%

La portata idraulica di un GCD è usualmente determinata tramite prove di laboratorio seguendo lo standard della normativa EN - ISO12958. Le prove vengono effettuate sotto diversi carichi e sotto alcuni gradienti idraulici caratteristici: 0,10, 0,50 e 1,00.

I risultati delle prove sono successivamente raccolti in diagrammi nei quali, normalmente, in ascissa viene indicata la pressione normale, in ordinata la portata idraulica unitaria misurata dall'apparecchiatura di prova.

I risultati delle prove effettuate per carichi diversi e per gradienti diversi sono indicati nelle schede tecniche del prodotto. Nel caso in esame si assumono i valori limite riportati nelle *Specifiche tecniche* (Cfr. par. 3.2 delle *Specifiche tecniche*).

Se il gradiente di progetto $i_{PROGETTO}$ è indicato nel diagramma si può allora scegliere quel GCD che, sotto un carico verticale σ_v e un gradiente $i_{PROGETTO}$ abbia una portata maggiore o uguale a $(Q_{ULT})_{i_{PROGETTO}}$.

Qualora invece il valore $i_{PROGETTO}$ sia differente dai valori indicati nel diagramma, è possibile calcolare la portata specifica per il gradiente immediatamente superiore a quello reale, $i > i_{PROGETTO}$, mediante la relazione sperimentale:

$$[(Q_{ULT})_i]_{CALCOLATA} = (Q_{ULT})_{i_{PROGETTO}} \cdot \sqrt{\frac{i}{i_{PROGETTO}}}$$

con:

$[(Q_{ULT})_i]_{CALCOLATA}$ = portata specifica per il gradiente i riportato nel diagramma, immediatamente superiore al gradiente reale $i_{PROGETTO}$ [$m^3/s/m$];

$(Q_{ULT})_{i_{PROGETTO}}$ = portata specifica per il gradiente $i_{PROGETTO}$ [$m^3/s/m$];

i = gradiente idraulico, presente nel diagramma, immediatamente superiore a quello di progetto [m/m];

$i_{PROGETTO}$ = gradiente di progetto [m/m].

Si ricorda che il pedice "ULT" si riferisce ai valori a "breve termine" delle caratteristiche idrauliche, determinati tramite prove di laboratorio.

Il valore a breve termine della portata $(Q_{ULT})_{i_{PROGETTO}}$, da inserire nella precedente equazione, viene calcolato a partire dalla portata richiesta (valore a lungo termine) che tiene conto del comportamento del geocomposito drenante in condizioni di esercizio e, quindi, nel lungo termine, applicando opportuni fattori di sicurezza riduttivi, secondo la consueta relazione, già incontrata in precedenza nel caso del drenaggio granulare:

$$(Q_{ULT})_{i_{PROGETTO}} = Q_{RICHIESTA} \cdot \Pi(RF)$$

Adattando al GCD i fattori riduttivi si ha:

$$\Pi(RF) = RF_{IN} \times RF_{CR} \times RF_{BC} \times RF_{CC}$$

con:

RF_{IN} : Fattore di riduzione per deformazioni elastiche o intrusione del geotessile;

RF_{CR} : Fattore di riduzione per le deformazioni di creep subite, nel tempo, dall'anima drenante;

RF_{BC} : Fattore di riduzione per intrusione di materiale biologico o per intrusione della frazione più fine dei rifiuti;

RF_{CC} : Fattore di riduzione per intasamento chimico dell'anima drenante;

$\Pi(RF)$: Fattore di riduzione totale.

Il campo di variazione dei suddetti fattori dipende dalla collocazione del GCD: in copertura, con acqua e carico modesto, e sul fondo, con percolato e carico rilevante.

Giroud, Zornberg, Zhao, (2000)¹¹ hanno fornito i seguenti campi di variazione:

	<i>acqua e carico basso</i>		<i>percolato e carico alto</i>	
	min	max	min	max
RF_{IN}	1,0	1,2	1,0	1,2
RF_{CR}	1,1	1,4	1,4	2,0
RF_{BC}	1,2	1,5	1,5	2,0
RF_{CC}	1,0	1,2	1,5	2,0

Una volta calcolata la portata $[(Q_{ULT})_i]_{CALCOLATA}$, occorre confrontarla con la portata specifica $[(Q_{ULT})_i]_{LETTA}$ riportata nel diagramma in corrispondenza del gradiente immediatamente superiore a quello di progetto, $i > i_{PROGETTO}$.

Affinché il GCD riesca a smaltire la portata di progetto occorre verificare che $[(Q_{ULT})_i]_{LETTA} > [(Q_{ULT})_i]_{CALCOLATA}$, valutando, al contempo, il fattore di sicurezza.

Assumendo il carico di 100 kPa e i valori massimi dei fattori di riduzione della portata indicati nella precedente tabella per l'acqua e i carichi bassi, trattandosi di GCD del deflusso ipodermico, sono stati svolti i calcoli di verifica con il procedimento sopra illustrato.

Questi sono riassunti nella seguente tabella:

¹¹ Giroud, Zornberg, Zhao, (2000). *Hydraulic Design of Geosynthetic and Granular Liquid Collection Layers. Geosynthetics International, Special Issue on Liquid Collection System, vol.7.*

Spessore minimo del GCD [mm]	7
Portata unitaria istantanea di deflusso da drenare q_h [m ³ /s/m ²]	4,37E-07
Lunghezza del drenaggio L [m]	150,00
Portata da drenare sulla lunghezza L $Q_{RICHIESTA} = q_h \cdot L$ [m ³ /s/m]	6,55E-05
Pendenza del drenaggio [%]	5,00%
Gradiente idraulico di progetto $i_{progetto}$ [m/m]	0,05
<i>Fattori di riduzione</i>	
RF_{IN} (intrusione geotessile nel tempo)	1,0
RF_{CR} (creep)	1,1
RF_{BC} (intasamento materiale fine - biologico)	1,2
RF_{CC} (intasamento materiale fine - chimico)	1,0
$\Pi(RF)$ Fattore di riduzione totale	1,32
Portata specifica per il gradiente $i_{PROGETTO}$ (Q_{ULT}) $i_{PROGETTO}$ [m ³ /s/m]	8,65E-05
<i>Geocomposito da specifica (Cfr. par.3.2 delle Specifiche tecniche)</i>	
i presente nel diagramma e immediatamente superiore a quello di progetto [m/m]	0,10
Portata specifica per il gradiente i [$(Q_{ULT})_i$] $i_{CALCOLATA}$ [m ³ /s/m]	1,22E-04
Carico normale σ_v [KPa]	100,00
Portata letta per gradiente i e carico 100 KPa [$(Q_{ULT})_i$] i_{LETTA} [m ³ /s/m]	3,50E-04
Fattore di Sicurezza	2,86

Il GCD prescelto è in grado di evacuare la portata di progetto in condizioni di sicurezza.

3.3 Drenaggio del biogas: aspetti teorici ed analisi del flusso [par. 3.7 delle Specifiche tecniche]

3.3.1 Generalità

Nel presente paragrafo saranno sviluppati le analisi e i calcoli relativi alla valutazione del flusso del biogas nell'ambito dello strato drenante della copertura finale a ciò preposto, le cui caratteristiche sono delineate nel par. 3.7 delle *Specifiche tecniche*.

Fra tali caratteristiche spicca il valore limite minimo del *Coefficiente di permeabilità idraulica* dello strato:

$$k_w \geq 1 \cdot 10^{-4} \text{ m/s}$$

determinato dall'analisi del flusso di biogas ivi fluente, che deve avvenire agevolmente e in piena sicurezza.

Per l'analisi teorica è stato utilizzato un recente Studio¹², svolto proprio nella discarica di Grumolo delle Abbadesse.

In somma sintesi, il modello considerato nello Studio rappresenta lo strato di drenaggio del biogas come un'intercapedine fra rifiuti esalanti biogas e una copertura che può sopportare una pressione massima compatibile con la stabilità del pendio del capping. Da tale copertura, la fuoriuscita del biogas avviene tramite "sonde" sub-orizzontali, poste a un determinato interasse nell'ambito dello strato.

Obiettivo dello Studio era lo sviluppo di un modello correlativo fra la stabilità del pendio di copertura e la permeabilità idraulica dello strato di drenaggio del biogas. Il modello adottato evidenzia l'opportunità di garantire un adeguato flusso di gas in uscita nel caso di perdurante assenza dell'aspirazione forzata (peraltro da escludere nella pratica gestionale dell'impianto); in tal caso, l'insieme dei pozzi verticali di aspirazione e delle sonde adacquatrici, opportunamente rinforzate e dotate di sistema di estrazione del biogas (Cfr. par. 11.4 della *Relazione tecnico-illustrativa*), può fungere da sistema di evacuazione temporanea del biogas.

Nei prossimi sottoparagrafi saranno trattati gli aspetti teorici e i calcoli di dimensionamento e verifica che condurranno, utilizzando il modello testè accennato, al succitato valore limite.

3.3.2 Stima della produzione massima di biogas

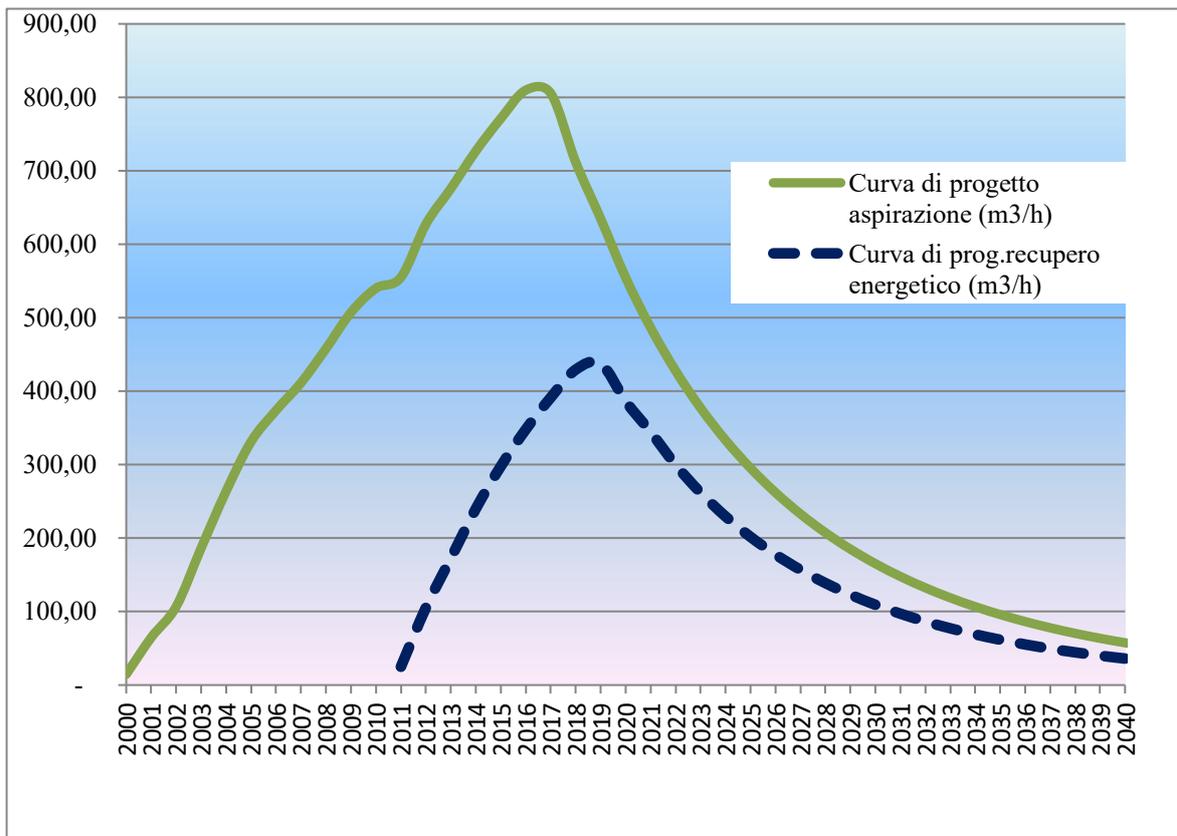
Il primo atto dello studio del flusso di biogas nell'ambito dello strato drenante è la stima della massima produzione di biogas della discarica.

Stante il carattere necessariamente conservativo della stima in oggetto, è parso opportuno utilizzare la stima derivata dal modello messo a punto nel modello utilizzato nel *Progetto del 2011* (Cfr. par. 11.2 della *Relazione tecnico-illustrativa*). Infatti, in quella sede, erano previsti conferimenti pari a 75.000 t/anno, drasticamente ridottisi nell'effettiva gestione.

Rapportato ad oggi, come si evince dalla previsione del par. 11.3 della *Relazione tecnico-illustrativa*, tale assunzione di massimo flusso appare viepiù cautelativa.

Il picco stimato nel succitato *Progetto del 2011* è riprodotto nel seguente grafico (nel caso in esame è di interesse la portata aspirata biogas + aria).

¹² *Biogas pressure effects on cover system stability of the Grumolo delle Abbadesse MSW landfill* - UNIVERSITY OF PADOVA: MSc Level Degree in Environmental Engineering. Department ICEA – Elisa Karen Buja - Supervisor: Prof. Eng. Marco Favaretti; Co-supervisor: Eng. Stefano Busana – october 2014.



Sempre a favore della sicurezza si assume che il flusso per unità di superficie sia lo stesso di quello assunto nel *Progetto del 2011*, anche a fronte dell'aumento della superficie a seguito del ripristino della vasca 18: con una produzione di 800 m³/h e di una superficie complessiva della copertura che allora ammontava a circa 140.000 m², il flusso di biogas è pari a:

$$\Phi_g = \frac{Q_b}{A} = \frac{800 \left[\frac{m^3}{h} \right]}{140.000 [m^2]} = 50,1 \frac{m^3}{y \cdot m^2}$$

che corrisponde a $1,59 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s} \cdot \text{m}^2$.

Studi effettuati da Thiel¹³ forniscono una stima "generica" di tale flusso tramite il *rapporto di produzione* di biogas di un kg di RSU:

$$r_g = 6,24 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{kg}/\text{anno}$$

¹³ Thiel, R.S. (1998), *Design Methodology for a Gas Pressure Relief Layer Below a Geomembrane Landfill Cover to Improve Slope Stability* - Geosynthetics International, 5(6), 589-617.

Tale parametro indica il volume di biogas, a pressione atmosferica e a temperatura ambiente, che si genera in un anno da un chilogrammo di rifiuto.

L'assunzione può definirsi cautelativa, giacchè considera RSU indifferenziati, con alto contenuto di frazione organica biogassificabile. I rifiuti conferiti a Grumolo d.A., invece, presentano contenuti di FORSU assai limitati, stante la bontà delle raccolte differenziate.

La portata di biogas prodotto per unità di superficie q_{LFG} (corrispondente al flusso sopra determinato) può essere valutata con la relazione:

$$q_{LFG} = r_g \cdot H_{waste} \cdot \gamma_{waste}$$

dove H_{waste} è lo spessore del cumulo di rifiuti, mentre γ_{waste} è il peso di volume del rifiuto conferito, che, per questo fine, può essere assunto pari a $0,8 \text{ t/m}^3$.

Nel caso in esame, lo spessore dei rifiuti può essere assunto nell'ordine dei 20 m, talchè il flusso di biogas è pari a $3,17 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{s}$.

La stima di Thiel, pertanto, conferma l'ordine di grandezza di quella sopra valutata; nondimeno, essendo circa il doppio rispetto a quest'ultima, nel seguito sarà assunto tale valore, a favore della sicurezza.

3.3.3 Lineamenti del modello – Flusso del biogas di progetto

Come precedentemente accennato, il modello di calcolo è basato sulla correlazione fra la stabilità del pendio di copertura e la permeabilità idraulica dello strato di drenaggio del biogas. Quest'ultimo è schematizzato come un'“intercapedine” fra rifiuti esalanti biogas e una copertura che può sopportare una pressione massima compatibile con la stabilità del pendio. Da tale copertura, la fuoriuscita del biogas avviene tramite sonde evacuatrici poste a un determinato interasse.

Lo spessore dello strato è posto pari al minimo fissato dal *Nuovo D.Lgs 36/2003*: 0,5 m.

La prima riflessione da affrontare riguarda le condizioni “limite” di lavoro di tale drenaggio, stante la circostanza che la discarica è dotata di impianto di estrazione del biogas tramite aspirazione in continuo da pozzi drenanti verticali, posti a interasse dell'ordine dei 20 m. Verrebbe pertanto spontaneo ritenere che il drenaggio in esame sia interessato dal biogas non captato dai “cilindri” di aspirazione di tali pozzi, allorchè la disomogeneità del corpo rifiuti tenda a racchiudere in “sacche” precluse alla zona di influenza dei pozzi, ed esalanti il biogas verso l'alto, fino a raggiungere il dreno in progetto.

Questa è, ragionevolmente, la situazione che più rappresenta la realtà della discarica di Grumolo delle Abbadesse e chiarisce la reale funzione del drenaggio in oggetto.

Dovendo però individuare un criterio conservativo di progettazione, è evidente la difficoltà di valutare il flusso di biogas da assumere nel progetto di tale strato drenante, se non ricorrendo ad una valutazione “grezza” basata sulla percentuale della portata totale prodotta.

Più agevole, ancorchè molto conservativo, è l'approccio "estremo", di considerare tutto il flusso esalato come se fosse confinato nell'"intercapedine" sopra definita, ed evacuato da sonde drenanti poste nell'ambito dello strato in esame ad un certo interasse. Tali sonde sfiaterebbero il biogas in atmosfera.

Ciò equivarrebbe a ritenere l'impianto di aspirazione fuori servizio per lunghi periodi, con l'esalazione del biogas, necessaria per il contenimento delle pressioni sulla copertura, demandata a tali sfiati.

Un tale scenario, nella discarica di Grumolo delle Abbadesse, avrebbe scarsissime probabilità di avverarsi, per i seguenti motivi:

1. gli scollettamenti locali e temporanei per la realizzazione della copertura definitiva avvengono su porzioni assai limitate, dell'ordine di 50x20 m, proprio per limitare la potenziale diffusione del biogas in atmosfera;
2. in caso di fuori servizio della centrale di aspirazione entra in funzione l'altro gruppo di aspirazione, senza soluzione di continuità;
3. la captazione del biogas avviene fin dalla posa dei rifiuti, poiché le sonde verticali spiccano dal fondo e sono "accompagnate" fino alla copertura provvisoria¹⁴. Al completamento di quest'ultima inizia il collettamento del pozzo.

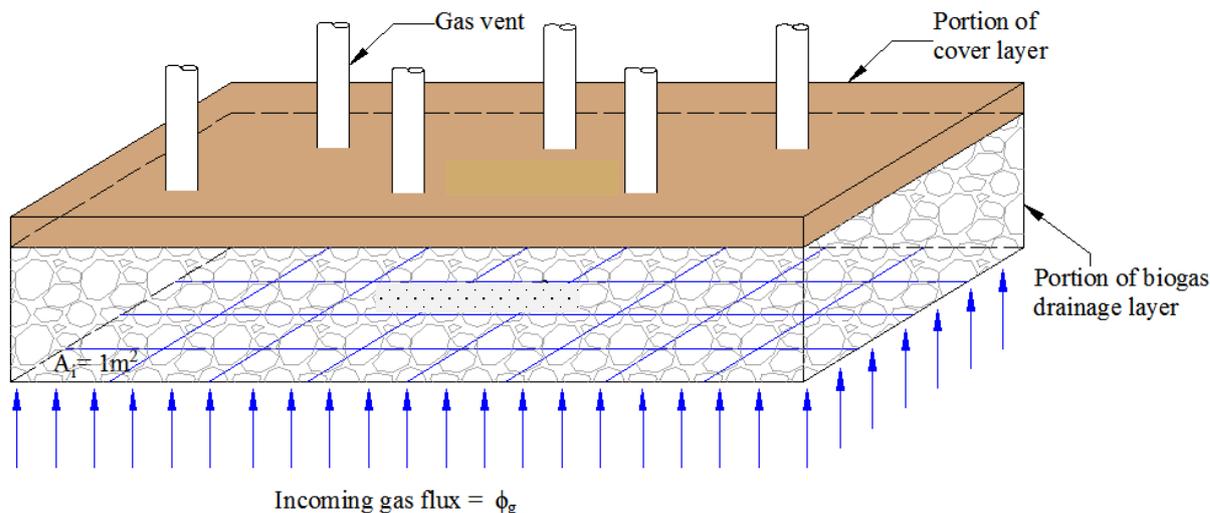
Per tutti questi motivi, il progetto dello strato secondo il criterio "limite" testè enunciato appare improntato alla massima conservatività.

Il modello di calcolo, dunque, assumerà lo scenario in cui tutto il biogas tende ad esalare dai rifiuti e a collocarsi nell'intercapedine riempita da materiale drenante; l'uscita del biogas avviene in condizioni "passive", attraverso le sonde di evacuazione, poste a interasse stimato cautelativamente nell'ordine dei 50 m.

Quest'ultima assunzione deriva dalla considerazione che i pozzi verticali intercettano trasversalmente lo strato drenante in esame, con interasse di circa 20 m. Lo strato stesso, inoltre, ospita le sonde adacquatrici illustrate nel sottopar. 8.4.5 della Relazione tecnico-illustrativa, costituendo così un sistema di evacuazione complessivo formato da elementi longitudinali e trasversali rispetto allo strato in progetto.

Lo schema del modello siffatto, indicando le teste di pozzo di sfiato dalla copertura, è riportato nel seguente schema.

¹⁴ Si veda nel cap.13 della *Relazione tecnico-illustrativa* come tali pozzi prevedano "espansioni" laterali in grado di captare ulteriormente il biogas.



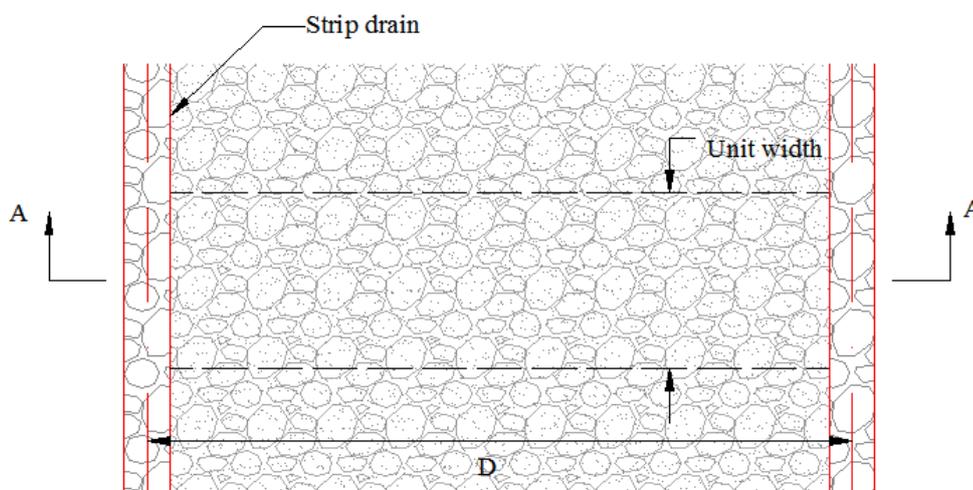
Il flusso di biogas precedentemente assunto è pari a:

$$\Phi_g = 3,17 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{s}$$

Una volta stimato il flusso di biogas esalato dai sottostanti rifiuti, che corrisponde, come accennato, alla portata fluente in un metro quadro di copertura, ci accingiamo ad analizzare il moto di tale portata all'interno dello strato drenante.

La trattazione utilizzata nel presente modello è stata proposta nel già citato studio di R. Thiel (1998).

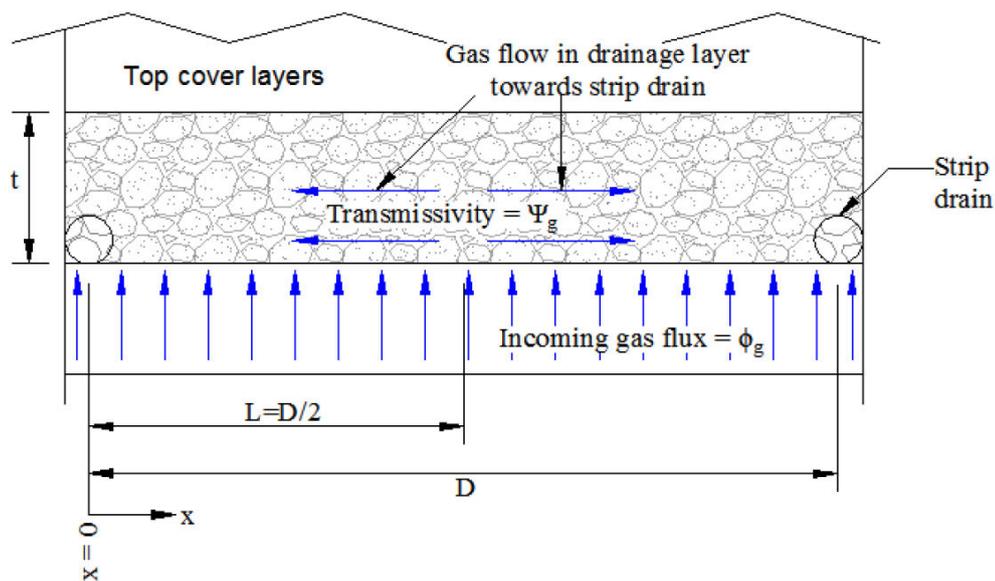
Questo stabilisce, come sopra riferito, che vengano inseriti all'interno dello strato di drenaggio, a distanza D, trincee parallele ("strip drains"), che costituiscono sfiati in grado di convogliare il gas direttamente in atmosfera. Nella seguente figura viene illustrato lo schema adottato.



Come sopra accennato, tale schematizzazione a trincee parallele, è conseguita, nel caso in esame, tramite la costituzione di un sistema di aspirazione che coinvolga le sonde adacquatrici.

In riferimento alla sottostante figura, ad una specifica posizione x tra due sonde di captazione consecutive poste a distanza $D = 50$ m, considerando una “striscia” di larghezza unitaria, la portata nello strato di drenaggio è data dalla seguente relazione:

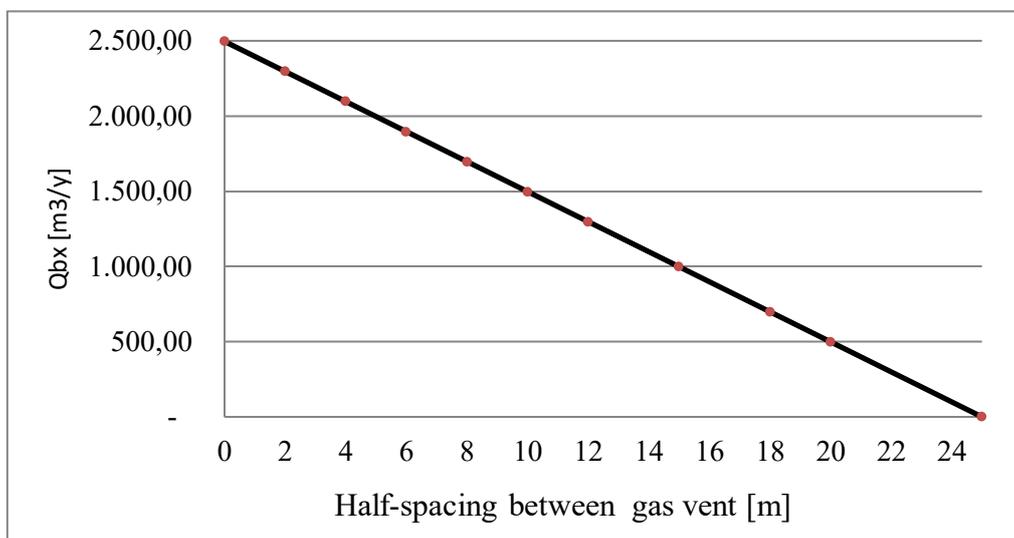
$$Q_{b_x} = \Phi_g \cdot A = \Phi_g \cdot (L - x) \cdot 1 \quad \left[\frac{m^3}{s} \right]$$



Assumendo che la diffusione del biogas sia simmetrica rispetto alla mezzieria delle sonde, a fronte di $L = D/2 = 25$ m, i valori della portata di biogas sono rappresentati nella seguente tabella:

x [m]	Portata di biogas a distanza x	
	Q_{b_x} [m ³ /s]	Q_{b_x} [m ³ /y]
0	7,91476E-05	2.496,00
2	7,28158E-05	2.296,32
4	6,6484E-05	2.096,64
6	6,01522E-05	1.896,96
8	5,38204E-05	1.697,28
10	4,74886E-05	1.497,60
12	4,11568E-05	1.297,92
15	3,16591E-05	998,40
18	2,21613E-05	698,88
20	1,58295E-05	499,20
25	0	0

Tali valori vengono rappresentati nel seguente grafico, raffigurante l'andamento della portata di biogas (Q_{bx}) in funzione della distanza x .

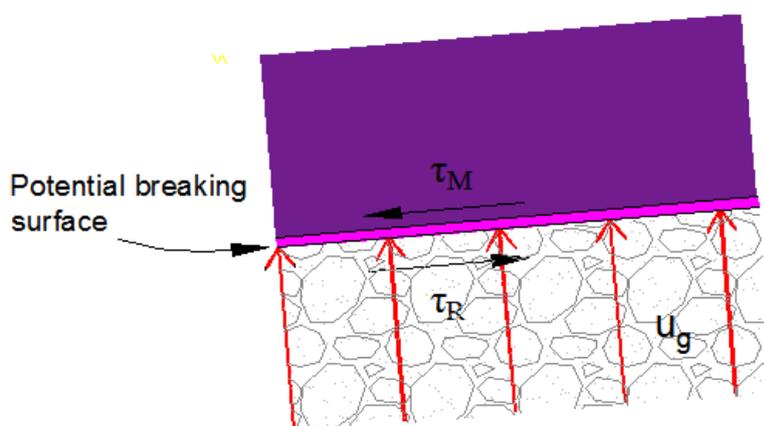


Dal grafico si evince che l'andamento della portata di biogas all'interno dello strato drenante varia linearmente da un valore massimo per $x = 0$ ad un valore nullo per $x = L$.

3.3.4 Valutazione della pressione instabilizzante

Una volta definito il modello di flusso del biogas all'interno dello strato drenante, si introduce l'altro aspetto dell'analisi in oggetto: la stabilità del pendio di copertura.

Assumendo lo schema conservativo del pendio infinito, la linea di interfaccia cui riferire l'analisi di stabilità coincide con la barriera argillosa di tenuta, posta immediatamente sopra lo stato drenante.



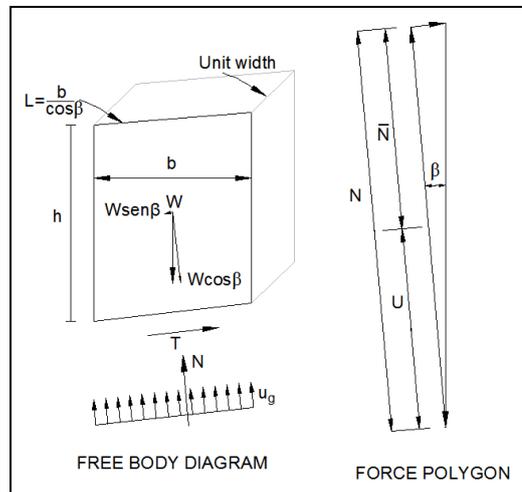
Il fattore di sicurezza è pari al rapporto tra le forze stabilizzanti, in opposizione allo scorrimento della massa posta sul piano inclinato e le forze instabilizzanti con verso nel senso di moto:

$$FS = \frac{\text{ff. stabilizzanti}}{\text{ff. instabilizzanti}} = \frac{\tau_R \cdot A}{\tau_M \cdot A} \quad [/]$$

L'analisi di tale fattore permetterà di valutare il grado di stabilità della copertura.

Il pendio in esame è costituito dagli strati di copertura al di sopra dello strato drenante in esame. Lo spessore complessivo minimo è di 1,50 m, con un peso di volume minimo dell'ordine di 18 kN/m³.

Con riferimento al seguente schema del poligono delle forze:



il peso dello strato di copertura è determinato dalla seguente relazione, in cui è stato adottato, come detto, un peso di volume medio fra gli strati:

$$W = \gamma_{med} \cdot V = \gamma_{med} \cdot A \cdot 1 = \gamma_{med} \cdot \left(h \cdot \frac{b}{\cos\beta} \right) \cdot 1 \quad [N]$$

Tale forza può scomporsi nelle due componenti:

- Forza normale (resistente): $N = W \cos\beta$ [N]
- Forza tangenziale (instabilizzante): $T = W \sin\beta$ [N]

Esprimendo tali azioni in termini di tensioni:

- Tensione normale:

$$\sigma = \frac{N}{A} = \frac{W \cos \beta}{\frac{b}{\cos \beta} \cdot 1} = \gamma_{med} \cdot h \cdot \cos \beta \quad [Pa]$$

– Tensione tangenziale:

$$\tau_M = \frac{T}{A} = \frac{W \sin \beta}{\frac{b}{\cos \beta} \cdot 1} = \gamma_{med} \cdot h \cdot \sin \beta \quad [Pa]$$

– il fattore di sicurezza, in termini di tensioni efficaci ($\sigma' = \sigma - u$), si riscrive come:

$$FS = \frac{\tau_R}{\tau_M} = \frac{c' + (\sigma - u_g) \tan \varphi'}{\gamma_{med} \cdot h \cdot \sin \beta} = \frac{c' + (\gamma_{med} \cdot h \cdot \cos \beta - u_g) \tan \varphi'}{\gamma_{med} \cdot h \cdot \sin \beta}$$

Si noti come la resistenza al taglio (τ_R) sull'interfaccia dipenda fortemente dalle pressioni neutre (u_g), derivanti dall'azione di un fluido in pressione all'interno della matrice porosa. È del tutto evidente che elevati valori di u_g , cagionati dall'azione del biogas possono rendere instabile la copertura definitiva.

La pendenza massima della copertura β si attesa sul 7% (Cfr. par. 8.2 della *Relazione tecnico-illustrativa*).

Pendenza della copertura β			
(%)	0,07	$\cos \beta$	0,998
(°)	4,00	$\sin \beta$	0,07

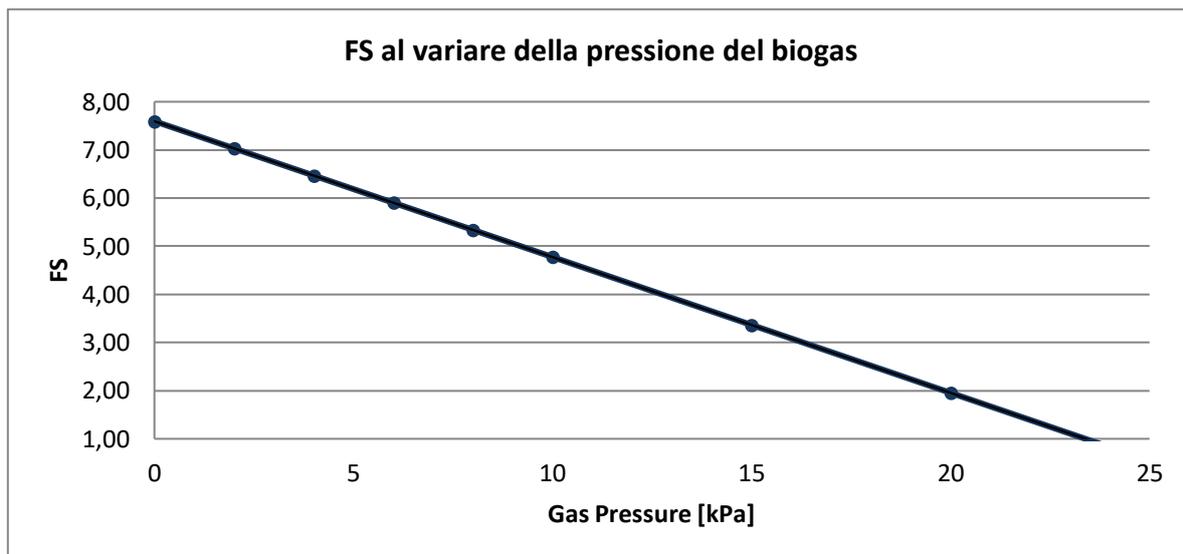
Trascurando cautelativamente, la coesione c' , l'angolo di attrito minimo d'interfaccia φ' , fra il geotessile di separazione e lo strato di drenaggio del biogas, può essere assunto¹⁵ pari a 28°.

Noti i parametri geometrici e di resistenza a taglio è possibile determinare il fattore di sicurezza in funzione della pressione esercitata dal biogas sulla copertura.

Nella seguente tabella e nel successivo grafico sono riportati i termini numerici di tale correlazione.

¹⁵ Valore minimo del range dedotto da prove sperimentali riportate in un abaco della ditta TENAX, relativamente all'attrito d'interfaccia fra sabbia e geotessile non tessuto.

Pressione generata dal biogas u_g		FS
[kPa]	[cm colonna d'acqua]	
25	250	0,55
20	200	1,96
15	150	3,37
10	100	4,78
8	80	5,34
6	60	5,90
4	40	6,47
2	20	7,03
0	0	7,60



Si noti come la stabilità della copertura sia garantita anche a fronte di significativi valori della pressione del biogas: la pressione massima ammissibile da biogas, corrispondente al FS di 2, è dell'ordine dei 20 kPa.

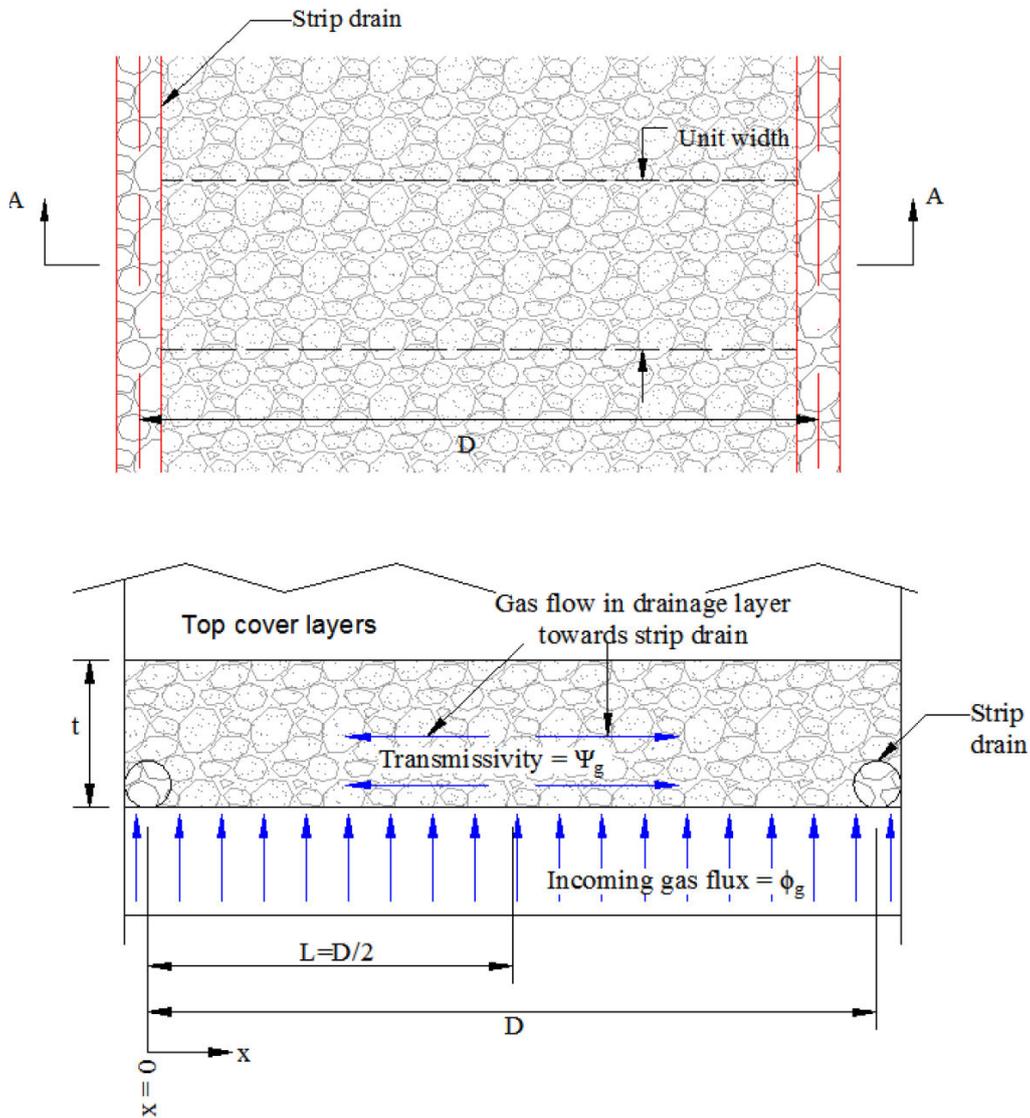
Si tratta ora di valutare la permeabilità limite da assegnare al drenaggio per non superare tali valori di pressione, a fronte dello spessore dello strato e dell'interasse dei pozzi indicati in precedenza.

3.3.5 Correlazione fra pressione del biogas e permeabilità dello strato drenante

La correlazione fra la pressione del biogas e la permeabilità dello strato drenante è concettualmente desumibile tenendo conto che il flusso di biogas per raggiungere i punti di sfiato è "favorito" da mezzi porosi

con permeabilità elevate, vale a dire da terreni di pezzatura grossolana. Viceversa, terreni di tessitura fine tendono a favorire l'insorgenza di pressioni neutre elevate.

Riprendendo il consueto schema di Thiel, richiamato per comodità nelle seguenti figure:



si assume che il flusso di biogas (Φ_g) esalato dai sottostanti rifiuti si distribuisca uniformemente all'interno dello strato di drenaggio.

Si assume altresì che il flusso del gas, all'interno del mezzo poroso, avvenga in regime laminare¹⁶. Sia quindi valida la relazione di Darcy:

¹⁶ Tale assunzione è pressochè sempre verificata. In particolare, se l'impostazione è quella, qui adottata, di limitare i valori di permeabilità dei mezzi drenanti in progetto (vedi oltre).

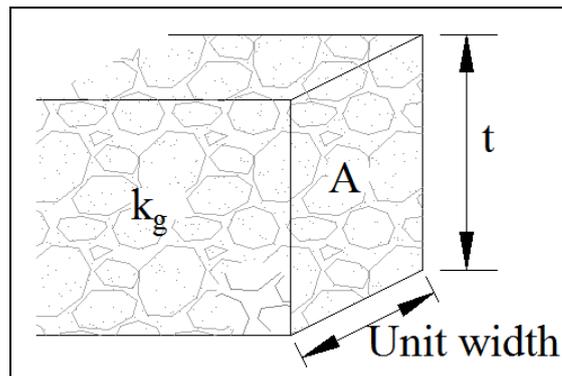
Progetto di ottimizzazione del fronte perimetrale e completamento del sedime della Discarica di Grumolo delle Abbadesse con incremento dei volumi di conferimento

$$Q_x = k_w \cdot A \cdot \left(\frac{dh}{dx}\right) \rightarrow Q_x = k_g \cdot A \cdot \frac{1}{\gamma_g} \cdot \left(\frac{du_g}{dx}\right) \quad \left[\frac{m^3}{s}\right]$$

Dove:

- Q_x = portata di biogas in una specifica posizione x [m³/s];
- k_w = permeabilità idraulica del mezzo drenante [m/s];
- k_g = permeabilità al gas del mezzo drenante [m/s];
- A = sezione trasversale dello strato drenante [m²];
- γ_g = peso di volume del biogas [N/m³];
- u_g = pressione interstiziale del biogas [Pa].

Con il seguente schema del drenaggio:



e tenendo conto che la trasmissività al biogas ψ_g è pari a:

$$\psi_g = k_g \cdot t \quad \left[\frac{m^2}{s}\right]$$

per una strisciata unitaria, dalla precedente relazione si ha che:

$$Q_x = \frac{\psi_g}{t} \cdot A \cdot \frac{1}{\gamma_g} \cdot \left(\frac{du_g}{dx}\right) = \frac{\psi_g}{\gamma_g} \cdot \left(\frac{du_g}{dx}\right) \quad \left[\frac{m^3}{s}\right]$$

Riprendendo la relazione del flusso precedentemente trattata:

$$Q_x = \Phi_g \cdot (L - x) \quad \left[\frac{m^3}{s} \right]$$

ed eguagliando le portate di biogas (Q_x), si ricava la seguente equazione:

$$\frac{\psi_g}{\gamma_g} \cdot \left(\frac{du_g}{dx} \right) = \Phi_g \cdot (L - x)$$

Integrando tale equazione differenziale:

$$\int du_g = \frac{\gamma_g \cdot \Phi_g}{\psi_g} \int_0^x (L - x) dx \rightarrow u_g = \frac{\gamma_g \cdot \Phi_g}{\psi_g} \left(Lx - \frac{x^2}{2} \right)$$

Tenendo conto che la pressione è maggiore per $x = L$ e si annulla per $x = 0$ (laddove la pressione è quella atmosferica):

$$u_{g_max} = \frac{\gamma_g \cdot \Phi_g}{\psi_g} \left(\frac{L^2}{2} \right) = \frac{\gamma_g \cdot \Phi_g}{\psi_g} \left(\frac{D^2}{8} \right) \quad [Pa]$$

Tale formula esprime la ricercata correlazione fra la pressione massima esercitata dal biogas sulla copertura u_g e la trasmissività al gas ψ_g .

Generalmente, tuttavia, è più agevole e consolidata l'associazione fra le caratteristiche tessiturali di un mezzo poroso e la propria permeabilità idraulica, il cui coefficiente, k_w , è comunemente disponibile da prove e/o stimabile attraverso formule empiriche.

In ragione di ciò, è opportuno analizzare la correlazione fra la permeabilità al biogas e quella all'acqua, così da rendere più agevole la progettazione di tale strato drenante.

Il primo step di tale analisi consiste nella definizione di "permeabilità intrinseca".

Entrando nel dettaglio di tali formulazioni, infatti, si definiscono:

- *Permeabilità effettiva o conducibilità idraulica* (k_w), legata tanto alle caratteristiche tessiturali del mezzo poroso (i.e. alla porosità), quanto alle caratteristiche del fluido;
- *Permeabilità intrinseca* (k_i), dipendente unicamente dalle caratteristiche proprie del mezzo poroso.
Tale grandezza, quindi, non è condizionata dal fluido che lo attraversa, sia questo liquido o gas.

Il moto di filtrazione dell'acqua, supposto laminare, all'interno di un mezzo poroso, è regolato, come già accennato, dalla legge di Darcy:

$$Q_w = k_w \cdot \frac{\Delta H_w}{L} \cdot A = k_w \cdot i_w \cdot A \quad [m^3/s]$$

dove:

- Q_w = portata idraulica [m^3/s];
- ΔH_w = perdita di carico idraulico [m];
- L = lunghezza del mezzo poroso (percorso idraulico) [m];
- A = area della sezione [m^2];
- k_w = coefficiente di *permeabilità idraulica effettiva* [m/s];

La permeabilità intrinseca e quella effettiva sono tra loro in relazione attraverso i parametri che definiscono le caratteristiche idrodinamiche del fluido in regime laminare: densità γ e viscosità μ ; nell'ipotesi che si tratti di acqua, la precedente relazione può esprimersi in termini di *permeabilità intrinseca*:

$$Q_w = \frac{K_i \cdot \gamma_w}{\mu_w} \cdot i_w \cdot A = \frac{K_i \cdot g \cdot \rho_w}{\eta_w} \cdot i_w \cdot A \quad [m^3/s]$$

Attraverso l'eguaglianza delle due precedenti relazioni si perviene alla seguente espressione:

$$k_w \cdot i_w \cdot A = \frac{K_i \cdot g \cdot \rho_w}{\mu_w} \cdot i_w \cdot A \rightarrow k_w = \frac{K_i \cdot g \cdot \rho_w}{\mu_w} = K_i \cdot \frac{\gamma_w}{\mu_w} \quad [m/s]$$

dove:

- k_i = coefficiente di permeabilità intrinseca (indipendente dal fluido) [m^2];
- γ_w = peso specifico del fluido [N/m^3];
- μ_w = viscosità dinamica del fluido [$N \cdot s/m^2$];
- g = accelerazione di gravità [m/s^2];
- ρ_w = densità del fluido [N/m^3];

k_i è indipendente dal tipo di fluido che attraversa il mezzo poroso, talchè, il coefficiente di *permeabilità effettiva*, valutato per due diversi fluidi (w = acqua, g = gas), è pari a:

$$k_w = \frac{K_i \cdot \gamma_w}{\mu_w} ; k_g = \frac{K_i \cdot \gamma_g}{\mu_g}$$

Eguagliando la permeabilità intrinseca K_i si giunge alla seguente equazione:

$$\frac{k_w}{k_g} = \frac{\gamma_w}{\gamma_g} \cdot \frac{\mu_g}{\mu_w}$$

che permette di ricavare la permeabilità idraulica del mezzo poroso, nota la permeabilità al gas dello stesso. Il peso di volume e la viscosità dinamica dei fluidi sono desumibili da letteratura.

Per il biogas, stante la sua mutevole composizione (funzione del tipo di rifiuto e del periodo di osservazione), è però necessario riferirsi a un valore “tipico” di composizione. Tenendo conto che la situazione di picco della produzione si ha in fase metanigena pienamente sviluppata, allorchè, da misure effettuate presso l’impianto di Grumolo delle Abbadesse, le percentuali di metano ed anidride carbonica erano rispettivamente del 45% e del 55%; a fronte dei seguenti pesi di volume:

$$\begin{aligned} \gamma_{CH_4} &= 6,54 \frac{N}{m^3} & \gamma_{CO_2} &= 17,9 \frac{N}{m^3} \\ \gamma_{CH_4}(45\%) &= 2,94 \frac{N}{m^3} & \gamma_{CO_2}(55\%) &= 9,84 \frac{N}{m^3} \end{aligned}$$

si perviene ad un peso di volume del biogas pari a 12,8 [N/m³].

Nella seguente tabella sono riportati i parametri caratteristici di alcuni fluidi.

	Densità (ρ) [kg/m ³]	Peso specifico (γ) [N/m ³]	Viscosità dinamica (μ) [N·s/m ²]	Viscosità cinematica (ϑ) [N·s/m ²]
Acqua	1.000	9.800	1,01·10 ⁻³	1,01·10 ⁻⁶
Aria	1,28	11,8	1,79·10 ⁻⁵	1,75·10 ⁻⁵
Anidride carbonica	1,83	17,9	1,50·10 ⁻⁵	8,21·10 ⁻⁶
Metano	0,67	6,54	1,10·10 ⁻⁵	1,65·10 ⁻⁵
Biogas (45% CH ₄ + 55% CO ₂)	1,31	12,8	1,32·10 ⁻⁵	1,01·10 ⁻⁵

Utilizzando tali valori, valutati a 20°C, si ricava il rapporto fra i coefficienti di permeabilità all’acqua e al biogas, che risulta pari a 10:

$$k_w = \left(\frac{\gamma_w}{\gamma_g} \cdot \frac{\mu_g}{\mu_w} \right) \cdot k_g = \left(\frac{9,8 \cdot 10^3 \frac{N}{m^3}}{12,8 \frac{N}{m^3}} \cdot \frac{1,32 \cdot 10^{-5} \frac{N \cdot s}{m^2}}{1,01 \cdot 10^{-3} \frac{N \cdot s}{m^2}} \right) \cdot k_g = 10 \cdot k_g$$

La validità di tale relazione è stata dimostrata sperimentalmente per mezzi sabbiosi aventi conducibilità idraulica k_w compresa tra 10^{-5} e 10^{-3} m/s (¹⁷) che, come si vedrà, copre proprio l'ambito della presente analisi.

Il risultato testè conseguito appare, per certi versi, sorprendente, tant'è che nel passato il rapporto si riteneva inverso, ossia che la trasmissività al biogas fosse finanche 100 volte maggiore della trasmissività idraulica. Tale assunzione portò a utilizzare drenaggi del biogas con permeabilità assai bassa, con le prevedibili conseguenze in termini di stabilità delle coperture, come effettivamente constatato in alcune realizzazioni, specie negli Stati Uniti.

3.3.6 Correlazione fra permeabilità dello strato drenante e fattore di sicurezza della copertura

Una volta chiarito il concetto di permeabilità al biogas è possibile completare il percorso finalizzato a determinare la correlazione fra la permeabilità dello strato drenante e il fattore di sicurezza relativo alla stabilità della copertura sottoposta alla pressione del biogas.

Recuperando la precedente equazione:

$$u_{g_max} = \frac{\gamma_g \cdot \Phi_g \left(\frac{L^2}{2} \right)}{\psi_g} = \frac{\gamma_g \cdot \Phi_g \left(\frac{D^2}{8} \right)}{\psi_g} \quad [Pa]$$

e invertendola, è possibile porre in relazione la trasmissività al biogas e la pressione.

$$\psi_{calc_g} = \frac{\gamma_g \cdot \Phi_g \left(\frac{D^2}{8} \right)}{u_{g_max}} \quad [m^2/s]$$

Recuperando la relazione prima determinata, fra il fattore di sicurezza della stabilità della copertura e la pressione (Cfr. sottopar. 3.3.4), l'equazione della retta riportata nel grafico è la seguente:

$$FS(u_g) = -0,282 u_g + 7,5958$$

Invertendola:

$$u_g(FS) = -3,55 FS + 26,94$$

è possibile ricavare la ricercata correlazione fra la trasmissività al biogas del mezzo poroso e il FS della stabilità della copertura.

A questo punto della trattazione è però necessario svolgere un'importante digressione sul significato della trasmissività al biogas (o della permeabilità al biogas) da assegnare al progettando mezzo poroso, affinché si raggiungano le condizioni di sicurezza desiderate.

È del tutto evidente che il modello consideri la trasmissività "effettiva", vale a dire quella che, a regime, consente il flusso di biogas nel mezzo poroso, nelle condizioni ipotizzate nel summenzionato modello proposto da Thiel.

¹⁷ Muskat M.; Wyckoff R.D.; Botset H.G.; Meres M.W. - *Flow of Gas-liquid Mixtures through Sands*; Published in Transactions of the AIME 123 (1937), pp 69-96; Document ID SPE-937069-G.

Va però tenuto presente che, fra tale schematizzazione e la realtà operativa di siffatte realizzazioni, vi sono alcuni elementi che tendono a penalizzare l'efficacia, in termini di trasmissività/permeabilità, del mezzo poroso.

Per tenere conto di tale penalizzazione, sono stati definiti fattori correttivi che, permettono di ricavare il valore di progetto della trasmissività minima del mezzo poroso, a fronte della permeabilità nominale di progetto:

$$\Psi_{prog_g} = \Psi_{nom_g} \cdot \prod_{i=1}^5 FC_i$$

con:

$$\prod_{i=1}^5 FC_i = FC_{IN} \cdot FC_{CR} \cdot FC_{CC} \cdot FC_{BC} \cdot FC_{OVERALL}$$

Tali fattori correttivi FC sono ascrivibili alle fattispecie riportate nella seguente tabella, in cui sono altresì indicati i range e i valori adottati.

<i>Fattispecie del fattore correttivo</i>		<i>Range</i>		<i>Valore adottato</i>
FC_{IN}	Fattore correttivo dovuto a una possibile intrusione del geotessile superiore all'interno dello strato drenante	1	1,2	1,2
FC_{CR}	Fattore correttivo dovuto al fenomeno di creep	1,1	1,4	1,1
FC_{CC}	Fattore correttivo dovuto al fenomeno di intasamento chimico	1	1,2	1,2
FC_{BC}	Fattore correttivo dovuto al fenomeno di intasamento biologico	1,2	1,5	1,5
$FC_{OVERALL}$	Fattore riduttivo da incertezza del modello	2	3	3

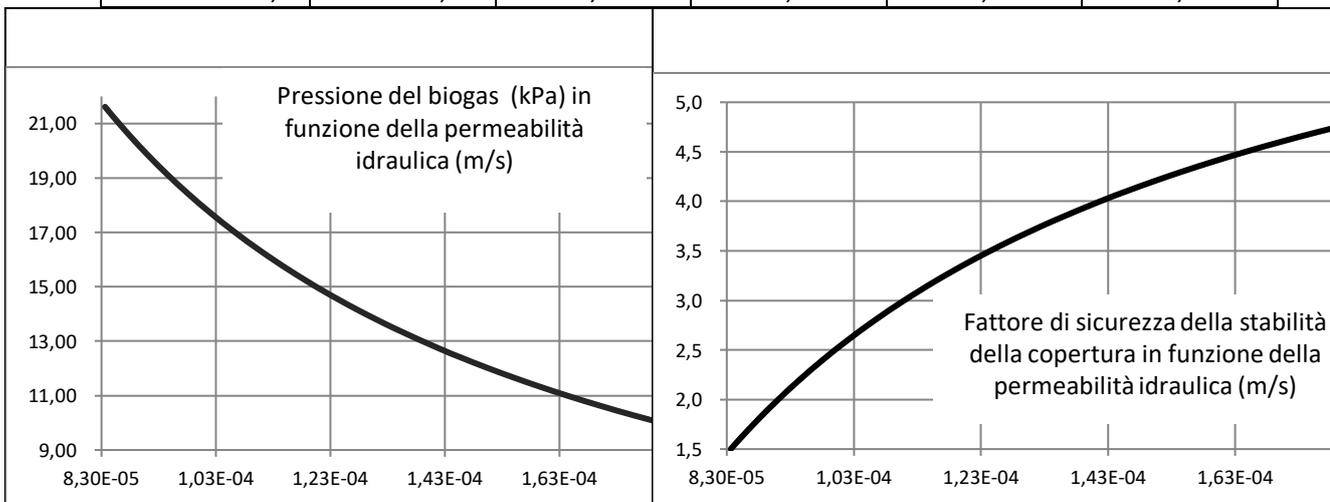
È stato assunto il minimo valore per il creep, più avvertito nei geocompositi drenanti in polimeri, mentre sono stati cautelativamente assunti i massimi valori del range per gli altri fattori. Quello relativo all'incertezza del modello non ha bisogno di commenti, se non che si tratta dell'indice di conservatività complessivo del metodo.

Nel caso in esame il valore complessivo del fattore correttivo è $FC = 7,128$.

Tramite la consueta indagine parametrica è ora possibile, al variare del FS, stimare i valori nominali e di progetto della trasmissività (al gas e all'acqua) e, dividendola per lo spessore 0,5 m, della permeabilità di progetto (al gas e all'acqua) del mezzo poroso.

Nella seguente tabella e nei grafici è riportato l'esito di tale analisi. In particolare, questi ultimi riportano gli andamenti della pressione del biogas sulla copertura e del fattore di sicurezza della stabilità della copertura in funzione della permeabilità **idraulica** del mezzo filtrante.

<i>FS</i>	u_g [kPa]	ψ_g [m ² /s] di calcolo	ψ_g [m ² /s] di progetto	k_g [m/s]	k_w [m/s]
1,5	21,62	5,87E-07	4,18E-06	8,36E-06	8,36E-05
1,6	21,26	5,96E-07	4,25E-06	8,50E-06	8,50E-05
1,8	20,55	6,17E-07	4,40E-06	8,80E-06	8,80E-05
2,0	19,84	6,39E-07	4,55E-06	9,11E-06	9,11E-05
2,2	19,13	6,63E-07	4,72E-06	9,45E-06	9,45E-05
2,4	18,42	6,88E-07	4,91E-06	9,81E-06	9,81E-05
2,6	17,72	7,16E-07	5,10E-06	1,02E-05	1,02E-04
2,8	17,01	7,46E-07	5,31E-06	1,06E-05	1,06E-04
3,0	16,30	7,78E-07	5,55E-06	1,11E-05	1,11E-04
3,2	15,59	8,13E-07	5,80E-06	1,16E-05	1,16E-04
3,4	14,88	8,52E-07	6,07E-06	1,21E-05	1,21E-04
3,6	14,17	8,95E-07	6,38E-06	1,28E-05	1,28E-04
3,8	13,46	9,42E-07	6,71E-06	1,34E-05	1,34E-04
4,0	12,75	9,94E-07	7,09E-06	1,42E-05	1,42E-04
4,1	12,40	1,02E-06	7,29E-06	1,46E-05	1,46E-04
4,2	12,04	1,05E-06	7,51E-06	1,50E-05	1,50E-04
4,3	11,69	1,08E-06	7,73E-06	1,55E-05	1,55E-04
4,4	11,33	1,12E-06	7,98E-06	1,60E-05	1,60E-04
4,5	10,98	1,16E-06	8,23E-06	1,65E-05	1,65E-04
4,6	10,62	1,19E-06	8,51E-06	1,70E-05	1,70E-04
4,7	10,27	1,23E-06	8,80E-06	1,76E-05	1,76E-04
4,8	9,91	1,28E-06	9,12E-06	1,82E-05	1,82E-04



Si noti come un mezzo poroso con **Coefficiente di permeabilità idraulica dell'ordine di $1,0 \cdot 10^{-4}$ m/s** presenti un **fattore di sicurezza FS alla stabilità della copertura di circa 2,5**. Ciò, pur tenendo conto delle svariate assunzioni cautelative considerate nell'analisi.

3.3.7 Caratteristiche granulometriche indicative del mezzo poroso

Dovendo inquadrare le caratteristiche indicative del mezzo poroso oggetto della presente progettazione, valga il seguente abaco indicativo, ricavato da prove di permeabilità idraulica effettuate in laboratorio.

		1	10^{-1}	10^{-2}	10^{-3}	10^{-4}	10^{-5}	10^{-6}	10^{-7}	10^{-8}	10^{-9}	10^{-10}	10^{-11}	10^{-12}
k_w [m/s]														
Drenaggio		Buono						Ridotto			Praticamente nullo			
Tipo di terreno	Ghiaia pulita	Sabbie pulite, misto di ghiaie e sabbie pulite				Sabbie molto fini, limo organico e inorganico, misti di sabbie, limi e argille ecc.				Terreno impermeabile argille omogenee al di sotto della coltre d'alterazione atmosferica				
		Terreno impermeabile argille con modificazioni strutturali generate da vegetazione ed alterazione in sito												

Ovviamente tale schematizzazione va assunta solo come indirizzo; è infatti noto che la permeabilità idraulica di un terreno dipende dalle dimensioni delle classi granulometriche più fini (D_{10} - D_{15}).

Il calcolo sopra illustrato porterebbe a concludere che un terreno costituito nel campo delle sabbie potrebbe costituire un idoneo strato di drenaggio del biogas.

Nella scelta del materiale è altresì necessario tener conto di altri aspetti; fra i principali possono annoverarsi i seguenti:

1. lo strato in oggetto deve fungere anche da "rottura capillare"; onde evitare la presenza di menischi di suzione della sovrastante argilla, ancorchè separata dal tessuto non tessuto è bene che lo strato in oggetto abbia permeabilità nel campo, almeno, delle sabbie di media granulometria;
2. è buona norma evitare l'insorgere di significative pressioni da biogas sulla copertura, pur in presenza di condizioni di assoluta stabilità.

Per tutti questi motivi, si ritiene che lo strato del biogas, nel nostro caso, debba essere costituito da un mezzo drenante con $k_w > 1 \cdot 10^{-4}$ m/s.

Tutte le altre caratteristiche del mezzo granulare in esame (granulometria, resilienza, ecc.) saranno trattate nel par. 3.7 delle *Specifiche tecniche*.

3.4 Drenaggi granulari: verifiche granulometriche [sottoparr. 3.6.3 e 3.7.3 delle Specifiche tecniche]

In questo paragrafo sarà sviluppato un esempio di verifica di stabilità interna di un materiale granulare proposto in fase di accettazione. Detto materiale dovrà dapprima essere sottoposto a verifica di compatibilità granulometrica con gli strati contigui, come illustrato nei punti 3.6.3.1 e 3.7.3.1 delle *Specifiche tecniche* a proposito degli strati di regolarizzazione e di drenaggio del biogas.

Quest'ultima verifica si svolgerà utilizzando il ben noto criterio di ritenzione di Terzaghi:

$$D_{15}/d_{85} < 4,0$$

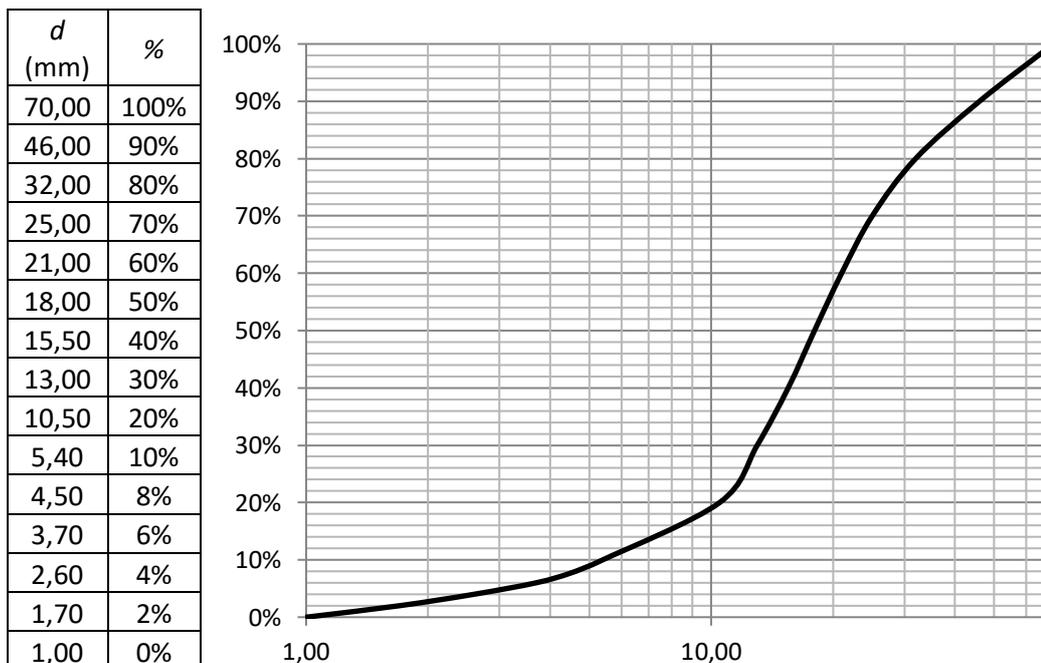
con D_{15} relativo alla curva granulometrica rappresentativa dello strato più grossolano e d_{85} dello strato a monte del flusso, più fine.

Una volta completata tale verifica, è necessario verificare se il materiale sia "internamente stabile" (Cfr. punti 3.6.3.2 e 3.7.3.3 delle *Specifiche tecniche*).

Queste ultime verifiche dovranno essere eseguite nei materiali costituenti i seguenti strati di copertura:

- Regolarizzazione (Cfr. 3.6.3.2 delle *Specifiche tecniche*);
- Drenaggio del biogas (Cfr. 3.7.3.3 delle *Specifiche tecniche*).

Nell'esempio qui di seguito illustrato è svolta la verifica di stabilità interna di un materiale che, in sede di accettazione sia caratterizzato dalla curva granulometrica rappresentata nel seguente grafico. Trattasi, nel caso specifico, di un materiale potenzialmente idoneo a formare lo strato di regolarizzazione, ma il metodo è del tutto identico per le altre fattispecie.



Il valore di d_{85} rilevato dalla curva è pari a 37,50 mm, maggiore del limite minimo fissato nel punto 3.6.3.1 delle *Specifiche tecniche* per lo strato di regolarizzazione, pari a 20 mm.

La verifica di stabilità interna con il metodo di Kenney e Lau, come illustrato nel punto 3.6.3.2 delle *Specifiche tecniche*, consiste nel determinare, per ogni diametro relativo alla “coda di fino”, i valori di F e H :

F = passante corrispondente a un certo diametro d^* ;

H = passante corrispondente al diametro $4 \cdot d^*$ a cui viene sottratto il valore di F per lo stesso d^* .

Tali valori, posti in un grafico, $H(F)$, devono essere sempre superiori alla retta $H = F$.

La verifica va limitata ai diametri relativi alla “coda di fino”, ristretta a $0 \leq F \leq 0,2$ nella gran parte delle curve granulometriche relative a siffatti materiali.

