



Azienda Servizi Ambientali S.C.p.A.

Società del Gruppo Herambiente

Via Saliceto n.43/a Castel Maggiore (Bologna)

## Discarica per rifiuti non pericolosi di Castel Maggiore (BO)

### COMPLETAMENTO DELLA VALORIZZAZIONE A SCOPO ENERGETICO DEL SITO

CON INTEGRAZIONE DELL'IMPIANTO FOTOVOLTAICO ESISTENTE  
MEDIANTE COSTITUZIONE DI UNA SECONDA UNITÀ ENERGETICA

### PROGETTO DEFINITIVO

### Relazione geotecnica

Firmato digitalmente da:


MINGOZZI DANIELE


Firmato il 14/06/2024 12:59

Seriale Certificato: 3240569

Valido dal 27/01/2024 al 27/01/2027


InfoCamere Qualified Electronic Signature CA

Progetto: Ing. Alberto Biondini Via Emilia Est, 985 41122 MODENA		Progetto Fotovoltaico: <b>Studio Associato Ne.Ma</b> Ingegneria Ambiente Sicurezza Via Cavour, 67 - 40026 Imola (BO) P.IVA 02653670394 Ing. Roberta Mazzolani		Geologica - Geotecnica:  Prof. Ing. Gianfranco Marchi Ing. Daniele Mingozi Ing. Francesco Carlomagno Ing. Smeralda Saccà		Studio di Impatto Ambientale:  Ing. Paolo Zoppellari Ing. Matteo Monti	
Approvato	Ing. Maurizio Bragaglia (ASA S.C.p.A.)						
Controllato							
Redatto							
Rev.			Data	Giugno 2024		Doc. n. <b>D3</b>	
Cod. Doc.			Scala				


	<b>Committente:</b> Azienda Servizi Ambientali SpA	<b>Documento:</b> Relazione geotecnica
	<b>Lavoro:</b> Completamento della valorizzazione a scopo energetico del sito con integrazione dell'impianto fotovoltaico esistente mediante costituzione di una seconda unità energetica	Codice: S24028-PE-RE001-0 Data: Maggio 2024

## INDICE

<b>1</b>	<b>PREMESSA.....</b>	<b>3</b>
<b>2</b>	<b>ILLUSTRAZIONE SINTETICA DEGLI ELEMENTI ESSENZIALI DEL PROGETTO STRUTTURALE.....</b>	<b>8</b>
2.1	DESCRIZIONE DEL CONTESTO EDILIZIO E DELLE CARATTERISTICHE GEOLOGICHE, MORFOLOGICHE E IDROGEOLOGICHE DEL SITO OGGETTO DI INTERVENTO.....	8
2.1.1	Ubicazione impianto.....	8
2.1.2	Classificazione (D.Lgs. n° 36/2003; D.M. 29/09/2010).....	8
2.1.3	Operazioni di gestione rifiuti svolte (D.Lgs. n° 152/2006, parte quarta, allegati B e C e s.m.i.).....	8
2.1.4	Caratteristiche geologiche, morfologiche e idrogeologiche del sito oggetto di intervento.....	8
2.2	DESCRIZIONE GENERALE DELLA STRUTTURA.....	9
2.3	NORMATIVA TECNICA DI RIFERIMENTO .....	12
2.4	DEFINIZIONE DEI PARAMETRI DI PROGETTO .....	13
2.4.1	Vita nominale.....	13
2.4.2	Classe d'uso.....	13
2.4.3	Periodo di riferimento.....	13
2.4.4	Zona sismica del sito.....	14
2.4.5	Coordinate geografiche del sito.....	14
2.4.6	Definizione dell'azione sismica di riferimento.....	14
2.4.7	Spettri elastici di accelerazione.....	15
2.4.8	Azioni sulla costruzione .....	16
2.4.9	Azione sismica.....	16
2.4.10	Azioni eccezionali.....	16
2.4.11	Pressioni interstiziali .....	17
2.5	DESCRIZIONE DEI MATERIALI E DEI PRODOTTI PER USO STRUTTURALE .....	17
2.6	CRITERI DI PROGETTAZIONE E DI MODELLAZIONE .....	17
2.7	COMBINAZIONI, COEFFICIENTI PARZIALI E CRITERI DI VERIFICA.....	17
2.8	METODI DI ANALISI .....	18
2.9	CARATTERISTICHE E AFFIDABILITÀ DEL CODICE DI CALCOLO .....	18
<b>3</b>	<b>CARATTERIZZAZIONE GEOTECNICA .....</b>	<b>19</b>
3.1	PREMESSA.....	19
3.2	TERRENI NATURALI.....	19
3.2.1	Studio Centrogeo(2011).....	19
3.2.1.1	Analisi di Laboratorio Geotecnico .....	21
3.2.1.2	Granulometria.....	21
3.2.1.3	Proprietà indice .....	22
3.2.1.4	Parametri di resistenza al taglio.....	25
3.2.1.5	Caratteristiche di deformabilità.....	28
3.3	RIFIUTI ABBANCATI .....	31
3.3.1	Studio Centrogeo, 2011.....	31
3.3.1.1	Parametri di resistenza al taglio.....	31
3.3.1.2	Caratteristiche di deformabilità.....	33
3.3.1.3	Analisi granulometrica.....	33
3.3.2	Studio Enser, 2013 .....	34
1.1.1.1	Rifiuti con codice CER 190112.....	34

	<b>Committente:</b> Azienda Servizi Ambientali SpA	<b>Documento:</b> Relazione geotecnica
	<b>Lavoro:</b> Completamento della valorizzazione a scopo energetico del sito con integrazione dell'impianto fotovoltaico esistente mediante costituzione di una seconda unità energetica	Codice: S24028-PE-RE001-0 Data: Maggio 2024

1.1.1.2	Rifiuti con codice CER 190304* .....	35
<b>4</b>	<b>PARAMETRI GEOTECNICI CARATTERISTICI.....</b>	<b>36</b>
4.1	TERRENI NATURALI.....	36
4.2	RIFIUTI ABBANCATI .....	36
4.3	FALDA DI RIFERIMENTO .....	37
<b>5</b>	<b>CEDIMENTI DEI TERRENI DI SOTTOFONDAZIONE.....</b>	<b>38</b>
5.1	MODELLO DI CALCOLO.....	38
5.2	STIMA DEI CEDIMENTI .....	41
5.3	DECORSO CEDIMENTI NEL TEMPO .....	49
<b>6</b>	<b>CEDIMENTI INDOTTI SUL CORPO DEL RILEVATO</b>	
<b>AUTOSTRADALE.....</b>		<b>55</b>
<b>7</b>	<b>ANALISI DI STABILITA' DEL CORPO DELLA DISCARICA .....</b>	<b>61</b>
7.1	PREMESSA.....	61
7.2	CONDIZIONI DI ANALISI.....	63
7.2.1	<i>Individuazione delle sezioni significative .....</i>	<i>64</i>
7.3	VERIFICHE DI STABILITÀ ALL'EQUILIBRIO LIMITE.....	69
7.4	RISULTATI STABILITÀ GLOBALE.....	72
7.4.1	<i>Sezione G-G.....</i>	<i>72</i>
7.4.2	<i>Sezione C-C.....</i>	<i>76</i>
7.4.2.1	Condizione statica .....	76
7.4.2.2	Condizione sismica .....	81
7.5	RISULTATI STABILITÀ LOCALE.....	84
7.5.1	<i>Sezione G-G.....</i>	<i>84</i>
7.5.2	<i>Sezione C-C.....</i>	<i>87</i>
7.5.2.1	Condizione statica .....	87
7.5.2.2	Condizione sismica .....	90
7.6	CONFERMA MEDIANTE ANALISI DINAMICHE AVANZATE .....	93
7.6.1	<i>Definizione dell'input sismico.....</i>	<i>93</i>
7.6.2	<i>Analisi Risposta sismica locale RSL 1D.....</i>	<i>95</i>
7.6.2.1	Risultati analisi 1D .....	100
7.6.3	<i>Definizione dei parametri geotecnici-sismici per l'analisi dinamica 2D .....</i>	<i>107</i>
7.6.4	<i>Analisi dinamica 2D di stabilità .....</i>	<i>112</i>
7.6.4.1	Risultati 000046xa_037019CastelMaggiore.....	114
7.6.4.2	Risultati 000126xa_037019CastelMaggiore.....	117
7.6.4.3	Risultati 000354xa_037019CastelMaggiore.....	121
<b>8</b>	<b>CONCLUSIONI .....</b>	<b>125</b>

	<b>Committente:</b> Azienda Servizi Ambientali SpA	<b>Documento:</b> Relazione geotecnica
	<b>Lavoro:</b> Completamento della valorizzazione a scopo energetico del sito con integrazione dell'impianto fotovoltaico esistente mediante costituzione di una seconda unità energetica	Codice: S24028-PE-RE001-0 Data: Maggio 2024

## 1 PREMESSA

Il presente documento costituisce la relazione geotecnica del progetto di *"Completamento della valorizzazione a scopo energetico del sito con integrazione dell'impianto fotovoltaico esistente mediante costituzione di una seconda unità energetica"* della discarica per rifiuti speciali non pericolosi di Castel Maggiore (BO), gestita dall'Azienda Servizi Ambientali SCpA.

