

Sogliano Ambiente S.p.A

Piazza Garibaldi, 12
47030 Sogliano al Rubicone (FC)
Tel. 0541 948910
Fax 0541 948909
e-mail: info@soglianoambiente.it
sito web: www.soglianoambiente.it



Sogliano
Ambiente

DISCARICA PER RIFIUTI NON PERICOLOSI DENOMINATA "GINESTRETO 3"

Località Ginestreto - Comune di Sogliano al Rubicone (FC)

Procedura di Valutazione di Impatto Ambientale

L.R. 4/18 e D.Lgs. 152/06 e s.m.i.

PROGETTO DEFINITIVO

RELAZIONE DI CALCOLO

Allegato:

3

Elaborato:

2

Progettazione:

ing. Maurizio Carbone - Sogliano Ambiente S.p.A.

Collaboratori alla progettazione:

dott. Nicholas Lazzarini - Sogliano Ambiente S.p.A.
ing. Maurizio Migliori - Sogliano Ambiente S.p.A.

Timbro e firma:

Consulenti per la progettazione:

ing. F. Forlani - Studio Sgai s.r.l., Morciano di R. (RN)
dott. geol. A. Ricci - S. Piero in Bagno (FC)
geom. R. Galeotti - Studio Geo-exe, Forlì (FC)
ing. D. Neri - Ingegneria ambientale, Forlì (FC)
dott. for. G. Grapeggia - Studio Verde, Forlì (FC)
ing. M. Orlati - Studio Tema, Forlì (FC)
ing. S. Bagli - Gecosistema, Rimini (RN)
ing. P. Bernabini - Cober S.r.l., S. Piero in Bagno (FC)

Codice documento: Ara G3 PD RC 03.02

Rev.	Data	Redatto	Controllato	Approvato
0	set-22	FF	MC	MC



Sogliano Ambiente S.p.A.

**Discarica di rifiuti non pericolosi situata nel Comune di
Sogliano al Rubicone (FC) denominata Ginestreto 3 -
Progettazione definitiva
Relazione di Calcolo**


Doc.no.

Ara G3 PD RC 03.02

Rev. 2

Date: Settembre-22

Pag. 1 of 69

	Sogliano Ambiente S.p.A. Discarica di rifiuti non pericolosi situata nel Comune di Sogliano al Rubicone (FC) denominata Ginestreto 3 - Progettazione definitiva Relazione di Calcolo		Doc.no.	Ara G3 PD RC 03.02
			Rev. 2	Date: Settembre-22
	Pag. 2 of 69			

Client	Sogliano Ambiente S.p.A.
Project	Discarica di rifiuti non pericolosi situata nel Comune di Sogliano al Rubicone (FC) denominata Ginestreto 3 - Progettazione definitiva
Title	Relazione di Calcolo
Date	
Document code	Ara G3 PD RC 03.02
Tipo/Scale	
Emission/Revision of Date	2 of Settembre-22
Internal Revision	D

SGAI srl di E.Forlani & C.

Via Mariotti 18 - 47833 Morciano di R. (RN), Italy – phone: +39-0541988277 - <http://www.sgai.com>
email: sgai@sgai.com

R.E.A. n. 226314 - Capitale sociale i.v. € 51.480,00 –C.F. e Iscrizione alla C.C.I.A.A. di Rimini n. 00772250411 - P.IVA. 01894420403

The information contained in this document are properties of SGA I which reserves all rights.
Questo documento è proprietà SGA I srl che se ne riserva i diritti.



Sogliano Ambiente S.p.A.

Discarica di rifiuti non pericolosi situata nel Comune
di Sogliano al Rubicone (FC) denominata Ginestreto 3
- Progettazione definitiva
Relazione di Calcolo

Doc.no.

Ara G3 PD RC 03.02

Rev. 2

Date: Settembre-22

Pag. 3 of 69

CONTENTS

1.	Premessa	5
2.	Riferimenti normative e dati di base	6
2.1.	Normativa di riferimento	6
2.2.	Dati di base	6
3.	Descrizione dell'opera	7
4.	Criteri di calcolo	10
4.1.	Criteri di verifica di sicurezza e delle prestazioni	10
4.2.	Software di calcolo	12
4.3.	Azione sismica	15
4.4.	Modello geotecnico e Relazioni Costitutive	16
4.4.1	<i>Terreni</i>	16
4.4.2	<i>Elementi strutturali</i>	19
5.	Verifiche di stabilità	20
5.1.	Sezioni di verifica	21
5.2.	Parametri impiegati	25
5.3.	Sezione Longitudinale (Sezione F)	26
5.3.1	<i>Risultati delle analisi</i>	28
5.4.	Sezione Laterale (sezione 11) e verifica del capping	32
5.5.	Sezione 3	33
5.6.	Sezione 4	34
5.7.	Strada di accesso alla discarica	35
5.8.	Riepilogo dei risultati delle verifiche di stabilità	37
6.	Verifiche agli SLE: cedimenti ed elementi di impermeabilizzazione	38
6.1.	Parametri impiegati	39
6.1.1	<i>Terreni</i>	39
6.1.2	<i>Strutture</i>	46
6.2.	Fasi di calcolo	47
6.3.	Analisi dei cedimenti	50
6.4.	Deformazioni indotte sul geocomposito bentonitico	54
7.	Verifiche geotecniche dell'argine di valle	57
7.1.	Parametri impiegati	57
7.2.	Fasi di calcolo	57
7.3.	Risultati	61
7.3.1	<i>Spinte sull'argine di valle</i>	61
7.3.2	<i>Verifiche dell'argine</i>	65
8.	Piano di Monitoraggio	68
9.	Conclusioni	69



Sogliano Ambiente S.p.A.

**Discarica di rifiuti non pericolosi situata nel Comune
di Sogliano al Rubicone (FC) denominata Ginestreto 3
- Progettazione definitiva
Relazione di Calcolo**


Doc.no.

Ara G3 PD RC 03.02

Rev. 2

Date: Settembre-22

Pag. 4 of 69


	Sogliano Ambiente S.p.A. Discarica di rifiuti non pericolosi situata nel Comune di Sogliano al Rubicone (FC) denominata Ginestreto 3 - Progettazione definitiva Relazione di Calcolo	Doc.no. Ara G3 PD RC 03.02	
		Rev. 2	Date: Settembre-22
		Pag. 5 of 69	

1. Premessa

La presente relazione di calcolo, redatta in ottemperanza alle Leggi vigenti in materia (in particolare DM 14.01.2018 – Aggiornamento delle “Norme tecniche per le costruzioni”), si pone l’obiettivo di illustrare le analisi eseguite in sede di progettazione definitiva della una discarica di rifiuti non pericolosi, denominata G3, situata nel Comune di Sogliano al Rubicone (FC).

Nello specifico, oggetto delle presente relazioni sono le verifiche geotecniche di stabilità e analisi dei cedimenti, nonché la verifica degli elementi costituenti la discarica (capping, geogriglia e geocomposito bentonitico).

Si da, inoltre, indicazione del piano di monitoraggio previsto sull’opera.

	Sogliano Ambiente S.p.A. Discarica di rifiuti non pericolosi situata nel Comune di Sogliano al Rubicone (FC) denominata Ginestreto 3 - Progettazione definitiva Relazione di Calcolo	Doc.no. Ara G3 PD RC 03.02	
		Rev. 2	Date: Settembre-22
		Pag. 6 of 69	

2. Riferimenti normative e dati di base

2.1. Normativa di riferimento

- Decreto Ministeriale 17.01.2018 - Aggiornamento delle Norme tecniche per le costruzioni
- Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici - Istruzioni per l'applicazione delle "Norme tecniche per le costruzioni" di cui al D.M. 17 gennaio 2018.
- Eurocodice 8 (1998) - Indicazioni progettuali per la resistenza fisica delle strutture - Parte 5: Fondazioni, strutture di contenimento ed aspetti geotecnici (stesura finale 2003)
- Eurocodice 7.1 (1997) - Progettazione geotecnica – Parte I : Regole Generali . UNI
- Eurocodice 7.2 (2002) - Progettazione geotecnica – Parte II : Progettazione assistita da prove di laboratorio (2002). UNI
- Eurocodice 7.3 (2002) - Progettazione geotecnica – Parte II : Progettazione assistita con prove in sito(2002). UNI
- Decreto legislativo 3 settembre 2020, n. 121 - Attuazione della direttiva (UE) 2018/850, che modifica la direttiva 1999/31/CE relativa alle discariche di rifiuti.

2.2. Dati di base

Doc. 1 _ Relazione geotecnica – discarica di rifiuti non pericolosi situata nel Comune di Sogliano al Rubicone (FC) denominata Ginestreto 3 - Progettazione definitiva

Doc. 2 _ Relazione geologica - Discarica per rifiuti non pericolosi Denominata Ginestreto 3

Doc. 3 _ Relazione Sismica - discarica di rifiuti non pericolosi situata nel Comune di Sogliano al Rubicone (FC) denominata Ginestreto 3 - Progettazione definitiva

Doc. 4 _ Relazione sui Materiali - discarica di rifiuti non pericolosi situata nel Comune di Sogliano al Rubicone (FC) denominata Ginestreto 3 - Progettazione definitiva

Doc. 5 _ Elaborato 22 – Relazione tecnica analisi risposta sismica locale - discarica di rifiuti non pericolosi situata nel Comune di Sogliano al Rubicone (FC) denominata Ginestreto 3 - Progettazione definitiva

Doc. 6 _ Profilo e sezioni geotecniche 1/2 - discarica di rifiuti non pericolosi situata nel Comune di Sogliano al Rubicone (FC) denominata Ginestreto 3 - Progettazione definitiva

Doc. 7 _ Profilo e sezioni geotecniche 2/2 - discarica di rifiuti non pericolosi situata nel Comune di Sogliano al Rubicone (FC) denominata Ginestreto 3 - Progettazione definitiva


Doc. 8 _ All.D Elaborato 1 – Relazione geologica - Discarica per rifiuti non pericolosi Denominata Ginestreto 4 – Progetto di ampliamento dal scarica per rifiuti non pericolosi denominata "Ginestreto 2" fino ad una potenzialità di 2.500.000 mc.

Doc. 9 _ All.3-El.1_Relazione Tecnico-Illustrativa e di Calcolo Strutturale - Discarica per rifiuti non pericolosi Denominata Ginestreto 4 – Progetto definitivo

Doc. 10 _ E19 – Prove di archivio aree limitrofe (Vallecola G3 e strada comunale del crinale) - Discarica per rifiuti non pericolosi Denominata Ginestreto 4

Doc. 11 _1_Relazione Stabilità G2 – Progetto per la costruzione di una discarica controllata per rifiuti urbani e speciali non pericolosi con una potenzialità di 1500000m³ Località Ginestreto – Sito denominato G2.

Doc. 12 _ Relazione tecnica - Progetto per la costruzione di una discarica controllata per rifiuti urbani e speciali non pericolosi con una potenzialità di 1500000m³ Località Ginestreto – Sito denominato G2. Integrazione richiesta dall'Amministrazione Provinciale FC.

	Sogliano Ambiente S.p.A. Discarica di rifiuti non pericolosi situata nel Comune di Sogliano al Rubicone (FC) denominata Ginestreto 3 - Progettazione definitiva Relazione di Calcolo	Doc.no. Ara G3 PD RC 03.02	
		Rev. 2	Date: Settembre-22
		Pag. 7 of 69	

3. Descrizione dell'opera

In Figura 3-1 è riportata la planimetria dello stato di progetto della discarica denominata G3 oggetto della presente relazione con indicazione di una sezione longitudinale.

L'approntamento della discarica prevede la realizzazione di un argine di valle realizzato mediante la tecnica di stabilizzazione delle terre con calce, con percentuale di quest'ultima pari al 3.5%.

Il pacchetto di fondo della discarica è eseguito in accordo alla normativa sulle discariche di rifiuti prevedendo, tra il fondo scavo (barriera geologica) e il rifiuto, l'inserimento di uno strato di impermeabilizzazione artificiale composto dall'accoppiamento di un geocomposito bentonitico (che garantisca almeno equivalenti caratteristiche di permeabilità di 1m di materiale artificiale con conducibilità idraulica inferiore a 1×10^{-9} m/s) e di un geosintetico identificato con una guaina in HDPE.

Le modalità esecutive della discarica prevedono la successione delle seguenti fasi:

1. Esecuzione dello scavo prevedendo la completa asportazione della coltre superficiale, nonché degli strati di roccia alterata, fino al raggiungimento del substrato costituito dalla roccia intatta (identificata nel progetto con la denominazione RAi e RPi), con un immersione di 1.5m all'interno di tale strato più rigido.

Pertanto durante le fasi di scavo verranno eseguite delle prove di carico su piastra per verificare di aver raggiunto il substrato.

Qualora lo scavo intercettasse la coltre superficiale o lo strato alterato, si approfondirà pertanto lo scavo fino a raggiungere lo strato di fondazione previsto e si eseguirà la riprofilatura del profilo di scavo mediante stabilizzato a calce.

L'esecuzione degli scavi dovrà prevedere, laddove le parti in scarpata hanno altezze maggiori, la realizzazione di banche intermedie per l'ancoraggio del geocomposito bentonitico.

Durante le operazioni di scavo in corrispondenza del rilevato in terra calce, andrà riubicata l'interferente strada esistente a valle;

2. Realizzazione dell'argine in terra calce, con contestuale verifica della sua corretta esecuzione mediante prove di carico su piastra;
3. Stesura del pacchetto di fondo della discarica;
4. Abbancamento (in tempi successivi fino al completamento della discarica) e realizzazione del capping.

Data la complessità della situazione geologica e geotecnica, nonché l'importanza dell'opera, che coinvolge volumi di scavo e riporto importanti, la progettazione in oggetto prevede il ricorso al metodo osservazionale, ovvero alla valutazione in corso d'opera e in fase di funzionamento del comportamento dell'insieme opera-terreno.

Tale metodo prevede, pertanto:

- l'osservazione delle condizioni di stabilità dei fronti di scavo, tale da valutare il potenziale verificarsi di cinatismi controllati da discontinuità dell'ammasso e, qualora si evidenziassero tali condizioni, prevedere adeguati consolidamenti;
- la valutazione dei livelli prestazionali mediante prove in sito del trattamento a calce del terreno e la valutazione del corretto approfondimento degli scavi;
- la predisposizione di un adeguato piano di monitoraggio tale da verificare i comportamenti attesi a seguito della realizzazione dell'opera.

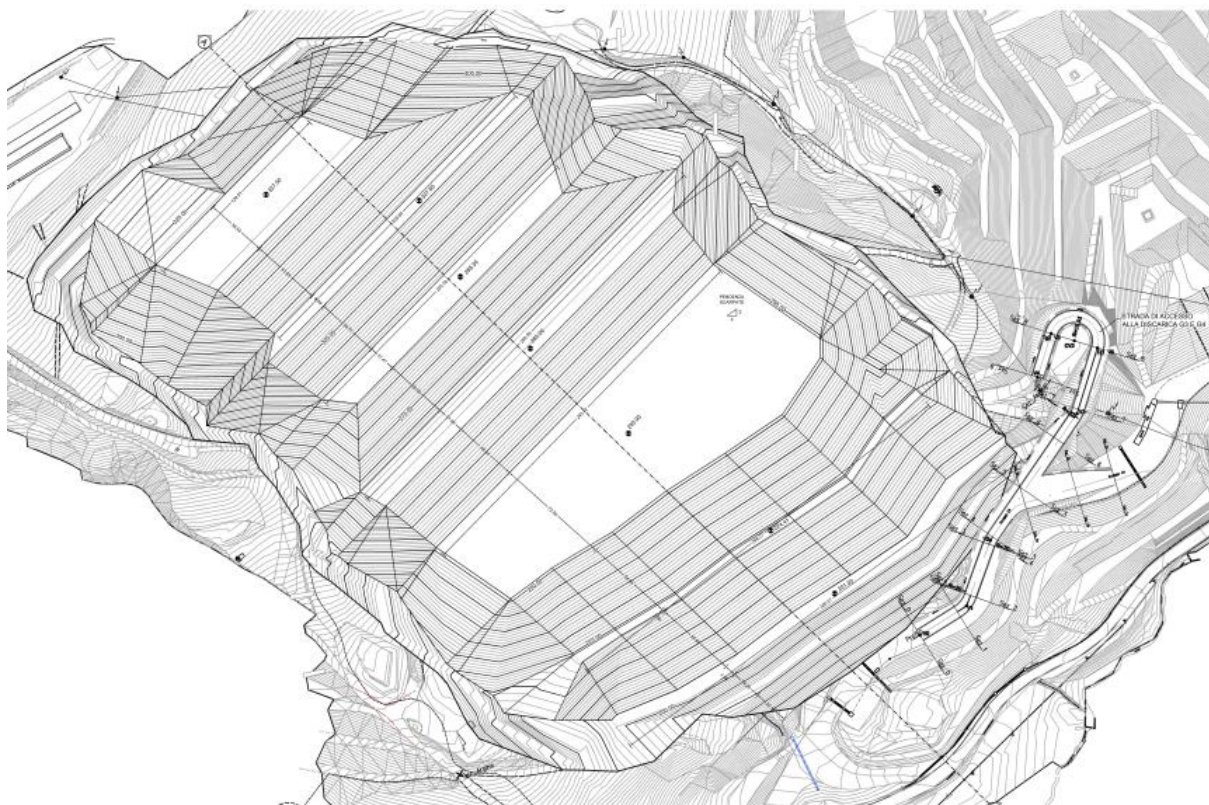


Figura 3-1 Planimetria di progetto dell'abbancamento dei rifiuti non pericolosi

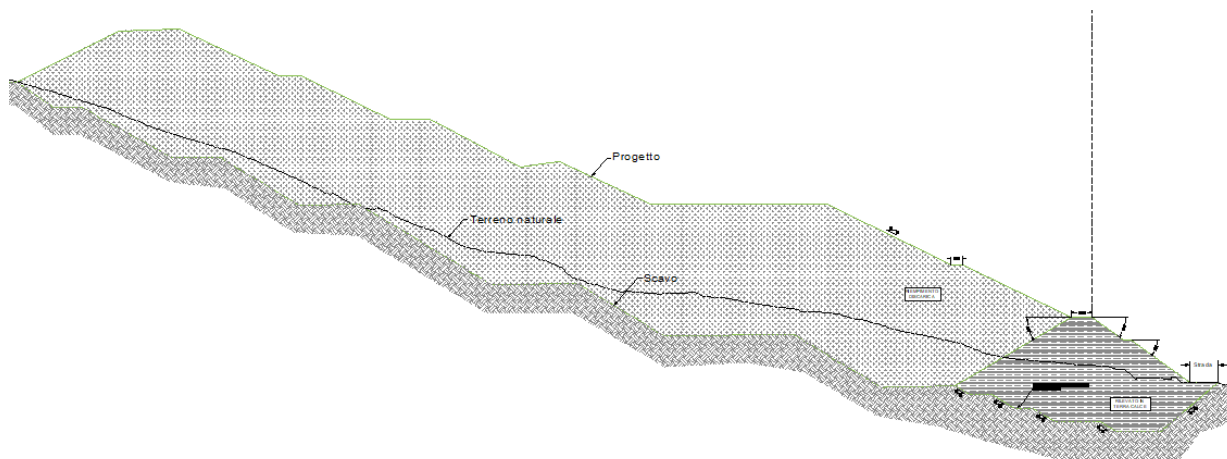
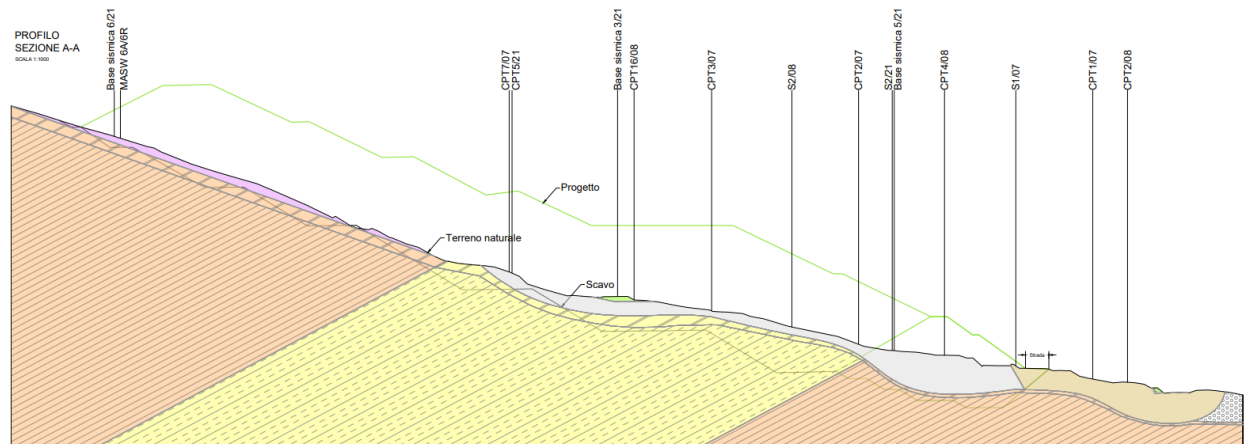


Figura 3-2 Sezione longitudinale della discarica

Nell'immagine che segue si riporta il profilo geotecnico di riferimento.



LEGENDA











- | | |
|---|--|
|  | Rilevati stradali |
|  | Ricostruzione e consolidamento della pendice mediante rilevati in terra battuta |
|  | Coperture detritiche e/o riporti |
|  | Deposito di frana |
|  | Deposito alluvionale |
|  | FAA2p : Argille Azzurre - Arenarie di Borello - litofacies pelitico arenacea - ALTERATO |
|  | FAA2p : Argille Azzurre - Arenarie di Borello - litofacies pelitico arenacea - INTATTO |
|  | FAA2ap : Argille Azzurre - Arenarie di Borello - litofacies arenaceo pelitica - ALTERATO |
|  | FAA2ap : Argille Azzurre - Arenarie di Borello - litofacies arenaceo pelitica - INTATTO |

Figura 3-3 Profilo geotecnico e indicazione delle unità geotecniche

	Sogliano Ambiente S.p.A. Discarica di rifiuti non pericolosi situata nel Comune di Sogliano al Rubicone (FC) denominata Ginestreto 3 - Progettazione definitiva Relazione di Calcolo	Doc.no. Ara G3 PD RC 03.02	
		Rev. 2	Date: Settembre-22
		Pag. 10 of 69	

4. Criteri di calcolo

Nel seguito saranno eseguite le verifiche necessarie al dimensionamento dell'opera, che consistono in:

- verifiche geotecniche di stabilità globale;
- analisi dei cedimenti,
- verifica del capping, che si configura come una verifica di stabilità locale;
- verifica degli elementi di impermeabilizzazione (geogriglia e geocomposito bentonitico);
- verifiche geotecniche dell'argine di valle.

Le analisi di stabilità sono state eseguite con il programma STAP che implementa il metodo dell'equilibrio limite.

L'analisi di stabilità della sezione maestra, nonché le verifiche locali suddette, sono state eseguite impiegando il metodo di calcolo agli elementi finiti con il software Plaxis 2D.

4.1. Criteri di verifica di sicurezza e delle prestazioni

Le verifiche vengono effettuate facendo riferimento al metodo semi-probabilistico agli stati limite, in cui la sicurezza strutturale deve essere verificata tramite il confronto tra la resistenza e l'effetto delle azioni.

Gli stati limite che si considerano sono sia gli stati limite ultimi, che sono quelli associati al collasso della struttura (o dell'insieme struttura-terreno) o alla rottura di parti di essa, sia gli stati limite di esercizio, che corrispondono a condizioni oltre le quali specifiche richieste d'uso per una struttura o per un elemento strutturale non sono più soddisfatte.

Le verifiche di sicurezza vengono condotte secondo il Metodo dei coefficienti parziali, ovvero, verificando che, in tutte le situazioni progettuali significative, per ogni stato limite venga soddisfatta la seguente condizione:

$$R_d \geq E_d$$

dove:


- R_d è la resistenza di progetto del sistema geotecnico, valutata in base ai valori di progetto della resistenza dei materiali e ai valori nominali delle grandezze geometriche interessate;
- E_d è il valore di progetto dell'effetto delle azioni, valutato in base ai valori di progetto $F_{dj} = F_{kj} \cdot \gamma_{Fj}$ delle azioni o direttamente $E_{dj} = E_{kj} \cdot \gamma_{Ej}$.

I coefficienti parziali di sicurezza, γ_{Mj} e γ_{Fj} , associati rispettivamente al materiale i-esimo e all'azione j-esima, tengono in conto la variabilità delle rispettive grandezze e le incertezze relative alle tolleranze geometriche e alla affidabilità del modello di calcolo.

Il non raggiungimento delle situazioni limite è da intendersi in senso probabilistico ("misura della sicurezza"), cioè implicitamente si assume che la probabilità di raggiungere una certa situazione limite, durante la vita nominale della struttura (o durante l'orizzonte temporale di riferimento nel caso di una fase transitoria), sia inferiore ad un valore prefissato, comunque piccolo ("affidabilità").

Sono state eseguite le verifiche agli Stati Limite Ultimi e agli Stati Limite di Esercizio.

Agli SLE si è verificata l'ammissibilità degli spostamenti con i requisiti prestazionali degli elementi costituenti la struttura. In particolare, si è stimato il cedimento che occorre sull'argine di valle e valutata l'entità della deformazione massima che si ha sul geocomposito costituente il pacchetto di fondo. Quest'ultimo, infatti, per impedire la dispersione nel terreno del percolato deve mantenere la sua integrità.

	Sogliano Ambiente S.p.A. Discarica di rifiuti non pericolosi situata nel Comune di Sogliano al Rubicone (FC) denominata Ginestreto 3 - Progettazione definitiva Relazione di Calcolo	Doc.no. Ara G3 PD RC 03.02	
		Rev. 2	Date: Settembre-22
		Pag. 11 of 69	

Agli SLU si sono eseguite le verifiche di stabilità dell'opera, nonché le verifiche geotecniche dell'argine di valle considerato come un'opera di sostegno.

Pertanto, in accordo alle Norme Tecniche delle costruzioni 2018, le verifiche di stabilità sono state condotte con l'approccio A2+M2+R2.

In condizioni statiche sono stati impiegati i coefficienti per le azioni e per i materiali indicate in Tabella 4-1 e

Tabella 4-2; mentre le resistenze di progetto vanno calcolate con un coefficiente riduttivo pari a $\gamma_R=1.1$, che corrisponde al fattore di sicurezza alla stabilità da rispettare.

In condizioni sismiche, invece, la normativa prevede di porre pari all'unità i coefficienti parziali sulle azioni e sui parametri di progetto (γ_F , γ_M) e pari ad 1.2 il coefficiente parziale sulle resistenze di progetto (γ_R).

Le verifiche geotecniche dell'argine, escluse quelle di stabilità implicitamente verificate eseguendo quelle sopra descritte, sono state eseguite con l'approccio A1+M1+R3. I coefficienti delle azioni, dei materiali, delle azioni e delle resistenze sono riportate rispettivamente in Tabella 4-1,

Tabella 4-2, Tabella 4-3 e Tabella 4-4.

Nelle tabelle seguenti si riportano i coefficienti adottati nelle verifiche agli SLU in accordo alle NTC.

Tabella 4-1 Coeff. Parziali per le azioni o per l'effetto delle azioni (Tab. 6.2.I da NTC 2018)

	Effetto	Coefficiente Parziale γ_F (o γ_E)	EQU	(A1)	(A2)
Carichi permanenti G_1	Favorevole	γ_{G1}	0,9	1,0	1,0
	Sfavorevole		1,1	1,3	1,0
Carichi permanenti $G_2^{(1)}$	Favorevole	γ_{G2}	0,8	0,8	0,8
	Sfavorevole		1,5	1,5	1,3
Azioni variabili Q	Favorevole	γ_{Qk}	0,0	0,0	0,0
	Sfavorevole		1,5	1,5	1,3

⁽¹⁾ Per i carichi permanenti G_2 si applica quanto indicato alla Tabella 2.6.1. Per la spinta delle terre si fa riferimento ai coefficienti γ_{Gk}

Tabella 4-2 Coeff. Parziali per i parametri geotecnici del terreno (Tab. 6.2.II da NTC 2018)

Parametro	Grandezza alla quale applicare il coefficiente parziale	Coefficiente parziale γ_M	(M1)	(M2)
Tangente dell'angolo di resistenza al taglio	$\tan \varphi'_k$	$\gamma_{\varphi'}$	1,0	1,25
Coesione efficace	c'_k	$\gamma_{c'}$	1,0	1,25
Resistenza non drenata	c_{uk}	γ_{cu}	1,0	1,4
Peso dell'unità di volume	γ_r	γ_γ	1,0	1,0


	Sogliano Ambiente S.p.A. Discarica di rifiuti non pericolosi situata nel Comune di Sogliano al Rubicone (FC) denominata Ginestreto 3 - Progettazione definitiva Relazione di Calcolo	Doc.no. Ara G3 PD RC 03.02	
		Rev. 2	Date: Settembre-22
		Pag. 12 of 69	

Tabella 4-3 Coeff. Parziali per le resistenze in condizioni statiche (Tab. 6.5.I da NTC 2018)

Verifica	Coefficiente parziale (R3)
Capacità portante della fondazione	$\gamma_R = 1,4$
Scorrimento	$\gamma_R = 1,1$
Ribaltamento	$\gamma_R = 1,15$
Resistenza del terreno a valle	$\gamma_R = 1,4$

Tabella 4-4 Coeff. Parziali per le resistenze in condizioni sismiche (Tab. 7.11.III da NTC 2018)

Verifica	Coefficiente parziale γ_R
Carico limite	1.2
Scorrimento	1.0
Ribaltamento	1.0
Resistenza del terreno a valle	1.2

4.2. Software di calcolo

I programmi di calcolo impiegati sono il codice di calcolo Plaxis 2D e il programma STAP (ver. 16).

STAP

Il software STAP della Aztec Informatica s.r.l. esegue le verifiche di stabilità del versante implementando il metodo dell'equilibrio limite (metodo di Bishop). Questo metodo utilizza la tecnica della suddivisione a strisce della superficie di scorrimento da analizzare.

In particolare il programma esamina un numero di superfici che dipende dalle impostazioni fornite. Il processo iterativo permette di determinare il coefficiente di sicurezza di tutte le superfici analizzate.

Nella descrizione dei metodi di calcolo si adotterà la seguente simbologia:

l	lunghezza della base della striscia
α	angolo della base della striscia rispetto all'orizzontale
b	larghezza della striscia $b=l \times \cos(\alpha)$
ϕ	angolo di attrito lungo la base della striscia
c	coesione lungo la base della striscia
γ	peso di volume del terreno
u	pressione neutra
W	peso della striscia
N	sforzo normale alla base della striscia
T	sforzo di taglio alla base della striscia
E_s, E_d	forze normali di interstriscia a sinistra e a destra
X_s, X_d	forze tangenziali di interstriscia a sinistra e a destra
E_a, E_b	forze normali di interstriscia alla base ed alla sommità del pendio
ΔX	variazione delle forze tangenziali sulla striscia $\Delta X = X_d - X_s$
ΔE	variazione delle forze normali sulla striscia $\Delta E = E_d - E_s$

Di seguito viene fornita a titolo di esempio, la soluzione analitica di Bishop.

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



Sogliano Ambiente S.p.A.

Discarica di rifiuti non pericolosi situata nel Comune di Sogliano al Rubicone (FC) denominata Ginestreto 3
- Progettazione definitiva
Relazione di Calcolo

Doc.no.

Ara G3 PD RC 03.02

Rev. 2

Date: Settembre-22

Pag. 13 of 69

$$F = \frac{\sum_i \left(\frac{c_i b_i + (N_i / \cos \alpha_i - u_i b_i) \tan \phi_i}{m} \right)}{\sum_i W_i \sin \alpha_i}$$

dove il termine m è espresso da

$$m = \left(1 + \frac{\tan \phi_i \tan \alpha_i}{F} \right) \cos \alpha_i$$

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

Le forze generate dagli elementi di rinforzo entrano a far parte del calcolo di stabilità come forze resistenti, e il loro valore dipende dalle caratteristiche di resistenza dell'elemento fornite dall'utente a seconda della tipologia dell'elemento stesso (resistenza a trazione, resistenza a taglio e a flessione, ecc.). La reazione dell'elemento di rinforzo viene assunta pari ad un valore a rottura scelto in base ad un "multi-criterio di rottura" (snervamento a trazione o a taglio dell'elemento, scorrimento lungo l'interfaccia terreno-ancoraggio, ecc.).

La resistenza del singolo chiodo viene considerato come incremento di resistenza allo scorrimento, che le componenti della resistenza a taglio e a trazione dell'elemento forniscono sulla superficie di scorrimento della striscia considerata, in funzione dell'inclinazione relativa tra la superficie della striscia e chiodo.