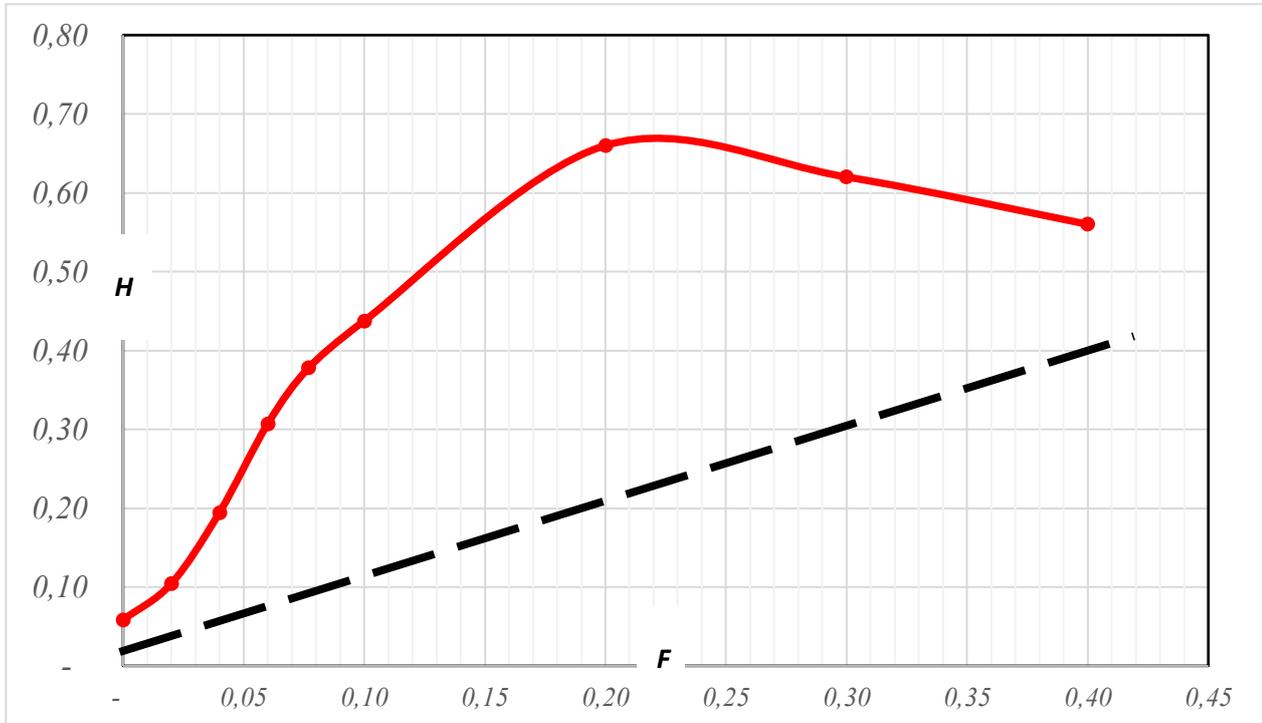
In ogni caso, laddove il diametro $4D$ superi quello massimo della curva granulometrica, la verifica si arresterà al diametro D .

Nel caso in esame, i dati significativi ricavati dalla curva sono i seguenti:

d	%	$4d$	F	H
70,00	1,00	280,00		
46,00	0,90	184,00		
32,00	0,80	128,00		
25,00	0,70	100,00		
21,00	0,60	84,00		
18,00	0,50	72,00		
15,50	0,40	62,00	0,40	0,56
13,00	0,30	52,00	0,30	0,62
10,50	0,20	42,00	0,20	0,66
5,40	0,10	21,60	0,10	0,44
4,50	0,08	18,00	0,08	0,38
3,70	0,06	14,80	0,06	0,31
2,60	0,04	10,40	0,04	0,19
1,70	0,02	6,80	0,02	0,10
1,00	-	4,00	-	0,06

Il conseguente grafico $H(F)$ è riportato di seguito.

Da questo si evince che l'andamento della curva $H(F)$ è sempre maggiore della retta $H = F$ e, pertanto, le condizioni di stabilità interna, secondo il criterio adottato, sono verificate.



4 ANALISI E CALCOLI DEL MURO [PAR. 7.2 – SOTTOPAR. 7.3.2]

4.1 Generalità

Il *Muro* costituisce il vero elemento di innovazione introdotto dal presente *Progetto*, sia per le modalità realizzative, con la tecnica della terra rinforzata, sia per le interazioni con il corpo rifiuti, di cui costituisce la parte perimetrale della copertura finale.

Nei successivi paragrafi, che sviluppano i temi del par. 7.2 della *Relazione tecnico-illustrativa*] dopo una breve descrizione della tecnica in oggetto, saranno sviluppati l'analisi e i calcoli relativi alla struttura del *Muro*, condotti utilizzando le basi scientifiche e i modelli messi a disposizione del Dipartimento ICEA dell'Università di Padova¹⁸.

Seguirà un paragrafo conclusivo dedicato ai calcoli relativi agli strati di tenuta, posti sul paramento interno del *Muro*.

4.2 Terra rinforzata: principi di funzionamento e materiali

La tecnica della *terra rinforzata* (o *armata*) costituisce un settore di notevole interesse nell'Ingegneria geotecnica, tanto che i muri in terra rinforzata sostituiscono spesso, soprattutto nelle applicazioni ambientali, le "tradizionali" opere di sostegno in conglomerato cementizio, più rigide e impattanti rispetto alle opere in terra nei contesti in cui sono normalmente inserite.

Storicamente, le prime opere con l'utilizzo di questa tecnica sono legate all'ingegnere francese Henri Vidal (1924-2007), che la propose in svariate applicazioni a partire dai primi anni '60 del 1900.

Ma il vero sviluppo di questa pratica si deve alla disponibilità di materiali di concezione più recente, quali geosintetici e geogriglie, con cui sono ottenuti rinforzi caratterizzati da notevoli interazioni con il terreno in termine di attrito, elevate resistenze con limitate deformazioni, e stabilità a lungo termine.

Entrando nel merito dei principi di funzionamento delle terre rinforzate, le prime schematizzazioni tendevano a considerarle alla stregua di un nuovo materiale, al quale il rinforzo attribuiva una "coesione anisotropa" nella direzione in cui esso era disposto.

¹⁸ Sono state sviluppate due Tesi di Laurea Magistrale specificamente condotte presso il sito in esame:

«L'impiego di rilevati in terra rinforzata nell'ottimizzazione del volume utile nelle discariche per rifiuti solidi urbani» – Tesi di Laurea di: Matteo Pavan - Relatore: Prof. Ing. Giampaolo Cortellazzo; Correlatore: Dott. Ing. Stefano Busana – Dip. ICEA dell'Università di Padova - 2020.

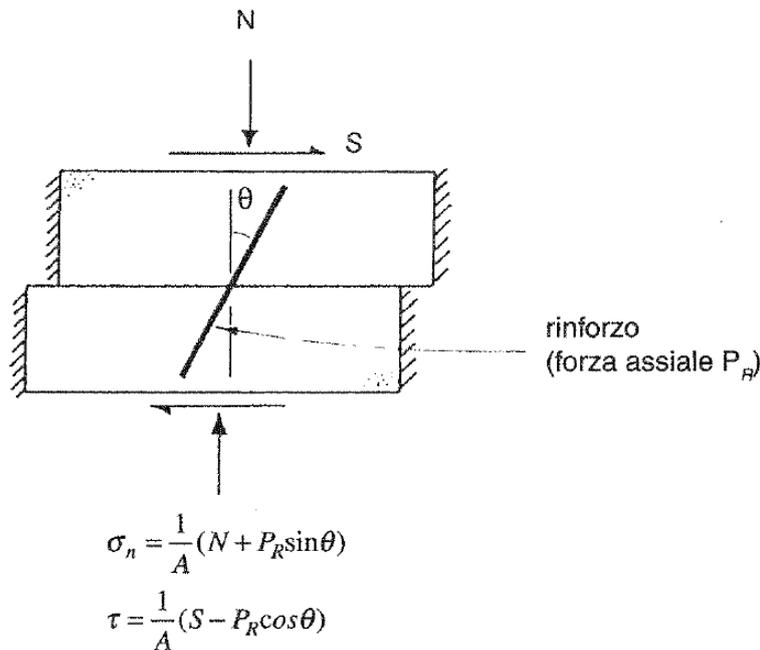
«Optimization of the available volume in the Grumolo delle Abbadesse MSW using perimetric embankment in reinforced earth» – Tesi di Laurea Magistrale di: Giuseppe Trovato – Relatore: Prof. Ing. Marco Favaretti; Correlatori: Prof. Ing. Giampaolo Cortellazzo e Dott. Ing. Stefano Busana – Dip. ICEA dell'Università di Padova - 2020.

Nell'ambito della collaborazione con detto Ateneo, regolata da una Convenzione con SIA SRL del marzo 2021, sono altresì previsti ulteriori sviluppi scientifici in sede di monitoraggio futuro del comportamento del *Muro*.

Una idealizzazione più diretta¹⁹ consiste nell'esaminare una potenziale superficie di rottura e valutare le forze risultanti che agiscono nel rinforzo a cavallo della superficie di rottura di un ammasso di terreno, come illustrato nella seguente figura per una prova di taglio diretto.

Si assiste ad un duplice effetto benefico per cui:

- la componente normale della forza del rinforzo permette di mobilitare una maggiore resistenza di tipo attritivo;
- la componente tangenziale si oppone direttamente agli sforzi di taglio.



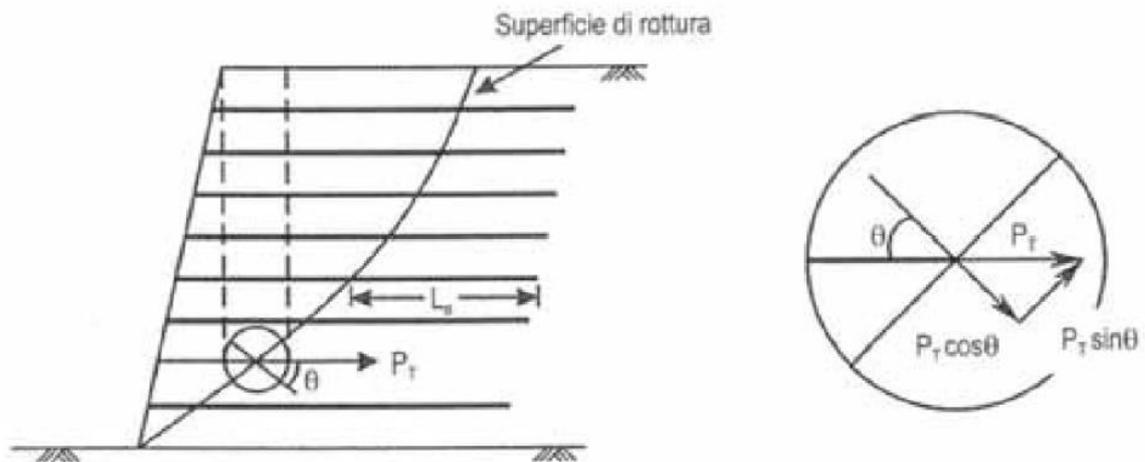
La resistenza al taglio della terra rinforzata può pertanto essere calcolata in base a considerazioni di equilibrio. In questo modo, è possibile calcolare la resistenza al taglio lungo una qualunque potenziale superficie di rottura, una volta che siano ipotizzati i valori della resistenza mobilitata dal terreno e della forza nel rinforzo.

Analizzando il comportamento di un pendio "tradizionale" costituito da terreno caricato dal peso proprio e da forze esterne, le forze stabilizzanti sono rappresentate dalla resistenza al taglio, di tipo attritivo e coesivo: in corrispondenza della superficie di rottura si registra un movimento allorché le forze sollecitanti superino le resistenze mobilitate dal terreno.

L'utilizzo di elementi di rinforzo nel terreno, come accennato sopra, modifica l'equilibrio delle forze a causa dell'interazione terreno-rinforzo; quest'ultimo si oppone alla deformazione tramite una reazione di trazione su di esso e, al contempo, incrementando il carico normale e, con esso, la resistenza d'attrito.

¹⁹ R. A. Jewell, C. P. Wroth: «Direct shear tests on reinforced sand» - Géotechnique - Vol. 37, Issue 1, March 1987, pp. 53-68.

Nella seguente figura il concetto risulterà più chiaro: la forza P_t mobilitata dal rinforzo può essere scomposta in una componente normale alla superficie di taglio e in una tangente alla superficie stessa.



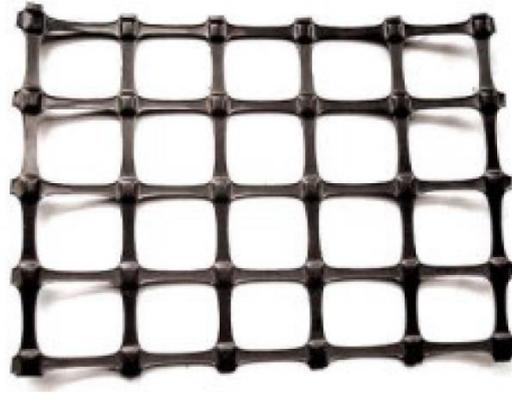
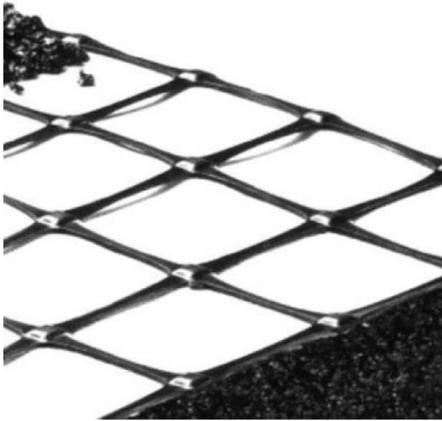
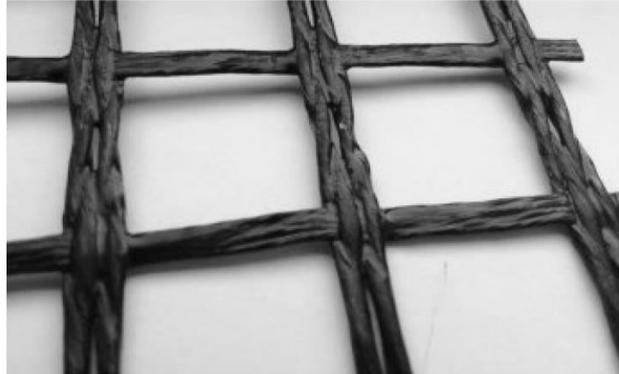
Altresì, l'elemento di rinforzo genera un aumento delle tensioni orizzontali di confinamento cosicché il terreno rinforzato si deforma in misura minore di quanto si sarebbe deformato senza rinforzo. Ovviamente, per rendere il sistema terreno-rinforzo efficace e in grado di garantire l'equilibrio, risultano fondamentali le seguenti condizioni:

- necessità del trasferimento delle tensioni tra terreno e rinforzi, tramite l'insorgere di sforzi tangenziali agenti all'interfaccia;
- rinforzi deformabili per mobilitare la resistenza a trazione e contribuire alla stabilità, ma compatibili con le deformazioni della struttura.

La sostanziale monoliticità di un ammasso di terra è quindi garantita dalla presenza dei rinforzi, i più efficienti dei quali devono mostrare, al contempo, rigidità e flessibilità.

Si è detto che la deformazione nei rinforzi si attiva allorché sia richiesta una reazione a trazione e che il livello di deformazione di questi dev'essere compatibile con la funzionalità dell'opera l'opera. Da qui l'importanza delle suaccennate moderne tipologie di materiali negli impieghi come quello in oggetto, quali i rinforzi planari polimerici.

Trattasi di elementi bidimensionali che interagiscono con il terreno in maniera diffusa su tutto il piano di contatto, quali le cd. *Geogriglie*, rappresentate nelle seguenti figure.



Il terreno utilizzato in siffatte opere ricopre un ruolo fondamentale, poiché in funzione delle sue caratteristiche dipendono i meccanismi di trasferimento degli sforzi tangenziali.

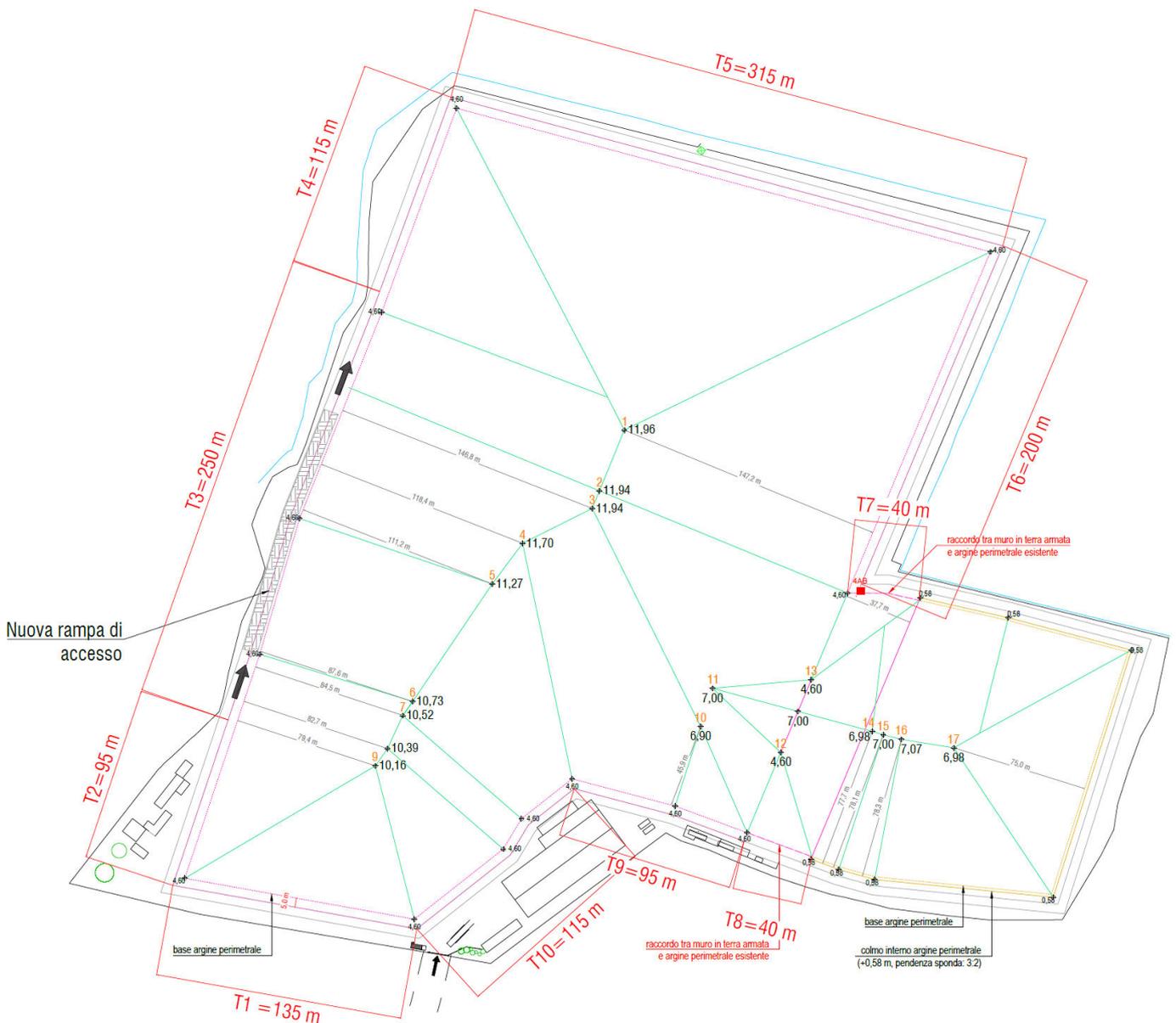
Nella maggior parte dei casi, stanti esigenze di tipo economico e, come nel caso in esame, di tipo ambientale, sono utilizzati terreni recuperati da scavi o altre operazioni del cantiere; ciò nondimeno, detti terreni devono comunque essere dotati di adeguate caratteristiche meccaniche.

4.3 Sezioni di progetto del *Muro*

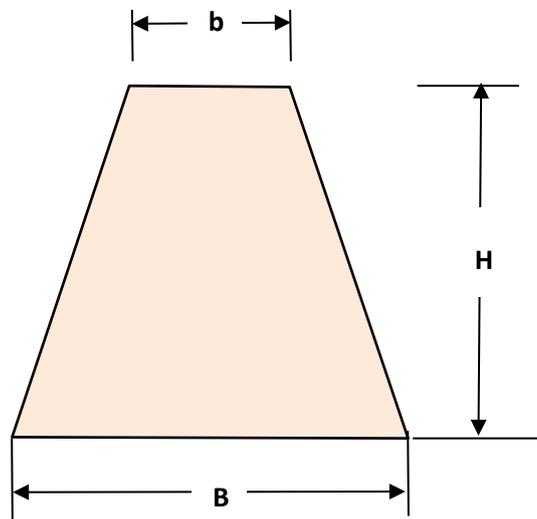
La configurazione di progetto del *Muro* vede, a parità di quota sommitale nell'intero sviluppo dell'opera, varie altezze, in funzione della quota del piano campagna che, con tutta evidenza, risente della baulatura del terreno.

L'altro vincolo d'interesse riguarda la disponibilità di spazio nella fascia perimetrale interessata dal *Muro*: in taluni settori prossimi al confine di proprietà, la contestuale presenza della pista perimetrale di servizio comporta una limitazione della possibilità di espansione della base del *Muro* verso l'esterno (verso l'interno il confine è costituito dal fronte di scavo delle vasche).

La definizione di questi due elementi di progetto, che condizionano lo schema di calcolo del *Muro*, ha portato alla rappresentazione grafica della seguente planimetria schematica in cui sono stati individuati 10 tratti di perimetro (T1÷T10) caratterizzati da diverse altezze e base maggiore della sezione trapezia del *Muro*.



Nella seguente tabella, riferita alla sezione del *Muro* (trapezio isoscele con pendenza sull'orizzontale di 72°), sono riportati i valori limite dei vari tratti definiti nella suddetta planimetria schematica.



<i>Tratti</i>	<i>Lunghezza totale</i> [m]	<i>H</i> [m]	<i>B (max)</i> [m]	<i>b (min)</i> [m]
T1+T10	250	4,20	5,00	1,50
T2+T4+T5+T6+T9	820	5,00	5,00	1,50
T3	250	4,80	4,50	1,50

In generale, quindi, la base maggiore dovrà essere contenuta entro i 5 m, con l'unica eccezione di un tratto di circa 250 m, nella zona adiacente alla rampa di accesso, dove è richiesto il contenimento della base entro i 4,50 m.

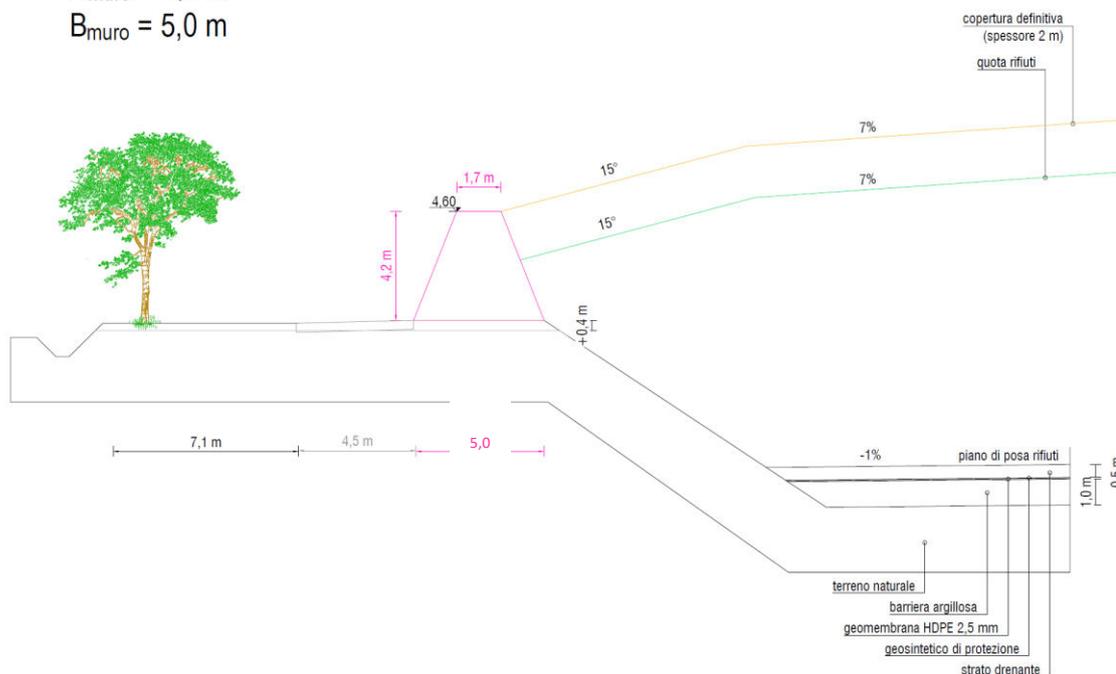
Le sezioni effettive del *Muro*, della copertura finale e del corpo rifiuti a tergo nei vari tratti sopra definiti sono rappresentate nelle seguenti figure, **che costituiscono le basi dello schema di calcolo.**

TRATTI T1 e T10

Lunghezza totale: 250 m

$H_{muro} = 4,2 \text{ m}$

$B_{muro} = 5,0 \text{ m}$

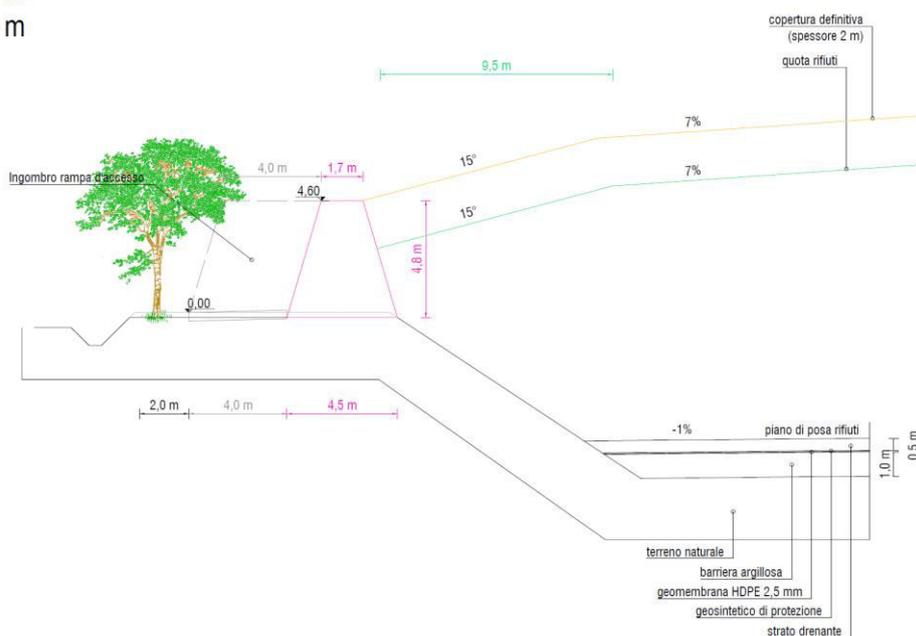


TRATTO T3

Lunghezza totale: 250 m

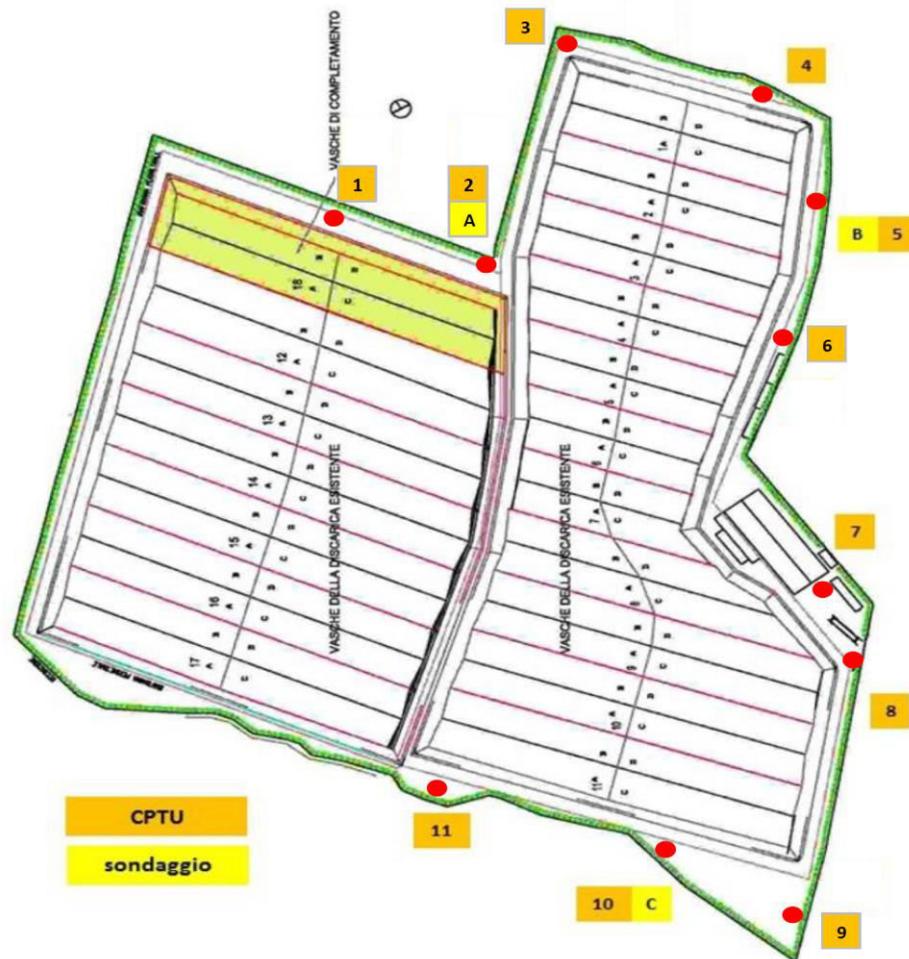
$H_{muro} = 4,8 \text{ m}$

$B_{muro} = 4,5 \text{ m}$



4.4.1.1 Parametri dei terreni di fondazione

Con riferimento alla figura qui sotto riportata



sono state eseguite le seguenti indagini in sito:

- n. 11 prove penetrometriche statiche con piezocono (CPTU), spinte fino alla profondità da p.c. di -30 m; le prove sono state contrassegnate con le sigle CPTU seguite dai numeri compresi tra 1 e 11 (CPTU1, CPTU2, ..., CPTU11);
- n. 3 sondaggi meccanici a rotazione spinti fino alla profondità da p.c. di 30 m con prelievo di campioni ed esecuzione di prove SPT; i sondaggi contrassegnati con le lettere A, B e C sono stati eseguiti in prossimità delle prove CPTU1, CPTU5 e CPTU10 rispettivamente;

- nel corso del sondaggio A sono stati prelevati n.2 campioni indisturbati e n.3 campioni rimaneggiati; sono state pure eseguite n.2 prove SPT;
- nel corso del sondaggio B sono stati prelevati n.2 campioni indisturbati e n.3 campioni rimaneggiati; sono state pure eseguite n.2 prove SPT;
- nel corso del sondaggio C sono stati prelevati n.1 campioni indisturbati e n.4 campioni rimaneggiati; sono state pure eseguite n.2 prove SPT

seguite da una serie di prove geotecniche di laboratorio costituite da:

- contenuto d'acqua;
- limiti di Atterberg;
- massa volumica;
- granulometria;
- peso specifico dei solidi;
- prova edometrica;
- prova di taglio diretto;
- prova triassiale con consolidazione e con drenaggio (CID);
- prova triassiale con consolidazione, senza drenaggio e con la misura della pressione dei pori (CIU).

4.4.1.2 Parametri del terreno del Muro

Su tre cumuli di materiali di scavo di buona qualità geotecnica derivanti dalla formazione delle vasche della discarica, sono state eseguite altre prove geotecniche per la definizione delle loro proprietà granulometriche e di resistenza al taglio (taglio diretto).

Dalla miscelazione delle aliquote provenienti dai suddetti tre cumuli si è ipotizzato di ottenere il terreno per la realizzazione del *Muro*.

4.4.1.3 Parametri geodinamici

Dall'indagine sismica condotta con la tecnica MASW è emerso che il terreno del suolo e sottosuolo del sito è di tipo C ($S = 1.5$ secondo le NTC).

4.4.1.4 Parametri geotecnici assunti nei modelli di calcolo

Sulla scorta degli esiti delle varie campagne geognostiche e sulle evidenze disponibili relativamente alle caratteristiche geotecniche dei rifiuti in discarica, i parametri geotecnici assunti nei modelli di calcolo sono riportati nella successiva tabella, con riferimento alla seguente simbologia:

γ	Peso di volume del terreno [kN/m^3]
γ_{sat}	Peso di volume saturo del terreno [kN/m^3]
ϕ	Angolo di attrito interno del terreno [$^\circ$]
δ	Angolo di attrito Muro-terreno [$^\circ$]
c	Coesione del terreno [kPa]

Descrizione	γ [kN/m^3]	γ_{sat} [kN/m^3]	ϕ [$^\circ$]	δ [$^\circ$]	c [kPa]
Muro in terra rinforzata	18,00	18,00	30	-	5
Copertura multistrato discarica (media)	20,00	20,00	26	17	5
Cumulo di RSU	9,00	9,00	17	11	10
Terreno di fondazione	17,50	17,50	27	27	10

4.4.2 Normativa di riferimento

L'analisi di stabilità dell'opera in oggetto è stata condotta seguendo indicazioni e prescrizioni delle seguenti norme, che costituiscono, nel loro insieme, il corpus della Normativa di riferimento:

- Legge nr. 1086 del 05/11/1971: *Norme per la disciplina delle opere in conglomerato cementizio, normale e precompresso ed a struttura metallica.*
- Legge nr. 64 del 02/02/1974: *Provvedimenti per le costruzioni con particolari prescrizioni per le zone sismiche.*
- D.M. LL.PP. del 11/03/1988: *Norme tecniche riguardanti le indagini sui terreni e sulle rocce, la stabilità dei pendii naturali e delle scarpate, i criteri generali e le prescrizioni per la progettazione, l'esecuzione e il collaudo delle opere di sostegno delle terre e delle opere di fondazione.*
- D.M. LL.PP. del 14/02/1992: *Norme tecniche per l'esecuzione delle opere in cemento armato normale e precompresso e per le strutture metalliche.*
- -D.M. 9 gennaio 1996: *Norme Tecniche per il calcolo, l'esecuzione ed il collaudo delle strutture in cemento armato normale e precompresso e per le strutture metalliche.*

- D.M. 16 gennaio 1996: *Norme Tecniche relative ai "Criteri generali per la verifica di sicurezza delle costruzioni e dei carichi e sovraccarichi"*.
- D.M. 16 gennaio 1996: Norme Tecniche per le costruzioni in zone sismiche
- Circolare Ministero LL.PP. 15 ottobre 1996 N. 252 AA.GG. /S.T.C.: *Istruzioni per l'applicazione delle Norme Tecniche di cui al D.M. 9 gennaio 1996.*
- Circolare Ministero LL.PP. 10 aprile 1997 N. 65/AA.GG: Istruzioni per l'applicazione delle Norme Tecniche per le costruzioni in zone sismiche di cui al D.M. 16 gennaio 1996.
- Norme Tecniche per le Costruzioni (NTC) 2018 (D.M. 17 gennaio 2018).

4.4.3 Modelli geotecnici impiegati

Le analisi di stabilità del *Muro* sono state effettuate mediante due diversi approcci di calcolo.

Il primo utilizza il metodo LEM (Limit Equilibrium Method – Metodo dell'Equilibrio Limite)], segnatamente il modello speditivo "GRETA", mediante il quale viene verificato, come verrà illustrato oltre più in dettaglio, l'intero *Muro* assoggettato, esternamente, ad una spinta di tipo attivo, ottenuta facendo riferimento alle teorie di Coulomb/Culmann, ed internamente fra ogni giacitura di geogriglia, alle spinte locali del terreno, cui si oppone la geogriglia stessa di rinforzo.

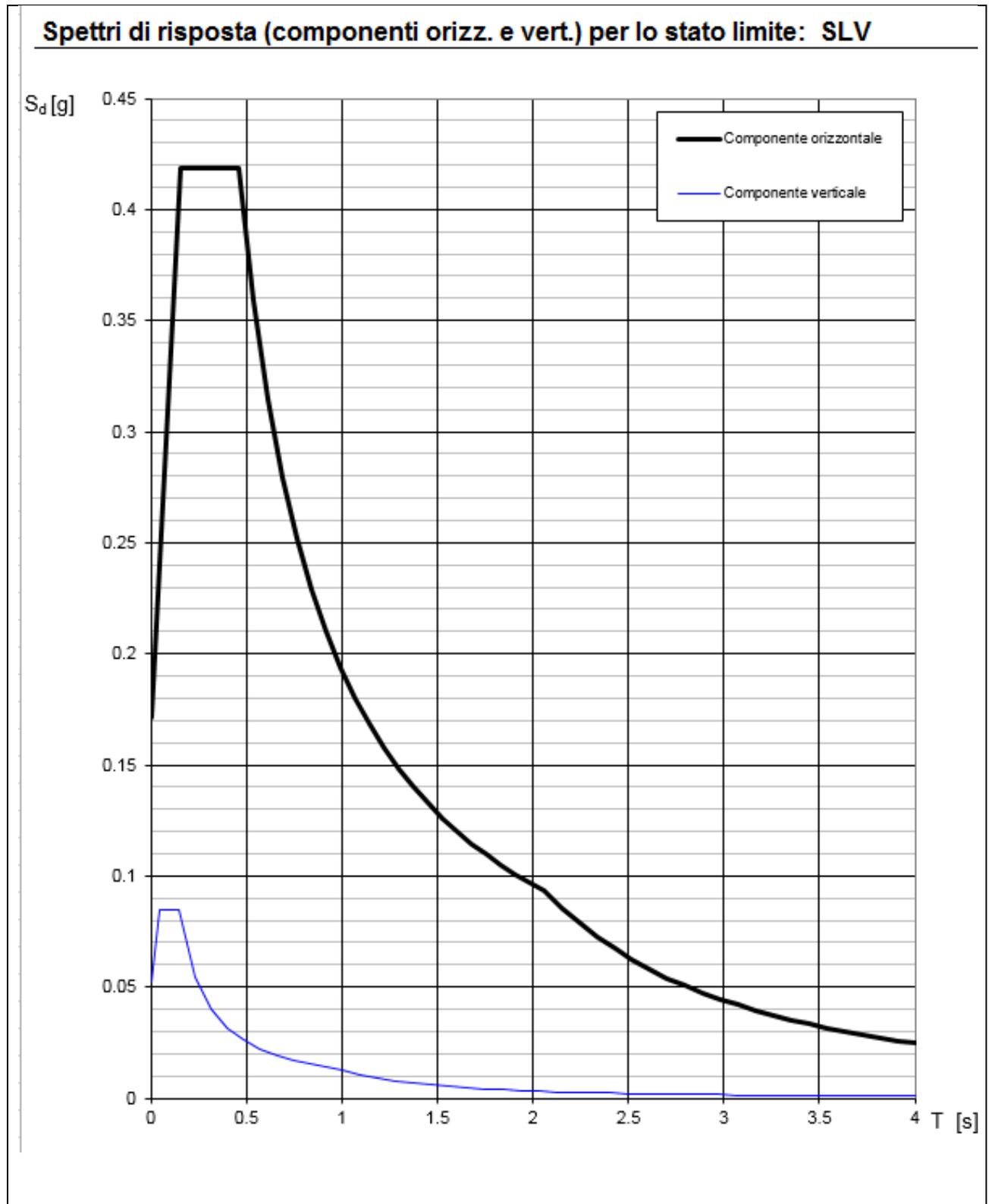
Il secondo approccio analizza il comportamento dell'opera mediante analisi numeriche agli elementi finiti (FEM). Il terreno di fondazione, i rifiuti/terreni sostenuti, il *Muro* e le strutture di rinforzo sono simulati mediante elementi dotati di opportune leggi costitutive. I valori delle spinte interne ed esterne agente sul muro e sollecitanti le strutture di rinforzo (geogriglie) derivano dalle analisi di deformazione dell'intero complesso, tenendo in considerazione la successione delle fasi costruttive. Come illustrato oltre, l'analisi FEM, che costituisce sostanzialmente un'analisi in condizioni di esercizio, può fornire anche indicazioni del Fattore di sicurezza dell'opera in condizioni di Stato Limite Ultimo.

In entrambi gli approcci, oltre alle verifiche del manufatto in condizioni statiche sono state svolte le verifiche in condizioni sismiche. A tal riguardo, le mappe di pericolosità sismica della normativa italiana (D.M. 14/01/2008) consentono l'identificazione, per il sito in esame, delle accelerazioni sismiche corrispondenti a prefissate probabilità di superamento nell'arco temporale di riferimento (tipicamente 50 anni ed indicato nelle normative vigenti come V_R).

Il *Muro* in esame (secondo quanto specificato dal D.M. 19/01/2018 - paragrafo 2.4) può essere classificato come costruzione di **Tipo 2** (opere ordinarie) e di **Classe d'Uso III**. Per le opere di nuova costruzione di **Tipo 2** e **Classe III** si definiscono una vita nominale $V_N = 50$ anni ed un coefficiente d'uso $C_U = 1,5$. A questi valori corrisponde un periodo di riferimento per l'azione sismica (D.M. 19/01/2018 - sottoparagrafo 2.4.3) pari a: $V_R = V_N \cdot C_U = 75$ anni.

È stato, inoltre, verificato sismicamente anche il solo *Muro* senza la presenza del riempimento a tergo, per un $V_R = 35$, valore minimo previsto nella normativa del 2008.

In base ai parametri sul terreno indicati, sono stati determinati gli spettri di progetto elastici orizzontale e verticale per entrambi i V_R scelti, illustrati nelle seguenti figure.



Parametri indipendenti

STATO LIMITE	SLV
a_g	0.114 g
F_o	2.441
T_C^*	0.291 s
S_S	1.500
C_C	1.578
S_T	1.000
q	1.000

Parametri dipendenti

S	1.500
η	1.000
T_B	0.153 s
T_C	0.459 s
T_D	2.058 s

Espressioni dei parametri dipendenti

$$S = S_S \cdot S_T \quad (\text{NTC-08 Eq. 3.2.5})$$

$$\eta = \sqrt{10/(5+\xi)} \geq 0,55; \eta = 1/q \quad (\text{NTC-08 Eq. 3.2.6; §. 3.2.3.5})$$

$$T_B = T_C / 3 \quad (\text{NTC-07 Eq. 3.2.8})$$

$$T_C = C_C \cdot T_C^* \quad (\text{NTC-07 Eq. 3.2.7})$$

$$T_D = 4,0 \cdot a_g / g + 1,6 \quad (\text{NTC-07 Eq. 3.2.9})$$

Espressioni dello spettro di risposta (NTC-08 Eq. 3.2.4)

$$0 \leq T < T_B \quad S_e(T) = a_g \cdot S \cdot \eta \cdot F_o \cdot \left[\frac{T}{T_B} + \frac{1}{\eta \cdot F_o} \left(1 - \frac{T}{T_B} \right) \right]$$

$$T_B \leq T < T_C \quad S_e(T) = a_g \cdot S \cdot \eta \cdot F_o$$

$$T_C \leq T < T_D \quad S_e(T) = a_g \cdot S \cdot \eta \cdot F_o \cdot \left(\frac{T_C}{T} \right)$$

$$T_D \leq T \quad S_e(T) = a_g \cdot S \cdot \eta \cdot F_o \cdot \left(\frac{T_C T_D}{T^2} \right)$$

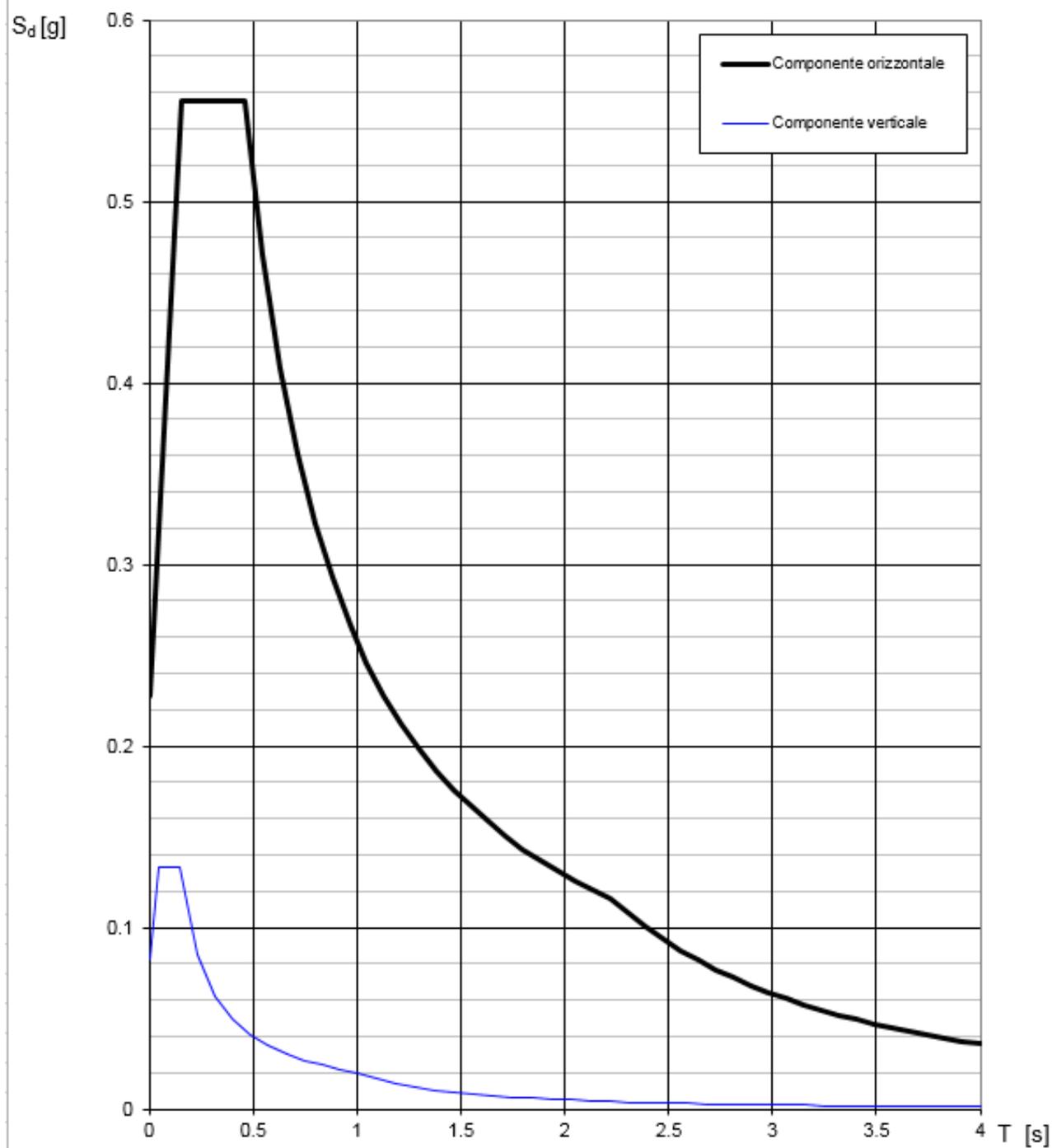
Lo spettro di progetto $S_d(T)$ per le verifiche agli Stati Limite Ultimi è ottenuto dalle espressioni dello spettro elastico $S_e(T)$ sostituendo η con $1/q$, dove q è il fattore di struttura. (NTC-08 § 3.2.3.5)

Punti dello spettro di risposta

	T [s]	Se [g]
	0.000	0.172
$T_B \leftarrow$	0.153	0.419
$T_C \leftarrow$	0.459	0.419
	0.535	0.359
	0.611	0.315
	0.687	0.280
	0.763	0.252
	0.840	0.229
	0.916	0.210
	0.992	0.194
	1.068	0.180
	1.144	0.168
	1.220	0.158
	1.296	0.148
	1.372	0.140
	1.449	0.133
	1.525	0.126
	1.601	0.120
	1.677	0.115
	1.753	0.110
	1.829	0.105
	1.905	0.101
	1.981	0.097
$T_D \leftarrow$	2.058	0.093
	2.150	0.086
	2.243	0.079
	2.335	0.073
	2.428	0.067
	2.520	0.062
	2.613	0.058
	2.705	0.054
	2.798	0.051
	2.890	0.047
	2.983	0.044
	3.075	0.042
	3.168	0.039
	3.260	0.037
	3.353	0.035
	3.445	0.033
	3.538	0.032
	3.630	0.030
	3.723	0.029
	3.815	0.027
	3.908	0.026
	4.000	0.025

Accelerazioni per $V_R = 35$ anni

Spettri di risposta (componenti orizz. e vert.) per lo stato limite: SLV



Progetto di ottimizzazione del fronte perimetrale e completamento del sedime della
 Discarica di Grumolo delle Abbadesse con incremento dei volumi di conferimento

Parametri indipendenti		Punti dello spettro di risposta	
STATO LIMITE	SLV	T [s]	Se [g]
a_g	0.154 g	0.000	0.227
F_o	2.444	$T_B \leftarrow$ 0.155	0.555
T_C^*	0.296 s	$T_C \leftarrow$ 0.464	0.555
S_S	1.474	0.547	0.471
C_C	1.570	0.631	0.408
S_T	1.000	0.714	0.361
q	1.000	0.798	0.323
		0.881	0.292
		0.965	0.267
		1.048	0.246
		1.132	0.228
		1.215	0.212
		1.299	0.198
		1.382	0.186
		1.466	0.176
		1.549	0.166
		1.633	0.158
		1.716	0.150
		1.800	0.143
		1.883	0.137
		1.967	0.131
		2.050	0.126
		2.133	0.121
		$T_D \leftarrow$ 2.217	0.116
		2.302	0.108
		2.387	0.100
		2.472	0.094
		2.557	0.087
		2.641	0.082
		2.726	0.077
		2.811	0.072
		2.896	0.068
		2.981	0.064
		3.066	0.061
		3.151	0.058
		3.236	0.055
		3.321	0.052
		3.406	0.049
		3.491	0.047
		3.575	0.045
		3.660	0.043
		3.745	0.041
		3.830	0.039
		3.915	0.037
		4.000	0.036

Parametri dipendenti	
Parametro	Valore
S	1.474
η	1.000
T_B	0.155 s
T_C	0.464 s
T_D	2.217 s

Espressioni dei parametri dipendenti

$S = S_S \cdot S_T$ (NTC-08 Eq. 3.2.5)

$\eta = \sqrt{10/(5+\xi)} \geq 0,55; \eta = 1/q$ (NTC-08 Eq. 3.2.6; §. 3.2.3.5)

$T_B = T_C / 3$ (NTC-07 Eq. 3.2.8)

$T_C = C_C \cdot T_C^*$ (NTC-07 Eq. 3.2.7)

$T_D = 4,0 \cdot a_g / g + 1,6$ (NTC-07 Eq. 3.2.9)

Espressioni dello spettro di risposta (NTC-08 Eq. 3.2.4)

$0 \leq T < T_B$ $S_e(T) = a_g \cdot S \cdot \eta \cdot F_o \cdot \left[\frac{T}{T_B} + \frac{1}{\eta \cdot F_o} \left(1 - \frac{T}{T_B} \right) \right]$

$T_B \leq T < T_C$ $S_e(T) = a_g \cdot S \cdot \eta \cdot F_o$

$T_C \leq T < T_D$ $S_e(T) = a_g \cdot S \cdot \eta \cdot F_o \cdot \left(\frac{T_C}{T} \right)$

$T_D \leq T$ $S_e(T) = a_g \cdot S \cdot \eta \cdot F_o \cdot \left(\frac{T_C T_D}{T^2} \right)$

Lo spettro di progetto $S_o(T)$ per le verifiche agli Stati Limite Ultimi è ottenuto dalle espressioni dello spettro elastico $S_e(T)$ sostituendo η con $1/q$, dove q è il fattore di struttura. (NTC-08 § 3.2.3.5)

Accelerazioni per VR = 75 anni

Le analisi per la verifica dell'opera in condizioni sismiche sono state condotte con il metodo pseudo-statico, in base al quale l'azione sismica è rappresentata da una forza statica equivalente, pari al prodotto delle forze di gravità per opportuni coefficienti sismici (k_h = coefficiente sismico orizzontale; k_v = coefficiente sismico verticale).

L'analisi pseudo-statica si esegue, generalmente, mediante il metodo di calcolo dell'equilibrio limite, ma può essere condotta anche con analisi di tipo FEM. Il modello di calcolo deve comprendere l'opera di sostegno, il volume di terreno a tergo dell'opera, che si suppone in stato di equilibrio limite attivo nelle analisi LEM, e gli eventuali sovraccarichi agenti sul volume suddetto.

Se la struttura può spostarsi, i valori dei coefficienti sismici orizzontale k_h e verticale k_v , sono valutati mediante i valori dell'accelerazione massima agente nel sito ($a_{max} = a_g \cdot S$) ridotta da un opportuno coefficiente ($\beta_m = 0,38$ nelle analisi SLV).

Dai dati su esposti si ricavano i valori dei coefficienti sismici orizzontale k_h e verticale k_v :

$$V_R = 35 \text{ anni}$$

$$a_{max} = 0,172 \text{ g}$$

$$\beta_m = 0,38 \text{ nelle verifiche dello stato limite ultimo (SLV)}$$

$$K_h = 0,172 \cdot 0,38 = 0,0654$$

$$K_v = \pm 0,5 \cdot 0,0654 = 0,0327$$

$$V_R = 75 \text{ anni}$$

$$a_{max} = 0,227 \text{ g}$$

$$\beta_m = 0,38 \text{ nelle verifiche dello stato limite ultimo (SLV)}$$

$$K_h = 0,227 \cdot 0,38 = 0,0863$$

$$K_v = \pm 0,5 \cdot 0,0863 = 0,0431$$

A commento delle due tipologie di modello proposte, è opportuno riferire che:

- ⇒ il metodo "speditivo", basato su ben note teorie consolidate, ha il pregio di fornire utili risposte in termini "generali", facilmente controllabili anche con calcoli manuali, che risultano molto affidabili in particolare nelle "verifiche esterne". Meno definite, giocoforza, sono le verifiche "locali", segnatamente sul comportamento dei rinforzi a fonte di geometrie particolari (risvolti, agganci, ecc.);
- ⇒ l'analisi a FEM, a fronte della complessità d'uso dei modelli e della difficoltà di controllarne sviluppo ed esiti, fornisce risposte complete e accurate anche a fronte di singolarità nella configurazione "locale" dei rinforzi, grazie anche all'analisi delle deformazioni.

Proprio per le suddette motivazioni, l'abbinamento dei due approcci consente di giungere al risultato più affidabile e completo nell'analisi in oggetto.

4.4.4 Sezioni di calcolo

Nel par. 4.3 sono state illustrate le tre sezioni di progetto, rappresentative delle diverse situazioni del Muro, da cui di evince che le situazioni "tipiche" sono rappresentate dalle seguenti configurazioni (sempre con riferimento alla simbologia del trapezio del par. 4.3):

H [m]	B (max) [m]	b (min) [m]
5,00	5,00	1,70
4,80	4,50	1,70

In sede di calcolo, nondimeno, è stato ritenuto opportuno sottoporre ad analisi una serie di sezioni più estesa, con lo scopo di “seguire” l’andamento dello stato tensionale in funzione di più combinazioni di altezza e base maggiore.

La sequenza di combinazioni analizzate è riportata nella seguente tabella:

H [m]	B [m]	b [m]
4,10	4,40	1,70
4,60	4,70	1,70
5,10	5,00	1,70
4,80	4,50	1,70

Le ultime due combinazioni, segnate in grassetto, sono rappresentative delle sezioni “tipiche” di progetto.

4.5 Analisi con Modello speditivo GRETA²⁰

4.5.1 Richiami teorici alla base del Modello

4.5.1.1 Calcolo della spinta sulla parete

Valori caratteristici e valori di calcolo

Effettuando il calcolo tramite le NTC 2018 è necessario effettuare la distinzione fra i *parametri caratteristici* ed i *valori di calcolo* (o di progetto) sia delle *azioni* che delle *resistenze*.

I valori di calcolo si ottengono dai valori caratteristici mediante l'applicazione di opportuni coefficienti di sicurezza parziali γ .

In particolare, si distinguono combinazioni di carico di tipo **A1-M1** nelle quali vengono incrementati i carichi permanenti e lasciati inalterati i parametri di resistenza del terreno e combinazioni di carico di tipo **A2-M2** nelle quali vengono ridotti i parametri di resistenza del terreno e lasciati inalterati i carichi.

²⁰ Il software *GRETA - Terre Armate* - Versione 16.0 è prodotto da Aztec Informatica srl, Casali del Manco - Loc. Casole Bruzio (CS). La Licenza d'utilizzo è: AIU5984A3.

Operando in tal modo si ottengono valori delle spinte (azioni) maggiorate e valori di resistenza ridotti e pertanto nelle verifiche globali è possibile fare riferimento a coefficienti di sicurezza unitari.

Metodo di Culmann

Il metodo di Culmann adotta le stesse ipotesi di base del metodo di Coulomb.

La differenza sostanziale è che mentre Coulomb considera un terrapieno con superficie a pendenza costante e carico uniformemente distribuito (il che permette di ottenere una espressione in forma chiusa per il coefficiente di spinta) il metodo di Culmann consente di analizzare situazioni con profilo di forma generica e carichi sia concentrati che distribuiti comunque disposti. Inoltre, rispetto al metodo di Coulomb, risulta più immediato e lineare tener conto della coesione dell'ammasso spingente.

Il metodo di Culmann, nato come essenzialmente grafico, si è evoluto per essere trattato mediante analisi numerica (noto in questa forma come *metodo del cuneo di tentativo*). Analogamente al metodo di Coulomb, anche questo considera una superficie di rottura rettilinea.

I passi del procedimento risolutivo sono i seguenti:

- si impone una superficie di rottura (angolo di inclinazione r rispetto all'orizzontale) e si considera il cuneo di spinta delimitato dalla superficie di rottura stessa, dalla parete su cui si calcola la spinta e dal profilo del terreno;
- si valutano tutte le forze agenti sul cuneo di spinta e cioè peso proprio (W), carichi sul terrapieno, resistenza per attrito e per coesione lungo la superficie di rottura (R e C) e resistenza per coesione lungo la parete (A);
- dalle equazioni di equilibrio si ricava il valore della spinta S sulla parete.

Il processo viene iterato fino ad individuare l'angolo di rottura per cui la spinta risulta massima.

La convergenza, ovviamente, non si raggiunge se il terrapieno risulta inclinato di un angolo maggiore dell'angolo d'attrito del terreno.

Nei casi in cui è applicabile il metodo di Coulomb (profilo a monte rettilineo e carico uniformemente distribuito) i risultati ottenuti col metodo di Culmann coincidono con quelli del metodo di Coulomb.

Le pressioni sulla parete di spinta si ricavano derivando l'espressione della spinta S rispetto all'ordinata z . Noto il diagramma delle pressioni è possibile ricavare il punto di applicazione della spinta.

Spinta in presenza di sisma

Per tener conto dell'incremento di spinta dovuta al sisma si impiega il metodo di Mononobe-Okabe (cui fa riferimento la Normativa Italiana).

La Normativa Italiana suggerisce di tener conto di un incremento di spinta dovuto al sisma nel modo seguente.

Detta ε l'inclinazione del terrapieno rispetto all'orizzontale e β l'inclinazione della parete rispetto alla verticale, si calcola la spinta S' considerando un'inclinazione del terrapieno e della parete pari a

$$\varepsilon' = \varepsilon + \theta$$

$$\beta' = \beta + \theta$$

dove $\theta = \arctg(k_h/(1 \pm k_v))$ essendo k_h il coefficiente sismico orizzontale e k_v il coefficiente sismico verticale, definito in funzione di k_h .

In presenza di falda a monte, θ assume le seguenti espressioni:

Terreno a bassa permeabilità:

$$\theta = \arctg[(\gamma_{sat}/(\gamma_{sat} - \gamma_w)) * (k_h/(1 \pm k_v))]$$

Terreno a permeabilità elevata:

$$\theta = \arctg[(\gamma/(\gamma_{sat} - \gamma_w)) * (k_h/(1 \pm k_v))]$$

Detta S la spinta calcolata in condizioni statiche l'incremento di spinta da applicare è espresso da

$$\Delta S = AS' - S$$

dove il coefficiente A vale

$$A = \frac{\cos^2(\beta + \theta)}{\cos^2\beta \cos\theta}$$

In presenza di falda a monte, nel coefficiente A si tiene conto dell'influenza dei pesi di volume nel calcolo di θ .

Adottando il metodo di Mononobe-Okabe per il calcolo della spinta, il coefficiente A viene posto pari a 1.

Tale incremento di spinta è applicato a metà altezza della parete di spinta nel caso di forma rettangolare del diagramma di incremento sismico, allo stesso punto di applicazione della spinta statica nel caso in cui la forma del diagramma di incremento sismico è uguale a quella del diagramma statico.

Oltre a questo incremento bisogna tener conto delle forze d'inerzia orizzontali e verticali che si generano per effetto del sisma. Tali forze vengono valutate come

$$F_{iH} = k_h W \quad F_{iV} = \pm k_v W$$

dove W è il peso del muro, del terreno soprastante la mensola di monte ed i relativi sovraccarichi e va applicata nel baricentro dei pesi.

Il metodo di Culmann tiene conto automaticamente dell'incremento di spinta. Basta inserire nell'equazione risolutiva la forza d'inerzia del cuneo di spinta. La superficie di rottura nel caso di sisma risulta meno inclinata della corrispondente superficie in assenza di sisma.

4.5.1.2 Verifiche

Verifica a ribaltamento

La verifica a ribaltamento consiste nel determinare il momento risultante di tutte le forze che tendono a fare ribaltare il muro (momento ribaltante M_r) ed il momento risultante di tutte le forze che tendono a stabilizzare il muro (momento stabilizzante M_s) rispetto allo spigolo a valle della fondazione e verificare che il rapporto M_s/M_r sia maggiore di un determinato fattore di sicurezza η_r .

Deve quindi essere verificata la seguente disequaglianza

$$M_s / M_r \geq \eta_r$$

Il momento ribaltante M_r è dato dalla componente orizzontale della spinta S , dalle forze di inerzia del muro e del terreno gravante sulla fondazione di monte (caso di presenza di sisma) per i rispettivi bracci.

Nel momento stabilizzante interviene il peso del muro (applicato nel baricentro) ed il peso del terreno gravante sulla fondazione di monte.

Per quanto riguarda invece la componente verticale della spinta essa sarà stabilizzante se l'angolo d'attrito terra-muro δ è positivo, ribaltante se δ è negativo. δ è positivo quando è il terrapieno che scorre rispetto al muro, negativo quando è il muro che tende a scorrere rispetto al terrapieno (questo può essere il caso di una spalla da ponte gravata da carichi notevoli). Se sono presenti dei tiranti essi contribuiscono al momento stabilizzante.

Questa verifica ha significato solo per fondazione superficiale e non per fondazione su pali.

Verifica a scorrimento

Per la verifica a scorrimento del muro lungo il piano di fondazione deve risultare che la somma di tutte le forze parallele al piano di posa che tendono a fare scorrere il muro deve essere minore di tutte le forze, parallele al piano di scorrimento, che si oppongono allo scivolamento, secondo un certo fattore di sicurezza. La verifica a scorrimento risulta soddisfatta se il rapporto fra la risultante delle forze resistenti allo scivolamento F_r e la risultante delle forze che tendono a far scorrere il muro F_s risulta maggiore di un determinato fattore di sicurezza η_s .

$$F_r / F_s \geq \eta_s$$

Le forze che intervengono nella F_s sono: la componente della spinta parallela al piano di fondazione e la componente delle forze d'inerzia parallela al piano di fondazione.

La forza resistente è data dalla resistenza d'attrito e dalla resistenza per adesione lungo la base della fondazione. Detta N la componente normale al piano di fondazione del carico totale gravante in fondazione e indicando con δ_f l'angolo d'attrito terreno-fondazione, con c_a l'adesione terreno-fondazione e con B_f la larghezza della fondazione reagente, la forza resistente può esprimersi come

$$F_r = N \operatorname{tg} \delta_f + c_a B_f$$

La Normativa consente di computare, nelle forze resistenti, un'aliquota dell'eventuale spinta dovuta al terreno posto a valle del muro. In tal caso, però, il fattore di sicurezza deve essere aumentato opportunamente. L'aliquota di spinta passiva che si può considerare ai fini della verifica a scorrimento non può comunque superare il 50%.

Per quanto riguarda l'angolo d'attrito terra-fondazione, δ_f , diversi autori suggeriscono di assumere un valore pari all'angolo d'attrito del terreno di fondazione.

Verifica al carico limite

Il rapporto fra il carico limite in fondazione e la componente normale della risultante dei carichi trasmessi dal muro sul terreno di fondazione deve essere superiore a η_q . Cioè, detto Q_u , il carico limite ed R la risultante verticale dei carichi in fondazione, deve essere:

$$Q_u / R \geq \eta_q$$

La formula di Vesic è analoga alla formula di Hansen. Cambia solo il fattore N_g e l'espressione di alcuni coefficienti.

Di seguito sono riportate per intero tutte le espressioni:

Caso generale

$$q_u = c N_c s_c d_c i_c g_c b_c + q N_q s_q d_q i_q g_q b_q + 0.5 B g N_\gamma s_\gamma d_\gamma i_\gamma g_\gamma b_\gamma$$

Caso di terreno puramente coesivo $\phi = 0$

$$q_u = 5.14 c (1 + s_c + d_c - i_c - g_c - b_c) + q$$

I fattori che compaiono in queste formule sono espressi da:

$$N_q = e^{\pi \operatorname{tg} \phi} K_p$$

$$N_c = (N_q - 1) c \operatorname{tg} \phi$$

$$N_\gamma = 2(N_q + 1) \operatorname{tg} \phi$$

Fattori di forma

$$s_c = 0.2 B/L \quad \text{per } f=0$$

$$s_c = 1 + (N_q/N_c) (B/L) \quad \text{per } f>0$$

$$s_q = 1 + (B/L) \operatorname{tg} \phi$$

$$s_\gamma = 1 - 0.4 B/L$$

Fattori di profondità

Si definisce il parametro k come:

$$k = D/B \quad \text{se } D/B \leq 1$$

$$k = \operatorname{arctg} (D/B) \quad \text{se } D/B > 1$$

I vari coefficienti si esprimono come:

$$d_c = 0.4k \quad \text{per } \phi = 0$$

$$d_c = 1 + 0.4k \quad \text{per } \phi > 0$$

$$d_q = 1 + 2 \operatorname{tg} \phi (1 - \sin \phi)^2 k$$

$$d_\gamma = 1$$

Fattori di inclinazione del carico

Definito il parametro:

$$m = (2 + B/L) / (1 + B/L)$$

$$i_c = 1 - (m H) / (A_f c_a N_c) \quad \text{per } \phi = 0$$

$$i_c = i_q - (1 - i_q) / (N_q - 1) \quad \text{per } \phi > 0$$

$$i_q = [1 - H / (V + A_f c_a \operatorname{tg} \phi)]^m$$

$$i_\gamma = [1 - H / (V + A_f c_a \operatorname{tg} \phi)]^{m+1}$$

Fattori di inclinazione del piano di posa della fondazione

$$b_c = \eta^\circ/147^\circ \quad \text{per } \phi = 0$$

$$b_c = 1 - \eta^\circ/147^\circ \quad \text{per } \phi > 0$$

$$b_q = b_g = (1 - \eta \operatorname{tg} \phi)^2$$

Fattori di inclinazione del terreno

Indicando con β la pendenza del pendio i fattori g si ottengono dalle espressioni seguenti:

$$g_c = \beta^\circ/147^\circ \quad \text{per } \phi = 0$$

$$g_c = 1 - \beta^\circ/147^\circ \quad \text{per } \phi > 0$$

$$g_q = g_\gamma = (1 - \operatorname{tg} \beta)^2$$

Verifica alla stabilità globale

La verifica alla stabilità globale del complesso muro + terreno deve fornire un fattore di sicurezza non inferiore a η_g .

Viene utilizzata la tecnica della suddivisione a strisce della superficie di scorrimento da analizzare.

La superficie di scorrimento viene supposta circolare e determinata in modo tale da non avere intersezione con il profilo del muro o con i pali di fondazione.

Si determina il minimo fattore di sicurezza su una maglia di centri di dimensioni 10x10 posta in prossimità della sommità del muro. Il numero di strisce è pari a 50.

Per la verifica di stabilità globale si adotta il metodo di Bishop.

Il fattore di sicurezza nel metodo di Bishop si esprime secondo la seguente formula:

$$\eta = \frac{\sum_i \left(\frac{c_i b_i + (W_i - u_i b_i) \operatorname{tg} \phi_i}{m} \right)}{\sum_i W_i \sin \alpha_i}$$

dove il termine m è espresso da

$$m = \left(1 + \frac{tg\phi tg\alpha_i}{\eta}\right) \cos\alpha_i$$

In questa espressione n è il numero delle strisce considerate, b_i e α_i sono la larghezza e l'inclinazione della base della striscia i_{esima} rispetto all'orizzontale, W_i è il peso della striscia i_{esima} , c_i e ϕ sono le caratteristiche del terreno (coesione ed angolo di attrito) lungo la base della striscia ed u_i è la pressione neutra lungo la base della striscia.

L'espressione del fattore di sicurezza di Bishop contiene al secondo membro il termine m che è funzione di η . Quindi essa viene risolta per successive approssimazioni assumendo un valore iniziale per η da inserire nell'espressione di m ed iterare fin quando il valore calcolato coincide con il valore assunto.