La coltivazione della discarica ebbe inizio negli anni 90 del secolo scorso come tombamento di alcuni invasi di una precedente cava di argilla. Nel 2004 iniziò il riempimento del cosiddetto III settore di forma pressoché rettangolare e posto nella parte meridionale del comparto. Attorno al 2010, le nuove esigenze di stoccaggio dei rifiuti evidenziarono la necessità nuove volumetrie e fu così proposto un ampliamento dell'impianto consistente in una sopraelevazione della discarica ipogea allora in coltivazione. Questo fu approvato nell'anno 2011 con delibera della Giunta Provinciale di Bologna n°181 del 26/04/2011 e s.m.i. Durante l'istruttoria AIA, il progetto aveva ottenuto dal SUAP dell'Unione Reno Galliera l'autorizzazione sismica con provvedimento finale unico prot. N° 3031 del 08/03/2011.

Particolarmente curato fu lo studio morfologico della sopraelevazione per consentire un inserimento paesaggistico concorde con il territorio di appartenenza, che porto a conformare la collina di abbancamento con due colmi laterali (lato sud e nord) intervallati un impluvio prossimo al colmo nord.

In quell'occasione, le tematiche geologiche, idrogeologiche e geotecniche erano state approfondite dal Dott. Geol. Gian Piero Mazzetti in un unico documento denominato *"Relazione geologico tecnica idrogeologica e sismica"*.


Nel 2013 è stata redatta una variante in corso d'opera sostanziale per le sole parti strutturali<sup>1</sup> consistente in una rimodulazione delle dimensioni delle arginature perimetrali realizzate, secondo il progetto Mazzetti, in "rifiuti con buone caratteristiche meccaniche". La variante è stata redatta dall'Ing. Gianfranco Marchi che ha aggiornato le sole parti oggetto di variante (le verifiche di stabilità del corpo della discarica ed alcuni elaborati grafici). La parte geologica è stata curata dal Dott. Geol. Gianluca Benedetti.

Nel 2015 è stata redatta una variante in corso d'opera sostanziale<sup>2</sup> che ha previsto un aumento della volumetria all'interno del medesimo perimetro di intervento definito

<sup>1</sup> I lavori relativi a questa variante sono stati denominati *"Rimodulazione delle dimensioni delle arginature - III settore"* e hanno ottenuto l'autorizzazione sismica prot. N° 25343 del 28/11/2013.

<sup>2</sup> I lavori relativi a questa variante sono stati denominati *"Ridefinizione del III settore della discarica"* e hanno ottenuto l'autorizzazione sismica prot. N° 626 del 11/01/2016.



	<b>Committente:</b> Azienda Servizi Ambientali SpA	<b>Documento:</b> Relazione geotecnica
	<b>Lavoro:</b> Completamento della valorizzazione a scopo energetico del sito con integrazione dell'impianto fotovoltaico esistente mediante costituzione di una seconda unità energetica	Codice: S24028-PE-RE001-0 Data: Maggio 2024

dalla AIA del 2011 secondo una morfologia determinata lasciando invariate le pendenze delle scarpate perimetrali e definendo nuove quote per i crinali della collina che compongono il corpo principale. In altri termini si è realizzato un aumento locale delle quote dell'abbancamento all'interno del medesimo sedime ovvero senza ampliamenti laterali di sorta.

Nel 2020 è stata redatta una variante in corso d'opera sostanziale che ha previsto un aumento della volumetria all'interno del medesimo perimetro di intervento definito dalla AIA del 2011 ancora secondo una morfologia determinata lasciando invariate le pendenze delle scarpate perimetrali e definendo nuove quote per i crinali della collina che compongono il corpo principale. Questo ad eccezione della scarpata Sud che sarà traslata verso Sud e regolarizzata portando la sua pendenza a 10°, sempre restando all'interno del perimetro della discarica ipogea. Anche in questo caso, è stato realizzato un aumento locale delle quote dell'abbancamento all'interno del medesimo sedime ovvero senza ampliamenti laterali di sorta.

Recentemente è stato sviluppato un progetto di valorizzazione del sito della discarica di ASA che prevede la costruzione di un ampio impianto di produzione di energia elettrica mediante pannelli fotovoltaici sul sedime del I e del II settore. Con il presente intervento si intende completare l'azione di valorizzazione energetica del sito mediante la costituzione di una seconda unità energetica posta sulla sommità del corpo discarica del III settore. Per realizzare ciò, sarà necessario apportare modifiche morfologiche alla porzione sommitale dell'abbancamento per garantire una forma adeguata, ovvero il più regolare possibile, per l'installazione dei pannelli fotovoltaici

Come mostrato nella Figura 1-2 l'adeguamento morfologico di progetto viene realizzato mediante l'aggiunta della porzione colorata in rosso e posta sulla sella del solido previsto dal precedente progetto del 2020 di cui alla Figura 1-1.

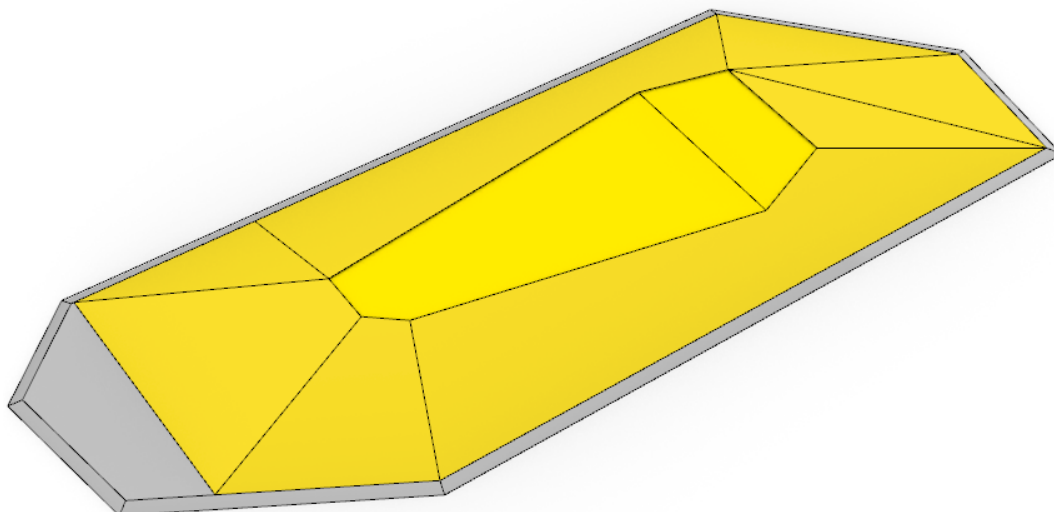



Figura 1-1. Volumetria del progetto 2020.

 <b>enser</b>	<b>Committente:</b> Azienda Servizi Ambientali SpA	<b>Documento:</b> Relazione geotecnica
	<b>Lavoro:</b> Completamento della valorizzazione a scopo energetico del sito con integrazione dell'impianto fotovoltaico esistente mediante costituzione di una seconda unità energetica	Codice: S24028-PE-RE001-0 Data: Maggio 2024