È inoltre possibile considerare una linea piezometrica di forma qualsiasi, schematizzare carichi esterni verticali o inclinati, distribuiti su una superficie o lineari lungo una retta. Il sistema viene schematizzato secondo il classico metodo "pseudostatico", applicando ad ogni elemento di volume di terreno una forza proporzionale al peso dell'elemento stesso sia in direzione orizzontale (k_h) che in direzione verticale ($1 \pm k_v$, incremento verso l'alto o verso il basso).

Il programma consente infine, nello spirito del Metodo Semiprobabilistico agli Stati Limite, una versatile e accurata gestione dei coefficienti parziali γ (sulle azioni, sui sovraccarichi esterni, sui parametri di resistenza del terreno e su quelli degli elementi strutturali resistenti, ecc.).

Plaxis

IL codice di calcolo agli elementi finiti Plaxis è utilizzabile per eseguire analisi di stabilità e di deformazione nell'ambito di molteplici applicazioni geotecniche nel quale il terreno viene schematizzato mediante un insieme di elementi finiti di forma triangolare a sei o quindici nodi; in particolare, il triangolo a quindici nodi, adottato nei seguenti modelli, fornisce un'interpolazione del quarto ordine e l'integrazione numerica adopera dodici punti di Gauss.

La versione bidimensionale impiegata, permette di simulare situazioni reali riconducibili a condizioni di deformazione piane (plain strain) o a condizioni assialsimmetriche (axisymmetric).

I dati principali richiesti dal programma sono:

- **geometria del sistema** (coordinate dei vertici di quadrilateri che vengono poi suddivisi in triangoli a 6 nodi, posizione di elementi beam, ancoraggi, geotessili, cerniere, vincoli, falda);
- **caratteristiche degli elementi di terreno;**
- **caratteristiche degli eventuali elementi lineari;**
- **definizione dei sistemi di carico.**

Il calcolo prevede in genere la suddivisione delle diverse fasi (corrispondenti all'applicazione di carichi, o a modifiche della configurazione geometrica per scavi o riporti, o a modifiche delle pressioni



Sogliano Ambiente S.p.A.

Discarica di rifiuti non pericolosi situata nel Comune di Sogliano al Rubicone (FC) denominata Ginestreto 3
- Progettazione definitiva
Relazione di Calcolo

Doc.no.

Ara G3 PD RC 03.02

Rev. 2

Date: Settembre-22

Pag. 14 of 69

idrostatiche) in passi di calcolo, ed è possibile quindi seguire l'evoluzione delle condizioni del terreno parallelamente alle prevedibili fasi costruttive.

Il programma è concepito in modo tale da applicare per passi i carichi desiderati, aggiornando di volta in volta i valori delle deformazioni e delle tensioni.

All'interno di ogni passo di carico il programma perviene all'equilibrio attraverso una serie di iterazioni sfruttando la matrice di rigidità iniziale (metodo di Newton-Raphson modificato). Il controllo della convergenza, al termine della i-esima iterazione viene effettuato attraverso la relazione:

$$\varepsilon_i = \frac{\|P_i\|}{\|\Sigma F\|}$$

dove:

ε_i = errore della i-esima iterazione;

P_i = norma del vettore costituito dalle forze nodali non bilanciate; P_i può essere definito come $\Sigma F - P$, dove P_i è il vettore dei carichi nodali equivalenti al termine della i-esima iterazione (relativo allo stato tensionale ottenuto via legame costitutivo dallo stato deformativo);

ΣF = norma del vettore dei carichi nodali equivalenti relativo al livello finale di carico del passo in esame.

In output sono disponibili, per ogni passo:

- spostamenti in tutti i nodi del sistema;
- stato tensionale in tutti i punti di integrazione;
- sollecitazioni di momento flettente, sforzo normale e taglio negli elementi beam.

Le verifiche geotecniche vengono condotte, se si impiega il codice di calcolo Plaxis, mediante il metodo ϕ -c reduction, che permette la definizione del fattore di sicurezza mediante la progressiva riduzione dei parametri di resistenza, intesi come $\tan\phi$ e c, fino al raggiungimento della condizione di rottura possibile in considerazione delle caratteristiche del sistema geotecnico e dei carichi in gioco.

Nello specifico, Plaxis usa il parametro " ΣMsf " per definire il valore della resistenza del terreno ad un dato stage di calcolo:

$$\Sigma Msf = \frac{\tan \phi_{input}}{\tan \phi_{reduced}} = \frac{c_{input}}{c_{reduced}}$$

dove al numeratore ci sono i parametri di resistenza dei terreni coinvolti (dati in input) mentre al denominatore ci sono i parametri ridotti a seguito di questa analisi. All'inizio del calcolo ΣMsf è impostato pari a 1.0 per assegnare a tutti i materiali coinvolti la loro resistenza effettiva (non ridotta); mentre durante l'analisi il suo valore aumenta progressivamente fino al raggiungimento della rottura.


Il valore di ΣMsf alla rottura coincide, pertanto, con il FS alla stabilità:

$$FS = \frac{\text{available strength}}{\text{strength at failure}} = \text{value of } \Sigma Msf \text{ at failure}$$

dove, adottando un meccanismo di rottura tipo mohr coulomb e indicando con "r" i parametri ridotti, il fattore di sicurezza ottenuto è pari a:

$$FS = \frac{c - \sigma_n \tan \phi}{c_r - \sigma_n \tan \phi_r}$$

Il software, pertanto, abbassa i parametri di resistenza fino al raggiungimento del primo meccanismo di collasso possibile, definendo contestualmente il relativo fattore di sicurezza come sopra descritto.

	Sogliano Ambiente S.p.A. Discarica di rifiuti non pericolosi situata nel Comune di Sogliano al Rubicone (FC) denominata Ginestreto 3 - Progettazione definitiva Relazione di Calcolo	Doc.no. Ara G3 PD RC 03.02	
		Rev. 2	Date: Settembre-22
		Pag. 15 of 69	

4.3. Azione sismica

Per l'azione sismica si è considerata la più gravosa tra quella definita dalla Risposta Sismica Locale riportata nel relativo documento (Doc. 5) e quella determinata mediante la definizione da NTC.

Come trattato ampiamente nella relazione sismica, considerando i seguenti parametri per la definizione dell'azione sismica allo SLV nella condizione di operatività dell'argine di valle (abbancamento completo):

- coordinate ED50: Longitudine 12.33194, Latitudine 43.97136);
- vita nominale (vn) pari a 100 anni;
- classe d'uso III, quindi coefficiente d'uso (cu) pari a 1.5;
- categoria di sottosuolo di tipo B, impiegabile, secondo quanto indicato nella relazione geologica (Doc. 2), nell'ipotesi di completa asportazione dei sedimenti di copertura e della parte alterata del substrato; prescrizione che risulta alla base del progetto;
- categoria topografica di tipo T2;

si ottengono i seguenti parametri sismici:

- $ag/g=0.263$
- $ST=1.2$
- $SS=1.138$ per categoria B

pertanto a_{max}/g risulta essere 0.359.

L'analisi di risposta sismica locale ha fornito, invece, un valore di a_{max} allo SLV pari a $0.257 < 0.263$ di cui sopra. Pertanto per le analisi si considererà, cautelativamente, il valore calcolato secondo le NTC.

In tale ipotesi si è calcolata l'azione sismica nella configurazione a scavi aperti e di discarica non approntata considerando una vita nominale (vn) pari a 50 anni ed un coefficiente d'usi pari ad 1, ottenendo i seguenti parametri:

- $ag/g=0.181$
- $ST=1.2$
- $SS=1.2$

pertanto a_{max}/g risulta essere 0.260.

I coefficienti sismici adottati nelle verifiche di stabilità eseguite con il metodo pseudo-statico sono i seguenti:

$$k_h = a_{max}/g \cdot \beta$$

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

Pertanto, tenendo conto del coefficiente di riduzione dell'accelerazione massima attesa al sito $\beta=0.38$ (vedasi par. 7.11.4 delle NTC), i coefficienti sismici sono i seguenti:


Discarica completamente approntata

$$k_h = 0.359$$

$$k_v = \pm 0.068$$

Scavi aperti e discarica vuota:

$$k_h = 0.260$$

	Sogliano Ambiente S.p.A. Discarica di rifiuti non pericolosi situata nel Comune di Sogliano al Rubicone (FC) denominata Ginestreto 3 - Progettazione definitiva Relazione di Calcolo	Doc.no. Ara G3 PD RC 03.02	
		Rev. 2	Date: Settembre-22
		Pag. 16 of 69	

$$k_v = \pm 0.049$$

4.4. Modello geotecnico e Relazioni Costitutive

Il modello geotecnico considerato è quello indicato al paragrafo 5.1 per ciascuna sezione calcolata e riportato a titolo rappresentativo in Figura 3-3.

Come evidenziato nelle relazioni geologica e geotecnica, non è stato individuato alcun livello di falda. Pertanto non se ne è tenuto conto nel corso delle modellazioni.

Nei paragrafi che seguono si descrivono i modelli reologici impiegati per i vari materiali considerati nelle analisi. I parametri assegnati a ciascun materiale, sia esso terreno o di tipo strutturale, derivano da specifiche prove in sito o in laboratorio eseguite per la caratterizzazione.

4.4.1 Terreni

Al fine di ottimizzare i calcoli, sono stati impiegati diversi modelli reologici, per le medesime unità geotecniche, in funzione del tipo di analisi eseguita.

Nel caso delle verifiche geotecniche, il modello reologico impiegato è stato il Mohr Coulomb, in primis perché i dati necessari per la valutazione di superfici di scorrimento e del relativo fattore di sicurezza sono i soli parametri di resistenza del terreno, in secondo luogo perché il software STAP utilizza solo questo modello costitutivo.

Per l'analisi dei cedimenti si è, invece, impiegato il modello costitutivo di tipo Hardening Soil e l'Hardening Soil small strain che descrivono in modo esaustivo il comportamento meccanico dei terreni, tenendo conto di aspetti quali la diversa risposta per percorsi tensionali di primo carico e di scarico-ricarico e delle condizioni dinamiche.

In talune analisi, per elementi modellati a rappresentare un peso, si è utilizzato il modello costitutivo di tipo Lineare Elastico, che considera un comportamento completamente in campo elastico e definisce una relazione sforzo-deformazione legata alle sole caratteristiche di rigidità individuabili nel modulo elastico e coefficiente di Poisson.

Il modello elastoplastico di tipo **Mohr Coulomb** esprime la deformabilità alla stregua del modello lineare elastico, ma considera la possibilità di plasticizzazione del materiale, definendo la resistenza dello stesso materiale i parametri coesione (c') e angolo di resistenza al taglio (ϕ'). L'involuppo di rottura considerato è indicato nelle immagini che seguono.

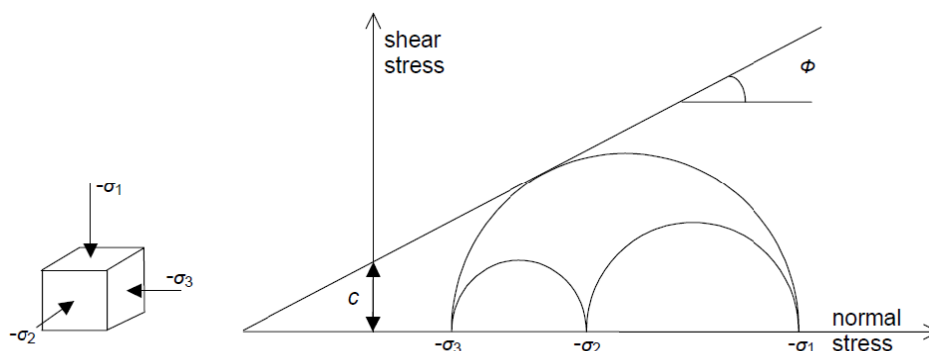


Figura 4-1 Circoli di Mohr: configurazione al limite plastico.

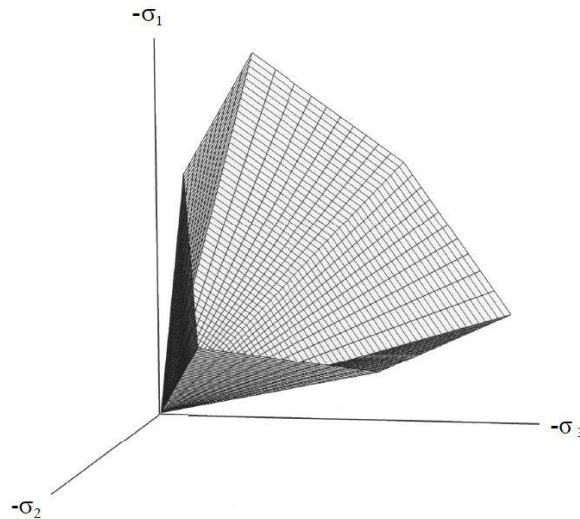


Figura 4-2 Superficie di rottura alla Mohr-Coulomb nello spazio delle tensioni principali (c=0).

L'**Hardening Soil Small Strain** è un modello reologico in grado di descrivere in modo esaustivo il comportamento meccanico dei terreni, tenendo conto di aspetti quali la diversa risposta per percorsi tensionali di primo carico e di scarico-ricarico. L'andamento del diagramma tensioni-deformazioni è di tipo iperbolico elastoplastico. Inoltre, questo modello incorpora moduli di rigidezza dipendenti dallo stato tensionale.

I parametri richiesti da questo tipo di modello costitutivo sono i seguenti:

- E50Ref: modulo di rigidezza secante (al 50% della rottura) alla pressione di riferimento;
- EurRef: modulo di rigidezza nel ramo di carico/scarico alla pressione di riferimento;
- EoedRef: modulo di rigidezza edometrico alla pressione di riferimento;
- m: coefficiente esponenziale che regola la dipendenza dallo stato tensionale dei parametri di rigidezza sopra elencati;
- p_{ref} = è la pressione di riferimento che è stata assunta pari a 100kpa.

A partire da questi parametri, i moduli di rigidezza Eoed, E50 e Eur vengono calcolati in funzione dello stato tensionale mediante le seguenti espressioni.

$$E_{oed} = E_{oed}^{Ref} \left[\frac{(c' \cos \phi' - \sigma'_3 / k_0 \sin \phi')}{(c' \cos \phi' + p_{ref} \sin \phi')} \right]^m$$

$$E_{50} = E_{50}^{Ref} \left[\frac{(c' \cos \phi' - \sigma'_3 \sin \phi')}{(c' \cos \phi' + p_{ref} \sin \phi')} \right]^m$$

$$E_{ur} = E_{ur}^{Ref} \left[\frac{(c' \cos \phi' - \sigma'_3 \sin \phi')}{(c' \cos \phi' + p_{ref} \sin \phi')} \right]^m$$

Dove σ'_3 è la pressione minima agente nel mezzo.

I grafici sottostanti indicano il significato dei vari parametri del modello:

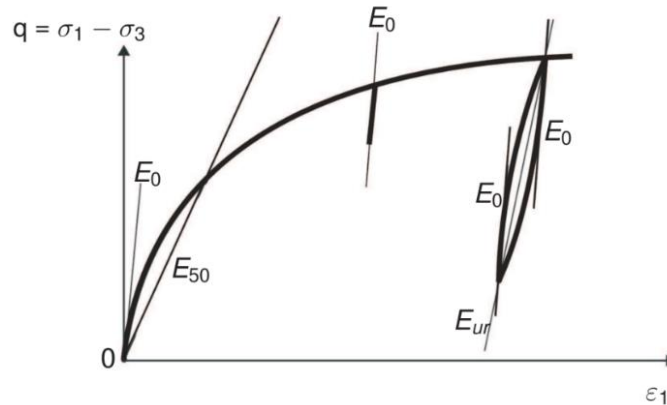


Figura 4-3 - Parametri di rigidezza E_{50} , E_{ur} e $E_0 = 2G_0(1+\nu_{ur})$ del modello HSsmall relativi alla prova triassiale

Il modello Hardening Soil assume un comportamento del materiale di tipo elastico durante i cicli di carico e scarico. Tuttavia, l'intervallo di deformazione in cui il terreno può essere considerato veramente elastico, vale a dire in cui la deformazione si recupera quasi completamente, è molto piccolo. Con l'aumento dell'ampiezza della deformazione, la rigidezza del terreno decade con andamento non lineare.

Il modello costitutivo **Hardening Soil Small Strain**, completa la descrizione del comportamento deformativo del terreno, tenendo conto anche di quest'ultimo aspetto, cioè della dipendenza non lineare della rigidezza del terreno dall'ampiezza di deformazione raggiunta.

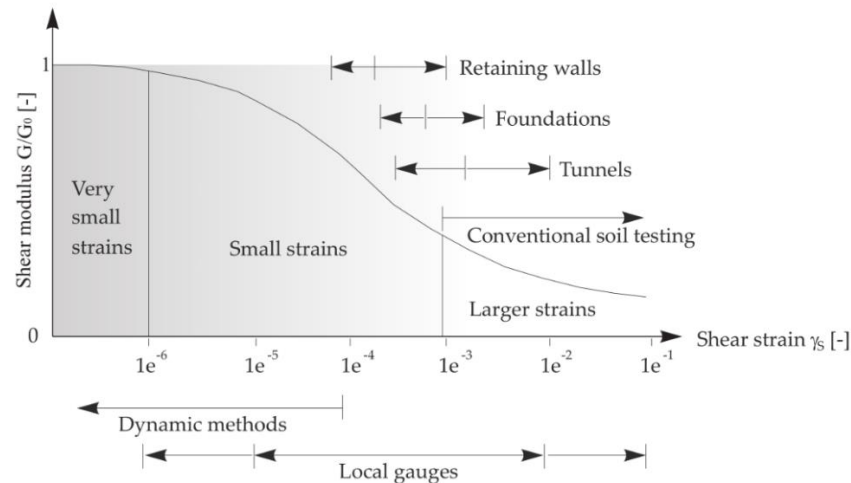


Figura 4-4 - Rigidezza caratteristica-comportamento deformativo del terreno con range di deformazione tipici per prove di laboratorio e per strutture (Atkinson & Stallfors 1991)

Per farlo, considera una riduzione del modulo G in funzione dell'entità delle deformazioni a taglio raggiunte, descrivendo una curva di decadimento come quelle individuate nelle figure seguenti. Tale curva viene implementata nel programma di calcolo mediante l'inserimento del parametro $\gamma_{0.7}$, che è la deformazione a taglio in corrispondenza della quale G si riduce al 70% del suo valore iniziale (G_0).

Raggiunto un valore limite (cut-off) di deformazione a taglio, G resta costante e pari a tale valore (G_{ur}).

Un parametro di input, pertanto, oltre a $\gamma_{0.7}$ è anche la rigidezza al taglio a piccole deformazioni ($\epsilon < 10^{-6}$) G_{0ref} , il cui andamento in funzione dello stato tensionale è descritto dalla seguente espressione:

$$G_0 = G_{0Ref} \left[\frac{(c' \cos \phi' - \sigma'_3 \sin \phi')}{(c' \cos \phi' + p_{ref} \sin \phi')} \right]^m$$

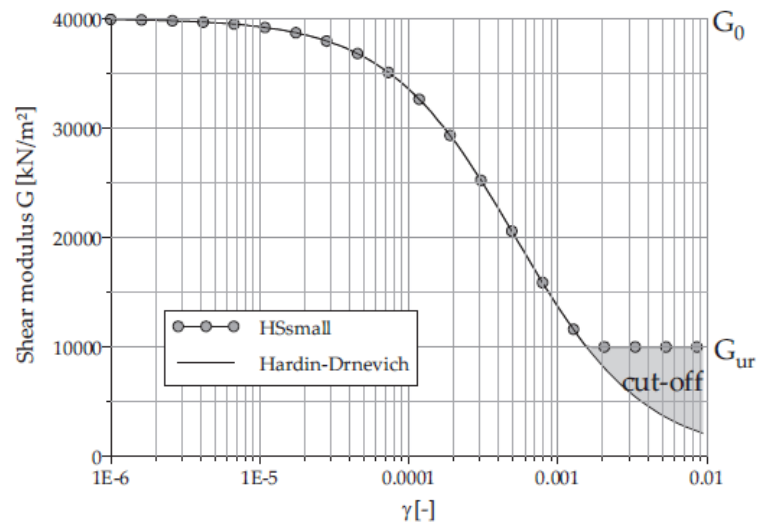


Figura 4-5 - Cut-off della curva di decadimento secondo l'HS Small Strain


4.4.2 Elementi strutturali

Il terracalce è stato simulato mediante un elemento di volume, impiegando il modello costitutivo di tipo Mohr Coulomb considerato rappresentativo del suo comportamento.

Il geocomposito costituente il pacchetto di fondo della discarica è stato modellato mediante un elemento appositamente messo a disposizione da plaxis, denominato geogrid, che si impiega per simulare elementi snelli con una rigidezza solo assiale e che può resistere solo a trazione e non a compressione.

Nel caso in questione è stato considerato, per la geogrid, un comportamento elasto-plastico, che permette di considerare una deformazione elastica in accordo alla rigidezza EA della geomembrana fino al raggiungimento della sua resistenza a trazione N_p , oltre la quale avverranno delle deformazioni plastiche.

Il pacchetto di fondo della discarica costituito, tra le altre cose, dal geocomposito e dal geosintetico interagisce con il sottofondo mediante l'attrito che si genera tra gli elementi e tra gli elementi e il terreno. Tale attrito viene modellato mediante l'inserimento di elementi di interfaccia i cui parametri sono derivanti da test eseguiti sul campo.

	Sogliano Ambiente S.p.A. Discarica di rifiuti non pericolosi situata nel Comune di Sogliano al Rubicone (FC) denominata Ginestreto 3 - Progettazione definitiva Relazione di Calcolo	Doc.no. Ara G3 PD RC 03.02	
		Rev. 2	Date: Settembre-22
		Pag. 20 of 69	

5. Verifiche di stabilità

Di seguito si riportano le verifiche di stabilità globale della discarica nella sua configurazione finale e nelle fasi a scavi aperti, nonché della strada di accesso alla discarica.

Relativamente al corpo discarica, le analisi di stabilità sono state eseguite con il software di calcolo Plaxis per la sezione longitudinale (sezione F), in quanto la medesima è stata impiegata anche per le successive verifiche sui cedimenti e sugli elementi costituenti l'argine di valle e con lo STAP per le altre sezioni.

Le verifiche di stabilità globale sono state condotte lungo le seguenti sezioni critiche (Figura 5-1 - Figura 5-7):

- Sezione frontale (sezione F): nella quale si è eseguita l'analisi in configurazione a scavi aperti (configurazione senza l'argine realizzato), discarica vuota e configurazione finale;
- Sezione laterale (sezione 11): nella quale si è eseguita l'analisi in configurazione finale;
- Sezione 3: nella quale si è eseguita l'analisi in configurazione a scavi aperti;
- Sezione 4: nella quale si è eseguita l'analisi in configurazione a scavi aperti.

Relativamente alla strada di accesso alla discarica si è analizzata la seguente sezione ritenuta rappresentativa nella sua unica configurazione che è quella finale.

Si fa presente che relativamente alla condizione a scavi aperti si è assunta la presenza di un ammasso isotropo, quindi le condizioni di stabilità sono state valutate, nel complesso, all'equilibrio limite con maglia dei cerchi (metodo di Bishop). Non sono stati considerati cinematismi controllati da discontinuità dell'ammasso (cunei e scivolamenti planari). Qualora durante gli scavi si evidenziassero tali condizioni saranno da prevedersi adeguati consolidamenti a seguito delle opportune verifiche.

Tutte le sezioni sono state analizzate in condizioni statiche e sismiche.

Come indicato al paragrafo 4.3, l'input sismico si differenzia in condizioni di configurazione a scavi aperti e discarica vuota rispetto alla configurazione finale di completo abbancamento. Nel primo caso si considera una vita nominale di 50 anni con un coefficiente d'uso pari a 1; nel secondo caso si considera una vita nominale di 100 anni con un coefficiente d'uso pari a 1.5.

Le verifiche di stabilità sono state condotte allo Stato Limite Ultimo (SLU) sia in fase statica che in fase sismica, in accordo ai criteri di verifica delle NTC 2018 illustrati al paragrafo 4.1.

5.1. Sezioni di verifica

Le sezioni di verifica considerate, con indicazione dei litotipi coinvolti, sono riportate nelle figure seguenti:

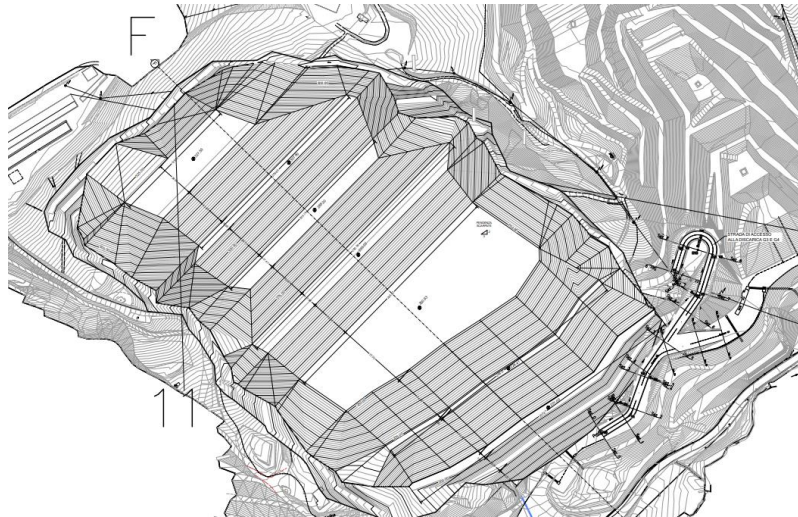


Figura 5-1 Planimetria di progetto con indicazione delle sezioni di verifica in configurazione finale

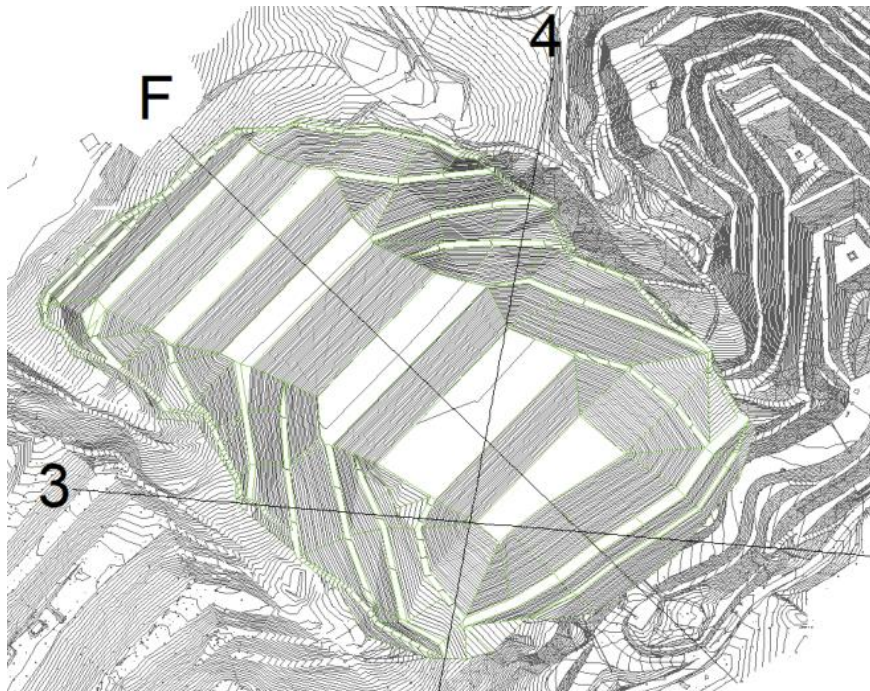


Figura 5-2 Planimetria di fondo discarica con indicazione delle sezioni di verifica in configurazione a scavi aperti/discardica vuota

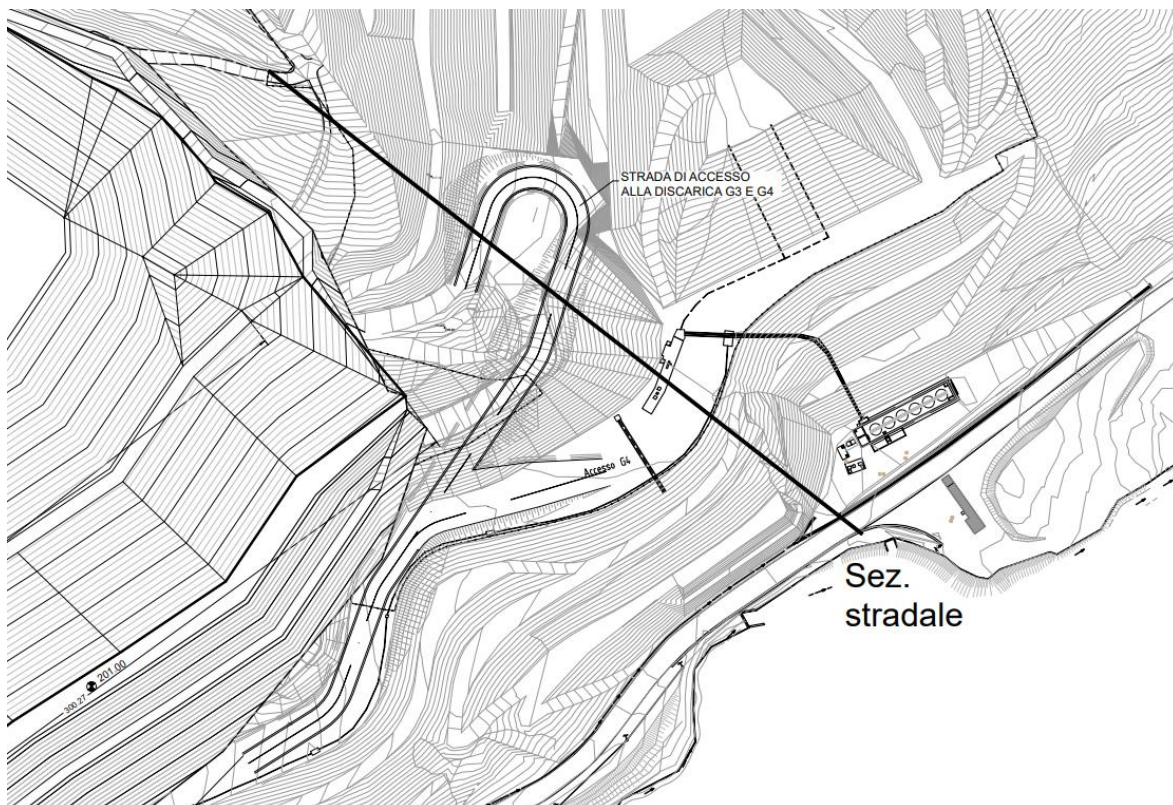


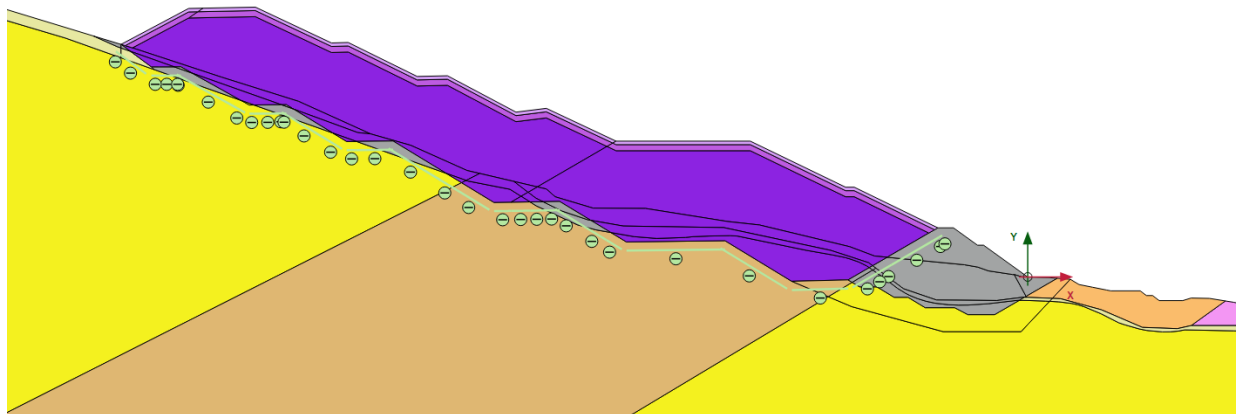
Figura 5-3 Planimetria della strada con indicazione della relativa sezione di verifica

Nelle immagini che seguono si riportano le sezioni di verifica con indicazione delle unità geotecniche coinvolte. In particolare in Figura 5-4 si riporta la sezione eseguita con plaxis, mentre in Figura -5.4 – Figura 5.6 si riportano le sezioni eseguite con lo STAP.

Si noti che all'interno del modello plaxis si è inserito l'interfaccia che simula l'elemento di impermeabilizzazione composto dall'accoppiamento del geocomposito bentonitico con la guaina HDPE. Tale elemento, come si evidenzierà nei risultati delle analisi, non incide sul cinematismo della stabilità globale, pertanto non è stato considerato ai fini delle verifiche eseguite con lo STAP.