Verifiche interne

Le verifiche interne riguardano la determinazione del non superamento delle resistenze date dai rinforzi per i meccanismi di:

- scorrimento diretto;
- sfilamento;
- resistenza a trazione.

Con S sarà indicata la spinta agente alla quota del rinforzo considerato.

La verifica a scorrimento diretto consiste nell'assicurare una lunghezza del rinforzo tale da scongiurare lo scivolamento del blocco di terra armata al di sopra del rinforzo stesso.

La resistenza allo scorrimento lungo un elemento di rinforzo è data dalla seguente espressione:

$$\tau_{scor} = \sigma'_v f_{ds} \tan \phi'$$

con f_{ds} coefficiente di resistenza allo scorrimento.

In termini di forza si ha:

$$T_{scor} = L_{scor} \times B \times \tau_{scor}$$

L_{scor} : Lunghezza del rinforzo;

B : Larghezza del rinforzo (pari ad 1 metro).

La verifica è soddisfatta se:

$$T_{scor}/S \geq FS_{scor}$$

La verifica a sfilamento consiste nell'assicurare una lunghezza del rinforzo tale da scongiurarne lo sfilamento dalla terra armata. La resistenza allo sfilamento lungo un elemento di rinforzo è data dalla seguente espressione:

$$\tau_{sfil} = \sigma'_v \times f_{po} \times \tan \phi'$$

con f_{po} coefficiente di resistenza allo sfilamento.

In termini di forza si ha:

$$T_{sfil} = L_{sfil} \times B \times 2 \tau_{sfil}$$

L_{sfil} : Lunghezza del rinforzo;

B : Larghezza del rinforzo (pari ad 1 metro).

La verifica è soddisfatta se:

$$T_{sfil}/S \geq FS_{sfil}$$

La verifica a trazione consiste nell'assicurare che la tensione nel rinforzo non superi quella ammissibile. La verifica è soddisfatta se:

$$P/T \geq FS_{traz}$$

con P resistenza ammissibile impiegata per il dimensionamento:

$$P = LTDS / (FS_{giunzione} \times FS_{chimico} \times FS_{biologico} \times FS_{danni\ ambientali})$$

$LTDS$: resistenza di progetto a lungo termine;

T : sforzo agente nel rinforzo.

La *verifica del risvolto* consiste nel prevenire spanciamenti della facciata.

La resistenza allo scorrimento del risvolto è data dalla seguente espressione:

$$\tau_{scor,risv} = \sigma'_v f_{ds} \tan \phi'$$

con f_{ds} coefficiente di resistenza allo scorrimento.

In termini di forza si ha:

$$T_{scor,risv} = L_{risv} \times B \times \tau_{scor,risv}$$

L_{risv} : Lunghezza del rinforzo;

B : Larghezza del rinforzo (pari ad 1 metro).

La verifica è soddisfatta se:

$$T_{scor,risv}/S \geq FS_{scor}$$

Verifiche composte

Le verifiche composte riguardano la ricerca dei cinematismi di rottura che riguardano l'insieme terreno-rinforzi.

Il programma analizza famiglie di superfici circolari.

Il calcolo del fattore di sicurezza della superficie circolare è effettuato con il metodo delle strisce, tenendo conto del contributo di resistenza dei rinforzi contenuti.

4.5.2 Esiti dell'analisi H = 4,10 m

Sono di seguito riportati i listati degli esiti relativi all'analisi della sezione qui sotto indicata, a partire dai **Dati** di dettaglio inseriti nel modello, seguiti dai **Risultati**.

H	B	b
[m]	[m]	[m]
4,10	4,40	1,70

4.5.2.1 Dati

Normativa

Spinte e verifiche secondo: N.T.C. 2018

Simbologia adottata

- γ_{Gfav} Coefficiente parziale sfavorevole sulle azioni permanenti
- γ_{Gfav} Coefficiente parziale favorevole sulle azioni permanenti
- γ_{Gsfav} Coefficiente parziale sfavorevole sulle azioni variabili
- γ_{Gsfav} Coefficiente parziale favorevole sulle azioni variabili
- $\gamma_{tan\phi'}$ Coefficiente parziale di riduzione dell'angolo di attrito drenato
- $\gamma_{c'}$ Coefficiente parziale di riduzione della coesione drenata
- γ_{cu} Coefficiente parziale di riduzione della coesione non drenata
- γ_{qu} Coefficiente parziale di riduzione del carico ultimo
- γ_r Coefficiente parziale di riduzione della resistenza a compressione uniaassiale delle rocce

Coefficienti di partecipazione combinazioni statiche

Coefficienti parziali per le azioni o per l'effetto delle azioni:

<i>Carichi</i>	<i>Effetto</i>		<i>EQU</i>	<i>A1</i>	<i>A2</i>
Permanenti	Favorevole	γ_{Gfav}	1.00	1.00	1.00
Permanenti	Sfavorevole	γ_{Gsfav}	1.30	1.30	1.00
Permanenti NS	Favorevole	γ_{Gfav}	0.80	0.80	0.80
Permanenti NS	Sfavorevole	γ_{Gsfav}	1.50	1.50	1.30
Variabili	Favorevole	γ_{Qfav}	0.00	0.00	0.00
Variabili	Sfavorevole	γ_{Qsfav}	1.50	1.50	1.30
Variabili TF	Favorevole	γ_{Qfav}	0.00	0.00	0.00
Variabili TF	Sfavorevole	γ_{Qsfav}	1.35	1.35	1.15

Coefficienti parziali per i parametri geotecnici del terreno:

<i>Parametri</i>			<i>M1</i>	<i>M2</i>
Tangente dell'angolo di attrito	$\gamma_{tan\phi'}$		1.00	1.25
Coesione efficace	$\gamma_{c'}$		1.00	1.25
Resistenza non drenata	γ_{cu}		1.00	1.40
Resistenza a compressione uniaassiale	γ_{qu}		1.00	1.60
Peso dell'unità di volume	γ_r		1.00	1.00

Coefficienti di partecipazione combinazioni sismiche

Coefficienti parziali per le azioni o per l'effetto delle azioni:

<i>Carichi</i>	<i>Effetto</i>		<i>EQU</i>	<i>A1</i>	<i>A2</i>
Permanenti	Favorevole	γ_{Gfav}	1.00	1.00	1.00
Permanenti	Sfavorevole	γ_{Gsfav}	1.00	1.00	1.00
Variabili	Favorevole	γ_{Qfav}	0.00	0.00	0.00
Variabili	Sfavorevole	γ_{Qsfav}	1.00	1.00	1.00

Coefficienti parziali per i parametri geotecnici del terreno:

<i>Parametri</i>			<i>M1</i>	<i>M2</i>
Tangente dell'angolo di attrito	$\gamma_{tan\phi'}$		1.00	1.00
Coesione efficace	$\gamma_{c'}$		1.00	1.00
Resistenza non drenata	γ_{cu}		1.00	1.00
Resistenza a compressione uniaassiale	γ_{qu}		1.00	1.00
Peso dell'unità di volume	γ_r		1.00	1.00

Verifiche esterne - Coefficienti parziali γ_R per le verifiche agli stati limite ultimi STR e GEO

	R1	R2	R3
Capacità portante della fondazione	1.00	1.00	1.40
Scorrimento	1.00	1.00	1.10
Resistenza del terreno a valle	1.00	1.00	1.40
Stabilità globale		1.10	

Verifiche interne - Coefficienti di sicurezza richiesti

Coefficiente di sicurezza allo scorrimento dei rinforzi	1.50
Coefficiente di sicurezza allo sfilamento del rinforzo	3.00
Coefficiente di sicurezza alla trazione del rinforzo	1.30
Coefficiente di sicurezza allo scorrimento del risvolto	1.30

Progetto di ottimizzazione del fronte perimetrale e completamento del sedime della Discarica di Grumolo delle Abbadesse con incremento dei volumi di conferimento

Verifiche compound - Coefficienti di sicurezza richiesti

Coefficiente di sicurezza alla stabilità locale 1.30
 Coefficiente di sicurezza alla stabilità locale sismica 1.30

Descrizione terreni

Caratteristiche fisico meccaniche

Simbologia adottata

Descrizione Descrizione terreno
 γ Peso di volume del terreno espresso in [kN/mc]
 γ_{sat} Peso di volume saturo del terreno espresso in [kN/mc]
 ϕ Angolo di attrito interno del terreno espresso in [°]
 δ Angolo di attrito Muro-terreno espresso in [°]
 c Coesione del terreno espressa in [kPa]
 ca Adesione del terreno espressa in [kPa]

Descrizione	γ [kN/mc]	γ_{sat} [kN/mc]	ϕ [°]	δ [°]	c [kPa]	ca [kPa]
Muro	18,0000	18,0000	30,000	-	5,0	0,0
Copertura	20,0000	20,0000	26,000	17,000	5,0	0,0
RSU	9,0000	9,0000	17,000	11,000	10,0	0,0
Fondazione	17,5000	17,5000	27,000	27,000	10,0	0,0

Caratteristiche di deformabilità

Simbologia adottata

Descrizione Descrizione terreno
 E Modulo elastico, espresso in [kPa]
 ν Coefficiente di Poisson
 G Modulo tangenziale, espresso in [kPa]
 Vs Velocità onde di taglio, espressa in [m/s]

Descrizione	E [kPa]	ν	G [kPa]	Vs [m/s]
Muro	0	0,000	0	0,00
Copertura	0	0,000	0	0,00
RSU	0	0,000	0	0,00
Fondazione	0	0,000	0	0,00

Stratigrafia terreno spingente

Simbologia adottata

n° Identificativo strato
 Sp Spessore dello strato, espresso in [m]
 α Inclinazione dello strato, espresso in [°]
 Terreno Terreno dello strato

n°	Sp [m]	α [°]	Terreno
1	2,00	15,000	Copertura
2	2,10	0,000	RSU
3	8,00	0,000	Fondazione

Profilo terreno

Profilo terreno a monte

Simbologia adottata

n° Indice punto
 X Ascissa punto, espresso in [m]
 Y Ordinata punto, espresso in [m]

n°	X [m]	Y [m]									
1	15,00	4,02	2	--	--	3	--	--	4	--	--

Profilo terreno a valle

Quota terreno rispetto al piano di posa [m] 0,30
 Inclinazione terreno a valle [°] 0,000

Progetto di ottimizzazione del fronte perimetrale e completamento del sedime della
 Discarica di Grumolo delle Abbadesse con incremento dei volumi di conferimento

Caratteristiche rinforzi

Simbologia adottata

Rinforzo Identificativo del rinforzo
 LTDS Resistenza di progetto di lungo termine, espresso in [kN/m]
 FS₀₆ Fattore di sicurezza per danni di giunzione
 FS_{0c} Fattore di sicurezza per danni chimici
 FS_{0b} Fattore di sicurezza per danni biologici
 FS_{0A} Fattore di sicurezza per danni ambientali
 LTDS_A Resistenza di progetto di lungo termine ammissibile, espresso in [kN/m]

Rinforzo	LTDS [kN/m]	FS ₀₆	FS _{0c}	FS _{0b}	FS _{0A}	LTDS _A [kN/m]
rinforzo 1	35,0000	1.00	1.00	1.00	1.30	26,9231

Geometria terra armata

Simbologia adottata

Il sistema di riferimento è il punto in alto a destra della terra armata
 n° Indice punto
 X Ascissa, espresso in [m]
 Y Ordinata, espresso in [m]

Materiale di riempimento della terra armata: Muro

n°	X [m]	Y [m]									
1	0,00	0,00	2	-1,70	0,00	3	-3,05	-4,40	4	1,35	-4,40

Descrizione rinforzi della Terra armata

Simbologia adottata

n° Indice rinforzo
 Y Quota del rinforzo
 Rinforzo Identificativo del rinforzo
 L Lunghezza del rinforzo, espresso in [m]
 Lrv Lunghezza tratto di risvolto verticale (facciata del risvolto), espresso in [m]
 Lro Lunghezza tratto di risvolto orizzontale (interno del risvolto), espresso in [m]
 Fds Parametro di interazione rinforzo-terra utilizzato per la verifica interna a scorrimento diretto
 Fpo Parametro di interazione rinforzo-terra utilizzato per la verifica interna a sfilamento del rinforzo dal terreno

n°	Y [m]	Rinforzo	L [m]	Lrv [m]	Lro [m]	Fds	Fpo
1	-0,40	rinforzo 1	1,95	0,35	1,20	0,90	0,90
2	-0,90	rinforzo 1	2,25	0,35	1,20	0,90	0,90
3	-1,40	rinforzo 1	2,56	0,35	1,20	0,90	0,90
4	-1,90	rinforzo 1	2,87	0,35	1,20	0,90	0,90
5	-2,40	rinforzo 1	3,17	0,35	1,20	0,90	0,90
6	-2,90	rinforzo 1	3,48	0,35	1,20	0,90	0,90
7	-3,40	rinforzo 1	3,79	0,35	1,20	0,90	0,90
8	-3,90	rinforzo 1	4,09	0,35	1,20	0,90	0,90
9	-4,15	rinforzo 1	4,25	0,25	1,20	0,90	0,90

Dati parametri sisma

Identificazione del sito

Latitudine 45.520481
 Longitudine 11.659389
 Comune Grumolo Delle Abbadesse
 Provincia Vicenza
 Regione Veneto

Punti di interpolazione del reticolo 12295 - 12517 - 12518 - 12296

Tipo di opera

Tipo di costruzione Opera ordinaria
 Vita nominale 50 anni
 Classe d'uso III - Affollamenti significativi e industrie non pericolose

Vita di riferimento	75 anni	Descrizione	Simbolo	Tipo	SLU	SLE	U.M.
Accelerazione al suolo			a _g		1.26	0.46	[m/s ²]
Massimo fattore amplificazione spettro orizzontale			F ₀		2.44	2.44	
Periodo inizio tratto spettro a velocità costante			T _c *		0.30	0.27	[s]
Tipo di sottosuolo e Coefficiente stratigrafico			S _s	C	1.50	1.50	
Categoria topografica e Coefficiente amplificazione topografica			S _r	T1	1.00	1.00	
Coefficiente di riduzione			β _m		0.38	0.47	

Progetto di ottimizzazione del fronte perimetrale e completamento del sedime della Discarica di Grumolo delle Abbadesse con incremento dei volumi di conferimento

Intensità sismica Verticale/Orizzontale 0.50
 Forma diagramma incremento sismico **Stessa forma diagramma statico**

Opzioni di calcolo

Le verifiche di capacità portante sono state eseguite con il metodo di VESIC.
 Le verifiche di stabilità globale e di compound sono state eseguite con il metodo di BISHOP.
 Per le verifiche interne sono stati analizzati i meccanismi:
 - rottura doppio cuneo
 - rottura superficie curvilinea (Circolare)

Descrizione combinazioni di carico

Simbologia adottata
 γ Coefficiente di partecipazione della condizione
 Ψ Coefficiente di combinazione della condizione

Combinazione n° 1 - SLU (Approccio 2)

Condizione	γ	Ψ	Effetto
Peso proprio	1.30	1.00	Sfavorevole
Spinta terreno	1.30	1.00	Sfavorevole

Combinazione n° 2 - SLU (Approccio 2) - Sisma Vert. positivo

Condizione	γ	Ψ	Effetto
Peso proprio	1.00	1.00	Sfavorevole
Spinta terreno	1.00	1.00	Sfavorevole

Combinazione n° 3 - SLU (Approccio 2) - Sisma Vert. negativo

Condizione	γ	Ψ	Effetto
Peso proprio	1.00	1.00	Sfavorevole
Spinta terreno	1.00	1.00	Sfavorevole

Combinazione n° 4 - EQU

Condizione	γ	Ψ	Effetto
Peso proprio	1.00	1.00	Favorevole
Spinta terreno	1.30	1.00	Sfavorevole

Combinazione n° 5 - EQU - Sisma Vert. positivo

Condizione	γ	Ψ	Effetto
Peso proprio	1.00	1.00	Favorevole
Spinta terreno	1.00	1.00	Sfavorevole

Combinazione n° 6 - EQU - Sisma Vert. negativo

Condizione	γ	Ψ	Effetto
Peso proprio	1.00	1.00	Favorevole
Spinta terreno	1.00	1.00	Sfavorevole

Combinazione n° 7 - STAB

Condizione	γ	Ψ	Effetto
Peso proprio	1.00	1.00	Sfavorevole
Spinta terreno	1.00	1.00	Sfavorevole

Combinazione n° 8 - STAB - Sisma Vert. positivo

Condizione	γ	Ψ	Effetto
Peso proprio	1.00	1.00	Sfavorevole
Spinta terreno	1.00	1.00	Sfavorevole

Combinazione n° 9 - STAB - Sisma Vert. negativo

Condizione	γ	Ψ	Effetto
Peso proprio	1.00	1.00	Sfavorevole
Spinta terreno	1.00	1.00	Sfavorevole

Progetto di ottimizzazione del fronte perimetrale e completamento del sedime della
 Discarica di Grumolo delle Abbadesse con incremento dei volumi di conferimento

4.5.2.2 Risultati

Sintesi - Fattori di sicurezza

Verifiche esterne

Simbologia adottata

IC Indice della combinazione
 FS_{rib} Fattore di sicurezza a ribaltamento
 FS_{scor} Fattore di sicurezza a scorrimento
 FS_{q_{lim}} Fattore di sicurezza a carico limite
 FS_{stab} Fattore di sicurezza a stabilità globale

IC	FS _{scor}	FS _{q_{lim}}	FS _{rib}	FS _{stab}
1	1.591	4.570	--	--
2	1.295	4.120	--	--
3	1.311	4.641	--	--
4	--	--	3.831	--
5	--	--	2.760	--
6	--	--	2.706	--
7	--	--	--	2.624
8	--	--	--	2.632
9	--	--	--	2.631

Verifiche interne

Simbologia adottata

n° Indice rinforzo
 FS_{scor} Fattore di sicurezza a scorrimento
 FS_{stil} Fattore di sicurezza a sfilamento
 FS_{traz} Fattore di sicurezza a trazione
 FS_{scorR} Fattore di sicurezza a scorrimento del risvolto

Combinazione n° 1

n°	FS _{scor}	FS _{stil}	FS _{traz}	FS _{scorR}
1	2.509	5.017	26.269	--
2	3.012	6.024	10.802	--
3	4.404	8.807	8.581	--
4	7.770	15.540	8.581	--
5	4.406	8.812	8.581	--
6	9.107	18.214	8.581	--
7	21.447	42.895	8.581	--
8	36.960	73.919	8.581	--
9	44.715	89.429	8.380	--

Combinazione n° 2

n°	FS _{scor}	FS _{stil}	FS _{traz}	FS _{scorR}
1	5.441	10.883	70.568	--
2	6.003	12.006	27.988	--
3	6.003	12.006	13.476	--
4	8.472	16.944	12.163	--
5	4.113	8.226	12.163	--
6	6.409	12.817	6.328	--
7	15.138	30.276	6.328	--
8	26.140	52.281	6.328	--
9	31.760	63.521	6.328	--

Combinazione n° 3

n°	FS _{scor}	FS _{stil}	FS _{traz}	FS _{scorR}
1	5.171	10.342	70.397	--
2	5.171	10.342	24.109	--
3	5.171	10.342	11.609	--
4	7.290	14.579	10.465	--
5	4.611	9.223	10.465	--
6	7.185	14.370	7.094	--
7	16.972	33.944	7.094	--
8	29.307	58.614	7.094	--
9	35.608	71.216	7.094	--

Verifiche composte

Simbologia adottata

IC Indice della combinazione
 FS_{comp} Coefficiente di sicurezza a stabilità locale (compound)

IC	FS _{comp}
1	2.253
2	2.577

Progetto di ottimizzazione del fronte perimetrale e completamento del sedime della Discarica di Grumolo delle Abbadesse con incremento dei volumi di conferimento

IC	FS _{Comp}
3	2.458

Verifiche esterne

Risultati spinta

Simbologia adottata

- n° Indice della combinazione
- S Spinta statica, incremento sismico della spinta e spinta falda, espresse in [kN]
- So Componente orizzontale della spinta statica, espresse in [kN]
- Sv Componente verticale della spinta statica, dell'incremento sismico o la sottospinta della falda, espresse in [kN]
- P Punto di applicazione della spinta, dell'incremento sismico e della spinta della falda, espresse in [kN]
- Is Inclinazione della spinta rispetto all'orizzontale, espressa in [°]

n°	Descrizione	S [kN]	So [kN]	Sv [kN]	P [m]	Is [°]
1	Spinta statica	112,00	108,93	26,05	0,00; -2,94	13,45
2	Spinta statica	74,58	72,54	17,30	0,00; -2,96	13,42
	Incremento sismico	17,10	16,63	3,97	0,00; -1,53	
3	Spinta statica	74,58	72,54	17,30	0,00; -2,96	13,42
	Incremento sismico	7,84	7,62	1,82	0,00; -1,53	

Risultanti al piano di posa

Simbologia adottata

- n° Indice della combinazione
- Rp Risultante al piano di posa, espressa in [kN]
- β Inclinazione della risultante rispetto al piano di posa, espresse in [°]
- Rn Risultante normale al piano di posa, espressa in [kN]
- Rt Risultante tangente al piano di posa, espressa in [kN]
- Rx Risultante in direzione X, espressa in [kN]
- Ry Risultante in direzione Y, espressa in [kN]
- e Eccentricità rispetto al baricentro della fondazione, espressa in [m]
- Mr Momento ribaltante, espresso in [kNm]
- Ms Momento stabilizzante, espresso in [kNm]

n°	Rp [kN]	β [°]	Rn [kN]	Rt [kN]	Rx [kN]	Ry [kN]	e [m]	Mr [kNm]	Ms [kNm]
1	357,10	17.76	340,08	108,93	108,93	340,08	0,404		
2	291,94	21.47	271,67	106,86	106,86	271,67	0,615		
3	270,18	21.23	251,84	97,85	97,85	251,84	0,568		
4	288,93	22.15	267,61	108,93	108,93	267,61	0,513	159,44	610,88
5	305,29	24.23	278,39	125,31	125,31	278,39	0,751	229,17	632,48
6	272,55	24.19	248,61	111,70	111,70	248,61	0,695	219,32	593,40

Verifica a carico limite

Simbologia adottata

- n° Indice della combinazione
- Rn Risultante normale al piano di posa, espressa in [kN]
- Qu Carico ultimo della fondazione, espressa in [kN]
- Pv Pressione terreno allo spigolo di valle, espressa in [kPa]
- Pm Pressione terreno allo spigolo di monte, espressa in [kPa]
- Lr Lunghezza fondazione reagente, espressa in [m]
- Nc, Nq, N_g Coeff. di capacità portante
- N'c, N'q, N'_g Coeff. di capacità portante corretti dai coeff. di forma, profondità, inclinazione del piano di posa e inclinazione del piano campagna a valle

n°	N [kN]	Qu [kN]	Pv [kPa]	Pm [kPa]	Lr [m]	Nc	Nq	N _g	N'c	N'q	N' _g
1	340,08	1554,05	119,8	34,7	4,40	23.94	13.20	14.47	14.82	8.53	6.22
2	271,67	1119,39	113,5	10,0	4,40	23.94	13.20	14.47	12.70	7.45	4.85
3	251,84	1168,77	101,5	12,9	4,40	23.94	13.20	14.47	12.84	7.52	4.94

Stabilità globale terra armata + terreno

Simbologia e convenzioni di segno adottate

- Le ascisse X sono considerate positive verso monte
- Le ordinate Y sono considerate positive verso l'alto
- Origine in testa alla terra armata (spigolo contro terra)
- Is Indice della striscia
- W peso della striscia espresso in [kN]
- α angolo fra la base della striscia e l'orizzontale espresso in [°] (positivo antiorario)
- φ angolo d'attrito del terreno lungo la base della striscia
- c coesione del terreno lungo la base della striscia espressa in [kPa]
- l lunghezza della base della striscia espressa in [m]
- u pressione neutra lungo la base della striscia espressa in [kPa]
- N sforzo normale alla base della striscia espressa in [kN]
- T sforzo tangenziale alla base della striscia espressa in [kN]
- Rt, Rn Resistenza tangenziale e normale del rinforzo alla base della striscia espressa in [kN]

Progetto di ottimizzazione del fronte perimetrale e completamento del sedime della
 Discarica di Grumolo delle Abbadesse con incremento dei volumi di conferimento

Combinazione n° 7

Superficie di scorrimento n° 1640 - $F_s = 2.62$

Is	W [kN]	α [°]	ϕ [°]	c [kPa]	l [m]	u [kPa]	N [kN]	T [kN]	El [kN]	Er [kN]	Rt [kN]	Rn [kN]
1	15,70	-43.278	21.315	40000	1,76	0	28,06	4,41	0,00	22,45	0,00	0,00
2	41,20	-37.093	22.177	80000	1,61	0	62,81	10,07	22,45	68,36	0,00	0,00
3	59,59	-31.149	22.177	80000	1,50	0	79,96	12,57	68,36	120,48	0,00	0,00
4	74,04	-25.130	22.177	80000	1,42	0	90,45	14,82	120,48	172,31	0,00	0,00
5	85,36	-19.899	22.177	80000	1,36	0	97,83	16,73	172,31	221,33	0,00	0,00
6	94,46	-14.966	22.177	80000	1,33	0	103,18	18,34	221,33	265,69	0,00	0,00
7	100,86	-10.245	22.177	80000	1,30	0	106,22	19,51	265,69	303,79	0,00	0,00
8	104,62	-5.663	22.177	80000	1,29	0	107,18	20,23	303,79	334,49	0,00	0,00
9	128,71	0.240	22.177	80000	1,28	0	128,61	24,05	334,49	358,00	0,00	0,00
10	195,45	5.141	22.177	80000	1,29	0	193,17	34,38	358,00	374,93	0,00	0,00
11	197,43	9.730	22.177	80000	1,30	0	194,42	34,41	374,93	375,99	0,00	0,00
12	182,78	14.452	22.177	80000	1,32	0	180,44	31,73	375,99	361,68	0,00	0,00
13	169,12	19.385	22.177	80000	1,36	0	168,54	29,11	361,68	333,20	0,00	0,00
14	161,23	25.351	22.177	80000	1,42	0	164,19	27,13	333,20	287,41	0,00	0,00
15	150,05	30.976	22.177	80000	1,50	0	157,48	24,70	287,41	227,54	0,00	0,00
16	134,93	36.725	22.177	80000	1,60	0	147,48	21,81	227,54	156,83	0,00	0,00
17	114,95	42.959	22.177	80000	1,75	0	132,74	18,53	156,83	79,93	0,00	0,00
18	95,89	50.144	13.744	80000	2,00	0	127,90	11,90	79,93	-10,62	0,00	0,00
19	79,06	59.234	13.744	80000	2,51	0	122,36	11,49	-10,62	-109,89	0,00	0,00
20	44,68	70.892	21.315	40000	3,92	0	83,20	8,20	-109,89	-185,83	0,00	0,00

Combinazione n° 8

Superficie di scorrimento n° 1640 - $F_s = 2.63$

Is	W [kN]	α [°]	ϕ [°]	c [kPa]	l [m]	u [kPa]	N [kN]	T [kN]	El [kN]	Er [kN]	Rt [kN]	Rn [kN]
1	15,70	-43.278	26.000	50000	1,76	0	29,03	5,49	0,00	22,75	0,00	0,00
2	41,20	-37.093	27.000	100000	1,61	0	63,79	12,54	22,75	68,21	0,00	0,00
3	59,59	-31.149	27.000	100000	1,50	0	79,93	15,65	68,21	118,58	0,00	0,00
4	74,04	-25.130	27.000	100000	1,42	0	89,49	18,45	118,58	167,87	0,00	0,00
5	85,36	-19.899	27.000	100000	1,36	0	96,11	20,83	167,87	213,91	0,00	0,00
6	94,46	-14.966	27.000	100000	1,33	0	100,80	22,83	213,91	255,08	0,00	0,00
7	100,86	-10.245	27.000	100000	1,30	0	103,27	24,29	255,08	289,97	0,00	0,00
8	104,62	-5.663	27.000	100000	1,29	0	103,77	25,18	289,97	317,60	0,00	0,00
9	128,71	0.240	27.000	100000	1,28	0	123,87	29,94	317,60	337,60	0,00	0,00
10	195,45	5.141	27.000	100000	1,29	0	185,37	42,79	337,60	349,30	0,00	0,00
11	197,43	9.730	27.000	100000	1,30	0	185,93	42,83	349,30	345,64	0,00	0,00
12	182,78	14.452	27.000	100000	1,32	0	171,92	39,50	345,64	327,60	0,00	0,00
13	169,12	19.385	27.000	100000	1,36	0	159,94	36,23	327,60	296,31	0,00	0,00
14	161,23	25.351	27.000	100000	1,42	0	155,02	33,77	296,31	248,65	0,00	0,00
15	150,05	30.976	27.000	100000	1,50	0	147,90	30,74	248,65	187,90	0,00	0,00
16	134,93	36.725	27.000	100000	1,60	0	137,64	27,15	187,90	117,48	0,00	0,00
17	114,95	42.959	27.000	100000	1,75	0	122,83	23,06	117,48	42,24	0,00	0,00
18	95,89	50.144	17.000	100000	2,00	0	118,43	14,82	42,24	-46,20	0,00	0,00
19	79,06	59.234	17.000	100000	2,51	0	111,04	14,30	-46,20	-140,09	0,00	0,00
20	44,68	70.892	26.000	50000	3,92	0	71,47	10,20	-140,09	-207,55	0,00	0,00

Combinazione n° 9

Superficie di scorrimento n° 1640 - $F_s = 2.63$

Is	W [kN]	α [°]	ϕ [°]	c [kPa]	l [m]	u [kPa]	N [kN]	T [kN]	El [kN]	Er [kN]	Rt [kN]	Rn [kN]
1	15,70	-43.278	26.000	50000	1,76	0	30,95	5,49	0,00	24,07	0,00	0,00
2	41,20	-37.093	27.000	100000	1,61	0	68,23	12,54	24,07	72,20	0,00	0,00
3	59,59	-31.149	27.000	100000	1,50	0	85,71	15,65	72,20	125,56	0,00	0,00
4	74,04	-25.130	27.000	100000	1,42	0	96,08	18,45	125,56	177,65	0,00	0,00
5	85,36	-19.899	27.000	100000	1,36	0	103,26	20,83	177,65	226,13	0,00	0,00
6	94,46	-14.966	27.000	100000	1,33	0	108,35	22,83	226,13	269,25	0,00	0,00
7	100,86	-10.245	27.000	100000	1,30	0	111,05	24,29	269,25	305,52	0,00	0,00
8	104,62	-5.663	27.000	100000	1,29	0	111,62	25,18	305,52	333,94	0,00	0,00
9	128,71	0.240	27.000	100000	1,28	0	133,29	29,94	333,94	353,90	0,00	0,00
10	195,45	5.141	27.000	100000	1,29	0	199,49	42,80	353,90	364,34	0,00	0,00
11	197,43	9.730	27.000	100000	1,30	0	200,12	42,84	364,34	358,28	0,00	0,00
12	182,78	14.452	27.000	100000	1,32	0	185,08	39,50	358,28	336,96	0,00	0,00
13	169,12	19.385	27.000	100000	1,36	0	172,23	36,24	336,96	301,60	0,00	0,00
14	161,23	25.351	27.000	100000	1,42	0	166,98	33,77	301,60	248,82	0,00	0,00
15	150,05	30.976	27.000	100000	1,50	0	159,37	30,75	248,82	182,18	0,00	0,00
16	134,93	36.725	27.000	100000	1,60	0	148,40	27,16	182,18	105,33	0,00	0,00
17	114,95	42.959	27.000	100000	1,75	0	132,57	23,06	105,33	23,45	0,00	0,00
18	95,89	50.144	17.000	100000	2,00	0	128,03	14,82	23,45	-72,36	0,00	0,00
19	79,06	59.234	17.000	100000	2,51	0	120,50	14,30	-72,36	-174,37	0,00	0,00
20	44,68	70.892	26.000	50000	3,92	0	77,96	10,21	-174,37	-247,97	0,00	0,00

Verifiche interne

Risultati rinforzi

Simbologia adottata

- Ir Indice rinforzo
 - Sft Sforzo nel rinforzo per meccanismo planare, espressa in [kN/m]
 - Sfdc Sforzo nel rinforzo per meccanismo doppio cuneo, espressa in [kN/m]
 - Sfr Sforzo nel rinforzo per meccanismo rotazionale, espressa in [kN/m] (sforzo che ha determinato il fattore di sicurezza minore a scorrimento)
- Gli sforzi nei rinforzi possono essere nulli. In tal caso la stabilità della superficie analizzata è garantita a meno del contributo dei rinforzi.

Combinazione n° 1

Ir	Sft [kN/m]	Sfdc [kN/m]	Sfr [kN/m]
1	--	0,0000	1,0249
2	--	0,0000	2,4924
3	--	0,0000	3,1377
4	--	0,0000	3,1377
5	--	0,6460	3,1377
6	--	3,0551	3,1377
7	--	3,0551	3,1377
8	--	3,0551	3,1377
9	--	3,0551	3,2127

Combinazione n° 2

Ir	Sft [kN/m]	Sfdc [kN/m]	Sfr [kN/m]
1	--	0,0000	0,3815
2	--	0,0000	0,9619
3	--	0,0000	1,9978
4	--	0,0000	2,2136
5	--	0,6758	2,2136
6	--	4,2547	2,2136
7	--	4,2547	2,2136
8	--	4,2547	2,2136
9	--	4,2547	2,2424

Combinazione n° 3

Ir	Sft [kN/m]	Sfdc [kN/m]	Sfr [kN/m]
1	--	0,0000	0,3824
2	--	0,0000	1,1167
3	--	0,0000	2,3192
4	--	0,0000	2,5727
5	--	0,6028	2,5727
6	--	3,7950	2,5727
7	--	3,7950	2,5727
8	--	3,7950	2,5727
9	--	3,7950	2,6032

Meccanismi di rottura

Simbologia adottata

- n° Indice del rinforzo
- Sf Sforzo nel rinforzo per meccanismo planare, espressa in [kN/m]
- Rsc0 Resistenza allo scorrimento, espressa in [kN/m]
- FSsco Fattore di sicurezza allo scorrimento
- Rsfi Resistenza allo sfilamento, espressa in [kN/m]
- FSsfi Fattore di sicurezza allo sfilamento
- Rtra Resistenza a trazione, espressa in [kN/m]
- FStra Fattore di sicurezza a trazione
- LI, Lf Lunghezza libera e di fondazione, espresse in [m]

Meccanismo rottura doppio cuneo

Combinazione n° 1

Ir	Sf [kN/m]	Rsc0 [kN/m]	FSsco	Rsfi [kN/m]	FSsfi	Rtra [kN/m]	FStra	LI [m]	Lf [m]
1	0,0000	0,0000	100,000	0,0000	100,000	0,0000	100,000	1,95	0,00
2	0,0000	0,0000	100,000	0,0000	100,000	0,0000	100,000	2,25	0,00
3	0,0000	0,0000	100,000	0,0000	100,000	0,0000	100,000	2,56	0,00
4	0,0000	0,0000	100,000	0,0000	100,000	0,0000	100,000	2,87	0,00
5	0,6460	2,8466	4,406	5,6931	8,812	5,6931	41,674	2,82	0,35
6	3,0551	27,8225	9,107	55,6451	18,214	26,9231	8,812	2,25	1,23
7	3,0551	65,5244	21,447	131,0487	42,895	26,9231	8,812	1,69	2,10
8	3,0551	112,9160	36,960	225,8320	73,919	26,9231	8,812	1,12	2,98
9	3,0551	136,6084	44,715	273,2168	89,429	26,9231	8,812	0,83	3,41

Combinazione n° 2

Ir	Sf [kN/m]	Rsc0 [kN/m]	FSsco	Rsfi [kN/m]	FSsfi	Rtra [kN/m]	FStra	LI [m]	Lf [m]
1	0,0000	0,0000	100,000	0,0000	100,000	0,0000	100,000	1,95	0,00
2	0,0000	0,0000	100,000	0,0000	100,000	0,0000	100,000	2,25	0,00
3	0,0000	0,0000	100,000	0,0000	100,000	0,0000	100,000	2,56	0,00
4	0,0000	0,0000	100,000	0,0000	100,000	0,0000	100,000	2,87	0,00
5	0,6758	2,7795	4,113	5,5590	8,226	4,2762	39,840	2,83	0,35
6	4,2547	27,2672	6,409	54,5345	12,817	26,9231	6,328	2,27	1,21
7	4,2547	64,4079	15,138	128,8157	30,276	26,9231	6,328	1,71	2,07
8	4,2547	111,2204	26,140	222,4408	52,281	26,9231	6,328	1,15	2,94
9	4,2547	135,1317	31,760	270,2634	63,521	26,9231	6,328	0,88	3,37

Progetto di ottimizzazione del fronte perimetrale e completamento del sedime della
 Discarica di Grumolo delle Abbadesse con incremento dei volumi di conferimento

Combinazione n° 3

Ir	Sf [kN/m]	RSCO [kN/m]	FSsco	RSfi [kN/m]	FSsfi	Rtra [kN/m]	FSTra	LI [m]	LF [m]
1	0,0000	0,0000	100,000	0,0000	100,000	0,0000	100,000	1,95	0,00
2	0,0000	0,0000	100,000	0,0000	100,000	0,0000	100,000	2,25	0,00
3	0,0000	0,0000	100,000	0,0000	100,000	0,0000	100,000	2,56	0,00
4	0,0000	0,0000	100,000	0,0000	100,000	0,0000	100,000	2,87	0,00
5	0,6028	2,7795	4,611	5,5590	9,223	4,2762	44,667	2,83	0,35
6	3,7950	27,2672	7,185	54,5345	14,370	26,9231	7,094	2,27	1,21
7	3,7950	64,4079	16,972	128,8157	33,944	26,9231	7,094	1,71	2,07
8	3,7950	111,2204	29,307	222,4408	58,614	26,9231	7,094	1,15	2,94
9	3,7950	135,1317	35,608	270,2634	71,216	26,9231	7,094	0,88	3,37

Meccanismo rottura rotazionale

Combinazione n° 1

Cerchio n° 201 - Centro (-5,34; 0,00) - Raggio 4,96 - Intersezione profilo valle (-3,05; -4,40) - Intersezione profilo monte (-0,38; 0,00)

Ir	Sf [kN/m]	RSCO [kN/m]	FSsco	RSfi [kN/m]	FSsfi	Rtra [kN/m]	FSTra	LI [m]	LF [m]
1	0,5574	2,3914	4,290	4,7828	8,581	4,7828	48,301	1,42	0,52
2	1,5957	6,8460	4,290	13,6919	8,581	13,6919	16,872	1,51	0,74
3	3,1377	13,8173	4,404	27,6347	8,807	26,9231	8,581	1,55	1,01
4	3,1377	24,3804	7,770	48,7608	15,540	26,9231	8,581	1,52	1,34
5	3,1377	40,1480	12,795	80,2961	25,591	26,9231	8,581	1,43	1,74
6	3,1377	62,4484	19,903	124,8969	39,805	26,9231	8,581	1,27	2,21
7	3,1377	93,3106	29,739	186,6212	59,477	26,9231	8,581	1,01	2,77
8	3,1377	130,1949	41,494	260,3897	82,987	26,9231	8,581	0,62	3,48
9	3,1377	148,0586	47,187	296,1171	94,374	26,9231	8,581	0,35	3,90

Combinazione n° 2

Cerchio n° 201 - Centro (-5,34; 0,00) - Raggio 4,96 - Intersezione profilo valle (-3,05; -4,40) - Intersezione profilo monte (-0,38; 0,00)

Ir	Sf [kN/m]	RSCO [kN/m]	FSsco	RSfi [kN/m]	FSsfi	Rtra [kN/m]	FSTra	LI [m]	LF [m]
1	0,3025	1,8395	6,081	3,6791	12,163	3,6791	89,004	1,42	0,52
2	0,8660	5,2661	6,081	10,5323	12,163	10,5323	31,091	1,51	0,74
3	1,7478	10,6287	6,081	21,2574	12,163	21,2574	15,404	1,55	1,01
4	2,2136	18,7542	8,472	37,5083	16,944	26,9231	12,163	1,52	1,34
5	2,2136	30,8831	13,952	61,7662	27,903	26,9231	12,163	1,43	1,74
6	2,2136	48,0373	21,701	96,0745	43,402	26,9231	12,163	1,27	2,21
7	2,2136	71,7774	32,426	143,5548	64,851	26,9231	12,163	1,01	2,77
8	2,2136	100,1499	45,243	200,2998	90,486	26,9231	12,163	0,62	3,48
9	2,2136	113,8912	51,451	227,7824	102,901	26,9231	12,163	0,35	3,90

Combinazione n° 3

Cerchio n° 201 - Centro (-5,34; 0,00) - Raggio 4,96 - Intersezione profilo valle (-3,05; -4,40) - Intersezione profilo monte (-0,38; 0,00)

Ir	Sf [kN/m]	RSCO [kN/m]	FSsco	RSfi [kN/m]	FSsfi	Rtra [kN/m]	FSTra	LI [m]	LF [m]
1	0,3516	1,8395	5,233	3,6791	10,465	3,6791	76,582	1,42	0,52
2	1,0064	5,2661	5,233	10,5323	10,465	10,5323	26,751	1,51	0,74
3	2,0313	10,6287	5,233	21,2574	10,465	21,2574	13,254	1,55	1,01
4	2,5727	18,7542	7,290	37,5083	14,579	26,9231	10,465	1,52	1,34
5	2,5727	30,8831	12,004	61,7662	24,009	26,9231	10,465	1,43	1,74
6	2,5727	48,0373	18,672	96,0745	37,344	26,9231	10,465	1,27	2,21
7	2,5727	71,7774	27,900	143,5548	55,800	26,9231	10,465	1,01	2,77
8	2,5727	100,1499	38,928	200,2998	77,857	26,9231	10,465	0,62	3,48
9	2,5727	113,8912	44,270	227,7824	88,539	26,9231	10,465	0,35	3,90

Verifiche composte

Stabilità globale della terra armata

Simbologia e convenzioni di segno adottate

- Le ascisse X sono considerate positive verso monte
- Le ordinate Y sono considerate positive verso l'alto
- Origine in testa alla terra armata (spigolo contro terra)
- Is Indice della striscia
- W peso della striscia espresso in [kN]
- α angolo fra la base della striscia e l'orizzontale espresso in [°] (positivo antiorario)
- φ angolo d'attrito del terreno lungo la base della striscia
- c coesione del terreno lungo la base della striscia espressa in [kPa]
- b larghezza della striscia espressa in [m]
- u pressione neutra lungo la base della striscia espressa in [kPa]
- N sforzo normale alla base della striscia espressa in [kN]
- T sforzo tangenziale alla base della striscia espressa in [kN]

Combinazione n° 1

Superficie di scorrimento n° 141 - Fs = 2.25

Is	W [kN]	α [°]	ϕ [°]	c [kPa]	b [m]	u [kPa]	N [kN]	T [kN]
1	0,46	22.401	30.000	5	0,13	0	0,43	0,39
2	1,38	23.360	30.000	5	0,13	0	1,27	0,61
3	2,28	25.868	30.000	5	0,13	0	2,06	0,82
4	3,18	27.935	30.000	5	0,13	0	2,81	1,01
5	4,05	29.334	30.000	5	0,13	0	3,53	1,20
6	4,91	32.663	30.000	5	0,14	0	4,13	1,37
7	5,75	34.177	30.000	5	0,14	0	4,76	1,54
8	6,58	36.268	30.000	5	0,15	0	5,30	1,68
9	7,37	39.333	30.000	5	0,15	0	5,70	1,80
10	7,50	41.310	30.000	5	0,16	0	5,64	1,79
11	7,20	43.488	30.000	5	0,16	0	5,23	1,70
12	6,88	46.667	30.000	5	0,17	0	4,72	1,59
13	6,52	49.462	30.000	5	0,18	0	4,24	1,49
14	6,13	52.266	30.000	5	0,19	0	3,75	1,39
15	5,68	55.365	30.000	5	0,21	0	3,23	1,29
16	5,19	58.785	30.000	5	0,23	0	2,69	1,19
17	4,61	62.541	30.000	5	0,25	0	2,13	1,11
18	3,92	66.686	30.000	5	0,30	0	1,55	1,06
19	3,05	72.498	30.000	5	0,39	0	0,92	1,10
20	1,66	82.660	30.000	5	0,92	0	0,21	2,10

Combinazione n° 2

Superficie di scorrimento n° 141 - $F_s = 2.58$

Is	W [kN]	α [°]	ϕ [°]	c [kPa]	b [m]	u [kPa]	N [kN]	T [kN]
1	0,35	22.401	30.000	5	0,13	0	0,33	0,32
2	1,06	23.360	30.000	5	0,13	0	0,97	0,47
3	1,76	25.868	30.000	5	0,13	0	1,58	0,61
4	2,44	27.935	30.000	5	0,13	0	2,16	0,74
5	3,12	29.334	30.000	5	0,13	0	2,72	0,87
6	3,78	32.663	30.000	5	0,14	0	3,18	0,98
7	4,43	34.177	30.000	5	0,14	0	3,66	1,10
8	5,06	36.268	30.000	5	0,15	0	4,08	1,20
9	5,67	39.333	30.000	5	0,15	0	4,39	1,28
10	5,77	41.310	30.000	5	0,16	0	4,34	1,28
11	5,54	43.488	30.000	5	0,16	0	4,02	1,22
12	5,29	46.667	30.000	5	0,17	0	3,63	1,15
13	5,02	49.462	30.000	5	0,18	0	3,26	1,08
14	4,71	52.266	30.000	5	0,19	0	2,88	1,02
15	4,37	55.365	30.000	5	0,21	0	2,49	0,96
16	3,99	58.785	30.000	5	0,23	0	2,07	0,90
17	3,55	62.541	30.000	5	0,25	0	1,63	0,86
18	3,02	66.686	30.000	5	0,30	0	1,19	0,84
19	2,35	72.498	30.000	5	0,39	0	0,71	0,92
20	1,28	82.660	30.000	5	0,92	0	0,16	1,82

Combinazione n° 3

Superficie di scorrimento n° 141 - $F_s = 2.46$

Is	W [kN]	α [°]	ϕ [°]	c [kPa]	b [m]	u [kPa]	N [kN]	T [kN]
1	0,35	22.401	30.000	5	0,13	0	0,33	0,34
2	1,06	23.360	30.000	5	0,13	0	0,97	0,49
3	1,76	25.868	30.000	5	0,13	0	1,58	0,64
4	2,44	27.935	30.000	5	0,13	0	2,16	0,78
5	3,12	29.334	30.000	5	0,13	0	2,72	0,91
6	3,78	32.663	30.000	5	0,14	0	3,18	1,03
7	4,43	34.177	30.000	5	0,14	0	3,66	1,15
8	5,06	36.268	30.000	5	0,15	0	4,08	1,25
9	5,67	39.333	30.000	5	0,15	0	4,39	1,34
10	5,77	41.310	30.000	5	0,16	0	4,34	1,34
11	5,54	43.488	30.000	5	0,16	0	4,02	1,27
12	5,29	46.667	30.000	5	0,17	0	3,63	1,20
13	5,02	49.462	30.000	5	0,18	0	3,26	1,13
14	4,71	52.266	30.000	5	0,19	0	2,88	1,07
15	4,37	55.365	30.000	5	0,21	0	2,49	1,00
16	3,99	58.785	30.000	5	0,23	0	2,07	0,95
17	3,55	62.541	30.000	5	0,25	0	1,63	0,90
18	3,02	66.686	30.000	5	0,30	0	1,19	0,89
19	2,35	72.498	30.000	5	0,39	0	0,71	0,96
20	1,28	82.660	30.000	5	0,92	0	0,16	1,91

4.5.3 Esiti dell'analisi H = 4,60 m

Sono di seguito riportati i listati degli esiti relativi all'analisi della sezione qui sotto indicata, a partire dai **Dati** di dettaglio inseriti nel modello, seguiti dai **Risultati**.

H [m]	B [m]	b [m]
4,60	4,70	1,70

4.5.3.1 Dati

Normativa

Spinte e verifiche secondo: N.T.C. 2018

Simbologia adottata

γ_{Gsfav}	Coefficiente parziale sfavorevole sulle azioni permanenti
γ_{Gfav}	Coefficiente parziale favorevole sulle azioni permanenti
γ_{Qsfav}	Coefficiente parziale sfavorevole sulle azioni variabili
γ_{Qfav}	Coefficiente parziale favorevole sulle azioni variabili
$\gamma_{tan\phi}$	Coefficiente parziale di riduzione dell'angolo di attrito drenato
γ_c	Coefficiente parziale di riduzione della coesione drenata
γ_{cu}	Coefficiente parziale di riduzione della coesione non drenata
γ_{qu}	Coefficiente parziale di riduzione del carico ultimo
γ_r	Coefficiente parziale di riduzione della resistenza a compressione uniassiale delle rocce

Coefficienti di partecipazione combinazioni statiche

Coefficienti parziali per le azioni o per l'effetto delle azioni:

<i>Carichi</i>	<i>Effetto</i>		<i>EQU</i>	<i>A1</i>	<i>A2</i>
Permanenti	Favorevole	γ_{Gfav}	1.00	1.00	1.00
Permanenti	Sfavorevole	γ_{Gsfav}	1.30	1.30	1.00
Permanenti NS	Favorevole	γ_{Gfav}	0.80	0.80	0.80
Permanenti NS	Sfavorevole	γ_{Gsfav}	1.50	1.50	1.30
Variabili	Favorevole	γ_{Qfav}	0.00	0.00	0.00
Variabili	Sfavorevole	γ_{Qsfav}	1.50	1.50	1.30
Variabili TF	Favorevole	γ_{Qfav}	0.00	0.00	0.00
Variabili TF	Sfavorevole	γ_{Qsfav}	1.35	1.35	1.15

Coefficienti parziali per i parametri geotecnici del terreno:

<i>Parametri</i>			<i>M1</i>	<i>M2</i>
Tangente dell'angolo di attrito	$\gamma_{tan\phi}$		1.00	1.25
Coesione efficace	γ_c		1.00	1.25
Resistenza non drenata	γ_{cu}		1.00	1.40
Resistenza a compressione uniassiale	γ_{qu}		1.00	1.60
Peso dell'unità di volume	γ_r		1.00	1.00

Coefficienti di partecipazione combinazioni sismiche

Coefficienti parziali per le azioni o per l'effetto delle azioni:

<i>Carichi</i>	<i>Effetto</i>		<i>EQU</i>	<i>A1</i>	<i>A2</i>
Permanenti	Favorevole	γ_{Gfav}	1.00	1.00	1.00
Permanenti	Sfavorevole	γ_{Gsfav}	1.00	1.00	1.00
Variabili	Favorevole	γ_{Qfav}	0.00	0.00	0.00
Variabili	Sfavorevole	γ_{Qsfav}	1.00	1.00	1.00

Coefficienti parziali per i parametri geotecnici del terreno:

<i>Parametri</i>			<i>M1</i>	<i>M2</i>
Tangente dell'angolo di attrito	$\gamma_{tan\phi}$		1.00	1.00
Coesione efficace	γ_c		1.00	1.00
Resistenza non drenata	γ_{cu}		1.00	1.00
Resistenza a compressione uniassiale	γ_{qu}		1.00	1.00
Peso dell'unità di volume	γ_r		1.00	1.00

Verifiche esterne - Coefficienti parziali γ_R per le verifiche agli stati limite ultimi STR e GEO

	R1	R2	R3
Capacità portante della fondazione	1.00	1.00	1.40
Scorrimento	1.00	1.00	1.10
Resistenza del terreno a valle	1.00	1.00	1.40
Stabilità globale		1.10	

Verifiche interne - Coefficienti di sicurezza richiesti

Coefficiente di sicurezza allo scorrimento dei rinforzi	1.50
Coefficiente di sicurezza allo sfilamento del rinforzo	3.00
Coefficiente di sicurezza alla trazione del rinforzo	1.30
Coefficiente di sicurezza allo scorrimento del risvolto	1.30

Progetto di ottimizzazione del fronte perimetrale e completamento del sedime della
 Discarica di Grumolo delle Abbadesse con incremento dei volumi di conferimento

Verifiche compound - Coefficienti di sicurezza richiesti

Coefficiente di sicurezza alla stabilità locale 1.30
 Coefficiente di sicurezza alla stabilità locale sismica 1.30

Descrizione terreni

Caratteristiche fisico meccaniche

Simbologia adottata

Descrizione Descrizione terreno
 γ Peso di volume del terreno espresso in [kN/mc]
 γ_{sat} Peso di volume saturo del terreno espresso in [kN/mc]
 ϕ Angolo di attrito interno del terreno espresso in [°]
 δ Angolo di attrito Muro-terreno espresso in [°]
 c Coesione del terreno espressa in [kPa]
 ca Adesione del terreno espressa in [kPa]

Descrizione	γ [kN/mc]	γ_{sat} [kN/mc]	ϕ [°]	δ [°]	c [kPa]	ca [kPa]
Muro	18,0000	18,0000	30,000	-	5,0	0,0
Copertura	20,0000	20,0000	26,000	17,000	5,0	0,0
RSU	9,0000	9,0000	17,000	11,000	10,0	0,0
Fondazione	17,5000	17,5000	27,000	27,000	10,0	0,0

Caratteristiche di deformabilità

Simbologia adottata

Descrizione Descrizione terreno
 E Modulo elastico, espresso in [kPa]
 ν Coefficiente di Poisson
 G Modulo tangenziale, espresso in [kPa]
 V_s Velocità onde di taglio, espressa in [m/s]

Descrizione	E [kPa]	ν	G [kPa]	V_s [m/s]
Muro	0	0,000	0	0,00
Copertura	0	0,000	0	0,00
RSU	0	0,000	0	0,00
Fondazione	0	0,000	0	0,00

Stratigrafia terreno spingente

Simbologia adottata

n° Identificativo strato
 Sp Spessore dello strato, espresso in [m]
 α Inclinazione dello strato, espresso in [°]
 Terreno Terreno dello strato

n°	Sp [m]	α [°]	Terreno
1	2,00	15,000	Copertura
2	2,10	0,000	RSU
3	8,00	0,000	Fondazione

Profilo terreno

Profilo terreno a monte

Simbologia adottata

n° Indice punto
 X Ascissa punto, espresso in [m]
 Y Ordinata punto, espresso in [m]

n°	X [m]	Y [m]									
1	15,00	4,02	2	--	--	3	--	--	4	--	--

Profilo terreno a valle

Quota terreno rispetto al piano di posa [m] 0,30
 Inclinazione terreno a valle [°] 0,000

Progetto di ottimizzazione del fronte perimetrale e completamento del sedime della Discarica di Grumolo delle Abbadesse con incremento dei volumi di conferimento

Caratteristiche rinforzi

Simbologia adottata

Rinforzo Identificativo del rinforzo
 LTDS Resistenza di progetto di lungo termine, espresso in [kN/m]
 FSoc Fattore di sicurezza per danni di giunzione
 FSoc Fattore di sicurezza per danni chimici
 FSob Fattore di sicurezza per danni biologici
 FSda Fattore di sicurezza per danni ambientali
 LTDSa Resistenza di progetto di lungo termine ammissibile, espresso in [kN/m]

Rinforzo	LTDS	FSoc	FSob	FSda	LTDSa
	[kN/m]				[kN/m]
rinforzo 1	35,0000	1.00	1.00	1.30	26,9231

Geometria terra armata

Simbologia adottata

Il sistema di riferimento è il punto in alto a destra della terra armata
 n° Indice punto
 X Ascissa, espresso in [m]
 Y Ordinata, espresso in [m]

Materiale di riempimento della terra armata: **Muro**

n°	X	Y	n°	X	Y	n°	X	Y	n°	X	Y
	[m]	[m]		[m]	[m]		[m]	[m]		[m]	[m]
1	0,00	0,00	2	-1,70	0,00	3	-3,20	-4,90	4	1,50	-4,90

Descrizione rinforzi della Terra armata

Simbologia adottata

n° Indice rinforzo
 Y Quota del rinforzo
 Rinforzo Identificativo del rinforzo
 L Lunghezza del rinforzo, espresso in [m]
 Lrv Lunghezza tratto di risvolto verticale (facciata del risvolto), espresso in [m]
 Lro Lunghezza tratto di risvolto orizzontale (interno del risvolto), espresso in [m]
 Fds Parametro di interazione rinforzo-terra utilizzato per la verifica interna a scorrimento diretto
 Fpo Parametro di interazione rinforzo-terra utilizzato per la verifica interna a sfilamento del rinforzo dal terreno

n°	Y	Rinforzo	L	Lrv	Lro	Fds	Fpo
	[m]		[m]	[m]	[m]		
1	-0,40	rinforzo 1	1,94	0,35	1,20	0,90	0,90
2	-0,90	rinforzo 1	2,25	0,35	1,20	0,90	0,90
3	-1,40	rinforzo 1	2,56	0,35	1,20	0,90	0,90
4	-1,90	rinforzo 1	2,86	0,35	1,20	0,90	0,90
5	-2,40	rinforzo 1	3,17	0,35	1,20	0,90	0,90
6	-2,90	rinforzo 1	3,48	0,35	1,20	0,90	0,90
7	-3,40	rinforzo 1	3,78	0,35	1,20	0,90	0,90
8	-3,90	rinforzo 1	4,09	0,35	1,20	0,90	0,90
9	-4,40	rinforzo 1	4,39	0,35	1,20	0,90	0,90
10	-4,65	rinforzo 1	4,55	0,25	1,20	0,90	0,90

Dati parametri sisma

Identificazione del sito

Latitudine 45.520481
 Longitudine 11.659389
 Comune Grumolo Delle Abbadesse
 Provincia Vicenza
 Regione Veneto

Punti di interpolazione del reticolo 12295 - 12517 - 12518 - 12296

Tipo di opera

Tipo di costruzione Opera ordinaria
 Vita nominale 50 anni
 Classe d'uso III - Affollamenti significativi e industrie non pericolose

Vita di riferimento	75 anni	Descrizione	Simbolo	Tipo	SLU	SLE	U.M.
Accelerazione al suolo			ag		1.26	0.46	[m/s ²]
Massimo fattore amplificazione spettro orizzontale			Fo		2.44	2.44	
Periodo inizio tratto spettro a velocità costante			Tc*		0.30	0.27	[s]
Tipo di sottosuolo e Coefficiente stratigrafico			Ss	C	1.50	1.50	
Categoria topografica e Coefficiente amplificazione topografica			Sr	T1	1.00	1.00	

Vita di riferimento	75 anni	Descrizione	Simbolo	Tipo	SLU	SLE	U.M.
Coefficiente di riduzione			β_m		0,38	0,47	

Intensità sismica Verticale/Orizzontale 0.50
 Forma diagramma incremento sismico **Stessa forma diagramma statico**

Opzioni di calcolo

Le verifiche di capacità portante sono state eseguite con il metodo di VESIC.
 Le verifiche di stabilità globale e di compound sono state eseguite con il metodo di BISHOP.
 Per le verifiche interne sono stati analizzati i meccanismi:
 - rottura doppio cuneo
 - rottura superficie curvilinea (Circolare)

Descrizione combinazioni di carico

Simbologia adottata

γ Coefficiente di partecipazione della condizione
 Ψ Coefficiente di combinazione della condizione

Combinazione n° 1 - SLU (Approccio 2)

Condizione	γ	Ψ	Effetto
Peso proprio	1.30	1.00	Sfavorevole
Spinta terreno	1.30	1.00	Sfavorevole

Combinazione n° 2 - SLU (Approccio 2) - Sisma Vert. positivo

Condizione	γ	Ψ	Effetto
Peso proprio	1.00	1.00	Sfavorevole
Spinta terreno	1.00	1.00	Sfavorevole

Combinazione n° 3 - SLU (Approccio 2) - Sisma Vert. negativo

Condizione	γ	Ψ	Effetto
Peso proprio	1.00	1.00	Sfavorevole
Spinta terreno	1.00	1.00	Sfavorevole

Combinazione n° 4 - EQU

Condizione	γ	Ψ	Effetto
Peso proprio	1.00	1.00	Favorevole
Spinta terreno	1.30	1.00	Sfavorevole

Combinazione n° 5 - EQU - Sisma Vert. positivo

Condizione	γ	Ψ	Effetto
Peso proprio	1.00	1.00	Favorevole
Spinta terreno	1.00	1.00	Sfavorevole

Combinazione n° 6 - EQU - Sisma Vert. negativo

Condizione	γ	Ψ	Effetto
Peso proprio	1.00	1.00	Favorevole
Spinta terreno	1.00	1.00	Sfavorevole

Combinazione n° 7 - STAB

Condizione	γ	Ψ	Effetto
Peso proprio	1.00	1.00	Sfavorevole
Spinta terreno	1.00	1.00	Sfavorevole

Combinazione n° 8 - STAB - Sisma Vert. positivo

Condizione	γ	Ψ	Effetto
Peso proprio	1.00	1.00	Sfavorevole
Spinta terreno	1.00	1.00	Sfavorevole

Combinazione n° 9 - STAB - Sisma Vert. negativo

Condizione	γ	Ψ	Effetto
Peso proprio	1.00	1.00	Sfavorevole
Spinta terreno	1.00	1.00	Sfavorevole

4.5.3.2 Risultati

Sintesi - Fattori di sicurezza

Verifiche esterne

Simbologia adottata

IC	Indice della combinazione
FS _{Rub}	Fattore di sicurezza a ribaltamento
FS _{Scor}	Fattore di sicurezza a scorrimento
FS _{q_{lim}}	Fattore di sicurezza a carico limite
FS _{Stab}	Fattore di sicurezza a stabilità globale

IC	FS _{Scor}	FS _{q_{lim}}	FS _{Rub}	FS _{Stab}
1	1.609	4.268	--	--
2	1.304	3.810	--	--
3	1.317	4.282	--	--
4	--	--	3.597	--
5	--	--	2.625	--
6	--	--	2.577	--
7	--	--	--	2.312
8	--	--	--	2.371
9	--	--	--	2.367

Verifiche interne

Simbologia adottata

n°	Indice rinforzo
FS _{Scor}	Fattore di sicurezza a scorrimento
FS _{fil}	Fattore di sicurezza a sfilamento
FS _{Traz}	Fattore di sicurezza a trazione
FS _{ScorR}	Fattore di sicurezza a scorrimento del risvolto

Combinazione n° 1

n°	FS _{Scor}	FS _{fil}	FS _{Traz}	FS _{ScorR}
1	3.414	6.828	37.090	--
2	3.414	6.828	13.279	--
3	3.467	6.933	6.828	--
4	6.058	12.116	6.828	--
5	9.661	19.322	6.828	--
6	2.346	4.691	5.459	--
7	7.655	15.309	4.691	--
8	15.044	30.088	4.691	--
9	23.878	47.755	4.691	--
10	28.131	56.262	4.691	--

Combinazione n° 2

n°	FS _{Scor}	FS _{fil}	FS _{Traz}	FS _{ScorR}
1	3.821	7.642	55.992	--
2	4.207	8.414	21.533	--
3	4.752	9.503	12.166	--
4	6.486	12.972	9.503	--
5	10.343	20.687	9.503	--
6	2.631	5.263	6.227	--
7	6.522	13.044	4.048	--
8	12.835	25.671	4.048	--
9	20.415	40.830	4.048	--
10	24.100	48.201	4.048	--

Combinazione n° 3

n°	FS _{Scor}	FS _{fil}	FS _{Traz}	FS _{ScorR}
1	4.163	8.326	58.799	--
2	4.163	8.326	21.050	--
3	4.163	8.326	10.659	--
4	5.683	11.366	8.326	--
5	9.062	18.125	8.326	--
6	2.842	5.684	6.725	--
7	7.044	14.088	4.373	--
8	13.863	27.727	4.373	--
9	22.050	44.099	4.373	--
10	26.031	52.061	4.373	--

Verifiche composte

Simbologia adottata

IC	Indice della combinazione
FS _{Comp}	Coefficiente di sicurezza a stabilità locale (compound)

Progetto di ottimizzazione del fronte perimetrale e completamento del sedime della
 Discarica di Grumolo delle Abbadesse con incremento dei volumi di conferimento

IC	FS _{comp}
1	2.225
2	2.603
3	2.477

Verifiche esterne

Risultati spinta

Simbologia adottata

- n° Indice della combinazione
- S Spinta statica, incremento sismico della spinta e spinta falda, espresse in [kN]
- So Componente orizzontale della spinta statica, espresse in [kN]
- Sv Componente verticale della spinta statica, dell'incremento sismico o la sottospinta della falda, espresse in [kN]
- P Punto di applicazione della spinta, dell'incremento sismico e della spinta della falda, espresse in [kN]
- Is Inclinazione della spinta rispetto all'orizzontale, espresse in [°]

n°	Descrizione	S [kN]	So [kN]	Sv [kN]	P [m]	Is [°]
1	Spinta statica	132,24	127,40	35,43	0,00; -3,21	15,54
2	Spinta statica	88,56	85,30	23,82	0,00; -3,24	15,60
	Incremento sismico	20,62	19,86	5,55	0,00; -1,71	
3	Spinta statica	88,56	85,30	23,82	0,00; -3,24	15,60
	Incremento sismico	9,79	9,43	2,63	0,00; -1,71	

Risultanti al piano di posa

Simbologia adottata

- n° Indice della combinazione
- Rp Risultante al piano di posa, espresse in [kN]
- β Inclinazione della risultante rispetto al piano di posa, espresse in [°]
- Rn Risultante normale al piano di posa, espresse in [kN]
- Rt Risultante tangente al piano di posa, espresse in [kN]
- Rx Risultante in direzione X, espresse in [kN]
- Ry Risultante in direzione Y, espresse in [kN]
- e Eccentricità rispetto al baricentro della fondazione, espresse in [m]
- Mr Momento ribaltante, espresso in [kNm]
- Ms Momento stabilizzante, espresso in [kNm]

n°	Rp [kN]	β [°]	Rn [kN]	Rt [kN]	Rx [kN]	Ry [kN]	e [m]	Mr [kNm]	Ms [kNm]
1	422,03	17,57	402,35	127,40	127,40	402,35	0,462		
2	345,65	21,35	321,93	125,82	125,82	321,93	0,693		
3	319,90	21,14	298,36	115,39	115,39	298,36	0,644		
4	342,27	21,85	317,67	127,40	127,40	317,67	0,585	215,93	776,65
5	361,85	24,09	330,33	147,71	147,71	330,33	0,843	306,22	803,97
6	323,10	24,10	294,93	131,95	131,95	294,93	0,786	292,33	753,47

Verifica a carico limite

Simbologia adottata

- n° Indice della combinazione
- Rn Risultante normale al piano di posa, espresse in [kN]
- Qu Carico ultimo della fondazione, espresse in [kN]
- Pv Pressione terreno allo spigolo di valle, espresse in [kPa]
- Pm Pressione terreno allo spigolo di monte, espresse in [kPa]
- Lr Lunghezza fondazione reagente, espresse in [m]
- Nc, Nq, N_g Coeff. di capacità portante
- N'c, N'q, N'_g Coeff. di capacità portante corretti dai coeff. di forma, profondità, inclinazione del piano di posa e inclinazione del piano campagna a valle

n°	N [kN]	Qu [kN]	Pv [kPa]	Pm [kPa]	Lr [m]	Nc	Nq	N _g	N'c	N'q	N' _g
1	402,35	1717,33	136,1	35,1	4,70	23,94	13,20	14,47	14,97	8,60	6,32
2	321,93	1226,71	129,1	7,9	4,70	23,94	13,20	14,47	12,82	7,51	4,92
3	298,36	1277,72	115,7	11,3	4,70	23,94	13,20	14,47	12,94	7,57	4,99

Stabilità globale terra armata + terreno

Simbologia e convenzioni di segno adottate

- Le ascisse X sono considerate positive verso monte
- Le ordinate Y sono considerate positive verso l'alto
- Origine in testa alla terra armata (spigolo contro terra)
- Is Indice della striscia
- W peso della striscia espresso in [kN]
- α angolo fra la base della striscia e l'orizzontale espresso in [°] (positivo antiorario)
- φ angolo d'attrito del terreno lungo la base della striscia
- c coesione del terreno lungo la base della striscia espresse in [kPa]
- l lunghezza della base della striscia espresse in [m]
- u pressione neutra lungo la base della striscia espresse in [kPa]
- N sforzo normale alla base della striscia espresse in [kN]
- T sforzo tangenziale alla base della striscia espresse in [kN]
- Rt, Rn Resistenza tangenziale e normale del rinforzo alla base della striscia espresse in [kN]

Progetto di ottimizzazione del fronte perimetrale e completamento del sedime della
 Discarica di Grumolo delle Abbadesse con incremento dei volumi di conferimento

Combinazione n° 7

Superficie di scorrimento n° 3130 - $F_s = 2.31$

Is	W [kN]	α [°]	ϕ [°]	c [kPa]	l [m]	u [kPa]	N [kN]	T [kN]	El [kN]	Er [kN]	Rt [kN]	Rn [kN]
1	13,42	-40.885	21.315	40000	1,66	0	23,74	4,61	0,00	19,03	0,00	0,00
2	34,74	-34.949	22.177	80000	1,53	0	52,63	10,38	19,03	57,69	0,00	0,00
3	51,15	-28.875	22.177	80000	1,44	0	67,79	12,93	57,69	101,75	0,00	0,00
4	64,84	-23.498	22.177	80000	1,37	0	78,85	15,31	101,75	147,22	0,00	0,00
5	75,63	-18.470	22.177	80000	1,33	0	86,40	17,32	147,22	191,03	0,00	0,00
6	83,67	-13.699	22.177	80000	1,29	0	91,15	18,91	191,03	230,98	0,00	0,00
7	89,12	-9.110	22.177	80000	1,27	0	93,63	20,02	230,98	265,58	0,00	0,00
8	92,18	-4.230	22.177	80000	1,26	0	93,99	20,68	265,58	293,13	0,00	0,00
9	142,66	1.506	22.177	80000	1,26	0	141,94	29,65	293,13	319,04	0,00	0,00
10	195,31	5.961	22.177	80000	1,26	0	192,36	38,82	319,04	337,68	0,00	0,00
11	194,27	10.491	22.177	80000	1,28	0	190,50	38,30	337,68	340,65	0,00	0,00
12	174,80	15.163	22.177	80000	1,30	0	171,64	34,43	340,65	328,99	0,00	0,00
13	164,96	20.346	22.177	80000	1,34	0	163,46	32,07	328,99	302,23	0,00	0,00
14	157,00	26.220	22.177	80000	1,40	0	158,75	29,84	302,23	258,85	0,00	0,00
15	145,84	31.525	22.177	80000	1,48	0	151,48	27,16	258,85	202,80	0,00	0,00
16	130,88	37.235	22.177	80000	1,58	0	141,20	23,96	202,80	136,44	0,00	0,00
17	111,26	43.423	22.177	80000	1,73	0	126,30	20,34	136,44	64,40	0,00	0,00
18	93,39	50.357	13.744	80000	1,97	0	122,40	13,19	64,40	-21,44	0,00	0,00
19	77,01	59.549	13.744	80000	2,48	0	116,24	12,78	-21,44	-115,16	0,00	0,00
20	43,41	71.000	21.315	40000	3,86	0	76,26	9,12	-115,16	-184,30	0,00	0,00

Combinazione n° 8

Superficie di scorrimento n° 3130 - $F_s = 2.37$

Is	W [kN]	α [°]	ϕ [°]	c [kPa]	l [m]	u [kPa]	N [kN]	T [kN]	El [kN]	Er [kN]	Rt [kN]	Rn [kN]
1	13,42	-40.885	26.000	50000	1,66	0	24,54	5,62	0,00	19,33	0,00	0,00
2	34,74	-34.949	27.000	100000	1,53	0	53,43	12,65	19,33	57,76	0,00	0,00
3	51,15	-28.875	27.000	100000	1,44	0	67,68	15,75	57,76	100,49	0,00	0,00
4	64,84	-23.498	27.000	100000	1,37	0	77,95	18,64	100,49	143,92	0,00	0,00
5	75,63	-18.470	27.000	100000	1,33	0	84,81	21,10	143,92	185,27	0,00	0,00
6	83,67	-13.699	27.000	100000	1,29	0	88,98	23,03	185,27	222,59	0,00	0,00
7	89,12	-9.110	27.000	100000	1,27	0	90,97	24,39	222,59	254,55	0,00	0,00
8	92,18	-4.230	27.000	100000	1,26	0	90,90	25,18	254,55	279,62	0,00	0,00
9	142,66	1.506	27.000	100000	1,26	0	136,57	36,11	279,62	301,68	0,00	0,00
10	195,31	5.961	27.000	100000	1,26	0	184,47	47,28	301,68	315,25	0,00	0,00
11	194,27	10.491	27.000	100000	1,28	0	182,06	46,65	315,25	313,74	0,00	0,00
12	174,80	15.163	27.000	100000	1,30	0	163,43	41,93	313,74	298,67	0,00	0,00
13	164,96	20.346	27.000	100000	1,34	0	154,98	39,06	298,67	269,34	0,00	0,00
14	157,00	26.220	27.000	100000	1,40	0	149,76	36,34	269,34	224,27	0,00	0,00
15	145,84	31.525	27.000	100000	1,48	0	142,17	33,08	224,27	167,46	0,00	0,00
16	130,88	37.235	27.000	100000	1,58	0	131,69	29,18	167,46	101,42	0,00	0,00
17	111,26	43.423	27.000	100000	1,73	0	116,78	24,78	101,42	31,00	0,00	0,00
18	93,39	50.357	17.000	100000	1,97	0	113,24	16,07	31,00	-52,78	0,00	0,00
19	77,01	59.549	17.000	100000	2,48	0	105,30	15,57	-52,78	-141,31	0,00	0,00
20	43,41	71.000	26.000	50000	3,86	0	65,43	11,10	-141,31	-202,74	0,00	0,00

Combinazione n° 9

Superficie di scorrimento n° 3109 - $F_s = 2.37$

Is	W [kN]	α [°]	ϕ [°]	c [kPa]	l [m]	u [kPa]	N [kN]	T [kN]	El [kN]	Er [kN]	Rt [kN]	Rn [kN]
1	13,54	-40.880	26.000	50000	1,66	0	26,34	5,65	0,00	20,52	0,00	0,00
2	35,08	-34.991	27.000	100000	1,53	0	57,68	12,72	20,52	61,44	0,00	0,00
3	51,35	-28.895	27.000	100000	1,44	0	72,86	15,81	61,44	106,73	0,00	0,00
4	64,71	-23.515	27.000	100000	1,37	0	83,55	18,64	106,73	152,43	0,00	0,00
5	75,50	-18.482	27.000	100000	1,32	0	90,97	21,10	152,43	195,75	0,00	0,00
6	83,53	-13.705	27.000	100000	1,29	0	95,50	23,03	195,75	234,64	0,00	0,00
7	89,00	-9.108	27.000	100000	1,27	0	97,68	24,40	234,64	267,68	0,00	0,00
8	92,01	-4.410	27.000	100000	1,26	0	97,70	25,18	267,68	293,56	0,00	0,00
9	111,08	1.490	27.000	100000	1,26	0	114,40	29,34	293,56	311,78	0,00	0,00
10	184,10	5.949	27.000	100000	1,26	0	187,10	44,95	311,78	323,62	0,00	0,00
11	191,75	10.482	27.000	100000	1,28	0	193,40	46,19	323,62	319,82	0,00	0,00
12	182,80	15.153	27.000	100000	1,30	0	184,05	43,67	319,82	300,48	0,00	0,00
13	163,32	20.055	27.000	100000	1,34	0	165,12	38,84	300,48	268,39	0,00	0,00
14	155,41	26.155	27.000	100000	1,40	0	159,61	36,10	268,39	219,06	0,00	0,00
15	144,33	31.441	27.000	100000	1,47	0	151,51	32,87	219,06	157,50	0,00	0,00
16	129,48	37.122	27.000	100000	1,58	0	140,31	29,01	157,50	86,48	0,00	0,00
17	110,00	43.268	27.000	100000	1,73	0	124,39	24,64	86,48	11,10	0,00	0,00
18	92,00	50.383	17.000	100000	1,97	0	120,57	15,97	11,10	-78,32	0,00	0,00
19	75,78	59.252	17.000	100000	2,46	0	111,74	15,45	-78,32	-172,00	0,00	0,00
20	42,39	70.608	26.000	50000	3,78	0	68,98	10,94	-172,00	-236,54	0,00	0,00

Verifiche interne

Risultati rinforzi

Simbologia adottata

Ir Indice rinforzo
 Sft Sforzo nel rinforzo per meccanismo planare, espressa in [kN/m]

Progetto di ottimizzazione del fronte perimetrale e completamento del sedime della
 Discarica di Grumolo delle Abbadesse con incremento dei volumi di conferimento

Sfdc Sforzo nel rinforzo per meccanismo doppio cuneo, espressa in [kN/m]
 Sfr Sforzo nel rinforzo per meccanismo rotazionale, espressa in [kN/m] (sforzo che ha determinato il fattore di sicurezza minore a scorrimento)
 Gli sforzi nei rinforzi possono essere nulli. In tal caso la stabilità della superficie analizzata è garantita a meno del contributo dei rinforzi.