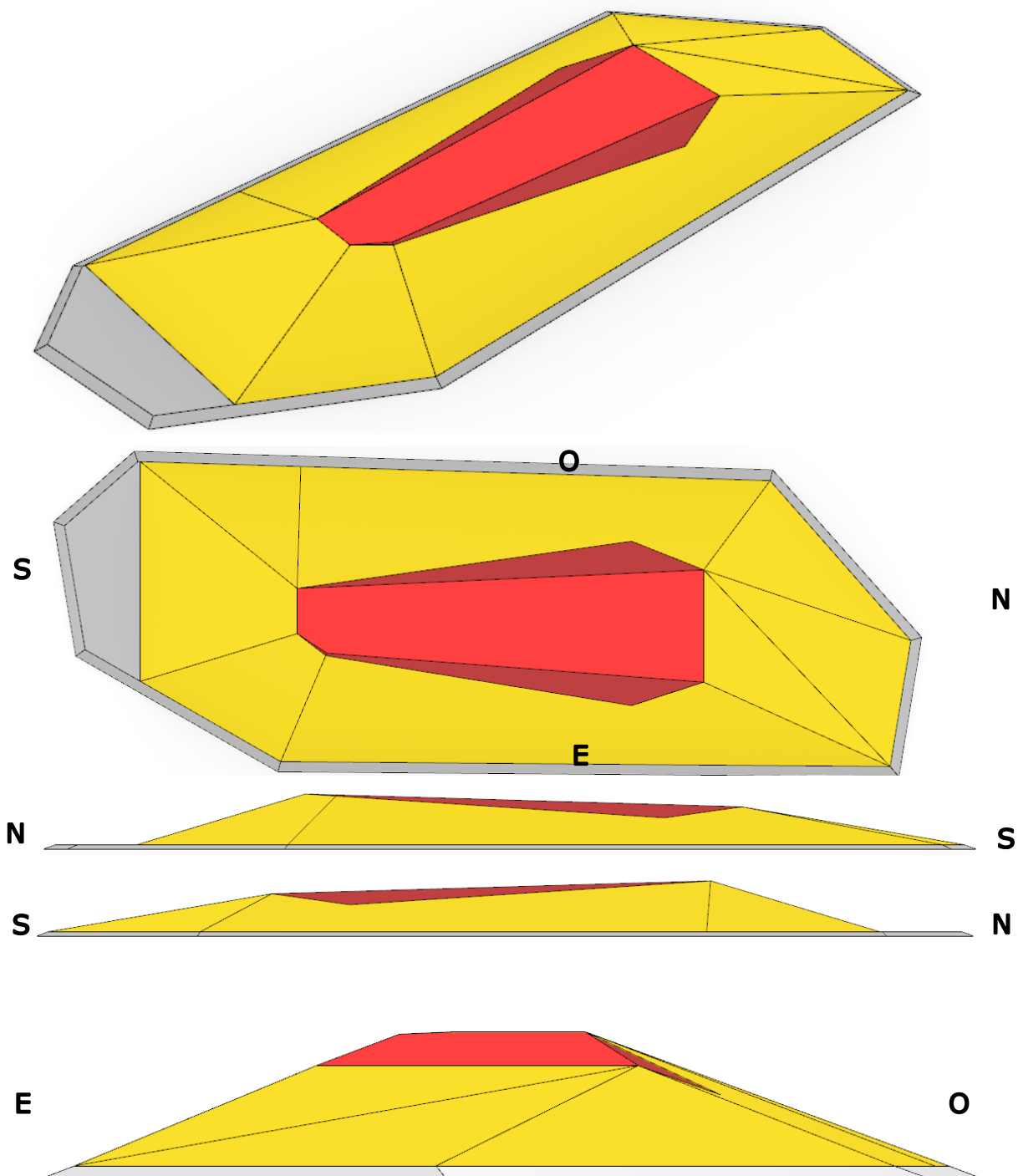



Figura 1-2. Elementi morfologici del progetto 2024 (in rosso).

	<b>Committente:</b> Azienda Servizi Ambientali SpA	<b>Documento:</b> Relazione geotecnica
	<b>Lavoro:</b> Completamento della valorizzazione a scopo energetico del sito con integrazione dell'impianto fotovoltaico esistente mediante costituzione di una seconda unità energetica	Codice: S24028-PE-RE001-0 Data: Maggio 2024

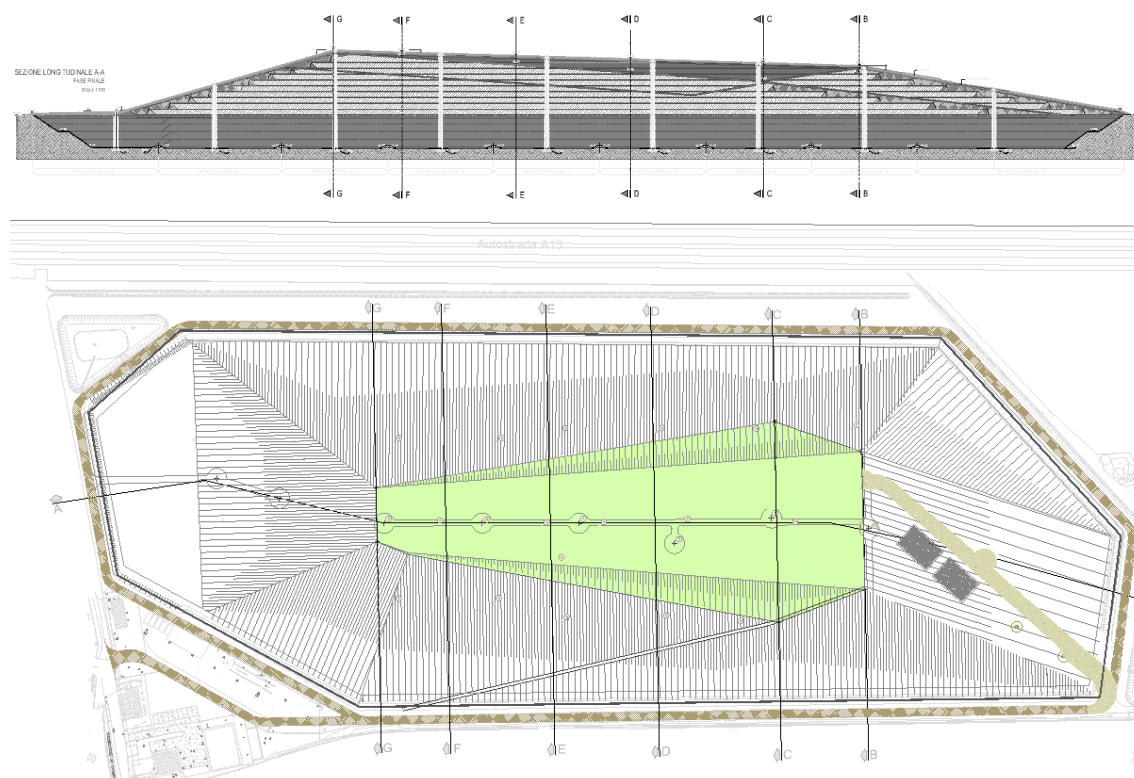



Figura 1-3. Proposta di progetto 2024.

Analogamente a quanto accaduto nel 2015 e nel 2020, il quadro geologico- geomorfologico, idrogeologico, geotecnico e sismico di riferimento dell'area, già ampiamente studiato in occasione della sopraelevazione del 2011 e della variante del 2013 e che abbracciava una area ben più estesa del solo volume di terreno significativo ai fini geotecnici, può dirsi confermato ed ancora valido e rappresentativo per l'ampliamento.

L'adeguamento morfologico sarà realizzato a partire dal primo strato inferiore del pacchetto di chiusura definitiva autorizzata con l'attuale provvedimento DGR 1497 DEL 27/09/2021 e s.m.i. con rifiuti a recupero (operazione R11), ossia dallo strato di 50 cm di spessore di regolarizzazione della superficie di estradosso dei rifiuti, realizzato con rifiuti a recupero (operazione R5) con caratteristiche di elevata permeabilità e stabilità meccanica. La stratigrafia completa relativa al capping, così come autorizzata dalla già citata DGR 1497/2021, verrà realizzata nella superficie semi piana ottenuta in sommità a seguito dell'adeguamento morfologico, dando così continuità al pacchetto di copertura delle sponde. In analogia a quanto già realizzato nella porzione di discarica già realizzata il nuovo volume sarà realizzato distinguendo fra l'arginatura esterna, da realizzarsi con rifiuto a recupero (operazione R11) con migliori

	<b>Committente:</b> Azienda Servizi Ambientali SpA	<b>Documento:</b> Relazione geotecnica
	<b>Lavoro:</b> Completamento della valorizzazione a scopo energetico del sito con integrazione dell'impianto fotovoltaico esistente mediante costituzione di una seconda unità energetica	Codice: S24028-PE-RE001-0 Data: Maggio 2024

caratteristiche meccaniche, e un riempimento interno, così come rappresentato nelle figure seguenti.