Allo stesso modo nella sezione con Plaxis è stato impiegato un maggior grado di dettaglio, legato alla natura del software che richiede l'esecuzione del calcolo per step, considerando pertanto anche le condizioni litostatiche antecedenti la realizzazione dell'opera, quindi la presenza delle unità geotecniche che verranno rimosse in fase di esecuzione dei lavori e quindi non presenti nelle configurazioni di verifica.

Nelle verifiche con lo STAP che coinvolgono le maggiori pendenze del fronte di abbancamento del rifiuto (sezione 11), invece, si è eseguita l'analisi considerando l'elemento di copertura della discarica costituito dal capping.



Terreno

- RAi
- RAa
- RPi
- RPa
- DetRip
- DepFr
- Ril

Intervento

- Terra Calce
- Interfaccia

Rifiuto

- Rifiuto con $\sigma_v < 20\text{kPa}$
- Rifiuto con $20 < \sigma_v < 60\text{kPa}$
- Rifiuto con $\sigma_v > 60\text{kPa}$

Figura 5-4 Sezione frontale (Sezione F) – Sezione Plaxis

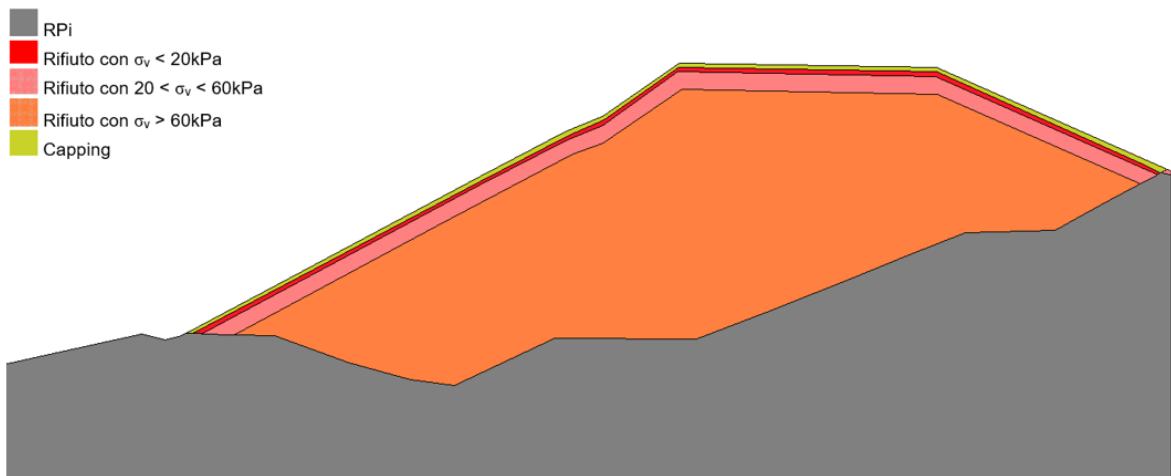


Figura 5-5 Sezione laterale (Sezione 11) – Configurazione finale



Sogliano Ambiente S.p.A.

Discarica di rifiuti non pericolosi situata nel Comune di Sogliano al Rubicone (FC) denominata Ginestreto 3
- Progettazione definitiva
Relazione di Calcolo

Doc.no.

Ara G3 PD RC 03.02

Rev. 2

Date: Settembre-22

Pag. 24 of 69



Figura 5-6 Sezione 3 – Configurazione a scavi aperti

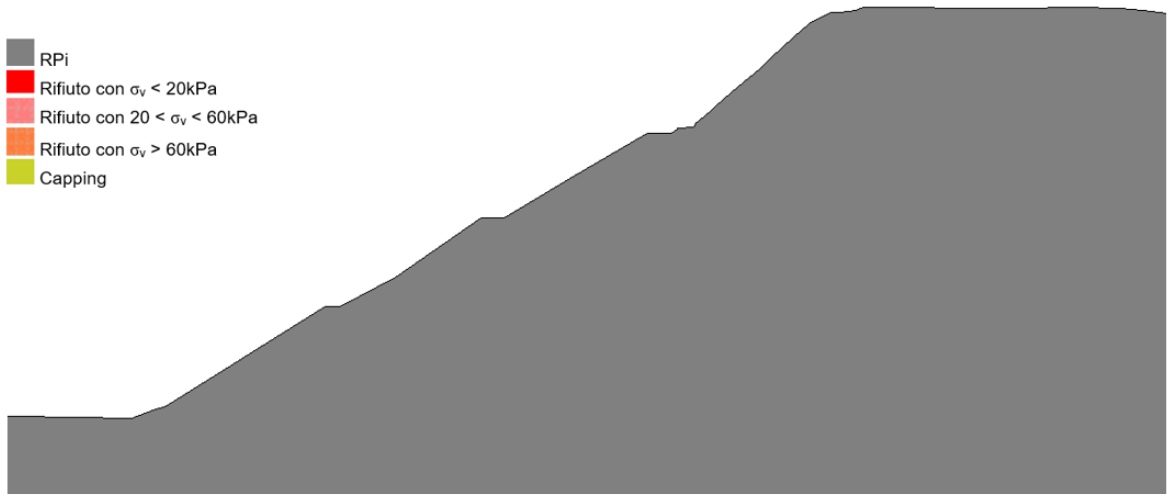


Figura 5-7 Sezione 4 – Configurazione a scavi aperti

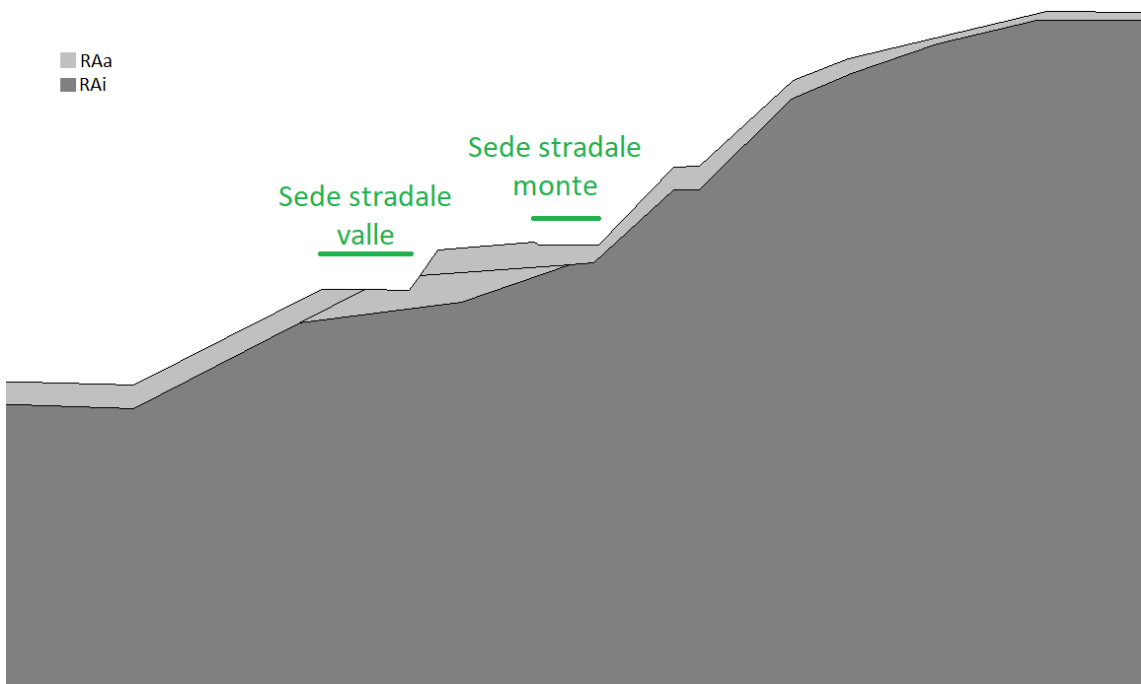



Figura 5-8 Sezione Strada di accesso alla discarica

	Sogliano Ambiente S.p.A.	Doc.no. Ara G3 PD RC 03.02	
	Discarica di rifiuti non pericolosi situata nel Comune di Sogliano al Rubicone (FC) denominata Ginestreto 3 - Progettazione definitiva	Rev. 2	Date: Settembre-22
	Relazione di Calcolo	Pag. 25 of 69	

5.2. Parametri impiegati

I parametri impiegati sono riportati nelle tabelle che seguono.

Dato lo scopo dell'analisi, l'interazione l'elemento di impermeabilizzazione e sistema scarica è stata modellata mediante l'inserimento di un'unica interfaccia che simuli la trasmissione dei carichi al sottofondo mediante le caratteristiche di attrito (φ) e adesione (c) tra i materiali a contatto; tali grandezze sono state definite sperimentalmente. Nello specifico, si sono considerati dei parametri medi che considerino la sovrapposizione degli effetti legati all'interazione tra geocomposito e sottosuolo e tra geocomposito e la parte sovrastante (la geogriglia). I parametri considerati sono pari a: $\varphi=21^\circ$ e $c=0\text{kPa}$.

Per la caratterizzazione del rifiuto, invece, si sono prese a riferimento le considerazioni fatte nella progettazione della discarica G4 (Doc. 9) che hanno seguito valutazioni accurate facendo riferimento a quanto indicato in letteratura.

Inoltre, per i parametri del capping si è fatto riferimento a quanto impiegato in sede di progetto della discarica G2 (vedasi Doc. 12).

Tabella 5-1 Tabella riassuntiva parametri dei litotipi RP e RA intatti e alterati – Mohr Coulomb

		R-A	R-A_alt	R-P	R-P_Alt
γ	kN/m^3	20.70	20.50	20.70	20.50
E'_{ref}	kN/m^2	60.00E3	30.00E3	60.00E3	30.00E3
ν (nu)		0.2400	0.3000	0.2400	0.3000
c	kN/m^2	110.0	50.0	110.0	50.0
φ	$^\circ$	24	21	24	21

Tabella 5-2 Tabella riassuntiva parametri dei terreni superficiali – Mohr Coulomb

		T-dt	T-depFr	S-TerraBattuta
γ	kN/m^3	19.70	19.70	21.00
E'_{ref}	kN/m^2	2804	2804	11140
E_{od}	kN/m^2	4500	4500	15000
ν (nu)		0.3500	0.3500	0.3
c	kN/m^2	5	5	5
φ	$^\circ$	24	24	34

Tabella 5-3 Tabella riassuntiva parametri del rifiuto e terra calce – Mohr Coulomb

		Rifiuto - 20kPa	Rifiuto - 20-60kPa	Rifiuto - 60kPa	S-TerraCalce	Capping
γ	kN/m^3	11	11	11	21.00	20.2
E'_{ref}	kN/m^2	1500	1500	1500	50.00E3	-
ν (nu)		0.33	0.33	0.33	0.3500	-
c	kN/m^2	22	5	20	109	15
φ	$^\circ$	0	38	30	36	26

Cautelativamente, nelle modellazioni al continuo, per lo strato intatto si sono usati valori di coesione drenata pari a 100kPa.

5.3. Sezione Longitudinale (Sezione F)

Tale analisi è stata eseguita in plaxis con la sezione indicata al paragrafo 5.1.

Le fasi di calcolo implementate sono le seguenti:

- Fase geostatica: nella quale il programma di calcolo prende in carico il terreno dato in input e ne definisce le condizioni litostatiche iniziali. Tale fase viene calcolata in due fasi distinte e successive. Con la prima "Initial Phase" il programma calcola automaticamente le tensioni sulla base del peso specifico del terreno e relativa profondità considerata. Con la seconda fase "Geostatica", si fa eseguire nuovamente l'analisi per correggere eventuali errori commessi con il primo calcolo.
- Scavo: realizzazione dello scavo fino al raggiungimento la quota di imposta della discarica;
- Consolidamenti: realizzazione dell'argine di valle ed eventuale riprofilatura del profilo di scavo con terreno trattato a calce;
 - a. Verifica di stabilità a discarica vuota in condizione statica e sismica;
- Riempimento della discarica: riempimento della discarica e attivazione dell'elemento di interfaccia;
 - b. Verifica di stabilità a discarica piena in condizione statica e sismica.

Nelle immagini seguenti si illustrano le fasi implementate.

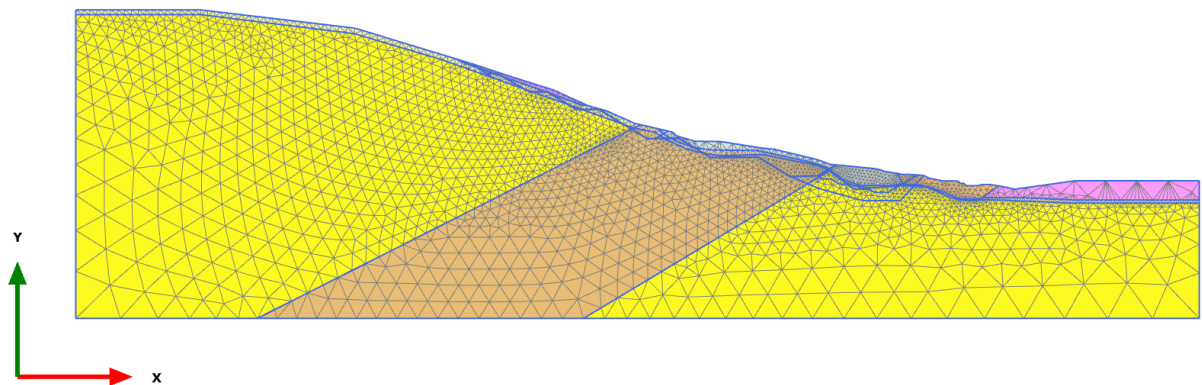


Figura 5-9 Fase Geostatica

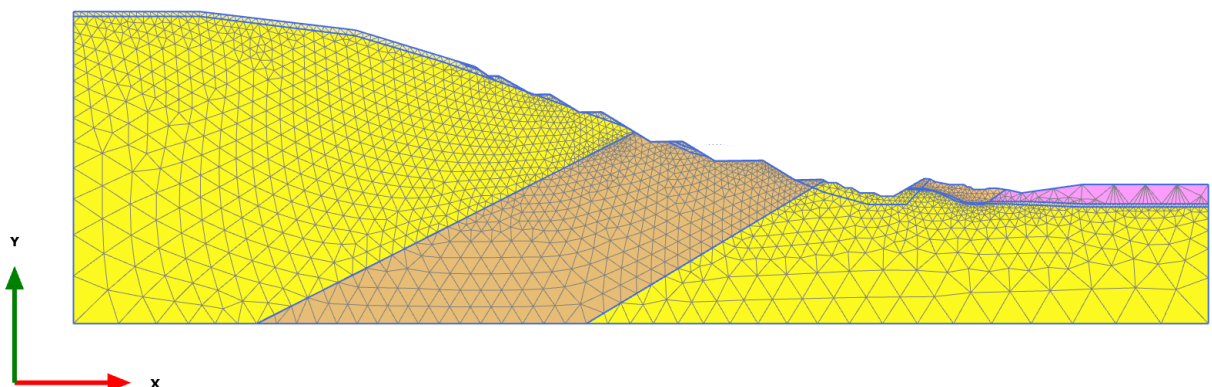


Figura 5-10 Fase Scavo

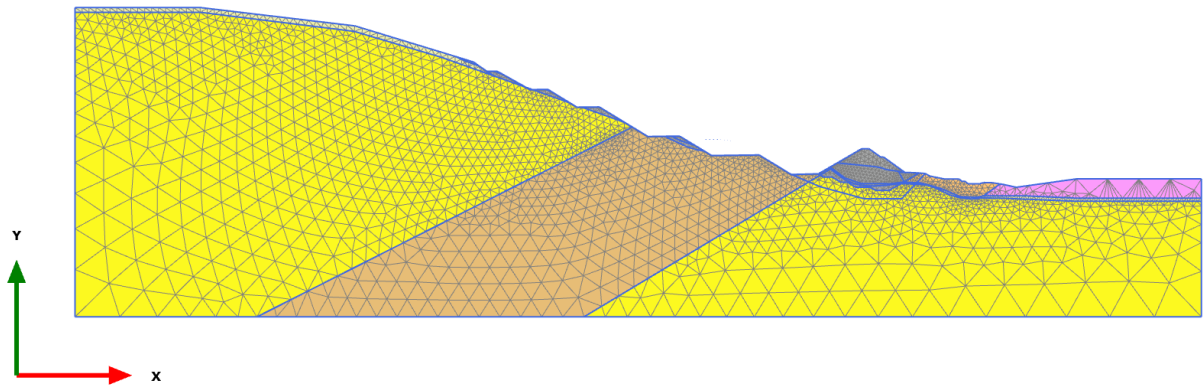


Figura 5-11 Fase Consolidamenti e verifiche di stabilità a discarica vuota

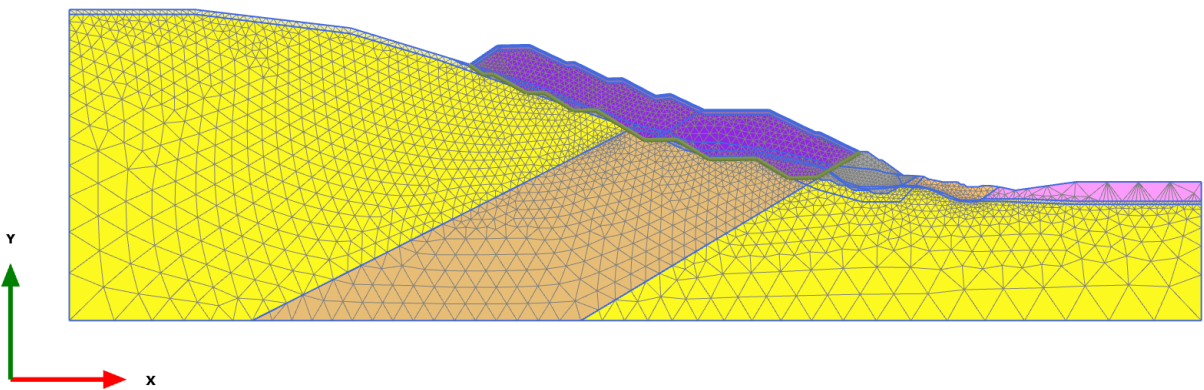



Figura 5-12 Fase Riempimento discarica e verifiche di stabilità a discarica piena

	Sogliano Ambiente S.p.A. Discarica di rifiuti non pericolosi situata nel Comune di Sogliano al Rubicone (FC) denominata Ginestreto 3 - Progettazione definitiva Relazione di Calcolo	Doc.no. Ara G3 PD RC 03.02	
		Rev. 2	Date: Settembre-22
		Pag. 28 of 69	

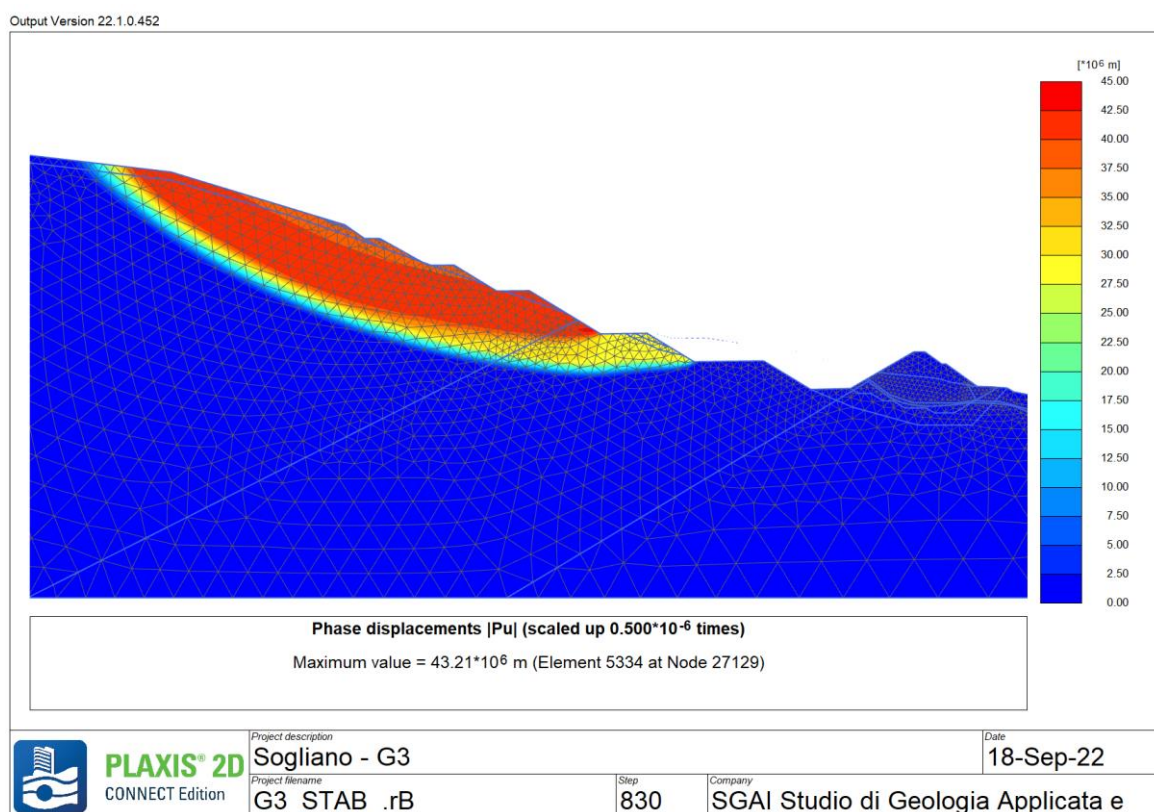
5.3.1 Risultati delle analisi

Le immagini seguenti mostrano il risultato dei calcoli di stabilità ed il meccanismo di rottura per le analisi eseguite alle varie configurazioni, in condizione statica e sismica.

Si specifica che relativamente alla verifica sismica, si è eseguito il calcolo considerando le coppie $\pm k_h \pm k_v$; nel seguito si riporta il meccanismo di rottura che ha individuato il fattore di sicurezza inferiore.

5.3.1.1 Configurazione discarica vuota

Condizione statica – FS = 1.366



Calculation information

+ Step info				
+ Design approach				
- Multipliers				
Soil weight			ΣM_{Weight}	1.000
Strength reduction factor	M_{sf}	-0.02848E-3	ΣM_{sf}	1.366
Time	Increment	0.000	End time	0.000

Figura 5-13 Superficie di stabilità a discarica vuota - Statica



Sogliano Ambiente S.p.A.

Discarica di rifiuti non pericolosi situata nel Comune di Sogliano al Rubicone (FC) denominata Ginestreto 3
- Progettazione definitiva
Relazione di Calcolo

Doc.no.

Ara G3 PD RC 03.02

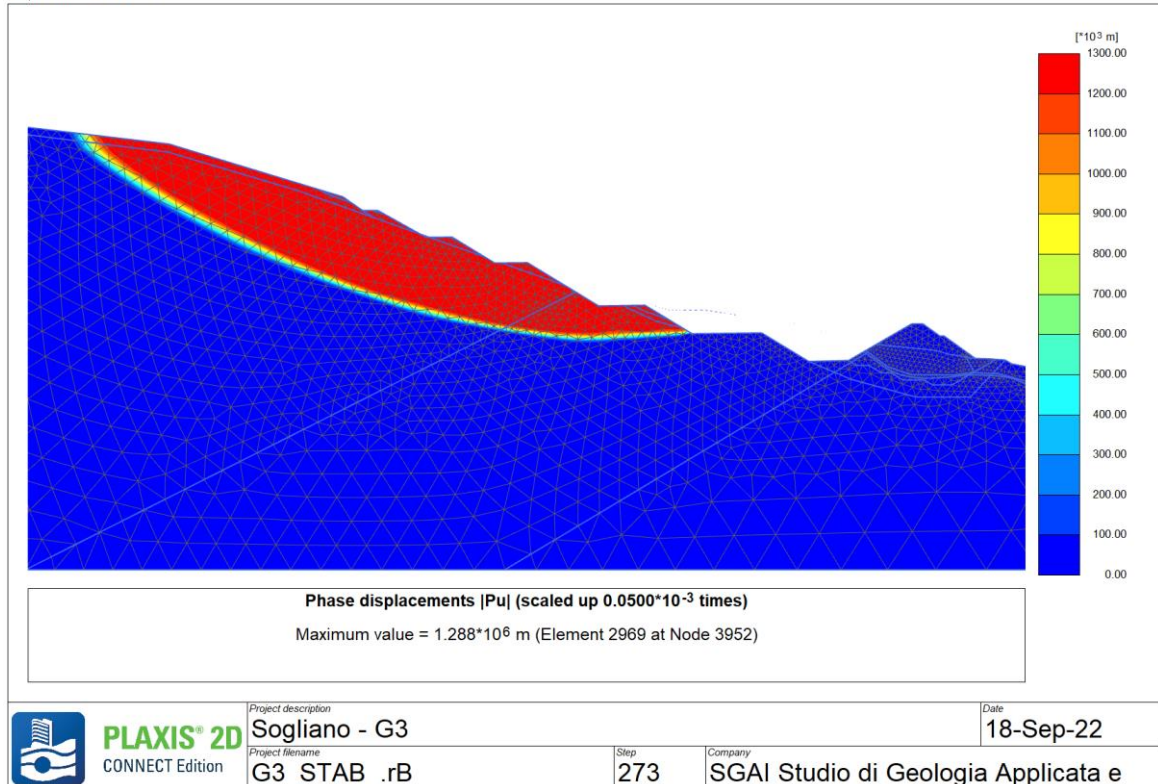
Rev. 2

Date: Settembre-22

Pag. 29 of 69

Condizione sismica - $F_s=1.252$


Output Version 22.1.0.452



Calculation information

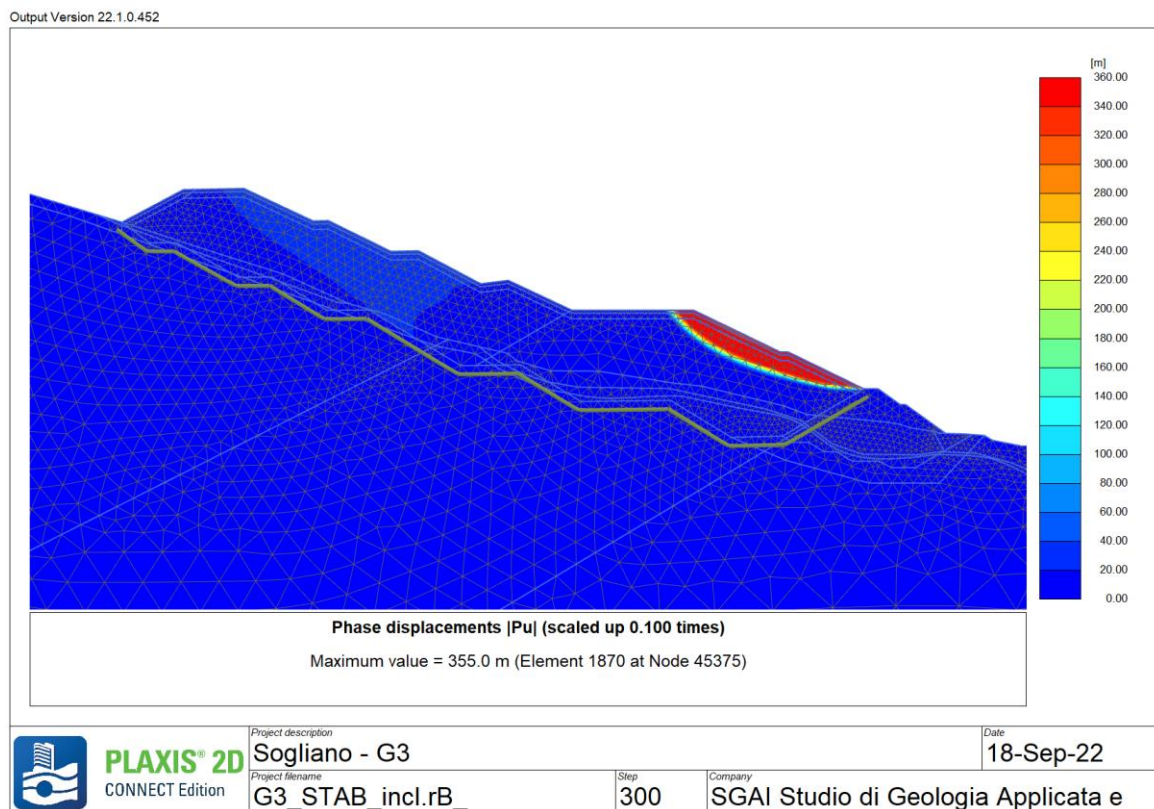
Step info				
Design approach				
Multipliers				
Soil weight			ΣM_{Weight}	1.000
Strength reduction factor	M_{sf}	0.4889E-3	ΣM_{sf}	1.252
Time	Increment	0.000	End time	0.000

Figura 5-14 Superficie di stabilità a scavi aperti e fattore di sicurezza - Sismica

	Sogliano Ambiente S.p.A. Discarica di rifiuti non pericolosi situata nel Comune di Sogliano al Rubicone (FC) denominata Ginestreto 3 - Progettazione definitiva Relazione di Calcolo	Doc.no. Ara G3 PD RC 03.02	
		Rev. 2	Date: Settembre-22
		Pag. 30 of 69	

5.3.1.2 Configurazione discarica piena

Condizione statica - $F_s=1.425$



Calculation information

+ Step info			
+ Design approach			
- Multipliers			
Soil weight			ΣM_{Weight} 1.000
Strength reduction factor	M_{sf}	0.4014E-3	ΣM_{sf} 1.425
Time	Increment	0.000	End time 0.000

Figura 5-15 Superficie di stabilità a discarica piena - Statica



Sogliano Ambiente S.p.A.

Discarica di rifiuti non pericolosi situata nel Comune di Sogliano al Rubicone (FC) denominata Ginestreto 3
- Progettazione definitiva
Relazione di Calcolo

Doc.no.

Ara G3 PD RC 03.02

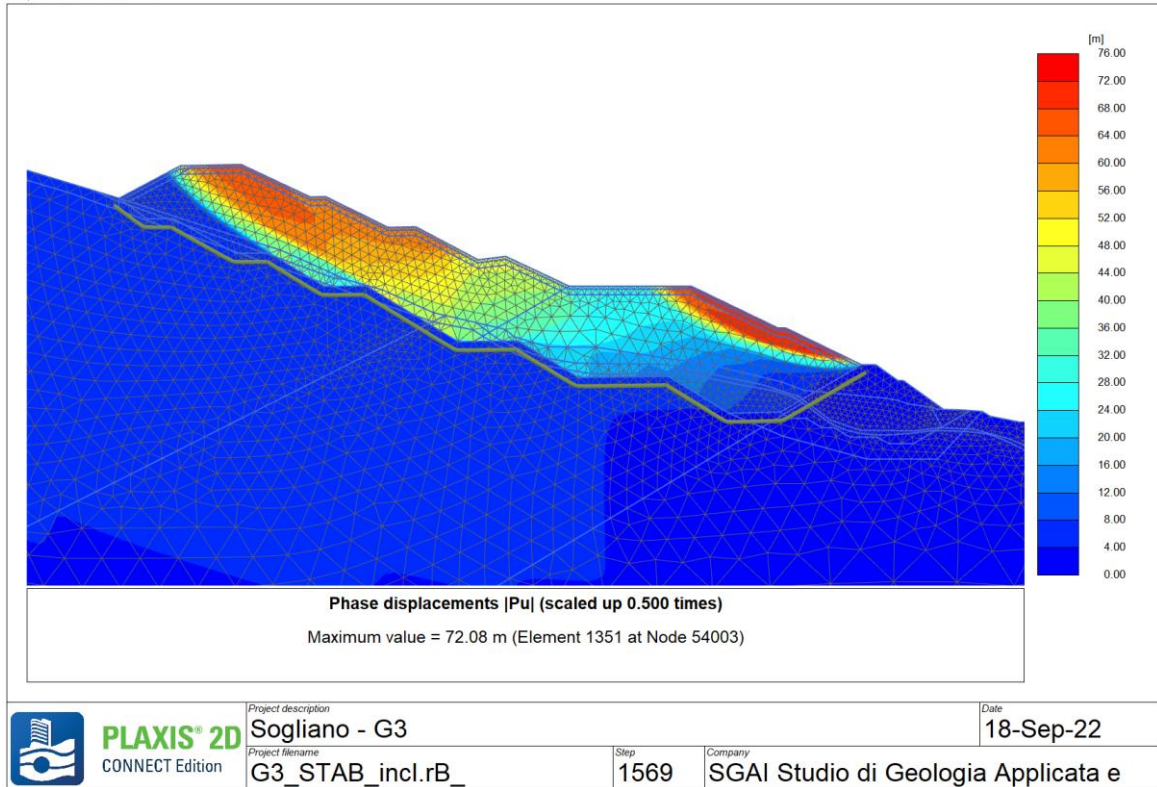
Rev. 2

Date: Settembre-22

Pag. 31 of 69

Condizione sismica - $F_s=1.259$

Output Version 22.1.0.452



Calculation information

Step info				
Design approach				
Multipliers				
Soil weight			ΣM_{Weight}	1.000
Strength reduction factor	M_{sf}	5.000E-3	ΣM_{sf}	1.259
Time	Increment	0.000	End time	0.000

Figura 5-16 Superficie di stabilità a discarica piena - Sismica

5.4. Sezione Laterale (sezione 11) e verifica del capping

Nelle figure seguenti si riportano le superfici critiche di scivolamento e il rispettivo fattore di sicurezza in condizione statica e sismica.