Combinazione n° 1

Ir	Sft [kN/m]	Sfdc [kN/m]	Sfr [kN/m]
1	--	0,0000	0,7259
2	--	0,0000	2,0276
3	--	0,0000	3,9431
4	--	0,0000	3,9431
5	--	0,0000	3,9431
6	--	4,9317	3,9431
7	--	5,7387	3,9431
8	--	5,7387	3,9431
9	--	5,7387	3,9431
10	--	5,7387	3,9431

Combinazione n° 2

Ir	Sft [kN/m]	Sfdc [kN/m]	Sfr [kN/m]
1	--	0,0000	0,4808
2	--	0,0000	1,2503
3	--	0,0000	2,2130
4	--	0,0000	2,8331
5	--	0,0000	2,8331
6	--	4,3239	2,8331
7	--	6,6505	2,8331
8	--	6,6505	2,8331
9	--	6,6505	2,8331
10	--	6,6505	2,8331

Combinazione n° 3

Ir	Sft [kN/m]	Sfdc [kN/m]	Sfr [kN/m]
1	--	0,0000	0,4579
2	--	0,0000	1,2790
3	--	0,0000	2,5258
4	--	0,0000	3,2335
5	--	0,0000	3,2335
6	--	4,0033	3,2335
7	--	6,1574	3,2335
8	--	6,1574	3,2335
9	--	6,1574	3,2335
10	--	6,1574	3,2335

Meccanismi di rottura

Simbologia adottata

- n° Indice del rinforzo
- Sf Sforzo nel rinforzo per meccanismo planare, espressa in [kN/m]
- RSCO Resistenza allo scorrimento, espressa in [kN/m]
- FSSCO Fattore di sicurezza allo scorrimento
- RSFI Resistenza allo sfilamento, espressa in [kN/m]
- FSFI Fattore di sicurezza allo sfilamento
- RTRA Resistenza a trazione, espressa in [kN/m]
- FSTRA Fattore di sicurezza a trazione
- LI, LF Lunghezza libera e di fondazione, espresse in [m]

Meccanismo rottura doppio cuneo

Combinazione n° 1

Ir	Sf [kN/m]	RSCO [kN/m]	FSSCO	RSFI [kN/m]	FSFI	RTRA [kN/m]	FSTRA	LI [m]	LF [m]
1	0,0000	0,0000	100,000	0,0000	100,000	0,0000	100,000	1,94	0,00
2	0,0000	0,0000	100,000	0,0000	100,000	0,0000	100,000	2,25	0,00
3	0,0000	0,0000	100,000	0,0000	100,000	0,0000	100,000	2,56	0,00
4	0,0000	0,0000	100,000	0,0000	100,000	0,0000	100,000	2,86	0,00
5	0,0000	0,0000	100,000	0,0000	100,000	0,0000	100,000	3,17	0,00
6	4,9317	11,5684	2,346	23,1368	4,691	23,1368	5,459	2,73	0,75
7	5,7387	43,9273	7,655	87,8546	15,309	26,9231	4,691	2,20	1,58
8	5,7387	86,3338	15,044	172,6676	30,088	26,9231	4,691	1,68	2,41
9	5,7387	137,0270	23,878	274,0540	47,755	26,9231	4,691	1,15	3,24
10	5,7387	161,4352	28,131	322,8704	56,262	26,9231	4,691	0,89	3,66

Combinazione n° 2

Ir	Sf [kN/m]	RSCO [kN/m]	FSSCO	RSFI [kN/m]	FSFI	RTRA [kN/m]	FSTRA	LI [m]	LF [m]
1	0,0000	0,0000	100,000	0,0000	100,000	0,0000	100,000	1,94	0,00
2	0,0000	0,0000	100,000	0,0000	100,000	0,0000	100,000	2,25	0,00
3	0,0000	0,0000	100,000	0,0000	100,000	0,0000	100,000	2,56	0,00

Progetto di ottimizzazione del fronte perimetrale e completamento del sedime della
 Discarica di Grumolo delle Abbadesse con incremento dei volumi di conferimento

Ir	Sf [kN/m]	Rsc0 [kN/m]	FSsc0	Rsf1 [kN/m]	FSsf1	Rtra [kN/m]	FStra	LI [m]	Lf [m]
4	0,0000	0,0000	100,000	0,0000	100,000	0,0000	100,000	2,86	0,00
5	0,0000	0,0000	100,000	0,0000	100,000	0,0000	100,000	3,17	0,00
6	4,3239	11,3778	2,631	22,7556	5,263	17,5043	6,227	2,73	0,74
7	6,6505	43,3727	6,522	86,7455	13,044	26,9231	4,048	2,22	1,57
8	6,6505	85,3618	12,835	170,7235	25,671	26,9231	4,048	1,70	2,39
9	6,6505	135,7682	20,415	271,5365	40,830	26,9231	4,048	1,18	3,22
10	6,6505	160,2792	24,100	320,5585	48,201	26,9231	4,048	0,92	3,63

Combinazione n° 3

Ir	Sf [kN/m]	Rsc0 [kN/m]	FSsc0	Rsf1 [kN/m]	FSsf1	Rtra [kN/m]	FStra	LI [m]	Lf [m]
1	0,0000	0,0000	100,000	0,0000	100,000	0,0000	100,000	1,94	0,00
2	0,0000	0,0000	100,000	0,0000	100,000	0,0000	100,000	2,25	0,00
3	0,0000	0,0000	100,000	0,0000	100,000	0,0000	100,000	2,56	0,00
4	0,0000	0,0000	100,000	0,0000	100,000	0,0000	100,000	2,86	0,00
5	0,0000	0,0000	100,000	0,0000	100,000	0,0000	100,000	3,17	0,00
6	4,0033	11,3778	2,842	22,7556	5,684	17,5043	6,725	2,73	0,74
7	6,1574	43,3727	7,044	86,7455	14,088	26,9231	4,373	2,22	1,57
8	6,1574	85,3618	13,863	170,7235	27,727	26,9231	4,373	1,70	2,39
9	6,1574	135,7682	22,050	271,5365	44,099	26,9231	4,373	1,18	3,22
10	6,1574	160,2792	26,031	320,5585	52,061	26,9231	4,373	0,92	3,63

Meccanismo rottura rotazionale

Combinazione n° 1

Cerchio n° 221 - Centro (-6,09; 0,00) - Raggio 5,69 - Intersezione profilo valle (-3,20; -4,90) - Intersezione profilo monte (-0,40; 0,00)

Ir	Sf [kN/m]	Rsc0 [kN/m]	FSsc0	Rsf1 [kN/m]	FSsf1	Rtra [kN/m]	FStra	LI [m]	Lf [m]
1	0,7259	2,4781	3,414	4,9562	6,828	4,9562	37,090	1,41	0,54
2	2,0276	6,9219	3,414	13,8438	6,828	13,8438	13,279	1,50	0,75
3	3,9431	13,6695	3,467	27,3390	6,933	26,9231	6,828	1,55	1,00
4	3,9431	23,8882	6,058	47,7763	12,116	26,9231	6,828	1,55	1,31
5	3,9431	38,0950	9,661	76,1901	19,322	26,9231	6,828	1,50	1,67
6	3,9431	58,1128	14,738	116,2256	29,476	26,9231	6,828	1,39	2,08
7	3,9431	85,1095	21,584	170,2190	43,169	26,9231	6,828	1,21	2,57
8	3,9431	119,8011	30,382	239,6022	60,765	26,9231	6,828	0,94	3,14
9	3,9431	157,3637	39,908	314,7275	79,817	26,9231	6,828	0,56	3,83
10	3,9431	174,4150	44,233	348,8299	88,465	26,9231	6,828	0,31	4,24

Combinazione n° 2

Cerchio n° 221 - Centro (-6,09; 0,00) - Raggio 5,69 - Intersezione profilo valle (-3,20; -4,90) - Intersezione profilo monte (-0,40; 0,00)

Ir	Sf [kN/m]	Rsc0 [kN/m]	FSsc0	Rsf1 [kN/m]	FSsf1	Rtra [kN/m]	FStra	LI [m]	Lf [m]
1	0,4012	1,9062	4,752	3,8125	9,503	3,8125	67,109	1,41	0,54
2	1,1206	5,3246	4,752	10,6491	9,503	10,6491	24,026	1,50	0,75
3	2,2130	10,5150	4,752	21,0300	9,503	21,0300	12,166	1,55	1,00
4	2,8331	18,3755	6,486	36,7510	12,972	26,9231	9,503	1,55	1,31
5	2,8331	29,3039	10,343	58,6078	20,687	26,9231	9,503	1,50	1,67
6	2,8331	44,7022	15,779	89,4043	31,557	26,9231	9,503	1,39	2,08
7	2,8331	65,4688	23,109	130,9377	46,217	26,9231	9,503	1,21	2,57
8	2,8331	92,1547	32,528	184,3094	65,056	26,9231	9,503	0,94	3,14
9	2,8331	121,0490	42,727	242,0980	85,454	26,9231	9,503	0,56	3,83
10	2,8331	134,1654	47,356	268,3307	94,713	26,9231	9,503	0,31	4,24

Combinazione n° 3

Cerchio n° 221 - Centro (-6,09; 0,00) - Raggio 5,69 - Intersezione profilo valle (-3,20; -4,90) - Intersezione profilo monte (-0,40; 0,00)

Ir	Sf [kN/m]	Rsc0 [kN/m]	FSsc0	Rsf1 [kN/m]	FSsf1	Rtra [kN/m]	FStra	LI [m]	Lf [m]
1	0,4579	1,9062	4,163	3,8125	8,326	3,8125	58,799	1,41	0,54
2	1,2790	5,3246	4,163	10,6491	8,326	10,6491	21,050	1,50	0,75
3	2,5258	10,5150	4,163	21,0300	8,326	21,0300	10,659	1,55	1,00
4	3,2335	18,3755	5,683	36,7510	11,366	26,9231	8,326	1,55	1,31
5	3,2335	29,3039	9,062	58,6078	18,125	26,9231	8,326	1,50	1,67
6	3,2335	44,7022	13,825	89,4043	27,649	26,9231	8,326	1,39	2,08
7	3,2335	65,4688	20,247	130,9377	40,494	26,9231	8,326	1,21	2,57
8	3,2335	92,1547	28,500	184,3094	56,999	26,9231	8,326	0,94	3,14
9	3,2335	121,0490	37,436	242,0980	74,871	26,9231	8,326	0,56	3,83
10	3,2335	134,1654	41,492	268,3307	82,984	26,9231	8,326	0,31	4,24

Verifiche composte

Stabilità globale della terra armata

Simbologia e convenzioni di segno adottate
 Le ascisse X sono considerate positive verso monte
 Le ordinate Y sono considerate positive verso l'alto
 Origine in testa alla terra armata (spigolo contro terra)

Progetto di ottimizzazione del fronte perimetrale e completamento del sedime della
 Discarica di Grumolo delle Abbadesse con incremento dei volumi di conferimento

- Is Indice della striscia
- W peso della striscia espresso in [kN]
- α angolo fra la base della striscia e l'orizzontale espresso in [°] (positivo antiorario)
- ϕ angolo d'attrito del terreno lungo la base della striscia
- c coesione del terreno lungo la base della striscia espressa in [kPa]
- b larghezza della striscia espressa in [m]
- u pressione neutra lungo la base della striscia espressa in [kPa]
- N sforzo normale alla base della striscia espressa in [kN]
- T sforzo tangenziale alla base della striscia espressa in [kN]

Combinazione n° 1

Superficie di scorrimento n° 221 - $F_s = 2.23$

Is	W [kN]	α [°]	ϕ [°]	c [kPa]	b [m]	u [kPa]	N [kN]	T [kN]
1	0,61	31.997	30.000	5	0,17	0	0,51	0,50
2	1,82	32.644	30.000	5	0,17	0	1,53	0,77
3	3,00	34.972	30.000	5	0,17	0	2,46	1,02
4	4,18	36.439	30.000	5	0,17	0	3,36	1,26
5	5,32	37.946	30.000	5	0,18	0	4,20	1,49
6	6,45	40.406	30.000	5	0,18	0	4,91	1,69
7	7,55	41.622	30.000	5	0,19	0	5,64	1,89
8	8,62	43.895	30.000	5	0,19	0	6,21	2,05
9	9,67	46.032	30.000	5	0,20	0	6,71	2,19
10	10,67	47.695	30.000	5	0,21	0	7,18	2,33
11	11,58	49.844	30.000	5	0,22	0	7,47	2,43
12	11,40	52.555	30.000	5	0,23	0	6,93	2,31
13	10,78	54.747	30.000	5	0,24	0	6,22	2,16
14	10,10	57.180	30.000	5	0,26	0	5,47	2,00
15	9,35	59.879	30.000	5	0,28	0	4,69	1,84
16	8,51	62.867	30.000	5	0,31	0	3,88	1,70
17	7,55	66.153	30.000	5	0,35	0	3,05	1,57
18	6,41	69.724	30.000	5	0,40	0	2,22	1,48
19	4,98	74.753	30.000	5	0,53	0	1,31	1,54
20	2,71	83.596	30.000	5	1,26	0	0,30	2,90

Combinazione n° 2

Superficie di scorrimento n° 221 - $F_s = 2.60$

Is	W [kN]	α [°]	ϕ [°]	c [kPa]	b [m]	u [kPa]	N [kN]	T [kN]
1	0,47	31.997	30.000	5	0,17	0	0,40	0,40
2	1,40	32.644	30.000	5	0,17	0	1,18	0,58
3	2,31	34.972	30.000	5	0,17	0	1,89	0,75
4	3,21	36.439	30.000	5	0,17	0	2,59	0,91
5	4,09	37.946	30.000	5	0,18	0	3,23	1,06
6	4,96	40.406	30.000	5	0,18	0	3,78	1,19
7	5,81	41.622	30.000	5	0,19	0	4,34	1,32
8	6,63	43.895	30.000	5	0,19	0	4,78	1,43
9	7,44	46.032	30.000	5	0,20	0	5,16	1,53
10	8,21	47.695	30.000	5	0,21	0	5,53	1,63
11	8,91	49.844	30.000	5	0,22	0	5,75	1,69
12	8,77	52.555	30.000	5	0,23	0	5,33	1,62
13	8,29	54.747	30.000	5	0,24	0	4,79	1,53
14	7,77	57.180	30.000	5	0,26	0	4,21	1,43
15	7,19	59.879	30.000	5	0,28	0	3,61	1,34
16	6,55	62.867	30.000	5	0,31	0	2,99	1,25
17	5,81	66.153	30.000	5	0,35	0	2,35	1,19
18	4,93	69.724	30.000	5	0,40	0	1,71	1,16
19	3,83	74.753	30.000	5	0,53	0	1,01	1,25
20	2,08	83.596	30.000	5	1,26	0	0,23	2,46

Combinazione n° 3

Superficie di scorrimento n° 221 - $F_s = 2.48$

Is	W [kN]	α [°]	ϕ [°]	c [kPa]	b [m]	u [kPa]	N [kN]	T [kN]
1	0,47	31.997	30.000	5	0,17	0	0,40	0,43
2	1,40	32.644	30.000	5	0,17	0	1,18	0,61
3	2,31	34.972	30.000	5	0,17	0	1,89	0,79
4	3,21	36.439	30.000	5	0,17	0	2,59	0,95
5	4,09	37.946	30.000	5	0,18	0	3,23	1,11
6	4,96	40.406	30.000	5	0,18	0	3,78	1,25
7	5,81	41.622	30.000	5	0,19	0	4,34	1,39
8	6,63	43.895	30.000	5	0,19	0	4,78	1,51
9	7,44	46.032	30.000	5	0,20	0	5,16	1,61
10	8,21	47.695	30.000	5	0,21	0	5,53	1,71
11	8,91	49.844	30.000	5	0,22	0	5,75	1,78
12	8,77	52.555	30.000	5	0,23	0	5,33	1,71
13	8,29	54.747	30.000	5	0,24	0	4,79	1,60
14	7,77	57.180	30.000	5	0,26	0	4,21	1,50
15	7,19	59.879	30.000	5	0,28	0	3,61	1,40
16	6,55	62.867	30.000	5	0,31	0	2,99	1,32
17	5,81	66.153	30.000	5	0,35	0	2,35	1,25
18	4,93	69.724	30.000	5	0,40	0	1,71	1,21
19	3,83	74.753	30.000	5	0,53	0	1,01	1,31
20	2,08	83.596	30.000	5	1,26	0	0,23	2,59

4.5.4 Esiti dell'analisi H = 5,10 m

Sono di seguito riportati i listati degli esiti relativi all'analisi della sezione qui sotto indicata, a partire dai **Dati** di dettaglio inseriti nel modello, seguiti dai **Risultati**.

H [m]	B [m]	b [m]
5,10	5,00	1,70

4.5.4.1 Dati

Normativa

Spinte e verifiche secondo: N.T.C. 2018

Simbologia adottata

- γ_{Gfav} Coefficiente parziale sfavorevole sulle azioni permanenti
- γ_{Gfav} Coefficiente parziale favorevole sulle azioni permanenti
- γ_{Qfav} Coefficiente parziale sfavorevole sulle azioni variabili
- γ_{Qfav} Coefficiente parziale favorevole sulle azioni variabili
- $\gamma_{tan\phi'}$ Coefficiente parziale di riduzione dell'angolo di attrito drenato
- γ_c Coefficiente parziale di riduzione della coesione drenata
- γ_{cu} Coefficiente parziale di riduzione della coesione non drenata
- γ_{qu} Coefficiente parziale di riduzione del carico ultimo
- γ_1 Coefficiente parziale di riduzione della resistenza a compressione uniassiale delle rocce

Coefficienti di partecipazione combinazioni statiche

Coefficienti parziali per le azioni o per l'effetto delle azioni:

<i>Carichi</i>	<i>Effetto</i>		<i>EQU</i>	<i>A1</i>	<i>A2</i>
Permanenti	Favorevole	γ_{Gfav}	1.00	1.00	1.00
Permanenti	Sfavorevole	γ_{Gsfav}	1.30	1.30	1.00
Permanenti NS	Favorevole	γ_{Gfav}	0.80	0.80	0.80
Permanenti NS	Sfavorevole	γ_{Gsfav}	1.50	1.50	1.30
Variabili	Favorevole	γ_{Qfav}	0.00	0.00	0.00
Variabili	Sfavorevole	γ_{Qsfav}	1.50	1.50	1.30
Variabili TF	Favorevole	γ_{Qfav}	0.00	0.00	0.00
Variabili TF	Sfavorevole	γ_{Qsfav}	1.35	1.35	1.15

Coefficienti parziali per i parametri geotecnici del terreno:

<i>Parametri</i>			<i>M1</i>	<i>M2</i>
Tangente dell'angolo di attrito	$\gamma_{tan\phi'}$		1.00	1.25
Coesione efficace	γ_c		1.00	1.25
Resistenza non drenata	γ_{cu}		1.00	1.40
Resistenza a compressione uniassiale	γ_{qu}		1.00	1.60
Peso dell'unità di volume	γ_1		1.00	1.00

Coefficienti di partecipazione combinazioni sismiche

Coefficienti parziali per le azioni o per l'effetto delle azioni:

<i>Carichi</i>	<i>Effetto</i>		<i>EQU</i>	<i>A1</i>	<i>A2</i>
Permanenti	Favorevole	γ_{Gfav}	1.00	1.00	1.00
Permanenti	Sfavorevole	γ_{Gsfav}	1.00	1.00	1.00
Variabili	Favorevole	γ_{Qfav}	0.00	0.00	0.00
Variabili	Sfavorevole	γ_{Qsfav}	1.00	1.00	1.00

Coefficienti parziali per i parametri geotecnici del terreno:

<i>Parametri</i>			<i>M1</i>	<i>M2</i>
Tangente dell'angolo di attrito	$\gamma_{tan\phi'}$		1.00	1.00
Coesione efficace	γ_c		1.00	1.00
Resistenza non drenata	γ_{cu}		1.00	1.00
Resistenza a compressione uniassiale	γ_{qu}		1.00	1.00
Peso dell'unità di volume	γ_1		1.00	1.00

Verifiche esterne - Coefficienti parziali γ_R per le verifiche agli stati limite ultimi STR e GEO

	R1	R2	R3
Capacità portante della fondazione	1.00	1.00	1.40
Scorrimento	1.00	1.00	1.10
Resistenza del terreno a valle	1.00	1.00	1.40
Stabilità globale		1.10	

Verifiche interne - Coefficienti di sicurezza richiesti

Coefficiente di sicurezza allo scorrimento dei rinforzi	1.50
Coefficiente di sicurezza allo sfilamento del rinforzo	3.00
Coefficiente di sicurezza alla trazione del rinforzo	1.30
Coefficiente di sicurezza allo scorrimento del risvolto	1.30

Verifiche compound - Coefficienti di sicurezza richiesti

Coefficiente di sicurezza alla stabilità locale 1.30
 Coefficiente di sicurezza alla stabilità locale sismica 1.30

Descrizione terreni

Caratteristiche fisico meccaniche

Simbologia adottata

Descrizione Descrizione terreno
 γ Peso di volume del terreno espresso in [kN/mc]
 γ_{sat} Peso di volume saturo del terreno espresso in [kN/mc]
 ϕ Angolo di attrito interno del terreno espresso in [°]
 δ Angolo di attrito Muro-terreno espresso in [°]
 c Coesione del terreno espressa in [kPa]
 ca Adesione del terreno espressa in [kPa]

Descrizione	γ [kN/mc]	γ_{sat} [kN/mc]	ϕ [°]	δ [°]	c [kPa]	ca [kPa]
Muro	18,0000	18,0000	30,000	-	5,0	0,0
Copertura	20,0000	20,0000	26,000	17,000	5,0	0,0
RSU	9,0000	9,0000	17,000	11,000	10,0	0,0
Fondazione	17,5000	17,5000	27,000	27,000	10,0	0,0

Caratteristiche di deformabilità

Simbologia adottata

Descrizione Descrizione terreno
 E Modulo elastico, espresso in [kPa]
 v Coefficiente di Poisson
 G Modulo tangenziale, espresso in [kPa]
 Vs Velocità onde di taglio, espressa in [m/s]

Descrizione	E [kPa]	v	G [kPa]	Vs [m/s]
Muro	0	0,000	0	0,00
Copertura	0	0,000	0	0,00
RSU	0	0,000	0	0,00
Fondazione	0	0,000	0	0,00

Stratigrafia terreno spingente

Simbologia adottata

n° Identificativo strato
 Sp Spessore dello strato, espresso in [m]
 α Inclinazione dello strato, espresso in [°]
 Terreno Terreno dello strato

n°	Sp [m]	α [°]	Terreno
1	2,00	15,000	Copertura
2	2,10	0,000	RSU
3	8,00	0,000	Fondazione

Profilo terreno

Profilo terreno a monte

Simbologia adottata

n° Indice punto
 X Ascissa punto, espresso in [m]
 Y Ordinata punto, espresso in [m]

n°	X [m]	Y [m]									
1	15,00	4,02	2	--	--	3	--	--	4	--	--

Profilo terreno a valle

Quota terreno rispetto al piano di posa [m] 0,30
 Inclinazione terreno a valle [°] 0,000

Caratteristiche rinforzi

Simbologia adottata

Rinforzo	Identificativo del rinforzo
LTDS	Resistenza di progetto di lungo termine, espresso in [kN/m]
FS _{0g}	Fattore di sicurezza per danni di giunzione
FS _{0c}	Fattore di sicurezza per danni chimici
FS _{0e}	Fattore di sicurezza per danni biologici
FS _{0a}	Fattore di sicurezza per danni ambientali
LTDS _a	Resistenza di progetto di lungo termine ammissibile, espresso in [kN/m]

Rinforzo	LTDS [kN/m]	FS _{0g}	FS _{0c}	FS _{0b}	FS _{0a}	LTDS _a [kN/m]
rinforzo 1	35,0000	1.00	1.00	1.00	1.30	26,9231

Geometria terra armata

Simbologia adottata

Il sistema di riferimento è il punto in alto a destra della terra armata	
n°	Indice punto
X	Ascissa, espresso in [m]
Y	Ordinata, espresso in [m]

Materiale di riempimento della terra armata: Muro

n°	X [m]	Y [m]									
1	0,00	0,00	2	-1,70	0,00	3	-3,35	-5,40	4	1,65	-5,40

Descrizione rinforzi della Terra armata

Simbologia adottata

n°	Indice rinforzo
Y	Quota del rinforzo
Rinforzo	Identificativo del rinforzo
L	Lunghezza del rinforzo, espresso in [m]
Lrv	Lunghezza tratto di risvolto verticale (facciata del risvolto), espresso in [m]
Lro	Lunghezza tratto di risvolto orizzontale (interno del risvolto), espresso in [m]
Fds	Parametro di interazione rinforzo-terra utilizzato per la verifica interna a scorrimento diretto
Fpo	Parametro di interazione rinforzo-terra utilizzato per la verifica interna a sfilamento del rinforzo dal terreno

n°	Y [m]	Rinforzo	L [m]	Lrv [m]	Lro [m]	Fds	Fpo
1	-0,40	rinforzo 1	1,94	0,35	1,20	0,90	0,90
2	-0,90	rinforzo 1	2,25	0,35	1,20	0,90	0,90
3	-1,40	rinforzo 1	2,56	0,35	1,20	0,90	0,90
4	-1,90	rinforzo 1	2,86	0,35	1,20	0,90	0,90
5	-2,40	rinforzo 1	3,17	0,35	1,20	0,90	0,90
6	-2,90	rinforzo 1	3,47	0,35	1,20	0,90	0,90
7	-3,40	rinforzo 1	3,78	0,35	1,20	0,90	0,90
8	-3,90	rinforzo 1	4,08	0,35	1,20	0,90	0,90
9	-4,40	rinforzo 1	4,39	0,35	1,20	0,90	0,90
10	-4,90	rinforzo 1	4,69	0,35	1,20	0,90	0,90
11	-5,15	rinforzo 1	4,85	0,25	1,20	0,90	0,90

Dati parametri sisma

Identificazione del sito

Latitudine 45.520481
 Longitudine 11.659389
 Comune Grumolo Delle Abbadesse
 Provincia Vicenza
 Regione Veneto

Punti di interpolazione del reticolo 12295 - 12517 - 12518 - 12296

Tipo di opera

Tipo di costruzione Opera ordinaria
 Vita nominale 50 anni
 Classe d'uso III - Affollamenti significativi e industrie non pericolose

Vita di riferimento	75 anni	Descrizione	Simbolo	Tipo	SLU	SLE	U.M.
Accelerazione al suolo			a _g		1.46	0.57	[m/s ²]
Massimo fattore amplificazione spettro orizzontale			F ₀		2.45	2.45	
Periodo inizio tratto spettro a velocità costante			T _c [*]		0.30	0.27	[s]

Vita di riferimento	75 anni	Descrizione	Simbolo	Tipo	SLU	SLE	U.M.
Tipo di sottosuolo e Coefficiente stratigrafico			S _s	C	1.48	1.50	
Categoria topografica e Coefficiente amplificazione topografica			S _T	T1	1.00	1.00	
Coefficiente di riduzione			β _m		0.38	0.47	

Intensità sismica Verticale/Orizzontale 0.50
 Forma diagramma incremento sismico **Stessa forma diagramma statico**

Opzioni di calcolo

Le verifiche di capacità portante sono state eseguite con il metodo di VESIC.
 Le verifiche di stabilità globale e di compound sono state eseguite con il metodo di BISHOP.
 Per le verifiche interne sono stati analizzati i meccanismi:
 - rottura superficie curvilinea (Circolare)

Descrizione combinazioni di carico

Simbologia adottata

γ Coefficiente di partecipazione della condizione
 Ψ Coefficiente di combinazione della condizione

Combinazione n° 1 - SLU (Approccio 2)

Condizione	γ	Ψ	Effetto
Peso proprio	1.30	1.00	Sfavorevole
Spinta terreno	1.30	1.00	Sfavorevole

Combinazione n° 2 - SLU (Approccio 2) - Sisma Vert. positivo

Condizione	γ	Ψ	Effetto
Peso proprio	1.00	1.00	Sfavorevole
Spinta terreno	1.00	1.00	Sfavorevole

Combinazione n° 3 - SLU (Approccio 2) - Sisma Vert. negativo

Condizione	γ	Ψ	Effetto
Peso proprio	1.00	1.00	Sfavorevole
Spinta terreno	1.00	1.00	Sfavorevole

Combinazione n° 4 - EQU

Condizione	γ	Ψ	Effetto
Peso proprio	1.00	1.00	Favorevole
Spinta terreno	1.30	1.00	Sfavorevole

Combinazione n° 5 - EQU - Sisma Vert. positivo

Condizione	γ	Ψ	Effetto
Peso proprio	1.00	1.00	Favorevole
Spinta terreno	1.00	1.00	Sfavorevole

Combinazione n° 6 - EQU - Sisma Vert. negativo

Condizione	γ	Ψ	Effetto
Peso proprio	1.00	1.00	Favorevole
Spinta terreno	1.00	1.00	Sfavorevole

Combinazione n° 7 - STAB

Condizione	γ	Ψ	Effetto
Peso proprio	1.00	1.00	Sfavorevole
Spinta terreno	1.00	1.00	Sfavorevole

Combinazione n° 8 - STAB - Sisma Vert. positivo

Condizione	γ	Ψ	Effetto
Peso proprio	1.00	1.00	Sfavorevole
Spinta terreno	1.00	1.00	Sfavorevole

Combinazione n° 9 - STAB - Sisma Vert. negativo

Condizione	γ	Ψ	Effetto
Peso proprio	1.00	1.00	Sfavorevole
Spinta terreno	1.00	1.00	Sfavorevole

Progetto di ottimizzazione del fronte perimetrale e completamento del sedime della Discarica di Grumolo delle Abbadesse con incremento dei volumi di conferimento

4.5.4.2 Risultati

Sintesi - Fattori di sicurezza

Verifiche esterne

Simbologia adottata

IC Indice della combinazione
 FSRib Fattore di sicurezza a ribaltamento
 FScor Fattore di sicurezza a scorrimento
 FSqlim Fattore di sicurezza a carico limite
 FSstab Fattore di sicurezza a stabilità globale

IC	FScor	FSqlim	FSRib	FSstab
1	1.612	4.000	--	--
2	1.249	3.244	--	--
3	1.257	3.681	--	--
4	--	--	3.438	--
5	--	--	2.348	--
6	--	--	2.296	--
7	--	--	--	2.060
8	--	--	--	2.097
9	--	--	--	2.090

Verifiche interne

Simbologia adottata

n° Indice rinforzo
 FScor Fattore di sicurezza a scorrimento
 FSfil Fattore di sicurezza a sfilamento
 FSTraz Fattore di sicurezza a trazione
 FScorR Fattore di sicurezza a scorrimento del risvolto

Combinazione n° 1

n°	FScor	FSfil	FSTraz	FScorR
1	2.349	4.697	26.502	--
2	2.769	5.538	10.913	--
3	2.943	5.887	5.812	--
4	5.037	10.075	5.812	--
5	7.910	15.820	5.812	--
6	11.871	23.741	5.812	--
7	17.116	34.231	5.812	--
8	23.912	47.823	5.812	--
9	31.852	63.704	5.812	--
10	39.926	79.851	5.812	--
11	43.872	87.745	5.812	--

Combinazione n° 2

n°	FScor	FSfil	FSTraz	FScorR
1	3.390	6.780	47.933	--
2	3.618	7.236	18.311	--
3	3.930	7.859	10.086	--
4	5.240	10.480	7.859	--
5	8.228	16.456	7.859	--
6	12.348	24.697	7.859	--
7	17.804	35.609	7.859	--
8	24.874	49.747	7.859	--
9	33.134	66.267	7.859	--
10	28.848	57.697	5.310	--
11	45.638	91.275	7.859	--

Combinazione n° 3

n°	FScor	FSfil	FSTraz	FScorR
1	3.429	6.858	46.760	--
2	3.429	6.858	17.029	--
3	3.429	6.858	8.801	--
4	4.572	9.145	6.858	--
5	7.180	14.360	6.858	--
6	10.775	21.550	6.858	--
7	15.536	31.072	6.858	--
8	21.705	43.409	6.858	--
9	28.912	57.825	6.858	--
10	36.241	72.482	6.858	--
11	39.823	79.647	6.858	--

Verifiche composte

Simbologia adottata

IC Indice della combinazione
 FS_{comp} Coefficiente di sicurezza a stabilità locale (compound)

IC	FS _{comp}
1	2.139
2	2.501
3	2.365

Verifiche esterne

Risultati spinta

Simbologia adottata

n° Indice della combinazione
 S Spinta statica, incremento sismico della spinta e spinta falda, espresse in [kN]
 So Componente orizzontale della spinta statica, espresse in [kN]
 Sv Componente verticale della spinta statica, dell'incremento sismico o la sottospinta della falda, espresse in [kN]
 P Punto di applicazione della spinta, dell'incremento sismico e della spinta della falda, espresse in [kN]
 Is Inclinazione della spinta rispetto all'orizzontale, espresa in [°]

n°	Descrizione	S [kN]	So [kN]	Sv [kN]	P [m]	Is [°]
1	Spinta statica	155,47	148,42	46,29	0,00; -3,50	17,32
2	Spinta statica	104,84	100,02	31,44	0,00; -3,54	17,45
	Incremento sismico	28,67	27,35	8,60	0,00; -1,88	
3	Spinta statica	104,84	100,02	31,44	0,00; -3,54	17,45
	Incremento sismico	14,23	13,57	4,27	0,00; -1,88	

Risultanti al piano di posa

Simbologia adottata

n° Indice della combinazione
 Rp Risultante al piano di posa, espresa in [kN]
 β Inclinazione della risultante rispetto al piano di posa, espresse in [°]
 Rn Risultante normale al piano di posa, espresa in [kN]
 Rt Risultante tangente al piano di posa, espresa in [kN]
 Rx Risultante in direzione X, espresa in [kN]
 Ry Risultante in direzione Y, espresa in [kN]
 e Eccentricità rispetto al baricentro della fondazione, espresa in [m]
 Mr Momento ribaltante, espresso in [kNm]
 Ms Momento stabilizzante, espresso in [kNm]

n°	Rp [kN]	β [°]	Rn [kN]	Rt [kN]	Rx [kN]	Ry [kN]	e [m]	Mr [kNm]	Ms [kNm]
1	492,49	17.54	469,59	148,42	148,42	469,59	0,516		
2	409,66	22.19	379,33	154,69	154,69	379,33	0,817		
3	375,14	22.06	347,67	140,92	140,92	347,67	0,763		
4	400,43	21.76	371,91	148,42	148,42	371,91	0,652	281,87	969,12
5	432,84	25.29	391,36	184,90	184,90	391,36	1,008	433,01	1016,85
6	380,97	25.51	343,82	164,08	164,08	343,82	0,951	411,03	943,69

Verifica a carico limite

Simbologia adottata

n° Indice della combinazione
 Rn Risultante normale al piano di posa, espresa in [kN]
 Qu Carico ultimo della fondazione, espresa in [kN]
 Pv Pressione terreno allo spigolo di valle, espresa in [kPa]
 Pm Pressione terreno allo spigolo di monte, espresa in [kPa]
 Lr Lunghezza fondazione reagente, espresa in [m]
 Nc, Nq, N_g Coeff. di capacità portante
 N'c, N'q, N'_g Coeff. di capacità portante corretti dai coeff. di forma, profondità, inclinazione del piano di posa e inclinazione del piano campagna a valle

n°	N [kN]	Qu [kN]	Pv [kPa]	Pm [kPa]	Lr [m]	Nc	Nq	N _g	N'c	N'q	N' _g
1	469,59	1878,21	152,1	35,7	5,00	23.94	13.20	14.47	15.02	8.63	6.35
2	379,33	1230,49	150,3	1,5	5,00	23.94	13.20	14.47	12.39	7.29	4.65
3	347,67	1279,81	133,2	5,9	5,00	23.94	13.20	14.47	12.46	7.33	4.69

Stabilità globale terra armata + terreno

Simbologia e convenzioni di segno adottate

Le ascisse X sono considerate positive verso monte
 Le ordinate Y sono considerate positive verso l'alto
 Origine in testa alla terra armata (spigolo contro terra)
 Is Indice della striscia
 W peso della striscia espresso in [kN]

Progetto di ottimizzazione del fronte perimetrale e completamento del sedime della
 Discarica di Grumolo delle Abbadesse con incremento dei volumi di conferimento

- α angolo fra la base della striscia e l'orizzontale espresso in [°] (positivo antiorario)
- φ angolo d'attrito del terreno lungo la base della striscia
- c coesione del terreno lungo la base della striscia espressa in [kPa]
- l lunghezza della base della striscia espressa in [m]
- u pressione neutra lungo la base della striscia espressa in [kPa]
- N sforzo normale alla base della striscia espressa in [kN]
- T sforzo tangenziale alla base della striscia espressa in [kN]
- Rt, Rn Resistenza tangenziale e normale del rinforzo alla base della striscia espressa in [kN]

Combinazione n° 7

Superficie di scorrimento n° 1607 - $F_s = 2.06$

Is	W [kN]	α [°]	φ [°]	c [kPa]	l [m]	u [kPa]	N [kN]	T [kN]	EI [kN]	Er [kN]	Rt [kN]	Rn [kN]
1	11,33	-38.337	22.177	80000	1,56	0	22,77	7,80	0,00	20,24	0,00	0,00
2	29,53	-32.472	22.177	80000	1,45	0	44,12	10,53	20,24	52,81	0,00	0,00
3	44,34	-26.900	22.177	80000	1,38	0	58,24	13,11	52,81	90,85	0,00	0,00
4	56,42	-21.771	22.177	80000	1,32	0	68,16	15,43	90,85	130,46	0,00	0,00
5	65,79	-16.934	22.177	80000	1,28	0	74,76	17,36	130,46	168,84	0,00	0,00
6	72,66	-12.313	22.177	80000	1,26	0	78,82	18,84	168,84	204,06	0,00	0,00
7	77,19	-7.841	22.177	80000	1,24	0	80,77	19,85	204,06	234,75	0,00	0,00
8	79,48	-2.873	22.177	80000	1,23	0	80,61	20,39	234,75	259,15	0,00	0,00
9	80,98	2.461	22.177	80000	1,23	0	80,17	20,69	259,15	276,38	0,00	0,00
10	137,11	6.848	22.177	80000	1,24	0	134,34	31,60	276,38	291,73	0,00	0,00
11	185,85	11.317	22.177	80000	1,25	0	181,42	40,74	291,73	296,09	0,00	0,00
12	182,07	15.927	22.177	80000	1,28	0	177,93	39,43	296,09	285,18	0,00	0,00
13	161,84	20.807	22.177	80000	1,31	0	159,28	34,88	285,18	261,21	0,00	0,00
14	147,67	26.672	22.177	80000	1,37	0	147,95	31,31	261,21	222,77	0,00	0,00
15	136,81	31.872	22.177	80000	1,44	0	140,42	28,48	222,77	172,81	0,00	0,00
16	122,39	37.444	22.177	80000	1,54	0	129,97	25,12	172,81	113,74	0,00	0,00
17	103,62	43.449	22.177	80000	1,69	0	115,06	21,35	113,74	50,11	0,00	0,00
18	86,64	50.640	13.744	80000	1,93	0	111,44	13,97	50,11	-27,19	0,00	0,00
19	71,21	58.972	13.744	80000	2,38	0	102,67	13,54	-27,19	-108,19	0,00	0,00
20	39,08	69.927	21.315	40000	3,57	0	62,63	9,44	-108,19	-163,78	0,00	0,00

Combinazione n° 8

Superficie di scorrimento n° 1607 - $F_s = 2.10$

Is	W [kN]	α [°]	φ [°]	c [kPa]	l [m]	u [kPa]	N [kN]	T [kN]	EI [kN]	Er [kN]	Rt [kN]	Rn [kN]
1	11,33	-38.337	27.000	100000	1,56	0	24,36	9,56	0,00	21,66	0,00	0,00
2	29,53	-32.472	27.000	100000	1,45	0	44,82	12,92	21,66	54,14	0,00	0,00
3	44,34	-26.900	27.000	100000	1,38	0	58,06	16,08	54,14	91,03	0,00	0,00
4	56,42	-21.771	27.000	100000	1,32	0	67,19	18,93	91,03	128,80	0,00	0,00
5	65,79	-16.934	27.000	100000	1,28	0	73,12	21,29	128,80	164,94	0,00	0,00
6	72,66	-12.313	27.000	100000	1,26	0	76,59	23,11	164,94	197,76	0,00	0,00
7	77,19	-7.841	27.000	100000	1,24	0	78,06	24,36	197,76	226,06	0,00	0,00
8	79,48	-2.873	27.000	100000	1,23	0	77,47	25,01	226,06	248,25	0,00	0,00
9	80,98	2.461	27.000	100000	1,23	0	76,61	25,38	248,25	263,52	0,00	0,00
10	137,11	6.848	27.000	100000	1,24	0	127,88	38,76	263,52	275,25	0,00	0,00
11	185,85	11.317	27.000	100000	1,25	0	172,07	49,98	275,25	274,90	0,00	0,00
12	182,07	15.927	27.000	100000	1,28	0	168,08	48,37	274,90	260,00	0,00	0,00
13	161,84	20.807	27.000	100000	1,31	0	149,75	42,79	260,00	233,23	0,00	0,00
14	147,67	26.672	27.000	100000	1,37	0	138,26	38,40	233,23	193,09	0,00	0,00
15	136,81	31.872	27.000	100000	1,44	0	130,47	34,93	193,09	142,38	0,00	0,00
16	122,39	37.444	27.000	100000	1,54	0	119,89	30,81	142,38	83,69	0,00	0,00
17	103,62	43.449	27.000	100000	1,69	0	105,09	26,20	83,69	21,74	0,00	0,00
18	86,64	50.640	17.000	100000	1,93	0	101,72	17,14	21,74	-53,30	0,00	0,00
19	71,21	58.972	17.000	100000	2,38	0	91,52	16,61	-53,30	-129,15	0,00	0,00
20	39,08	69.927	26.000	50000	3,57	0	52,60	11,58	-129,15	-177,85	0,00	0,00

Combinazione n° 9

Superficie di scorrimento n° 1607 - $F_s = 2.09$

Is	W [kN]	α [°]	φ [°]	c [kPa]	l [m]	u [kPa]	N [kN]	T [kN]	EI [kN]	Er [kN]	Rt [kN]	Rn [kN]
1	11,33	-38.337	27.000	100000	1,56	0	25,91	9,60	0,00	22,65	0,00	0,00
2	29,53	-32.472	27.000	100000	1,45	0	48,34	12,96	22,65	57,06	0,00	0,00
3	44,34	-26.900	27.000	100000	1,38	0	62,86	16,14	57,06	96,17	0,00	0,00
4	56,42	-21.771	27.000	100000	1,32	0	72,87	19,00	96,17	136,10	0,00	0,00
5	65,79	-16.934	27.000	100000	1,28	0	79,38	21,37	136,10	174,14	0,00	0,00
6	72,66	-12.313	27.000	100000	1,26	0	83,20	23,19	174,14	208,45	0,00	0,00
7	77,19	-7.841	27.000	100000	1,24	0	84,84	24,44	208,45	237,76	0,00	0,00
8	79,48	-2.873	27.000	100000	1,23	0	84,24	25,10	237,76	260,37	0,00	0,00
9	80,98	2.461	27.000	100000	1,23	0	83,34	25,47	260,37	275,44	0,00	0,00
10	137,11	6.848	27.000	100000	1,24	0	139,13	38,90	275,44	285,97	0,00	0,00
11	185,85	11.317	27.000	100000	1,25	0	187,21	50,16	285,97	282,81	0,00	0,00
12	182,07	15.927	27.000	100000	1,28	0	182,89	48,54	282,81	264,02	0,00	0,00
13	161,84	20.807	27.000	100000	1,31	0	163,00	42,94	264,02	232,67	0,00	0,00
14	147,67	26.672	27.000	100000	1,37	0	150,56	38,54	232,67	187,14	0,00	0,00
15	136,81	31.872	27.000	100000	1,44	0	142,14	35,05	187,14	130,37	0,00	0,00
16	122,39	37.444	27.000	100000	1,54	0	130,72	30,92	130,37	65,18	0,00	0,00
17	103,62	43.449	27.000	100000	1,69	0	114,74	26,29	65,18	-3,34	0,00	0,00
18	86,64	50.640	17.000	100000	1,93	0	111,37	17,20	-3,34	-85,81	0,00	0,00
19	71,21	58.972	17.000	100000	2,38	0	100,74	16,67	-85,81	-169,52	0,00	0,00
20	39,08	69.927	26.000	50000	3,57	0	58,32	11,62	-169,52	-223,59	0,00	0,00

Progetto di ottimizzazione del fronte perimetrale e completamento del sedime della Discarica di Grumolo delle Abbadesse con incremento dei volumi di conferimento

Verifiche interne

Risultati rinforzi

Simbologia adottata

Ir Indice rinforzo
 Sft Sforzo nel rinforzo per meccanismo planare, espressa in [kN/m]
 Sfdc Sforzo nel rinforzo per meccanismo doppio cuneo, espressa in [kN/m]
 Sfr Sforzo nel rinforzo per meccanismo rotazionale, espressa in [kN/m] (sforzo che ha determinato il fattore di sicurezza minore a scorrimento)
 Gli sforzi nei rinforzi possono essere nulli. In tal caso la stabilità della superficie analizzata è garantita a meno del contributo dei rinforzi.

Combinazione n° 1

Ir	Sft [kN/m]	Sfdc [kN/m]	Sfr [kN/m]
1	--	--	1,0159
2	--	--	2,4672
3	--	--	4,6327
4	--	--	4,6327
5	--	--	4,6327
6	--	--	4,6327
7	--	--	4,6327
8	--	--	4,6327
9	--	--	4,6327
10	--	--	4,6327
11	--	--	4,6327

Combinazione n° 2

Ir	Sft [kN/m]	Sfdc [kN/m]	Sfr [kN/m]
1	--	--	0,5758
2	--	--	1,4703
3	--	--	2,6692
4	--	--	3,4258
5	--	--	3,4258
6	--	--	3,4258
7	--	--	3,4258
8	--	--	3,4258
9	--	--	3,4258
10	--	--	5,0698
11	--	--	3,4258

Combinazione n° 3

Ir	Sft [kN/m]	Sfdc [kN/m]	Sfr [kN/m]
1	--	--	0,5758
2	--	--	1,5810
3	--	--	3,0590
4	--	--	3,9259
5	--	--	3,9259
6	--	--	3,9259
7	--	--	3,9259
8	--	--	3,9259
9	--	--	3,9259
10	--	--	3,9259
11	--	--	3,9259

Meccanismi di rottura

Simbologia adottata

n° Indice del rinforzo
 Sf Sforzo nel rinforzo per meccanismo planare, espressa in [kN/m]
 Rsco Resistenza allo scorrimento, espressa in [kN/m]
 FSsco Fattore di sicurezza allo scorrimento
 Rsfi Resistenza allo sfilamento, espressa in [kN/m]
 FSsfi Fattore di sicurezza allo sfilamento
 Rtra Resistenza a trazione, espressa in [kN/m]
 FStra Fattore di sicurezza a trazione
 Ll, Lf Lunghezza libera e di fondazione, espresse in [m]

Meccanismo rottura rotazionale

Combinazione n° 1

Cerchio n° 241 - Centro (-6,86; 0,00) - Raggio 6,44 - Intersezione profilo valle (-3,35; -5,40) - Intersezione profilo monte (-0,42; 0,00)

Ir	Sf [kN/m]	Rsco [kN/m]	FSsco	Rsfi [kN/m]	FSsfi	Rtra [kN/m]	FStra	Ll [m]	Lf [m]
1	0,8832	2,5665	2,906	5,1330	5,812	5,1330	30,482	1,39	0,55
2	2,4254	7,0475	2,906	14,0951	5,812	14,0951	11,101	1,49	0,76
3	4,6327	13,6354	2,943	27,2709	5,887	26,9231	5,812	1,55	1,00
4	4,6327	23,3363	5,037	46,6727	10,075	26,9231	5,812	1,57	1,29

Progetto di ottimizzazione del fronte perimetrale e completamento del sedime della
 Discarica di Grumolo delle Abbadesse con incremento dei volumi di conferimento

Ir	Sf [kN/m]	RSCO [kN/m]	FSSCO	RSFI [kN/m]	FSFI	RTRA [kN/m]	FSTRA	LI [m]	LF [m]
5	4,6327	36,6435	7.910	73,2869	15.820	26,9231	5.812	1,55	1,62
6	4,6327	54,9933	11.871	109,9867	23.741	26,9231	5.812	1,48	2,00
7	4,6327	79,2911	17.116	158,5822	34.231	26,9231	5.812	1,35	2,43
8	4,6327	110,7745	23.912	221,5490	47.823	26,9231	5.812	1,16	2,93
9	4,6327	147,5604	31.852	295,1208	63.704	26,9231	5.812	0,89	3,50
10	4,6327	184,9624	39.926	369,9248	79.851	26,9231	5.812	0,51	4,18
11	4,6327	203,2462	43.872	406,4925	87.745	26,9231	5.812	0,28	4,57

Combinazione n° 2

Cerchio n° 241 - Centro (-6,86; 0,00) - Raggio 6,44 - Intersezione profilo valle (-3,35; -5,40) - Intersezione profilo monte (-0,42; 0,00)

Ir	Sf [kN/m]	RSCO [kN/m]	FSSCO	RSFI [kN/m]	FSFI	RTRA [kN/m]	FSTRA	LI [m]	LF [m]
1	0,5024	1,9742	3.930	3,9485	7.859	3,9485	53.588	1,39	0,55
2	1,3796	5,4212	3.930	10,8424	7.859	10,8424	19.515	1,49	0,76
3	2,6692	10,4888	3.930	20,9776	7.859	20,9776	10.086	1,55	1,00
4	3,4258	17,9510	5.240	35,9020	10.480	26,9231	7.859	1,57	1,29
5	3,4258	28,1873	8.228	56,3745	16.456	26,9231	7.859	1,55	1,62
6	3,4258	42,3026	12.348	84,6051	24.697	26,9231	7.859	1,48	2,00
7	3,4258	60,9932	17.804	121,9863	35.609	26,9231	7.859	1,35	2,43
8	3,4258	85,2112	24.874	170,4223	49.747	26,9231	7.859	1,16	2,93
9	3,4258	113,5080	33.134	227,0160	66.267	26,9231	7.859	0,89	3,50
10	3,4258	142,2788	41.532	284,5576	83.064	26,9231	7.859	0,51	4,18
11	3,4258	156,3433	45.638	312,6865	91.275	26,9231	7.859	0,28	4,57

Combinazione n° 3

Cerchio n° 241 - Centro (-6,86; 0,00) - Raggio 6,44 - Intersezione profilo valle (-3,35; -5,40) - Intersezione profilo monte (-0,42; 0,00)

Ir	Sf [kN/m]	RSCO [kN/m]	FSSCO	RSFI [kN/m]	FSFI	RTRA [kN/m]	FSTRA	LI [m]	LF [m]
1	0,5758	1,9742	3.429	3,9485	6.858	3,9485	46.760	1,39	0,55
2	1,5810	5,4212	3.429	10,8424	6.858	10,8424	17.029	1,49	0,76
3	3,0590	10,4888	3.429	20,9776	6.858	20,9776	8.801	1,55	1,00
4	3,9259	17,9510	4.572	35,9020	9.145	26,9231	6.858	1,57	1,29
5	3,9259	28,1873	7.180	56,3745	14.360	26,9231	6.858	1,55	1,62
6	3,9259	42,3026	10.775	84,6051	21.550	26,9231	6.858	1,48	2,00
7	3,9259	60,9932	15.536	121,9863	31.072	26,9231	6.858	1,35	2,43
8	3,9259	85,2112	21.705	170,4223	43.409	26,9231	6.858	1,16	2,93
9	3,9259	113,5080	28.912	227,0160	57.825	26,9231	6.858	0,89	3,50
10	3,9259	142,2788	36.241	284,5576	72.482	26,9231	6.858	0,51	4,18
11	3,9259	156,3433	39.823	312,6865	79.647	26,9231	6.858	0,28	4,57

Verifiche composte

Stabilità globale della terra armata

Simbologia e convenzioni di segno adottate

- Le ascisse X sono considerate positive verso monte
- Le ordinate Y sono considerate positive verso l'alto
- Origine in testa alla terra armata (spigolo contro terra)
- Is Indice della striscia
- W peso della striscia espresso in [kN]
- α angolo fra la base della striscia e l'orizzontale espresso in [°] (positivo antiorario)
- φ angolo d'attrito del terreno lungo la base della striscia
- c coesione del terreno lungo la base della striscia espressa in [kPa]
- b larghezza della striscia espressa in [m]
- u pressione neutra lungo la base della striscia espressa in [kPa]
- N sforzo normale alla base della striscia espressa in [kN]
- T sforzo tangenziale alla base della striscia espressa in [kN]

Combinazione n° 1

Superficie di scorrimento n° 207 - Fs = 4,90

Is	W [kN]	α [°]	φ [°]	c [kPa]	b [m]	u [kPa]	N [kN]	T [kN]
1	0,13	57.408	30.000	5	0,15	0	0,07	0,16
2	0,40	57.733	30.000	5	0,15	0	0,21	0,18
3	0,66	58.983	30.000	5	0,16	0	0,34	0,20
4	0,91	59.752	30.000	5	0,16	0	0,46	0,22
5	1,15	60.558	30.000	5	0,17	0	0,56	0,24
6	1,38	61.881	30.000	5	0,17	0	0,65	0,25
7	1,59	62.575	30.000	5	0,18	0	0,73	0,27
8	1,79	63.707	30.000	5	0,18	0	0,79	0,28
9	1,98	64.965	30.000	5	0,19	0	0,84	0,30
10	2,15	65.922	30.000	5	0,20	0	0,88	0,31
11	2,30	66.986	30.000	5	0,21	0	0,90	0,32
12	2,43	68.432	30.000	5	0,22	0	0,89	0,33
13	2,54	69.782	30.000	5	0,24	0	0,88	0,34
14	2,61	71.142	30.000	5	0,25	0	0,84	0,36
15	2,64	72.633	30.000	5	0,27	0	0,79	0,37
16	2,63	74.259	30.000	5	0,30	0	0,71	0,39
17	2,55	76.030	30.000	5	0,34	0	0,62	0,42
18	2,37	78.409	30.000	5	0,41	0	0,48	0,47

Is	W [kN]	α [°]	ϕ [°]	c [kPa]	b [m]	u [kPa]	N [kN]	T [kN]
19	2,03	80.948	30.000	5	0,52	0	0,32	0,57
20	1,11	85.230	30.000	5	0,98	0	0,09	1,01

Superficie di scorrimento n° 209 - $F_s = 5.60$

Is	W [kN]	α [°]	ϕ [°]	c [kPa]	b [m]	u [kPa]	N [kN]	T [kN]
1	0,12	60.059	30.000	5	0,16	0	0,06	0,15
2	0,36	60.509	30.000	5	0,17	0	0,18	0,17
3	0,59	61.355	30.000	5	0,17	0	0,28	0,18
4	0,81	62.327	30.000	5	0,18	0	0,38	0,20
5	1,02	62.935	30.000	5	0,18	0	0,46	0,21
6	1,22	63.946	30.000	5	0,19	0	0,54	0,22
7	1,41	64.929	30.000	5	0,19	0	0,60	0,23
8	1,58	65.718	30.000	5	0,20	0	0,65	0,24
9	1,73	66.578	30.000	5	0,21	0	0,69	0,26
10	1,87	67.833	30.000	5	0,22	0	0,71	0,27
11	1,99	68.848	30.000	5	0,23	0	0,72	0,28
12	2,09	69.909	30.000	5	0,24	0	0,72	0,29
13	2,16	71.057	30.000	5	0,25	0	0,70	0,30
14	2,20	72.297	30.000	5	0,27	0	0,67	0,31
15	2,20	73.630	30.000	5	0,29	0	0,62	0,32
16	2,16	75.057	30.000	5	0,32	0	0,56	0,34
17	2,05	76.572	30.000	5	0,35	0	0,48	0,36
18	1,85	78.577	30.000	5	0,41	0	0,37	0,41
19	1,51	80.657	30.000	5	0,50	0	0,25	0,48
20	0,74	83.542	30.000	5	0,73	0	0,08	0,66

Superficie di scorrimento n° 212 - $F_s = 3.29$

Is	W [kN]	α [°]	ϕ [°]	c [kPa]	b [m]	u [kPa]	N [kN]	T [kN]
1	0,25	50.357	30.000	5	0,16	0	0,16	0,27
2	0,76	50.826	30.000	5	0,16	0	0,48	0,33
3	1,25	52.249	30.000	5	0,17	0	0,76	0,39
4	1,73	53.314	30.000	5	0,17	0	1,03	0,44
5	2,20	54.141	30.000	5	0,17	0	1,29	0,49
6	2,65	55.918	30.000	5	0,18	0	1,48	0,54
7	3,08	56.804	30.000	5	0,19	0	1,69	0,58
8	3,50	57.926	30.000	5	0,19	0	1,86	0,62
9	3,90	59.693	30.000	5	0,20	0	1,97	0,65
10	4,27	60.874	30.000	5	0,21	0	2,08	0,68
11	4,62	62.180	30.000	5	0,22	0	2,16	0,71
12	4,94	63.623	30.000	5	0,23	0	2,20	0,73
13	5,23	65.495	30.000	5	0,25	0	2,17	0,75
14	5,47	67.149	30.000	5	0,26	0	2,12	0,77
15	5,67	68.935	30.000	5	0,28	0	2,04	0,79
16	5,64	70.873	30.000	5	0,31	0	1,85	0,80
17	4,95	73.246	30.000	5	0,35	0	1,43	0,79
18	4,06	75.811	30.000	5	0,42	0	1,00	0,81
19	2,97	78.974	30.000	5	0,53	0	0,57	0,91
20	1,36	83.938	30.000	5	0,97	0	0,14	1,50

Superficie di scorrimento n° 219 - $F_s = 2.90$

Is	W [kN]	α [°]	ϕ [°]	c [kPa]	b [m]	u [kPa]	N [kN]	T [kN]
1	0,38	48.484	30.000	5	0,19	0	0,25	0,37
2	1,13	49.236	30.000	5	0,19	0	0,74	0,47
3	1,87	50.171	30.000	5	0,19	0	1,20	0,57
4	2,59	51.740	30.000	5	0,20	0	1,60	0,66
5	3,29	52.670	30.000	5	0,20	0	1,99	0,75
6	3,97	53.669	30.000	5	0,21	0	2,35	0,83
7	4,63	55.232	30.000	5	0,22	0	2,64	0,90
8	5,27	56.472	30.000	5	0,22	0	2,91	0,96
9	5,88	57.680	30.000	5	0,23	0	3,14	1,02
10	6,46	58.977	30.000	5	0,24	0	3,33	1,07
11	7,01	60.369	30.000	5	0,25	0	3,46	1,12
12	7,52	61.981	30.000	5	0,26	0	3,53	1,15
13	7,97	63.564	30.000	5	0,28	0	3,55	1,18
14	7,62	65.178	30.000	5	0,29	0	3,20	1,14
15	6,83	66.893	30.000	5	0,31	0	2,68	1,07
16	5,96	68.945	30.000	5	0,34	0	2,14	1,02
17	4,99	71.024	30.000	5	0,38	0	1,62	0,97
18	3,90	73.181	30.000	5	0,42	0	1,13	0,96
19	2,61	76.087	30.000	5	0,51	0	0,63	1,01
20	0,99	79.365	30.000	5	0,67	0	0,18	1,18

Superficie di scorrimento n° 221 - $F_s = 2.30$

Is	W [kN]	α [°]	ϕ [°]	c [kPa]	b [m]	u [kPa]	N [kN]	T [kN]
1	0,63	33.289	30.000	5	0,17	0	0,52	0,50
2	1,88	33.900	30.000	5	0,17	0	1,56	0,77
3	3,11	36.197	30.000	5	0,18	0	2,51	1,02
4	4,33	37.595	30.000	5	0,18	0	3,43	1,25
5	5,52	39.105	30.000	5	0,18	0	4,28	1,47
6	6,68	41.463	30.000	5	0,19	0	5,01	1,67
7	7,82	42.641	30.000	5	0,19	0	5,75	1,87

Progetto di ottimizzazione del fronte perimetrale e completamento del sedime della
 Discarica di Grumolo delle Abbadesse con incremento dei volumi di conferimento