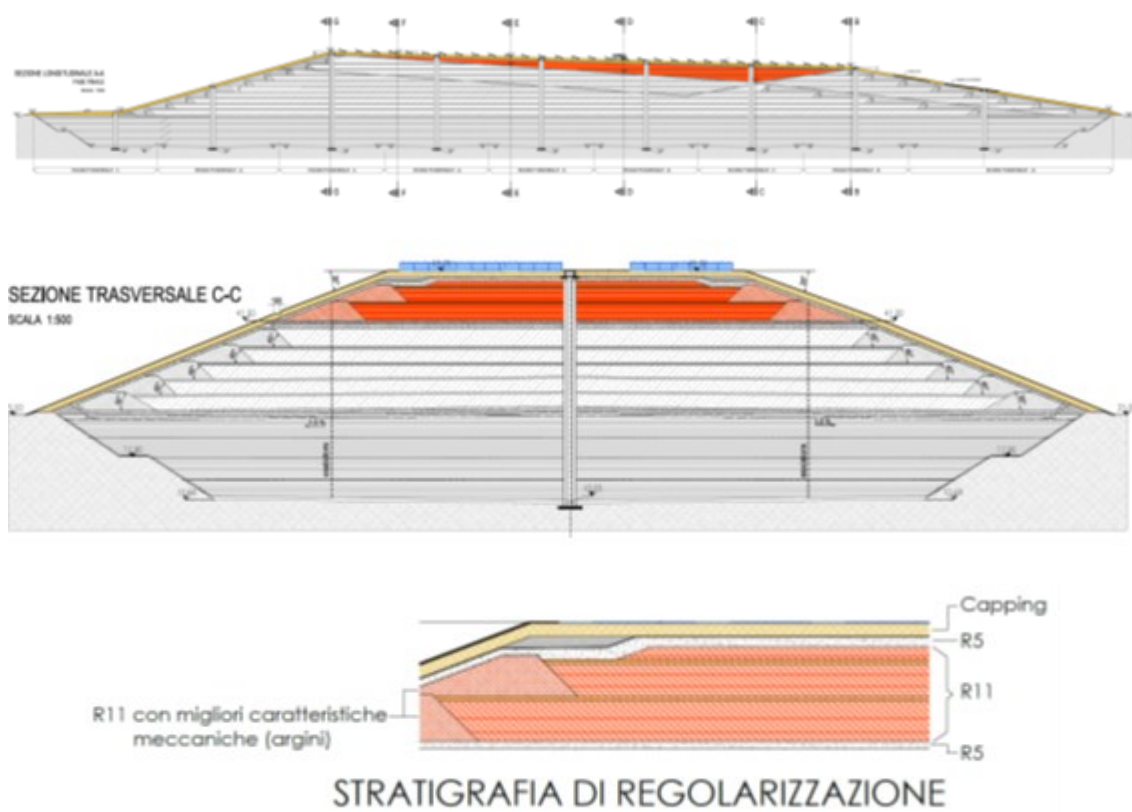



Figura 1-4: – Stralcio tavola 004 del progetto

Nel presente documento questo è stato indicato genericamente come “*Materiale di riempimento*” e sono state determinate le sue caratteristiche di resistenza minime necessarie per garantire la stabilità del corpo discarica.

In conclusione, la presente relazione rappresenta l’aggiornamento delle valutazioni geotecniche a seguito delle modifiche morfologiche generate dalla proposta di modifica di progetto 2024 appena descritta e basa i propri contenuti sia su lavoro di Centrogeo Survey SnC del 2010, sia sugli studi relativi alla caratterizzazione geotecnica dei rifiuti che sono stati alla base della variante sismica del 2013.

Viste le peculiarità dell’opera, il documento si configura anche come relazione di calcolo strutturale, in quanto la garanzia della stabilità dell’opera è un problema di carattere unicamente geotecnico, e contiene il capitolo “*Illustrazione sintetica degli elementi essenziali del progetto strutturale*”, diretto a specificare, in maniera unitaria e sintetica, le modalità di elaborazione del progetto esecutivo delle strutture secondo lo schema del DGR 1373/2011.

	<b>Committente:</b> Azienda Servizi Ambientali SpA	<b>Documento:</b> Relazione geotecnica
	<b>Lavoro:</b> Completamento della valorizzazione a scopo energetico del sito con integrazione dell'impianto fotovoltaico esistente mediante costituzione di una seconda unità energetica	Codice: S24028-PE-RE001-0 Data: Maggio 2024

## 2 ILLUSTRAZIONE SINTETICA DEGLI ELEMENTI ESSENZIALI DEL PROGETTO STRUTTURALE

### 2.1 Descrizione del contesto edilizio e delle caratteristiche geologiche, morfologiche e idrogeologiche del sito oggetto di intervento

Il corpo discarica si presenta come un elemento isolato, emergente dalla campagna circostante quindi esterno a qualsiasi altro contesto. Altre informazioni generali sull'impianto sono nel seguito riportate.

#### 2.1.1 Ubicazione impianto

Provincia di Bologna, Comune di Castel Maggiore, via Saliceto n° 45

#### 2.1.2 Classificazione (D.Lgs. n° 36/2003)

- Classificazione D.Lgs. n° 36/2003: "discarica per rifiuti non pericolosi"

#### 2.1.3 Operazioni di gestione rifiuti svolte (D.Lgs. n° 152/2006, parte quarta, allegati B e C e s.m.i.)


- D1 : attività di smaltimento di rifiuti non pericolosi
- R5 : attività di recupero di rifiuti aventi caratteristiche granulometriche adeguate per la realizzazione dello strato basale del sistema di copertura multistrato per il drenaggio delle emissioni gassose.

#### 2.1.4 Caratteristiche geologiche, morfologiche e idrogeologiche del sito oggetto di intervento

Nell'area oggetto di intervento sono prevalentemente presenti alternanze di orizzonti argilloso limosi e limoso argillosi ai quali si intercalano strati e banchi sabbiosi spiccatamente lentiformi, che a luoghi evidenziano sensibili e rapidi incrementi in spessore definendo corpi allungati in direzione sud ovest - nord est identificanti tratti di antichi canali fluviali estinti.

Dette tipologie di sequenze denotano una tendenza all'aumento in potenza degli orizzonti sabbiosi con l'incremento della profondità rispetto al piano campagna e, superati i -22 ÷ -23 m, definiscono unità localmente continue lateralmente con spessori mediamente variabili tra 2 ÷ 3 e 5 ÷ 7 m.

La sequenza litostratigrafica riscontrata dalle indagini effettuate evidenzia che i primi 10 ÷ 15 m del sottosuolo costituiscono un complesso a pronunciata variabilità laterale e verticale sia delle componenti litologiche che di permeabilità. In tale insieme i corpi sabbiosi - sabbioso limosi sede di circolazione idrica assumono

	<b>Committente:</b> Azienda Servizi Ambientali SpA	<b>Documento:</b> Relazione geotecnica
	<b>Lavoro:</b> Completamento della valorizzazione a scopo energetico del sito con integrazione dell'impianto fotovoltaico esistente mediante costituzione di una seconda unità energetica	Codice: S24028-PE-RE001-0 Data: Maggio 2024

caratteristiche sia di falda freatica, in prossimità dei tratti di paleoalveo, che di semi-fretica nei settori dove sono presenti sequenze essenzialmente argillose nei primi 2 ÷ 7 m del sottosuolo che localmente confinano gli strati sabbiosi.

## 2.2 Descrizione generale della struttura

La sopraelevazione del III settore della discarica per rifiuti speciali non pericolosi di Castel Maggiore (BO), gestita dall'Azienda Servizi Ambientali SCpA, è realizzata da un abbancamento di varie tipologie di rifiuto e si è sviluppata per fasi successive.


In origine, era previsto che il III settore della discarica fosse coltivato come col-mamento di una ex cava di argilla ipogea; successivamente fu proposto un primo progetto di sopraelevazione che ottenne l'AIA con Delibera di Giunta n° 181 del 26/04/2011 e l'autorizzazione sismica con provvedimento n° 3031 del 08/03/2011.

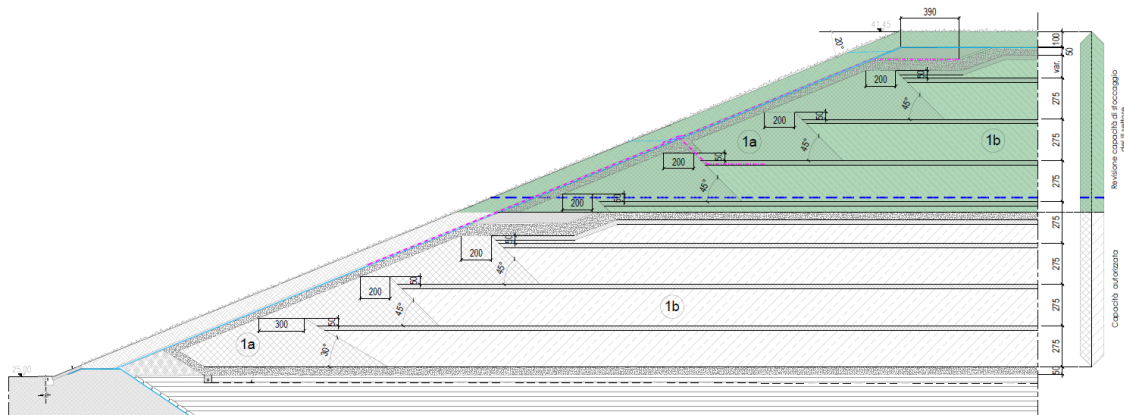
Dal punto di vista morfologico, per consentire un inserimento paesaggistico con-corde con il territorio di appartenenza, la collina di abbancamento è conformata da due colmi laterali (lato sud e nord) intervallati da un impluvio prossimo al colmo nord (v. figura seguente).



Figura 2-1. Vista 3d ad opera finita secondo il primo progetto di sopraelevazione.

Costruttivamente, l'abbancamento è composto dalla giustapposizione di vari livelli di rifiuto normalmente di altezza pari a 2,75m. La porzione laterale di ogni livello, di sezione trapezoidale, è formata da "rifiuti di buone caratteristiche geotecniche" (v. figura seguente), generalmente identificabili con le scorie di inceneritore.