Questa sezione rappresenta quella di massima pendenza del rifiuto. Avendo considerato il capping nelle analisi ed essendo stata individuata la superficie di scivolamento più approfondita, si può ritenere eseguita anche la verifica locale del capping.

Condizione statica - $F_s=1.28$

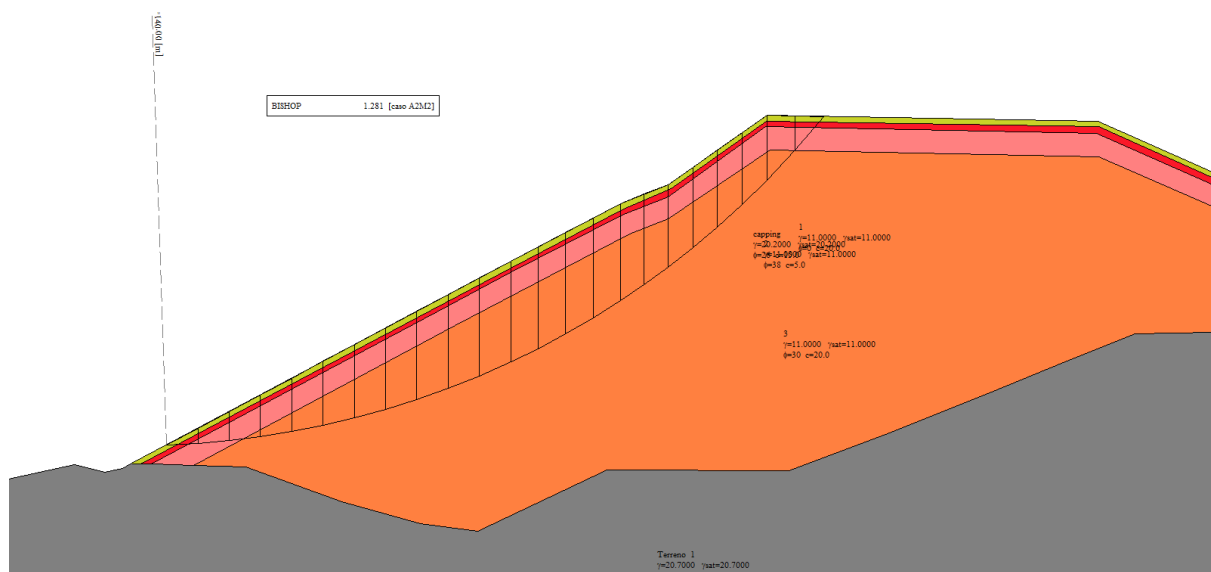


Figura 5-17 Superficie di stabilità a discarica piena - Statica

Condizione sismica - $F_s=1.2$

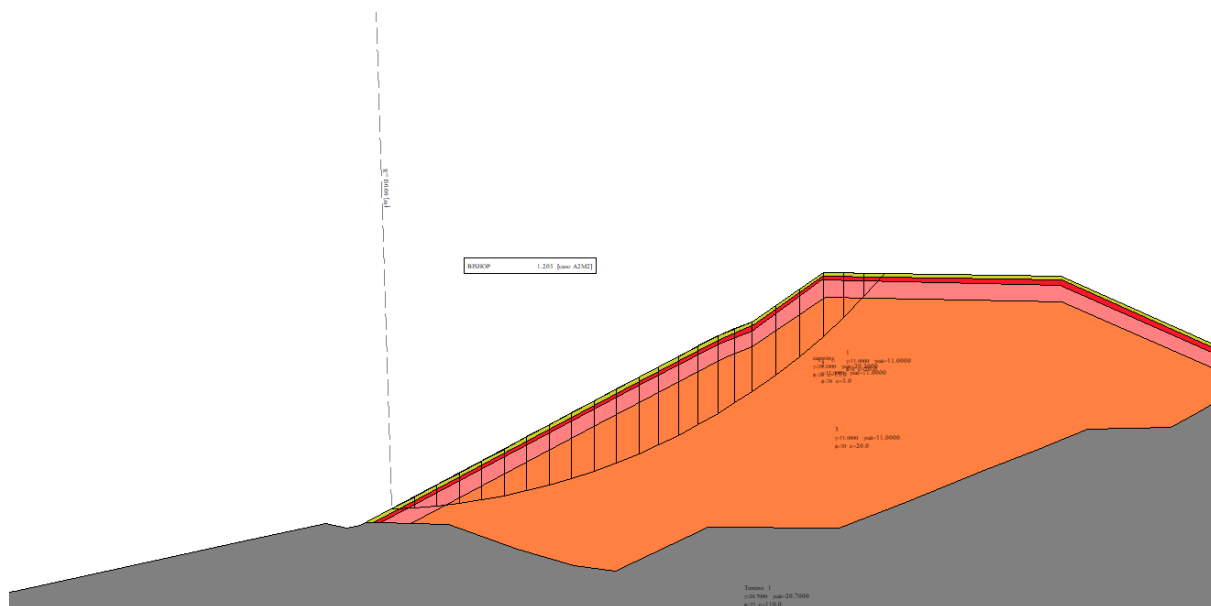


Figura 5-18 Superficie di stabilità a discarica piena - Sismica

5.5. Sezione 3

Nelle figure seguenti si riportano le superfici critiche di scivolamento e il rispettivo fattore di sicurezza in condizione statica e sismica.

Condizione statica - $F_s=1.52$

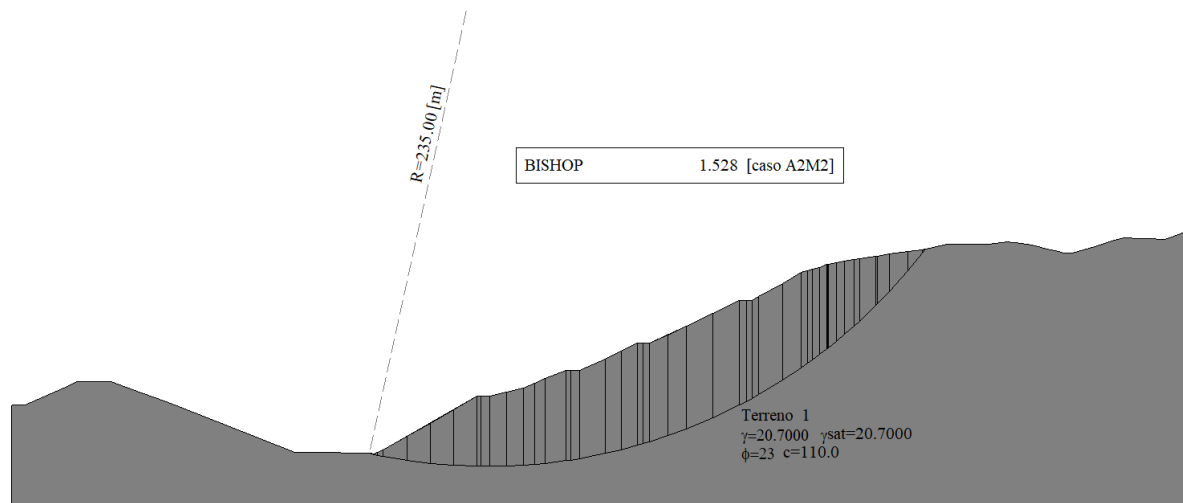


Figura 5-19 Superficie di stabilità a scavi aperti - Statica

Condizione sismica - $F_s=1.47$

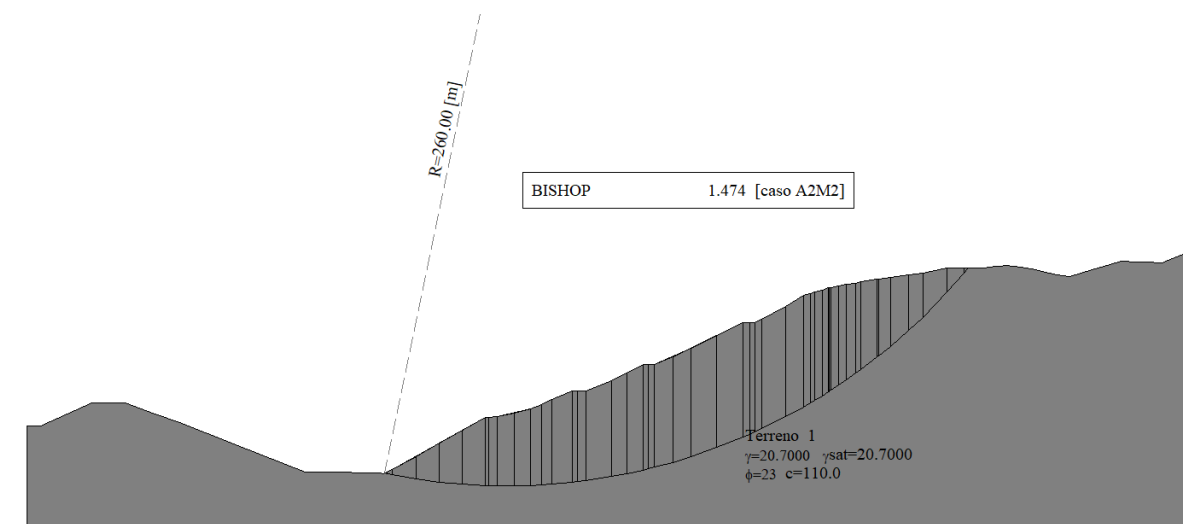


Figura 5-20 Superficie di stabilità a scavi aperti - Sismica

5.6. Sezione 4

Nelle figure seguenti si riportano le superfici critiche di scivolamento e il rispettivo fattore di sicurezza in condizione statica e sismica.

Condizione statica - $F_s=1.20$

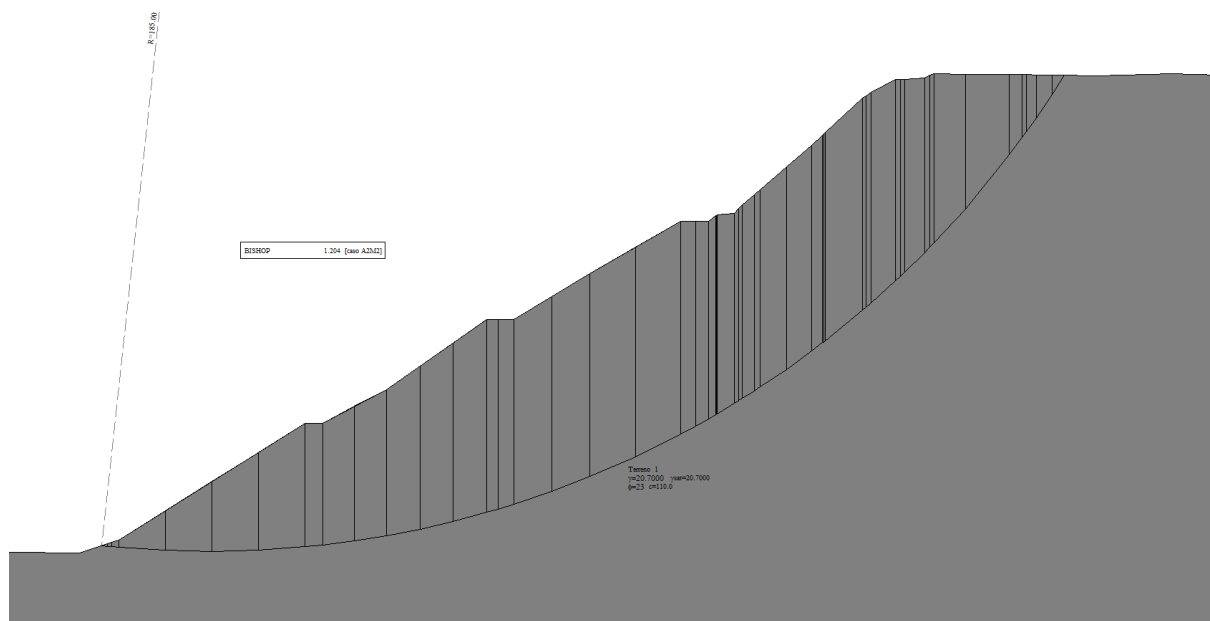


Figura 5-21 Superficie di stabilità a scavi aperti - Statica

Condizione sismica - $F_s= 1.22$

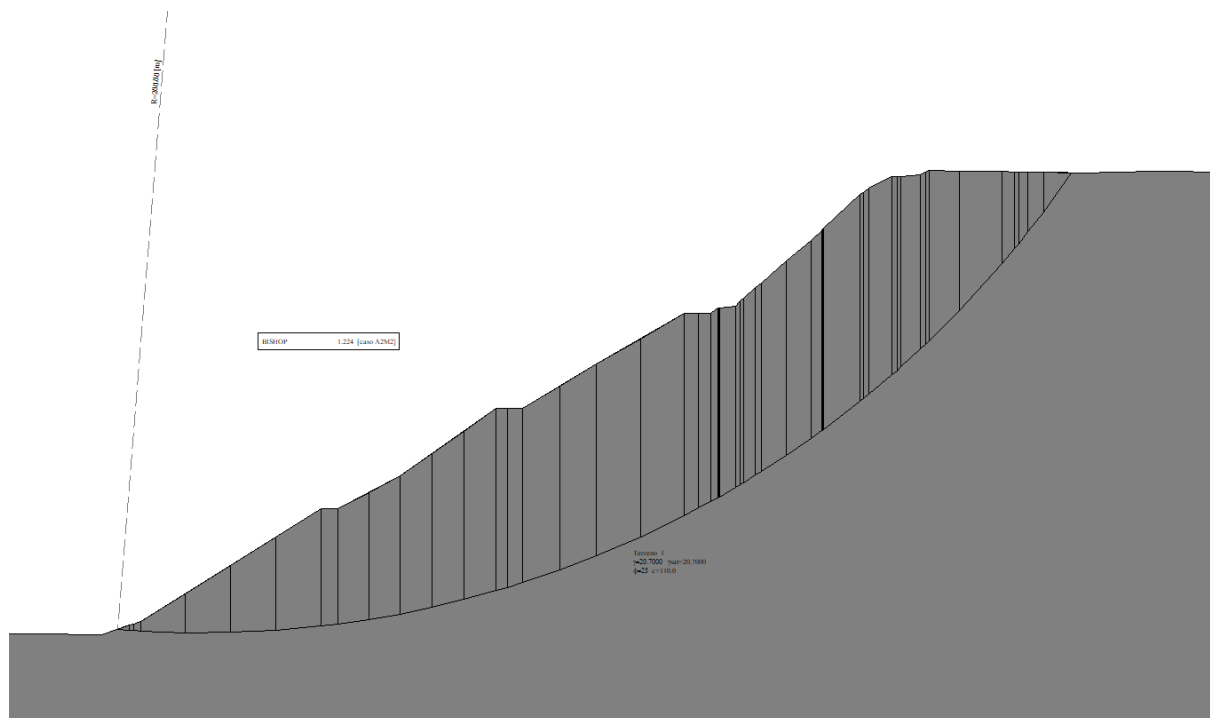


Figura 5-22 Superficie di stabilità a scavi aperti – Sismica

5.7. Strada di accesso alla discarica

Nelle figure seguenti si riportano le superfici critiche di scivolamento e il rispettivo fattore di sicurezza in condizione statica e sismica.

Condizione statica - $F_s=1.552$

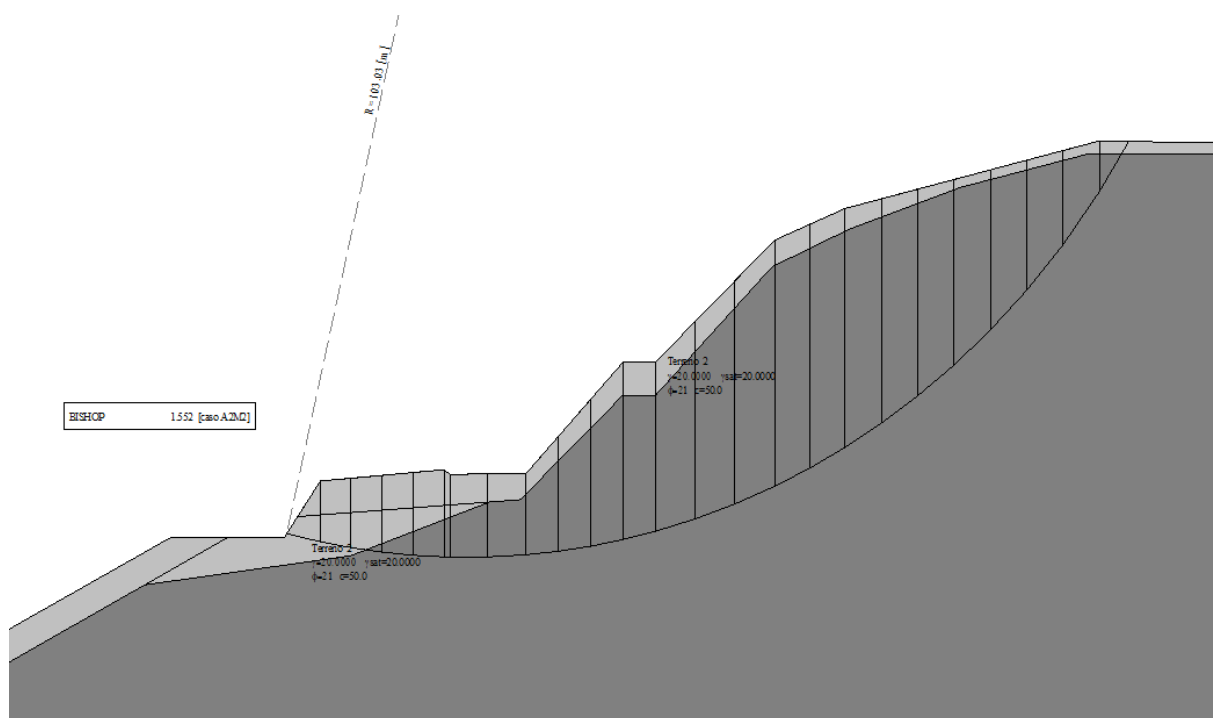


Figura 5-23 Superficie di stabilità strada a valle- Statica

Condizione sismica - $F_s= 1.444$

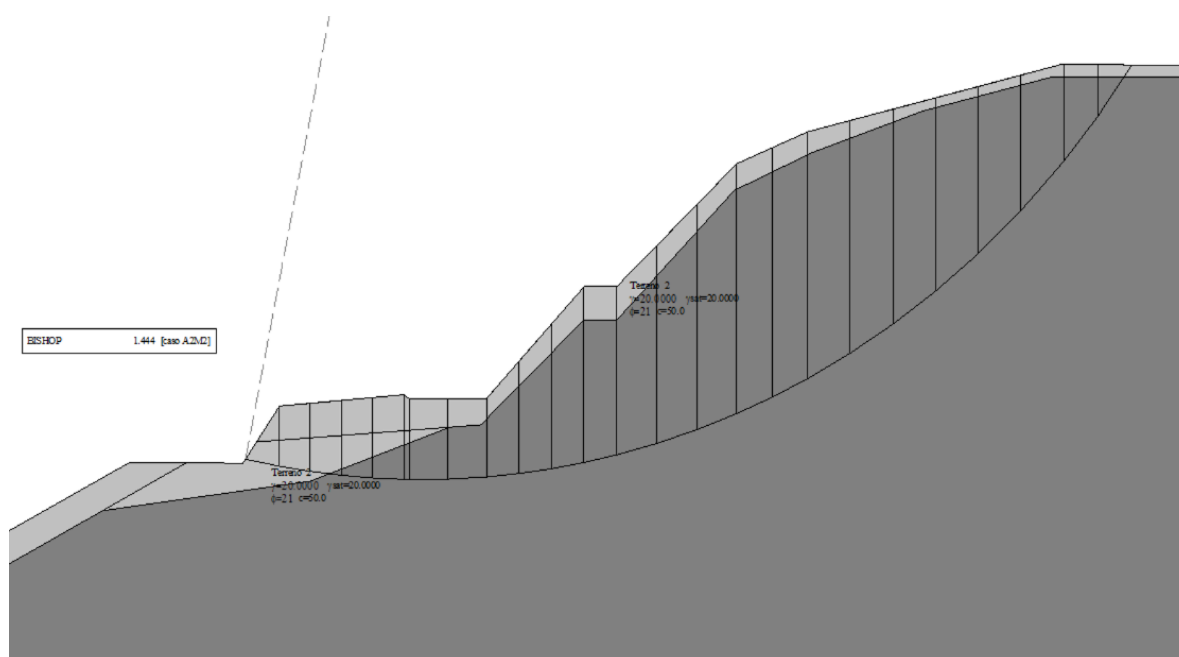


Figura 5-24 Superficie di stabilità strada a valle – Sismica



Sogliano Ambiente S.p.A.

Discarica di rifiuti non pericolosi situata nel Comune di Sogliano al Rubicone (FC) denominata Ginestreto 3
- Progettazione definitiva
Relazione di Calcolo

Doc.no.

Ara G3 PD RC 03.02

Rev. 2

Date: Settembre-22

Pag. 36 of 69

Condizione statica - $F_s=1.481$

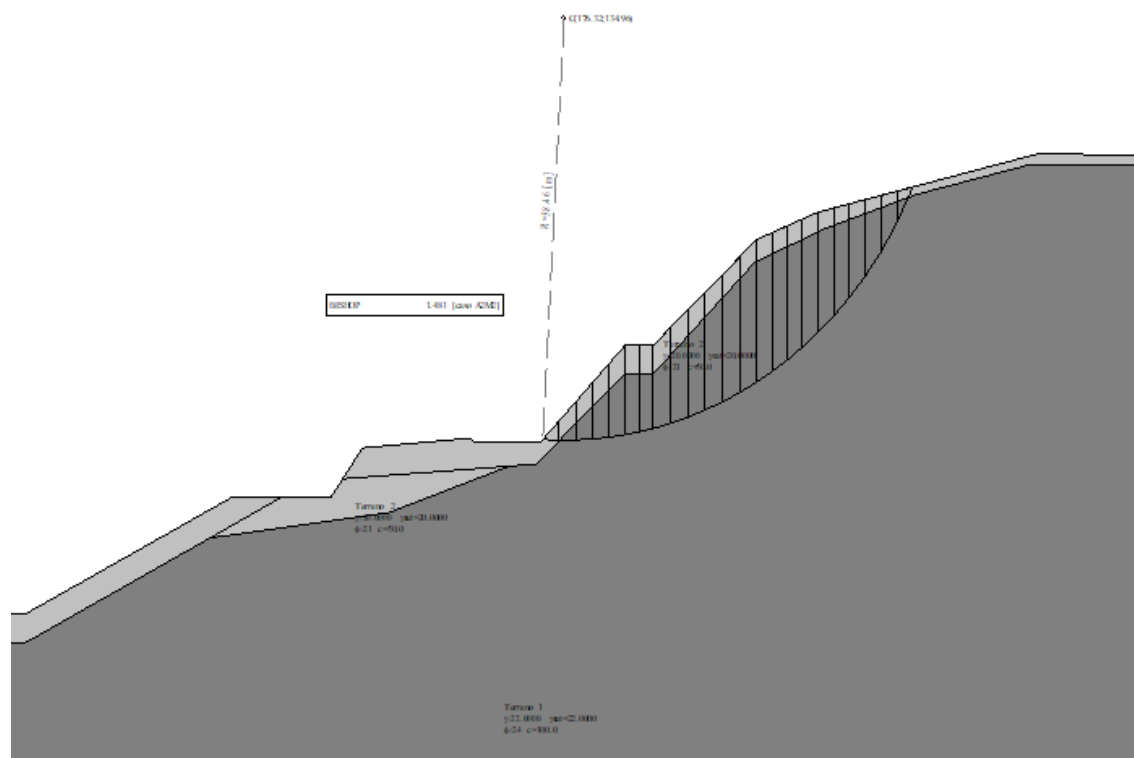


Figura 5-25 Superficie di stabilità strada a monte- Statica

Condizione sismica - $F_s= 1.437$

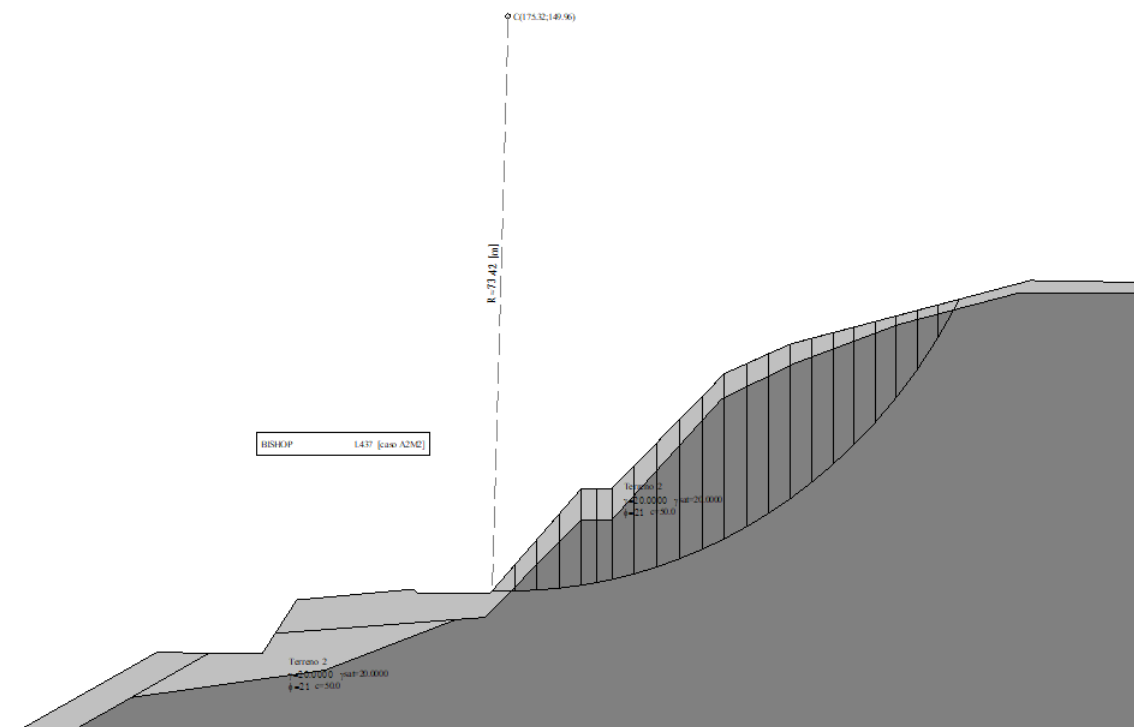



Figura 5-26 Superficie di stabilità strada a monte – Sismica

	Sogliano Ambiente S.p.A. Discarica di rifiuti non pericolosi situata nel Comune di Sogliano al Rubicone (FC) denominata Ginestreto 3 - Progettazione definitiva Relazione di Calcolo	Doc.no. Ara G3 PD RC 03.02	
		Rev. 2	Date: Settembre-22
		Pag. 37 of 69	

5.8. Riepilogo dei risultati delle verifiche di stabilità

Nella tabella seguente si riporta un sunto dei fattori di sicurezza raggiunti nelle verifiche di stabilità. I fattori di sicurezza raggiunti in condizione statica e sismica sono risultati maggiori e uguali a, rispettivamente, 1.1 e 1.2. le verifiche risultano pertanto soddisfatte.

Va sottolineato che i cinematismi di rottura determinati non coinvolgono in alcun modo l'argine di valle; considerando che il metodo di calcolo impiegato individua automaticamente il meccanismo di rottura con il minor coefficiente di sicurezza, si può dire affermare che l'argine di valle verifica a stabilità con coefficienti di sicurezza superiori a quelli indicati.

Combinazione	Scavi Aperti/Discarica vuota			Configurazione finale		Strada di accesso
	Sez. 3	Sez. 4	Sez. F	Sez. 11	Sez. F	
<i>STATICA</i> "SLU – A2+M2" (Fs min 1.1)	1.52	1.2	1.366	1.28	1.425	1.481
<i>SISMICA</i> "SLV – A2+M2 + sisma" (Fs min 1.2)	1.47	1.22	1.252	1.2	1.259	1.437

Si suggerisce, comunque, l'inserimento di banche intermedie per ridurre le altezze dei fronti di rilevato del materiale abbancato.

6. Verifiche agli SLE: cedimenti ed elementi di impermeabilizzazione

Le verifiche agli SLE sono consistiti nel calcolo dei cedimenti e della deformazione indotta sul geocomposito bentonitico.

Tale verifica è stata eseguita sulla sezione F ritenuta la più rappresentativa, che si riporta nuovamente nel seguito per completezza.

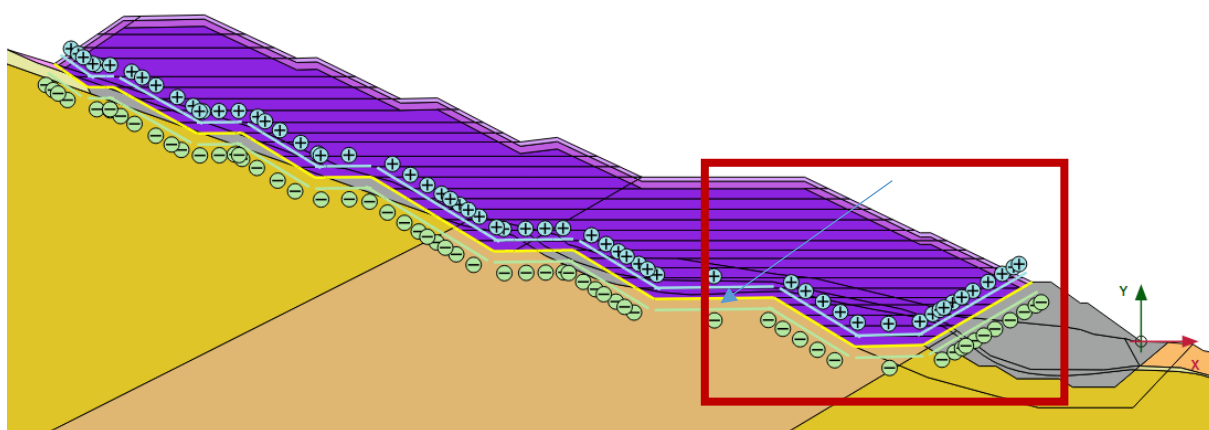


Figura 6-1 Sezione frontale (Sezione F) – Sezione Plaxis

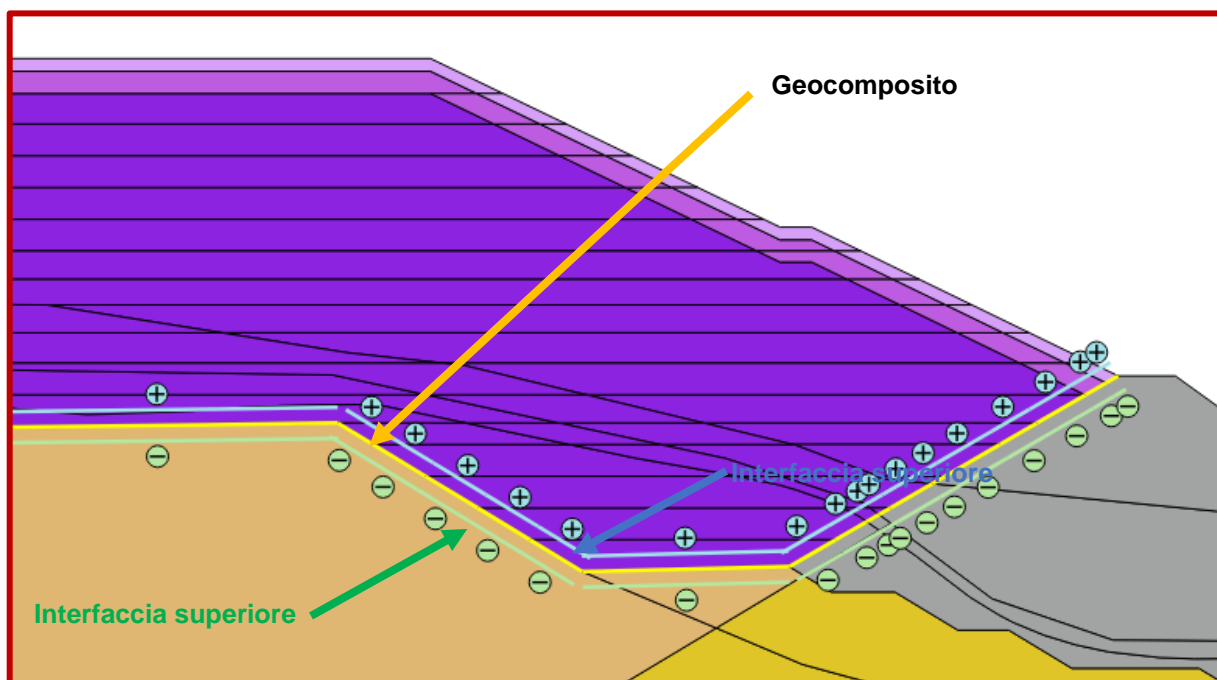



Figura 6-2 Zoom

A differenza del calcolo eseguito precedentemente, questo tipo di analisi ha richiesto degli affinamenti maggiori relativi ai seguenti aspetti:

- abbancamento dei rifiuti per fasi: si esegue il riempimento dell'argine di valle per step di 10m di materiale alla volta, che simula più propriamente le operazioni di abbancamento piuttosto che il completo riempimento in un'unica fase, cogliendo una più realistica reazione deformativa del terreno di sottofondo;

	Sogliano Ambiente S.p.A. Discarica di rifiuti non pericolosi situata nel Comune di Sogliano al Rubicone (FC) denominata Ginestreto 3 - Progettazione definitiva Relazione di Calcolo	Doc.no. Ara G3 PD RC 03.02	
		Rev. 2	Date: Settembre-22
		Pag. 39 of 69	

- modellazione del geocomposito per tener conto della sua rigidità estensionale alla deformazione;
- inserimento di un'interfaccia superiore ed una inferiore che simulano rispettivamente, l'attrito del geocomposito con il terreno di sottofondo e con la sovrastante geomembrana;
- parametrizzazione con un modello reologico che tiene conto in modo esaustivo del comportamento deformativo dei terreni.