Is	W [kN]	α [°]	ϕ [°]	c [kPa]	b [m]	u [kPa]	N [kN]	T [kN]
8	8,93	44.922	30.000	5	0,20	0	6,32	2,02
9	10,01	46.952	30.000	5	0,21	0	6,83	2,17
10	11,05	48.574	30.000	5	0,22	0	7,31	2,30
11	12,05	50.738	30.000	5	0,23	0	7,63	2,40
12	12,20	53.332	30.000	5	0,24	0	7,29	2,35
13	11,54	55.476	30.000	5	0,25	0	6,54	2,19
14	10,81	57.857	30.000	5	0,27	0	5,75	2,03
15	10,00	60.502	30.000	5	0,29	0	4,92	1,87
16	9,10	63.429	30.000	5	0,32	0	4,07	1,72
17	8,07	66.650	30.000	5	0,36	0	3,20	1,59
18	6,85	70.150	30.000	5	0,42	0	2,33	1,50
19	5,32	75.061	30.000	5	0,56	0	1,37	1,55
20	2,89	83.726	30.000	5	1,31	0	0,32	2,93

Superficie di scorrimento n° 223 - $F_s = 2.46$

Is	W [kN]	α [°]	ϕ [°]	c [kPa]	b [m]	u [kPa]	N [kN]	T [kN]
1	0,58	40.917	30.000	5	0,19	0	0,44	0,49
2	1,73	41.797	30.000	5	0,19	0	1,29	0,69
3	2,86	43.022	30.000	5	0,20	0	2,09	0,89
4	3,97	44.866	30.000	5	0,20	0	2,81	1,07
5	5,05	45.962	30.000	5	0,21	0	3,51	1,24
6	6,11	47.233	30.000	5	0,21	0	4,15	1,40
7	7,15	49.254	30.000	5	0,22	0	4,66	1,54
8	8,15	50.597	30.000	5	0,23	0	5,17	1,67
9	9,12	52.044	30.000	5	0,23	0	5,61	1,79
10	10,06	53.605	30.000	5	0,24	0	5,97	1,89
11	10,95	55.654	30.000	5	0,25	0	6,18	1,96
12	10,99	57.434	30.000	5	0,27	0	5,92	1,93
13	10,21	59.292	30.000	5	0,28	0	5,22	1,79
14	9,37	61.283	30.000	5	0,30	0	4,50	1,66
15	8,46	63.414	30.000	5	0,32	0	3,78	1,54
16	7,45	65.686	30.000	5	0,35	0	3,07	1,42
17	6,31	68.377	30.000	5	0,39	0	2,33	1,33
18	5,01	71.323	30.000	5	0,45	0	1,60	1,28
19	3,44	74.742	30.000	5	0,54	0	0,91	1,32
20	1,36	79.197	30.000	5	0,76	0	0,25	1,61

Superficie di scorrimento n° 225 - $F_s = 2.59$

Is	W [kN]	α [°]	ϕ [°]	c [kPa]	b [m]	u [kPa]	N [kN]	T [kN]
1	0,54	45.338	30.000	5	0,20	0	0,38	0,48
2	1,62	46.226	30.000	5	0,21	0	1,12	0,65
3	2,68	47.165	30.000	5	0,21	0	1,82	0,81
4	3,72	48.618	30.000	5	0,22	0	2,46	0,97
5	4,74	49.830	30.000	5	0,22	0	3,06	1,11
6	5,73	50.926	30.000	5	0,23	0	3,61	1,25
7	6,70	52.088	30.000	5	0,23	0	4,11	1,37
8	7,63	53.538	30.000	5	0,24	0	4,54	1,48
9	8,54	54.976	30.000	5	0,25	0	4,90	1,58
10	9,41	56.310	30.000	5	0,26	0	5,22	1,66
11	10,24	57.722	30.000	5	0,27	0	5,47	1,74
12	10,22	59.213	30.000	5	0,28	0	5,23	1,71
13	9,39	60.789	30.000	5	0,29	0	4,58	1,59
14	8,50	62.451	30.000	5	0,31	0	3,93	1,48
15	7,55	64.200	30.000	5	0,33	0	3,29	1,37
16	6,51	66.036	30.000	5	0,35	0	2,65	1,27
17	5,38	67.971	30.000	5	0,38	0	2,02	1,19
18	4,11	70.446	30.000	5	0,43	0	1,38	1,13
19	2,67	72.712	30.000	5	0,48	0	0,79	1,11
20	0,97	75.701	30.000	5	0,58	0	0,24	1,17

Superficie di scorrimento n° 241 - $F_s = 2.14$

Is	W [kN]	α [°]	ϕ [°]	c [kPa]	b [m]	u [kPa]	N [kN]	T [kN]
1	0,65	34.436	30.000	5	0,18	0	0,54	0,56
2	1,95	35.017	30.000	5	0,18	0	1,60	0,85
3	3,22	37.286	30.000	5	0,18	0	2,57	1,12
4	4,48	38.624	30.000	5	0,19	0	3,50	1,38
5	5,71	40.135	30.000	5	0,19	0	4,37	1,63
6	6,92	42.405	30.000	5	0,20	0	5,11	1,84
7	8,09	43.550	30.000	5	0,20	0	5,87	2,06
8	9,24	45.834	30.000	5	0,21	0	6,44	2,23
9	10,35	47.773	30.000	5	0,22	0	6,96	2,39
10	11,43	49.358	30.000	5	0,23	0	7,44	2,54
11	12,46	51.533	30.000	5	0,24	0	7,75	2,64
12	12,99	54.025	30.000	5	0,25	0	7,63	2,64
13	12,33	56.127	30.000	5	0,26	0	6,87	2,47
14	11,55	58.463	30.000	5	0,28	0	6,04	2,29
15	10,69	61.058	30.000	5	0,30	0	5,17	2,10
16	9,72	63.932	30.000	5	0,33	0	4,27	1,93
17	8,62	67.094	30.000	5	0,38	0	3,35	1,79
18	7,32	70.529	30.000	5	0,44	0	2,44	1,69
19	5,68	75.337	30.000	5	0,58	0	1,44	1,74
20	3,09	83.843	30.000	5	1,37	0	0,33	3,28

Superficie di scorrimento n° 243 - $F_s = 2.31$

Is	W [kN]	α [°]	ϕ [°]	c [kPa]	b [m]	u [kPa]	N [kN]	T [kN]
1	0,60	41.812	30.000	5	0,20	0	0,45	0,54
2	1,79	42.665	30.000	5	0,20	0	1,32	0,76
3	2,96	43.885	30.000	5	0,20	0	2,13	0,98
4	4,11	45.675	30.000	5	0,21	0	2,87	1,17
5	5,23	46.743	30.000	5	0,21	0	3,58	1,36
6	6,32	48.031	30.000	5	0,22	0	4,23	1,53
7	7,39	49.979	30.000	5	0,23	0	4,75	1,68
8	8,43	51.294	30.000	5	0,23	0	5,27	1,83
9	9,43	52.712	30.000	5	0,24	0	5,71	1,96
10	10,39	54.250	30.000	5	0,25	0	6,07	2,06
11	11,31	56.318	30.000	5	0,26	0	6,27	2,14
12	11,72	58.019	30.000	5	0,28	0	6,21	2,16
13	10,95	59.846	30.000	5	0,29	0	5,50	2,01
14	10,05	61.808	30.000	5	0,31	0	4,75	1,86
15	9,07	63.909	30.000	5	0,33	0	3,99	1,72
16	7,99	66.149	30.000	5	0,36	0	3,23	1,59
17	6,77	68.756	30.000	5	0,40	0	2,45	1,49
18	5,38	71.713	30.000	5	0,47	0	1,69	1,44
19	3,70	75.063	30.000	5	0,57	0	0,95	1,47
20	1,47	79.484	30.000	5	0,80	0	0,27	1,81

Combinazione n° 2

Superficie di scorrimento n° 207 - $F_s = 6.09$

Is	W [kN]	α [°]	ϕ [°]	c [kPa]	b [m]	u [kPa]	N [kN]	T [kN]
1	0,10	57.408	30.000	5	0,15	0	0,06	0,13
2	0,31	57.733	30.000	5	0,15	0	0,16	0,14
3	0,51	58.983	30.000	5	0,16	0	0,26	0,16
4	0,70	59.752	30.000	5	0,16	0	0,35	0,17
5	0,88	60.558	30.000	5	0,17	0	0,43	0,18
6	1,06	61.881	30.000	5	0,17	0	0,50	0,19
7	1,22	62.575	30.000	5	0,18	0	0,56	0,20
8	1,38	63.707	30.000	5	0,18	0	0,61	0,21
9	1,52	64.965	30.000	5	0,19	0	0,64	0,22
10	1,66	65.922	30.000	5	0,20	0	0,68	0,23
11	1,77	66.986	30.000	5	0,21	0	0,69	0,24
12	1,87	68.432	30.000	5	0,22	0	0,69	0,25
13	1,95	69.782	30.000	5	0,24	0	0,67	0,26
14	2,01	71.142	30.000	5	0,25	0	0,65	0,27
15	2,03	72.633	30.000	5	0,27	0	0,61	0,28
16	2,02	74.259	30.000	5	0,30	0	0,55	0,30
17	1,96	76.030	30.000	5	0,34	0	0,47	0,32
18	1,82	78.409	30.000	5	0,41	0	0,37	0,37
19	1,56	80.948	30.000	5	0,52	0	0,25	0,45
20	0,85	85.230	30.000	5	0,98	0	0,07	0,82

Superficie di scorrimento n° 209 - $F_s = 6.97$

Is	W [kN]	α [°]	ϕ [°]	c [kPa]	b [m]	u [kPa]	N [kN]	T [kN]
1	0,09	60.059	30.000	5	0,16	0	0,05	0,12
2	0,28	60.509	30.000	5	0,17	0	0,14	0,13
3	0,45	61.355	30.000	5	0,17	0	0,22	0,14
4	0,62	62.327	30.000	5	0,18	0	0,29	0,15
5	0,79	62.935	30.000	5	0,18	0	0,36	0,16
6	0,94	63.946	30.000	5	0,19	0	0,41	0,17
7	1,08	64.929	30.000	5	0,19	0	0,46	0,18
8	1,21	65.718	30.000	5	0,20	0	0,50	0,18
9	1,33	66.578	30.000	5	0,21	0	0,53	0,19
10	1,44	67.833	30.000	5	0,22	0	0,54	0,20
11	1,53	68.848	30.000	5	0,23	0	0,55	0,21
12	1,61	69.909	30.000	5	0,24	0	0,55	0,22
13	1,66	71.057	30.000	5	0,25	0	0,54	0,23
14	1,69	72.297	30.000	5	0,27	0	0,52	0,24
15	1,70	73.630	30.000	5	0,29	0	0,48	0,25
16	1,66	75.057	30.000	5	0,32	0	0,43	0,26
17	1,58	76.572	30.000	5	0,35	0	0,37	0,28
18	1,42	78.577	30.000	5	0,41	0	0,28	0,32
19	1,16	80.657	30.000	5	0,50	0	0,19	0,38
20	0,57	83.542	30.000	5	0,73	0	0,06	0,53

Superficie di scorrimento n° 212 - $F_s = 4.01$

Is	W [kN]	α [°]	ϕ [°]	c [kPa]	b [m]	u [kPa]	N [kN]	T [kN]
1	0,19	50.357	30.000	5	0,16	0	0,12	0,22
2	0,58	50.826	30.000	5	0,16	0	0,37	0,26
3	0,96	52.249	30.000	5	0,17	0	0,59	0,29
4	1,33	53.314	30.000	5	0,17	0	0,80	0,33
5	1,69	54.141	30.000	5	0,17	0	0,99	0,36
6	2,04	55.918	30.000	5	0,18	0	1,14	0,39
7	2,37	56.804	30.000	5	0,19	0	1,30	0,42
8	2,69	57.926	30.000	5	0,19	0	1,43	0,45
9	3,00	59.693	30.000	5	0,20	0	1,51	0,47
10	3,29	60.874	30.000	5	0,21	0	1,60	0,49

Progetto di ottimizzazione del fronte perimetrale e completamento del sedime della
 Discarica di Grumolo delle Abbadesse con incremento dei volumi di conferimento

Is	W [kN]	α [°]	ϕ [°]	c [kPa]	b [m]	u [kPa]	N [kN]	T [kN]
11	3,55	62.180	30.000	5	0,22	0	1,66	0,51
12	3,80	63.623	30.000	5	0,23	0	1,69	0,53
13	4,02	65.495	30.000	5	0,25	0	1,67	0,55
14	4,21	67.149	30.000	5	0,26	0	1,63	0,56
15	4,36	68.935	30.000	5	0,28	0	1,57	0,58
16	4,34	70.873	30.000	5	0,31	0	1,42	0,59
17	3,81	73.246	30.000	5	0,35	0	1,10	0,60
18	3,13	75.811	30.000	5	0,42	0	0,77	0,63
19	2,29	78.974	30.000	5	0,53	0	0,44	0,73
20	1,04	83.938	30.000	5	0,97	0	0,11	1,22

Superficie di scorrimento n° 219 - $F_s = 3.47$

Is	W [kN]	α [°]	ϕ [°]	c [kPa]	b [m]	u [kPa]	N [kN]	T [kN]
1	0,29	48.484	30.000	5	0,19	0	0,19	0,30
2	0,87	49.236	30.000	5	0,19	0	0,57	0,37
3	1,44	50.171	30.000	5	0,19	0	0,92	0,43
4	1,99	51.740	30.000	5	0,20	0	1,23	0,49
5	2,53	52.670	30.000	5	0,20	0	1,53	0,55
6	3,05	53.669	30.000	5	0,21	0	1,81	0,60
7	3,56	55.232	30.000	5	0,22	0	2,03	0,65
8	4,05	56.472	30.000	5	0,22	0	2,24	0,69
9	4,52	57.680	30.000	5	0,23	0	2,42	0,73
10	4,97	58.977	30.000	5	0,24	0	2,56	0,77
11	5,39	60.369	30.000	5	0,25	0	2,66	0,80
12	5,78	61.981	30.000	5	0,26	0	2,72	0,83
13	6,13	63.564	30.000	5	0,28	0	2,73	0,85
14	5,86	65.178	30.000	5	0,29	0	2,46	0,83
15	5,25	66.893	30.000	5	0,31	0	2,06	0,79
16	4,58	68.945	30.000	5	0,34	0	1,65	0,77
17	3,84	71.024	30.000	5	0,38	0	1,25	0,75
18	3,00	73.181	30.000	5	0,42	0	0,87	0,76
19	2,01	76.087	30.000	5	0,51	0	0,48	0,82
20	0,76	79.365	30.000	5	0,67	0	0,14	0,98

Superficie di scorrimento n° 221 - $F_s = 2.70$

Is	W [kN]	α [°]	ϕ [°]	c [kPa]	b [m]	u [kPa]	N [kN]	T [kN]
1	0,48	33.289	30.000	5	0,17	0	0,40	0,40
2	1,45	33.900	30.000	5	0,17	0	1,20	0,58
3	2,40	36.197	30.000	5	0,18	0	1,93	0,74
4	3,33	37.595	30.000	5	0,18	0	2,64	0,90
5	4,24	39.105	30.000	5	0,18	0	3,29	1,04
6	5,14	41.463	30.000	5	0,19	0	3,85	1,18
7	6,02	42.641	30.000	5	0,19	0	4,43	1,31
8	6,87	44.922	30.000	5	0,20	0	4,86	1,41
9	7,70	46.952	30.000	5	0,21	0	5,25	1,51
10	8,50	48.574	30.000	5	0,22	0	5,62	1,60
11	9,27	50.738	30.000	5	0,23	0	5,87	1,67
12	9,39	53.332	30.000	5	0,24	0	5,61	1,64
13	8,87	55.476	30.000	5	0,25	0	5,03	1,54
14	8,31	57.857	30.000	5	0,27	0	4,42	1,44
15	7,69	60.502	30.000	5	0,29	0	3,79	1,35
16	7,00	63.429	30.000	5	0,32	0	3,13	1,26
17	6,21	66.650	30.000	5	0,36	0	2,46	1,19
18	5,27	70.150	30.000	5	0,42	0	1,79	1,16
19	4,09	75.061	30.000	5	0,56	0	1,05	1,25
20	2,23	83.726	30.000	5	1,31	0	0,24	2,48

Superficie di scorrimento n° 223 - $F_s = 2.91$

Is	W [kN]	α [°]	ϕ [°]	c [kPa]	b [m]	u [kPa]	N [kN]	T [kN]
1	0,44	40.917	30.000	5	0,19	0	0,34	0,39
2	1,33	41.797	30.000	5	0,19	0	0,99	0,53
3	2,20	43.022	30.000	5	0,20	0	1,61	0,65
4	3,05	44.866	30.000	5	0,20	0	2,16	0,78
5	3,89	45.962	30.000	5	0,21	0	2,70	0,89
6	4,70	47.233	30.000	5	0,21	0	3,19	1,00
7	5,50	49.254	30.000	5	0,22	0	3,59	1,09
8	6,27	50.597	30.000	5	0,23	0	3,98	1,18
9	7,02	52.044	30.000	5	0,23	0	4,32	1,26
10	7,73	53.605	30.000	5	0,24	0	4,59	1,32
11	8,42	55.654	30.000	5	0,25	0	4,75	1,38
12	8,45	57.434	30.000	5	0,27	0	4,55	1,36
13	7,86	59.292	30.000	5	0,28	0	4,01	1,28
14	7,21	61.283	30.000	5	0,30	0	3,46	1,20
15	6,51	63.414	30.000	5	0,32	0	2,91	1,13
16	5,73	65.686	30.000	5	0,35	0	2,36	1,06
17	4,86	68.377	30.000	5	0,39	0	1,79	1,02
18	3,85	71.323	30.000	5	0,45	0	1,23	1,01
19	2,65	74.742	30.000	5	0,54	0	0,70	1,07
20	1,05	79.197	30.000	5	0,76	0	0,20	1,35

Progetto di ottimizzazione del fronte perimetrale e completamento del sedime della
 Discarica di Grumolo delle Abbadesse con incremento dei volumi di conferimento

Superficie di scorrimento n° 225 - $F_s = 3.07$

Is	W [kN]	α [°]	ϕ [°]	c [kPa]	b [m]	u [kPa]	N [kN]	T [kN]
1	0,42	45.338	30.000	5	0,20	0	0,29	0,39
2	1,25	46.226	30.000	5	0,21	0	0,86	0,50
3	2,06	47.165	30.000	5	0,21	0	1,40	0,61
4	2,86	48.618	30.000	5	0,22	0	1,89	0,71
5	3,65	49.830	30.000	5	0,22	0	2,35	0,80
6	4,41	50.926	30.000	5	0,23	0	2,78	0,89
7	5,15	52.088	30.000	5	0,23	0	3,16	0,98
8	5,87	53.538	30.000	5	0,24	0	3,49	1,05
9	6,57	54.976	30.000	5	0,25	0	3,77	1,12
10	7,24	56.310	30.000	5	0,26	0	4,01	1,18
11	7,88	57.722	30.000	5	0,27	0	4,21	1,23
12	7,86	59.213	30.000	5	0,28	0	4,03	1,21
13	7,22	60.789	30.000	5	0,29	0	3,53	1,14
14	6,54	62.451	30.000	5	0,31	0	3,03	1,07
15	5,81	64.200	30.000	5	0,33	0	2,53	1,01
16	5,01	66.036	30.000	5	0,35	0	2,03	0,96
17	4,14	67.971	30.000	5	0,38	0	1,55	0,91
18	3,16	70.446	30.000	5	0,43	0	1,06	0,90
19	2,06	72.712	30.000	5	0,48	0	0,61	0,90
20	0,75	75.701	30.000	5	0,58	0	0,18	0,98

Superficie di scorrimento n° 241 - $F_s = 2.50$

Is	W [kN]	α [°]	ϕ [°]	c [kPa]	b [m]	u [kPa]	N [kN]	T [kN]
1	0,50	34.436	30.000	5	0,18	0	0,41	0,45
2	1,50	35.017	30.000	5	0,18	0	1,23	0,64
3	2,48	37.286	30.000	5	0,18	0	1,97	0,82
4	3,45	38.624	30.000	5	0,19	0	2,69	1,00
5	4,39	40.135	30.000	5	0,19	0	3,36	1,16
6	5,32	42.405	30.000	5	0,20	0	3,93	1,30
7	6,23	43.550	30.000	5	0,20	0	4,51	1,45
8	7,11	45.834	30.000	5	0,21	0	4,95	1,56
9	7,96	47.773	30.000	5	0,22	0	5,35	1,67
10	8,79	49.358	30.000	5	0,23	0	5,73	1,77
11	9,58	51.533	30.000	5	0,24	0	5,96	1,85
12	9,99	54.025	30.000	5	0,25	0	5,87	1,85
13	9,49	56.127	30.000	5	0,26	0	5,29	1,75
14	8,88	58.463	30.000	5	0,28	0	4,65	1,63
15	8,22	61.058	30.000	5	0,30	0	3,98	1,52
16	7,48	63.932	30.000	5	0,33	0	3,29	1,43
17	6,63	67.094	30.000	5	0,38	0	2,58	1,35
18	5,63	70.529	30.000	5	0,44	0	1,88	1,31
19	4,37	75.337	30.000	5	0,58	0	1,11	1,41
20	2,38	83.843	30.000	5	1,37	0	0,25	2,79

Superficie di scorrimento n° 243 - $F_s = 2.72$

Is	W [kN]	α [°]	ϕ [°]	c [kPa]	b [m]	u [kPa]	N [kN]	T [kN]
1	0,46	41.812	30.000	5	0,20	0	0,34	0,43
2	1,38	42.665	30.000	5	0,20	0	1,01	0,58
3	2,28	43.885	30.000	5	0,20	0	1,64	0,72
4	3,16	45.675	30.000	5	0,21	0	2,21	0,86
5	4,02	46.743	30.000	5	0,21	0	2,76	0,98
6	4,86	48.031	30.000	5	0,22	0	3,25	1,10
7	5,69	49.979	30.000	5	0,23	0	3,66	1,20
8	6,48	51.294	30.000	5	0,23	0	4,05	1,29
9	7,25	52.712	30.000	5	0,24	0	4,39	1,38
10	7,99	54.250	30.000	5	0,25	0	4,67	1,45
11	8,70	56.318	30.000	5	0,26	0	4,82	1,51
12	9,02	58.019	30.000	5	0,28	0	4,78	1,53
13	8,42	59.846	30.000	5	0,29	0	4,23	1,44
14	7,73	61.808	30.000	5	0,31	0	3,65	1,35
15	6,97	63.909	30.000	5	0,33	0	3,07	1,27
16	6,14	66.149	30.000	5	0,36	0	2,48	1,20
17	5,21	68.756	30.000	5	0,40	0	1,89	1,15
18	4,13	71.713	30.000	5	0,47	0	1,30	1,14
19	2,84	75.063	30.000	5	0,57	0	0,73	1,20
20	1,13	79.484	30.000	5	0,80	0	0,21	1,52

Combinazione n° 3

Superficie di scorrimento n° 207 - $F_s = 5.69$

Is	W [kN]	α [°]	ϕ [°]	c [kPa]	b [m]	u [kPa]	N [kN]	T [kN]
1	0,10	57.408	30.000	5	0,15	0	0,06	0,14
2	0,31	57.733	30.000	5	0,15	0	0,16	0,15
3	0,51	58.983	30.000	5	0,16	0	0,26	0,17
4	0,70	59.752	30.000	5	0,16	0	0,35	0,18
5	0,88	60.558	30.000	5	0,17	0	0,43	0,19
6	1,06	61.881	30.000	5	0,17	0	0,50	0,20
7	1,22	62.575	30.000	5	0,18	0	0,56	0,21
8	1,38	63.707	30.000	5	0,18	0	0,61	0,22
9	1,52	64.965	30.000	5	0,19	0	0,64	0,24
10	1,66	65.922	30.000	5	0,20	0	0,68	0,24
11	1,77	66.986	30.000	5	0,21	0	0,69	0,25

Progetto di ottimizzazione del fronte perimetrale e completamento del sedime della
 Discarica di Grumolo delle Abbadesse con incremento dei volumi di conferimento

Is	W [kN]	α [°]	ϕ [°]	c [kPa]	b [m]	u [kPa]	N [kN]	T [kN]
12	1,87	68.432	30.000	5	0,22	0	0,69	0,27
13	1,95	69.782	30.000	5	0,24	0	0,67	0,28
14	2,01	71.142	30.000	5	0,25	0	0,65	0,29
15	2,03	72.633	30.000	5	0,27	0	0,61	0,30
16	2,02	74.259	30.000	5	0,30	0	0,55	0,32
17	1,96	76.030	30.000	5	0,34	0	0,47	0,35
18	1,82	78.409	30.000	5	0,41	0	0,37	0,39
19	1,56	80.948	30.000	5	0,52	0	0,25	0,48
20	0,85	85.230	30.000	5	0,98	0	0,07	0,87

Superficie di scorrimento n° 209 - $F_s = 6.51$

Is	W [kN]	α [°]	ϕ [°]	c [kPa]	b [m]	u [kPa]	N [kN]	T [kN]
1	0,09	60.059	30.000	5	0,16	0	0,05	0,13
2	0,28	60.509	30.000	5	0,17	0	0,14	0,14
3	0,45	61.355	30.000	5	0,17	0	0,22	0,15
4	0,62	62.327	30.000	5	0,18	0	0,29	0,16
5	0,79	62.935	30.000	5	0,18	0	0,36	0,17
6	0,94	63.946	30.000	5	0,19	0	0,41	0,18
7	1,08	64.929	30.000	5	0,19	0	0,46	0,19
8	1,21	65.718	30.000	5	0,20	0	0,50	0,20
9	1,33	66.578	30.000	5	0,21	0	0,53	0,21
10	1,44	67.833	30.000	5	0,22	0	0,54	0,21
11	1,53	68.848	30.000	5	0,23	0	0,55	0,22
12	1,61	69.909	30.000	5	0,24	0	0,55	0,23
13	1,66	71.057	30.000	5	0,25	0	0,54	0,24
14	1,69	72.297	30.000	5	0,27	0	0,52	0,25
15	1,70	73.630	30.000	5	0,29	0	0,48	0,27
16	1,66	75.057	30.000	5	0,32	0	0,43	0,28
17	1,58	76.572	30.000	5	0,35	0	0,37	0,30
18	1,42	78.577	30.000	5	0,41	0	0,28	0,34
19	1,16	80.657	30.000	5	0,50	0	0,19	0,40
20	0,57	83.542	30.000	5	0,73	0	0,06	0,56

Superficie di scorrimento n° 212 - $F_s = 3.76$

Is	W [kN]	α [°]	ϕ [°]	c [kPa]	b [m]	u [kPa]	N [kN]	T [kN]
1	0,19	50.357	30.000	5	0,16	0	0,12	0,23
2	0,58	50.826	30.000	5	0,16	0	0,37	0,27
3	0,96	52.249	30.000	5	0,17	0	0,59	0,31
4	1,33	53.314	30.000	5	0,17	0	0,80	0,35
5	1,69	54.141	30.000	5	0,17	0	0,99	0,38
6	2,04	55.918	30.000	5	0,18	0	1,14	0,42
7	2,37	56.804	30.000	5	0,19	0	1,30	0,45
8	2,69	57.926	30.000	5	0,19	0	1,43	0,48
9	3,00	59.693	30.000	5	0,20	0	1,51	0,50
10	3,29	60.874	30.000	5	0,21	0	1,60	0,52
11	3,55	62.180	30.000	5	0,22	0	1,66	0,55
12	3,80	63.623	30.000	5	0,23	0	1,69	0,56
13	4,02	65.495	30.000	5	0,25	0	1,67	0,58
14	4,21	67.149	30.000	5	0,26	0	1,63	0,60
15	4,36	68.935	30.000	5	0,28	0	1,57	0,62
16	4,34	70.873	30.000	5	0,31	0	1,42	0,63
17	3,81	73.246	30.000	5	0,35	0	1,10	0,64
18	3,13	75.811	30.000	5	0,42	0	0,77	0,67
19	2,29	78.974	30.000	5	0,53	0	0,44	0,78
20	1,04	83.938	30.000	5	0,97	0	0,11	1,30

Superficie di scorrimento n° 219 - $F_s = 3.27$

Is	W [kN]	α [°]	ϕ [°]	c [kPa]	b [m]	u [kPa]	N [kN]	T [kN]
1	0,29	48.484	30.000	5	0,19	0	0,19	0,32
2	0,87	49.236	30.000	5	0,19	0	0,57	0,39
3	1,44	50.171	30.000	5	0,19	0	0,92	0,46
4	1,99	51.740	30.000	5	0,20	0	1,23	0,52
5	2,53	52.670	30.000	5	0,20	0	1,53	0,58
6	3,05	53.669	30.000	5	0,21	0	1,81	0,64
7	3,56	55.232	30.000	5	0,22	0	2,03	0,69
8	4,05	56.472	30.000	5	0,22	0	2,24	0,74
9	4,52	57.680	30.000	5	0,23	0	2,42	0,78
10	4,97	58.977	30.000	5	0,24	0	2,56	0,82
11	5,39	60.369	30.000	5	0,25	0	2,66	0,85
12	5,78	61.981	30.000	5	0,26	0	2,72	0,88
13	6,13	63.564	30.000	5	0,28	0	2,73	0,90
14	5,86	65.178	30.000	5	0,29	0	2,46	0,88
15	5,25	66.893	30.000	5	0,31	0	2,06	0,84
16	4,58	68.945	30.000	5	0,34	0	1,65	0,81
17	3,84	71.024	30.000	5	0,38	0	1,25	0,80
18	3,00	73.181	30.000	5	0,42	0	0,87	0,80
19	2,01	76.087	30.000	5	0,51	0	0,48	0,87
20	0,76	79.365	30.000	5	0,67	0	0,14	1,04

Superficie di scorrimento n° 221 - $F_s = 2.55$

Progetto di ottimizzazione del fronte perimetrale e completamento del sedime della Discarica di Grumolo delle Abbadesse con incremento dei volumi di conferimento

Is	W [kN]	α [°]	ϕ [°]	c [kPa]	b [m]	u [kPa]	N [kN]	T [kN]
1	0,48	33,289	30,000	5	0,17	0	0,40	0,43
2	1,45	33,900	30,000	5	0,17	0	1,20	0,61
3	2,40	36,197	30,000	5	0,18	0	1,93	0,78
4	3,33	37,595	30,000	5	0,18	0	2,64	0,95
5	4,24	39,105	30,000	5	0,18	0	3,29	1,11
6	5,14	41,463	30,000	5	0,19	0	3,85	1,25
7	6,02	42,641	30,000	5	0,19	0	4,43	1,38
8	6,87	44,922	30,000	5	0,20	0	4,86	1,50
9	7,70	46,952	30,000	5	0,21	0	5,25	1,60
10	8,50	48,574	30,000	5	0,22	0	5,62	1,70
11	9,27	50,738	30,000	5	0,23	0	5,87	1,77
12	9,99	53,332	30,000	5	0,24	0	5,61	1,74
13	8,87	55,476	30,000	5	0,25	0	5,03	1,63
14	8,31	57,857	30,000	5	0,27	0	4,42	1,53
15	7,69	60,502	30,000	5	0,29	0	3,79	1,43
16	7,00	63,429	30,000	5	0,32	0	3,13	1,34
17	6,21	66,650	30,000	5	0,36	0	2,46	1,26
18	5,27	70,150	30,000	5	0,42	0	1,79	1,23
19	4,09	75,061	30,000	5	0,56	0	1,05	1,33
20	2,23	83,726	30,000	5	1,31	0	0,24	2,62

Superficie di scorrimento n° 223 - $F_s = 2.75$

Is	W [kN]	α [°]	ϕ [°]	c [kPa]	b [m]	u [kPa]	N [kN]	T [kN]
1	0,44	40,917	30,000	5	0,19	0	0,34	0,42
2	1,33	41,797	30,000	5	0,19	0	0,99	0,56
3	2,20	43,022	30,000	5	0,20	0	1,61	0,69
4	3,05	44,866	30,000	5	0,20	0	2,16	0,82
5	3,89	45,962	30,000	5	0,21	0	2,70	0,94
6	4,70	47,233	30,000	5	0,21	0	3,19	1,06
7	5,50	49,254	30,000	5	0,22	0	3,59	1,15
8	6,27	50,597	30,000	5	0,23	0	3,98	1,25
9	7,02	52,044	30,000	5	0,23	0	4,32	1,33
10	7,73	53,605	30,000	5	0,24	0	4,59	1,40
11	8,42	55,654	30,000	5	0,25	0	4,75	1,46
12	8,45	57,434	30,000	5	0,27	0	4,55	1,44
13	7,86	59,292	30,000	5	0,28	0	4,01	1,35
14	7,21	61,283	30,000	5	0,30	0	3,46	1,27
15	6,51	63,414	30,000	5	0,32	0	2,91	1,19
16	5,73	65,686	30,000	5	0,35	0	2,36	1,13
17	4,86	68,377	30,000	5	0,39	0	1,79	1,08
18	3,85	71,323	30,000	5	0,45	0	1,23	1,07
19	2,65	74,742	30,000	5	0,54	0	0,70	1,14
20	1,05	79,197	30,000	5	0,76	0	0,20	1,43

Superficie di scorrimento n° 225 - $F_s = 2.89$

Is	W [kN]	α [°]	ϕ [°]	c [kPa]	b [m]	u [kPa]	N [kN]	T [kN]
1	0,42	45,338	30,000	5	0,20	0	0,29	0,41
2	1,25	46,226	30,000	5	0,21	0	0,86	0,53
3	2,06	47,165	30,000	5	0,21	0	1,40	0,64
4	2,86	48,618	30,000	5	0,22	0	1,89	0,75
5	3,65	49,830	30,000	5	0,22	0	2,35	0,85
6	4,41	50,926	30,000	5	0,23	0	2,78	0,95
7	5,15	52,088	30,000	5	0,23	0	3,16	1,04
8	5,87	53,538	30,000	5	0,24	0	3,49	1,11
9	6,57	54,976	30,000	5	0,25	0	3,77	1,18
10	7,24	56,310	30,000	5	0,26	0	4,01	1,25
11	7,88	57,722	30,000	5	0,27	0	4,21	1,30
12	7,86	59,213	30,000	5	0,28	0	4,03	1,29
13	7,22	60,789	30,000	5	0,29	0	3,53	1,21
14	6,54	62,451	30,000	5	0,31	0	3,03	1,14
15	5,81	64,200	30,000	5	0,33	0	2,53	1,07
16	5,01	66,036	30,000	5	0,35	0	2,03	1,02
17	4,14	67,971	30,000	5	0,38	0	1,55	0,97
18	3,16	70,446	30,000	5	0,43	0	1,06	0,95
19	2,06	72,712	30,000	5	0,48	0	0,61	0,96
20	0,75	75,701	30,000	5	0,58	0	0,18	1,04

Superficie di scorrimento n° 241 - $F_s = 2.37$

Is	W [kN]	α [°]	ϕ [°]	c [kPa]	b [m]	u [kPa]	N [kN]	T [kN]
1	0,50	34,436	30,000	5	0,18	0	0,41	0,48
2	1,50	35,017	30,000	5	0,18	0	1,23	0,68
3	2,48	37,286	30,000	5	0,18	0	1,97	0,87
4	3,45	38,624	30,000	5	0,19	0	2,69	1,05
5	4,39	40,135	30,000	5	0,19	0	3,36	1,22
6	5,32	42,405	30,000	5	0,20	0	3,93	1,38
7	6,23	43,550	30,000	5	0,20	0	4,51	1,53
8	7,11	45,834	30,000	5	0,21	0	4,95	1,65
9	7,96	47,773	30,000	5	0,22	0	5,35	1,77
10	8,79	49,358	30,000	5	0,23	0	5,73	1,87
11	9,58	51,533	30,000	5	0,24	0	5,96	1,95
12	9,99	54,025	30,000	5	0,25	0	5,87	1,96
13	9,49	56,127	30,000	5	0,26	0	5,29	1,85
14	8,88	58,463	30,000	5	0,28	0	4,65	1,73
15	8,22	61,058	30,000	5	0,30	0	3,98	1,61

Is	W [kN]	α [°]	ϕ [°]	c [kPa]	b [m]	u [kPa]	N [kN]	T [kN]
16	7,48	63.932	30.000	5	0,33	0	3,29	1,51
17	6,63	67.094	30.000	5	0,38	0	2,58	1,43
18	5,63	70.529	30.000	5	0,44	0	1,88	1,39
19	4,37	75.337	30.000	5	0,58	0	1,11	1,49
20	2,38	83.843	30.000	5	1,37	0	0,25	2,95

Superficie di scorrimento n° 243 - $F_s = 2.56$

Is	W [kN]	α [°]	ϕ [°]	c [kPa]	b [m]	u [kPa]	N [kN]	T [kN]
1	0,46	41.812	30.000	5	0,20	0	0,34	0,46
2	1,38	42.665	30.000	5	0,20	0	1,01	0,62
3	2,28	43.885	30.000	5	0,20	0	1,64	0,77
4	3,16	45.675	30.000	5	0,21	0	2,21	0,91
5	4,02	46.743	30.000	5	0,21	0	2,76	1,04
6	4,86	48.031	30.000	5	0,22	0	3,25	1,16
7	5,69	49.979	30.000	5	0,23	0	3,66	1,27
8	6,48	51.294	30.000	5	0,23	0	4,05	1,37
9	7,25	52.712	30.000	5	0,24	0	4,39	1,46
10	7,99	54.250	30.000	5	0,25	0	4,67	1,54
11	8,70	56.318	30.000	5	0,26	0	4,82	1,60
12	9,02	58.019	30.000	5	0,28	0	4,78	1,62
13	8,42	59.846	30.000	5	0,29	0	4,23	1,52
14	7,73	61.808	30.000	5	0,31	0	3,65	1,43
15	6,97	63.909	30.000	5	0,33	0	3,07	1,34
16	6,14	66.149	30.000	5	0,36	0	2,48	1,27
17	5,21	68.756	30.000	5	0,40	0	1,89	1,21
18	4,13	71.713	30.000	5	0,47	0	1,30	1,20
19	2,84	75.063	30.000	5	0,57	0	0,73	1,27
20	1,13	79.484	30.000	5	0,80	0	0,21	1,61

4.5.5 Esiti dell'analisi H = 4,8 m

Sono di seguito riportati i listati degli esiti relativi all'analisi della sezione qui sotto indicata, a partire dai **Dati** di dettaglio inseriti nel modello, seguiti dai **Risultati**.

H	B	b
[m]	[m]	[m]
4,80	4,50	1,70

4.5.5.1 Dati

Normativa

Spinte e verifiche secondo: N.T.C. 2018

Simbologia adottata

γ_{Gfav}	Coefficiente parziale sfavorevole sulle azioni permanenti
γ_{Gfav}	Coefficiente parziale favorevole sulle azioni permanenti
γ_{Qsfav}	Coefficiente parziale sfavorevole sulle azioni variabili
γ_{Qsfav}	Coefficiente parziale favorevole sulle azioni variabili
$\gamma_{tan\phi'}$	Coefficiente parziale di riduzione dell'angolo di attrito drenato
γ_c'	Coefficiente parziale di riduzione della coesione drenata
γ_{cu}	Coefficiente parziale di riduzione della coesione non drenata
γ_{qu}	Coefficiente parziale di riduzione del carico ultimo
γ_r	Coefficiente parziale di riduzione della resistenza a compressione uniaassiale delle rocce

Coefficienti di partecipazione combinazioni statiche

Coefficienti parziali per le azioni o per l'effetto delle azioni:

<i>Carichi</i>	<i>Effetto</i>		<i>EQU</i>	<i>A1</i>	<i>A2</i>
Permanenti	Favorevole	γ_{Gfav}	1.00	1.00	1.00
Permanenti	Sfavorevole	γ_{Gsfav}	1.30	1.30	1.00
Permanenti NS	Favorevole	γ_{Gfav}	0.80	0.80	0.80
Permanenti NS	Sfavorevole	γ_{Gsfav}	1.50	1.50	1.30
Variabili	Favorevole	γ_{Qfav}	0.00	0.00	0.00
Variabili	Sfavorevole	γ_{Qsfav}	1.50	1.50	1.30
Variabili TF	Favorevole	γ_{Qfav}	0.00	0.00	0.00
Variabili TF	Sfavorevole	γ_{Qsfav}	1.35	1.35	1.15

Coefficienti parziali per i parametri geotecnici del terreno:

<i>Parametri</i>			<i>M1</i>	<i>M2</i>
Tangente dell'angolo di attrito	$\gamma_{tan\phi'}$		1.00	1.25
Coesione efficace	γ_c'		1.00	1.25
Resistenza non drenata	γ_{cu}		1.00	1.40
Resistenza a compressione uniaassiale	γ_{qu}		1.00	1.60
Peso dell'unità di volume	γ_r		1.00	1.00

Coefficienti di partecipazione combinazioni sismiche

Coefficienti parziali per le azioni o per l'effetto delle azioni:

<i>Carichi</i>	<i>Effetto</i>		<i>EQU</i>	<i>A1</i>	<i>A2</i>
Permanenti	Favorevole	γ_{Gfav}	1.00	1.00	1.00
Permanenti	Sfavorevole	γ_{Gsfav}	1.00	1.00	1.00
Variabili	Favorevole	γ_{Qfav}	0.00	0.00	0.00
Variabili	Sfavorevole	γ_{Qsfav}	1.00	1.00	1.00

Coefficienti parziali per i parametri geotecnici del terreno:

<i>Parametri</i>			<i>M1</i>	<i>M2</i>
Tangente dell'angolo di attrito	$\gamma_{tan\phi'}$		1.00	1.00
Coesione efficace	γ_c'		1.00	1.00
Resistenza non drenata	γ_{cu}		1.00	1.00
Resistenza a compressione uniaassiale	γ_{qu}		1.00	1.00
Peso dell'unità di volume	γ_r		1.00	1.00

Verifiche esterne - Coefficienti parziali γ_R per le verifiche agli stati limite ultimi STR e GEO

	R1	R2	R3
Capacità portante della fondazione	1.00	1.00	1.40
Scorrimento	1.00	1.00	1.10
Resistenza del terreno a valle	1.00	1.00	1.40
Stabilità globale		1.10	

Verifiche interne - Coefficienti di sicurezza richiesti

Coefficiente di sicurezza allo scorrimento dei rinforzi	1.50
Coefficiente di sicurezza allo sfilamento del rinforzo	3.00
Coefficiente di sicurezza alla trazione del rinforzo	1.30
Coefficiente di sicurezza allo scorrimento del risvolto	1.30

Progetto di ottimizzazione del fronte perimetrale e completamento del sedime della
 Discarica di Grumolo delle Abbadesse con incremento dei volumi di conferimento

Verifiche compound - Coefficienti di sicurezza richiesti

Coefficiente di sicurezza alla stabilità locale 1.30
 Coefficiente di sicurezza alla stabilità locale sismica 1.30

Descrizione terreni

Caratteristiche fisico meccaniche

Simbologia adottata

Descrizione Descrizione terreno
 γ Peso di volume del terreno espresso in [kN/mc]
 γ_{sat} Peso di volume saturo del terreno espresso in [kN/mc]
 ϕ Angolo di attrito interno del terreno espresso in [°]
 δ Angolo di attrito Muro-terreno espresso in [°]
 c Coesione del terreno espressa in [kPa]
 ca Adesione del terreno espressa in [kPa]

Descrizione	γ [kN/mc]	γ_{sat} [kN/mc]	ϕ [°]	δ [°]	c [kPa]	ca [kPa]
Muro	18,0000	18,0000	30,000	-	5,0	0,0
Copertura	20,0000	20,0000	26,000	17,000	5,0	0,0
RSU	9,0000	9,0000	17,000	11,000	10,0	0,0
Fondazione	17,5000	17,5000	27,000	27,000	10,0	0,0

Caratteristiche di deformabilità

Simbologia adottata

Descrizione Descrizione terreno
 E Modulo elastico, espresso in [kPa]
 v Coefficiente di Poisson
 G Modulo tangenziale, espresso in [kPa]
 Vs Velocità onde di taglio, espressa in [m/s]

Descrizione	E [kPa]	v	G [kPa]	Vs [m/s]
Muro	0	0,000	0	0,00
Copertura	0	0,000	0	0,00
RSU	0	0,000	0	0,00
Fondazione	0	0,000	0	0,00

Stratigrafia terreno spingente

Simbologia adottata

n° Identificativo strato
 Sp Spessore dello strato, espresso in [m]
 α Inclinazione dello strato, espresso in [°]
 Terreno Terreno dello strato

n°	Sp [m]	α [°]	Terreno
1	2,00	15,000	Copertura
2	2,80	0,000	RSU
3	8,00	0,000	Fondazione

Profilo terreno

Profilo terreno a monte

Simbologia adottata

n° Indice punto
 X Ascissa punto, espresso in [m]
 Y Ordinata punto, espresso in [m]

n°	X [m]	Y [m]									
1	15,00	4,02	2	--	--	3	--	--	4	--	--

Profilo terreno a valle

Quota terreno rispetto al piano di posa [m] 0,30
 Inclinazione terreno a valle [°] 0.000

Progetto di ottimizzazione del fronte perimetrale e completamento del sedime della Discarica di Grumolo delle Abbadesse con incremento dei volumi di conferimento

Caratteristiche rinforzi

Simbologia adottata

Rinforzo Identificativo del rinforzo
 LTDS Resistenza di progetto di lungo termine, espresso in [kN/m]
 FS_{0g} Fattore di sicurezza per danni di giunzione
 FS_{0c} Fattore di sicurezza per danni chimici
 FS_{0b} Fattore di sicurezza per danni biologici
 FS_{0a} Fattore di sicurezza per danni ambientali
 LTDS_a Resistenza di progetto di lungo termine ammissibile, espresso in [kN/m]

Rinforzo	LTDS [kN/m]	FS _{0g}	FS _{0c}	FS _{0b}	FS _{0a}	LTDS _a [kN/m]
rinforzo 1	35,0000	1.00	1.00	1.00	1.30	26,9231

Geometria terra armata

Simbologia adottata

Il sistema di riferimento è il punto in alto a destra della terra armata
 n° Indice punto
 X Ascissa, espresso in [m]
 Y Ordinata, espresso in [m]

Materiale di riempimento della terra armata: **Muro**

n°	X [m]	Y [m]									
1	0,00	0,00	2	-1,50	0,00	3	-3,00	-5,10	4	1,50	-5,10

Descrizione rinforzi della Terra armata

Simbologia adottata

n° Indice rinforzo
 Y Quota del rinforzo
 Rinforzo Identificativo del rinforzo
 L Lunghezza del rinforzo, espresso in [m]
 Lrv Lunghezza tratto di risvolto verticale (facciata del risvolto), espresso in [m]
 Lro Lunghezza tratto di risvolto orizzontale (interno del risvolto), espresso in [m]
 Fds Parametro di interazione rinforzo-terra utilizzato per la verifica interna a scorrimento diretto
 Fpo Parametro di interazione rinforzo-terra utilizzato per la verifica interna a sfilamento del rinforzo dal terreno

n°	Y [m]	Rinforzo	L [m]	Lrv [m]	Lro [m]	Fds	Fpo
1	-0,40	rinforzo 1	1,74	0,35	1,20	0,90	0,90
2	-0,90	rinforzo 1	2,03	0,35	1,20	0,90	0,90
3	-1,40	rinforzo 1	2,32	0,35	1,20	0,90	0,90
4	-1,90	rinforzo 1	2,62	0,35	1,20	0,90	0,90
5	-2,40	rinforzo 1	2,91	0,35	1,20	0,90	0,90
6	-2,90	rinforzo 1	3,21	0,35	1,20	0,90	0,90
7	-3,40	rinforzo 1	3,50	0,35	1,20	0,90	0,90
8	-3,90	rinforzo 1	3,79	0,35	1,20	0,90	0,90
9	-4,40	rinforzo 1	4,09	0,35	1,20	0,90	0,90
10	-4,65	rinforzo 1	4,24	0,25	1,20	0,90	0,90

Dati parametri sisma

Identificazione del sito

Latitudine 45.520481
 Longitudine 11.659389
 Comune Grumolo Delle Abbadesse
 Provincia Vicenza
 Regione Veneto

Punti di interpolazione del reticolo 12295 - 12517 - 12518 - 12296

Tipo di opera

Tipo di costruzione Opera ordinaria
 Vita nominale 50 anni
 Classe d'uso III - Affollamenti significativi e industrie non pericolose

Vita di riferimento	75 anni	Descrizione	Simbolo	Tipo	SLU	SLE	U.M.
Accelerazione al suolo			a _g		1.26	0.46	[m/s ²]
Massimo fattore amplificazione spettro orizzontale			F ₀		2.44	2.44	
Periodo inizio tratto spettro a velocità costante			Tc*		0.30	0.27	[s]
Tipo di sottosuolo e Coefficiente stratigrafico			S _s	C	1.50	1.50	

Vita di riferimento	75 anni	Descrizione	Simbolo	Tipo	SLU	SLE	U.M.
Categoria topografica e Coefficiente amplificazione topografica			S_T	T1	1.00	1.00	
Coefficiente di riduzione			β_m		0.38	0.47	

Intensità sismica Verticale/Orizzontale 0.50
 Forma diagramma incremento sismico **Stessa forma diagramma statico**

Opzioni di calcolo

Le verifiche di capacità portante sono state eseguite con il metodo di VESIC.
 Le verifiche di stabilità globale e di compound sono state eseguite con il metodo di BISHOP.
 Per le verifiche interne sono stati analizzati i meccanismi:
 - rottura doppio cuneo
 - rottura superficie curvilinea (Circolare)

Descrizione combinazioni di carico

Simbologia adottata
 γ Coefficiente di partecipazione della condizione
 Ψ Coefficiente di combinazione della condizione

Combinazione n° 1 - SLU (Approccio 2)

Condizione	γ	Ψ	Effetto
Peso proprio	1.30	1.00	Sfavorevole
Spinta terreno	1.30	1.00	Sfavorevole

Combinazione n° 2 - SLU (Approccio 2) - Sisma Vert. positivo

Condizione	γ	Ψ	Effetto
Peso proprio	1.00	1.00	Sfavorevole
Spinta terreno	1.00	1.00	Sfavorevole

Combinazione n° 3 - SLU (Approccio 2) - Sisma Vert. negativo

Condizione	γ	Ψ	Effetto
Peso proprio	1.00	1.00	Sfavorevole
Spinta terreno	1.00	1.00	Sfavorevole

Combinazione n° 4 - EQU

Condizione	γ	Ψ	Effetto
Peso proprio	1.00	1.00	Favorevole
Spinta terreno	1.30	1.00	Sfavorevole

Combinazione n° 5 - EQU - Sisma Vert. positivo

Condizione	γ	Ψ	Effetto
Peso proprio	1.00	1.00	Favorevole
Spinta terreno	1.00	1.00	Sfavorevole

Combinazione n° 6 - EQU - Sisma Vert. negativo

Condizione	γ	Ψ	Effetto
Peso proprio	1.00	1.00	Favorevole
Spinta terreno	1.00	1.00	Sfavorevole

Combinazione n° 7 - STAB

Condizione	γ	Ψ	Effetto
Peso proprio	1.00	1.00	Sfavorevole
Spinta terreno	1.00	1.00	Sfavorevole

Combinazione n° 8 - STAB - Sisma Vert. positivo

Condizione	γ	Ψ	Effetto
Peso proprio	1.00	1.00	Sfavorevole
Spinta terreno	1.00	1.00	Sfavorevole

Combinazione n° 9 - STAB - Sisma Vert. negativo

Condizione	γ	Ψ	Effetto
Peso proprio	1.00	1.00	Sfavorevole
Spinta terreno	1.00	1.00	Sfavorevole

4.5.5.2 Risultati

Sintesi - Fattori di sicurezza

Verifiche esterne

Simbologia adottata

IC	Indice della combinazione
FS _{Rib}	Fattore di sicurezza a ribaltamento
FS _{Scor}	Fattore di sicurezza a scorrimento
FS _{Qlim}	Fattore di sicurezza a carico limite
FS _{Stab}	Fattore di sicurezza a stabilità globale

IC	FS _{Scor}	FS _{Qlim}	FS _{Rib}	FS _{Stab}
1	1.383	3.303	--	--
2	1.146	2.781	--	--
3	1.160	3.185	--	--
4	--	--	2.905	--
5	--	--	2.167	--
6	--	--	2.192	--
7	--	--	--	2.211
8	--	--	--	2.280
9	--	--	--	2.273

Verifiche interne

Simbologia adottata

n°	Indice rinforzo
FS _{Scor}	Fattore di sicurezza a scorrimento
FS _{Sfil}	Fattore di sicurezza a sfilamento
FS _{Traz}	Fattore di sicurezza a trazione
FS _{ScorR}	Fattore di sicurezza a scorrimento del risvolto

Combinazione n° 1

n°	FS _{Scor}	FS _{Sfil}	FS _{Traz}	FS _{ScorR}
1	2.917	5.834	33.816	--
2	2.917	5.834	12.084	--
3	2.917	5.834	6.136	--
4	4.830	9.659	5.834	--
5	7.661	15.321	5.834	--
6	1.570	3.140	5.834	--
7	3.913	7.827	3.140	--
8	8.304	16.608	3.140	--
9	13.690	27.379	3.140	--
10	16.464	32.929	3.140	--

Combinazione n° 2

n°	FS _{Scor}	FS _{Sfil}	FS _{Traz}	FS _{ScorR}
1	3.522	7.044	50.003	--
2	3.983	7.967	19.484	--
3	4.121	8.242	11.270	--
4	5.248	10.497	8.242	--
5	8.325	16.650	8.242	--
6	1.987	3.974	8.242	--
7	3.753	7.506	3.057	--
8	7.983	15.966	3.057	--
9	13.179	26.358	3.057	--
10	15.888	31.776	3.057	--

Combinazione n° 3

n°	FS _{Scor}	FS _{Sfil}	FS _{Traz}	FS _{ScorR}
1	3.033	6.065	43.056	--
2	3.430	6.860	16.777	--
3	3.623	7.246	9.909	--
4	4.615	9.229	7.246	--
5	7.320	14.639	7.246	--
6	2.098	4.196	7.246	--
7	3.963	7.926	3.228	--
8	8.429	16.859	3.228	--
9	13.916	27.832	3.228	--
10	16.776	33.552	3.228	--

Progetto di ottimizzazione del fronte perimetrale e completamento del sedime della
 Discarica di Grumolo delle Abbadesse con incremento dei volumi di conferimento

Verifiche composte

Simbologia adottata

IC Indice della combinazione
 FS_{comp} Coefficiente di sicurezza a stabilità locale (compound)

IC	FS _{comp}
1	2.150
2	2.524
3	2.402

Verifiche esterne

Risultati spinta

Simbologia adottata

n° Indice della combinazione
 S Spinta statica, incremento sismico della spinta e spinta falda, espresse in [kN]
 So Componente orizzontale della spinta statica, espresse in [kN]
 Sv Componente verticale della spinta statica, dell'incremento sismico o la sottospinta della falda, espresse in [kN]
 P Punto di applicazione della spinta, dell'incremento sismico e della spinta della falda, espresse in [kN]
 Is Inclinazione della spinta rispetto all'orizzontale, espresse in [°]

n°	Descrizione	S [kN]	So [kN]	Sv [kN]	P [m]	Is [°]
1	Spinta statica	147,95	144,16	33,26	0,00; -3,38	12,99
2	Spinta statica	99,46	96,92	22,31	0,00; -3,42	12,96
	Incremento sismico	22,62	22,04	5,07	0,00; -1,77	
3	Spinta statica	99,46	96,92	22,31	0,00; -3,42	12,96
	Incremento sismico	10,60	10,33	2,38	0,00; -1,77	

Risultanti al piano di posa

Simbologia adottata

n° Indice della combinazione
 Rp Risultante al piano di posa, espresse in [kN]
 β Inclinazione della risultante rispetto al piano di posa, espresse in [°]
 Rn Risultante normale al piano di posa, espresse in [kN]
 Rt Risultante tangente al piano di posa, espresse in [kN]
 Rx Risultante in direzione X, espresse in [kN]
 Ry Risultante in direzione Y, espresse in [kN]
 e Eccentricità rispetto al baricentro della fondazione, espresse in [m]
 Mr Momento ribaltante, espresso in [kNm]
 Ms Momento stabilizzante, espresso in [kNm]

n°	Rp [kN]	β [°]	Rn [kN]	Rt [kN]	Rx [kN]	Ry [kN]	e [m]	Mr [kNm]	Ms [kNm]
1	416,99	20.23	391,28	144,16	144,16	391,28	0,569		
2	342,40	23.97	312,86	139,13	139,13	312,86	0,827		
3	316,76	23.72	290,01	127,41	127,41	290,01	0,765		
4	340,66	25.03	308,66	144,16	144,16	308,66	0,722	247,65	719,43
5	359,50	26.80	320,87	162,11	162,11	320,87	1,000	343,62	744,73
6	320,88	26.74	286,55	144,39	144,39	286,55	0,925	318,69	698,48

Verifica a carico limite

Simbologia adottata

n° Indice della combinazione
 Rn Risultante normale al piano di posa, espresse in [kN]
 Qu Carico ultimo della fondazione, espresse in [kN]
 Pv Pressione terreno allo spigolo di valle, espresse in [kPa]
 Pm Pressione terreno allo spigolo di monte, espresse in [kPa]
 Lr Lunghezza fondazione reagente, espresse in [m]
 Nc, Nq, N_γ Coeff. di capacità portante
 N'c, N'q, N'_γ Coeff. di capacità portante corretti dai coeff. di forma, profondità, inclinazione del piano di posa e inclinazione del piano campagna a valle

n°	N [kN]	Qu [kN]	Pv [kPa]	Pm [kPa]	Lr [m]	Nc	Nq	N _γ	N'c	N'q	N' _γ
1	391,28	1292,46	152,9	21,0	4,50	23.94	13.20	14.47	13.44	7.82	5.31
2	312,86	870,08	146,6	0,0	4,27	23.94	13.20	14.47	11.26	6.72	4.01
3	290,01	923,78	130,2	0,0	4,46	23.94	13.20	14.47	11.41	6.80	4.09

Stabilità globale terra armata + terreno

Simbologia e convenzioni di segno adottate

Le ascisse X sono considerate positive verso monte
 Le ordinate Y sono considerate positive verso l'alto
 Origine in testa alla terra armata (spigolo contro terra)
 Is Indice della striscia
 W peso della striscia espresso in [kN]

Progetto di ottimizzazione del fronte perimetrale e completamento del sedime della Discarica di Grumolo delle Abbadesse con incremento dei volumi di conferimento

- α angolo fra la base della striscia e l'orizzontale espresso in [°] (positivo antiorario)
- φ angolo d'attrito del terreno lungo la base della striscia
- c coesione del terreno lungo la base della striscia espressa in [kPa]
- l lunghezza della base della striscia espressa in [m]
- u pressione neutra lungo la base della striscia espressa in [kPa]
- N sforzo normale alla base della striscia espressa in [kN]
- T sforzo tangenziale alla base della striscia espressa in [kN]
- Rt, Rn Resistenza tangenziale e normale del rinforzo alla base della striscia espressa in [kN]

Combinazione n° 7

Superficie di scorrimento n° 1629 - $F_s = 2.21$

Is	W [kN]	α [°]	φ [°]	c [kPa]	l [m]	u [kPa]	N [kN]	T [kN]	El [kN]	Er [kN]	Rt [kN]	Rn [kN]
1	12,55	-39.885	21.315	40000	1,62	0	22,09	4,66	0,00	17,74	0,00	0,00
2	32,56	-33.966	22.177	80000	1,50	0	49,06	10,47	17,74	53,84	0,00	0,00
3	48,34	-28.100	22.177	80000	1,41	0	63,86	13,04	53,84	95,42	0,00	0,00
4	61,47	-22.823	22.177	80000	1,35	0	74,57	15,41	95,42	138,55	0,00	0,00
5	71,70	-17.871	22.177	80000	1,31	0	81,75	17,40	138,55	180,20	0,00	0,00
6	79,27	-13.160	22.177	80000	1,28	0	86,23	18,96	180,20	218,29	0,00	0,00
7	84,35	-8.618	22.177	80000	1,26	0	88,49	20,04	218,29	251,36	0,00	0,00
8	87,06	-3.662	22.177	80000	1,25	0	88,58	20,64	251,36	277,62	0,00	0,00
9	102,94	1.879	22.177	80000	1,25	0	102,23	23,60	277,62	297,85	0,00	0,00
10	178,46	6.308	22.177	80000	1,25	0	175,45	37,43	297,85	315,77	0,00	0,00
11	190,14	10.815	22.177	80000	1,27	0	186,11	39,22	315,77	319,37	0,00	0,00
12	177,55	15.464	22.177	80000	1,29	0	173,99	36,41	319,37	308,07	0,00	0,00
13	154,13	20.581	22.177	80000	1,33	0	152,23	31,58	308,07	284,12	0,00	0,00
14	146,20	26.411	22.177	80000	1,39	0	147,18	29,32	284,12	244,91	0,00	0,00
15	135,13	31.680	22.177	80000	1,46	0	139,55	26,63	244,91	194,29	0,00	0,00
16	120,36	37.343	22.177	80000	1,57	0	128,83	23,43	194,29	134,77	0,00	0,00
17	103,23	43.467	13.744	80000	1,72	0	123,32	14,57	134,77	60,51	0,00	0,00
18	90,96	50.481	13.744	80000	1,96	0	118,36	13,56	60,51	-22,17	0,00	0,00
19	74,91	59.384	13.744	80000	2,45	0	111,17	13,14	-22,17	-111,15	0,00	0,00
20	41,86	70.654	21.315	40000	3,76	0	71,01	9,30	-111,15	-175,07	0,00	0,00

Combinazione n° 8

Superficie di scorrimento n° 1629 - $F_s = 2.28$

Is	W [kN]	α [°]	φ [°]	c [kPa]	l [m]	u [kPa]	N [kN]	T [kN]	El [kN]	Er [kN]	Rt [kN]	Rn [kN]
1	12,55	-39.885	26.000	50000	1,62	0	22,84	5,64	0,00	18,06	0,00	0,00
2	32,56	-33.966	27.000	100000	1,50	0	49,81	12,68	18,06	54,02	0,00	0,00
3	48,34	-28.100	27.000	100000	1,41	0	63,76	15,79	54,02	94,44	0,00	0,00
4	61,47	-22.823	27.000	100000	1,35	0	73,72	18,67	94,44	135,74	0,00	0,00
5	71,70	-17.871	27.000	100000	1,31	0	80,24	21,08	135,74	175,17	0,00	0,00
6	79,27	-13.160	27.000	100000	1,28	0	84,16	22,96	175,17	210,89	0,00	0,00
7	84,35	-8.618	27.000	100000	1,26	0	85,96	24,27	210,89	241,58	0,00	0,00
8	87,06	-3.662	27.000	100000	1,25	0	85,63	25,00	241,58	265,62	0,00	0,00
9	102,94	1.879	27.000	100000	1,25	0	98,32	28,58	265,62	283,43	0,00	0,00
10	178,46	6.308	27.000	100000	1,25	0	168,19	45,33	283,43	296,93	0,00	0,00
11	190,14	10.815	27.000	100000	1,27	0	177,80	47,50	296,93	296,30	0,00	0,00
12	177,55	15.464	27.000	100000	1,29	0	165,61	44,09	296,30	281,65	0,00	0,00
13	154,13	20.581	27.000	100000	1,33	0	144,25	38,24	281,65	255,45	0,00	0,00
14	146,20	26.411	27.000	100000	1,39	0	138,75	35,51	255,45	214,84	0,00	0,00
15	135,13	31.680	27.000	100000	1,46	0	130,87	32,25	214,84	163,66	0,00	0,00
16	120,36	37.343	27.000	100000	1,57	0	120,03	28,38	163,66	104,60	0,00	0,00
17	103,23	43.467	17.000	100000	1,72	0	115,16	17,65	104,60	30,63	0,00	0,00
18	90,96	50.481	17.000	100000	1,96	0	109,40	16,42	30,63	-49,98	0,00	0,00
19	74,91	59.384	17.000	100000	2,45	0	100,61	15,91	-49,98	-133,94	0,00	0,00
20	41,86	70.654	26.000	50000	3,76	0	60,89	11,26	-133,94	-190,73	0,00	0,00

Combinazione n° 9

Superficie di scorrimento n° 1629 - $F_s = 2.27$

Is	W [kN]	α [°]	φ [°]	c [kPa]	l [m]	u [kPa]	N [kN]	T [kN]	El [kN]	Er [kN]	Rt [kN]	Rn [kN]
1	12,55	-39.885	26.000	50000	1,62	0	24,33	5,66	0,00	19,03	0,00	0,00
2	32,56	-33.966	27.000	100000	1,50	0	53,24	12,72	19,03	56,94	0,00	0,00
3	48,34	-28.100	27.000	100000	1,41	0	68,36	15,84	56,94	99,57	0,00	0,00
4	61,47	-22.823	27.000	100000	1,35	0	79,14	18,73	99,57	143,02	0,00	0,00
5	71,70	-17.871	27.000	100000	1,31	0	86,21	21,14	143,02	184,35	0,00	0,00
6	79,27	-13.160	27.000	100000	1,28	0	90,47	23,03	184,35	221,57	0,00	0,00
7	84,35	-8.618	27.000	100000	1,26	0	92,43	24,34	221,57	253,31	0,00	0,00
8	87,06	-3.662	27.000	100000	1,25	0	92,11	25,07	253,31	277,85	0,00	0,00
9	102,94	1.879	27.000	100000	1,25	0	105,81	28,67	277,85	295,49	0,00	0,00
10	178,46	6.308	27.000	100000	1,25	0	181,00	45,47	295,49	307,73	0,00	0,00
11	190,14	10.815	27.000	100000	1,27	0	191,36	47,65	307,73	304,70	0,00	0,00
12	177,55	15.464	27.000	100000	1,29	0	178,28	44,23	304,70	286,80	0,00	0,00
13	154,13	20.581	27.000	100000	1,33	0	155,33	38,36	286,80	256,83	0,00	0,00
14	146,20	26.411	27.000	100000	1,39	0	149,45	35,62	256,83	211,55	0,00	0,00
15	135,13	31.680	27.000	100000	1,46	0	141,02	32,35	211,55	155,13	0,00	0,00
16	120,36	37.343	27.000	100000	1,57	0	129,42	28,46	155,13	90,45	0,00	0,00
17	103,23	43.467	17.000	100000	1,72	0	124,33	17,70	90,45	10,20	0,00	0,00
18	90,96	50.481	17.000	100000	1,96	0	118,32	16,47	10,20	-77,25	0,00	0,00
19	74,91	59.384	17.000	100000	2,45	0	109,27	15,96	-77,25	-168,64	0,00	0,00
20	41,86	70.654	26.000	50000	3,76	0	66,51	11,30	-168,64	-230,72	0,00	0,00

Progetto di ottimizzazione del fronte perimetrale e completamento del sedime della
 Discarica di Grumolo delle Abbadesse con incremento dei volumi di conferimento

Verifiche interne

Risultati rinforzi

Simbologia adottata

Ir Indice rinforzo
 Sft Sforzo nel rinforzo per meccanismo planare, espressa in [kN/m]
 Sfdc Sforzo nel rinforzo per meccanismo doppio cuneo, espressa in [kN/m]
 Sfr Sforzo nel rinforzo per meccanismo rotazionale, espressa in [kN/m] (sforzo che ha determinato il fattore di sicurezza minore a scorrimento)
 Gli sforzi nei rinforzi possono essere nulli. In tal caso la stabilità della superficie analizzata è garantita a meno del contributo dei rinforzi.