	<b>Committente:</b> Azienda Servizi Ambientali SpA  <b>Lavoro:</b> Completamento della valorizzazione a scopo energetico del sito con integrazione dell'impianto fotovoltaico esistente mediante costituzione di una seconda unità energetica	<b>Documento:</b> Relazione geotecnica  <b>Codice:</b> S24028-PE-RE001-0 <b>Data:</b> Maggio 2024
---	---	---



B-B  
SEZIONE TIPO CORPO DISCARICA AL BORDO  
SCARPATA (20°)

Figura 2-2. Sezione tipo del corpo della discarica al bordo.


Nel corso del tempo, il progetto è stato variato mantenendo inalterate le proprie caratteristiche fondamentali – ovvero il l’imposta contenuta all’interno del perimetro della discarica ipogea, le pendenze delle scarpate esterne, lo schema costruttivo costituito da arginature laterali di altezza pari a 2,75m, le caratteristiche e la qualità chimico/meccaniche dei rifiuti - e modificando le quote dei colmi e dell’impluvio centrale. I progetti di variante sono stati oggetto della

- ✚ Autorizzazione sismica prot. N° 626 del 11/01/2016 relativa alla “Ridefinizione del III settore della discarica”;
- ✚ Autorizzazione sismica prot. N° 36551 del 08/06/2021 relativa alla “Revisione della capacità di stoccaggio del III settore”.

Quest’ultimo risulta il progetto attualmente autorizzato.

L’intervento di progetto prevede l’adeguamento morfologico della sagoma sommitale del corpo discarica allo scopo di creare una superficie regolare e ottimizzata per la posa di un futuro l’impianto fotovoltaico. Nelle figure seguenti si presenta la porzione in aggiunta identificata con il colore rosso.



	<b>Committente:</b> Azienda Servizi Ambientali SpA	<b>Documento:</b> Relazione geotecnica
	<b>Lavoro:</b> Completamento della valorizzazione a scopo energetico del sito con integrazione dell'impianto fotovoltaico esistente mediante costituzione di una seconda unità energetica	Codice: S24028-PE-RE001-0 Data: Maggio 2024

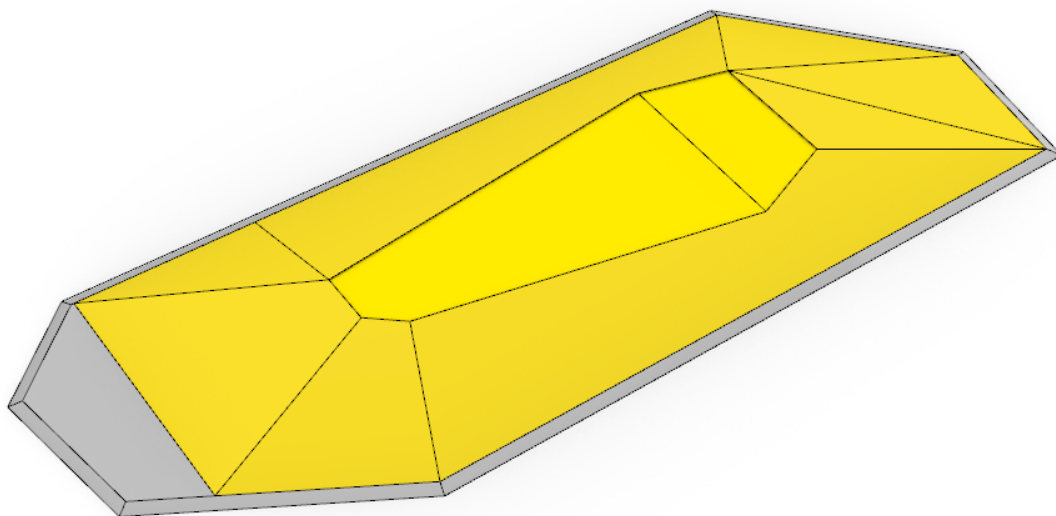


Figura 2-3. Volumetria del progetto 2020.

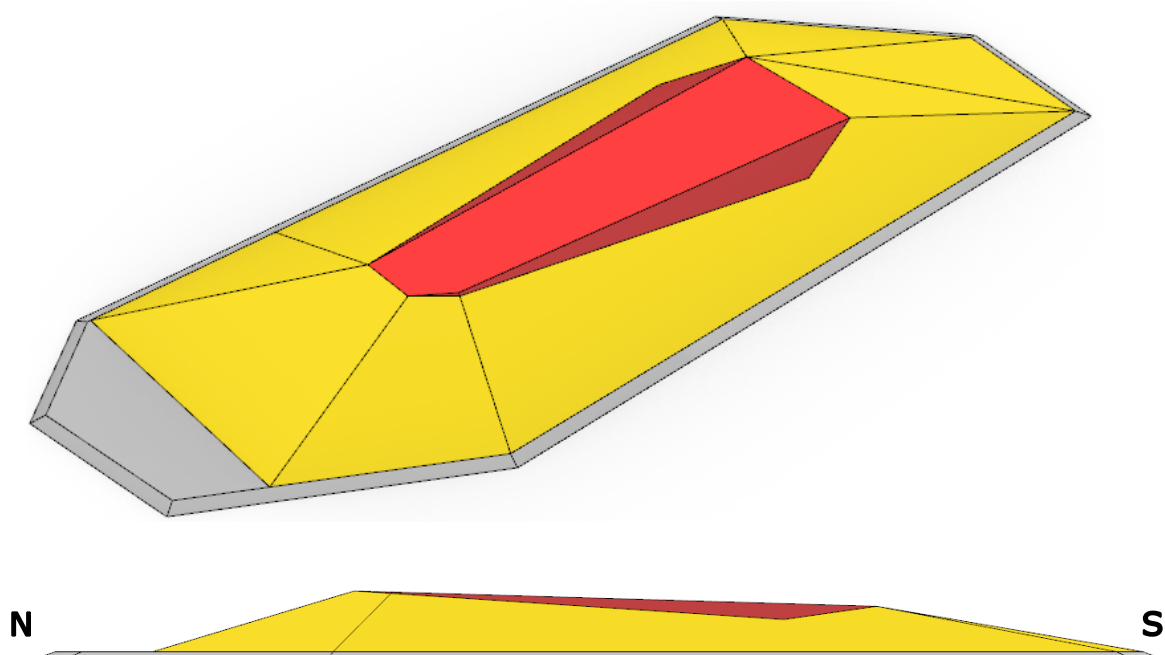



Figura 2-4. Elementi morfologici del progetto 2024 (in rosso).

L'adeguamento morfologico sarà realizzato con rifiuti a recupero (operazione R11) e sovrasterà lo strato di 50 cm di spessore di regolarizzazione della superficie di estradosso dei rifiuti, realizzato con rifiuti a recupero (operazione R5) con caratteristiche di elevata permeabilità e stabilità meccanica. La stratigrafia completa relativa al capping verrà realizzata nella superficie semi piana ottenuta in sommità a seguito dell'adeguamento morfologico, dando così continuità al pacchetto di copertura delle



	<b>Committente:</b> Azienda Servizi Ambientali SpA	<b>Documento:</b> Relazione geotecnica
	<b>Lavoro:</b> Completamento della valorizzazione a scopo energetico del sito con integrazione dell'impianto fotovoltaico esistente mediante costituzione di una seconda unità energetica	Codice: S24028-PE-RE001-0 Data: Maggio 2024

sponde. In analogia a quanto già realizzato nella porzione di discarica già realizzata il nuovo volume sarà realizzato distinguendo fra l'arginatura esterna, da realizzarsi con rifiuto a recupero (operazione R11) con migliori caratteristiche meccaniche, e un riempimento interno, così come rappresentato nelle figure seguenti.