6.1. Parametri impiegati

6.1.1 Terreni

I parametri di resistenza sono i medesimi considerati nelle verifiche di stabilità.

In questa sede sono state approfondite le caratteristiche di rigidità dei terreni coinvolti.

Le unità geotecniche T-depFr e T-dt, non essendo significative a livello di calcolo, in quanto verranno rimosse all'atto della realizzazione della discarica, sono caratterizzate mediante il modello costitutivo Hardening Soil. Le rispettive rigidità derivano dalle prove edometriche di laboratorio; nello specifico si è preso a riferimento il modulo edometrico, dal quale si sono derivati i moduli E_{50} e E_{ur} , mediante le seguenti relazioni tipicamente impiegate:

$$E_{50}^{ref} = E_{oed}^{ref}$$

$$E_{ur}^{ref} = 3 \cdot E_{50}^{ref}$$

I moduli relativi alle unità geotecniche relative al substrato, alterato e intatto, sono invece state definite sulla base delle indagini sismiche, non avendo a disposizione prove su campioni indisturbati, assumendo come modulo operativo il 20% di quello iniziale E_0 . Essendo il terreno sovraconsolidato, lavora nel ramo di carico scarico; pertanto il modulo così definito è pari al modulo E_{ur} ($E_{ur}=E_0/5$).

Il modulo di taglio iniziale G_0 è stato anch'esso definito sulla base delle prove sismiche.

Sulla base di tali dati sono stati calibrati i valori di E_{ur}^{ref} , E_{50}^{ref} , E_{oed}^{ref} , m , p_{ref} (si veda tabella riassuntiva dei parametri) al fine di ottenere un andamento della rigidità con la profondità confrontabile con quella misurata in sito.

Nel seguito si riportano i grafici relativi ai parametri di rigidità (Figura 6-4÷Figura 6-7) determinati dalle prove sismiche e le curve di rigidità simulate dal Plaxis in funzione dei parametri anzidetti.

In Figura 6-4 si riportano invece le curve di degrado disponibili, ottenuti da prove di colonna risonante (CR) e taglio torsionale ciclico (TTC), su terreni della stessa litologia di quelli in esame (terreni pelitico arenacei e arenaceo pelitici - Argille Azzurre), per l'individuazione delle quali si è fatto riferimento alla relazione sull'analisi di risposta sismica locale. Sulla base di tali prove si è determinato il valore di $\gamma_{0.7}$ per tutti i litotipi RP e RA pari a $3 \cdot 10^{-4}$ che ben approssima la media per le varie curve.

Cautelativamente, nelle modellazioni al continuo, per lo strato intatto si sono usati valori di coesione drenata pari a 100kPa.



Sogliano Ambiente S.p.A.

Discarica di rifiuti non pericolosi situata nel Comune di Sogliano al Rubicone (FC) denominata Ginestreto 3
- Progettazione definitiva
Relazione di Calcolo

Doc.no.

Ara G3 PD RC 03.02

Rev. 2

Date: Settembre-22

Pag. 40 of 69

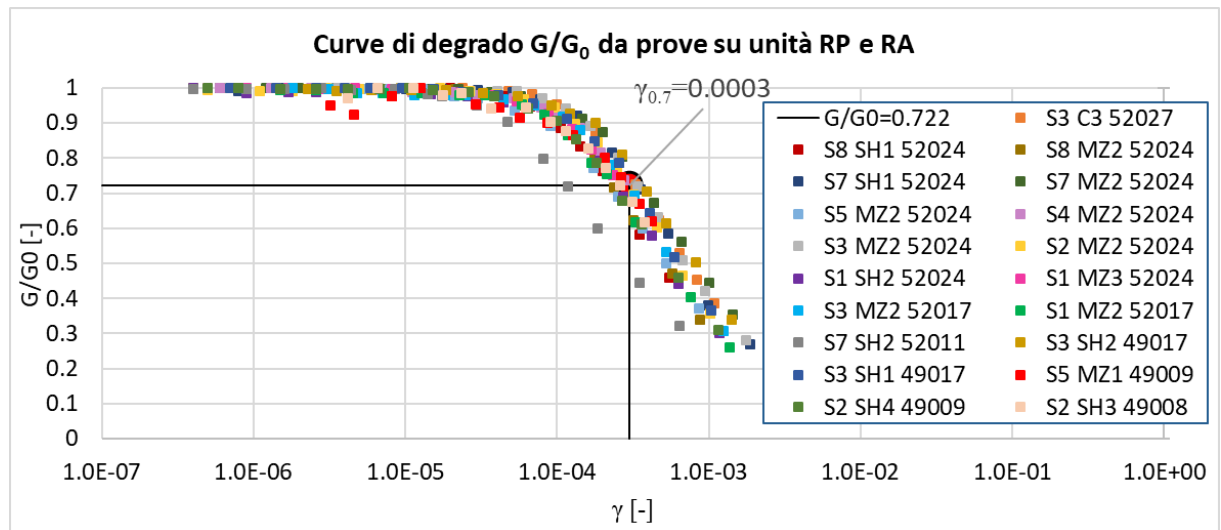


Figura 6-3 Curve di degrado su RP e RA

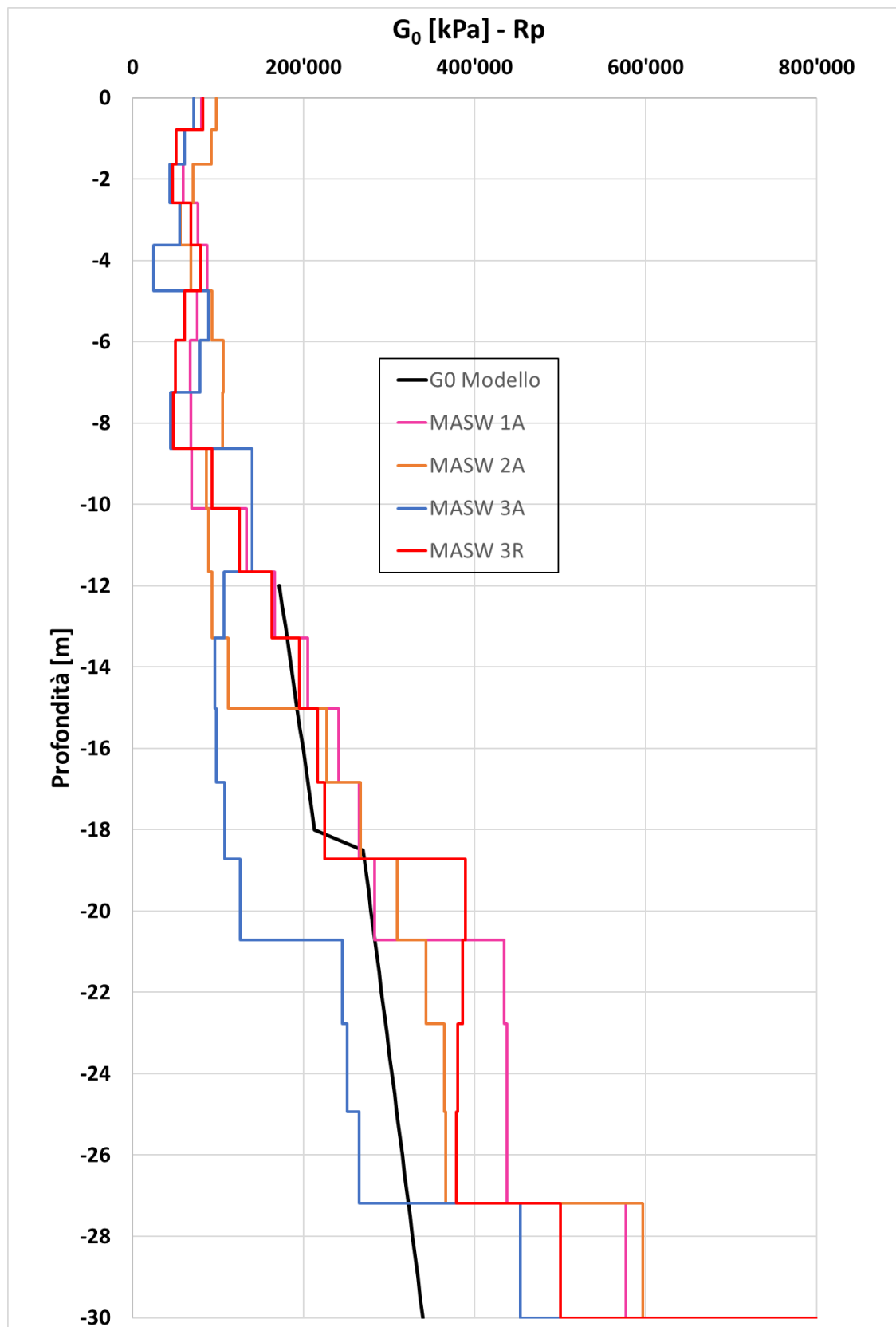


Figura 6-4 Modulo di taglio iniziale G_0 per unità RPa e RPi da sismiche e curva Rigidezza - Profondità da modello Plaxis

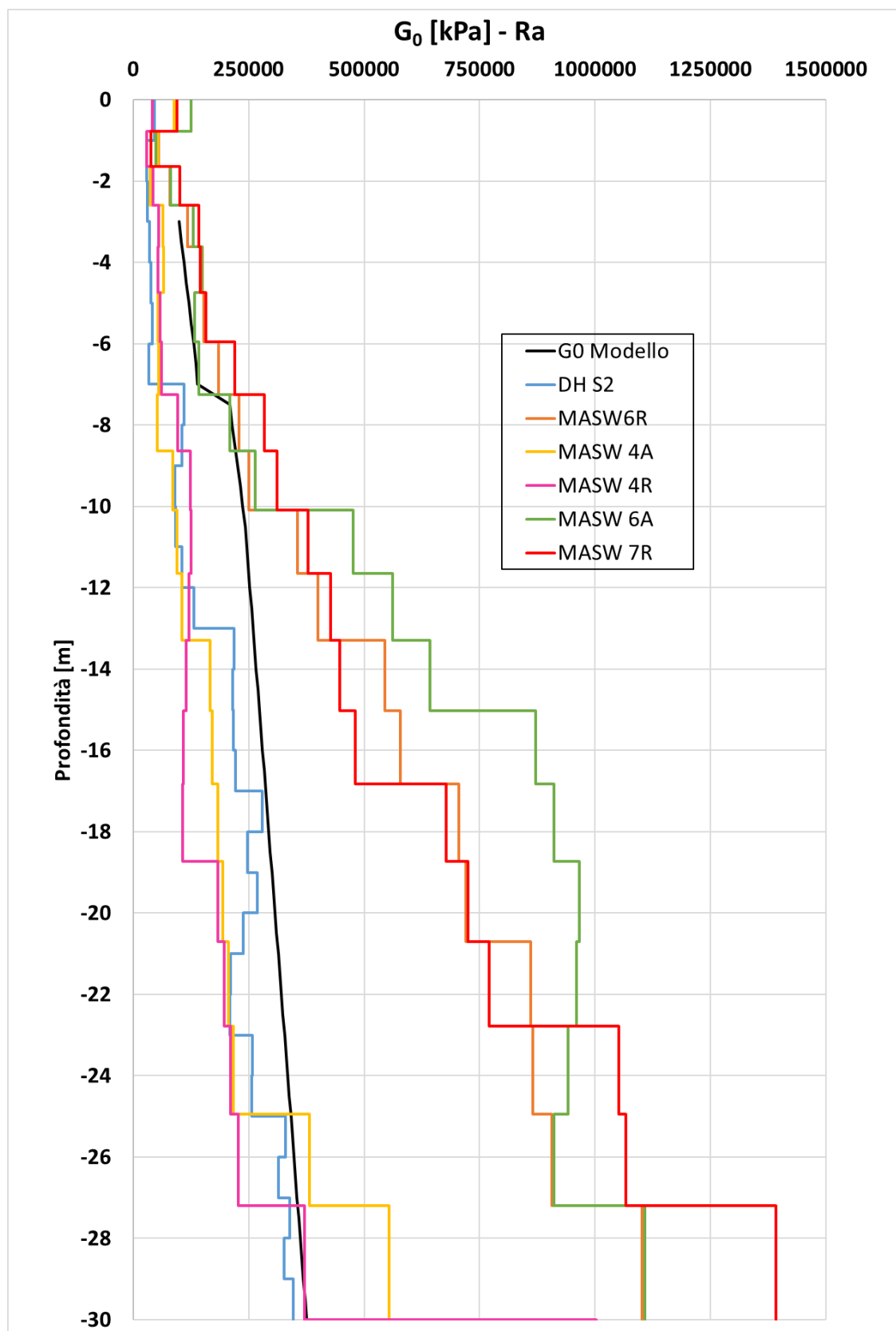


Figura 6-5 Modulo di taglio iniziale G_0 per unità R_{Aa} e R_{Ai} da sismiche e curva Rigidezza-Profondità da modello Plaxis

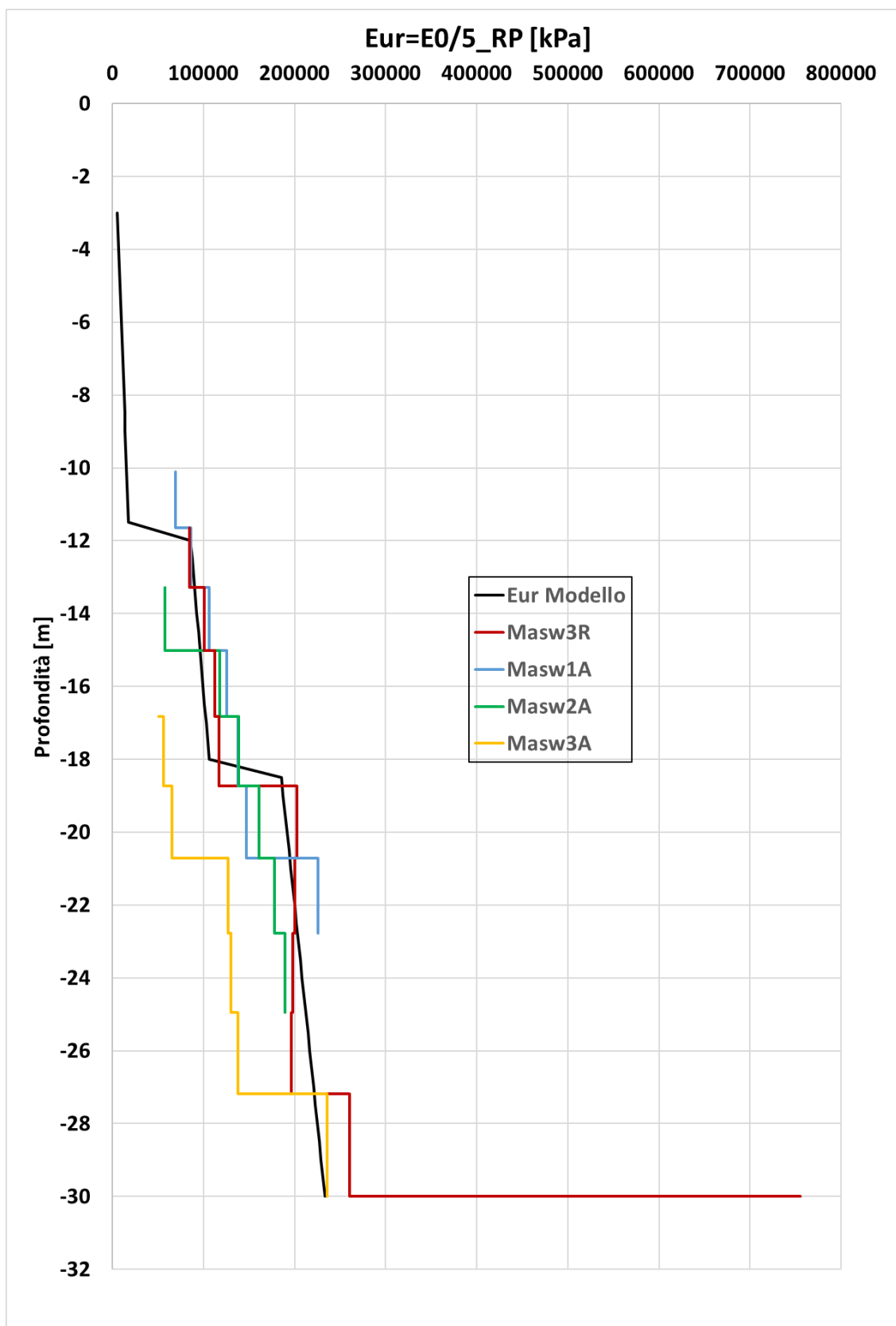


Figura 6-6 Modulo Eur per unità RPa e RPi da sismiche e curva Rigidezza-Profondità da modello Plaxis

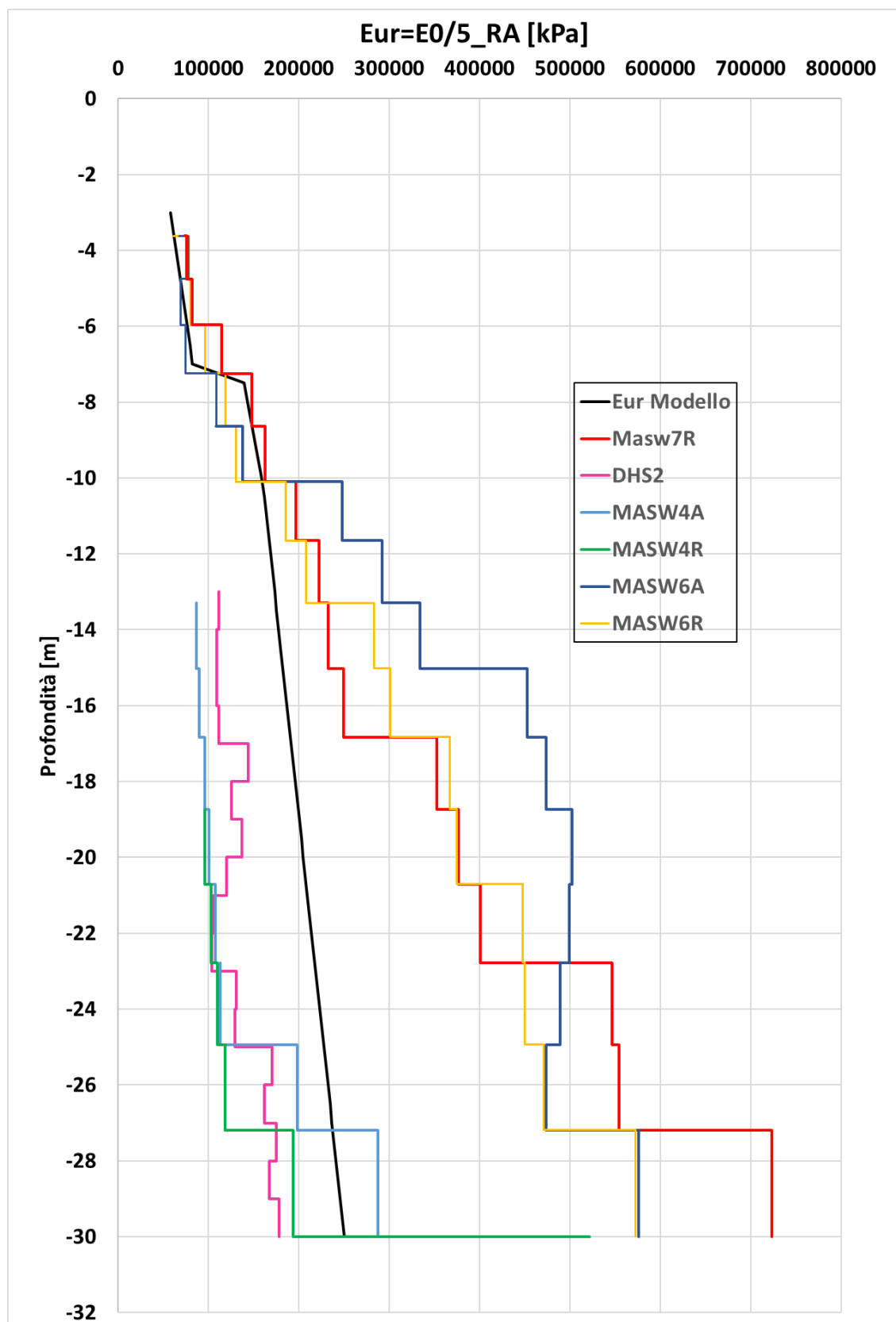


Figura 6-7 Modulo Eur per unità RAa e RAi da sismiche e curva Rigidezza-Profondità da modello Plaxis

Nella tabella che segue si riportano i parametri geotecnici impiegati:



Sogliano Ambiente S.p.A.

Discarica di rifiuti non pericolosi situata nel Comune di Sogliano al Rubicone (FC) denominata Ginestreto 3
- Progettazione definitiva
Relazione di Calcolo

Doc.no.

Ara G3 PD RC 03.02

Rev. 2

Date: Settembre-22

Pag. 45 of 69

Tabella 6-1 Tabella riassuntiva parametri dei litotipi RP e RA intatti e alterati – Hardening soil Small Strain

Identification		R-A	R-P	R-A_ alt	R-P_ Alt
Soil model		HS small	HS small	HS small	HS small
Colour					
γ	kN/m ³	20.70	20.70	20.50	20.50
E_{50}^{ref}	kN/m ²	40.00E3	35.00E3	20.00E3	20.00E3
E_{oed}^{ref}	kN/m ²	40.00E3	35.00E3	20.00E3	20.00E3
E_{ur}^{ref}	kN/m ²	120.0E3	110.0E3	70.00E3	60.00E3
ν_{ur}		0.2000	0.2000	0.2000	0.2000
Power (m)		1	1	1	1
G_0^{ref}	kN/m ²	180.0E3	160.0E3	120.0E3	120.0E3
$\gamma_{0.7}$		0.3E-3	0.3E-3	0.3E-3	0.3E-3
pref	kN/m ²	100	100	100	100
c	kN/m ²	100	100	50	50
ϕ	°	24	24	21	21
K_0^{nc}		0.5933	0.5933	0.6416	0.6416
POP	kN/m ²	250.0	300.0	120.0	120.0
OCR		1.000	1.000	1.000	1.000

Tabella 6-2 Tabella riassuntiva parametri dei terreni superficiali – Mohr Coulomb

Identification		S-TerraBattuta
Soil model		Mohr-Coulomb
Colour		
γ	kN/m ³	21.00
E'_{ref}	kN/m ²	11140
E_{oed}	kN/m ²	15000
ν (nu)		0.3
c	kN/m ²	5
ϕ	°	34

Tabella 6-3 Tabella riassuntiva parametri dei terreni superficiali – Hardening soil

Identification		T-dt	T-depFr
Soil model		Hardening Soil	Hardening Soil
Drainage type		Drained	Drained
Colour			
γ	kN/m ³	19.70	19.70
E_{50}^{ref}	kN/m ²	4500	4500
E_{oed}^{ref}	kN/m ²	4500	4500
E_{ur}^{ref}	kN/m ²	13.50E3	13.50E3
ν_{ur}		0.2000	0.2000
Power (m)		0	0
pref	kN/m ²	100	100
c	kN/m ²	5	5
ϕ	°	24	24
K_0^{nc}		0.5933	0.5933
POP	kN/m ²	0.000	0.000
OCR		1.000	1.000





	Sogliano Ambiente S.p.A.	Doc.no.	
	Discarica di rifiuti non pericolosi situata nel Comune di Sogliano al Rubicone (FC) denominata Ginestreto 3 - Progettazione definitiva Relazione di Calcolo	Ara G3 PD RC 03.02	
		Rev. 2	Date: Settembre-22
		Pag. 46 of 69	

Tabella 6-4 Tabella riassuntiva parametri del rifiuto – Mohr Coulomb

Identification		Rifiuto - 20kPa	Rifiuto - 20-60kPa	Rifiuto - 60kPa
Soil model		Mohr-Coulomb	Mohr-Coulomb	Mohr-Coulomb
Colour				
γ	kN/m ³	11	11	11
E'_{ref}	kN/m ²	1500	1500	1500
ν (nu)		0.33	0.33	0.33
c	kN/m ²	22	5	20
ϕ	°	0	38	30

6.1.2 Strutture

Per il terra calce si sono impiegati i medesimi parametri usati per le verifiche di stabilità, nel seguito si riassumono nuovamente le grandezze considerate.

Il geocomposito bentonitico, invece, è stato modellato mediante l'inserimento di una geogriglia alla quale è stata assegnata una resistenza ultima $N_p = 12 \text{ kN/m}$ e una rigidezza estensionale pari a $EA = \frac{\text{Resistenza ultima}}{\text{Deformazione massima a rottura}}$. Entrambi sono parametri desunti dalle specifiche tecniche fornite dai produttori.

La deformazione ultima a rottura del geocomposito preso a riferimento è pari al 30%; a favore di sicurezza si è considerato un minore valore di deformazione ultima a rottura, nello specifico 5%, ottenendo un valore di $EA = 12/0.05 = 240 \text{ kN/m}$.


Tale assunzione è cautelativa in quanto il geocomposito, essendo modellato con maggiore rigidezza assorbe maggiori sollecitazioni rispetto a quanto ne avrebbe e raggiunge deformazioni più alte.

L'interazione tra geocomposito e sistema discarica è modellata mediante l'inserimento di due interfacce, poste superiormente e inferiormente al geocomposito, che simulano la trasmissione dei carichi mediante le caratteristiche di attrito (ϕ) e adesione (c) tra i materiali a contatto che sono state definite sperimentalmente.

All'interfaccia inferiore, posta tra geocomposito e terreno in sito, sono stati assegnati i valori di resistenza determinati considerando il geocomposito steso lato TNT: $\phi = 31.5^\circ$ e $c = 0 \text{ kPa}$.

All'interfaccia superiore sono stati assegnati i valori determinati al contatto tra geocomposito e geomembrana HDPE. I valori considerati per questo tipo di analisi sono quelli maggiori, ritenuti cautelativi in quanto aumentano la trasmissione del peso dei rifiuti sul geocomposito, quindi lo sforzo di trazione. I valori assegnati sono: $\phi = 21.3^\circ$ e $c = 5.6 \text{ kPa}$.

Tabella 6-5 Parametri del terra calce– Mohr Coulomb

Identification		S-TerraCalce
Soil model		Mohr-Coulomb
Colour		
γ	kN/m ³	21.00
E'_{ref}	kN/m ²	50.00E3
ν (nu)		0.3500
c	kN/m ²	109
ϕ	°	36

6.2. Fasi di calcolo

Le fasi di calcolo implementate sono le seguenti:

- Fase geostatica (Fase 0-1).
- Scavo (Fase 2): realizzazione dello scavo fino al raggiungimento la quota di imposta della discarica;
- Consolidamenti (Fase 3): realizzazione dell'argine di valle ed eventuale riprofilatura del profilo di scavo con terreno trattato a calce;
- Geogriglia (Fase 4): Inserimento del geocomposito e attivazione delle interfacce superiori ed inferiori;
- Rifiuto 1-15 (Fase 5-19): riempimento della discarica a step di circa 10m di materiale.

Nelle immagini seguenti si illustrano le fasi implementate.