Combinazione n° 1

Ir	Sft [kN/m]	Sfdc [kN/m]	Sfr [kN/m]
1	--	0,0000	0,7962
2	--	0,0000	2,2280
3	--	0,0000	4,3875
4	--	0,0000	4,6152
5	--	0,0000	4,6152
6	--	4,0758	4,6152
7	--	8,5742	4,6152
8	--	8,5742	4,6152
9	--	8,5742	4,6152
10	--	8,5742	4,6152

Combinazione n° 2

Ir	Sft [kN/m]	Sfdc [kN/m]	Sfr [kN/m]
1	--	0,0000	0,5384
2	--	0,0000	1,3818
3	--	0,0000	2,3889
4	--	0,0000	3,2667
5	--	0,0000	3,2667
6	--	3,1643	3,2667
7	--	8,8076	3,2667
8	--	8,8076	3,2667
9	--	8,8076	3,2667
10	--	8,8076	3,2667

Combinazione n° 3

Ir	Sft [kN/m]	Sfdc [kN/m]	Sfr [kN/m]
1	--	0,0000	0,6253
2	--	0,0000	1,6048
3	--	0,0000	2,7170
4	--	0,0000	3,7155
5	--	0,0000	3,7155
6	--	2,9967	3,7155
7	--	8,3412	3,7155
8	--	8,3412	3,7155
9	--	8,3412	3,7155
10	--	8,3412	3,7155

Meccanismi di rottura

Simbologia adottata

n° Indice del rinforzo
 Sf Sforzo nel rinforzo per meccanismo planare, espressa in [kN/m]
 Rsc0 Resistenza allo scorrimento, espressa in [kN/m]
 FSsco Fattore di sicurezza allo scorrimento
 Rsf Resistenza allo sfilamento, espressa in [kN/m]
 FSsf Fattore di sicurezza allo sfilamento
 Rtra Resistenza a trazione, espressa in [kN/m]
 FStra Fattore di sicurezza a trazione
 Ll, Lf Lunghezza libera e di fondazione, espresse in [m]

Meccanismo rottura doppio cuneo

Combinazione n° 1

Ir	Sf [kN/m]	Rsc0 [kN/m]	FSsco	Rsf [kN/m]	FSsf	Rtra [kN/m]	FStra	Ll [m]	Lf [m]
1	0,0000	0,0000	100,000	0,0000	100,000	0,0000	100,000	1,74	0,00
2	0,0000	0,0000	100,000	0,0000	100,000	0,0000	100,000	2,03	0,00
3	0,0000	0,0000	100,000	0,0000	100,000	0,0000	100,000	2,32	0,00
4	0,0000	0,0000	100,000	0,0000	100,000	0,0000	100,000	2,62	0,00
5	0,0000	0,0000	100,000	0,0000	100,000	0,0000	100,000	2,91	0,00
6	4,0758	6,3990	1,570	12,7981	3,140	12,7981	6,606	2,67	0,54
7	8,5742	33,5536	3,913	67,1072	7,827	26,9231	3,140	2,20	1,30
8	8,5742	71,2019	8,304	142,4038	16,608	26,9231	3,140	1,72	2,07
9	8,5742	117,3790	13,690	234,7579	27,379	26,9231	3,140	1,25	2,84
10	8,5742	141,1688	16,464	282,3375	32,929	26,9231	3,140	1,01	3,22

Progetto di ottimizzazione del fronte perimetrale e completamento del sedime della Discarica di Grumolo delle Abbadesse con incremento dei volumi di conferimento

Combinazione n° 2

Ir	Sf [kN/m]	RSCO [kN/m]	FSsco	Rsfi [kN/m]	FSsfi	Rtra [kN/m]	FStra	LI [m]	Lf [m]
1	0,0000	0,0000	100,000	0,0000	100,000	0,0000	100,000	1,74	0,00
2	0,0000	0,0000	100,000	0,0000	100,000	0,0000	100,000	2,03	0,00
3	0,0000	0,0000	100,000	0,0000	100,000	0,0000	100,000	2,32	0,00
4	0,0000	0,0000	100,000	0,0000	100,000	0,0000	100,000	2,62	0,00
5	0,0000	0,0000	100,000	0,0000	100,000	0,0000	100,000	2,91	0,00
6	3,1643	6,2871	1,987	12,5743	3,974	9,6725	8,508	2,67	0,53
7	8,8076	33,0564	3,753	66,1129	7,506	26,9231	3,057	2,21	1,29
8	8,8076	70,3106	7,983	140,6212	15,966	26,9231	3,057	1,74	2,05
9	8,8076	116,0768	13,179	232,1537	26,358	26,9231	3,057	1,28	2,81
10	8,8076	139,9341	15,888	279,8681	31,776	26,9231	3,057	1,04	3,19

Combinazione n° 3

Ir	Sf [kN/m]	RSCO [kN/m]	FSsco	Rsfi [kN/m]	FSsfi	Rtra [kN/m]	FStra	LI [m]	Lf [m]
1	0,0000	0,0000	100,000	0,0000	100,000	0,0000	100,000	1,74	0,00
2	0,0000	0,0000	100,000	0,0000	100,000	0,0000	100,000	2,03	0,00
3	0,0000	0,0000	100,000	0,0000	100,000	0,0000	100,000	2,32	0,00
4	0,0000	0,0000	100,000	0,0000	100,000	0,0000	100,000	2,62	0,00
5	0,0000	0,0000	100,000	0,0000	100,000	0,0000	100,000	2,91	0,00
6	2,9967	6,2871	2,098	12,5743	4,196	9,6725	8,984	2,67	0,53
7	8,3412	33,0564	3,963	66,1129	7,926	26,9231	3,228	2,21	1,29
8	8,3412	70,3106	8,429	140,6212	16,859	26,9231	3,228	1,74	2,05
9	8,3412	116,0768	13,916	232,1537	27,832	26,9231	3,228	1,28	2,81
10	8,3412	139,9341	16,776	279,8681	33,552	26,9231	3,228	1,04	3,19

Meccanismo rottura rotazionale

Combinazione n° 1

Cerchio n° 211 - Centro (-6,64; 0,00) - Raggio 6,27 - Intersezione profilo valle (-3,00; -5,10) - Intersezione profilo monte (-0,38; 0,00)

Ir	Sf [kN/m]	RSCO [kN/m]	FSsco	Rsfi [kN/m]	FSsfi	Rtra [kN/m]	FStra	LI [m]	Lf [m]
1	0,7962	2,3223	2,917	4,6445	5,834	4,6445	33,816	1,23	0,51
2	2,2280	6,4987	2,917	12,9973	5,834	12,9973	12,084	1,32	0,70
3	4,3875	12,7973	2,917	25,5946	5,834	25,5946	6,136	1,38	0,95
4	4,6152	22,2891	4,830	44,5782	9,659	26,9231	5,834	1,39	1,23
5	4,6152	35,3550	7,661	70,7100	15,321	26,9231	5,834	1,35	1,56
6	4,6152	53,5777	11,609	107,1554	23,218	26,9231	5,834	1,27	1,94
7	4,6152	77,9597	16,892	155,9195	33,784	26,9231	5,834	1,12	2,38
8	4,6152	108,6715	23,546	217,3430	47,093	26,9231	5,834	0,91	2,88
9	4,6152	142,1592	30,802	284,3183	61,605	26,9231	5,834	0,61	3,48
10	4,6152	159,0147	34,455	318,0294	68,909	26,9231	5,834	0,42	3,81

Combinazione n° 2

Cerchio n° 211 - Centro (-6,64; 0,00) - Raggio 6,27 - Intersezione profilo valle (-3,00; -5,10) - Intersezione profilo monte (-0,38; 0,00)

Ir	Sf [kN/m]	RSCO [kN/m]	FSsco	Rsfi [kN/m]	FSsfi	Rtra [kN/m]	FStra	LI [m]	Lf [m]
1	0,4335	1,7864	4,121	3,5727	8,242	3,5727	62,107	1,23	0,51
2	1,2131	4,9990	4,121	9,9979	8,242	9,9979	22,193	1,32	0,70
3	2,3889	9,8441	4,121	19,6881	8,242	19,6881	11,270	1,38	0,95
4	3,2667	17,1455	5,248	34,2909	10,497	26,9231	8,242	1,39	1,23
5	3,2667	27,1961	8,325	54,3923	16,650	26,9231	8,242	1,35	1,56
6	3,2667	41,2136	12,616	82,4273	25,232	26,9231	8,242	1,27	1,94
7	3,2667	59,9690	18,357	119,9381	36,715	26,9231	8,242	1,12	2,38
8	3,2667	83,5935	25,589	167,1870	51,179	26,9231	8,242	0,91	2,88
9	3,2667	109,3532	33,475	218,7064	66,949	26,9231	8,242	0,61	3,48
10	3,2667	122,3190	37,444	244,6380	74,888	26,9231	8,242	0,42	3,81

Combinazione n° 3

Cerchio n° 211 - Centro (-6,64; 0,00) - Raggio 6,27 - Intersezione profilo valle (-3,00; -5,10) - Intersezione profilo monte (-0,38; 0,00)

Ir	Sf [kN/m]	RSCO [kN/m]	FSsco	Rsfi [kN/m]	FSsfi	Rtra [kN/m]	FStra	LI [m]	Lf [m]
1	0,4930	1,7864	3,623	3,5727	7,246	3,5727	54,606	1,23	0,51
2	1,3797	4,9990	3,623	9,9979	7,246	9,9979	19,513	1,32	0,70
3	2,7170	9,8441	3,623	19,6881	7,246	19,6881	9,909	1,38	0,95
4	3,7155	17,1455	4,615	34,2909	9,229	26,9231	7,246	1,39	1,23
5	3,7155	27,1961	7,320	54,3923	14,639	26,9231	7,246	1,35	1,56
6	3,7155	41,2136	11,092	82,4273	22,185	26,9231	7,246	1,27	1,94
7	3,7155	59,9690	16,140	119,9381	32,281	26,9231	7,246	1,12	2,38
8	3,7155	83,5935	22,499	167,1870	44,998	26,9231	7,246	0,91	2,88
9	3,7155	109,3532	29,432	218,7064	58,864	26,9231	7,246	0,61	3,48
10	3,7155	122,3190	32,922	244,6380	65,843	26,9231	7,246	0,42	3,81

Verifiche composte

Stabilità globale della terra armata

Simbologia e convenzioni di segno adottate

Le ascisse X sono considerate positive verso monte

Le ordinate Y sono considerate positive verso l'alto

Origine in testa alla terra armata (spigolo contro terra)

- Is Indice della striscia
- W peso della striscia espresso in [kN]
- α angolo fra la base della striscia e l'orizzontale espresso in [°] (positivo antiorario)
- φ angolo d'attrito del terreno lungo la base della striscia
- c coesione del terreno lungo la base della striscia espressa in [kPa]
- b larghezza della striscia espressa in [m]
- u pressione neutra lungo la base della striscia espressa in [kPa]
- N sforzo normale alla base della striscia espressa in [kN]
- T sforzo tangenziale alla base della striscia espressa in [kN]

Combinazione n° 1

Superficie di scorrimento n° 207 - $F_s = 2.56$

Is	W [kN]	α [°]	φ [°]	c [kPa]	b [m]	u [kPa]	N [kN]	T [kN]
1	0,35	46.666	30.000	5	0,16	0	0,24	0,37
2	1,04	47.222	30.000	5	0,17	0	0,71	0,48
3	1,71	48.721	30.000	5	0,17	0	1,13	0,59
4	2,38	49.961	30.000	5	0,17	0	1,53	0,69
5	3,03	50.777	30.000	5	0,18	0	1,91	0,78
6	3,66	52.818	30.000	5	0,19	0	2,21	0,86
7	4,27	53.810	30.000	5	0,19	0	2,52	0,94
8	4,86	54.904	30.000	5	0,20	0	2,79	1,01
9	5,43	56.944	30.000	5	0,21	0	2,96	1,07
10	5,97	58.259	30.000	5	0,21	0	3,14	1,12
11	6,49	59.691	30.000	5	0,22	0	3,27	1,17
12	6,97	61.268	30.000	5	0,23	0	3,35	1,21
13	7,41	63.111	30.000	5	0,25	0	3,35	1,24
14	7,58	65.076	30.000	5	0,27	0	3,20	1,24
15	6,97	67.011	30.000	5	0,29	0	2,72	1,17
16	6,24	69.139	30.000	5	0,32	0	2,22	1,12
17	5,40	71.791	30.000	5	0,36	0	1,69	1,08
18	4,43	74.442	30.000	5	0,42	0	1,19	1,09
19	3,23	77.935	30.000	5	0,54	0	0,68	1,20
20	1,46	83.232	30.000	5	0,95	0	0,17	1,90

Superficie di scorrimento n° 209 - $F_s = 2.78$

Is	W [kN]	α [°]	φ [°]	c [kPa]	b [m]	u [kPa]	N [kN]	T [kN]
1	0,32	50.908	30.000	5	0,18	0	0,20	0,36
2	0,96	51.593	30.000	5	0,18	0	0,60	0,45
3	1,59	52.517	30.000	5	0,18	0	0,97	0,53
4	2,20	53.954	30.000	5	0,19	0	1,29	0,61
5	2,79	54.815	30.000	5	0,20	0	1,61	0,69
6	3,37	55.744	30.000	5	0,20	0	1,90	0,75
7	3,93	57.344	30.000	5	0,21	0	2,12	0,82
8	4,47	58.408	30.000	5	0,21	0	2,34	0,87
9	4,98	59.544	30.000	5	0,22	0	2,52	0,92
10	5,47	60.768	30.000	5	0,23	0	2,67	0,97
11	5,93	62.171	30.000	5	0,24	0	2,77	1,01
12	6,36	63.705	30.000	5	0,25	0	2,82	1,04
13	6,75	65.147	30.000	5	0,27	0	2,84	1,07
14	6,87	66.687	30.000	5	0,28	0	2,72	1,08
15	6,21	68.327	30.000	5	0,30	0	2,29	1,02
16	5,43	70.154	30.000	5	0,33	0	1,84	0,98
17	4,56	72.284	30.000	5	0,37	0	1,39	0,95
18	3,57	74.361	30.000	5	0,42	0	0,96	0,95
19	2,40	77.091	30.000	5	0,50	0	0,54	1,02
20	0,92	80.303	30.000	5	0,67	0	0,16	1,23

Superficie di scorrimento n° 211 - $F_s = 2.15$

Is	W [kN]	α [°]	φ [°]	c [kPa]	b [m]	u [kPa]	N [kN]	T [kN]
1	0,53	36.891	30.000	5	0,16	0	0,43	0,50
2	1,60	37.411	30.000	5	0,17	0	1,27	0,73
3	2,65	39.615	30.000	5	0,17	0	2,04	0,94
4	3,68	40.832	30.000	5	0,17	0	2,79	1,15
5	4,69	42.338	30.000	5	0,18	0	3,47	1,34
6	5,68	44.429	30.000	5	0,18	0	4,06	1,52
7	6,65	45.506	30.000	5	0,19	0	4,66	1,69
8	7,59	47.786	30.000	5	0,20	0	5,10	1,82
9	8,51	49.540	30.000	5	0,20	0	5,52	1,95
10	9,39	51.047	30.000	5	0,21	0	5,90	2,07
11	10,24	53.233	30.000	5	0,22	0	6,13	2,16
12	10,83	55.518	30.000	5	0,23	0	6,13	2,19
13	10,35	57.529	30.000	5	0,24	0	5,56	2,06
14	9,69	59.767	30.000	5	0,26	0	4,88	1,92
15	8,96	62.255	30.000	5	0,28	0	4,17	1,78

Is	W [kN]	α [°]	ϕ [°]	c [kPa]	b [m]	u [kPa]	N [kN]	T [kN]
16	8,14	65.013	30.000	5	0,31	0	3,44	1,65
17	7,22	68.048	30.000	5	0,35	0	2,70	1,54
18	6,12	71.346	30.000	5	0,41	0	1,96	1,48
19	4,75	75.933	30.000	5	0,54	0	1,15	1,57
20	2,58	84.094	30.000	5	1,28	0	0,27	3,04

Superficie di scorrimento n° 212 - $F_s = 2.25$

Is	W [kN]	α [°]	ϕ [°]	c [kPa]	b [m]	u [kPa]	N [kN]	T [kN]
1	0,51	40.806	30.000	5	0,17	0	0,39	0,48
2	1,53	41.518	30.000	5	0,18	0	1,15	0,68
3	2,53	43.118	30.000	5	0,18	0	1,85	0,87
4	3,52	44.667	30.000	5	0,18	0	2,50	1,05
5	4,48	45.635	30.000	5	0,19	0	3,13	1,22
6	5,42	47.741	30.000	5	0,20	0	3,65	1,37
7	6,34	49.097	30.000	5	0,20	0	4,15	1,51
8	7,24	50.375	30.000	5	0,21	0	4,61	1,64
9	8,10	52.363	30.000	5	0,21	0	4,95	1,75
10	8,93	54.149	30.000	5	0,22	0	5,23	1,84
11	9,73	55.783	30.000	5	0,23	0	5,47	1,92
12	10,26	57.571	30.000	5	0,24	0	5,50	1,96
13	9,73	59.531	30.000	5	0,26	0	4,93	1,84
14	9,01	61.677	30.000	5	0,28	0	4,27	1,71
15	8,22	64.021	30.000	5	0,30	0	3,60	1,59
16	7,35	66.571	30.000	5	0,33	0	2,92	1,48
17	6,36	69.324	30.000	5	0,37	0	2,24	1,40
18	5,20	72.259	30.000	5	0,43	0	1,58	1,36
19	3,77	76.282	30.000	5	0,55	0	0,89	1,46
20	1,67	82.078	30.000	5	0,95	0	0,23	2,18

Combinazione n° 2

Superficie di scorrimento n° 207 - $F_s = 3.07$

Is	W [kN]	α [°]	ϕ [°]	c [kPa]	b [m]	u [kPa]	N [kN]	T [kN]
1	0,27	46.666	30.000	5	0,16	0	0,18	0,30
2	0,80	47.222	30.000	5	0,17	0	0,54	0,37
3	1,32	48.721	30.000	5	0,17	0	0,87	0,44
4	1,83	49.961	30.000	5	0,17	0	1,18	0,51
5	2,33	50.777	30.000	5	0,18	0	1,47	0,57
6	2,81	52.818	30.000	5	0,19	0	1,70	0,62
7	3,28	53.810	30.000	5	0,19	0	1,94	0,67
8	3,74	54.904	30.000	5	0,20	0	2,15	0,72
9	4,18	56.944	30.000	5	0,21	0	2,28	0,76
10	4,59	58.259	30.000	5	0,21	0	2,42	0,80
11	4,99	59.691	30.000	5	0,22	0	2,52	0,84
12	5,36	61.268	30.000	5	0,23	0	2,58	0,87
13	5,70	63.111	30.000	5	0,25	0	2,58	0,89
14	5,83	65.076	30.000	5	0,27	0	2,46	0,90
15	5,37	67.011	30.000	5	0,29	0	2,10	0,86
16	4,80	69.139	30.000	5	0,32	0	1,71	0,84
17	4,16	71.791	30.000	5	0,36	0	1,30	0,83
18	3,41	74.442	30.000	5	0,42	0	0,91	0,85
19	2,48	77.935	30.000	5	0,54	0	0,52	0,97
20	1,12	83.232	30.000	5	0,95	0	0,13	1,58

Superficie di scorrimento n° 209 - $F_s = 3.33$

Is	W [kN]	α [°]	ϕ [°]	c [kPa]	b [m]	u [kPa]	N [kN]	T [kN]
1	0,25	50.908	30.000	5	0,18	0	0,16	0,29
2	0,74	51.593	30.000	5	0,18	0	0,46	0,35
3	1,22	52.517	30.000	5	0,18	0	0,74	0,41
4	1,69	53.954	30.000	5	0,19	0	0,99	0,46
5	2,15	54.815	30.000	5	0,20	0	1,24	0,51
6	2,59	55.744	30.000	5	0,20	0	1,46	0,55
7	3,02	57.344	30.000	5	0,21	0	1,63	0,60
8	3,44	58.408	30.000	5	0,21	0	1,80	0,63
9	3,83	59.544	30.000	5	0,22	0	1,94	0,67
10	4,21	60.768	30.000	5	0,23	0	2,05	0,70
11	4,56	62.171	30.000	5	0,24	0	2,13	0,73
12	4,89	63.705	30.000	5	0,25	0	2,17	0,76
13	5,19	65.147	30.000	5	0,27	0	2,18	0,78
14	5,28	66.687	30.000	5	0,28	0	2,09	0,79
15	4,78	68.327	30.000	5	0,30	0	1,76	0,76
16	4,17	70.154	30.000	5	0,33	0	1,42	0,74
17	3,50	72.284	30.000	5	0,37	0	1,07	0,74
18	2,74	74.361	30.000	5	0,42	0	0,74	0,75
19	1,85	77.091	30.000	5	0,50	0	0,41	0,83
20	0,71	80.303	30.000	5	0,67	0	0,12	1,02

Superficie di scorrimento n° 211 - $F_s = 2.52$

Is	W [kN]	α [°]	ϕ [°]	c [kPa]	b [m]	u [kPa]	N [kN]	T [kN]
1	0,41	36.891	30.000	5	0,16	0	0,33	0,40
2	1,23	37.411	30.000	5	0,17	0	0,98	0,55
3	2,04	39.615	30.000	5	0,17	0	1,57	0,70
4	2,83	40.832	30.000	5	0,17	0	2,14	0,83
5	3,61	42.338	30.000	5	0,18	0	2,67	0,96
6	4,37	44.429	30.000	5	0,18	0	3,12	1,08
7	5,12	45.506	30.000	5	0,19	0	3,59	1,19
8	5,84	47.786	30.000	5	0,20	0	3,92	1,28
9	6,55	49.540	30.000	5	0,20	0	4,25	1,37
10	7,22	51.047	30.000	5	0,21	0	4,54	1,45
11	7,88	53.233	30.000	5	0,22	0	4,71	1,51
12	8,33	55.518	30.000	5	0,23	0	4,72	1,54
13	7,96	57.529	30.000	5	0,24	0	4,27	1,46
14	7,45	59.767	30.000	5	0,26	0	3,75	1,37
15	6,89	62.255	30.000	5	0,28	0	3,21	1,29
16	6,26	65.013	30.000	5	0,31	0	2,65	1,22
17	5,55	68.048	30.000	5	0,35	0	2,08	1,17
18	4,71	71.346	30.000	5	0,41	0	1,51	1,16
19	3,65	75.933	30.000	5	0,54	0	0,89	1,27
20	1,99	84.094	30.000	5	1,28	0	0,20	2,57

Superficie di scorrimento n° 212 - $F_s = 2.65$

Is	W [kN]	α [°]	ϕ [°]	c [kPa]	b [m]	u [kPa]	N [kN]	T [kN]
1	0,39	40.806	30.000	5	0,17	0	0,30	0,39
2	1,18	41.518	30.000	5	0,18	0	0,88	0,52
3	1,95	43.118	30.000	5	0,18	0	1,42	0,65
4	2,71	44.667	30.000	5	0,18	0	1,93	0,77
5	3,45	45.635	30.000	5	0,19	0	2,41	0,88
6	4,17	47.741	30.000	5	0,20	0	2,81	0,98
7	4,88	49.097	30.000	5	0,20	0	3,20	1,08
8	5,57	50.375	30.000	5	0,21	0	3,55	1,16
9	6,23	52.363	30.000	5	0,21	0	3,80	1,24
10	6,87	54.149	30.000	5	0,22	0	4,02	1,30
11	7,49	55.783	30.000	5	0,23	0	4,21	1,36
12	7,90	57.571	30.000	5	0,24	0	4,23	1,39
13	7,48	59.531	30.000	5	0,26	0	3,79	1,32
14	6,93	61.677	30.000	5	0,28	0	3,29	1,24
15	6,32	64.021	30.000	5	0,30	0	2,77	1,17
16	5,65	66.571	30.000	5	0,33	0	2,25	1,11
17	4,89	69.324	30.000	5	0,37	0	1,73	1,08
18	4,00	72.259	30.000	5	0,43	0	1,22	1,08
19	2,90	76.282	30.000	5	0,55	0	0,69	1,20
20	1,28	82.078	30.000	5	0,95	0	0,18	1,84

Combinazione n° 3

Superficie di scorrimento n° 207 - $F_s = 2.91$

Is	W [kN]	α [°]	ϕ [°]	c [kPa]	b [m]	u [kPa]	N [kN]	T [kN]
1	0,27	46.666	30.000	5	0,16	0	0,18	0,32
2	0,80	47.222	30.000	5	0,17	0	0,54	0,39
3	1,32	48.721	30.000	5	0,17	0	0,87	0,47
4	1,83	49.961	30.000	5	0,17	0	1,18	0,53
5	2,33	50.777	30.000	5	0,18	0	1,47	0,60
6	2,81	52.818	30.000	5	0,19	0	1,70	0,66
7	3,28	53.810	30.000	5	0,19	0	1,94	0,71
8	3,74	54.904	30.000	5	0,20	0	2,15	0,76
9	4,18	56.944	30.000	5	0,21	0	2,28	0,81
10	4,59	58.259	30.000	5	0,21	0	2,42	0,85
11	4,99	59.691	30.000	5	0,22	0	2,52	0,88
12	5,36	61.268	30.000	5	0,23	0	2,58	0,91
13	5,70	63.111	30.000	5	0,25	0	2,58	0,94
14	5,83	65.076	30.000	5	0,27	0	2,46	0,95
15	5,37	67.011	30.000	5	0,29	0	2,10	0,91
16	4,80	69.139	30.000	5	0,32	0	1,71	0,88
17	4,16	71.791	30.000	5	0,36	0	1,30	0,88
18	3,41	74.442	30.000	5	0,42	0	0,91	0,90
19	2,48	77.935	30.000	5	0,54	0	0,52	1,03
20	1,12	83.232	30.000	5	0,95	0	0,13	1,66

Superficie di scorrimento n° 209 - $F_s = 3.16$

Is	W [kN]	α [°]	ϕ [°]	c [kPa]	b [m]	u [kPa]	N [kN]	T [kN]
1	0,25	50.908	30.000	5	0,18	0	0,16	0,31
2	0,74	51.593	30.000	5	0,18	0	0,46	0,37
3	1,22	52.517	30.000	5	0,18	0	0,74	0,43
4	1,69	53.954	30.000	5	0,19	0	0,99	0,48
5	2,15	54.815	30.000	5	0,20	0	1,24	0,54
6	2,59	55.744	30.000	5	0,20	0	1,46	0,58
7	3,02	57.344	30.000	5	0,21	0	1,63	0,63
8	3,44	58.408	30.000	5	0,21	0	1,80	0,67
9	3,83	59.544	30.000	5	0,22	0	1,94	0,71
10	4,21	60.768	30.000	5	0,23	0	2,05	0,74
11	4,56	62.171	30.000	5	0,24	0	2,13	0,77

Is	W [kN]	α [°]	ϕ [°]	c [kPa]	b [m]	u [kPa]	N [kN]	T [kN]
12	4,89	63.705	30.000	5	0,25	0	2,17	0,80
13	5,19	65.147	30.000	5	0,27	0	2,18	0,82
14	5,28	66.687	30.000	5	0,28	0	2,09	0,83
15	4,78	68.327	30.000	5	0,30	0	1,76	0,80
16	4,17	70.154	30.000	5	0,33	0	1,42	0,78
17	3,50	72.284	30.000	5	0,37	0	1,07	0,78
18	2,74	74.361	30.000	5	0,42	0	0,74	0,80
19	1,85	77.091	30.000	5	0,50	0	0,41	0,87
20	0,71	80.303	30.000	5	0,67	0	0,12	1,08

Superficie di scorrimento n° 211 - $F_s = 2.40$

Is	W [kN]	α [°]	ϕ [°]	c [kPa]	b [m]	u [kPa]	N [kN]	T [kN]
1	0,41	36.891	30.000	5	0,16	0	0,33	0,42
2	1,23	37.411	30.000	5	0,17	0	0,98	0,58
3	2,04	39.615	30.000	5	0,17	0	1,57	0,73
4	2,83	40.832	30.000	5	0,17	0	2,14	0,88
5	3,61	42.338	30.000	5	0,18	0	2,67	1,01
6	4,37	44.429	30.000	5	0,18	0	3,12	1,13
7	5,12	45.506	30.000	5	0,19	0	3,59	1,25
8	5,84	47.786	30.000	5	0,20	0	3,92	1,35
9	6,55	49.540	30.000	5	0,20	0	4,25	1,44
10	7,22	51.047	30.000	5	0,21	0	4,54	1,53
11	7,88	53.233	30.000	5	0,22	0	4,71	1,59
12	8,33	55.518	30.000	5	0,23	0	4,72	1,62
13	7,96	57.529	30.000	5	0,24	0	4,27	1,54
14	7,45	59.767	30.000	5	0,26	0	3,75	1,44
15	6,89	62.255	30.000	5	0,28	0	3,21	1,36
16	6,26	65.013	30.000	5	0,31	0	2,65	1,28
17	5,55	68.048	30.000	5	0,35	0	2,08	1,23
18	4,71	71.346	30.000	5	0,41	0	1,51	1,22
19	3,65	75.933	30.000	5	0,54	0	0,89	1,34
20	1,99	84.094	30.000	5	1,28	0	0,20	2,70

Superficie di scorrimento n° 212 - $F_s = 2.52$

Is	W [kN]	α [°]	ϕ [°]	c [kPa]	b [m]	u [kPa]	N [kN]	T [kN]
1	0,39	40.806	30.000	5	0,17	0	0,30	0,41
2	1,18	41.518	30.000	5	0,18	0	0,88	0,55
3	1,95	43.118	30.000	5	0,18	0	1,42	0,68
4	2,71	44.667	30.000	5	0,18	0	1,93	0,81
5	3,45	45.635	30.000	5	0,19	0	2,41	0,93
6	4,17	47.741	30.000	5	0,20	0	2,81	1,03
7	4,88	49.097	30.000	5	0,20	0	3,20	1,13
8	5,57	50.375	30.000	5	0,21	0	3,55	1,22
9	6,23	52.363	30.000	5	0,21	0	3,80	1,30
10	6,87	54.149	30.000	5	0,22	0	4,02	1,37
11	7,49	55.783	30.000	5	0,23	0	4,21	1,43
12	7,90	57.571	30.000	5	0,24	0	4,23	1,46
13	7,48	59.531	30.000	5	0,26	0	3,79	1,39
14	6,93	61.677	30.000	5	0,28	0	3,29	1,30
15	6,32	64.021	30.000	5	0,30	0	2,77	1,23
16	5,65	66.571	30.000	5	0,33	0	2,25	1,17
17	4,89	69.324	30.000	5	0,37	0	1,73	1,14
18	4,00	72.259	30.000	5	0,43	0	1,22	1,14
19	2,90	76.282	30.000	5	0,55	0	0,69	1,26
20	1,28	82.078	30.000	5	0,95	0	0,18	1,93

4.6 Analisi con Modello FEM PLAXIS²¹

4.6.1 Richiami teorici

L'analisi del comportamento del *Muro* nelle quattro sezioni tipo di cui al par. 4.3, preventivamente condotta con il modello speditivo, più agevole e controllabile, illustrato nel precedente paragrafo, è stata integrata con l'utilizzo di idoneo software di calcolo agli elementi finiti. Con tale approccio che, come precedentemente riferito, è più complesso e oneroso, oltre che di minor controllabilità, è, nondimeno, possibile inseguire le risposte dei rinforzi in corrispondenza delle singolarità (risvolti, connessioni, ecc.). Altresì, l'analisi FEM consente di simulare con maggior precisione il comportamento del terreno e dei rifiuti, le interazioni fra geosintetici di varia tipologia ed il terreno e/o rifiuti e determinare, nel corso di tutte le fasi costruttive ed operative, sia gli stati di sollecitazione e deformazione nel terreno e nei geosintetici, sia il grado di sicurezza dell'opera, grazie anche all'analisi delle deformazioni.

Nel caso in esame, è stato utilizzato un programma agli elementi finiti bidimensionale in condizioni di stato piano di deformazione, adottando appropriati modelli costitutivi per la simulazione del comportamento del terreno, dei rifiuti e dei geosintetici. Inoltre, si è fatto ricorso ad elementi interfaccia per la definizione degli attriti fra i diversi materiali.

Tutte le analisi in condizioni statiche (Stato Limite Ultimo e Stato Limite di Servizio) sono state svolte con l'impiego di software dedicati alla risoluzione di problemi di tipo geotecnico quali, nella fattispecie, il *PLAXIS 2019*.

Le principali caratteristiche del programma sono:

Automatic mesh generation: la mesh utilizzata da PLAXIS è costituita da elementi triangolari, generati in automatico;

Interfaces: l'interazione tra le strutture e il terreno è simulata con valori di attrito e adesione che possono essere diversi da quelli del terreno circostante;

Advanced soil model: vengono utilizzate per modellare il terreno con leggi costitutive più avanzate e complesse rispetto a quella di Mohr-Coulomb;

Staged construction: il programma consente di simulare processi di costruzione e di scavo per fasi successive, consentendo di tener conto in modo realistico dell'evoluzione dello stato tensionale al progredire dell'intervento;

Phi-c reduction: per la valutazione delle condizioni di stabilità globale sono state condotte analisi tipo phi-c reduction, intendendo con ciò la progressiva riduzione delle caratteristiche di resistenza del terreno ($\tan\varphi'$ e c') fino al completo sviluppo del meccanismo di rottura.

Il fattore di sovraresistenza è definito dall'espressione:

$$OSF = \frac{\text{Resistenza disponibile}}{\text{Resistenza a rottura}} = \frac{\text{tg } \varphi_{input}}{\text{tg } \varphi_{reduced}} = \frac{c_{input}}{c_{reduced}} = \sum M_{sf}$$

²¹ Codice di calcolo messo a disposizione nell'ambito della Convenzione fra SIA e l'Università di Padova del marzo 2021.

Il valore di *OSF* va inteso come il margine di sicurezza rispetto ad un fenomeno di instabilità globale.

Il pedice “*input*” si riferisce alla caratteristica di resistenza adottata per l’analisi in esame, mentre il pedice “*reduced*” si riferisce alla caratteristica di resistenza per la quale si sviluppa il primo cinematismo di rottura.

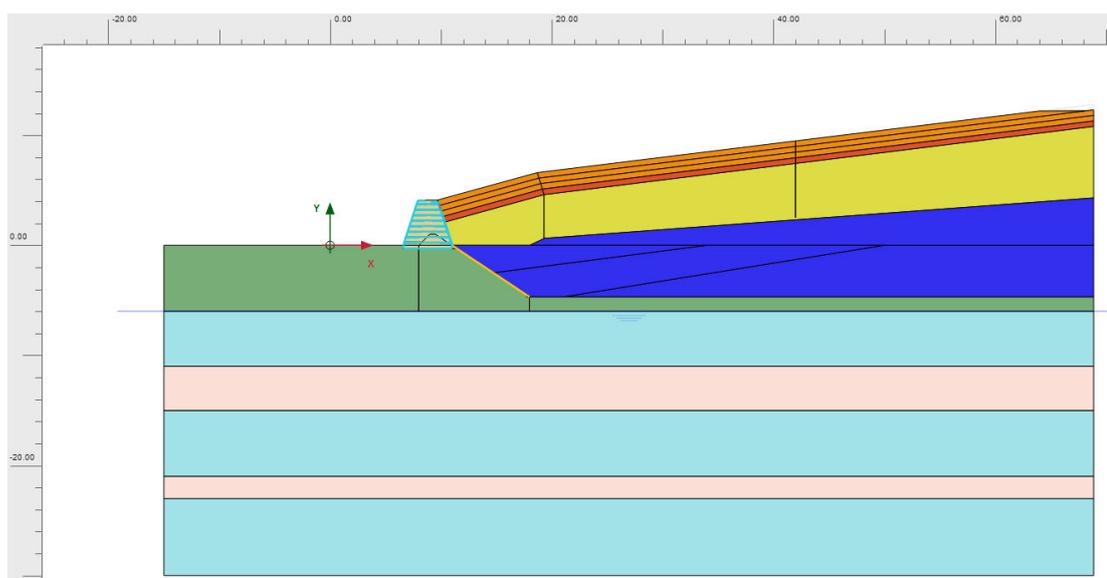
La riduzione dei parametri di resistenza al taglio è controllata dal moltiplicatore totale ΣM_{sf} il quale viene aumentato in una procedura fino a quando non si stabilizza per valori di spostamento considerevoli. *FS* è definito, quindi, come il valore di ΣM_{sf} in condizioni di incipiente collasso.

4.6.2 Dati di input

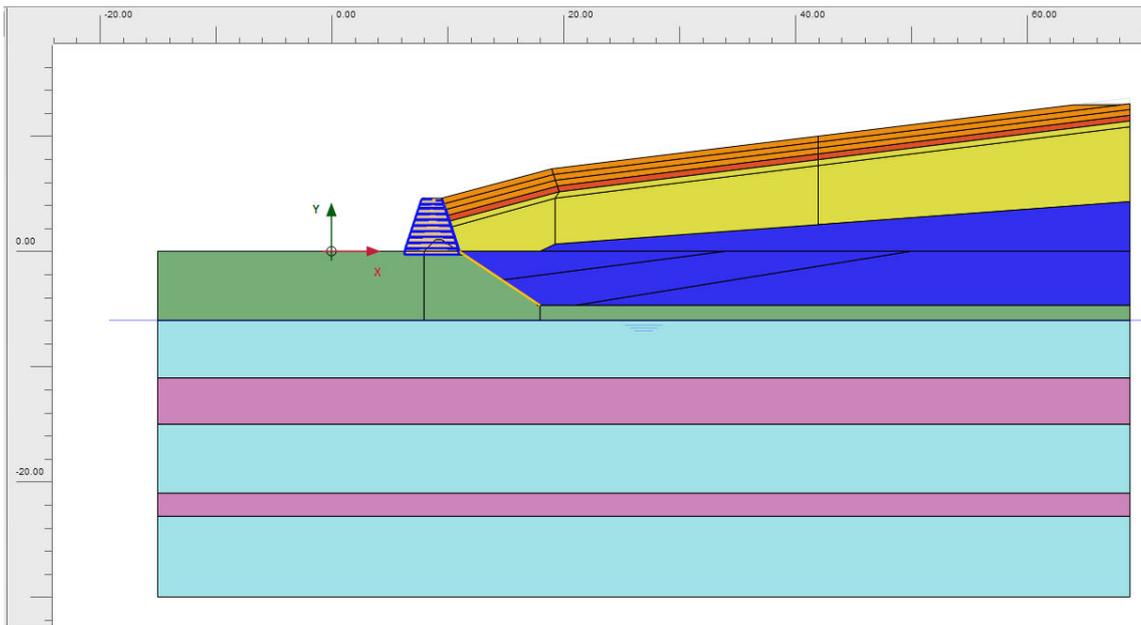
È stata condotta una serie di analisi relative alle condizioni di stato limite ultimo e di esercizio in condizioni statiche e dinamiche relativamente alle medesime quattro sezioni già analizzate nel precedente paragrafo e qui riproposte:

<i>H</i> [m]	<i>B</i> [m]	<i>b</i> [m]
4,10	4,40	1,70
4,60	4,70	1,70
5,10	5,00	1,70
4,80	4,50	1,70

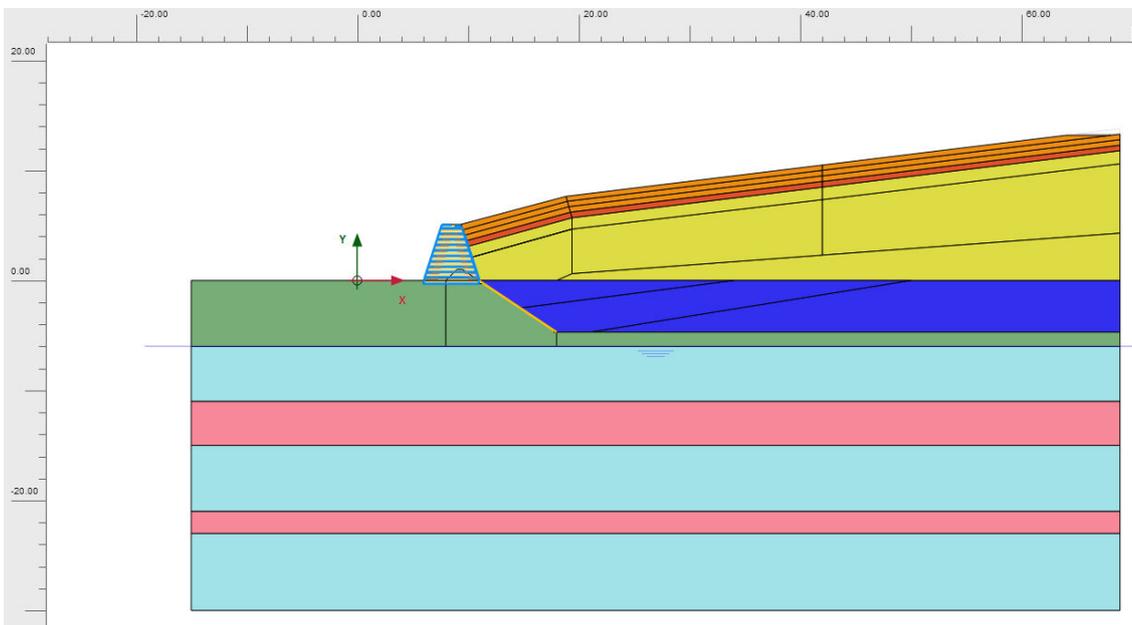
Nelle seguenti figure sono riportati gli schemi geometrici adottati per le analisi agli elementi finiti relativi alla fase successiva al completamento della copertura finale della discarica (*Fase post-operativa*). I materiali coinvolti nel volume significativo dell’opera hanno le caratteristiche riportate nella tabella che segue le figure. La falda è stata ipotizzata a - 6.00 m da P.C. per i livelli di terreno fino a -11.00 m ed a -1.00 da P.C. per gli strati sottostanti.



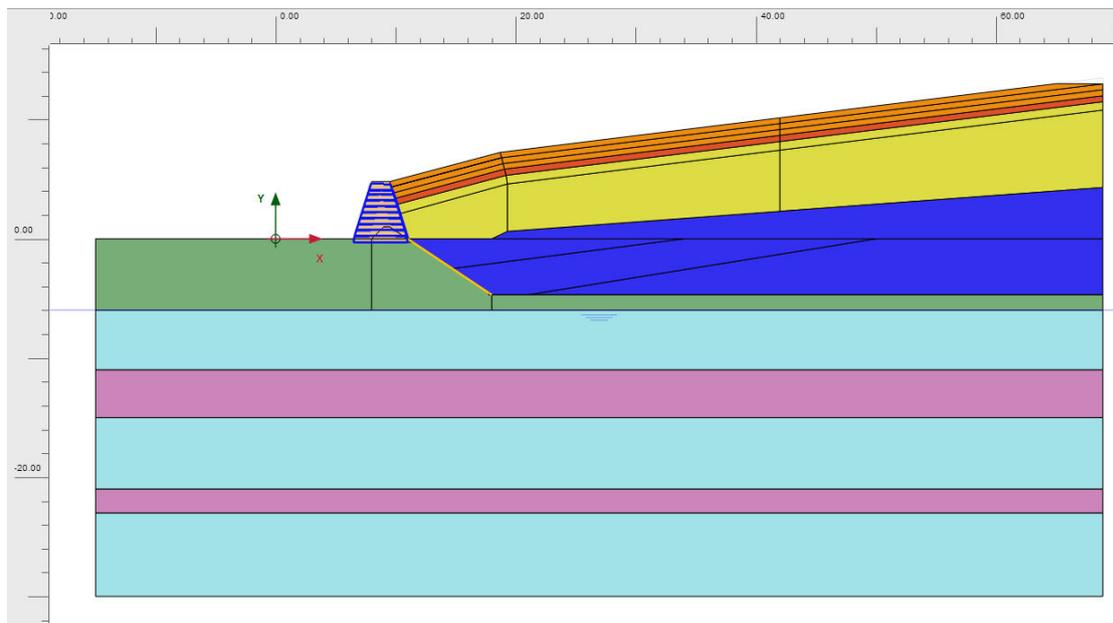
Sezione tipo Muro in terra rinforzata *H* = 4,1 m; *B* = 4,40 m



Sezione tipo Muro in terra rinforzata $H = 4,6 \text{ m}$; $B = 4,70 \text{ m}$



Sezione tipo Muro in terra rinforzata $H = 5,1 \text{ m}$; $B = 5,00 \text{ m}$.



Sezione tipo Muro in terra rinforzata H = 4,8 m; B = 4,50 m.

Profondità [m]	Tipologia	γ_k [kN/m ³]	ϕ_k [°]	c'_k [kN/m ²]	E'/λ^* [kN/m ²]/[]	E_{ur}/K^* [kN/m ²]/[]
+0,00 ÷ -6,00	Alternanza di Limo e sabbia	17,5/19,0	27	10	5.000	15.000
-6,00 ÷ -11,00	Terreno limo sabbioso	17,5/20,0	33	1	25.000	75.000
-11,00 ÷ -15,00	Terreno argilloso	17,5/19,0	25	5	0,06051	0,02136
-15,00 ÷ -21,00	Terreno sabbioso limoso fine	17,5/20,0	33	1	25.000	75.000
-21,00 ÷ -23,00	Terreno argilloso	17,5/19,0	25	5	0,06051	0,02136
-23,10 ÷ -30,00	Terreno sabbioso limoso fine	17,5/20,0	33	1	25.000	75.000
	Terreno costituente il Muro	18,0/19,0	30	5	14.000	42.000
	Drenaggio copertura	19,0/20,0	33	0,1	35.000	10.5000
	Terreno copertura Limo argilloso	20,0/21,0	26	5	25.000	75.000
	Rifiuto fresco	9,0	17	10	0,0942	0,01971
	Rifiuto stagionato	9,0	17	10	0,03453	0,01151

Parametri geotecnici utilizzati nelle analisi numeriche

dove²²:

γ_k = Peso di volume [kN/m^3]

ϕ_k = Angolo di attrito [°]

c'_k = Coesione effettiva [kN/m^2]

E' = Modulo di Young drenato [kN/m^2]

λ^* = Coefficiente di compressione modificato [ad]

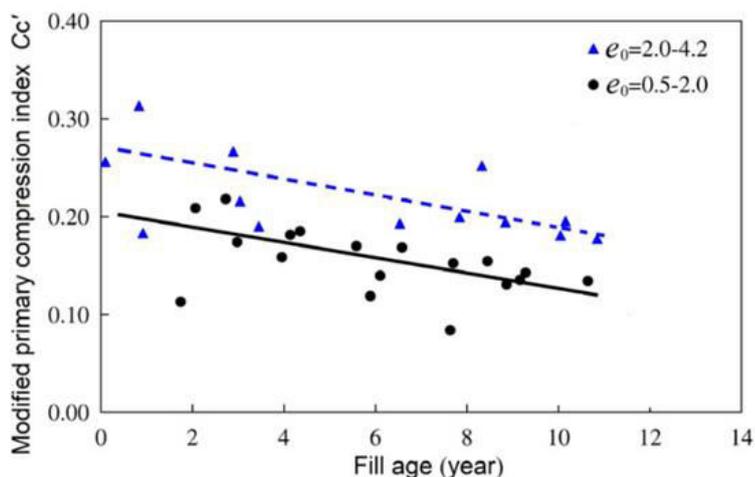
E_{ur} = Modulo di elasticità carico-scarico drenato [kN/m^2]

κ^* = Coefficiente di rigonfiamento modificato [ad]

Le caratteristiche dei terreni e dei materiali riportati nella tabella tengono conto di alcune peculiarità di comportamento che possono essere tenute in conto grazie alle succitate caratteristiche dell'analisi FEM, segnatamente per quanto attiene gli aspetti deformativi.

In particolare, la legge costitutiva per i rifiuti è stata scelta di tipo visco-plastico, in linea con le evidenze sperimentali riportate nella letteratura scientifica, che mettono in evidenza l'insorgere di significative aliquote di cedimenti dovuti a fenomeni di creep. Per individuare i parametri significativi di tale comportamento, in mancanza di dati sperimentali, si è fatto riferimento:

- a una serie di prove sperimentali (143), su campioni di grandi dimensioni, di compressione monodimensionale di rifiuti provenienti da cinque discariche dell'Arizona, California, Michigan e Texas negli Stati Uniti e di una in Grecia;
- agli studi e ad ai test effettuati su campioni di rifiuto solido urbano prelevati da pozzi nella discarica di Quizishan, in Cina, con vario grado di maturazione, in base ai quali è stato possibile stimare la variazione di compressibilità del materiale in funzione dell'età del rifiuto, come riportato nel seguente grafico.



Andamento nel tempo del coefficiente di compressione primaria C_c'

²² Con "k" si intendono i valori caratteristici.

In base a tali dati sono stati stimati due gruppi di valori di compressibilità primaria con i quali è stato simulato il comportamento del rifiuto fresco e dopo circa 8 anni.

Tipo di rifiuto	C_c'	C_c	e_0
Consolidato: Età > 8 anni	0,12	0,18	0,5
Fresco	0,20	0,7	2

dove:

C_c = coefficiente di compressione secondaria

e_0 = indice dei vuoti iniziale

La relazione fra questi parametri è la seguente:

$$C_c' = \frac{C_c}{1 + e_0}$$

Il coefficiente di compressione secondaria dei rifiuti tiene conto di due contributi di cui l'uno legato al creep meccanico, l'altro alla degradazione.

Il cedimento secondario dovuto al fenomeno di creep è generalmente analizzato utilizzando una semplice equazione:

$$\varepsilon_c = \alpha_c \cdot \ln \frac{t}{t_m}$$

dove α_c è una costante del materiale e ε_c è la deformazione viscosa. Trattasi di una relazione lineare tra la deformazione di creep ed il logaritmo naturale del tempo, con t_m tempo di riferimento iniziale della deformazione stessa.

L'equazione in termini di logaritmo decimale diviene

$$\varepsilon_c = C_\alpha \cdot \lg \frac{t}{t_m}$$

Nella seguente figura sono riportati i valori di α_c individuati in vari studi di letteratura.

Reference	Description of experiments	α_c (%)	
Zacharof and Coumoulos (2001)	Control cell of Mountain View landfill project was analyzed for creep by splitting total settlement into two curves distinguished by slopes	0.608–1.13	
Park and Lee (2002)	Determined creep parameters by fitting their own model to previous studies. Park and Lee (2002) argued that decomposition did not affect these tests as they lasted only a few days, in which case it is uncertain how representative the measured creep was	1.042–1.602 (fresh waste); 0.347–0.434 (old waste)	
Hossain et al. (2003)	Waste collected from a transfer station was shredded, and then was used to obtain specimens in different states of decomposition	Specimens B1–B4 were saturated with 6% acetic acid to prevent decomposition during compression 0.651–1.302	
		Specimens C1–C4 were neither seeded nor neutralized (while leachate was recirculated) to retard the onset of methane production 0.868	
Benson et al. (2007)	Settlement monitoring at landfill sites: creep was distinguished from degradation-induced settlement by slope of settlement- $\lg t$ curve	1.13–1.26	
Ivanova et al. (2008)	Fresh waste obtained from White's Pit Landfill, UK. Degradation was successfully inhibited in CAR3 for the first 350 d which is evidenced by the measured gas generation	2.18	
Chen et al. (2010)	Artificial specimens were of typical waste composition in Hangzhou, China (Table 2). Degradation was inhibited	0.308–0.521	
Siddiqui et al. (2013)	Degradation was inhibited for the entire duration of the tests ^a	Aerobically degraded MBT 0.69–0.91	
		Anaerobically-aerobically degraded MBT 0.65–0.78	
Bareither et al. (2013)	Mechanical creep prior to the onset of degradation	Fresh MSW ^b	Fresh MSW 1.56–1.65
			Fresh MSW passing the 25-mm screen 0.87–0.95
			Fresh MSW retained on the 25-mm screen 1.82–2.26
	Fresh MSW ^c Reconstituted decomposed waste ^d	Fresh MSW	Fresh MSW 2.08–2.43
		Low decomposed	Low decomposed 0.91–1.30
		Medium decomposed	Medium decomposed 1.43–1.86
High decomposed	High decomposed 1.26–1.56		
Shi et al. (2016)	Degradation was inhibited for the staged compression tests (12.5–1600 kPa) on shredded fresh MSW	3.4–4.9	

La correlazione fra α_c e C_α è: $C_\alpha = \frac{\alpha_c}{100} \cdot 2,303$.

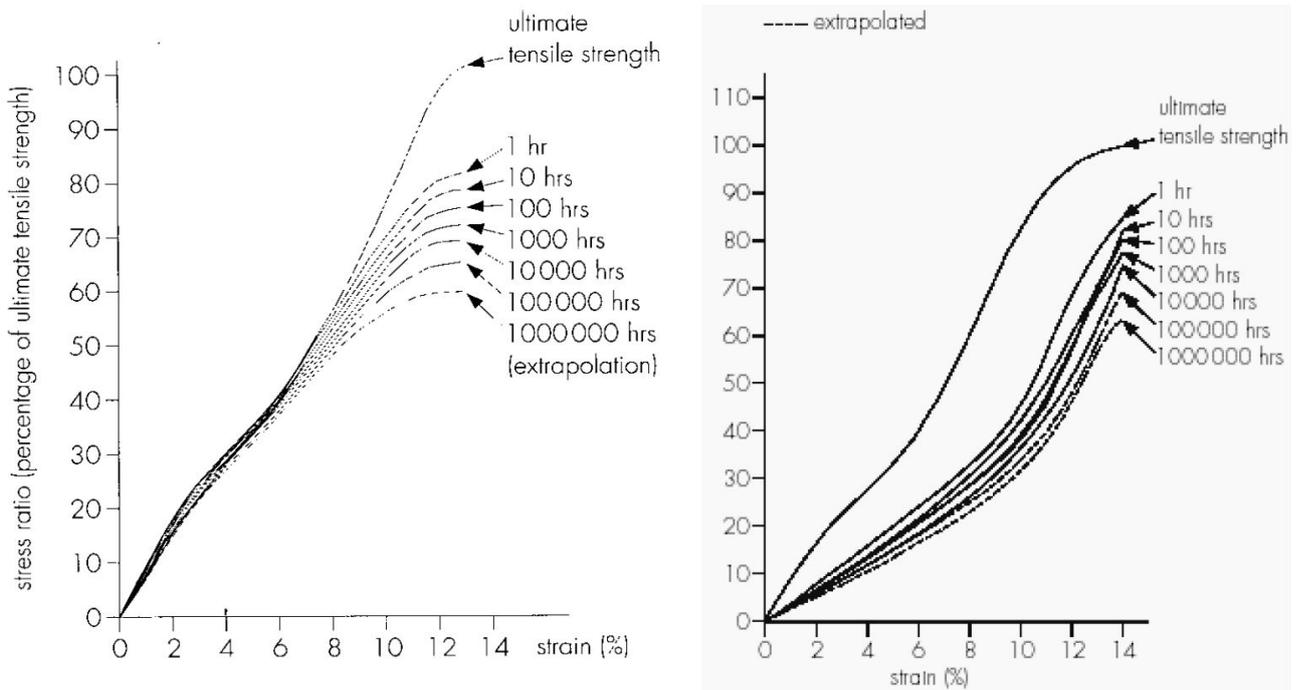
Nelle analisi numeriche sono stati utilizzati i seguenti valori di compressibilità secondaria:

Tipo di rifiuto	C_α	α_c
Consolidato: Età > 8 anni	0,022	0,955
Fresco	0,01	0,43

Per tener conto di tali fenomeni di creep, nelle analisi è stata utilizzata la legge costitutiva *Soft Soil Creep*, che oltre a simulare il comportamento di terreni particolarmente compressibili, con incrudimento funzione della tensione efficace media e criterio di rottura alla Mohr Coulomb, permette in modo specifico di simulare il comportamento viscoso del materiale.

Anche per i geosintetici di rinforzo si è tenuto conto del possibile sviluppo di deformazioni dovute a creep, come avviene normalmente per siffatti elementi strutturali quando sono sottoposti a tensioni di trazione permanente nel tempo.

Nella modellazione si è assunto il comportamento viscoelastico dei materiali di rinforzo, determinato mediante le specifiche curve isocrone della variazione di tensione-deformazione del geosintetico in un prefissato arco temporale, come illustrato nella seguente figura, riferita a due geogriglie reperibili sul mercato. Nell'ipotesi di una resistenza di progetto pari a circa il 50% della resistenza ultima, nell'analisi sono stati adottati i valori riportati nella successiva tabella, con i dati relativi sempre a geogriglie reperibili sul mercato.



Tipo di geogriglia	EA_{1,short} [kN/m]	EA_{1,long} [kN/m]
1° set di dati	920,8	801,3
2° set di dati	857,9	801,3

dove con EA_1 si intende la rigidità per due set di valori relativi a rispettivi archi temporali:

- il primo set di valori è stato utilizzato fino a 7.776.000 secondi, pari a 90 giorni, lasso di tempo, stimato, necessario per il completamento della costruzione di un settore di *Muro*;
- il secondo set di valori è stato utilizzato per tempi maggiori, corrispondenti alla fase di riempimento delle vasche.

Gli attriti fra le varie interfacce dei geosintetici sono stati assunti in base ai dati riportati in letteratura. In particolare, si è tenuto conto di un attrito geomembrana-geocomposito drenante a contatto con il muro pari a 12° , per individuare livelli di sforzo massimo della geogriglia, ed a 14° lungo la copertura.

Nella valutazione dei parametri di input dei materiali e nelle analisi numeriche non si è tenuto conto di altri fattori di riduzione delle tensioni, generalmente considerati nella progettazione di geogriglie o più in generale di geosintetici, come il fattore di riduzione per estrapolazione dei dati e per variabilità della produzione, il fattore di riduzione per danneggiamento meccanico e il fattore di riduzione per attacco chimico o ambientale.

Di tali riduzioni si dovrà comunque tener conto in sede esecutiva, all'atto della definizione dei materiali, incrementando opportunamente i valori derivanti dalle analisi numeriche.

4.6.3 Esiti dell'analisi

L'analisi FEM con il Modello *PLAXIS* 2019 è stata sviluppata a partire dalla condizione iniziale, allorché non era ancora presente la discarica.

Onde ricostruire la situazione tensionale e deformativa dello stato di fatto attuale, nella simulazione del Modello sono state ricostruite le fasi successive alla succitata condizione iniziale, rappresentate dallo scavo delle vasche, fino a -6.0 m da P.C., dalla costruzione dell'argine perimetrale e dalla coltivazione delle vasche fino alla formazione dell'attuale corpo rifiuti.

Per simulare le fasi dell'ampliamento secondo il presente *Progetto*, la modellazione prevede la rimozione di parte di rifiuti²³, la demolizione dell'argine perimetrale, la progressiva formazione per strati del *Muro*, il riempimento del nuovo volume di discarica con rifiuti solidi urbani freschi e, infine, la realizzazione del pacchetto multistrato della copertura definitiva. Sono state considerate sia le condizioni statiche che sismiche.

Nella seguente tabella è riportato, relativamente alla Sezione tipo con $H = 5.1$ (per le altre tre sezioni analizzate le fasi sono analoghe), il dettaglio delle testè citate fasi considerate nella modellazione numerica, rappresentative dello stato limite di esercizio e di stato limite di salvaguardia della vita in presenza di azioni sismiche.

Infine, è stato determinato, come in precedenza illustrato, il valore di sovrarresistenza dell'opera sia in condizioni statiche che sismiche.

²³ Trattasi della possibile rimozione di una piccola fascia perimetrale del corpo rifiuti a ridosso dell'argine. Alla luce degli assaggi eseguiti, tale provvedimento non sembra necessario, ma, nondimeno, è stato cautelativamente considerato nell'analisi.

<i>Descrizione</i>	<i>Fase di modellazione</i>	<i>Fase di riferimento precedente</i>
Condizione iniziale	0	-
Scavo vasche	1	0
Costruzione argine perimetrale	2	1
Riempimento vasche con rifiuti	3	2
Cambio parametri rifiuto	4	3
Scavo rifiuto	5	4
Demolizione argine perimetrale	6	5
Muro in terra rinforzata strato 1	7	6
Muro in terra rinforzata strato 2	8	7
Muro in terra rinforzata strato 3	9	8
Muro in terra rinforzata strato 4	10	9
Muro in terra rinforzata strato 5	11	10
Muro in terra rinforzata strato 6	12	11
Muro in terra rinforzata strato 7	13	12
Muro in terra rinforzata strato 8	14	13
Muro in terra rinforzata strato 9	15	14
Muro in terra rinforzata strato 10	16	15
Muro in terra rinforzata strato 11	17	16
FS condizione statica	18	17
Sollecitazione sismica - $V_R = 35$ anni	19	18
FS condizione sismica - $V_R = 35$ anni	20	19
Riempimento con rifiuti	21	17
Strato drenante biogas capping 0,5 m	22	21
Strato argilloso di tenuta capping 0,5 m	23	22
1° Strato vegetale capping 0,5 m	24	23
2° Strato vegetale capping 0,5 m	25	24
FS condizione statica	26	25
Comportamento a 5 anni	27	25
Comportamento a 10 anni	28	27
Comportamento a 20 anni	29	28
Comportamento a 30 anni	30	29
Sollecitazione sismica - $V_R = 75$ anni	31	30
FS condizione sismica - $V_R = 75$ anni	32	31

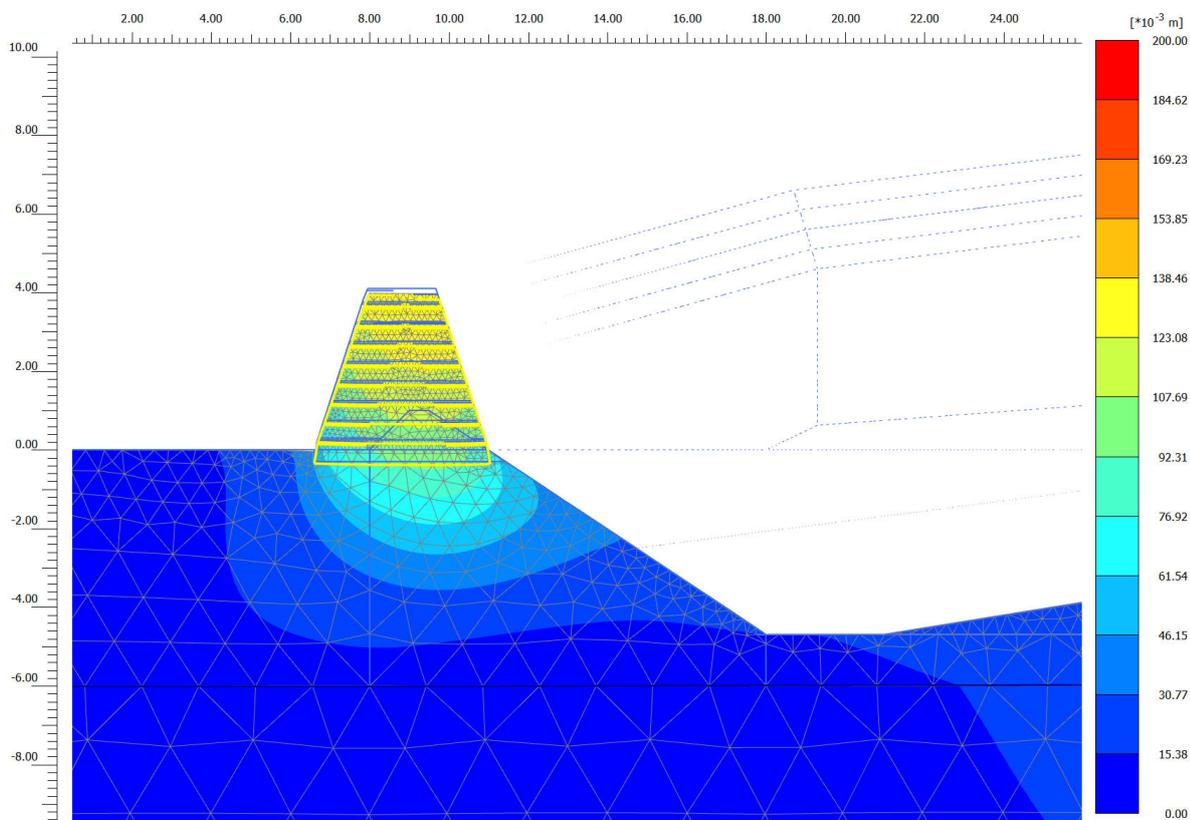
Nel seguito sono riportate le rappresentazioni grafiche dei principali risultati, relativi agli stati di deformazione e di tensione dell'opera per ciascuna delle quattro sezioni tipo analizzate.

4.6.3.1 Sezione H = 4,10 m

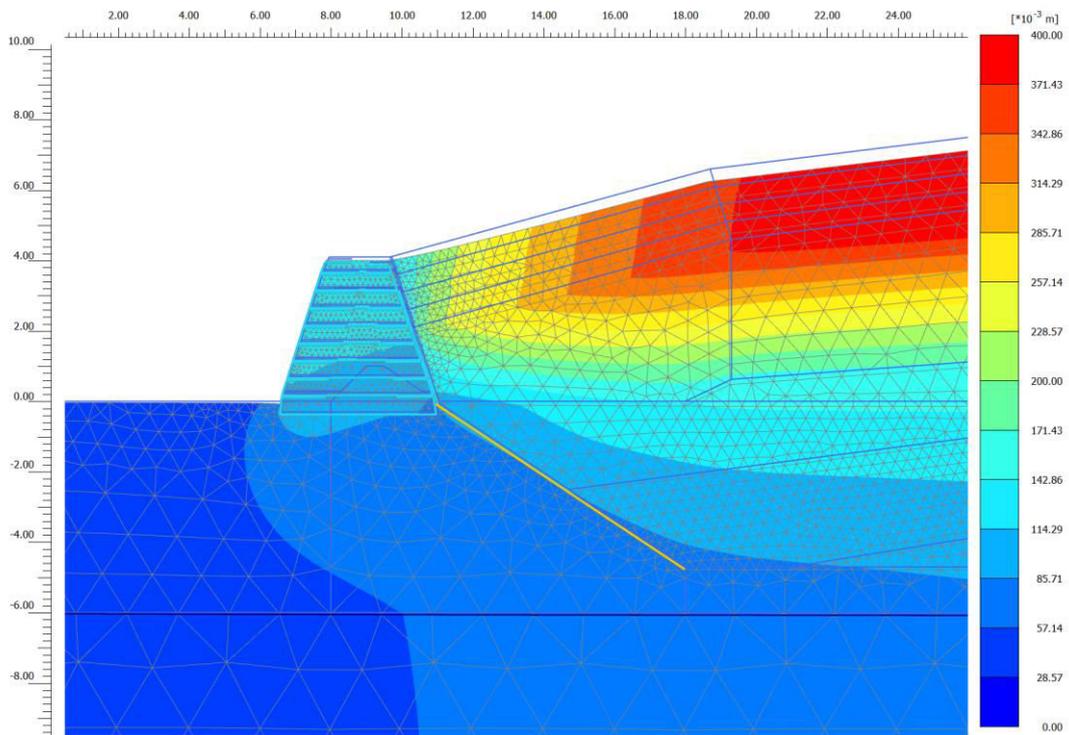
Spostamenti nei terreni e nel corpo del Muro.

Nelle seguenti figure sono riportati gli spostamenti del *Muro* nelle fasi più significative:

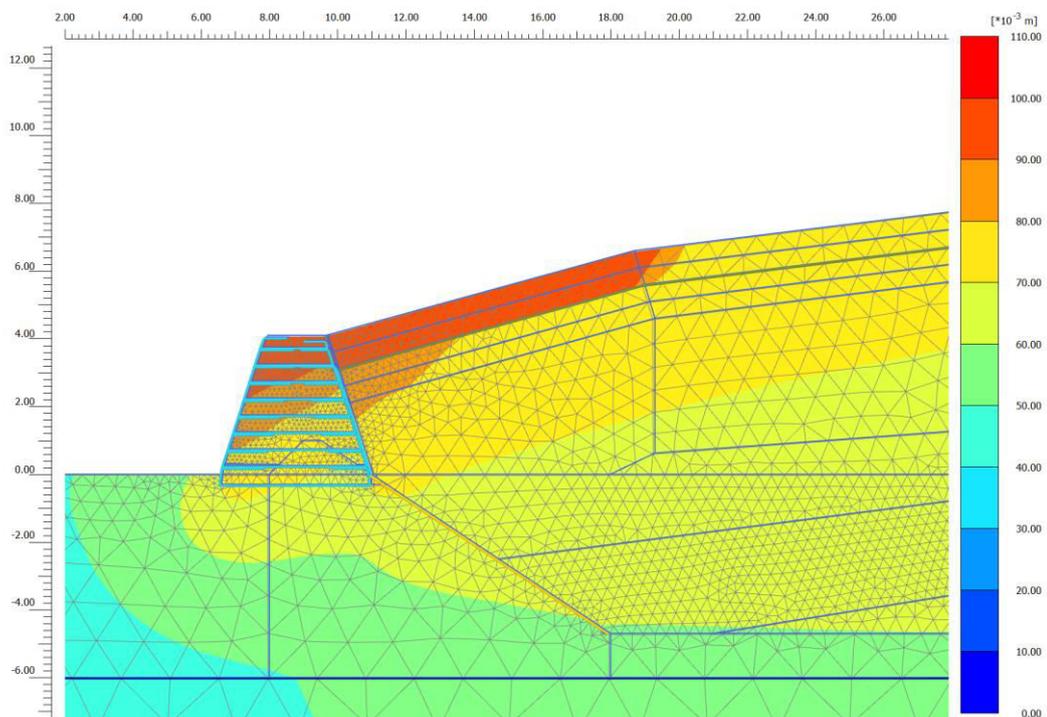
Spostamenti a fine costruzione – condizione statica



Spostamenti dopo completamento copertura – condizione statica



Spostamenti dopo completamento copertura – condizione sismica

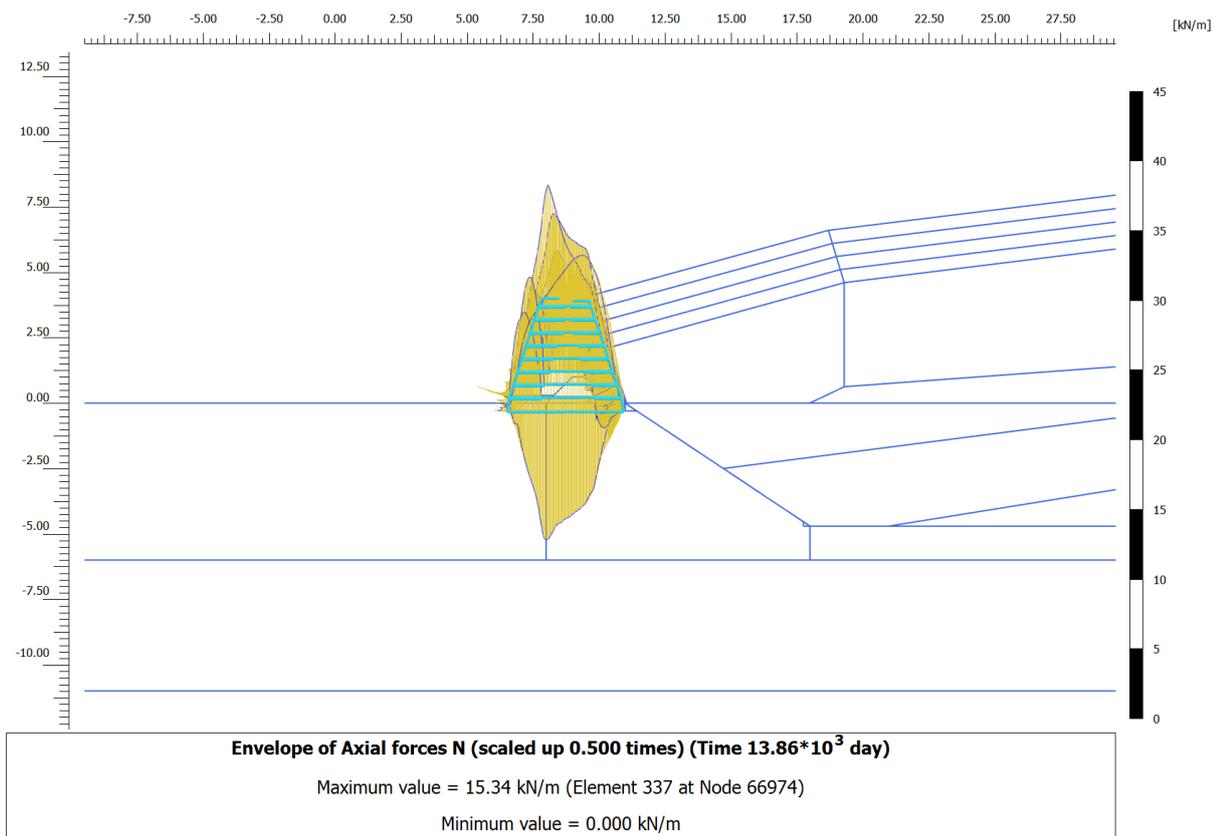


Gli spostamenti verticali del *Muro* sono calcolati dell'ordine di circa 12,50 cm al termine della costruzione, cui si devono sommare ulteriori 10,00 cm a seguito della realizzazione della copertura definitiva della discarica. Un evento sismico potrebbe incrementarli di circa 4,50 cm. Gli spostamenti in senso orizzontale si stimano dell'ordine di 4,00 cm nel verso delle vasche alla fine della costruzione del muro, di circa 9,00 cm e 8,70 cm verso l'esterno, a completamento della copertura e per un evento sismico, valutato cautelativamente con le medesime accelerazioni della condizione SLV.