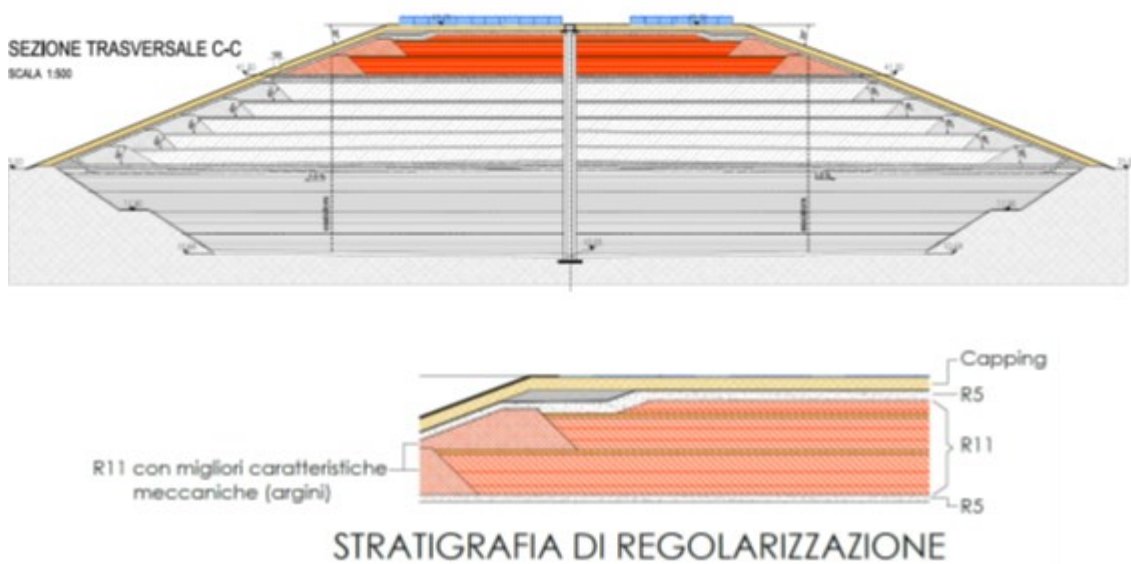



Figura 2-5. Stratigrafia dell'adeguamento morfologico

## 2.3 Normativa tecnica di riferimento

- [Ref 1] D.M. 17/01/2018 – “Nuove norme tecniche per le costruzioni”;
- [Ref 2] Circolare n. 7 - 21/01/2019 – “Istruzioni per l'applicazione dell'aggiornamento delle norme tecniche per le costruzioni di cui al decreto ministeriale 17 gennaio 2018”;
- [Ref 3] DGR 1373/2011 “Atto di indirizzo recante l'individuazione della documentazione attinente alla riduzione del rischio sismico necessaria per il rilascio del permesso di costruire e per gli altri titoli edilizi, alla individuazione degli elaborati costitutivi e dei contenuti del progetto esecutivo riguardante le strutture e alla definizione delle modalità di controllo degli stessi, ai sensi dell'art. 12, comma 1, e dell'art. 4, comma 1, della L.R. n. 19 del 2008”;
- [Ref 4] Raccomandazioni AGI giugno 1977 “Programmazione ed esecuzione delle indagini geotecniche”;
- [Ref 5] Linee guida AGI 2005 “Aspetti geotecnici della progettazione in zona sismica”;
- [Ref 6] UNI EN 1997-1:2005 “Eurocodice 7 - Progettazione geotecnica - Parte 1: Regole generali”;

	<b>Committente:</b> Azienda Servizi Ambientali SpA	<b>Documento:</b> Relazione geotecnica
	<b>Lavoro:</b> Completamento della valorizzazione a scopo energetico del sito con integrazione dell'impianto fotovoltaico esistente mediante costituzione di una seconda unità energetica	Codice: S24028-PE-RE001-0 Data: Maggio 2024

[Ref 7] UNI EN 1998-5:2005 "Eurocodice 8 - Progettazione delle strutture per la resistenza sismica - Parte 5: Fondazioni, strutture di contenimento ed aspetti geotecnici".

Oltre alla normativa tecnica, si elencano i seguenti documenti di riferimento progettuale:

[Ref 8] Progetto definitivo - Variante Progetto III settore e riqualificazione finale generale del Sito – Procedura di VIA con contestuale domanda di modifica sostanziale della AIA – Relazione geologico-geotecnica, idrogeologica e sismica – CentroGeo Survey SnC – Aprile 2010

[Ref 9] Progetto definitivo - Ridefinizione del III settore della discarica - Procedura di VIA - Relazione sui materiali.

[Ref 10] Autorizzazione sismica prot. N° 3031 del 08/03/2011 relativa al primo progetto di sopraelevazione e relativi elaborati descrittivi e grafici;

[Ref 11] Autorizzazione sismica prot. N° 25343 del 28/11/2013 relativa alla "Rimodulazione delle dimensioni delle arginature – III settore" e relativi elaborati descrittivi e grafici;

[Ref 12] Autorizzazione sismica prot. N° 626 del 11/01/2016 relativa alla "Ridefinizione del III settore della discarica" e relativi elaborati descrittivi e grafici;

[Ref 13] Autorizzazione sismica prot. N° 36551 del 08/06/2021 relativa alla "Revisione della capacità di stoccaggio del III settore" e relativi elaborati descrittivi e grafici;

## 2.4 Definizione dei parametri di progetto

### 2.4.1 Vita nominale


La vita nominale dell'opera  $V_N$  è intesa come il numero di anni nel quale la struttura, purché soggetta a manutenzione ordinaria, deve poter essere usata per lo scopo per il quale è destinata. Nel caso in esame, la vita nominale può essere assunta pari a 100 anni così come suggerito dalle NTC per "grandi opere, ponti opere infrastrutturali e dighe di grandi dimensioni o di importanza strategica".

### 2.4.2 Classe d'uso

La Classe d'uso di una costruzione è definita con riferimento alle conseguenze di un'interruzione di operatività o di un eventuale collasso. Nel caso in esame, l'opera può essere definita di "Classe IV" così come suggerito dalle NTC in quanto assimilabile a "industrie con attività particolarmente pericolose per l'ambiente". Alla classe d'uso IV corrisponde un coefficiente d'uso  $C_u = 2.0$ .

### 2.4.3 Periodo di riferimento

Il periodo di riferimento  $V_R$  ricavato con la seguente espressione:  $V_R = V_N \cdot C_u$ .

	<b>Committente:</b> Azienda Servizi Ambientali SpA	<b>Documento:</b> Relazione geotecnica
	<b>Lavoro:</b> Completamento della valorizzazione a scopo energetico del sito con integrazione dell'impianto fotovoltaico esistente mediante costituzione di una seconda unità energetica	Codice: S24028-PE-RE001-0 Data: Maggio 2024

È in questo caso pari a 200 anni.

#### 1. Categoria di suolo e $V_{s30}$

I valori di  $V_s$  calcolati dalle prove Down Hole e Remi confermano una categoria di suolo di tipo C, ovvero "*Depositi di terreni a grana grossa mediamente addensati o terreni a grana fina mediamente consistenti con spessori superiori a 30 m, caratterizzati da un graduale miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di  $V_{s30}$  compresi tra 180 m/s e 360 m/s (ovvero  $15 < N_{SPT30} < 50$  nei terreni a grana grossa e  $70 < cu_{30} < 250$  kPa nei terreni a grana fina).*"

#### 2. Categoria topografica

Per quanto attiene alla valutazione degli effetti topografici, il sito si colloca in Categoria T1 "Aree pianeggianti". Il coefficiente di amplificazione topografica  $S_T$  risulta quindi uguale a 1.00.

### 2.4.4 Zona sismica del sito

Secondo la zonazione sismo genetica ZS9, il sito ricade nella zona 912 dominio della dorsale Ferrarese.

### 2.4.5 Coordinate geografiche del sito

Le coordinate geografiche del sito di intervento sono


Latitudine (°): 44.58144°

Longitudine (°): 11.39211°

### 2.4.6 Definizione dell'azione sismica di riferimento


La Tabella seguente illustra tali parametri di riferimento per la definizione della pericolosità sismica di base del sito in esame. Fra gli stati limite ultimi delle costruzioni in progetto, si prende in considerazione lo stato limite di salvaguardia della vita (SLV) nell'ambito del quale "a seguito del terremoto di progetto si accetta che la costruzione subisca rotture e crolli dei componenti non strutturali ed impiantistici e significativi danni dei componenti strutturali cui si associa una perdita significativa di rigidità nei confronti delle azioni orizzontali, ma la costruzione conserva una parte della resistenza e rigidità per azioni verticali e un margine di sicurezza nei confronti del collasso per azioni sismiche orizzontali".

STATO LIMITE	$T_R$ (anni)	$a_g$ (g)	$F_0$ (-)	$T_c$ (s)
SLO	120	0.093	2.451	0.283
SLD	201	0.117	2.460	0.285
SLV	<b>1898</b>	<b>0.277</b>	<b>2.421</b>	<b>0.296</b>
SLC	2475	0.304	2.405	0.300

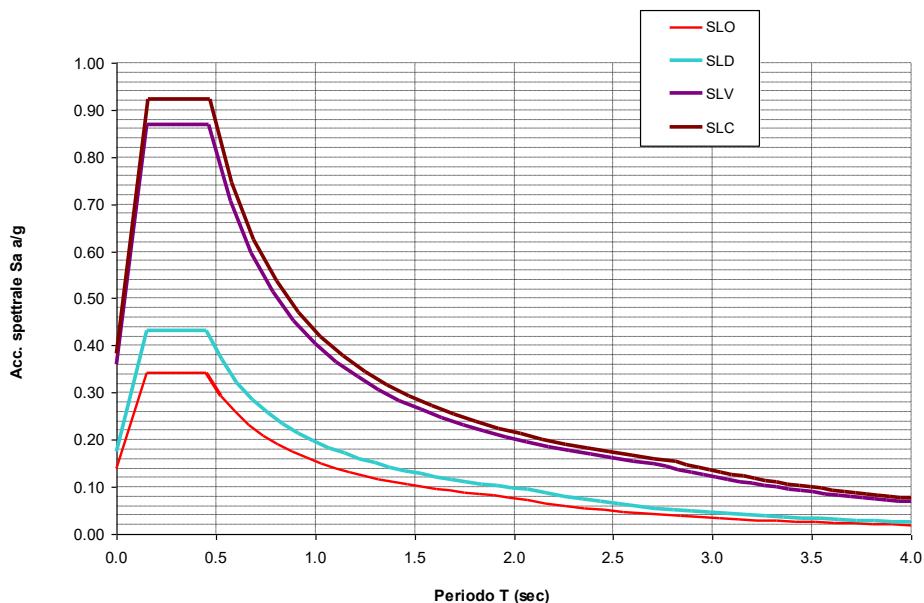
	<b>Committente:</b> Azienda Servizi Ambientali SpA	<b>Documento:</b> Relazione geotecnica
	<b>Lavoro:</b> Completamento della valorizzazione a scopo energetico del sito con integrazione dell'impianto fotovoltaico esistente mediante costituzione di una seconda unità energetica	Codice: S24028-PE-RE001-0 Data: Maggio 2024

### 2.4.7 Spettri elastici di accelerazione

A questo punto è possibile definire gli spettri di risposta elastici in accelerazione delle componenti orizzontali, tenendo in conto degli effetti di sito.