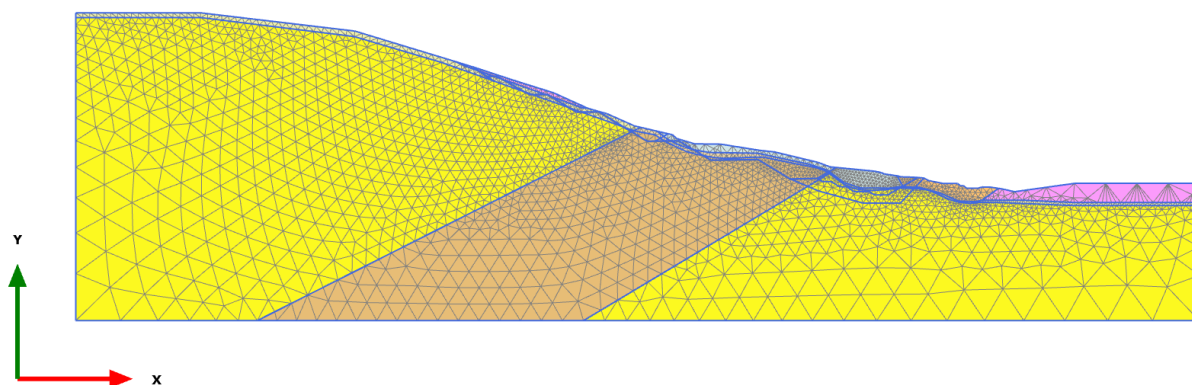


Figura 6-8 Fase Geostatica

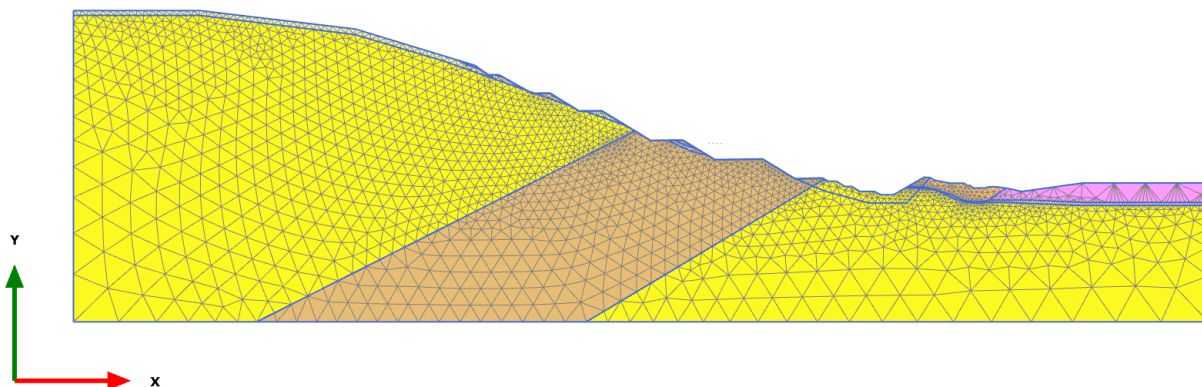


Figura 6-9 Fase Scavo

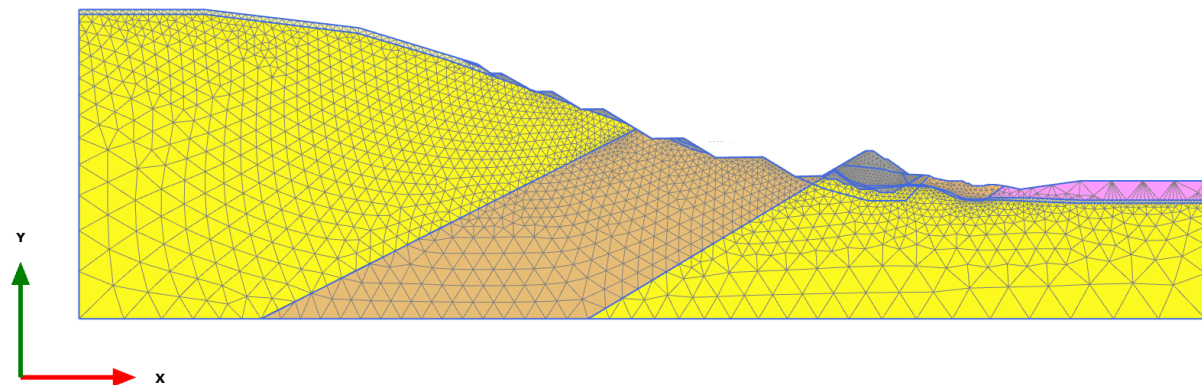


Figura 6-10 Fase Consolidamenti

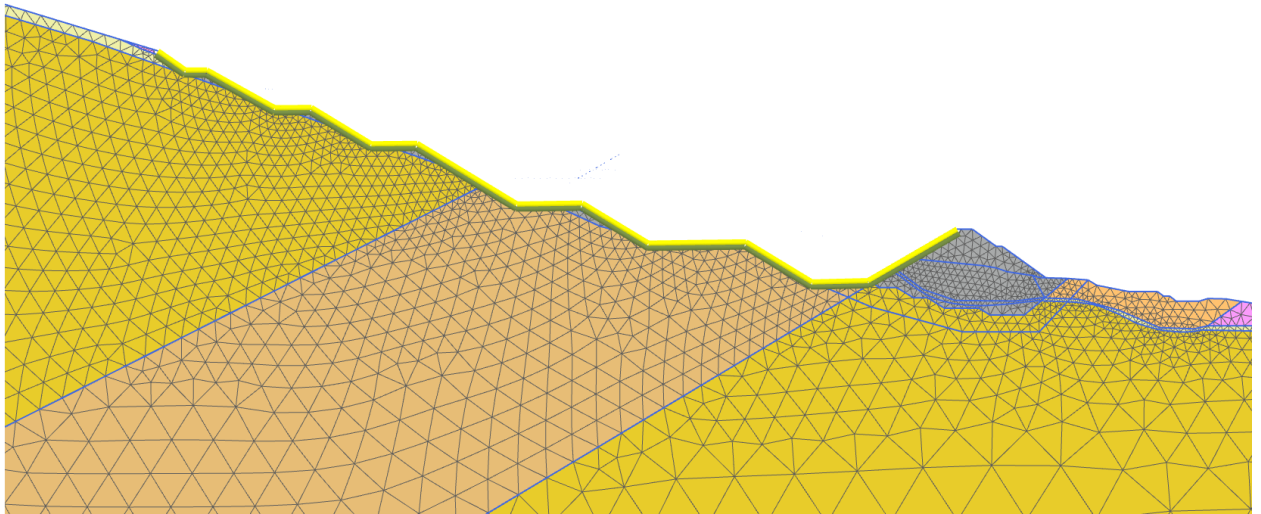


Figura 6-11 Fase Geogriglia

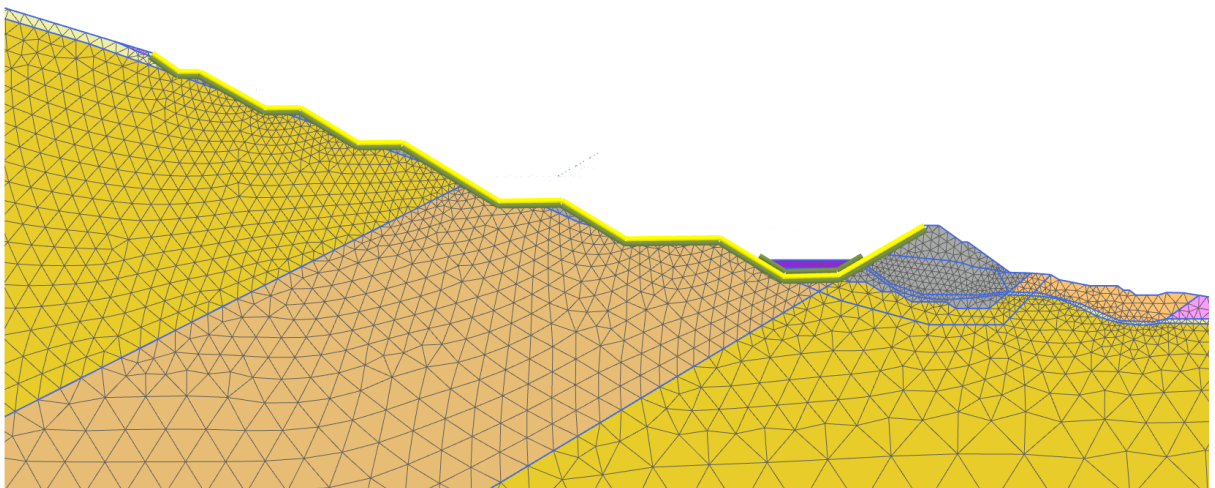


Figura 6-12 Fase Rifiuto 1: primo step di abbancamento di 10m

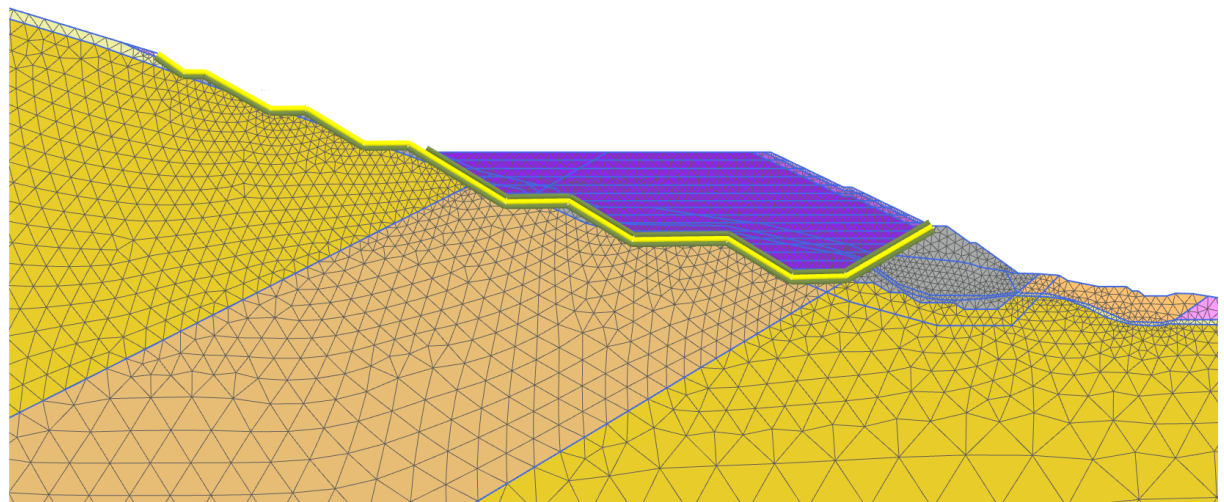


Figura 6-13 Fase Rifiuto 8: ottavo step di abbancamento di 10m



Sogliano Ambiente S.p.A.

**Discarica di rifiuti non pericolosi situata nel Comune
di Sogliano al Rubicone (FC) denominata Ginestreto 3
- Progettazione definitiva
Relazione di Calcolo**

Doc.no.

Ara G3 PD RC 03.02

Rev. 2

Date: Settembre-22

Pag. 49 of 69

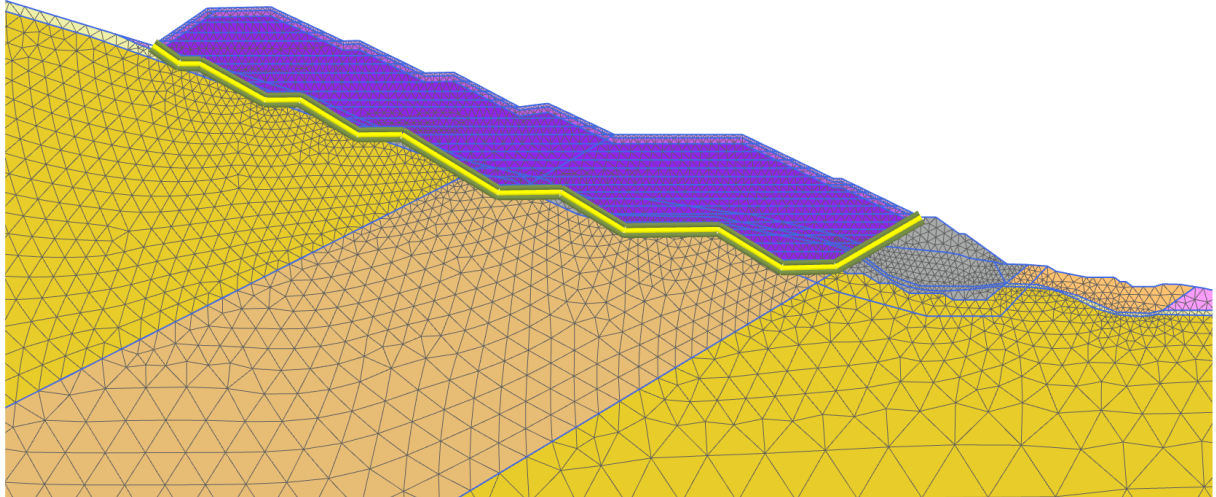



Figura 6-14 Fase Rifiuto 15: completamento abbancamento

	Sogliano Ambiente S.p.A. Discarica di rifiuti non pericolosi situata nel Comune di Sogliano al Rubicone (FC) denominata Ginestreto 3 - Progettazione definitiva Relazione di Calcolo	Doc.no. Ara G3 PD RC 03.02	
		Rev. 2	Date: Settembre-22
		Pag. 50 of 69	

6.3. Analisi dei cedimenti

Nel seguito si riportano i risultati in termini di cedimenti indotti dal riempimento della discarica.

A titolo semplificativo si riportano gli spostamenti verticali e la deformata alla prima fase di abbancamento (quindi di discarica pressoché vuota), al riempimento di metà discarica e a discarica piena.

I risultati di interesse sono solo quelli relativi al sistema di fondazione e consolidamento; mentre il cedimento del rifiuto è ovviamente atteso per la natura del problema e non è significativo ai fini geotecnici. In considerazione di ciò, verranno riportati i soli cedimenti sul substrato e argine di valle e rappresentato, ai fini esplicativi, solo come ingombro il rifiuto che ha indotto tali spostamenti.

I cedimenti riportati sono decurtati di tutti quelli dovuti alle fasi precedenti, sono pertanto quelli indotti dal solo abbancamento dei rifiuti.

I segni dei valori di spostamento sono concordi al sistema di riferimento globale riportato in Figura 5-9.

Come è possibile notare dai risultati illustrati, i valori di cedimento nel substrato e nell'argine di valle sono esigui e sono maggiori laddove vi è una minore asportazione di materiale rispetto all'altezza del rifiuto apportato, con raggiungimento di valori massimi pari a circa 0.3m. In sommità all'argine, a discarica piena, si hanno valori di spostamento compresi tra i 0.03 e i 0.06m (Figura 6-21).

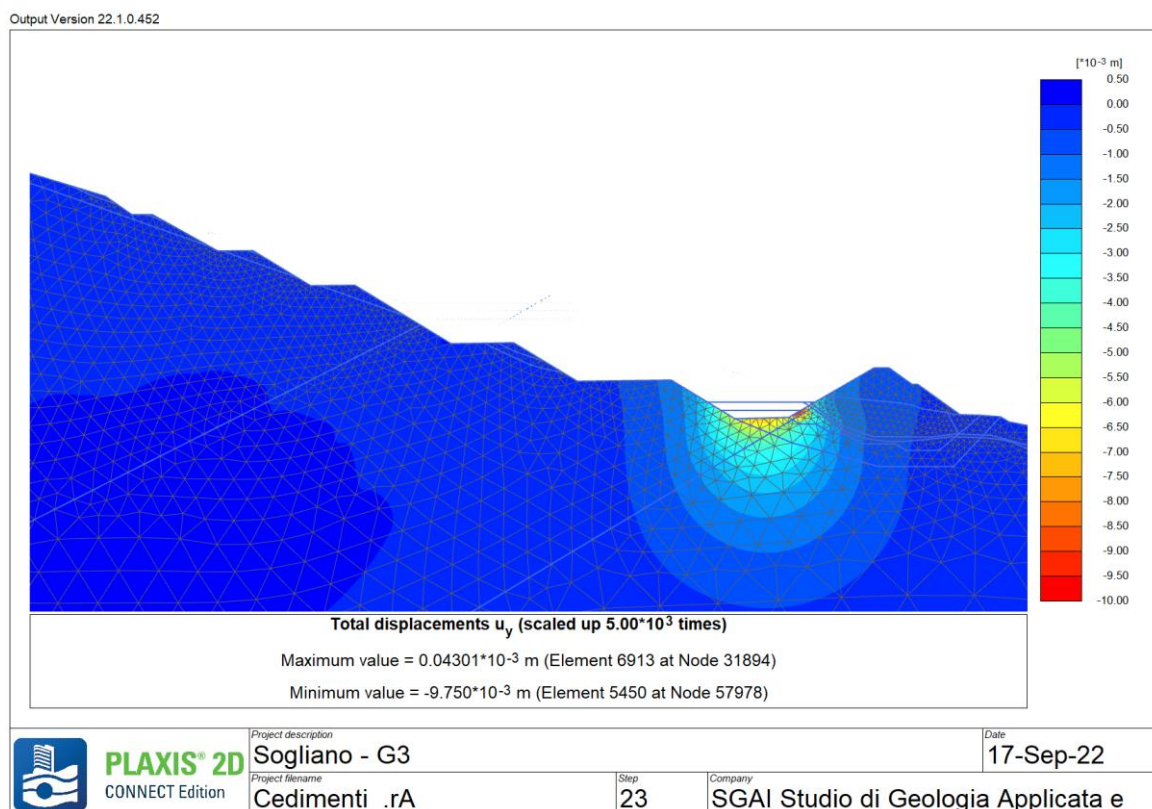


Figura 6-15 Fase Rifiuto 1: spostamenti verticali del terreno di fondazione/argine

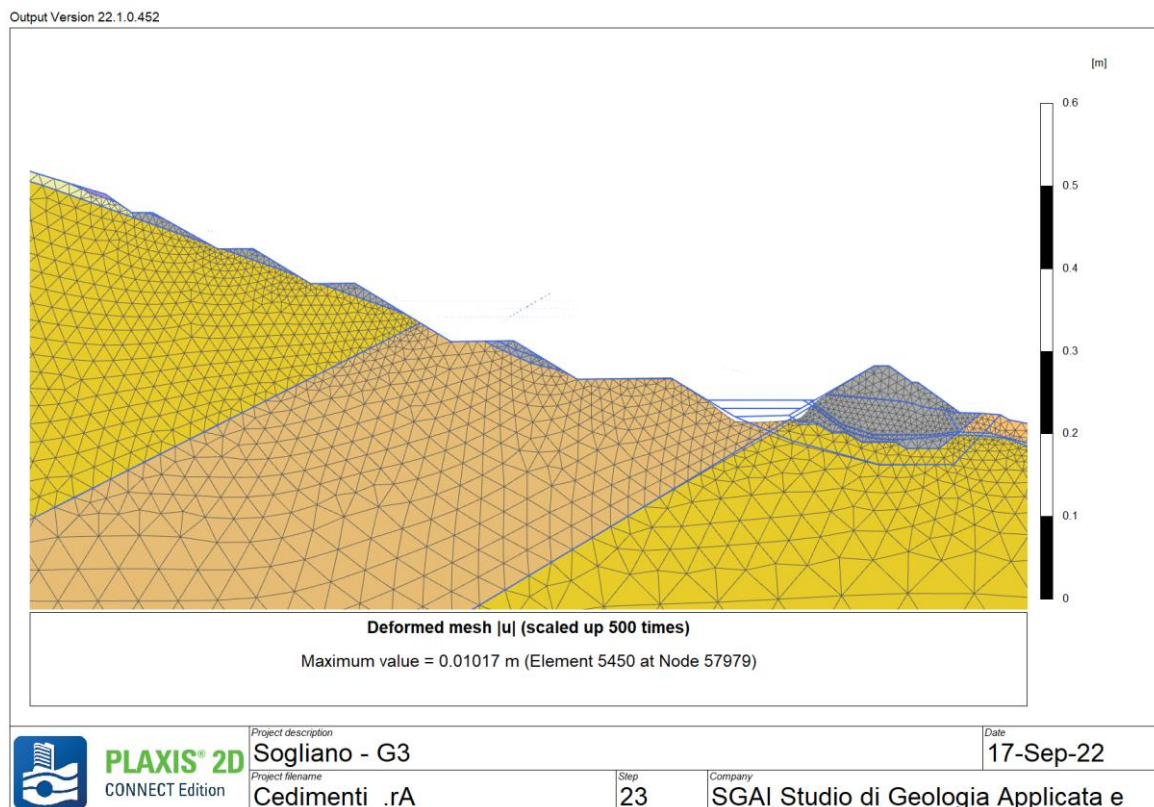


Figura 6-16 Fase Rifiuto 1: deformata del terreno di fondazione/argine

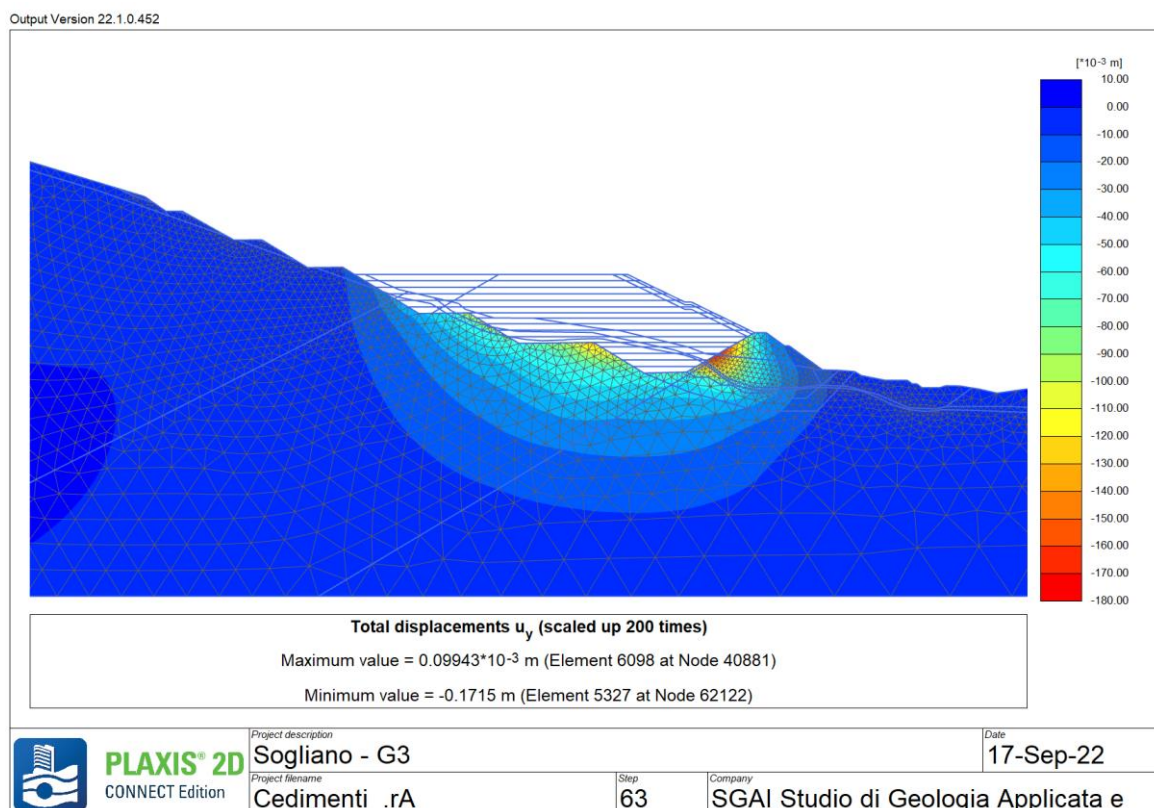


Figura 6-17 Fase Rifiuto 8: spostamenti verticali del terreno di fondazione/argine



Sogliano Ambiente S.p.A.

Discarica di rifiuti non pericolosi situata nel Comune di Sogliano al Rubicone (FC) denominata Ginestreto 3
- Progettazione definitiva
Relazione di Calcolo

Doc.no.

Ara G3 PD RC 03.02

Rev. 2

Date: Settembre-22

Pag. 52 of 69

Output Version 22.1.0.452

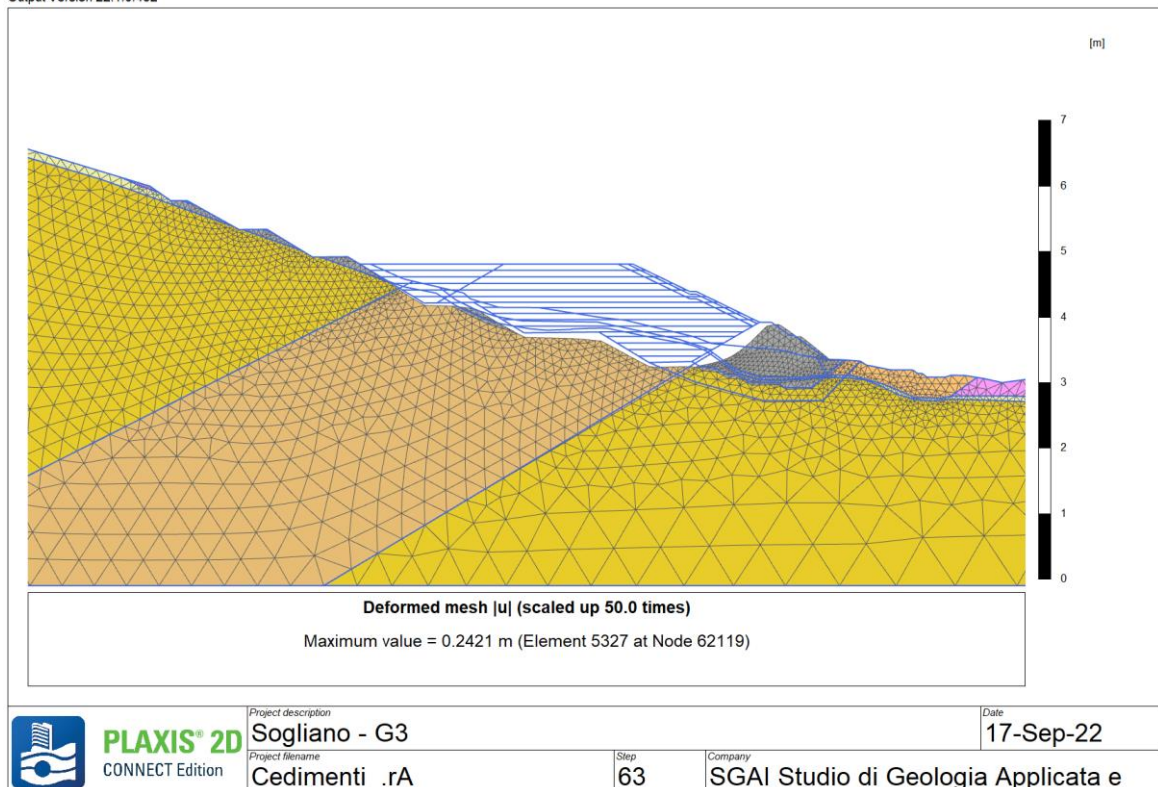


Figura 6-18 Fase Rifiuto 8: deformata del terreno di fondazione/argine

Output Version 22.1.0.452

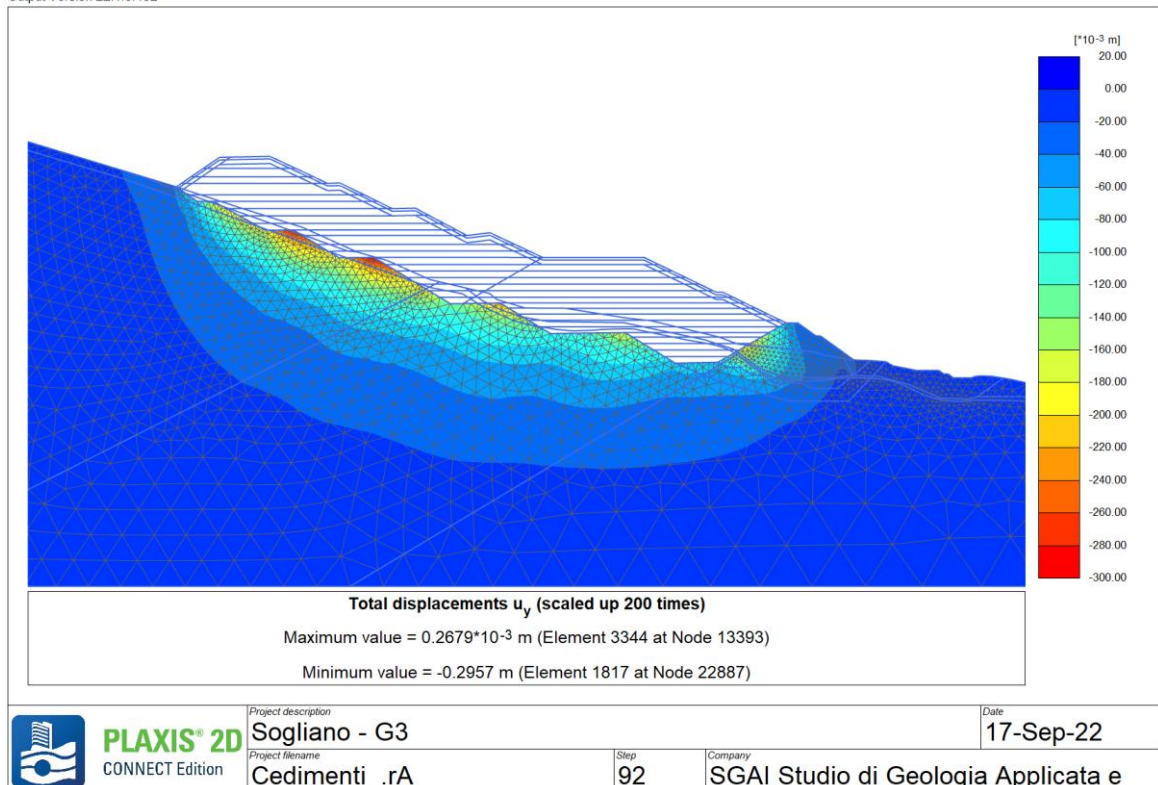


Figura 6-19 Fase Rifiuto 15: spostamenti verticali del terreno di fondazione/argine



Sogliano Ambiente S.p.A.

Discarica di rifiuti non pericolosi situata nel Comune di Sogliano al Rubicone (FC) denominata Ginestreto 3
- Progettazione definitiva
Relazione di Calcolo

Doc.no.

Ara G3 PD RC 03.02

Rev. 2

Date: Settembre-22

Pag. 53 of 69

Output Version 22.1.0.452

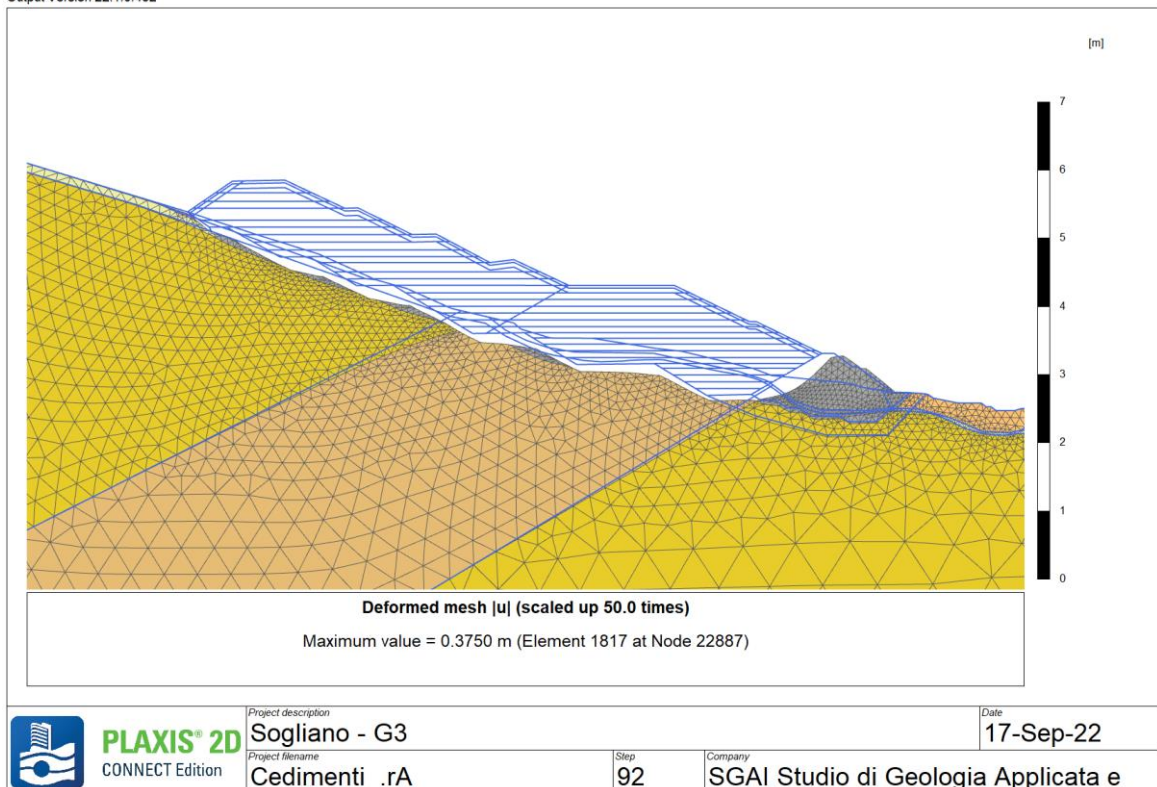


Figura 6-20 Fase Rifiuto 15: deformata del terreno di fondazione/argine

Output Version 22.1.0.452

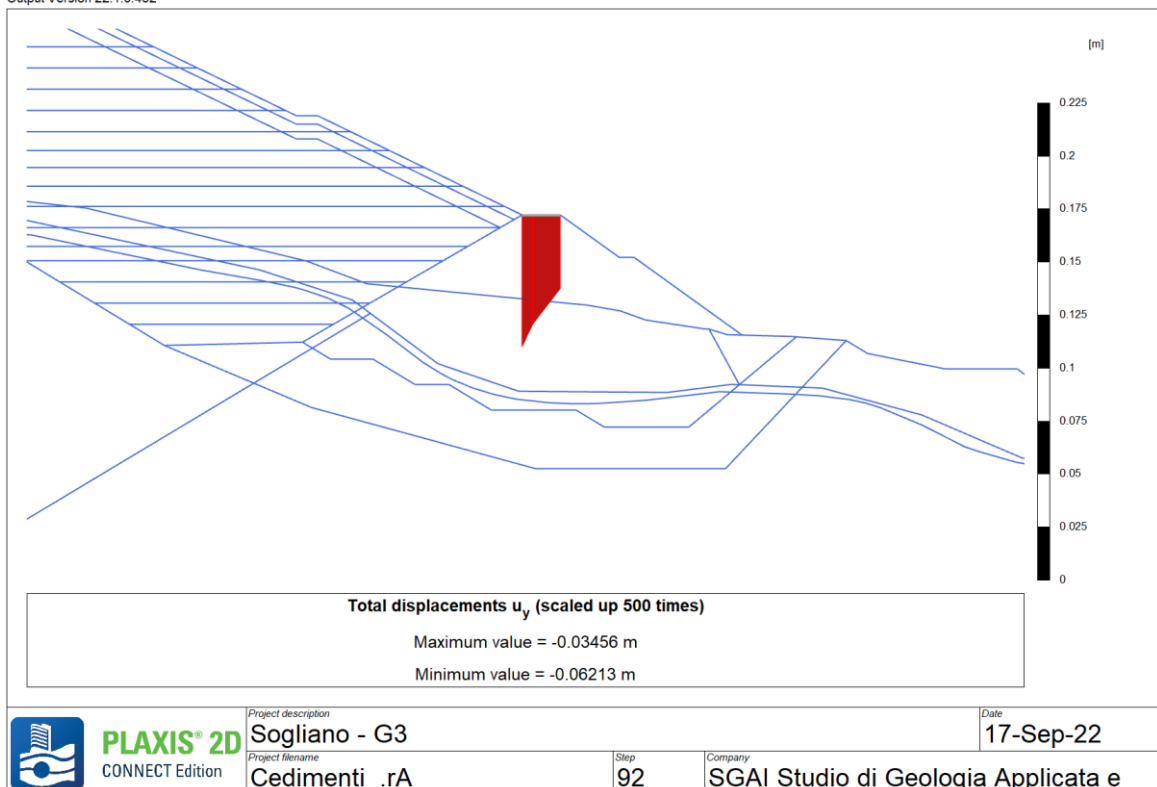



Figura 6-21 Fase Rifiuto 15: spostamenti verticali in sommità all'argine di valle

	Sogliano Ambiente S.p.A. Discarica di rifiuti non pericolosi situata nel Comune di Sogliano al Rubicone (FC) denominata Ginestreto 3 - Progettazione definitiva Relazione di Calcolo	Doc.no. Ara G3 PD RC 03.02	
		Rev. 2	Date: Settembre-22
		Pag. 54 of 69	

6.4. Deformazioni indotte sul geocomposito bentonitico

Nel seguito si illustrano i risultati in termini di sollecitazioni assiali agenti sulla geogriglia e di spostamenti estensionali della stessa che si hanno all'ultima fase di abbancamento.