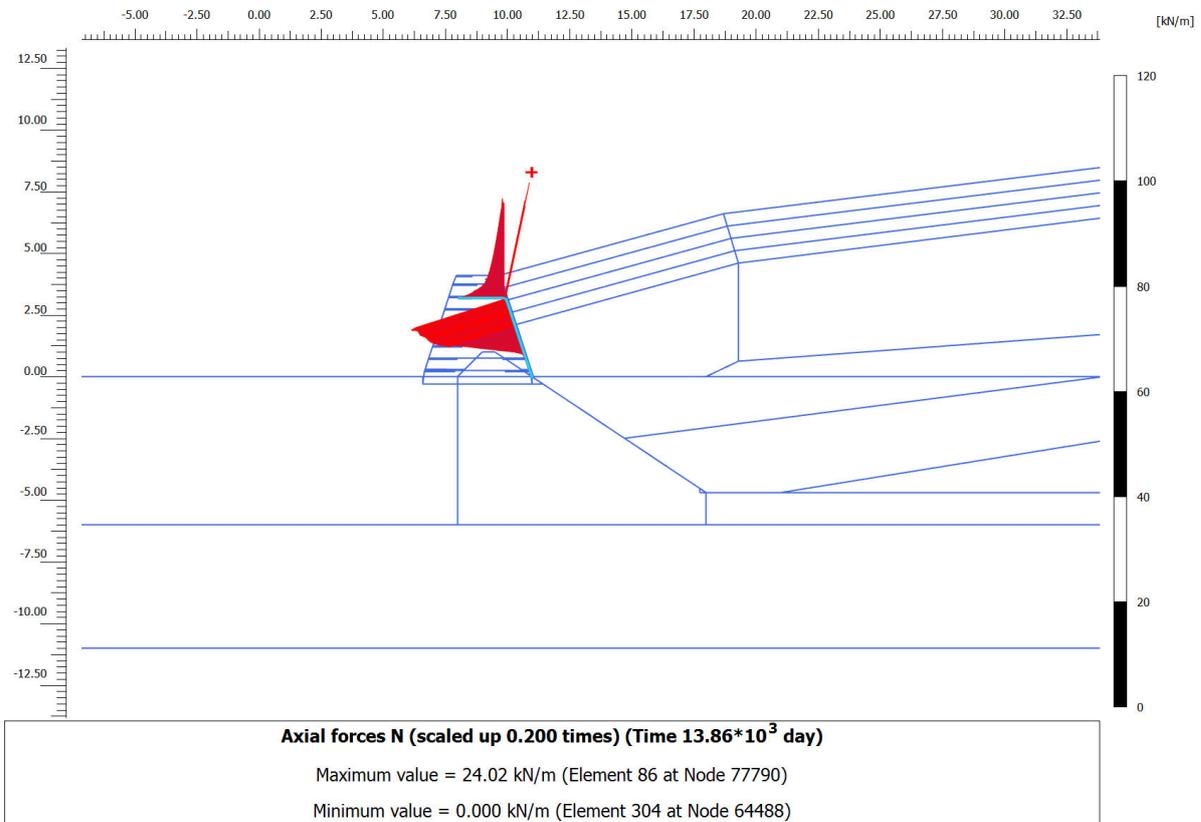
Sollecitazioni nei geosintetici di rinforzo

Nelle seguenti figure sono riportate le sollecitazioni delle geogriglie nelle situazioni più significative:

Tensioni nelle geogriglie costitutive del Muro - condizione sismica



Tensioni nelle geogriglie lungo paramento del Muro - condizione sismica



Le sollecitazioni di trazione nelle geogriglie di rinforzo del *Muro* variano durante le diverse fasi. A fine costruzione sono stimabili in circa 7,60 kN/m, in circa 10,00 kN/m al completamento della copertura finale ed in circa 15,20 kN/m durante un evento sismico.

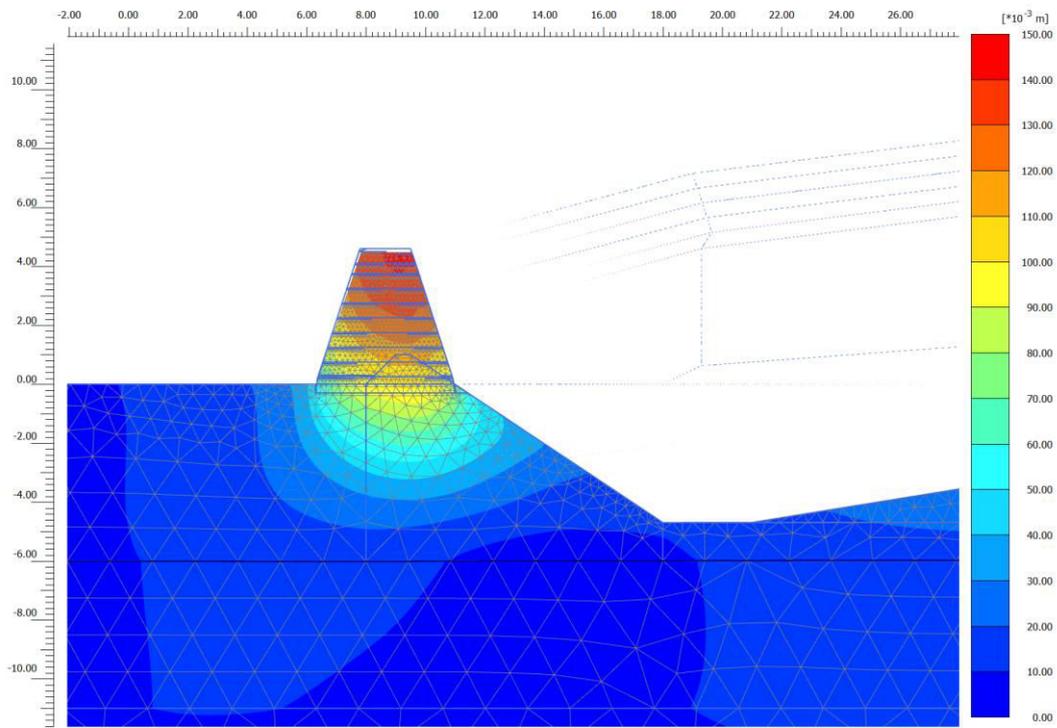
La geogriglia di protezione della geomembrana lungo il paramento è sollecitata a circa 22,00 kN/m in condizioni statiche ed a 24,40 kN/m in condizioni sismiche.

4.6.3.2 Sezione H = 4,60 m

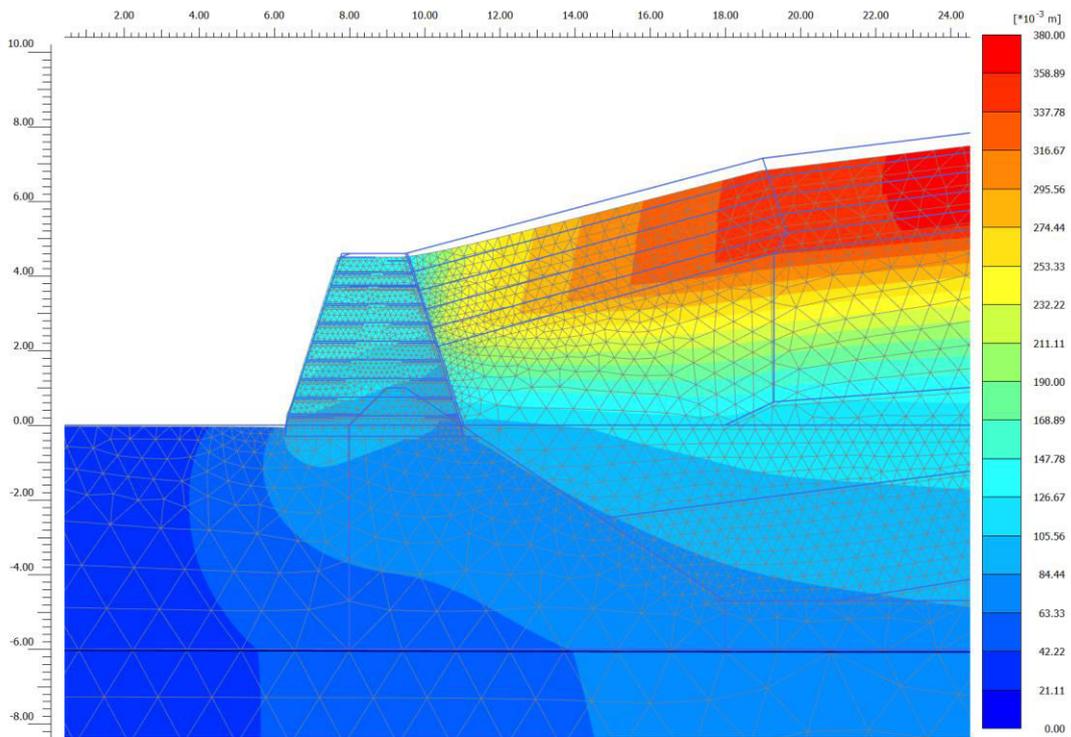
Spostamenti nei terreni e nel corpo del Muro.

Nelle seguenti figure sono riportati gli spostamenti del *Muro* nelle fasi più significative:

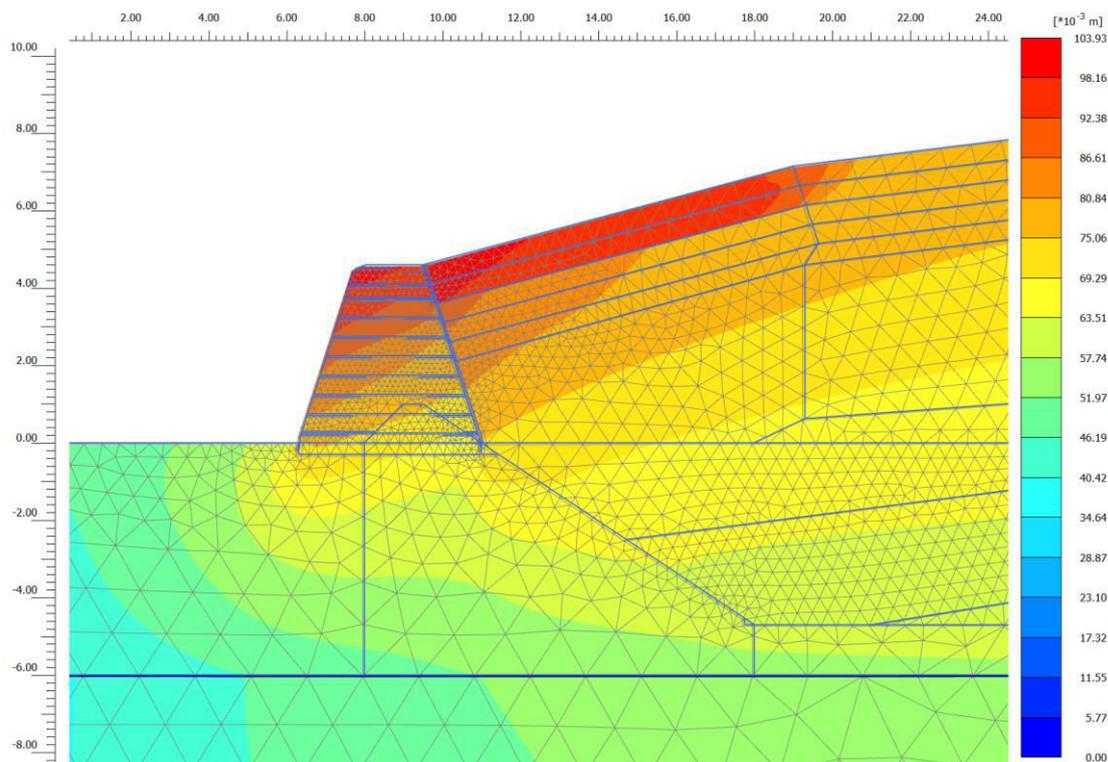
Spostamenti a fine costruzione – condizione statica



Spostamenti dopo completamento copertura – condizione statica



Spostamenti dopo completamento copertura – condizione sismica

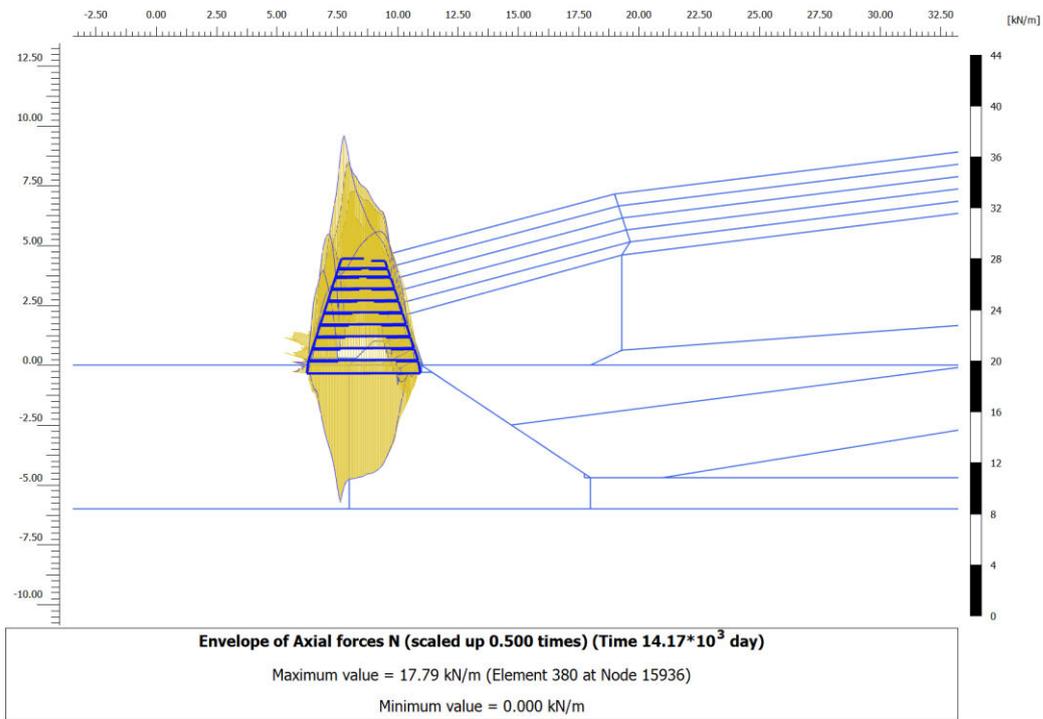


Gli spostamenti verticali del *Muro* sono calcolati dell'ordine di circa 14,50 cm al termine della costruzione, cui si devono sommare ulteriori 11,00 cm a seguito della realizzazione della copertura definitiva della discarica. Un evento sismico potrebbe incrementarli di circa 5,00 cm. Gli spostamenti in senso orizzontale si stimano dell'ordine di 4,00 cm nel verso delle vasche alla fine della costruzione del muro, di circa 10,00 cm e 9,00 cm verso l'esterno, a completamento della copertura e per un evento sismico, valutato cautelativamente con le medesime accelerazioni della condizione SLV.

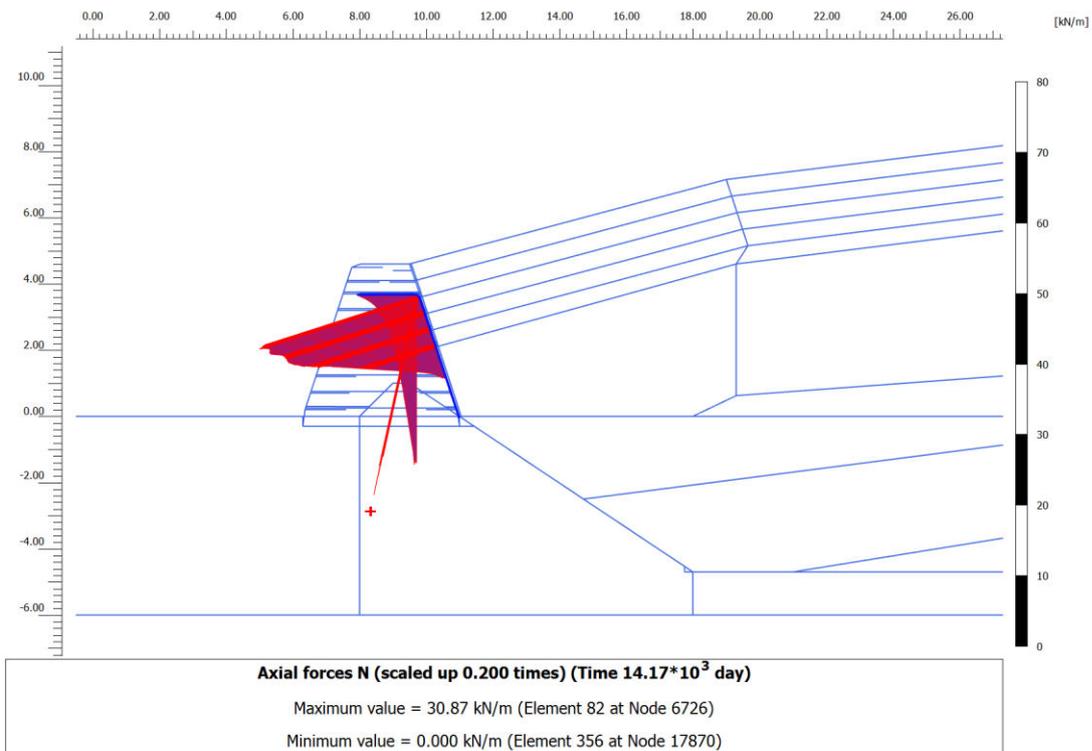
Sollecitazioni nei geosintetici di rinforzo

Nelle seguenti figure sono riportate le sollecitazioni delle geogriglie nelle situazioni più significative:

Tensioni nelle geogriglie costitutive del Muro - condizione sismica



Tensioni nelle geogriglie lungo paramento del Muro - condizione sismica



Le sollecitazioni di trazione nelle geogriglie di rinforzo del *Muro* variano durante le diverse fasi. A fine costruzione sono stimabili in circa 7,00 kN/m, in circa 11,00 kN/m al completamento della copertura finale ed in circa 17,80 kN/m durante un evento sismico.

La geogriglia di protezione della geomembrana lungo il paramento è sollecitata a circa 26,10 kN/m in condizioni statiche ed a 30,90 kN/m in condizioni sismiche.

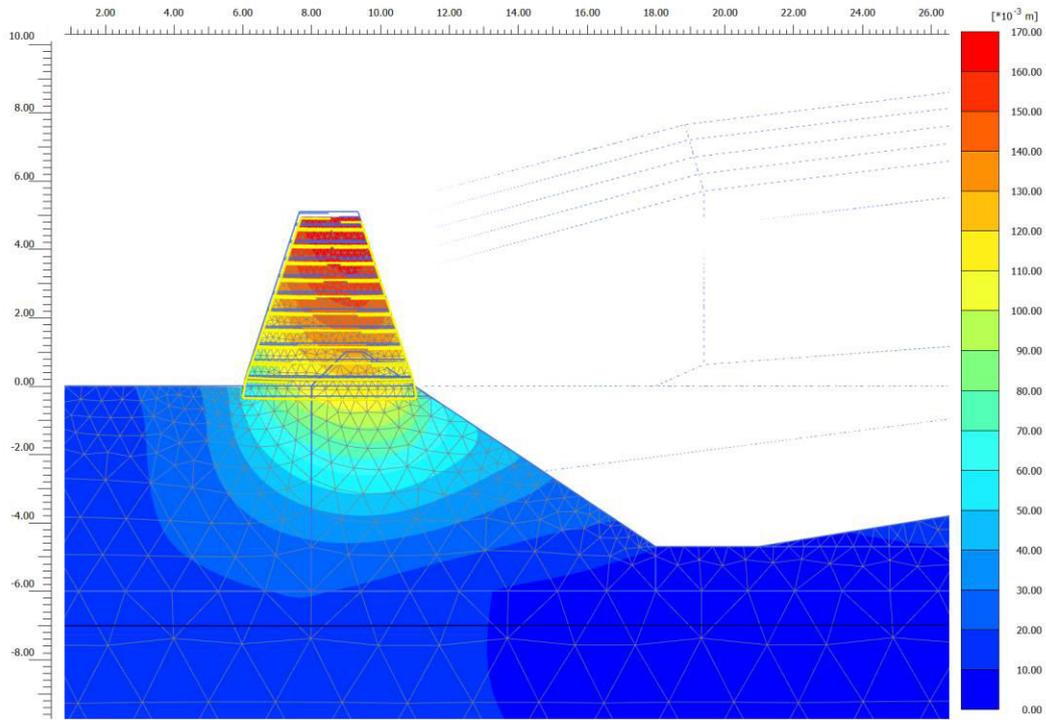
Le analisi hanno inoltre evidenziato che le sollecitazioni sulle geogriglie potrebbero aumentare di ulteriori 1,00 – 2,00 kN/m a seguito dell'assestamento dei rifiuti.

4.6.3.3 Sezione H = 5,10 m

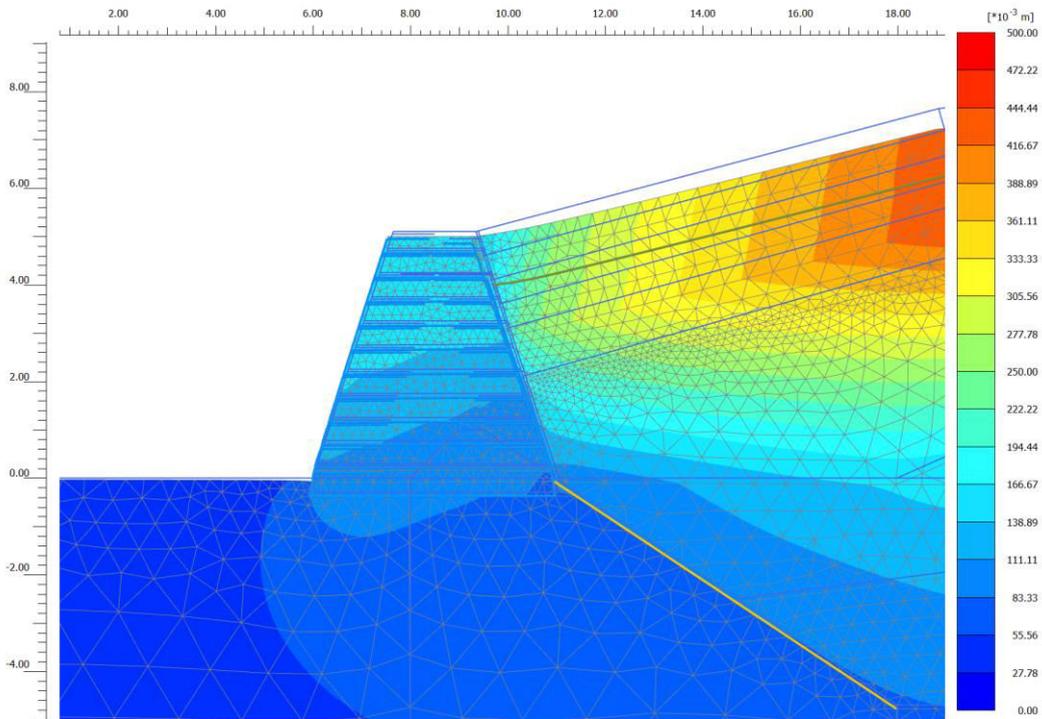
Spostamenti nei terreni e nel corpo del Muro.

Nelle seguenti figure sono riportati gli spostamenti del *Muro* nelle fasi più significative:

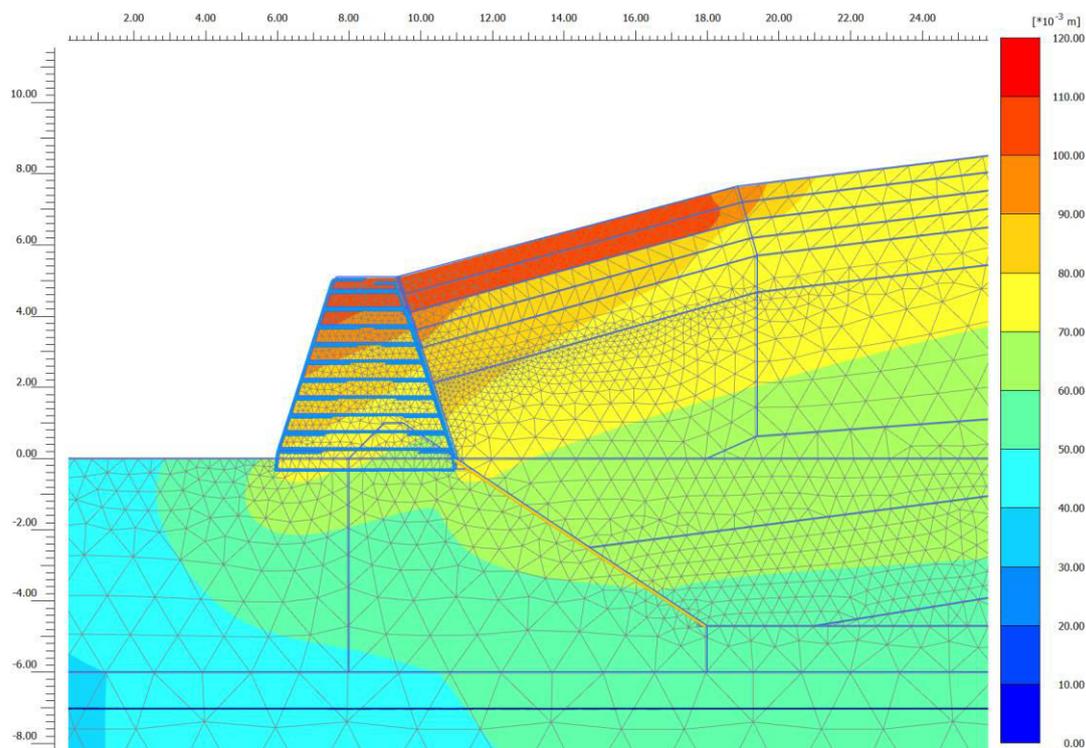
Spostamenti a fine costruzione – condizione statica



Spostamenti dopo completamento copertura – condizione statica



Spostamenti dopo completamento copertura – condizione sismica

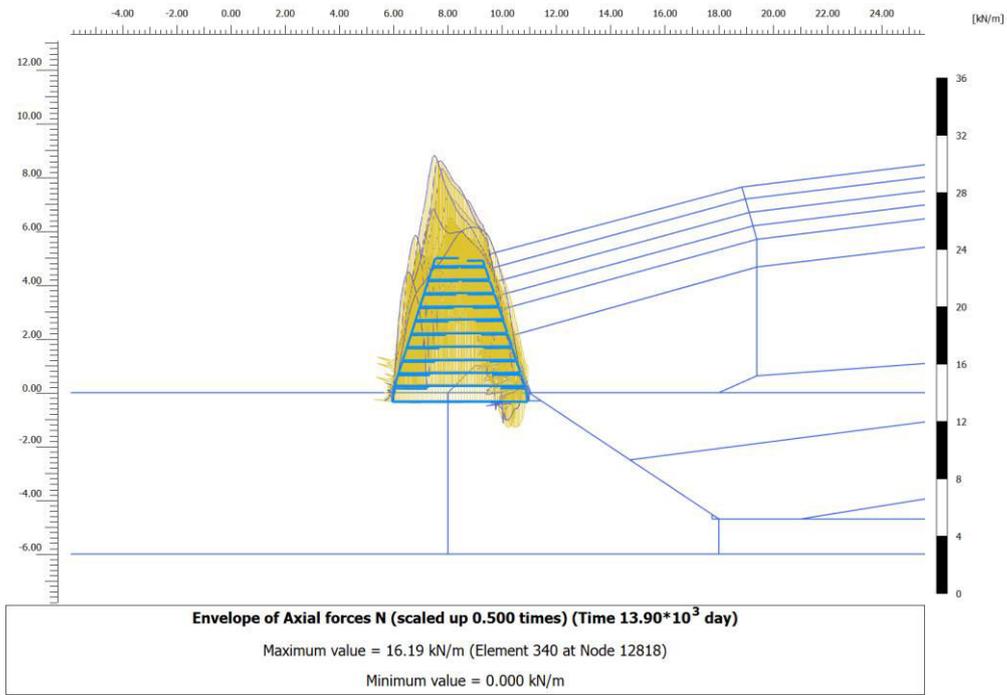


Gli spostamenti verticali del *Muro* sono calcolati dell'ordine di circa 18,80 cm al termine della costruzione, cui si devono sommare ulteriori 10,20 cm a seguito della realizzazione della copertura definitiva della discarica. Un evento sismico potrebbe incrementarli di circa 5,10 cm. Gli spostamenti in senso orizzontale si stimano dell'ordine di 6,20 cm nel verso delle vasche alla fine della costruzione del muro, di circa 11,00 cm e 10,00 cm verso l'esterno, a completamento della copertura e per un evento sismico, valutato cautelativamente con le medesime accelerazioni della condizione SLV.

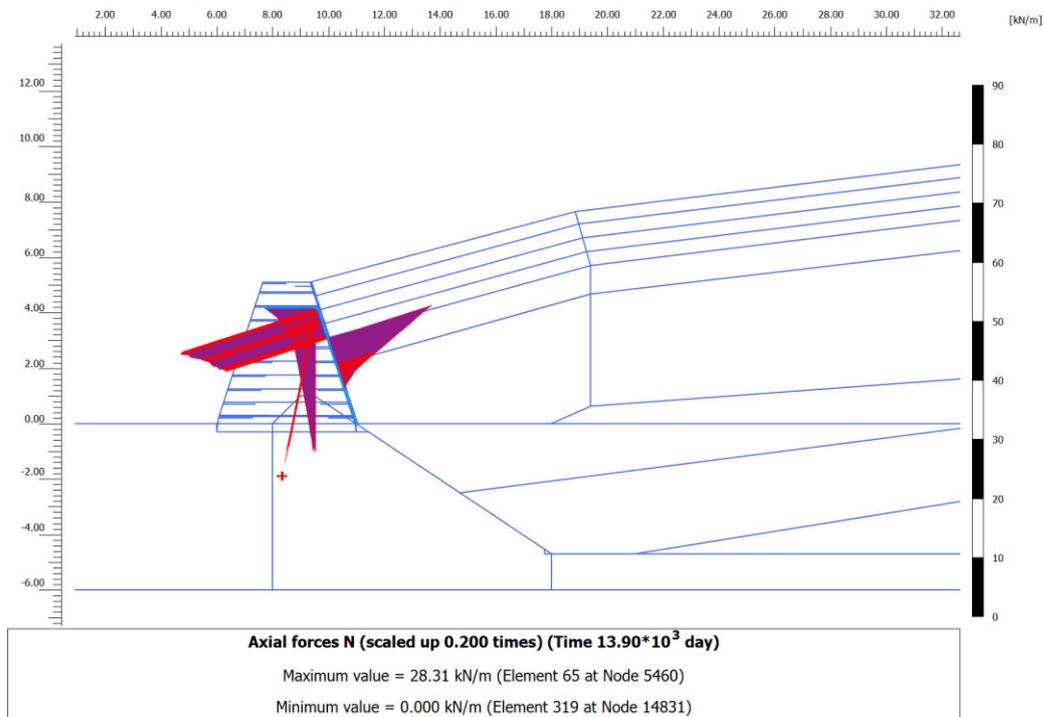
Sollecitazioni nei geosintetici di rinforzo

Nelle seguenti figure sono riportate le sollecitazioni delle geogriglie nelle situazioni più significative:

Tensioni nelle geogriglie costitutive del Muro - condizione sismica



Tensioni nelle geogriglie lungo paramento del Muro - condizione sismica



Le sollecitazioni di trazione nelle geogriglie di rinforzo del *Muro* variano durante le diverse fasi. A fine costruzione sono stimabili in circa 8,40 kN/m, in circa 11,60 kN/m al completamento della copertura finale ed in circa 16,20 kN/m durante un evento sismico.

La geogriglia di protezione della geomembrana lungo il paramento è sollecitata a circa 25,05 kN/m in condizioni statiche ed a 28,31 kN/m in condizioni sismiche.

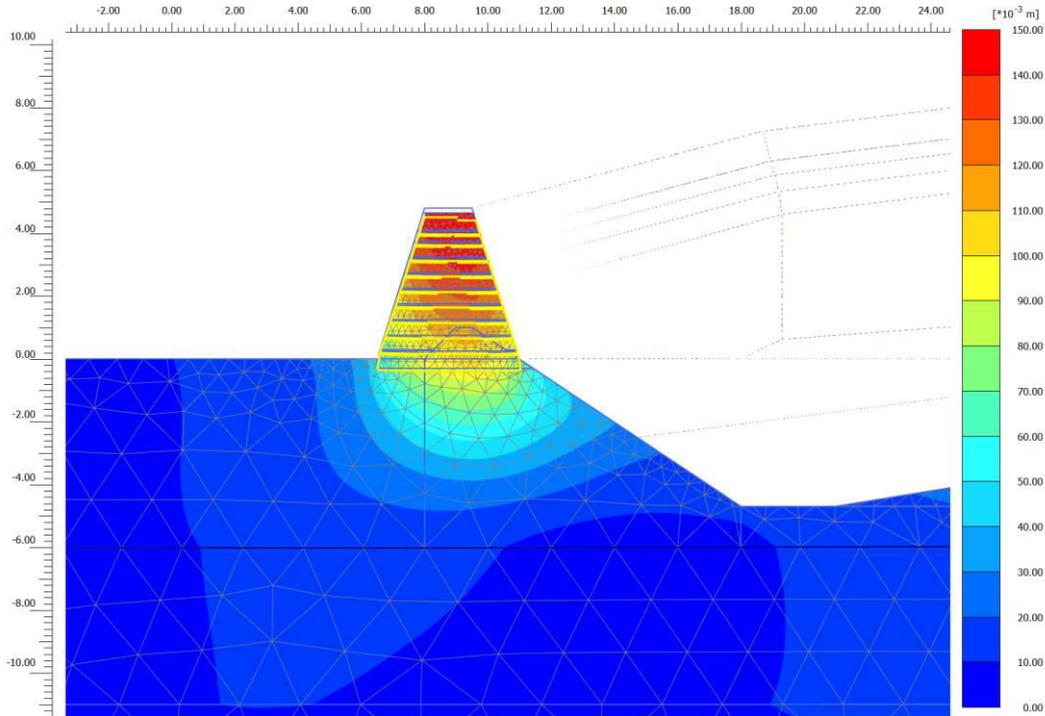
Le analisi hanno inoltre evidenziato che le sollecitazioni sulle geogriglie potrebbero aumentare di ulteriori 1,00 – 2,00 kN/m a seguito dell'assestamento dei rifiuti.

4.6.3.4 Sezione H = 4,80 m

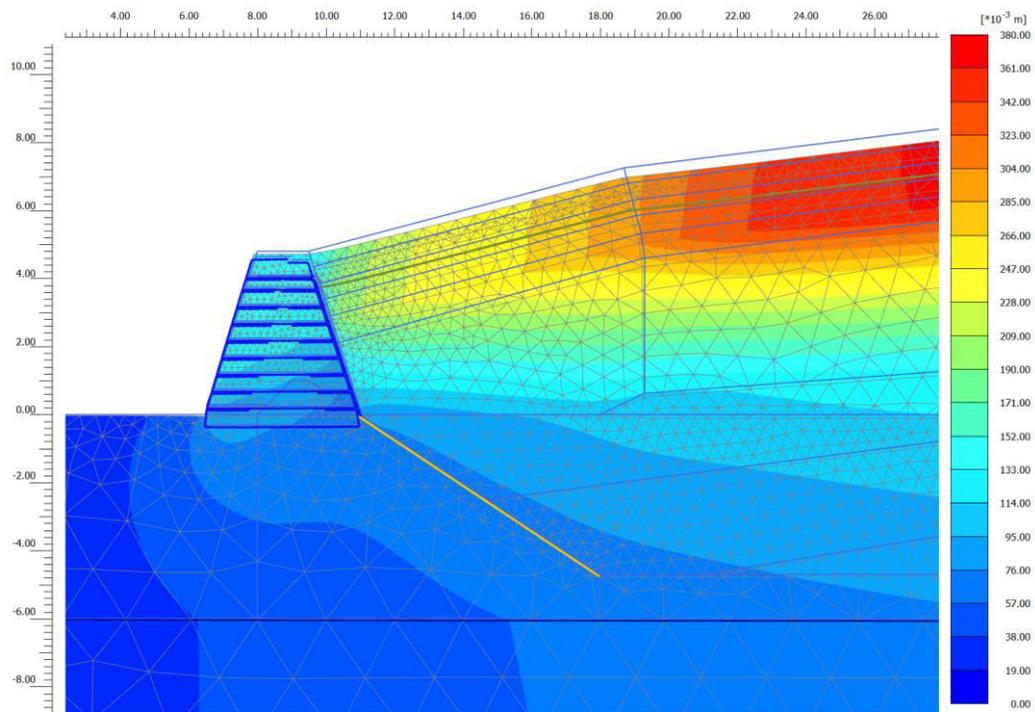
Spostamenti nei terreni e nel corpo del Muro.

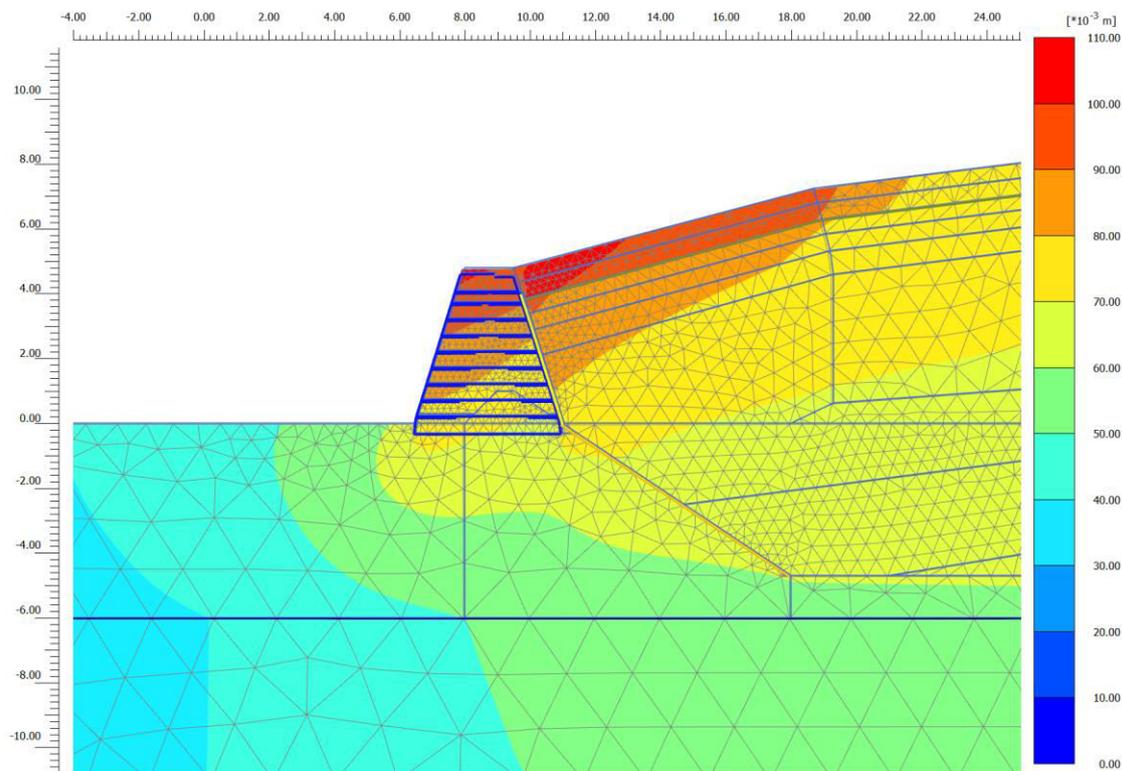
Nelle seguenti figure sono riportati gli spostamenti del *Muro* nelle fasi più significative:

Spostamenti a fine costruzione – condizione statica



Spostamenti dopo completamento copertura – condizione statica



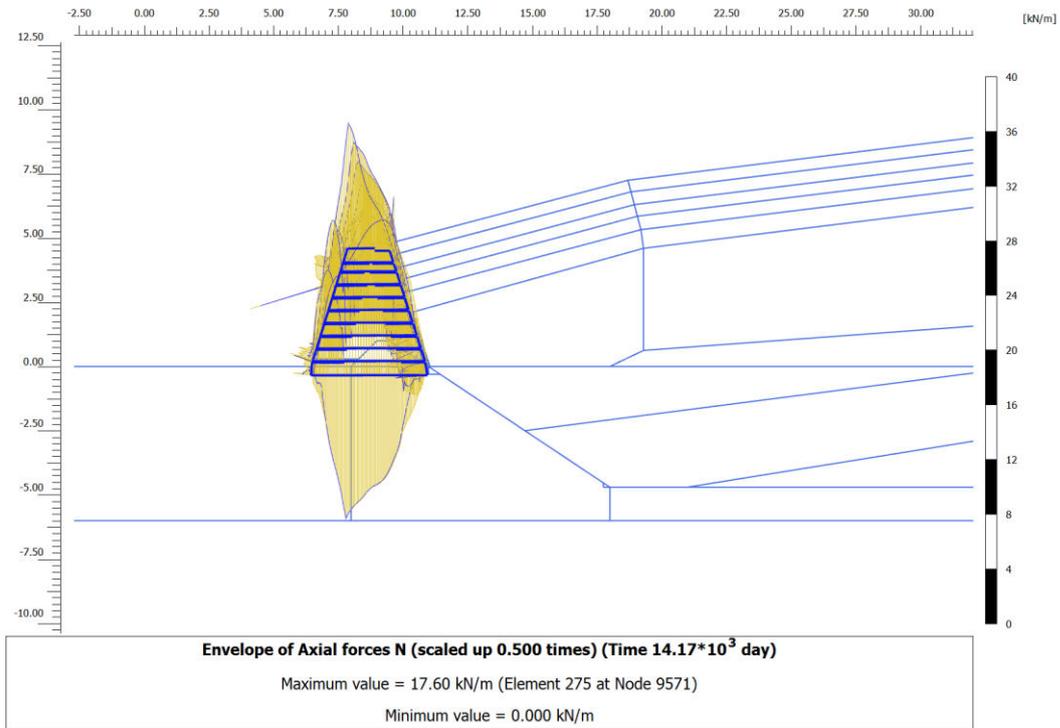
Spostamenti dopo completamento copertura – condizione sismica

Gli spostamenti verticali del *Muro* sono calcolati dell'ordine di circa 14,00 cm al termine della costruzione, cui si devono sommare ulteriori 8,50 cm a seguito della realizzazione della copertura definitiva della discarica. Un evento sismico potrebbe incrementarli di circa 5,20 cm. Gli spostamenti in senso orizzontale si stimano dell'ordine di 4,50 cm nel verso delle vasche alla fine della costruzione del muro, di circa 11,00 cm e 9,00 cm verso l'esterno, a completamento della copertura e per un evento sismico, valutato cautelativamente con le medesime accelerazioni della condizione SLV.

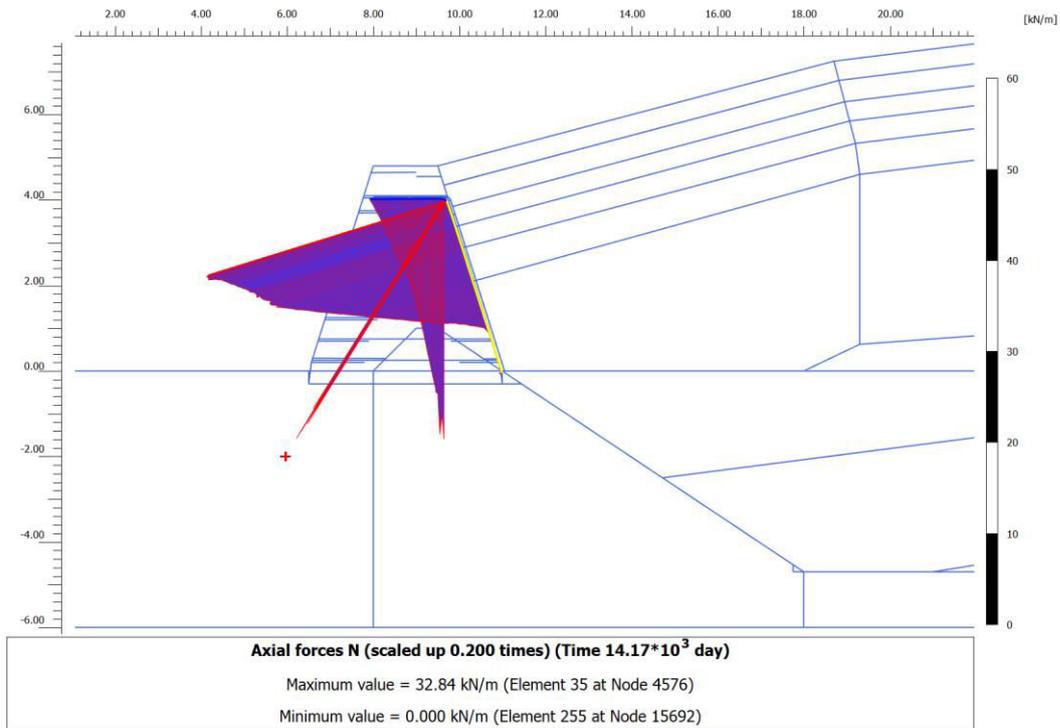
Sollecitazioni nei geosintetici di rinforzo

Nelle seguenti figure sono riportate le sollecitazioni delle geogriglie nelle situazioni più significative:

Tensioni nelle geogriglie costitutive del Muro - condizione sismica



Tensioni nelle geogriglie lungo paramento del Muro - condizione sismica



Le sollecitazioni di trazione nelle geogriglie di rinforzo del *Muro* variano durante le diverse fasi. A fine costruzione sono stimabili in circa 7,30 kN/m, in circa 12,10 kN/m al completamento della copertura finale ed in circa 17,60 kN/m durante un evento sismico.

La geogriglia di protezione della geomembrana lungo il paramento è sollecitata a circa 26,80 kN/m in condizioni statiche ed a 32,80 kN/m in condizioni sismiche.

Le analisi hanno inoltre evidenziato che le sollecitazioni sulle geogriglie potrebbero aumentare di ulteriori 1,00 – 2,00 kN/m a seguito dell'assestamento dei rifiuti.

4.6.4 Verifiche

4.6.4.1 Verifiche di stabilità globale

Le verifiche di stabilità sono state riferite ai seguenti scenari:

- CONDIZIONE 1. a fine costruzione del *Muro*, allorquando, in assenza dei rifiuti a tergo, la condizione ultima più gravosa consiste nella rottura globale del pendio verso l'interno della discarica, in condizioni di stato limite ultimo e di stato limite di salvaguardia della vita;
- CONDIZIONE 2. dopo la realizzazione della copertura finale, in condizioni di stato limite ultimo e di stato limite di salvaguardia della vita.

Dopo la simulazione di tutte le fasi di costruzione, illustrata in precedenza, il fattore di sicurezza è stato determinato svolgendo un ulteriore passo di calcolo, finalizzato alla ricerca di un meccanismo di collasso nel terreno ed eventualmente nella struttura, tramite la progressiva riduzione dei parametri di resistenza a taglio (Cfr. sottopar. 4.6.1). La verifica è soddisfatta se il fattore di riduzione di detti parametri risulta non inferiore a γ_c e a γ_ϕ nelle analisi in tensioni efficaci, assunti entrambi a 1,25.

Dato che la verifica allo Stato Limite Ultimo attiene la stabilità globale dell'insieme manufatto-terreno di fondazione, i suddetti valori sono stati ulteriormente incrementati del coefficiente di sicurezza γ_{R2} , pari ad 1,10.

Nelle verifiche di sicurezza in condizioni sismiche, stante la circostanza che i coefficienti parziali sulle azioni e sui parametri geotecnici sono posti pari all'unità, si utilizzerà solo il coefficiente parziale $\gamma_R = 1,2$ previsto nella verifica dei fronti di scavo e rilevati.

Pertanto, i valori di sovraresistenza determinati numericamente devono ottemperare ai coefficienti di sicurezza 1,375 per le situazioni di Stato Limite Ultimo e 1,20 per le condizioni sismiche.

I risultati ottenuti dalle verifiche sono riportati nella seguente tabella.

	Tipo di verifica	Sovreresistenza	Valore richiesto da Normativa
H = 4,10 m	Condizione 1) - Statica	1,472	1,375
	Condizione 1) – Sismica	1,296	1,2
	Condizione 2) - Statica	1,465	1,375
	Condizione 2) – Sismica	1,201	1,2
H = 4,60 m	Condizione 1) - Statica	1,718	1,375
	Condizione 1) – Sismica	1,254	1,2
	Condizione 2) - Statica	1,535	1,375
	Condizione 2) – Sismica	1,209	1,2
H = 5,10 m	Condizione 1) - Statica	1,445	1,375
	Condizione 1) – Sismica	1,255	1,2
	Condizione 2) - Statica	1,560	1,375
	Condizione 2) – Sismica	1,260	1,2
H = 4,80 m	Condizione 1) - Statica	1,690	1,375
	Condizione 1) – Sismica	1,255	1,2
	Condizione 2) - Statica	1,380	1,375
	Condizione 2) – Sismica	1,200	1,2

4.6.4.2 Verifiche dei rinforzi

Per i rinforzi costitutivi del *Muro* saranno impiegate geogriglie in materiali polimerici, con resistenza ultima ≥ 55 kN/m.

La geogriglia lungo il paramento avrà invece una resistenza ultima ≥ 110 kN/m.

La resistenza a trazione di progetto di un geosintetico di rinforzo può essere determinata a partire dalla resistenza a rottura, ridotta mediante l'applicazione di una serie di fattori riduttivi, che tengano conto di eventuali danneggiamenti della geogriglia durante la posa in opera (R_{Costr}), del degrado dovuto all'eventuale attacco di agenti chimici e biologici ($R_{Ambientale}$) e della necessità di contenere lo stato di trazione in esercizio per evitare rilevanti fenomeni di creep durante la vita utile dell'opera (R_{Creep}).

Sulla base dei dati di letteratura a disposizione e di quanto richiesto da alcune normative europee si ritiene opportuna l'adozione dei seguenti valori:

$$R_{Costr} = 1,15$$

$$R_{Ambientale} = 1,10$$

$$R_{Creep} = 1,60$$

Il fattore di riduzione totale è pertanto pari a:

$$R_{TOT} = R_{Creep} \cdot R_{Costr} \cdot R_{Ambientale} = 2,024$$

A tali fattori di riduzione deve essere associato anche un fattore di sicurezza parziale di resistenza del materiale (γ_m) che, sempre da letteratura, può essere assunto pari a 1,25.

Geogriglia $T_{ult} = 55$ kN/m:

$$T_{LTDS} = \frac{T_{ult}}{R_{TOT}} = \frac{55}{2,024} = 27,17 \text{ kN/m}$$

$$T_d = \frac{T_{LTDS}}{\gamma_m} = \frac{27,17}{1,25} = \mathbf{21,74 \text{ kN/m}}$$

Geogriglia $T_{ult} = 110$ kN/m:

$$T_{LTDS} = \frac{T_{ult}}{R_{TOT}} = \frac{110}{2,024} = 54,35 \text{ kN/m}$$

$$T_d = \frac{T_{LTDS}}{\gamma_m} = \frac{54,35}{1,25} = \mathbf{43,48 \text{ kN/m}}$$

Assumendo i seguenti fattori di sicurezza nello scenario statico e sismico:

$$\gamma_{G-stat} = 1,30$$

$$\gamma_{G-sism} = 1,00$$

e alla luce delle sollecitazioni massime restituite dai calcoli (E_{num}) è possibile ricostruire le sollecitazioni massime di confronto (E_d), da confrontare con i tiri disponibili (T_d) testè calcolati, sempre nei due scenari proposti:

Sollecitazione - Geogriglia rinforzo *Muro*

$$E_d = E_{num} \cdot \gamma_{G statico} = 12,10 \cdot 1,3 = 15,73 \text{ kN/m} \leq \mathbf{21,74 \text{ kN/m}}$$

$$E_d = E_{num} \cdot \gamma_{G \text{ sismico}} = 17.80 \cdot 1.0 = 17.80 \text{ kN/m} \leq \mathbf{21.74 \text{ kN/m}}$$

Sollecitazione - Geogriglia lungo paramento

$$E_d = E_{num} \cdot \gamma_{G \text{ statico}} = 26.80 \cdot 1.3 = 34.84 \text{ kN/m} \leq \mathbf{43.48 \text{ kN/m}}$$

$$E_d = E_{num} \cdot \gamma_{G \text{ sismico}} = 32.80 \cdot 1.0 = 32.80 \text{ kN/m} \leq \mathbf{43.48 \text{ kN/m}}$$

In tutti i casi, le geogriglie di progetto appaiono ampiamente idonee a svolgere la funzione di rinforzo loro assegnata.

4.6.4.3 Valutazioni e conclusioni

I risultati ottenuti dall'analisi di stabilità FEM con il Modello *PLAXIS 2019* evidenziano che, sia in fase di costruzione, sia nella successiva fase operativa e post-operativa del *Muro*, i livelli di sicurezza sono adeguati e superiori a quanto richiesto dalla Normativa.

A tal riguardo si deve anche tener presente che, per la tipologia dell'opera, eventuali situazioni di sollecitazioni eccezionali possono comportare fenomeni deformativi rilevanti, ma non collassi "fragili" ed improvvisi di tutta l'opera.

Gli spostamenti verticali e orizzontali previsti sono del tutto compatibili con l'opera in sé e non determinano particolari problematiche.

Le caratteristiche di resistenza dei geosintetici di progetto sono idonee a resistere agli stati di sollecitazione a cui plausibilmente saranno assoggettati.

4.7 Strati di tenuta [sottopar.7.3.2]

Nel presente paragrafo saranno sviluppati i calcoli relativi all'argomento trattato nel sottopar.7.3.2 della *Relazione tecnico-illustrativa*, riguardante gli strati di tenuta posti nel paramento interno del *Muro*.

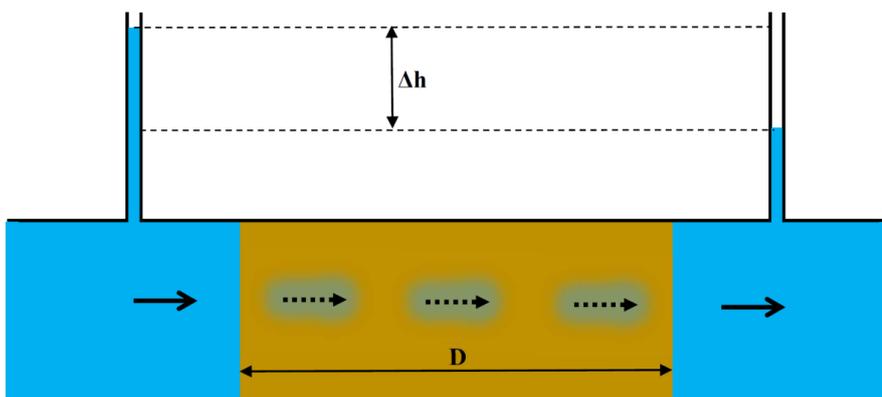
Lo strato minerale prescritto dal *Nuovo D.Lgs 36/2003* (spessore $s \geq 0,5 \text{ m}$ e di conducibilità idraulica $k \leq 1 \cdot 10^{-8} \text{ m/s}$) rappresenta il riferimento per le soluzioni alternative «che garantiscano comunque una protezione equivalente».

Come più volte argomentato a proposito delle barriere di fondo, il *Nuovo D.Lgs 36/2003* ha meglio definito la "protezione equivalente" rapportandole al "tempo di attraversamento" della barriera. Altresì, nella barriera di fondo, il *Decreto* ha introdotto il carico idraulico sulla barriera di 0,3 m.

È di tutta evidenza che nella barriera di copertura è meno probabile che si formino siffatti battenti; ciò nondimeno, nel calcolo della "protezione equivalente", il "tempo di attraversamento" della barriera di

riferimento, con spessore $s \geq 0,5$ m e conducibilità idraulica $k \leq 1 \cdot 10^{-8}$ m/s, sottoposta a detto battente, costituisca, come testè accennato, il riferimento obbligato.

Avvalendoci delle considerazioni teoriche svolte nel cap.2, tale tempo di attraversamento T_a deriva dal calcolo sotto riportato, basato sul seguente schema:



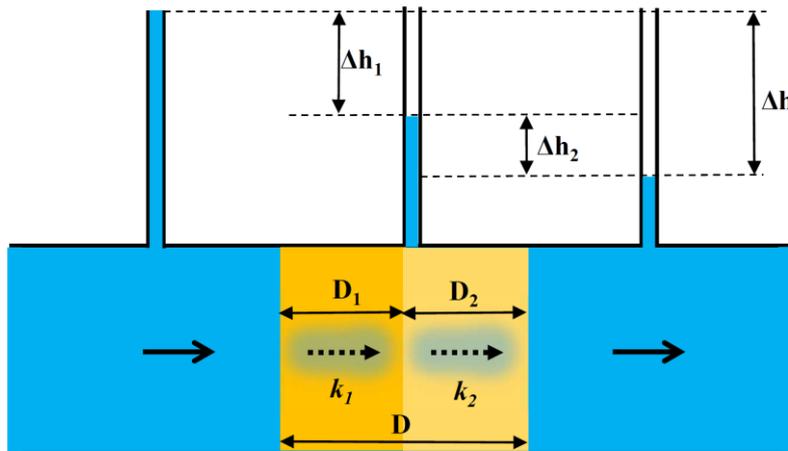
Coefficiente di permeabilità k_1 (m/s)	1,00E-08	
Spessore barriera D_1 (m)	0,50	
Battente sulla barriera Δh (m)	0,30	
	Equazioni	Valori
Velocità v (Darcy) (m/s)	$v = k \cdot i$	
Gradiente i (m/m)	$i = \frac{\Delta h}{D}$	0,60
	da cui: $v = k \cdot \frac{\Delta h}{D}$	6,00E-09
Tempo di attraversamento t_s (s)	$t_s = \frac{D}{v}$	
	da cui: $t_s = \frac{D^2}{k \cdot \Delta h}$	8,33E+07
Tempo di attraversamento t_a (anni)	$t_a = \frac{t_s}{3600 \cdot 24 \cdot 365}$	2,64

Tale tempo di attraversamento, pari a 2,64 anni, costituisce, pertanto, il termine cui riferire la soluzione alternativa proposta.

Questa consiste nella posa di due geocompositi bentonitici disposti a quinconce/coprigiunto analogamente a quanto previsto nell'integrazione della barriera delle sponde:

- **STRATO n. 1:** Spessore minimo di **10 mm**; conducibilità idraulica $k < 1,5 \cdot 10^{-11}$ m/s;
- **STRATO n. 2:** Spessore minimo di **10 mm**; conducibilità idraulica $k < 1,5 \cdot 10^{-11}$ m/s.

Con riferimento allo schema sottostante e al procedimento già precedentemente più volte illustrato, il tempo di attraversamento con un battente di 0,3 m è calcolato come segue:



Battente sulla barriera Δh (m)	0,30	
	Equazioni	Valori
Velocità v (Darcy) (m/s)	$v = k \cdot i$	
Gradiente i (m/m)	$i = \frac{\Delta h}{D}$	15,00
	da cui: $v = k \cdot \frac{\Delta h}{D}$	2,25E-10
Tempo di attraversamento t_s (s)	$t_s = \frac{D}{v}$	
	da cui: $t_s = \frac{D^2}{k \cdot \Delta h}$	8,89E+07
Tempo di attraversamento t_a (anni)	$t_a = \frac{t_s}{3600 \cdot 24 \cdot 365}$	2,82

La soluzione proposta evidenzia prestazioni simili a quelle della barriera di riferimento.

5 STIMA DEI CEDIMENTI DEL CORPO RIFIUTI [CAP.10 DEL PIANO DI GESTIONE OPERATIVA]

5.1 Generalità

Nel presente capitolo saranno sviluppate le analisi e i calcoli relativi alla stima dei cedimenti del corpo rifiuti, i cui effetti principali si riverberano su molti aspetti del presente *Progetto*.

Segnatamente, dovrà essere stimato il volume utile connesso a tali cedimenti (argomento trattato nel cap. 10 del *Piano di gestione operativa* e nel par. 9.5 della *Relazione tecnico-illustrativa*), oltre ai vari riflessi sull'interfaccia *Muro-copertura* finale (argomento trattato nel cap.7 della *Relazione tecnico-illustrativa*).

5.2 Aspetti teorici dell'asestamento dei RSU in discarica

5.2.1 Premessa

I rifiuti solidi urbani si presentano come una miscela eterogenea di frazioni che, una volta depositate in discarica, possono degradare per biogassificazione in ambiente anaerobico e/o lisciviare per effetto dei liquidi ivi fluenti.

Dalla letteratura si evince che un cumulo di rifiuti collocati in discarica può subire rilevanti riduzioni della massa e del volume nel tempo; quest'ultimo fino anche al 50%²⁴.

Occorre altresì considerare che i cedimenti non si distribuiscono in modo uniforme nello spazio e nel tempo, sia per l'inevitabile disuniformità dei rifiuti nell'ammasso, sia per le diverse condizioni di biodegradazione/lisciviazione, sia, soprattutto, per il diverso spessore dell'ammasso nelle varie zone della discarica.

Questa circostanza, a lungo termine, può generare concavità nella morfologia superficiale dell'ammasso e, di conseguenza, provocare ristagni di acqua meteorica che, **nelle moderne discariche dotate di drenaggio ipodermico, non sono rimediabili con riporti superficiali di terreno fine**, con le prevedibili conseguenze sulla produzione di percolato.

Nel caso del presente *Progetto* la valutazione dei cedimenti è ancor più determinante, poiché nella fascia di contatto fra la copertura finale e il *Muro* non si potranno accettare particolari asestamenti del corpo rifiuti, per non compromettere il drenaggio delle acque meteoriche fluenti dalla copertura, segnatamente il deflusso ipodermico.

Ciò comporta un cruciale indirizzo nella progettazione e gestione di siffatte discariche, basato su tre principali elementi:

²⁴ Grisolia, M., Napoleoni, Q., Tancredi, G. (1995), *Modelli di comportamento geotecnico di una discarica di RSU* nell'ambito del Convegno: La progettazione delle discariche, Bergamo.

Va peraltro precisato che l'elevato valore citato si può registrare solo in RSU con notevole presenza di sostanza organica biogassificabile e scarsa compattazione.

1. progettazione di significative pendenze delle coperture (non inferiori al 5%);
2. approntamento di coperture provvisorie in grado di espletare la loro funzione anche per anni, così da valutare con sufficiente cura l'evoluzione dei cedimenti e i dovuti riporti nelle zone di maggiori assestamenti;
3. implementazione di un accurato sistema di monitoraggio dei cedimenti nelle coperture.

I cedimenti sono essenzialmente dovuti a cause:

- meccaniche, quali il peso proprio, che agiscono su un mezzo che presenta variegati comportamenti sforzi-deformazioni: dall'iniziale comportamento elastico, alle successive evoluzioni di tipo plastico e viscoso, quasi sempre combinati;
- chimico-fisiche e biochimiche, che comportano la perdita della parte lisciviabile e la materia organica biodegradabile, in un reattore anaerobico qual è la discarica per RSU. Quest'ultima causa, per l'entità dei cedimenti, è di gran lunga preponderante in siffatte discariche.

Dal punto di vista geotecnico i RSU sono costituiti da una fase solida, una fase liquida e una gassosa (Grisolia et al., 1995, citato nella nota sopra).

Nella fase solida si possono distinguere tre categorie di materiali:

- *materiali inerti stabili* quali vetri, ceramiche, metalli, scarti di lavorazioni edilizie, il cui comportamento può ricondursi a quello dei grani di un terreno, seppur grossolano ed eterogeneo.
- *materiali altamente deformabili* (tessuti, carta, materiale plastico in fogli, gomma) che conferiscono al cumulo proprietà variabili con il carico applicato e con il tempo.
- *sostanze vegetali ed organiche facilmente biodegradabili* (vegetali, scarti alimentari, legno e altri rifiuti organici) grazie alle quali i rifiuti subiscono, in breve tempo, trasformazioni chimico-fisiche e biologiche.

È comunemente assunto che, nella fase iniziale di collocazione a dimora, gli elementi maggiormente deformabili e quelli degradabili siano prevalenti rispetto agli "inerti"²⁵, limitando il contatto diretto fra questi ultimi a pochi punti.

Sotto l'azione del carico esterno e del peso proprio del rifiuto sovrastante, la maggior parte della diminuzione iniziale di volume si concentra sugli elementi fortemente deformabili e degradabili, mentre gli "inerti" traslano, subendo grandi spostamenti all'interno del cumulo e tendono a raggiungere una configurazione pressoché definitiva.

²⁵ Il virgolettato si rende opportuno per rimarcare il significato geotecnico-strutturale e non chimico-merceologico del termine *inerte*.

I contatti tra gli “inerti” saranno ancora per lo più impediti dai materiali deformabili e dalla sostanza organica; il cumulo continuerà pertanto a subire deformazioni lente per effetto del carico costante e per il procedere della decomposizione della sostanza organica (Grisolia et al., 1995, citato nella nota).

Il processo di decomposizione della sostanza organica determina la diminuzione della massa e del volume del cumulo di rifiuti dovuta alla degradazione della sostanza solida in fluidi, liquidi o gassosi, che vengono estratti tramite appositi pozzi e smaltiti.

La deformabilità di origine meccanica del cumulo, nel caso in esame, è inferiore, stante il pretrattamento di pressatura e confezionamento a bocca discarica che subisce la gran parte dei rifiuti.

Ciò nondimeno, la presenza di sostanze lisciviabili e biodegradabili potrà generare una compressione secondaria (Cfr. il successivo paragrafo) anche significativa.

5.2.2 Modelli per il calcolo dei cedimenti²⁶

Nell’analisi dei cedimenti possono distinguersi tre fasi distinte: compressione iniziale, compressione primaria, compressione secondaria²⁷.