	<b>Committente:</b> Azienda Servizi Ambientali SpA	<b>Documento:</b> Relazione geotecnica
	<b>Lavoro:</b> Completamento della valorizzazione a scopo energetico del sito con integrazione dell'impianto fotovoltaico esistente mediante costituzione di una seconda unità energetica	Codice: S24028-PE-RE001-0 Data: Maggio 2024

#### Spettri Elastici di Risposta in Superficie per i diversi stati limite



Con

Tr anni	St	Sc	Cc
1898	1,0	1,298	1,569

### 2.4.8 Azioni sulla costruzione

Il calcolo della stabilità dell'abbancamento considera le seguenti azioni:

1. pesi proprio dell'abbancamento;
2. azioni dovute alle pressioni interstiziali;
2. le azioni sismiche determinate sulla base dei parametri di cui sopra.

### 2.4.9 Azione sismica


Una sintesi dei parametri sismici relativi al sito di intervento ed adottati nelle analisi di stabilità sono raccolti qui di seguito.

Parametri sismici - Castel Maggiore (BO) - 44° 34' 49,94" N; 11° 23' 27,90" E											
$V_N$	Classe d'uso	$C_U$	$V_R$	$a_g$	$F_0$	$S_s$ (cat. C)	$S_T$ (cat. T1)	$a_{max}=a_g \cdot S_s$ $\cdot S_T=a_g \cdot S$	$\beta_s$	$k_h$	$k_v$
100 anni	IV	2	200	0,277 g	2,420	1,298	1,000	0,359	0,28	0,10	+/- 0,05

Figura 2-6 –Parametri sismici.

### 2.4.10 Azioni eccezionali

Non si sono considerate azioni eccezionali.

	<b>Committente:</b> Azienda Servizi Ambientali SpA	<b>Documento:</b> Relazione geotecnica
	<b>Lavoro:</b> Completamento della valorizzazione a scopo energetico del sito con integrazione dell'impianto fotovoltaico esistente mediante costituzione di una seconda unità energetica	Codice: S24028-PE-RE001-0 Data: Maggio 2024

### 2.4.11 Pressioni interstiziali

Il regime delle pressioni interstiziali è governato, per gli scenari statici di riferimento, da una falda a piano campagna. In condizioni sismiche cautelativamente si assume falda coincidente con il profilo della discarica stessa.

## 2.5 Descrizione dei materiali e dei prodotti per uso strutturale

Nel particolare caso in esame, il materiale per uso strutturale coincide con il rifiuto abbancato.

Ai fini del calcolo dei cedimenti, essendo preponderante il comportamento medio dell'ammasso, i rifiuti sono stati caratterizzati come un unico materiale avente un valore di modulo edometrico compreso fra 3700 kPa (discarica in sopraelevazione) e 5000 kPa (discarica ipogea). I parametri geotecnici caratteristici sono riassunti nella tabella che segue.

ID	$\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	$\phi'$ (°)	$c'$ (kPa)	$E_{ed}$ (kPa)	$c_v$ (m <sup>2</sup> /s)
Corpo discarica	18	30	20	3700	1E-07
Rifiuto ipogeo	16	33	20	5000	1E-06

Figura 2-7. Parametri geotecnici caratteristici (modello per il calcolo dei cedimenti)

Ai fini delle verifiche di stabilità, i rifiuti sono stati caratterizzati sia in termini di condizioni drenate – per le verifiche statiche – sia in termini di condizioni non drenate – per le verifiche sismiche – così come riportato nelle tabelle seguenti.


ID	$\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	$\phi'$ (°)	$c'$ (kPa)	$c_u$ (kPa)
Scorie	17	36	20	200
Fanghi	18	30	20	200
Capping	20	20	5	50
Rifiuto ipogeo	16	33	20	20

Figura 2-8. Parametri geotecnici caratteristici (modello per le verifiche di stabilità)

## 2.6 Criteri di progettazione e di modellazione

La stima dei cedimenti è condotta con l'ausilio di una modellazione agli elementi finiti in condizioni 3D (v. paragrafo 5), alla quale è affiancata una valutazione sul loro decorso temporale.

## 2.7 Combinazioni, coefficienti parziali e criteri di verifica

	<b>Committente:</b> Azienda Servizi Ambientali SpA	<b>Documento:</b> Relazione geotecnica
	<b>Lavoro:</b> Completamento della valorizzazione a scopo energetico del sito con integrazione dell'impianto fotovoltaico esistente mediante costituzione di una seconda unità energetica	Codice: S24028-PE-RE001-0 Data: Maggio 2024

Le analisi sono state effettuate in conformità al D.M. 17/01/2018 – “Nuove norme tecniche per le costruzioni”.

In particolare le verifiche di stabilità sono state condotte secondo l’**Approccio 1 - Combinazione 2**: A2+M2+R2, mentre la stima dei cedimenti è chiaramente una condizione SLE.

## 2.8 Metodi di analisi


Le verifiche di stabilità sono state condotte, in prima battuta, impiegando il metodo pseudostatico (par. 7.11.3.5.2 del D.M. 14/01/2008). Successivamente queste sono state approfondite mediante una analisi di risposta sismica locale e utilizzando il cosiddetto “metodo degli spostamenti”.

## 2.9 Caratteristiche e affidabilità del codice di calcolo

Le analisi agli elementi finiti sono state svolte utilizzando il codice di calcolo Midas GTS NX in condizioni 3D, mentre le analisi di stabilità sono state condotte con il modulo “Slope W” del programma GeoStudio 2020 versione 10.2.1.19666 della GEO-SLOPE International.

Entrambi i software sono riconosciuti, anche a livello internazionale, come fra i maggiormente affidabili per la modellazione delle problematiche geotecniche.

A prescindere da questo, lo studio della stabilità del corpo discarica è stato svolto a successivi livelli di approfondimento, introducendo anche uno studio di risposta sismica locale, per avere una maggiore confidenza sui risultati ottenuti dai modelli numerici.

	<b>Committente:</b> Azienda Servizi Ambientali SpA	<b>Documento:</b> Relazione geotecnica
	<b>Lavoro:</b> Completamento della valorizzazione a scopo energetico del sito con integrazione dell'impianto fotovoltaico esistente mediante costituzione di una seconda unità energetica	Codice: S24028-PE-RE001-0 Data: Maggio 2024

## 3 CARATTERIZZAZIONE GEOTECNICA

### 3.1 Premessa

La caratterizzazione geotecnica per i terreni naturali deriva dai dati e dalle elaborazioni redatte dallo studio di Centrogeo Survey SnC – Geol. Gian Piero Mazzetti, redatto nel 2011 nell'ambito del progetto di sopraelevazione del III settore.

La caratterizzazione dei rifiuti, invece, si basa sia sulle risultanze del predetto studio, sia sulle indagini in laboratorio e in sito svolte da Enser Srl – Ing. Gianfranco Marchi nell'ambito dei lavori di costruzione della sopraelevazione nel periodo 2012-2013.

Lo studio del 2011 si è basato su quattro sondaggi meccanici a carotaggio continuo, con rivestimento del foro, di cui due eseguiti lungo il perimetro della discarica nei terreni incassanti e due all'interno del corpo della discarica ipogea. Questi ultimi sono quindi riferibili a rifiuti che hanno già subito, seppure a vario livello, un processo di assestamento.

Lo studio del 2012-2013 è riferito in modo particolare ai cosiddetti "rifiuti con buone caratteristiche geotecniche" (perlopiù scorie di inceneritore cod. CER 190112) e trae origine dal complesso di prove in sito e in laboratorio eseguite durante le prime fasi di costruzione della discarica epigea. Su questo studio è basata anche la relazione sui materiali allegata al presente progetto così come quella della variante sismica 2013.

Il complesso dei due studi fornisce una buona quantità di dati utile alla caratterizzazione del "rifiuto" che tuttavia rimane un "materiale" di caratteristiche estremamente variabili.