Si noti che la forza di trazione agente massima è inferiore alla resistenza del materiale dato in input. I valori maggiori sono in corrispondenza degli spigoli del profilo di scavo.

Nel grafico di Figura 6-24 sono riportati gli spostamenti estensionali indotti sulla geogriglia dai vari step di abbancamento del rifiuto (ciascuna curva è denominata come la fase di calcolo); la massima estensione si ha ad opera completata (Rifiuto 15), in corrispondenza della scarpata di scavo più alta.

Nel grafico di Figura 5-11 sono riportate le deformazioni calcolate nella fase finale in cui si hanno maggiori spostamenti estensionali; a titolo esplicativo le deformazioni sono rappresentate contestualmente ai relativi spostamenti (curva "Rifiuto 15"). Tali deformazioni sono rappresentate con più curve ciascuna delle quali rappresenta un tratto del profilo di scavo. Le maggiori deformazioni, concordemente alle forze di trazioni agenti, sono puntuali e in corrispondenza degli spigoli del profilo di scavo.

Il valore massimo di deformazione è pari a circa il 3.8%, pertanto inferiore alla deformazione a rottura del 30%.

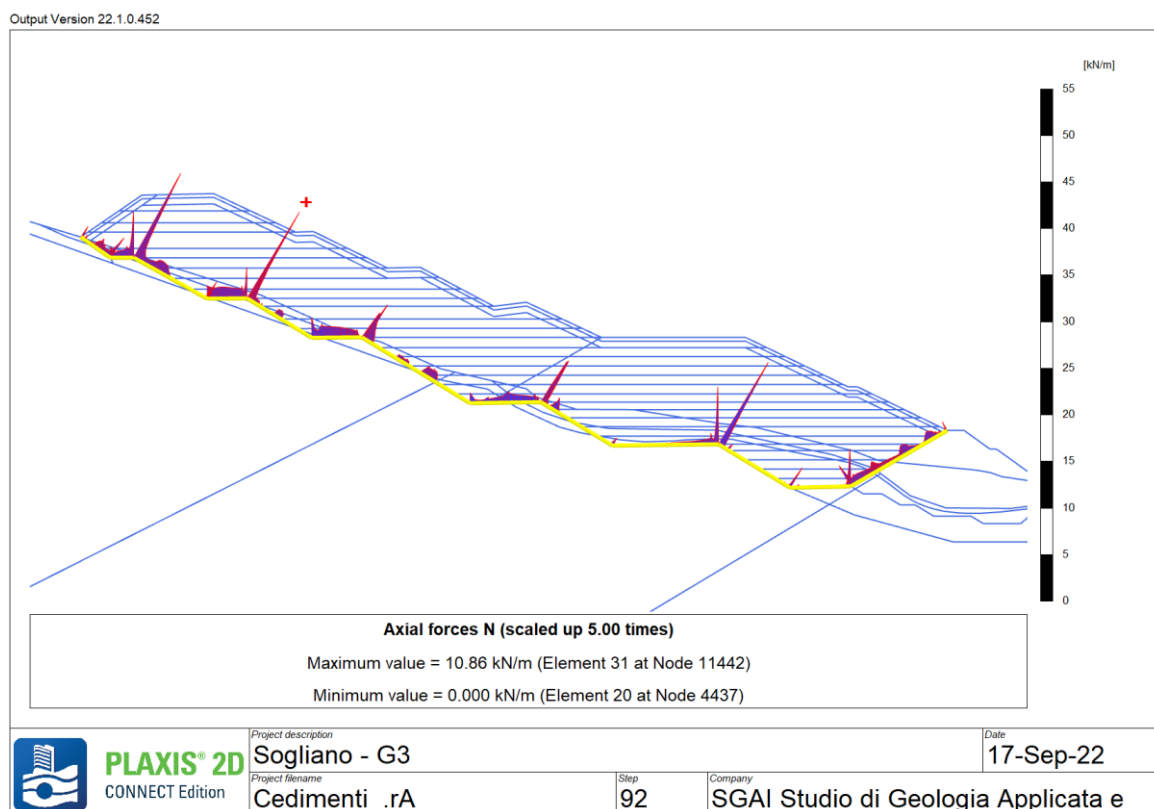


Figura 6-22 Fase Rifiuto 15: Trazione sulla geogriglia

Output Version 22.1.0.452

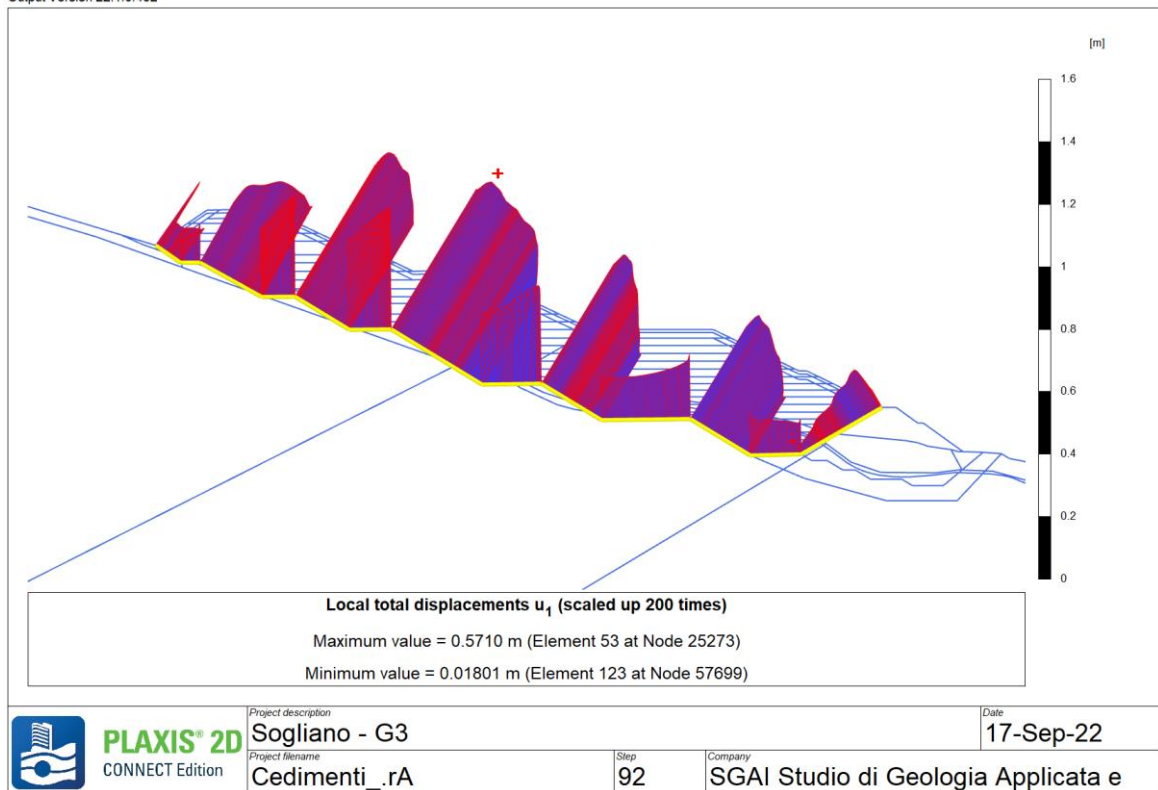


Figura 6-23 Fase Rifiuto 15: Estensione sulla geogriglia

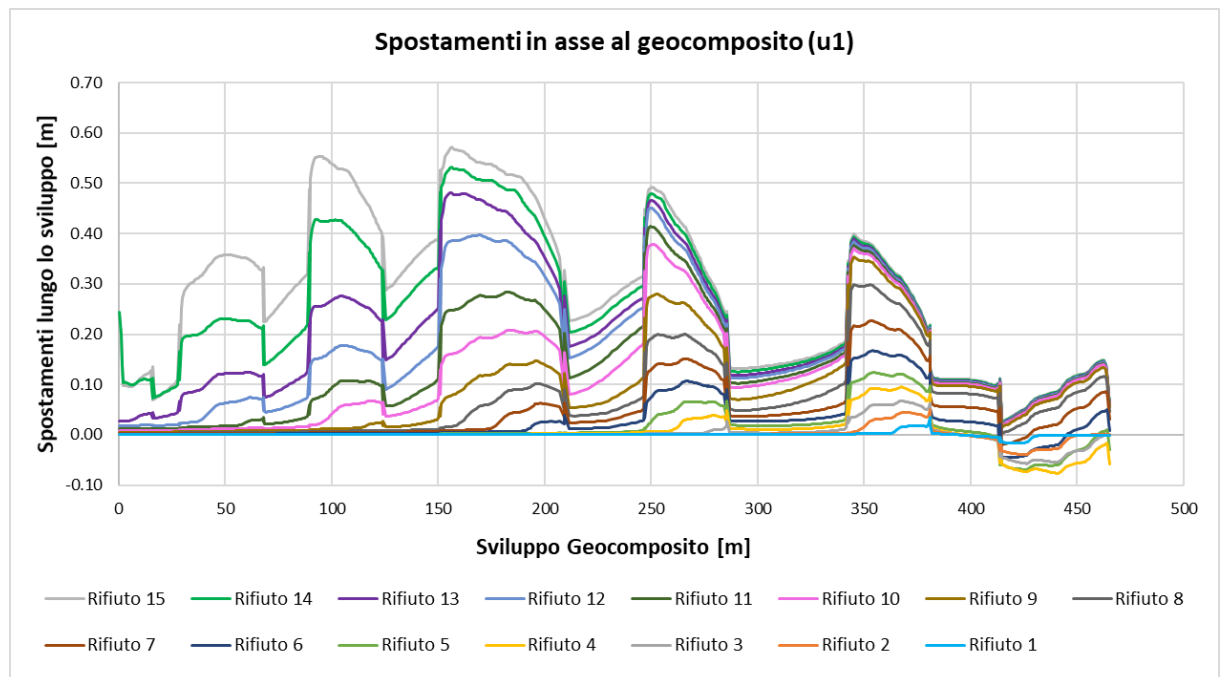


Figura 6-24 Estensione della geogriglia per fasi (Rifiuto 15 corrisponde a discarica completata)

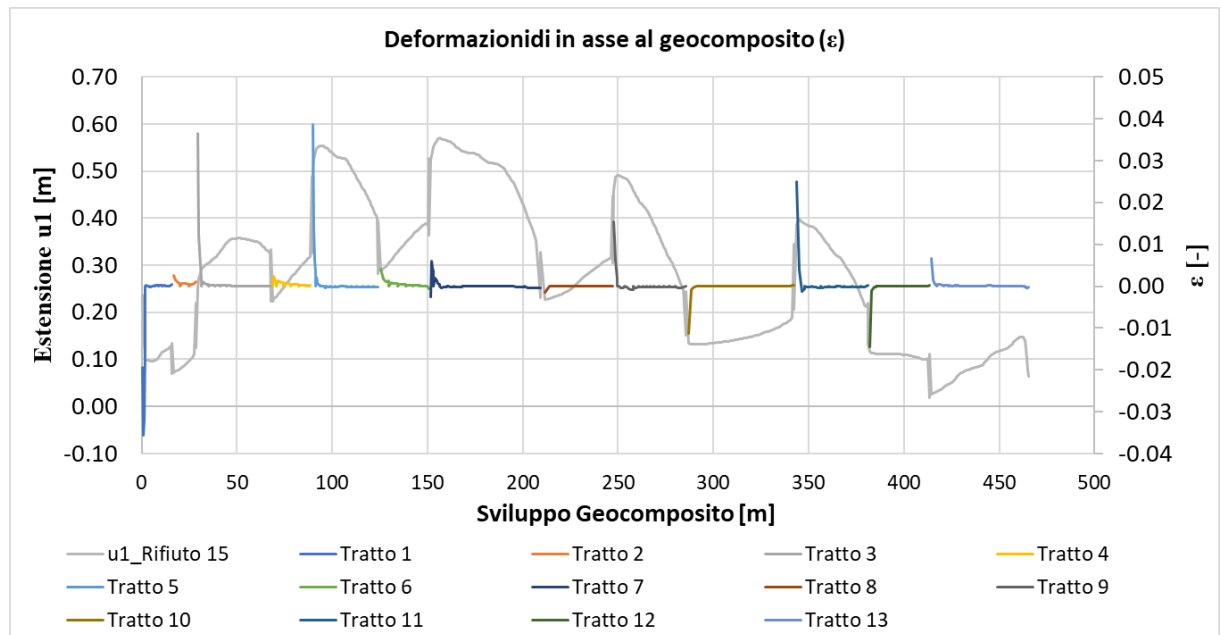



Figura 6-25 Deformazioni assiali geogriglia a discarica completata

	Sogliano Ambiente S.p.A. Discarica di rifiuti non pericolosi situata nel Comune di Sogliano al Rubicone (FC) denominata Ginestreto 3 - Progettazione definitiva Relazione di Calcolo	Doc.no. Ara G3 PD RC 03.02	
		Rev. 2	Date: Settembre-22
		Pag. 57 of 69	

7. Verifiche geotecniche dell'argine di valle

Le verifiche geotecniche dell'argine di valle, a meno di quelle di stabilità riportate al relativo capitolo, sono state eseguite sulla sezione F mediante il codice di calcolo plaxis adottando le medesime ipotesi di base considerate per le verifiche di stabilità, in quanto lo stesso è il metodo di calcolo utilizzato.

Essendo di interesse il solo argine di valle ed il terreno su cui si intesta, si sono adottate alcune semplificazioni utili all'esecuzione del calcolo rispetto a quanto fatto per le verifiche di stabilità:

- modellazione del geocomposito;
- inserimento di un'interfaccia superiore ed una inferiore che simulano rispettivamente, l'attrito del geocomposito con il terreno di sottofondo e con la sovrastante geomembrana. All'interfaccia superiore si sono attribuiti dei parametri di resistenza arbitrariamente molto bassi al fine di favorire uno scorrimento del rifiuto e, quindi, aumentare la spinta gravante sull'argine. In questo modo si vuole giungere alla determinazione di forze destabilizzanti maggiori rispetto a quelle reali, mantenendosi a favore di sicurezza.

All'interfaccia inferiore si sono attribuiti i valori di resistenza ottenuti sperimentalmente considerando il geocomposito steso sul substrato lato TNT.

- Attribuzione di un modello costitutivo lineare elastico al rifiuto, così da non avere problemi di plasticizzazione del relativo materiale ed evitare problematiche numeriche prive di significato. Questa è una semplificazione possibile in quanto in questa modellazione il rifiuto deve fungere solo da carico.

7.1. Parametri impiegati

In accordo a quanto anzidetto, i terreni e il terra calce sono modellati mediante legame costitutivo Mohr Coulomb (si veda paragrafo 5.2).

Il rifiuto è modellato mediante legame costitutivo elastico lineare caratterizzato da medesima rigidità ($E=1500\text{kPa}$) e coefficiente di Poisson ($\nu=0.33$) assegnati nelle altre analisi.

L'interfaccia superiore ha parametri arbitrariamente bassi (si veda in premessa) pari a $\varphi=10^\circ$ e $c=0\text{kPa}$ per le ragioni descritte in premessa e quella inferiore ha parametri pari a $\varphi=31.5^\circ$ e $c=0\text{kPa}$.

7.2. Fasi di calcolo

Le fasi di calcolo implementate sono le seguenti:

- Fase geostatica (Fase 0-1).
- Scavo (Fase 2): realizzazione dello scavo fino al raggiungimento la quota di imposta della discarica;
- Consolidamenti (Fase 3): realizzazione dell'argine di valle ed eventuale riprofilatura del profilo di scavo con terreno trattato a calce;
- Geogriglia (Fase 4): Inserimento del geocomposito e attivazione delle interfacce superiori ed inferiori;
- Rifiuto 1-15 (Fase 5-19): riempimento della discarica a step di circa 10m di materiale.
- Applicazione del carico sismico pseudostatico (Fase 20-21): considerando le due condizioni più gravose per l'argine di valle:
 - a. Fase 20: carico sismico $kh+kv+$
 - b. Fase 21: carico sismico $kh+kv-$

Dalle fasi 19 (discarica piena), 20 e 21 sono state determinate le tensioni normali e tangenziali agenti sull'argine di valle. Tali tensioni sono state composte per determinare il carico equivalente agente (per



mezzo del rifiuto) sul paramento di monte, da applicare successivamente in sede di verifica. Le tensioni sono state lette in corrispondenza dell'elemento di interfaccia che trasferisce i carichi all'argine. Questa operazione è stata necessaria per bypassare problemi numerici.

I carichi equivalenti gravanti sull'argine sono stati applicati come carichi distribuiti (si vedano Figura 7-6 - Figura 7-8) composti da una componente orizzontale (q_x) ed una componente verticale (q_y) determinati dai risultati riportati in Figura 7-9 - Figura 7-14, come segue:

$$q_{x(da\ \sigma_n)} = -\sigma_n \cdot \sin \theta$$

$$q_{x(da\ \tau)} = -\tau \cdot \cos \theta$$

$$q_{y(da\ \sigma_n)} = \sigma_n \cdot \cos \theta$$

$$q_{y(da\ \tau)} = -\tau \cdot \sin \theta$$

Dove

- σ_n è la tensione normale sull'interfaccia di segno negativo se di compressione pertanto verso il basso;
- τ è la tensione di sull'interfaccia in direzione degli assi locali, di segno positivo verso il basso;
- θ è l'inclinazione del paramento a monte dell'argine di valle pari a 30° .

Sono stati determinati, pertanto, una forza statica e due sismiche che sono state applicate rispettivamente alla:

- Fase 22: applicazione del carico statico equivalente alla condizione statica. In tale fase si è rimosso il rifiuto (sostituito completamente dal carico equivalente).
 - a. Analisi c/ϕ reduction per determinare il probabile cinematismo di scorrimento e il relativo fattore di sicurezza;
- Fase 23: applicazione del carico statico equivalente alla condizione sismica $kh+ kv+$. In tale fase si è rimosso il rifiuto (sostituito completamente dal carico equivalente).
 - b. Analisi c/ϕ reduction;
- Fase 24: applicazione del carico statico equivalente alla condizione sismica $kh+ kv-$. In tale fase si è rimosso il rifiuto (sostituito completamente dal carico equivalente).
 - c. Analisi c/ϕ reduction;

Nelle immagini seguenti si illustrano le fasi implementate.

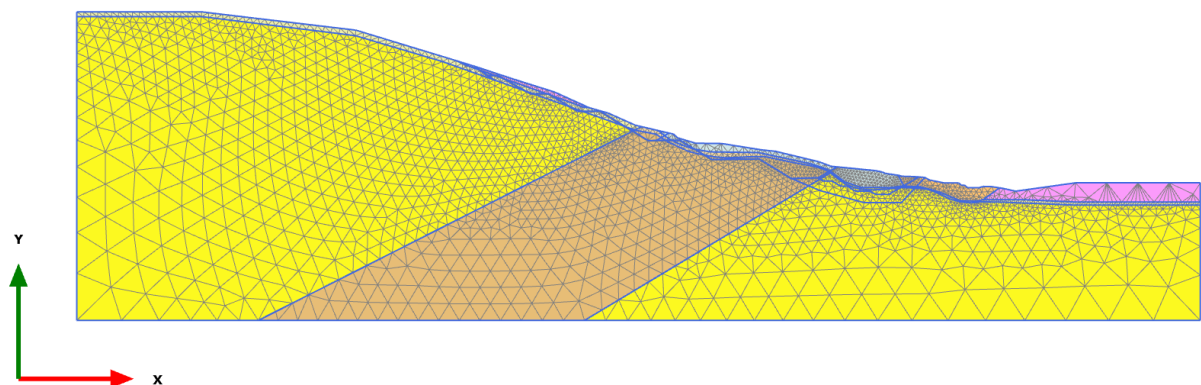


Figura 7-1 Fase Geostatica

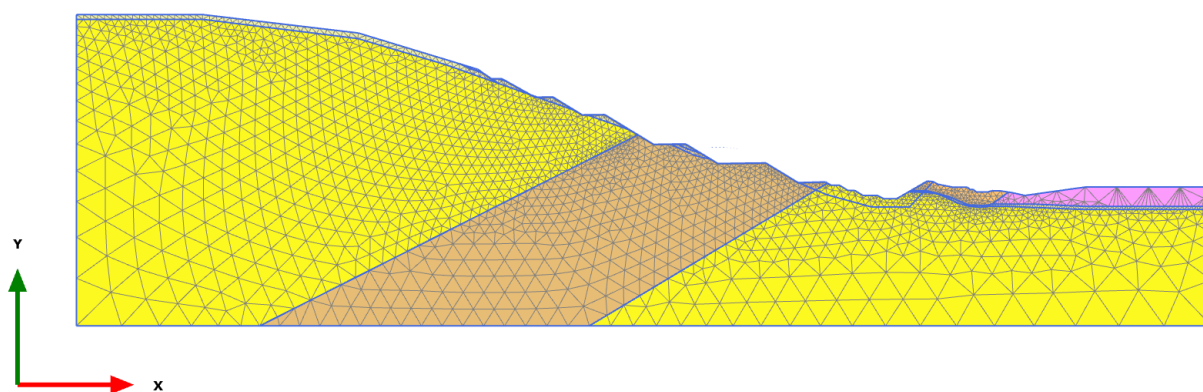


Figura 7-2 Fase Scavo

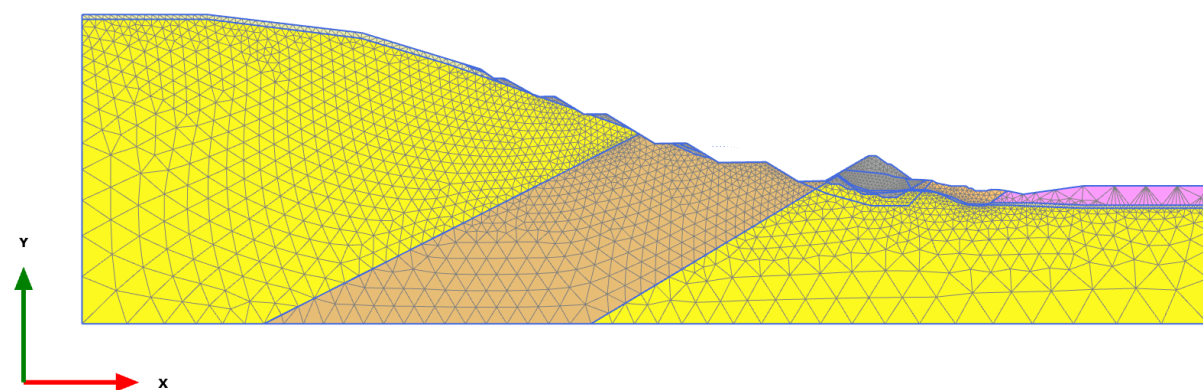


Figura 7-3 Fase Consolidamenti

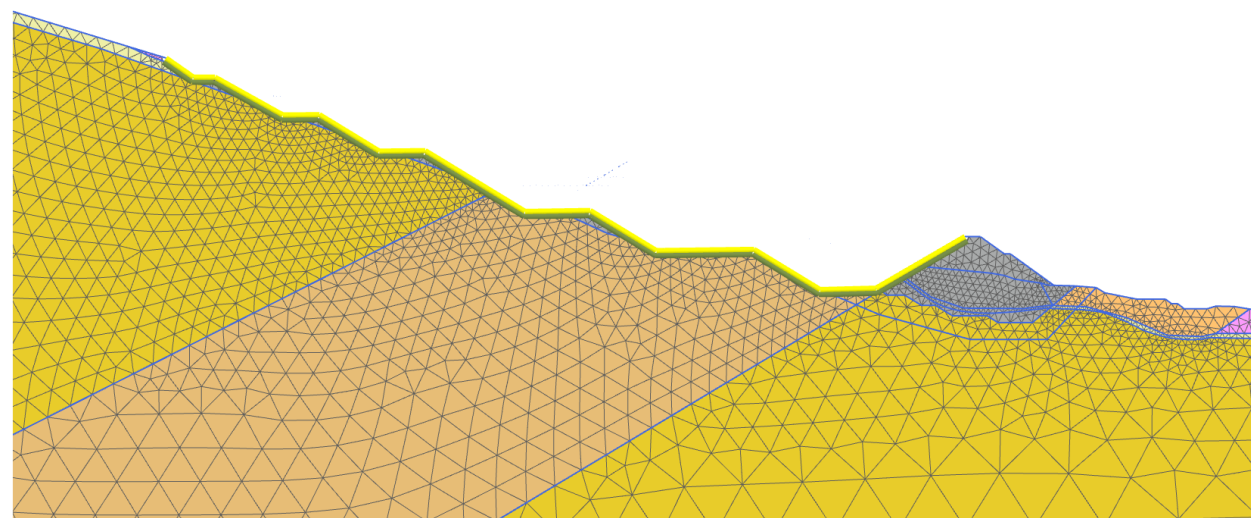


Figura 7-4 Fase Geogriglia

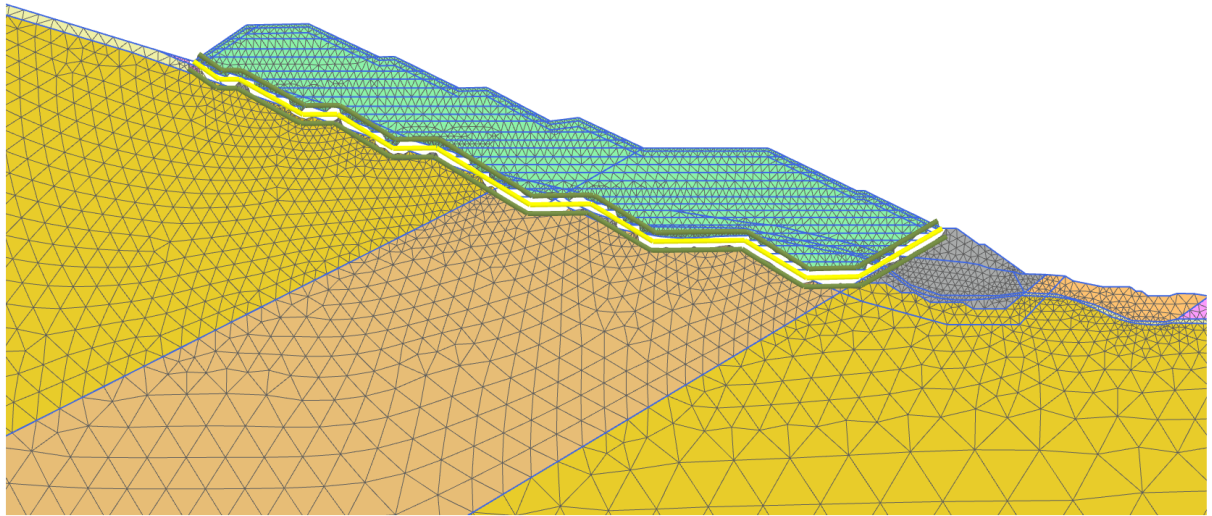


Figura 7-5 Fase Rifiuto 15 e applicazione carico sismico

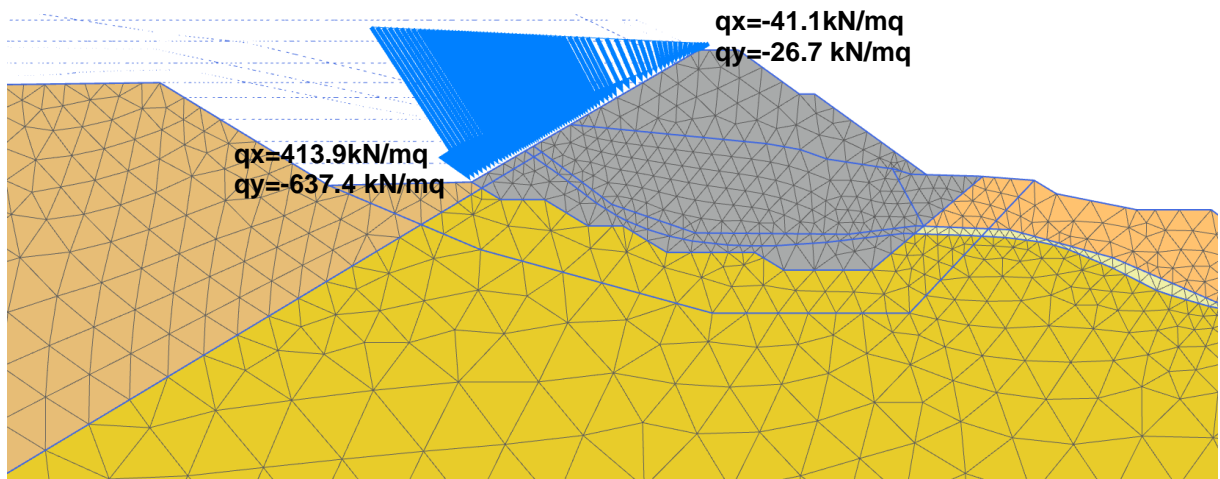


Figura 7-6 Applicazione carico equivalente in condizione statica

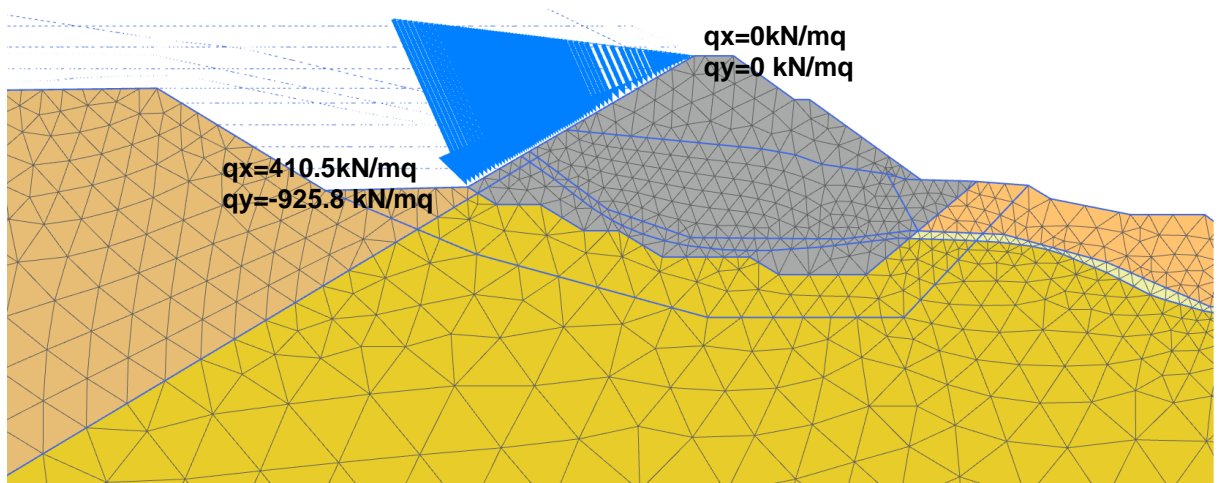


Figura 7-7 Applicazione carico equivalente in condizione sismica kh+kv+

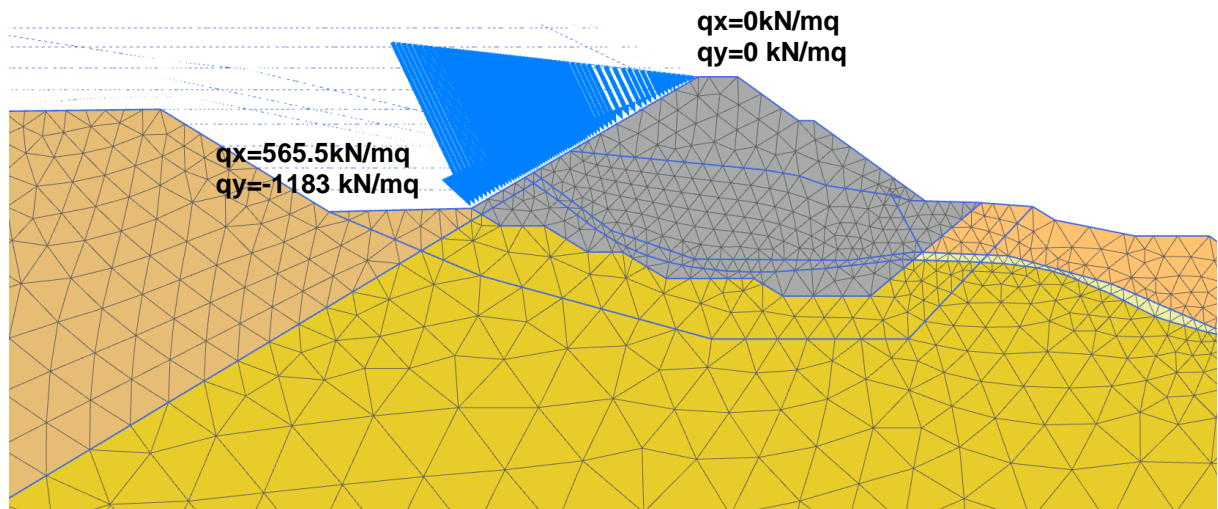


Figura 7-8 Applicazione carico equivalente in condizione sismica kh+kv-

7.3. Risultati

7.3.1 Spinte sull'argine di valle

Come anticipato le spinte agenti in condizioni statiche e sismiche sono state determinate osservando le tensioni normali e tangenziali agenti sull'interfaccia che si frappona tra l'argine e la discarica.