- una compressione immediata detta *compressione iniziale* e indicata con s_i , generalmente associata alla riduzione dei vuoti per effetto dell’applicazione del carico.
- un cedimento dovuto all’espulsione dell’acqua e dei gas dai vuoti e che prende il nome di *compressione primaria* ed è indicata con s_p .
- una componente detta *compressione secondaria* e indicata con s_s , dovuta al comportamento viscoso dello scheletro solido del rifiuto e, soprattutto, alla lisciviazione e alla biodegradazione della sostanza organica.

La compressione iniziale (s_i) può essere calcolata usando procedure di calcolo basate sulla teoria dell’elasticità e sul modulo di elasticità E_s del rifiuto:

$$s_i = \frac{\Delta q \cdot H_0}{E_s}$$

dove Δq è l’incremento di carico e H_0 l’altezza iniziale dello strato di rifiuti.

²⁶ La trattazione del sottopar. 4.6.2 sull’argomento è specificamente finalizzata alla definizione del modello costitutivo dei rifiuti nell’ambito dell’analisi FEM. Quella riportata nel presente paragrafo, che pur fornisce valori analoghi, è invece più utilizzata nelle stime dei cedimenti del corpo rifiuti.

²⁷ Morris, D.V., Woods, C.E. (1990), *Settlement and Engineering Considerations in Landfill and Final Cover Design* in Geotechnics of Waste Fills – Theory and Practice, ASTM STP 1070, ASTM, Philadelphia, pp. 9-21.

Favaretti, M., Maestrini, S., (1998). *Fenomeni di assestamento dei rifiuti solidi urbani: effetti e possibilità di controllo* in Convegno Nazionale “Chiusura e post-chiusura delle discariche controllate”, Castelfranco Veneto (TV).

Il range di variazione del modulo di elasticità è compreso, in questi casi, fra 8 e 12 volte il valore della tensione verticale applicata.

Nel caso in esame, con pretrattamento di pressatura a bocca discarica, tale contributo può essere trascurato.

I cedimenti dovuti alla compressione primaria avvengono in un tempo relativamente breve, normalmente nei primi 30 giorni che seguono l'applicazione del carico.

I cedimenti da compressione secondaria possono invece protrarsi per molti anni e a lungo termine costituiscono la componente principale del cedimento totale (Favaretti et al., 1998, citato in nota).

Per la stima della compressione primaria e della compressione secondaria esistono in letteratura diversi modelli.

Sebbene entrambi i processi avvengano simultaneamente, l'entità della compressione primaria a breve termine è maggiore e copre gli effetti della compressione secondaria; dopo, orientativamente, i primi 30 giorni la compressione secondaria diventa più rilevante. Per questo motivo i due processi sono generalmente modellati separatamente²⁸.

Il modello ad oggi più impiegato nella stima dei cedimenti in oggetto è quello proposto da Sowers nel 1973²⁹. Trattasi di un modello che prevede l'uso di due espressioni separate: una per il calcolo del cedimento dovuto alla compressione primaria, l'altra per il cedimento generato dalla compressione secondaria.

Nell'espressione fornita da Sowers:

$$s_p = H_i \cdot \frac{C_c}{1 + e_0} \cdot \log \frac{p_0 + \Delta p}{p_0}$$

dove:

H_i = altezza dello strato di rifiuti al termine della compressione iniziale;

C_c = indice di compressione primaria;

e_0 = indice dei vuoti al termine della compressione iniziale;

p_0 = pressione esistente a metà dello strato

Δp = incremento della pressione a metà dello strato

le tensioni considerate dovrebbero essere "efficaci"; tuttavia, dal momento che, per effetto della presenza dello strato di copertura e dell'impianto di pompaggio del percolato, di rado il cumulo dei rifiuti si trova in condizioni sature, si può ritenere accettabile utilizzare le tensioni totali (Favaretti et al, 1998, citato in nota).

L'indice di compressione primaria C_c varia a seconda dell'indice dei vuoti e del contenuto di sostanza organica.

²⁸ WALL, D.K., ZEISS, C. (1995), *Municipal Landfill Biodegradation and Settlement*, Journal of Environmental Engineering, ASCE, 121, Vol. 3, pp.214-224.

²⁹ SOWERS, G.F. (1973), *Settlement of waste disposal fills* in Proceedings of the 8th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Moscow, Vol.2(2), pp. 207-210.

Sowers propone le seguenti espressioni:

$$Cc = 0,15 \cdot e_0 \quad \text{con basso contenuto di sostanza organica}$$

$$Cc = 0,55 \cdot e_0 \quad \text{con elevato contenuto di sostanza organica}$$

Il campo di variabilità dell'indice iniziale dei vuoti va da un valore di 2 per rifiuti ben compattati a 15 per rifiuti non compattati.

La compressione secondaria, secondo Sowers, si può calcolare con la seguente espressione:

$$S_s = H_p \cdot \frac{C_\alpha}{1 + e_p} \cdot \log \frac{t}{t_p}$$

in cui:

H_p = altezza dello strato di rifiuti al termine della compressione primaria

C_α = indice di compressione secondaria

e_p = indice dei vuoti al termine della compressione primaria

t = tempo dopo il quale si desidera calcolare il cedimento

t_p = durata della fase di compressione primaria

Per valutare l'indice di compressione secondaria Sowers indica le seguenti espressioni, in base alle condizioni favorevoli o sfavorevoli alla decomposizione della sostanza organica:

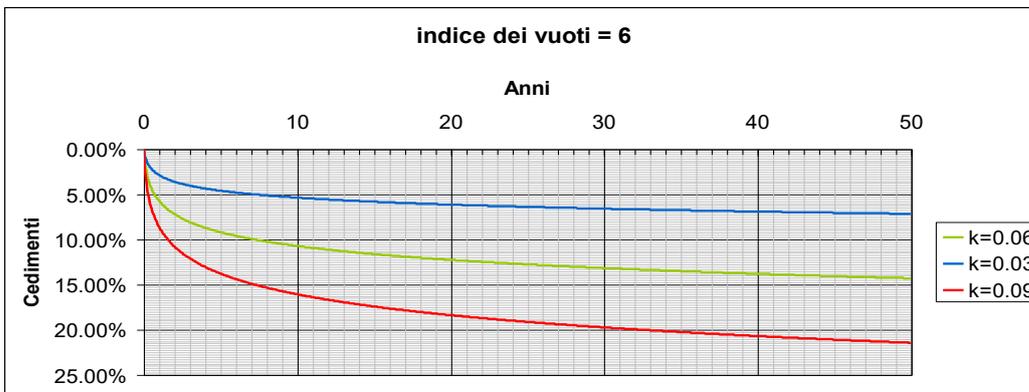
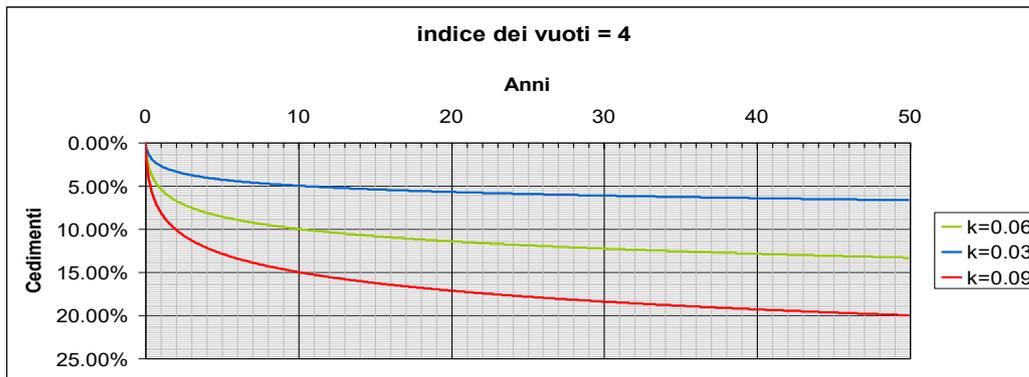
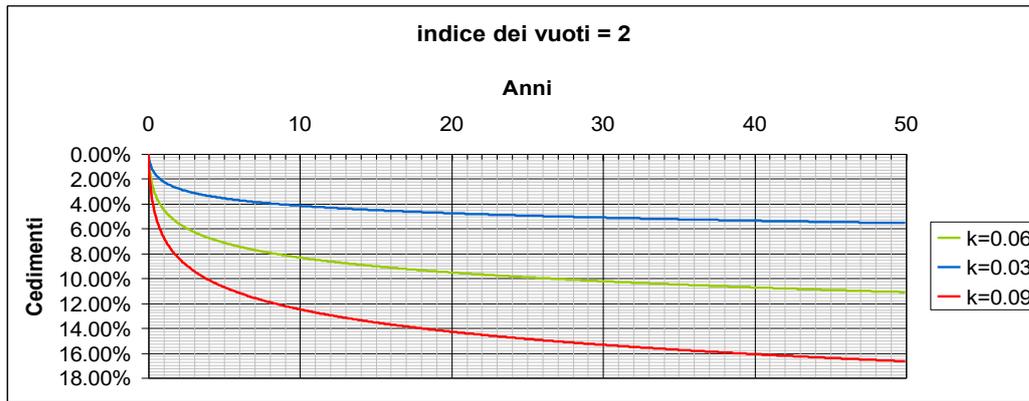
$$C_\alpha = 0,03 \cdot e_p \quad (\text{condizioni sfavorevoli})$$

$$C_\alpha = 0,09 \cdot e_p \quad (\text{condizioni favorevoli})$$

5.3 Stima dell'assestamento dei RSU in discarica

L'applicazione del modello di Sowers al caso specifico della "vecchia" discarica (la prima parte della discarica, coltivata dal 1999 al 2010), limitato alla componente più importante dei cedimenti: la compressione secondaria, conduce alla seguente stima³⁰, in funzione dei parametri che la condizionano, analizzati nel precedente capitolo.

³⁰ I valori sono tratti dallo Studio contenuto in *MODELLI PER IL CALCOLO DEI CEDIMENTI DEI RIFIUTI SOLIDI URBANI E LORO APPLICAZIONE ALL'IMPIANTO DI SMALTIMENTO DI GRUMOLO DELLE ABBADESSE* – Tesi di Laurea dell'Allievo Ing. Jacopo Zanforlin - Relatore: Prof. Ing. Marco Favaretti; Correlatore: Dott. Ing. Stefano Busana – Facoltà di Ingegneria dell'Università degli Studi di Padova – novembre 2010.



Nel caso in esame, il pretrattamento di pressatura a bocca discarica ha interessato la parte prevalente della discarica³¹; parimenti, una gran parte della discarica è stata interessata dal conferimento di RSU a basso contenuto di sostanza organica biodegradabile (Cfr. nota p.p. n.30).

³¹ Nelle prime vasche della discarica, a partire dal luglio del 2009, sono stati conferiti RSU "tal quali", senza pressatura, con contenuto di frazione organica biodegradabile dell'ordine del 25-30% del totale in peso. Successivamente, con l'implementazione della separazione secco-umido a bocca discarica e, ancor più tardi, con il conferimento della sola frazione "secca" da raccolta differenziata "spinta", la suddetta percentuale si è ridotta al 10-15%. Va peraltro aggiunto che anche la componente cellulosa dei rifiuti contribuisce in modo non irrilevante alla produzione di biogas.

Alla luce di ciò si ritiene che il contenuto di sostanza organica biodegradabile possa essere ritenuto variabile fra il minimo e il medio.

Questa situazione, nondimeno, delinea un vaso con due zone abbastanza disomogenee fra loro, come evidenziato nello studio di nota p.p. n.30.

Dovendo individuare la forbice di variabilità dei parametri relativi al modello di Sowers si può assumere che l'indice dei vuoti sia compreso fra 2 e 4, a fronte di un indice di compressione secondaria variabile fra il minimo (condizioni sfavorevoli alla decomposizione della sostanza organica) e il medio [$k = 0,03 \div 0,06$].

Con questi parametri, la percentuale di cedimenti sullo spessore dei rifiuti potrebbe variare fra il 9% e il 14%; **ma con una probabile stabilizzazione verso quest'ultimo valore, stante la buona produzione di biogas osservata nel corso della gestione della "vecchia" discarica³².**

Assumendo che lo spessore medio del corpo prismatico rappresentativo del corpo rifiuti sia dell'ordine dei 10 m e che la superficie della copertura a piano campagna sia di circa 75.100 m², i cedimenti possono essere compresi in una forbice 0,60 ÷ 1,42 m, generando un volume compreso in una forbice 45.000,00 ÷ 106.400,00 m³.

Una quantificazione più precisa, nondimeno, non potrà che derivare dagli elementi oggettivi di gestione, sviluppati nel successivo paragrafo.

5.4 Deduzioni dai dati di gestione

5.4.1 Procedura di tracciamento dell'ubicazione dei rifiuti

Nel modello gestionale implementato nella discarica di Grumolo delle Abbadesse è attivo un sistema di tracciamento dei flussi giornalieri di rifiuti, che consiste nella registrazione dell'ubicazione dei conferimenti, differenziata per codice CER e semivasca di stoccaggio.

Viepiù, è possibile desumere se la collocazione dei rifiuti avviene nella "ribaulatura"³³ di settori che presentavano significativi cedimenti rispetto alle quote di fine conferimento.

5.4.2 Ricostruzione dei flussi di rifiuti nelle ribaulature

Utilizzando il succitato sistema di tracciamento è stato possibile, a partire dai primi conferimenti del luglio 1999, ricostruire la destinazione dei flussi di rifiuti collocati in discarica, **segnatamente di quelli posti nelle varie fasi di ribaulatura succedutesi nel tempo.**

³² Nelle verifiche sperimentali effettuare a valle della modellizzazione del fenomeno si è osservata una produzione di punta del biogas maggiore del 35% rispetto alle previsioni dei modelli più utilizzati (Cfr. il *Progetto del 2011- Appendice sul biogas*). Tale circostanza è stata motivata dal Prof. B. Ruggeri del Politecnico di Torino, che ha condotto le sperimentazioni, come una conseguenza della notevole densità del corpo rifiuti, confezionato in cubi compattati, a fronte di una buona percentuale di umidità.

³³ Per evitare confusione, con il termine "ribaulatura" si intende il ripristino delle quote di progetto nelle zone della "vecchia" discarica interessata da significativi cedimenti nel corso della gestione.

Per quanto attiene la situazione della “vecchia” discarica, una parte di questa è stata interessata dall’ampliamento introdotto con il *Progetto del 2011*: un sormonto, costituito da un “prisma” con area di base di 13.197 m² (pari a circa il 17% dell’intera superficie della “vecchia” discarica, circa 75.000 m²).

In ragione di ciò, i flussi di rifiuti da considerare nelle ribaulature della “vecchia” discarica, ai fini del ripristino delle quote primigenie, non potevano che essere quelli relativi alle zone esterne al suddetto “prisma”, stante l’invarianza delle quote.

Ad una determinata epoca, sommando i flussi già conferiti (ricostruiti tramite il succitato sistema di tracciamento) a quelli da conferire per il raggiungimento di tali quote (valutati tramite un rilievo topografico) è possibile quantificare le quantità e, tramite il peso di volume medio “storico” i volumi di assestamento.

La ricostruzione analitica di tali flussi, effettuata in tal guisa, è stata recentemente elaborata in un rapporto interno di SIA SRL, da cui si è desumibile una quantità complessiva di **90.800,93 t**.

5.4.3 Quantificazione dei cedimenti nella “vecchia” discarica

Considerando il peso di volume “storico” del corpo rifiuti, pari a circa 1 t/m³, la stima del volume di assestamento della “vecchia” discarica, al netto della zona del suddetto “prisma” di sovrapposizione, ammonta a **90.800,93 m³**.

A fronte di un’area di 61.900,00 m², l’entità media dei cedimenti è di 1,47 m che, rapportata allo spessore medio del corpo rifiuti di 11,50 m, conduce a una percentuale del **12,76%**.

A commento di tale stima, con riferimento alla trattazione teorica precedentemente sviluppata, allorchè si preconizzava una «[...] *percentuale di cedimenti sullo spessore dei rifiuti [...] fra il 9% e il 14%; ma con una probabile stabilizzazione verso quest’ultimo valore, stante la buona produzione di biogas osservata nel corso della gestione della “vecchia” discarica*», si può affermare che il **dato calcolato si pone perfettamente in linea con le previsioni desunte dai modelli più affidabili.**

6 MODELLO DI PRODUZIONE DEL BIOGAS [PAR. 11.3]

6.1 Generalità sul modello impiegato

A oltre 10 anni dall'elaborazione dell'*Appendice sul biogas* del *Progetto del 2011*, in cui era stato sviluppato uno studio previsionale sulla produzione di biogas in continuità con i modelli fino ad allora utilizzati, è parso necessario valutare la situazione all'attualità, alla luce dei conferimenti reali a consuntivo e dell'effettiva produzione di biogas, tenendo conto anche dei nuovi apporti dalla vasca 18 e della ribaulatura della discarica.

Nel seguito sarà illustrata detta analisi, condotta con un modello di concezione più moderna.

Il nuovo modello impiegato per stimare la produzione totale di biogas della discarica nella configurazione ampliata del presente Progetto è costituito da due sotto-modelli³⁴:

1. un *sotto-modello stechiometrico*, che fornisce la quantità teorica totale di biogas prodotta annualmente dalla degradazione anaerobica dei rifiuti;
2. un *sotto-modello cinetico*, che elabora i risultati del precedente e fornisce la distribuzione nel tempo della produzione di biogas.

Al fine di aderire il più possibile ai processi reali di degradazione e conseguente produzione di biogas, il modello cinetico raggruppa i rifiuti conferiti in quattro diverse classi, a seconda della loro velocità di degradazione, ossia:

- Rifiuto velocemente putrescibile (RVP)
- Rifiuto moderatamente putrescibile (RMP)
- Rifiuto lentamente putrescibile (RLP)
- Rifiuto non putrescibile (RNP), che non contribuisce alla produzione di biogas.

Il modello considera, inoltre, alcuni parametri correttivi per tener conto di fenomeni reali, quali l'efficienza del sistema di aspirazione, la reale temperatura media del biogas e la captazione di aria esterna dovuti alla non perfetta sigillatura della copertura provvisoria.

L'affidabilità del modello sarà verificata confrontandone i risultati con la produzione reale di biogas nel periodo 2007-2020.

Per non appesantire la seguente trattazione, i dati utilizzati nell'analisi sono riportati nel paragrafo finale: *Matrici dei dati*.

6.2 Dati di Input

Il modello utilizza i seguenti dati per stimare la produzione totale di biogas dopo l'ampliamento relativo al presente progetto:

³⁴ Cossu, R., Andreottola, G., Muntoni, A., 1996. *Modelling Landfill Gas Production*. In: Christensen, T.H., Cossu, R., Stegman, R. (Eds.), *Landfilling of Waste: Biogas*. Chapman & Hall Publishers, London, pp. 237–268.

- La quantità di rifiuti solidi urbani e assimilabili conferiti annualmente;
- La composizione media annuale dei rifiuti solidi urbani dopo il loro pretrattamento nell'impianto a servizio della discarica;
- Il contenuto d'acqua e di carbonio organico biodegradabile per ogni categoria merceologica, sulla base di dati di letteratura;
- La costante cinetica per ogni classe di degradazione, ottenuta a partire dai tempi di dimezzamento della produzione di biogas;
- Il tempo che intercorre tra fine dei conferimenti ed inizio della produzione di biogas per ogni classe di degradazione, ossia la cosiddetta fase di latenza³⁵;
- La temperatura media del biogas immediatamente a monte dell'impianto di recupero energetico/torcia, che permetterà di convertire il flusso da condizioni normali (0°C, 1 atm) a reali, al fine di effettuare il confronto con la portata osservata e continuare a verificare l'affidabilità del modello. La temperatura media annuale del biogas è stata stimata pari a $T = 282,04 K$, ossia circa 8,9°C ;
- La percentuale di aria captata, stimata a partire da studi preliminari e precedenti progetti sulla discarica in oggetto³⁶.

6.2.1 Previsione delle quantità e qualità dei rifiuti da conferire

Il modello utilizza come dati di input le reali quantità e caratteristiche merceologiche dei rifiuti solidi urbani e assimilabili conferiti annualmente dall'inizio di attività della discarica (luglio 1999) fino all'anno appena conclusosi, ossia il 2020. Le future quantità di rifiuti, invece, sono state stimate effettuando la seguente distinzione temporale:

- **Periodo 2021-2022:** in tale biennio è stimato avvenga il completamento del volume utile autorizzato con il *Progetto del 2011*. Per tale periodo si attendono conferimenti in linea con la media degli ultimi 5-6 anni, sia come quantità totali, sia come ripartizione tra RSU e RSA:

TOTALE rifiuti	42.000 t/anno	<i>Media periodo 2015-2020</i>
RSU	25.200 t/anno	<i>Media periodo 2015-2020, 60% del totale</i>
RSA	16.800 t/anno	<i>Media periodo 2015-2020, 40% del totale</i>

- **Periodo 2023-2030:** tale arco temporale di 8 anni costituisce la stima (assunta assai cautelativa) dell'incremento di vita utile della discarica a seguito dell'approvazione del presente *Progetto*. In

³⁵ Denominata anche *lag-phase*.

³⁶ Cfr. *Appendice sul biogas del Progetto del 2011*.

questo periodo sono attesi minori conferimenti, ma una ripartizione tra RSU e RSA simile all'ultimo periodo 2015-2020³⁷:

TOTALE rifiuti	38.000 t/anno	
RSU	22.800 t/anno	60% del totale
RSA	15.200 t/anno	40% del totale

Per quanto concerne la caratterizzazione dei rifiuti, non sono attese significative variazioni nella loro composizione. Il modello assume, quindi, una composizione costante per la rimanente vita utile dell'impianto (2021-2030), pari alla media dell'ultimo periodo (2015-2020).

6.3 Modello Stechiometrico

Il modello stechiometrico stima la resa massima di biogas (L_0), ossia la quantità di biogas prodotta dalla degradazione dei rifiuti conferiti annualmente in discarica. Essa può essere definita a partire dal contenuto di carbonio organico biodegradabile e dalla quantità di rifiuto conferito.

La resa massima L_0 è stata definita su base annuale per ognuna delle quattro classi di degradazione, secondo la seguente formula (Cfr. nota p.p. 35):

$$L_{0,j}(t_d) = 1.876 \cdot OC_{b,j}(t_d) \cdot m_j(t_d) \quad (Nm^3)$$

dove:

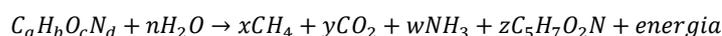
il pedice j rappresenta la generica classe di degradazione (RVP, RMP, RLP);

t_d è il generico anno di conferimento;

1.867 è il fattore di conversione che individua il volume di biogas in condizioni normali prodotto per unità di massa di carbonio organico biodegradabile presente nei rifiuti³⁸;

³⁷ Tale scelta, **del tutto cautelativa**, differisce dalle stime effettuate in altre parti del presente *Progetto* (Cfr. ad esempio, il *Piano economico-finanziario e tariffario*). La ragione di tale scelta risiede nell'opportunità di valutare uno scenario più produttivo, correlabile a possibili accelerazioni nel ritmo dei conferimenti in discarica.

³⁸ Dalla reazione di degradazione anaerobica della sostanza organica in discarica



Si osserva che 1 mole di sostanza organica biodegradabile ($C_a H_b O_c N_d$), e quindi 1 mole di carbonio organico biodegradabile, produce 1 mole di biogas ($x CH_4 + y CO_2$). Sapendo che il volume molare di un gas ideale in condizioni normali ($0^\circ C, 1 atm$) è $22,4 l/mole$

$OC_{b,j}$ è il contenuto di carbonio organico biodegradabile della classe j ;

$m_j(t_d)$ è la quantità di rifiuti della classe j conferiti nel generico anno t_d .

Il carbonio organico biodegradabile di ogni classe di degradazione $OC_{b,j}$ è definito come media pesata del carbonio organico biodegradabile delle categorie merceologiche che ne fanno parte:

$$OC_{b,j} = \sum_i w_{i,j} \cdot OC_{b,i} = \sum_i \frac{w_i}{\sum_i f_{ij} \cdot w_i} \cdot OC_{b,i} \quad (kg_{ocb}/kg_{rifiuto})$$

Dove:

il pedice i indica la categoria merceologica (es. es. carta e cartone, pannolini, plastica etc);

il pedice j indica la classe di degradazione (RVP, RMP, RLP);

$OC_{b,i}$ è il contenuto di carbonio organico biodegradabile della categoria merceologica i ($kg_{ocb}/kg_{rifiuto}$);

w_i è la frazione media annuale di RSU appartenenti alla categoria merceologica i (kg_i/kg_{RSU});

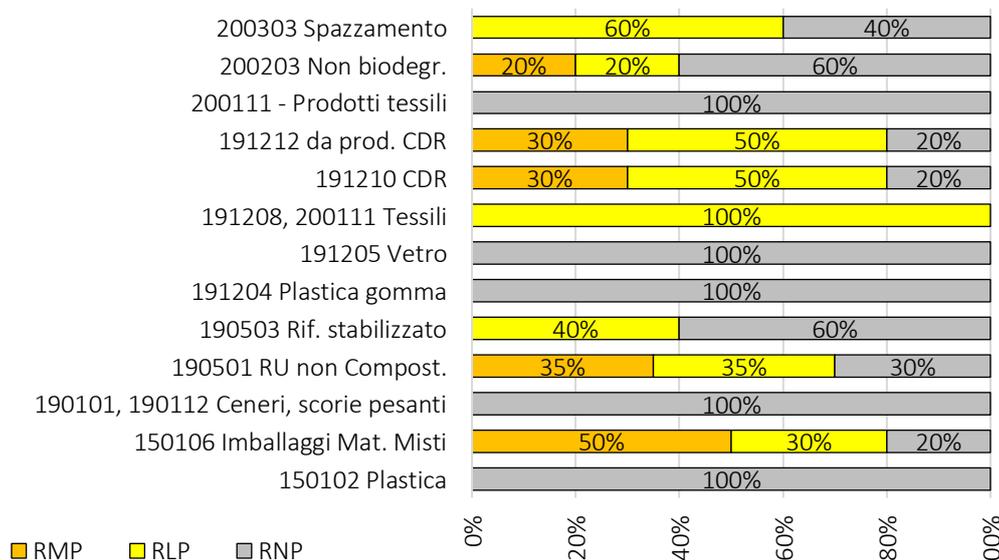
f_{ij} è la frazione di rifiuti della categoria merceologica i che appartengono alla classe di degradazione j , come mostrato nel grafico seguente (kg_i/kg_i).

e che il peso molecolare del carbonio organico biodegradabile è 12 g/mole , si ottiene che ogni chilogrammo di carbonio organico biodegradabile produce $22,4 \text{ Nm}^3 / 12 \text{ kg} = 1,876 \text{ Nm}^3 / \text{kg}$ di biogas.

Distribuzione f_{ij} delle categorie merceologiche dei RSU nelle quattro classi di degradazione

Polistirolo 100%

Distribuzione f_{ij} dei RSA nelle quattro classi di degradazione



Il carbonio organico biodegradabile di ogni categoria merceologica è stato definito a partire dalla quantità di carbonio organico presente e dall'umidità di rifiuto (Cfr. nota p.p. n. 35).

$$OC_{b,i} = OC_i \cdot f_{b,i} \cdot (1 - u_i)$$

dove:

i indica la categoria merceologica (es. carta e cartone, pannolini, plastica, etc);

OC_i è il contenuto di Carbonio Organico della categoria i ($kg_{OC}/kg_{RSU\ secco}$);

$f_{b,i}$ è la frazione biodegradabile di Carbonio Organico della categoria i ($kg_{OC_{bio.}}/kg_{OC}$);

u_i è il contenuto d'acqua della categoria i (kg_{H_2O}/kg_{wetMSW}).

La tabella sottostante riporta i valori dei precedenti parametri utilizzati nel modello, ottenuti da dati di letteratura e da un modello di produzione del biogas precedentemente applicato al caso specifico della discarica di Grumolo delle Abbadesse³⁹.

Umidità, Carbonio Organico e frazione biodegradabile dello stesso per le principali classi merceologiche di RSU conferiti in discarica⁴⁰

	u_i $kg_{H_2O}/kg_{RSU\ umido}$	OC_i $kg_{OC}/kg_{RSU\ secco}$	$f_{b,i}$ $kg_{OC_{biod.}}/kg_{OC}$	$OC_{b,i}$ $kg_{OC_b}/kg_{RSU\ umido}$
Rifiuto putrescibile	0.60	0.48	0.80	0.154
Verde	0.50	0.48	0.70	0.168
Carta e Cartone	0.08	0.44	0.50	0.202
Plastica e gomma	0.06	0.60	0.00	0.000
Rifiuti tessili	0.20	0.40	0.50	0.158
Legno	0.22	0.50	0.65	0.251
Vetro	0.03	0.01	0.00	0.000
Metalli	0.04	0.05	0.00	0.000
Incernibile	0.30	0.26	0.20	0.037

Una volta definito il carbonio organico biodegradabile per ogni classe di degradazione, si definisce la quantità di rifiuto conferito annualmente e appartenente a ciascuna classe $m_j(t_d)$. Quest'ultimo è stato calcolato in modo differente per i rifiuti solidi urbani, per cui erano noti la quantità annua totale ($m_{RSU}(t_d)$) e l'analisi merceologica (w_i), e per i rifiuti solidi assimilabili agli urbani, per i quali è invece nota la quantità annua conferita a seconda del CER ($m_{i,RSA}$):

$$m_{j,RSU}(t_d) = \left(\sum_i f_{ij} \cdot w_i \right) \cdot m_{RSU}(t_d)$$

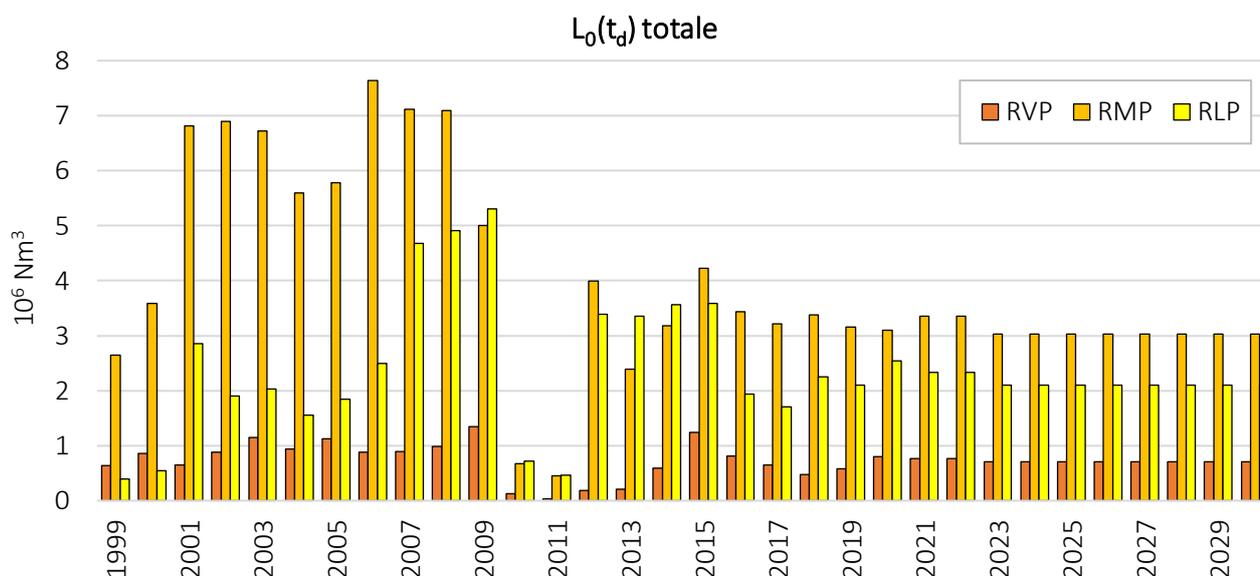
$$m_{j,RSA}(t_d) = \sum_j f_{ij} \cdot m_{i,RSA}$$

Dove i indica, per i RSU, la categoria merceologica (es. carta e cartone, pannolini, plastica, etc), mentre per i RSA i diversi CER. La distribuzione f_{ij} dei vari rifiuti solidi assimilabili agli urbani nelle quattro classi di degradazione è riportata nel grafico seguente.

³⁹ Cfr. *Appendice sul biogas del Progetto del 2011* e Ruggeri, B., 2003. *Sperimentazione per la valutazione della produzione di biogas dalla discarica di Grumolo delle Abbadesse In ottemperanza a quanto richiesto dalla Delibera della Giunta Provinciale di Vicenza n° 263 del 27 GIU. 2001 - Periodo di sperimentazione: 1/2/2002 – 3.*

⁴⁰ Cfr. *Appendice sul biogas del Progetto del 2011* e Cossu et al., 1996 riportato in nota n. 35.

Si ottiene quindi la resa annuale di biogas per ognuna delle tre classi di degradazione.



Resa massima annuale di biogas per ogni classe di degradazione

6.4 Modello Cinetico

Il modello cinetico, che permette di produrre la curva di produzione del biogas a partire dalla resa annuale di biogas assume, come usualmente effettuato in letteratura⁴¹ una cinetica di degradazione del primo ordine, caratterizzata dalla costante cinetica di degradazione k_i ($anni^{-1}$).

L'intervallo di tale parametro risulta molto ampio. Nwaokorie et al. (2018)⁴² elenca diversi studi al riguardo: Reinhart et al. (2005)⁴³ riporta intervalli di k tra 0.11 e 0.21 $anni^{-1}$, raccomandando un $k = 0.3$ $anni^{-1}$ per

⁴¹ Cfr. *Appendice sul biogas del Progetto del 2011*; Cossu et al., 1996 riportato in nota n. 35 e Townsend, T.G., Powell, J., Jain, P., Xu, Q., Tolaymat, T., Reinhart, D., 2015. *Sustainable practices for landfill design and operation, I. ed, Sustainable Practices for Landfill Design and Operation*. Springer New York Heidelberg Dordrecht London.

⁴² Nwaokorie, K.J., Bareither, C.A., Mantell, S.C., Leclaire, D.J., 2018. *The influence of moisture enhancement on landfill gas generation in a full-scale landfill*. *Waste Manag.* 79, 647–657.

⁴³ Reinhart, D.R., Faour, A.A., You, H., 2005. *First-Order Kinetic Gas Generation Model Parameters for Wet Landfills*, USEPA, Report No EPA-600/R-05/072. Washington DC.

discariche di rifiuti con alte percentuali di rifiuto rapidamente putrescibile. Wang et al. (2013)⁴⁴ individua valori di k tra 0.04 e 0.17 anni^{-1} per discariche che effettuano il ricircolo del percolato. Fei et al. (2016)⁴⁵ riporta ancora un k medio di 0.18 anni^{-1} ottenuto dalla modellazione di dati provenienti dal monitoraggio di 57 diverse discariche. Altri studi⁴⁶ concordano nel definire l'intervallo della costante cinetica compreso tra valori 0.04 anni^{-1} per discariche convenzionali e 0.3 anni^{-1} per discariche gestite come un bioreattore.

Nel caso specifico della discarica di Grumolo delle Abbadesse, le costanti cinetiche delle varie classi di degradazione sono state definite da studi in situ⁴⁷ a partire dai tempi di dimezzamento della degradazione del rifiuto conferito ($t_{1/2}$), che, per una cinetica del primo ordine permette di definire la costante k attraverso la formula seguente:

$$k = \frac{\ln 2}{t_{1/2}} \quad (\text{anni}^{-1})$$

I suddetti studi in situ hanno inoltre permesso di definire la fase di latenza iniziale, t_{lag} . Entrambi i parametri $t_{1/2}$ e t_{lag} sono nell'intorno dei valori minimi dei rispettivi intervalli riportati in letteratura, poiché è stato osservato che il pretrattamento effettuato, basato sulla compattazione in balle, favorisce ed accelera la produzione di biogas di circa il 30-35%⁴⁸.

Il modello cinetico tiene inoltre conto di due possibili scenari, uno di cinetica rapida (cd. *best case*) e uno di cinetica lenta (cd. *worst case*), al fine di rappresentare rispettivamente il sistema di captazione e di recupero energetico del biogas. Per ogni classe di degradazione sono quindi definite due costanti cinetiche, una per ogni scenario, come riportato nella tabella sottostante.

Tempi di dimezzamento, costanti cinetiche e fase di latenza per ogni classe di degradazione e per i due scenari di cinetica.

Classe di degradazione	RVP		RMP		RLP	
	Rapida	Lenta	Rapida	Lenta	Rapida	Lenta
$t_{1/2}$ (anni)	2	5	5	10	10	20
k (anni^{-1})	0.347	0.139	0.139	0.069	0.069	0.035
t_{lag} (anni)	0		1		3	

⁴⁴ Wang, X., Nagpure, A.S., DeCarolis, J.F., Barlaz, M.A., 2013. *Using observed data to improve estimated methane collection from select U.S. landfills*. Environ. Sci. Technol. 47, 3251–3257.

⁴⁵ Fei, X., Zekkos, D., Raskin, L., 2016. *Quantification of parameters influencing methane generation due to biodegradation of municipal solid waste in landfills and laboratory experiments*. Waste Manag. 55, 276–287.

⁴⁶ Amini, H.R., Reinhart, D.R., Mackie, K.R., 2012. *Determination of first-order landfill gas modeling parameters and uncertainties*. Waste Manag. 32, 305–316.

Bareither, C.A., Benson, C.H., Barlaz, M.A., Edil, T.B., Tolaymat, T.M., 2010. *Performance of North American Bioreactor Landfills. I: Leachate Hydrology and Waste Settlement*. J. Environ. Eng. 136, 824–838.

⁴⁷ Cfr. *Appendice sul biogas del Progetto del 2011* e Ruggeri B., riportato in nota n. 40.

⁴⁸ Cfr. *Appendice sul biogas del Progetto del 2011* e Ruggeri B., riportato in nota n. 40, confermato nel *Piano di monitoraggio e controllo del 2007*.

L'equazione che descrive la produzione di biogas nel tempo per il rifiuto della classe di degradazione j , conferito nel generico anno t_d è la seguente:

$$Q_{biogas,j}(t) = k_i \cdot L_{0,j}(t_d) \cdot e^{-k_j(t-t_d-t_{lag})}$$

Applicando la sovrapposizione degli effetti è possibile quindi sommare per ogni scenario le curve di produzione di biogas relative ai diversi anni di conferimento ed alle tre classi di degradazione che contribuiscono alla produzione di biogas e ottenere la produzione totale di biogas nel tempo.

Infine, come detto, il modello considera alcuni parametri correttivi. Infatti, il biogas non si trova ad una temperatura di 0°C, ma nel punto di monitoraggio varia tra 3.6°C e 15.4°C (media del periodo novembre 2014 – marzo 2019), con un valore medio di 8.9°C e una deviazione standard di 4.1°C. Approssimando il biogas ad un gas ideale, si può definire il parametro α_T di correzione della temperatura:

$$\alpha_T = \frac{T_2}{T_1} = \frac{282.04 \text{ K}}{273.15 \text{ K}} = 1.03$$

Come accennato precedentemente, il sistema di captazione e raccolta del biogas ha un'efficienza che, in via cautelativa ed in accordo con i dati di letteratura⁴⁹, può essere stimato pari a:

$$\eta_{captazione} = 0.7$$

Infine, la discarica non risulta perfettamente sigillata, soprattutto finché dotata della sola copertura provvisoria. Il sistema di captazione la mantiene in depressione e ciò può causare ingresso di aria dall'esterno, che va a sommarsi al biogas misurato. La percentuale di captazione d'aria dall'esterno può essere stimata considerando il contenuto di ossigeno misurato nel biogas, ma, nel caso in oggetto, tale misura non è risultata affidabile ed è stata quindi assunta, dopo un'analisi di sensibilità, pari a quella stimata in una precedente modellazione della produzione di biogas:

$$\alpha_{aria} = 1 + \frac{V_{aria}}{V_{biogas}} = 1.15$$

La curva di produzione del biogas nei due diversi scenari può quindi essere calcolata come segue:

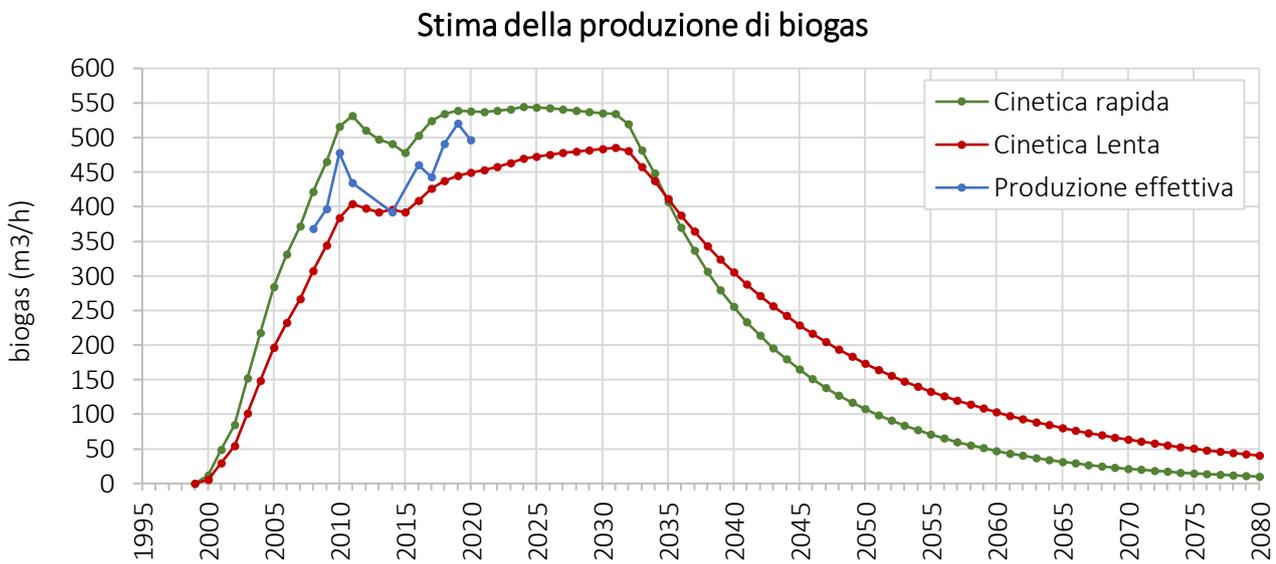
$$Q_{collected\ biogas} = \eta \cdot \alpha_{air} \cdot \alpha_T \cdot Q_{biogas}$$

⁴⁹ Cfr. *Appendice sul biogas del Progetto del 2011*, Nwaokorie et al., 2018 già citato e Zhang, L.L., Fredlund, M.D., Fredlund, D.G., Lu, H., Wilson, G.W., 2015. *The influence of the unsaturated soil zone on 2-D and 3-D slope stability analyses*. Eng. Geol. 193, 374–383.

6.5 Curve di Produzione del Biogas

Le curve di produzione del biogas per i due scenari sono riportate nel grafico sottostante, insieme con la produzione effettivamente misurata.

Quest'ultima risulta ben compresa tra le due curve teoriche, a conferma dell'affidabilità del modello di previsione.



6.6 Matrici dei dati

Rifiuti Solidi Urbani conferiti annualmente (CER 200301, 191212)

anno	kg/anno	anno	kg/anno	anno	kg/anno	anno	kg/anno
1999	18.994.930	2005	48.308.720	2011	1.823.200	2017	25.266.230
2000	25.660.210	2006	52.528.000	2012	25.081.740	2018	28.622.450
2001	45.507.530	2007	55.061.000	2013	16.860.290	2019	26.019.660
2002	43.781.030	2008	49.041.570	2014	16.125.730	2020	27.607.040
2003	47.275.478	2009	44.785.799	2015	25.969.560	2021-2022	25.000.000
2004	44.656.220	2010	4.832.520	2016	18.971.740	2023-2030	22.800.000

Composizione media annuale dei RSU conferiti (w_i , in %)

anno	Carta e cartone	Inerte e vetro	Legno e ramaglie	Metalli	Pannolini	Pericolosi RUP	Plastica	Poli- Accoppiati	Putrescibile	Tessuti e cuoio	Inceneribile	Polistirolo
1999	35,60	0,90	1,50	3,60	0,00	0,00	31,30	0,00	10,70	4,50	11,90	0,00
2000	32,10	0,90	1,50	3,60	5,50	0,00	25,10	6,90	7,90	4,50	11,90	0,00
2001	33,63	5,17	10,53	5,07	3,70	0,03	21,97	3,90	2,67	7,07	5,67	0,63
2002	36,53	2,33	2,28	4,70	6,65	0,00	23,48	6,10	3,20	8,30	6,03	0,40
2003	28,18	0,65	3,60	2,78	5,60	0,00	21,70	13,08	4,80	7,63	10,68	1,35
2004	23,13	0,78	1,90	4,13	8,78	0,08	30,13	13,03	2,48	6,98	6,23	2,48
2005	24,78	1,08	2,38	1,98	7,83	0,13	34,93	7,85	3,78	8,33	5,13	1,88
2006	28,05	0,85	2,55	2,80	7,45	0,20	33,00	10,48	1,83	8,45	3,88	0,70
2007	26,80	4,73	2,38	5,20	3,98	0,20	29,55	4,25	3,30	12,58	4,35	2,95
2008	28,73	1,57	1,43	1,00	9,20	0,30	27,93	7,30	2,17	14,67	3,13	2,67
2009	18,25	1,40	5,03	1,43	9,30	0,11	32,63	6,83	5,55	13,70	3,51	2,25
2010	16,50	2,00	4,00	2,30	12,10	0,00	28,60	9,00	3,10	17,20	2,00	3,30
2011	19,35	1,60	3,75	1,80	7,85	0,08	20,00	20,30	2,80	16,70	4,40	1,35
2012	29,20	2,85	3,58	1,28	0,06	0,06	21,93	12,50	2,00	15,00	6,10	5,41
2013	19,75	1,53	7,30	1,05	4,89	0,05	44,85	1,83	1,66	13,50	2,93	0,85
2014	12,70	2,90	4,65	4,30	22,05	0,00	23,45	5,20	1,35	16,05	6,40	1,05
2015	16,20	1,48	0,74	1,00	21,70	0,04	25,73	4,50	5,48	16,95	4,93	1,33
2016	18,93	1,38	0,88	1,61	22,96	0,06	22,66	6,66	2,58	9,66	12,23	0,44
2017	20,43	1,23	1,35	1,08	14,10	0,05	36,78	3,45	1,08	8,15	11,48	0,90
2018	19,38	6,98	1,68	1,48	8,05	0,01	32,68	5,60	1,00	10,90	10,00	2,30
2019	19,23	1,90	1,45	5,08	12,08	0,10	30,70	7,13	1,03	9,53	9,43	2,63

2020	17,93	1,30	3,10	1,65	17,68	0,10	29,25	7,13	0,80	12,20	6,15	2,95
2021-2030	18,68	2,38	1,53	1,98	16,09	0,06	29,63	5,74	1,99	11,23	9,03	1,76

Rifiuti Solidi Assimilabili agli Urbani conferiti annualmente secondo il loro CER (kg) (Parte1)

anno	15.01.02 Plastica	15.01.06 Imballaggi di Materiali Misti	19.01.01, 19.01.12 Ceneri e scorie pesanti	19.05.01 Rif. Urbano non Compostato	19.05.03 Rifiuto stabilizzato FOS	19.12.04 Plastica e gomma	19.12.05 Vetro	19.12.10 - CDR	20.01.11 Prodotti tessili
1999									
2000									
2001			5.174.980		1.563.500				
2002	153.460	22.380	23.837.680		3.661.140		264.760		
2003	332.920	80.340		56.360	1.816.140				
2004		205.340		460.000	426.620		27.740		
2005		149.200							2.520
2006		163.380							4.040
2007		332.300		632.580					111.060
2008		7.240	3.757.950	1.824.920					
2009		2.420	5.121.680	1.333.800		396.380			
2010			5.113.630	0		93.880			
2011			2.135.020	0		19.900			
2012			4.335.080	0		0			
2013			8.025.120	568.180		55.000	712.840		
2014			6.473.580	1.108.640		158.380	1.734.640		
2015			687.300	735.360		0	1.381.720		
2016			4.858.060	179.660		336.160	1.722.960		
2017			2.471.560	282.440		0	360.780		

Rifiuti Solidi Assimilabili agli Urbani conferiti annualmente secondo il loro CER (kg) (Parte 2)

anno	19.12.08 Prodotti Tessili	19.12.12 Assimilabili da produzione CDR	20.01.11 Prodotti tessili	20.02.03 Altri Rifiuti non biodegradabili	20.03.03 Rifiuti da spazzamento	20.03.07 Ingombranti
1999					27.320	
2000					383.530	
2001					1.297.730	
2002	0				2.022.160	
2003	4.422				2.691.230	
2004	5.930	962.280		83.300	3.297.970	
2005	360	382.320	2.520	144.380	3.926.860	
2006		4.298.220	4.040		4.514.900	
2007		3.537.480	111.060		5.095.860	8.361.560
2008		2.866.100			5.715.420	12.965.615
2009		3.379.300			6.932.600	12.144.575
2010		278.300		28.200	3.250.920	1.480.220
2011		1.403.700		95.440	1.201.970	719.800
2012		3.832.210		110.140	1.129.800	7.508.680
2013		7.035.160		44.900	1.135.340	6.305.960
2014		18.832.360		36.520	1.109.520	4.610.080
2015		21.118.700		23.060	530.620	2.176.900
2016		17.370.460		146.320	379.990	1.514.120
2017		9.482.930		65.240	315.740	1.636.860
2018	71.780	8.268.810		63.200	247.580	1.821.760
2019	85.580	7.886.260		64.900	198.560	4.299.860
2020	61.020	6.768.860		159.540	144.940	5.070.860

Media annuale del carbonio organico biodegradabile per ogni classe di degradazione (kg_{ocb}/kg_{ri-fi-uto})

anno	RVP	RMP	RLP	anno	RVP	RMP	RLP	anno	RVP	RMP	RLP
1999	0,122	0,186	0,118	2007	0,128	0,195	0,139	2015	0,143	0,189	0,096
2000	0,122	0,186	0,092	2008	0,138	0,197	0,123	2016	0,127	0,177	0,071
2001	0,119	0,195	0,167	2009	0,142	0,194	0,134	2017	0,116	0,178	0,084
2002	0,126	0,195	0,117	2010	0,146	0,198	0,129	2018	0,107	0,181	0,110
2003	0,116	0,187	0,119	2011	0,133	0,195	0,136	2019	0,118	0,183	0,095
2004	0,127	0,192	0,103	2012	0,095	0,194	0,157	2020	0,133	0,189	0,101
2005	0,132	0,193	0,115	2013	0,131	0,196	0,157	2021- 2030	0,127	0,182	0,092
2006	0,132	0,196	0,120	2014	0,136	0,184	0,106				

Quantità annuale di rifiuto per classe di degradazione (kg)

anno	RVP	RMP	RLP	anno	RVP	RMP	RLP
1999	2785170	7608109	1812395	2011	149324	1246653	1824732
2000	3749650	10334272	3223341	2012	1018958	11047117	11554528
2001	2914151	18751986	9156850	2013	856549	6554193	11441034
2002	3735102	19001226	8673129	2014	2339231	9296530	18026761
2003	5273473	19204801	9113300	2015	4665438	11975138	20008503
2004	3990223	15638267	8147465	2016	3439594	10397699	14631291
2005	4538182	16010395	8563533	2017	3018348	9674045	10930283
2006	3593112	20841077	11115861	2018	2391406	9977005	10909383
2007	3708936	19586654	17968234	2019	2654272	9267091	11778381
2008	3830179	19250666	21448823	2020	3226007	8815530	13489236
2009	5091994	13770635	21147848	2021-2022	3261782	9857072	13539271
2010	474360	1838775	2968522	2023-2030	2974745	8898449	12165416

Resa annuale per classe di degradazione

anno	RVP	RMP	RLP	anno	RVP	RMP	RLP
1999	634481	2640928	399111	2011	36991	453358	462790
2000	853440	3586838	550636	2012	181093	3993337	3394096
2001	648352	6814799	2858002	2013	209791	2393209	3351370
2002	879449	6899322	1901727	2014	595787	3186207	3563572
2003	1145671	6718097	2032250	2015	1244831	4224681	3584307
2004	942286	5597084	1560419	2016	817773	3434988	1939770
2005	1121466	5776784	1842387	2017	654959	3220692	1705345
2006	882462	7638172	2495285	2018	477892	3373573	2246771
2007	889561	7117192	4673206	2019	583015	3159308	2095421

2008	986644	7089256	4909380	2020	801714	3101916	2544845
2009	1345784	4997607	5305095	2021-2022	771270	3356829	2335854
2010	128993	678112	715928	2023-2030	703398	3030370	2098831

Temperatura media mensile del biogas

Mese	2014	2015	2016	2017	2018	MEDIA	DEV.ST.
Gennaio	-	3,6	3,4	2,8	5,0	4,0	1,0
Febbraio	-	4,4	5,3	5,0	4,4	5,3	1,2
Marzo	-	6,3	7,1	8,4	8,3	7,9	1,2
Aprile	-	8,1	9,1	8,5	12,5	9,6	1,7
Maggio	-	9,4	9,8	11,8	14,1	11,3	2,1
Giugno	-	12,9	11,8	15,8	15,0	13,9	1,9
Luglio	-	15,5	14,8	14,8	16,6	15,4	0,8
Agosto	-	13,2	12,5	14,1	16,4	14,0	1,7
Settembre	-	10,9	11,4	11,0	13,8	11,7	1,4
Ottobre	-	7,4	7,3	9,8	10,9	8,8	1,8
Novembre	5,6	4,8	5,1	5,6	7,0	5,6	0,8
Dicembre	3,8	3,5	3,9	3,5	3,4	3,6	0,2
MEDIA (°C)	4,7	8,3	8,4	9,3	10,6	8,9	4,1
MEDIA (K)	277,8	281,5	281,6	282,4	283,7	282,04	4,1

Volume e portata di biogas per anno

Anno	m ³ /anno estratti	Ore di funzionamento impianto	Portata media m ³ /h
2007	3.771.402	8.424	447,7
2008	3.155.815	8.576	368,0
2009	3.448.563	8.705	396,2
2010	4.035.380	8.439	478,2
2011	4.627.575	10.654	434,4
2012	3.222.943	8.885	362,7
2013	3.535.085	9.293	380,4
2014	3.370.423	8.606	391,6
2015	3.076.868	8.547	360,0
2016	3.301.098	8.717	460,1
2017	2.626.834	9.293	443,2
2018	2.161.540	8.064	491,2
2019	2.216.357	8.304	520,0
2020	1.808.798	8.177	496,5

7 RICONFIGURAZIONE DELLA RETE DI ASPIRAZIONE DEL BIOGAS [PAR. 11.4]

7.1 Generalità

L'introduzione della vasca 18 richiede la formazione di nuovi pozzi di aspirazione che, insieme con le sonde adacquatrici, costituiscono gli elementi di estrazione del biogas dalla discarica.

Ciò nondimeno, nel precedente capitolo è stato dimostrato che la portata prodotta nel prossimo futuro sarà inferiore a quella prevista nell'*Appendice sul biogas del Progetto del 2011* che aveva fornito le basi per il progetto delle linee, della centrale di aspirazione e della torcia di termodistruzione degli sfiori.

In questa sede, l'introduzione del Muro perimetrale e di una nuova viabilità di servizio sulla copertura ha richiesto la razionalizzazione del percorso dei collettori primari e dei presidi di gestione.

Da tale riconfigurazione della rete di aspirazione, descritta nel par. 11.4 della *Relazione tecnico-illustrativa*, deriva la necessità di verificare se:

- la prevalenza di aspirazione esplicita dalle dotazioni di centrale sia sufficiente a coprire le nuove esigenze;
- l'attuale disponibilità di tubazioni del collettore primario, di sviluppo anulare, sia idonea a coprire il nuovo percorso, di forma ramificata.

Nella seguente trattazione saranno sviluppati i calcoli fluidodinamici relativi alla riconfigurazione in oggetto, con lo scopo di giungere alle verifiche testè accennate.

Tali calcoli riguarderanno esclusivamente le componenti modificate dal presente *Progetto*, rispetto a quanto elaborato nella più volte citata *Appendice sul biogas del Progetto del 2011*.

7.2 Schema di calcolo

Come detto, la riconfigurazione della rete di aspirazione del biogas, descritta nel par. 11.4 della *Relazione tecnico-illustrativa* e rappresentata nella **Tav. 13**, ai fini della valutazione della prevalenza richiesta alle dotazioni della centrale è caratterizzata dalla sola modifica del percorso dei collettori primari, **atteso che i pozzi, le linee secondarie⁵⁰, i presidi di gestione, i separatori di condensa e le dotazioni di centrale richiederanno sostanzialmente il medesimo fabbisogno di prevalenza della configurazione attuale, derivata dal Progetto del 2011.**

In questo quadro, pertanto, l'unico calcolo di verifica di importanza riguarda la determinazione del fabbisogno di prevalenza dei collettori primari nella nuova configurazione.

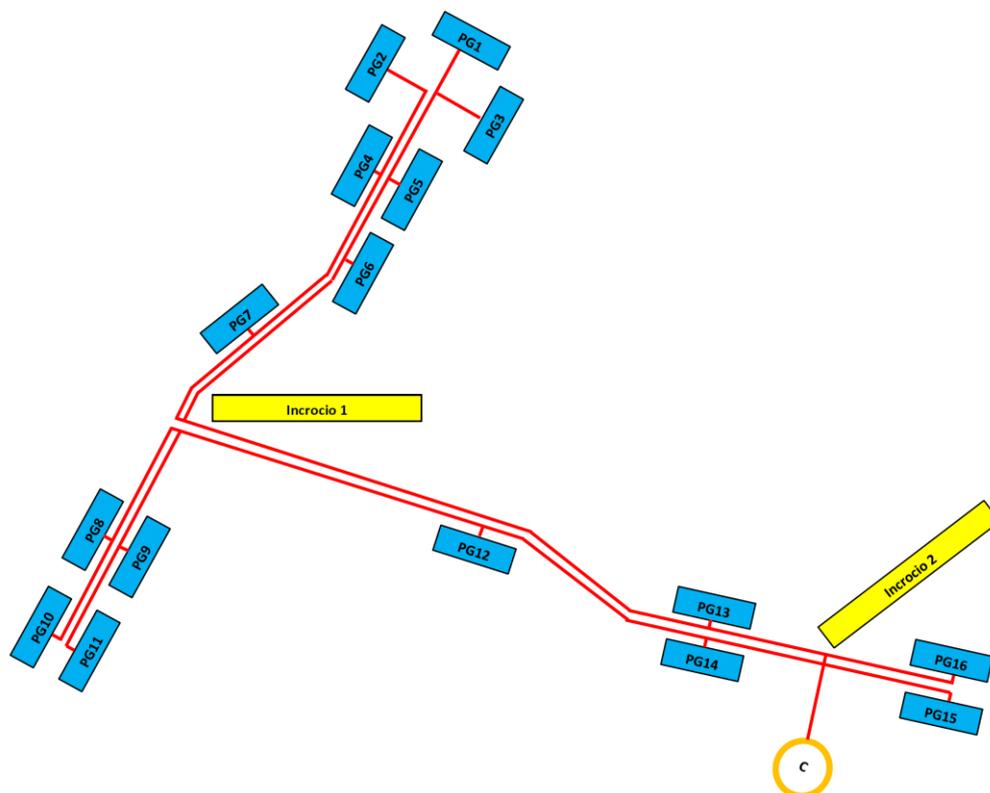
All'uopo, mantenendo la medesima portata aspirata da ogni pozzo/sonda dell'*Appendice sul biogas del Progetto del 2011*, pari a 10,36 Nm³/h e, a fronte del numero di pozzi/sonde per ogni presidio di gestione

⁵⁰ Collocate fra le teste di pozzo e i presidi di gestione.

indicato nella seguente tabella (Cfr. Tav.13), è possibile valutare le portate fluenti nelle varie tratte dei collettori primari.

Presidio di gestione	n. pozzi collegati	n. trincee collegate
PG1	13	2
PG2	12	2
PG3	12	2
PG4	9	1
PG5	9	1
PG6	11	1
PG7	13	1
PG8	11	2
PG9	13	1
PG10	10	1
PG11	6	2
PG12	7	2
PG13	10	2
PG14	4	2
PG15	6	1
PG16	8	2
TOT	154	25

Con riferimento al seguente schema, tratto dalla Tav.13, i flussi sono ricostruiti nella successiva tabella.



Presidio di Gestione	Portata massima per punto di captazione	Portata massima per Presidio di Gestione	Lunghezza della linea di trasporto primaria	Portata massima per tratta linea primaria
		[Nm ³ /h]	[m]	[Nm ³ /h]
PG1	num. Pozzi 15	155,40	PG1 - PG3	
	portata unit. [m ³ /h] 10,36		10,00	155,40
PG3	num. Pozzi 14	145,04	PG3 - PG5	
	portata unit. [m ³ /h] 10,36		30,00	300,44
PG5	num. Pozzi 10	103,60	PG5 - PG6	
	portata unit. [m ³ /h] 10,36		15,00	404,04
PG6	num. Pozzi 12	124,32	PG6 - Incrocio 1	
	portata unit. [m ³ /h] 10,36		40,00	528,36
PG2	num. Pozzi 14	145,04	PG2 - PG4	
	portata unit. [m ³ /h] 10,36		20,00	145,04
PG4	num. Pozzi 10	103,60	PG4 - PG7	
	portata unit. [m ³ /h] 10,36		45,00	248,64
PG7	num. Pozzi 14	145,04	PG7 - Incrocio 1	
	portata unit. [m ³ /h] 10,36		55,00	393,68
			Incrocio 1 - PG13	
			185,00	922,04
PG13	num. Pozzi 12	124,32	PG13 - Incrocio 2	
	portata unit. [m ³ /h] 10,36		50,00	1.046,36

PG16	<i>num. Pozzi</i> 10	103,60	PG16 - Incrocio 2	
	<i>portata unit. [m³/h]</i> 10,36		40,00	103,60
PG10	<i>num. Pozzi</i> 11	113,96	PG10 - PG8	
	<i>portata unit. [m³/h]</i> 10,36		35,00	113,96
PG8	<i>num. Pozzi</i> 13	134,68	PG8 - Incrocio 1	
	<i>portata unit. [m³/h]</i> 10,36		75,00	248,64
PG11	<i>num. Pozzi</i> 8	82,88	PG11 - PG9	
	<i>portata unit. [m³/h]</i> 10,36		35,00	82,88
PG9	<i>num. Pozzi</i> 14	145,04	PG9 - Incrocio 1	
	<i>portata unit. [m³/h]</i> 10,36		75,00	227,92
			Incrocio 1 - PG12	
			90,00	476,56
PG12	<i>num. Pozzi</i> 9	93,24	PG12 - PG14	
	<i>portata unit. [m³/h]</i> 10,36		95,00	569,80
PG14	<i>num. Pozzi</i> 6	62,16	PG14 - Incrocio 2	
	<i>portata unit. [m³/h]</i> 10,36		50,00	631,96
PG15	<i>num. Pozzi</i> 7	72,52	PG15 - Incrocio 2	
	<i>portata unit. [m³/h]</i> 10,36		40,00	72,52
			Incrocio 2 - Centrale	
			135,00	1.854,44

7.3 Calcolo fluidodinamico della prevalenza

Il calcolo della prevalenza richiesta dai flussi nelle tratte di collettori primari determinati nel precedente paragrafo seguirà le medesime modalità adottate nell'*Appendice sul biogas del Progetto del 2011*.

Le perdite di carico nelle singole tratte sono funzione della velocità del flusso e, di conseguenza, diametri maggiori comportano minori perdite.

Queste, a sua volta, si distinguono in:

1. concentrate, a seguito della presenza di curve, gomiti, incroci, valvole, ecc.;
2. distribuite.

Le prime sono valutate considerando un coefficiente di incremento virtuale della lunghezza di ogni singola tratta, in funzione di un numero "medio" conservativo di pezzi speciali ivi inseriti.

Per le perdite di carico distribuite è stata applicata la formula di Renouard, opportunamente modificata per il trasporto di gas combustibili in tubazioni in HDPE (fonte IIP). L'espressione utilizzata è la seguente:

$$\Delta p = 232 \cdot 10^6 \cdot S \cdot L \cdot Q^{1,82} \cdot D^{-4,82}$$

dove:

- Δp : variazione di pressione espressa in mm H₂O
- S: densità del gas rispetto all'aria
- L: lunghezza della tubazione in km
- Q: portata della tubazione in m³/h
- D: diametro interno della tubazione in mm

Le sezioni delle linee sono state scelte con riferimento a diametri standard disponibili sul mercato, assumendo la consueta classe S8 (PN6).

Nella seguente tabella sono riassunti i passi del calcolo.

I diametri indicati si riferiscono al valore minimo necessario a garantire la prevalenza calcolata. Pertanto, dovranno essere posti in opera tubazioni con diametri maggiori o uguali a quelli ivi riportati.

Con L_{eff} . Si intende la lunghezza effettiva della tratta, mentre con L_{virt} . la lunghezza virtuale, incrementata per tener conto delle perdite di carico concentrate.

Con ΔH , in mm H₂O, si intende la perdita di carico complessiva della tratta.

Tratta	Q [Nm ³ /h]	L _{eff.} [m]	L _{virt.} [m]	DE [mm]	D _{int} [mm]	ΔH [mm H ₂ O]	V [m/s]
PG1 - PG3	155,40	10,00	33,00	DE 110	97,40	19,39	5,80
PG3 - PG5	300,44	30,00	53,00	DE 140	124,00	32,28	6,91
PG5 - PG6	404,04	15,00	38,00	DE 180	159,60	11,76	5,61
PG6 - INC.1	528,36	40,00	63,00	DE 180	159,60	31,76	7,34
PG2 - PG4	145,04	20,00	43,00	DE 110	97,40	22,28	5,41
PG4 - PG7	248,64	45,00	68,00	DE 125	110,80	50,50	7,17
PG7 - INC.1	393,68	55,00	78,00	DE 180	159,60	23,02	5,47
INC.1 - PG13	922,04	185,00	208,00	DE 225	199,40	98,79	8,21
PG13 - INC.2	1.046,36	50,00	73,00	DE 250	221,60	26,24	7,54
PG16 - INC.2	103,60	40,00	63,00	DE 90	79,80	46,25	5,76
PG10 - PG8	113,96	35,00	58,00	DE 90	79,80	50,65	6,33
PG8 - INC.1	248,64	75,00	98,00	DE 140	124,00	42,30	5,72
PG11 - PG9	82,88	35,00	58,00	DE 90	79,80	28,37	4,61
PG9 - INC.1	227,92	75,00	98,00	DE 125	110,80	62,11	6,57
INC.1 - PG12	476,56	90,00	113,00	DE 180	159,60	47,22	6,62
PG12 - PG14	569,80	95,00	118,00	DE 200	177,20	41,23	6,42
PG14 - INC.2	631,96	50,00	73,00	DE 200	177,20	30,79	7,12
PG15 - INC.2	72,52	40,00	63,00	DE 90	79,80	24,17	4,03
INC.2-CENTRALE	1.854,44	135,00	166,00	DE 250	221,60	169,08	13,36
TOTALI		1.120,00	1.565,00			858,21	

Il fabbisogno complessivo di prevalenza per garantire il flusso di biogas nei collettori primari è pari a 858,21 mm H₂O.

7.4 Confronti con le dotazioni del Progetto del 2011

Il quadro comparativo del fabbisogno di prevalenza con le dotazioni attuali, derivanti dal *Progetto del 2011* è riportato nella seguente tabella (1 mm H₂O = 0,1 mBar).

Fabbisogno di prevalenza [mBar]	Pr. 2021	Pr.2011	Delta
Pozzi	13,00	13,00	0,00
Linee secondarie	1,00	1,00	0,00
Presidi di gestione	30,00	30,00	0,00
Separatori di condense	10,00	10,00	0,00
Linee primarie	85,82	93,00	-7,18
Centrale	30,00	30,00	0,00
Totale	169,82	177,00	-7,18

Alla luce di ciò si può concludere che le dotazioni impiantistiche di aspirazione del biogas stimate nel presente *Progetto* richiederanno una prevalenza minore di quanto attualmente richiesto sulla scorta del Progetto del 2011.

Per quanto attiene la comparazione fra l'attuale disponibilità di tubazioni, da adattare alla situazione futura testè prospettata, nella seguente tabella sono dettagliati i confronti fra le lunghezze (in m) dei vari diametri (in mm):

<i>Diametri [mm]/Lunghezze [m]</i>	<i>Pr.2021</i>	<i>Pr. 2011</i>	<i>Delta</i>
DE 250	185	264	-79
DE 225	185	531	-346
DE 200	145	264	-119
DE 180	200	150	50
DE 160		63	-63
DE 140	105	264	-159
DE 125	120	57	63
DE 110	30	98	-68
DE 90	150	0	150
TOTALI	1.120	1.691	-571

Si noti come l'attuale dotazione di tubazioni sia notevolmente maggiore del fabbisogno futuro, segnatamente nei diametri maggiori. Ciò consentirà finanche di coprire le tratte con diametri maggiori dei minimi sopra individuati, riducendo ulteriormente il fabbisogno di prevalenza.