Nel seguito sono riportate tali tensioni che ai fini della loro applicazione come distribuzione statica equivalente sono state linearizzate. Nella prima figura è anche riportato il sistema di riferimento per la valutazione della direzione della τ .

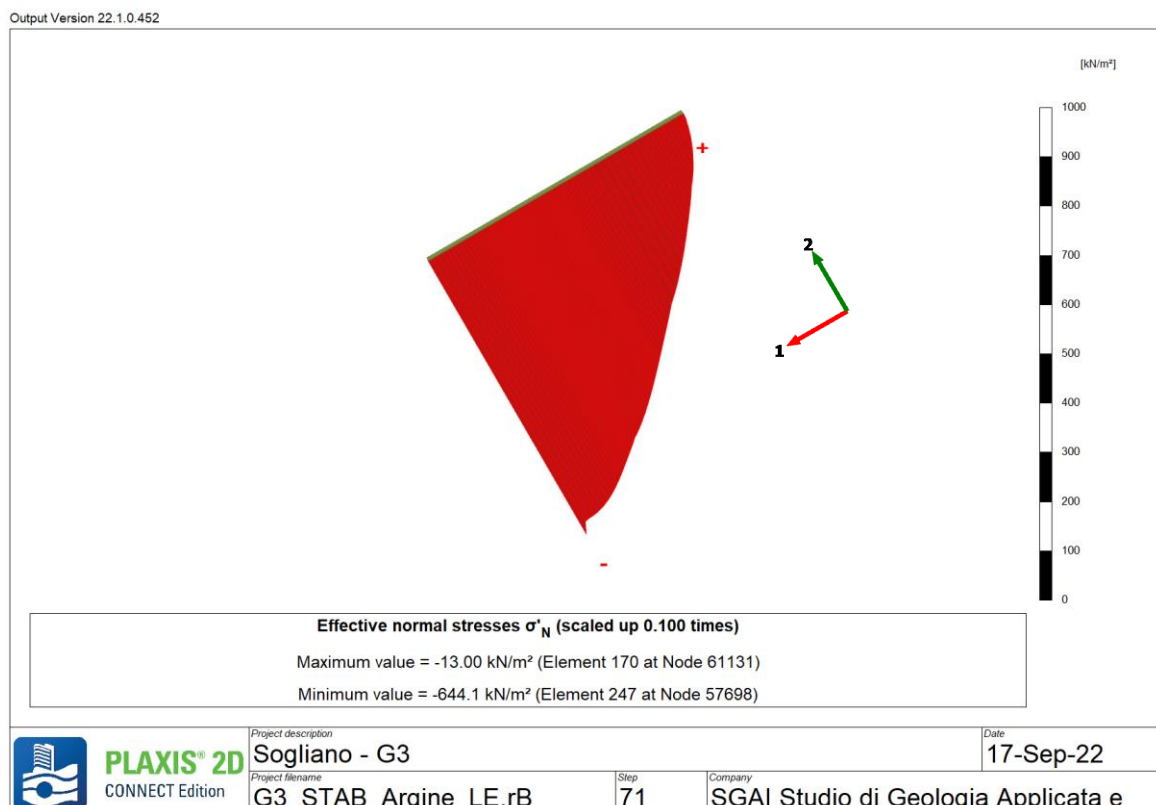


Figura 7-9 Tensione normale - Condizione Statica discarica piena

Output Version 22.1.0.452

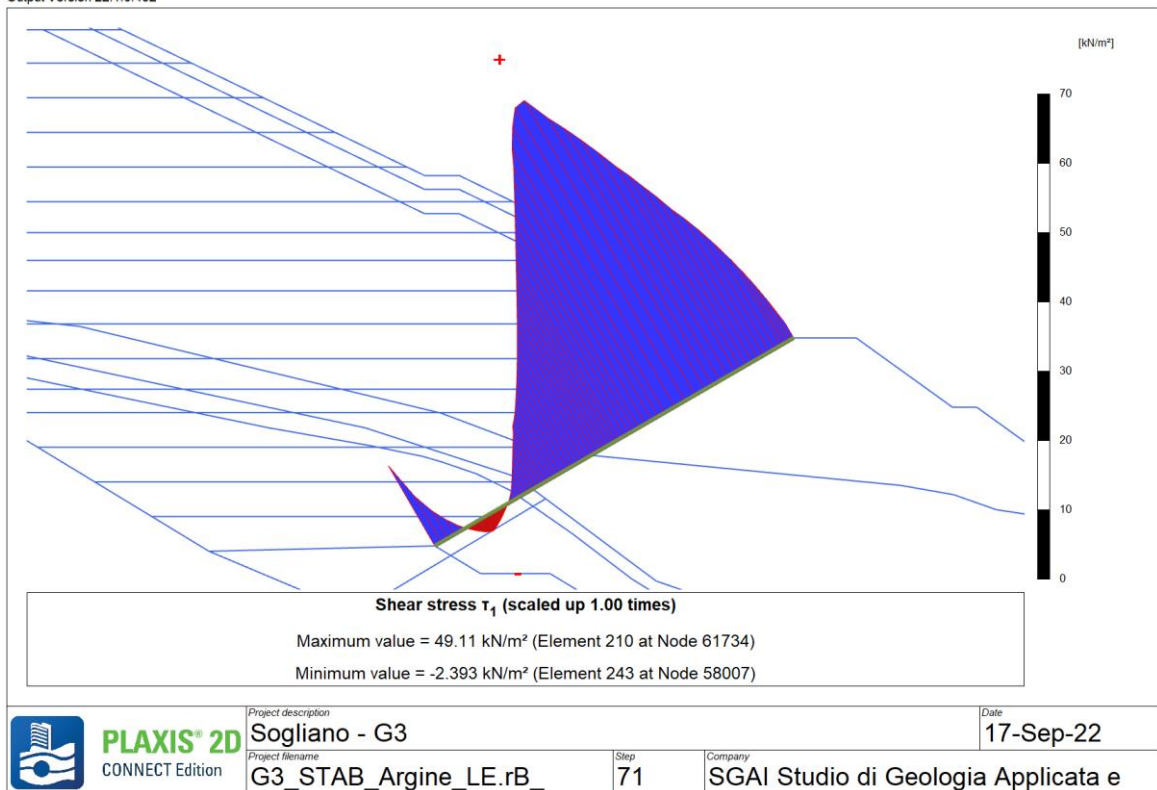


Figura 7-10 Tensione tangenziale - Condizione Statica discarica piena

Output Version 22.1.0.452

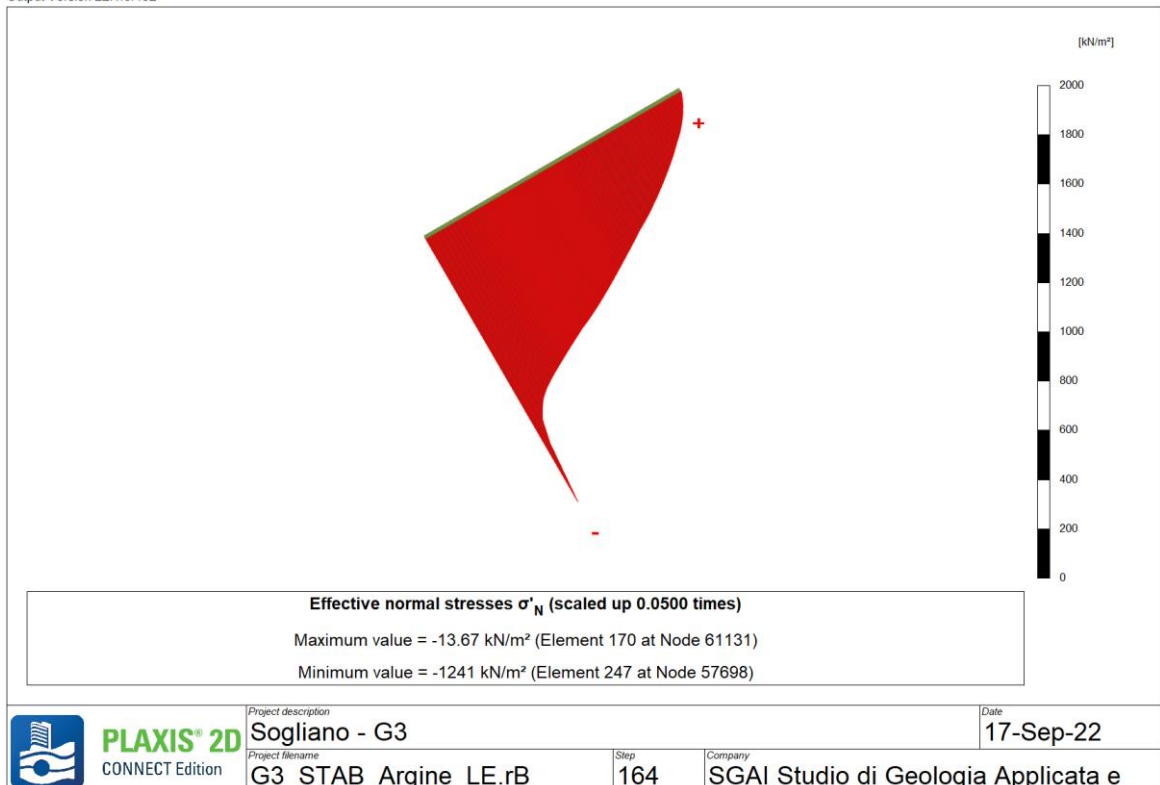


Figura 7-11 Tensione normale - Condizione sismica kh+kv+

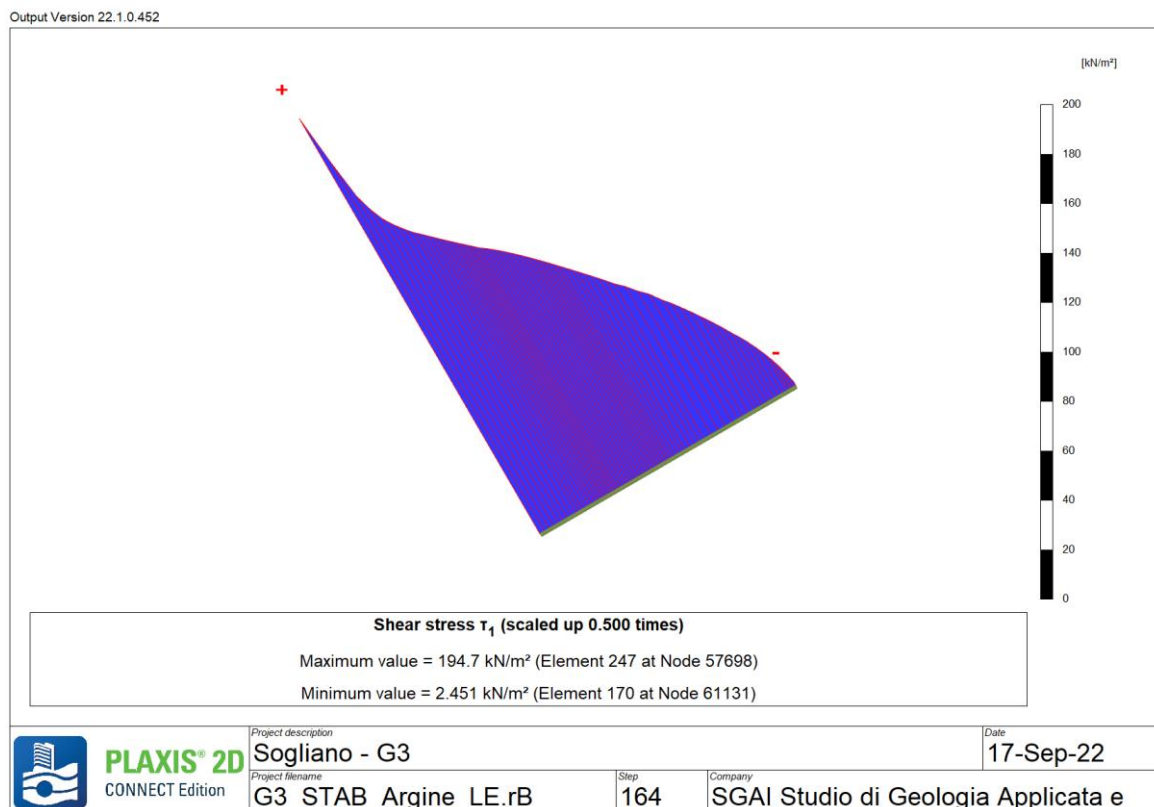


Figura 7-12 Tensione tangenziale - Condizione sismica kh+kv+

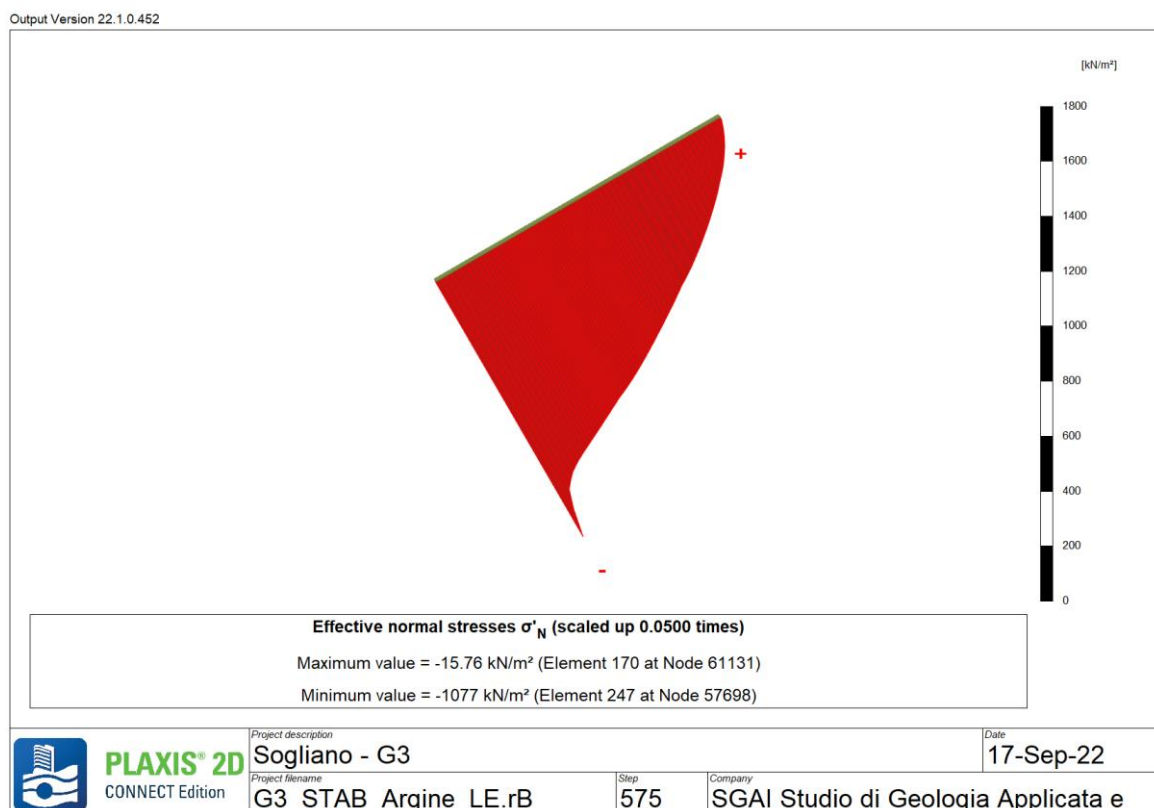


Figura 7-13 Tensione normale - Condizione sismica kh+kv-

Output Version 22.1.0.452

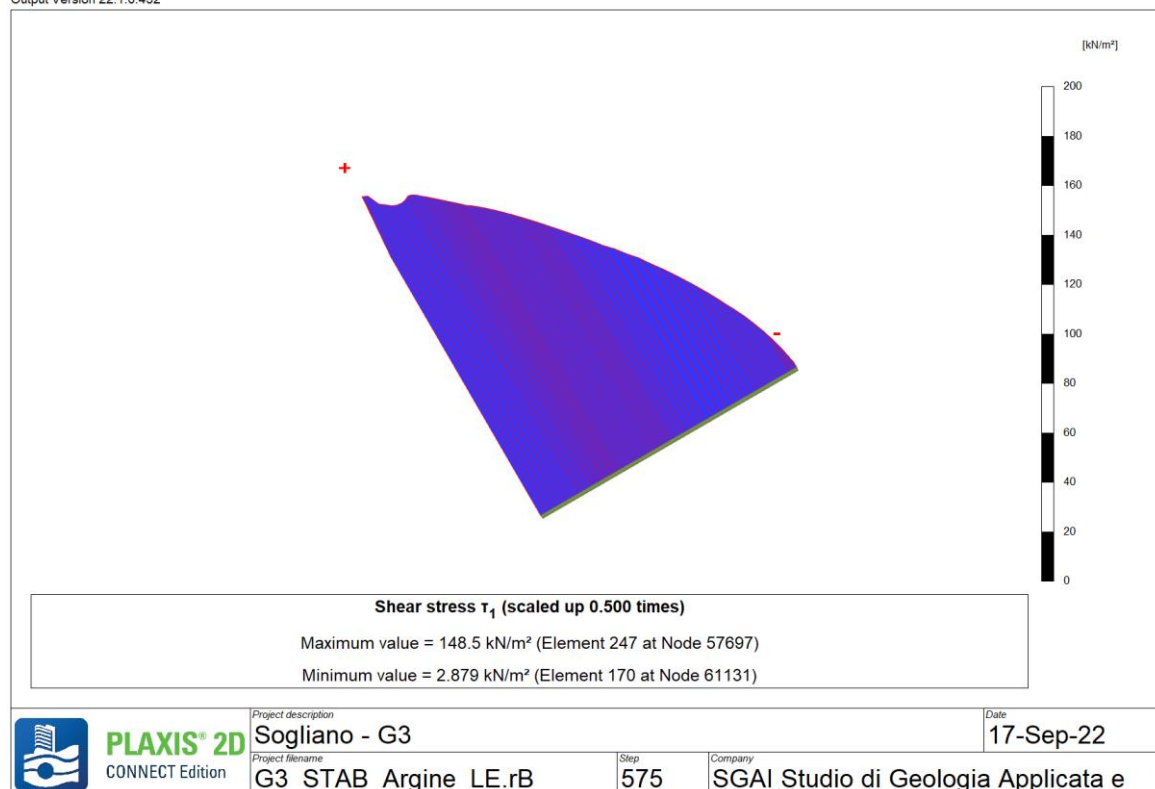


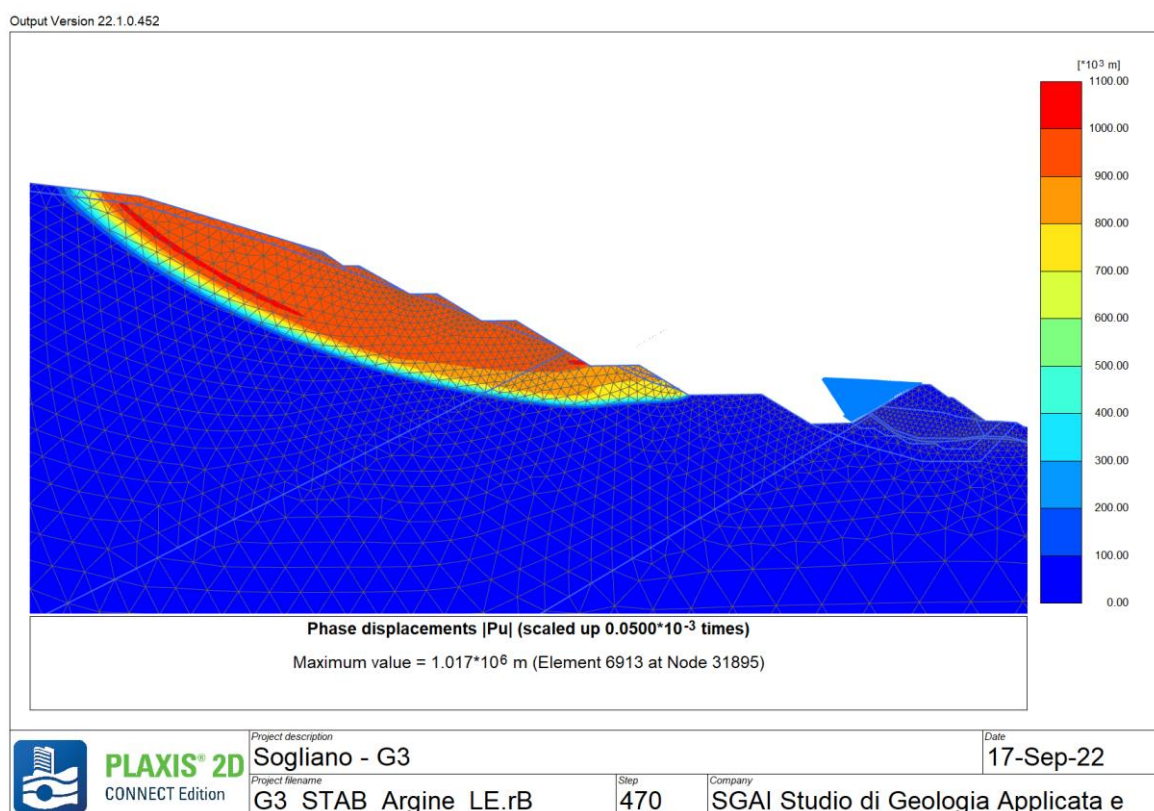
Figura 7-14 Tensione tangenziale - Condizione sismica kh+kv-

7.3.2 Verifiche dell'argine

Le immagini seguenti mostrano il risultato delle verifiche ed il meccanismo di rottura più gravoso individuato alle condizioni statiche e sismiche eseguite. I fattori di sicurezza raggiunti circa uguali a 1.7, superiori a quelli previsti da normativa per le verifiche geotecniche di un'opera di sostegno.

I cinematismi individuati, però, non riguardano l'argine, che sarà, pertanto, caratterizzato da maggiori coefficienti di sicurezza. In considerazione di ciò, l'argine si può ritenere verificato.

Condizione statica – FS = 1.7



Calculation information

Step info				
Multipliers				
Soil weight			ΣM_{Weight}	1.000
Strength reduction factor	M_{sf}	-0.08804E-3	ΣM_{sf}	1.702
Time	Increment	0.000	End time	0.000

Figura 7-15 Superficie di stabilità - Statica



Sogliano Ambiente S.p.A.

Discarica di rifiuti non pericolosi situata nel Comune di Sogliano al Rubicone (FC) denominata Ginestreto 3
- Progettazione definitiva
Relazione di Calcolo

Doc.no.

Ara G3 PD RC 03.02

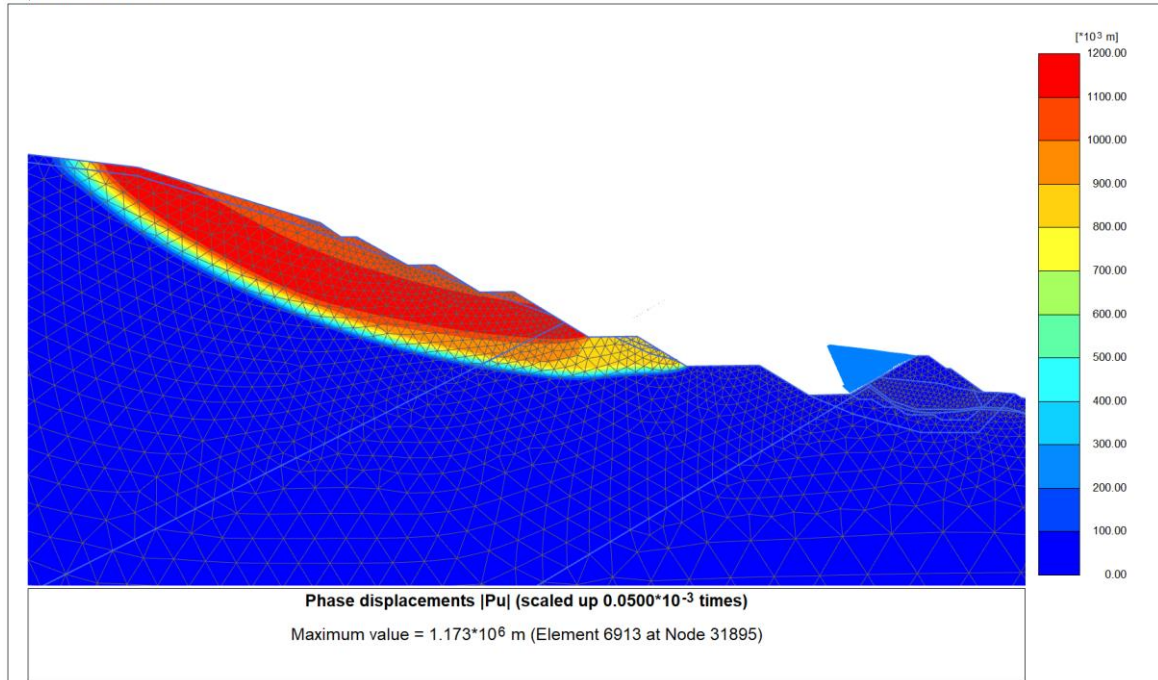
Rev. 2

Date: Settembre-22

Pag. 66 of 69

Condizione sismica kh+kv+ – FS = 1.7

Output Version 22.1.0.452



PLAXIS® 2D
CONNECT Edition

Project description

Sogliano - G3

Date

17-Sep-22

Project filename

G3_STAB_Argine_LE.rB_

Step

268

Company

SGAI Studio di Geologia Applicata e



Calculation information

+ Step info				
- Multipliers				
Soil weight			ΣM_{Weight}	1.000
Strength reduction factor	M_{sf}	-0.9077E-6	ΣM_{sf}	1.703
Time	Increment	0.000	End time	0.000

Figura 7-16 Superficie di stabilità – Sismica kh+kv+



Sogliano Ambiente S.p.A.

Discarica di rifiuti non pericolosi situata nel Comune di Sogliano al Rubicone (FC) denominata Ginestreto 3
- Progettazione definitiva
Relazione di Calcolo

Doc.no.

Ara G3 PD RC 03.02

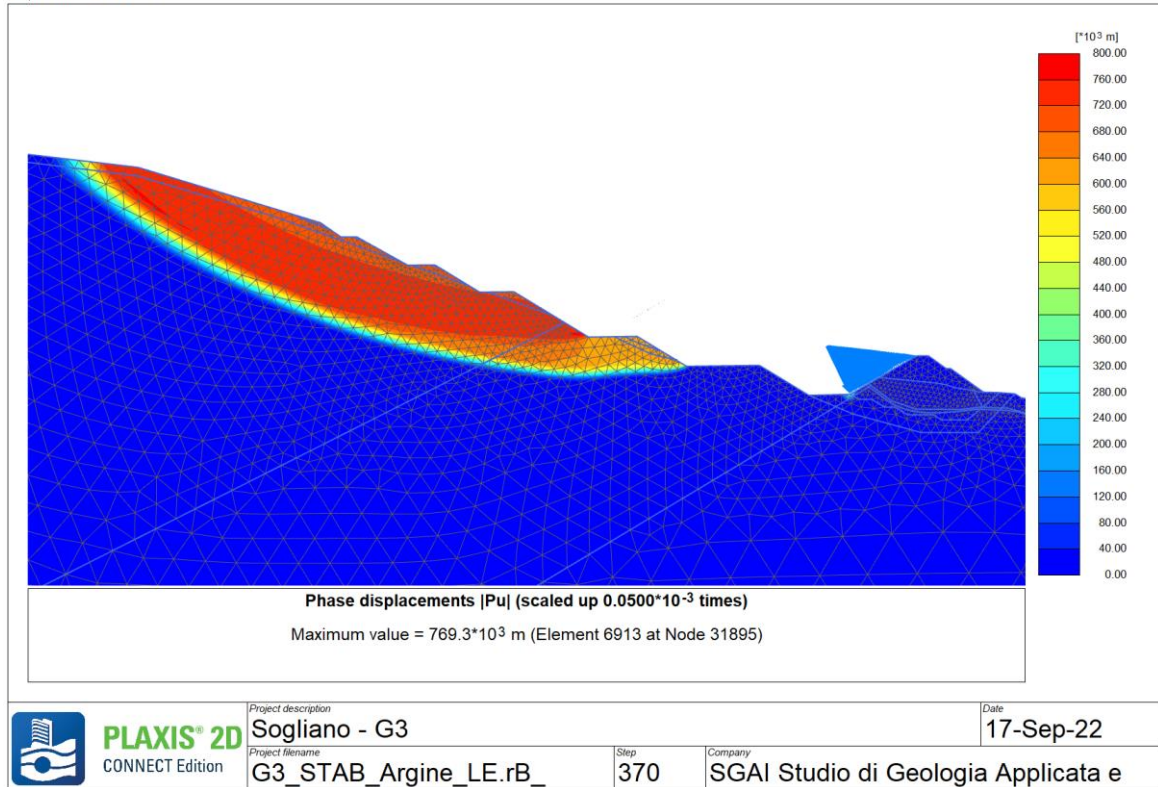
Rev. 2

Date: Settembre-22

Pag. 67 of 69

Condizione sismica kh+kv- – FS = 1.7


Output Version 22.1.0.452



Calculation information

Step info				
Multipliers				
Soil weight			ΣM_{Weight}	1.000
Strength reduction factor	M_{sf}	-3.047E-6	ΣM_{sf}	1.701
Time	Increment	0.000	End time	0.000

Figura 7-17 Superficie di stabilità – Sismica kh+kv-

	Sogliano Ambiente S.p.A. Discarica di rifiuti non pericolosi situata nel Comune di Sogliano al Rubicone (FC) denominata Ginestreto 3 - Progettazione definitiva Relazione di Calcolo	Doc.no. Ara G3 PD RC 03.02	
		Rev. 2	Date: Settembre-22
		Pag. 68 of 69	

8. Piano di Monitoraggio

L'opera nella sua complessità può essere vista nelle varie fasi della sua vita:

- a. scavi e predisposizione per ricevere il materiale
- b. fasi di abbancamento, dove, partendo dal basso, si giungerà alla configurazione finale in più anni, si possono vedere su due stralci qui di interesse:
 - i. primo abbancamento fino alla quota argine
 - ii. completamento
- c. fase finale

Per ognuna di queste fasi è necessario monitorare il comportamento da un punto di vista geotecnico con il fine di verificare che il comportamento atteso reale sia riferibile ai calcoli analitici e modellazioni geotecniche effettuate.


Per fare questo si sono definiti più punti topografici definitivi, quindi non interessati né dagli scavi né dai riempimenti, che saranno riferimento costante per tutte le fasi ante-operam e post-operam.

Al monitoraggio topografico semplice e affidabile si assoceranno misure inclinometriche.

E' previsto un inclinometro di monte e più inclinometri sull'argine e a valle di questo. Anche questi sono configurati per poter aver misure durante l'intera vita dell'opera.

All'argine saranno associate anche letture topografiche in sommità, a mezza costa e a valle. Questo sia per dare un riferimento univoco alle letture inclinometriche sia per verificare gli assetamenti nel tempo, anche in linea con le condizioni critiche dei diversi meccanismi di stato limite ultimo studiati.

Allegata la tavola relativa al monitoraggio.

	Sogliano Ambiente S.p.A. Discarica di rifiuti non pericolosi situata nel Comune di Sogliano al Rubicone (FC) denominata Ginestreto 3 - Progettazione definitiva Relazione di Calcolo	Doc.no. Ara G3 PD RC 03.02	
		Rev. 2	Date: Settembre-22
		Pag. 69 of 69	

9. Conclusioni

In virtù di quanto sopra premesso, con particolare riferimento alle caratteristiche geotecniche del sito e ai carichi agenti, le opere di progetto risultano conformi ai criteri di progettazione e di resistenza indicati nella normativa di riferimento.