### 3.2 Terreni naturali

#### 3.2.1 Studio Centrogeo(2011)

In funzione degli spessori di sottosuolo che risulteranno coinvolti dagli inviluppi delle pressioni conseguenti agli incrementi di carico generati dagli abbancamenti in sopraelevazione, sono state effettuate indagini geognostiche per definire le caratteristiche litotecniche dei terreni che formano i primi 75 ÷ 85 m del piano campagna nell'area interessata dall'impronta del terzo settore.

In riferimento a ciò sono stati eseguiti due sondaggi a carotaggio continuo, con rivestimento mediante camicie metalliche del foro di perforazione, nel contesto del quale sono state effettuate prove di taglio con torvane da campo e di penetrazione con poket penetrometer, determinazione della granulometria con metodi speditivi, sui tratti di carota recuperati, il prelievo di campioni indisturbati con campionatore a pareti sottili *Osterberg* o *Shelby*, prove di penetrazione codificata SPT.



	<b>Committente:</b> Azienda Servizi Ambientali SpA	<b>Documento:</b> Relazione geotecnica
	<b>Lavoro:</b> Completamento della valorizzazione a scopo energetico del sito con integrazione dell'impianto fotovoltaico esistente mediante costituzione di una seconda unità energetica	Codice: S24028-PE-RE001-0 Data: Maggio 2024

I campioni indisturbati prelevati durante i sondaggi, in n° 20, sono stati sottoposti ad analisi di laboratorio geotecnico per la determinazione dei parametri di seguito elencati

- Proprietà indice, n° 19
- Limiti Atterberg, n° 8
- Prove di compressibilità edometrica, n° 18
- Prove di resistenza al taglio in tensioni efficaci, n° 7
- Granulometria, n° 3
- Descrizione geotecnica campioni e documentazione fotografica, n° 20


Sono inoltre state effettuate prove di laboratorio geotecnico per la determinazione dei parametri in condizioni di sollecitazione ciclica dinamica di seguito esposte:

- Prova in colonna risonante, n° 2
- Prova taglio torsionale ciclico, n° 2
- Prova triassiale ciclica "property", n° 1

Sono state esaminate anche le analisi di laboratorio geotecnico precedentemente effettuate nel contesto delle elaborazioni di progetto del terzo lotto, gennaio 2000, che contemplano 22 campioni indisturbati, dei quali sono già stati consegnati agli Enti Autorizzativi Competenti i certificati.

Le analisi effettuate sia per il progetto di sopraelevazione 2010, che quelle precedenti 2000 hanno consentito la redazione di un quadro significativamente rappresentativo dal punto di vista statistico relativamente alla caratterizzazione geotecnica che contraddistingue il sottosuolo dell'area di intervento.

L'interpretazione d'insieme delle prove penetrometriche statiche e dell'assetto stratigrafico derivato dai sondaggi meccanici denota che le granulometrie caratterizzanti i primi 30 ÷ 85 m del sottosuolo sono rappresentate sostanzialmente da frazioni argillose a medio elevata consistenza, alle quali si intercalano localmente livelli limosi - limoso sabbioso fini ed orizzonti sabbiosi-sabbioso ghiaiosi consistenti che denotano spessori e sviluppi tabulari, dei quali i più significativi si rilevano alle profondità tra - 18/-20 m pc, -23÷-24/-31 m pc, -47 ÷ -50/-58 ÷ -60 m pc, -60 ÷ -62 /-66 ÷ -70 m pc.

	<b>Committente:</b> Azienda Servizi Ambientali SpA	<b>Documento:</b> Relazione geotecnica
	<b>Lavoro:</b> Completamento della valorizzazione a scopo energetico del sito con integrazione dell'impianto fotovoltaico esistente mediante costituzione di una seconda unità energetica	Codice: S24028-PE-RE001-0 Data: Maggio 2024

### 3.2.1.1 Analisi di Laboratorio Geotecnico

I campioni indisturbati prelevati durante l'esecuzione dei sondaggi a carotaggio continuo sono stati sottoposti alle analisi di laboratorio geotecnico di seguito descritte:

- Caratteristiche naturali: umidità naturale, densità naturale, densità secca, grado di saturazione, indice dei vuoti, n° 18
- Curve granulometriche per sedimentazione, n° 3
- Limiti di Atterberg, n° 8
- Prove di compressione triassiale isotopica con misura delle pressioni neutrali CIU, per l'individuazione del valore della coesione e dell'angolo d'attrito interno sia in condizioni non drenate, tensioni totali, che in condizioni drenate, tensioni efficaci, n° 4
- Prove di taglio diretto con Scatola di Casagrande, l'individuazione del valore della coesione e dell'angolo d'attrito interno in condizioni drenate, tensioni efficaci, per valori di picco, n° 3
- Prove di deformabilità: determinazione del valore del modulo edometrico e determinazione del valore del coefficiente di consolidazione, n° 18.

Per le determinazioni in condizioni ciclica/ dinamica sono state effettuate

- Prova in colonna risanante, n° 2
- Prova di taglio torsionale ciclico, n° 2
- Prova triassiale ciclica "property" n° 1

I campioni indisturbati prelevati sono stati recuperati a profondità variabili per analizzare in modo statisticamente significativo la successione presente nei primi 85 m del sottosuolo.


Tali campioni sono stati quindi conferiti presso *SINERGEA SRL* – Via Badini 6/6 – Granarolo Emilia (BO) ove si è proceduto all'esecuzione delle prove geotecniche di laboratorio in condizioni statiche.

Le analisi in condizioni di sollecitazione ciclica/dinamica sono state effettuate dal laboratorio *ISM GEO*, via Pastrengo, 9, Seriate (BG).

Nei successivi paragrafi si riporta la sintesi delle indagini svolte.

### 3.2.1.2 Granulometria

Al fine di definire la distribuzione granulometrica dei terreni, le cui particelle presentano un diametro dei grani inferiore a 0,075 mm, sono state effettuate due analisi granulometriche per sedimentazione.

	<b>Committente:</b> Azienda Servizi Ambientali SpA	<b>Documento:</b> Relazione geotecnica
	<b>Lavoro:</b> Completamento della valorizzazione a scopo energetico del sito con integrazione dell'impianto fotovoltaico esistente mediante costituzione di una seconda unità energetica	Codice: S24028-PE-RE001-0 Data: Maggio 2024

Le dimensioni delle particelle vengono determinate indirettamente misurandone il tempo di sedimentazione all'interno di un cilindro graduato in cui il materiale viene miscelato ad acqua distillata additivata con esametafosfato.

La procedura di calcolo si basa sulla legge di Stokes che permette di determinare il diametro di una sfera posta in movimento all'interno di un liquido tramite la relazione:

$$D = \sqrt{\frac{1800 \cdot \eta_L}{\gamma_S - \gamma_L}} \cdot \sqrt{\frac{H_R}{\delta_t \cdot 60}}$$

in cui:

D = diametro della particella (mm)

V = velocità di caduta (cm/sec)

$\eta_L$  = viscosità dinamica del liquido (g sec/cm<sup>2</sup>)

$\gamma_S$  = peso specifico della particella (g/cm<sup>3</sup>)

$\gamma_L$  = densità del liquido (g/cm<sup>3</sup>)

H<sub>r</sub> = percorso di sedimentazione delle particelle (cm)

$\delta t$  = tempo dall'inizio della prova

Le metodiche di prova sono di seguito descritte:

Essiccazione in forno del materiale (110°).

Setacciatura a secco con vaglio ASTM, N° 200, apertura 0,075 mm.


Dispersione uniforme di una quantità di 40 g di campione in acqua distillata all'interno di un cilindro graduato da 1000 cm<sup>3</sup>.

Effettuazione delle letture tramite densimetro dopo 30 sec, 1, 2, 3, 8, 15, 30, 60 ... 1440 min, ecc.

### 3.2.1.3 Proprietà indice

Per definire le proprietà indice dei terreni sono stati determinati i Limiti di Atterberg su 9 campioni, adottando le seguenti procedure:

- Disgregazione dei terreni con pestello di gomma ed essiccazione in forno (110°)
- Setacciatura ad umido del materiale con vaglio ASTM, N° 40, apertura 0,425 mm.
- Esecuzione dei limiti di liquidità e plasticità sul passante mediante utilizzo di apparecchiatura di Casagrande completa (mod. T624) con strumento solcatore modello ASTM.

	<b>Committente:</b> Azienda Servizi Ambientali SpA	<b>Documento:</b> Relazione geotecnica
	<b>Lavoro:</b> Completamento della valorizzazione a scopo energetico del sito con integrazione dell'impianto fotovoltaico esistente mediante costituzione di una seconda unità energetica	Codice: S24028-PE-RE001-0 Data: Maggio 2024

- Limite Liquido (LL)
- Limite Plastico (LP)
- Indice Plastico (IP)
- Indice di consistenza (IC)

Le metodiche e strumentazioni di prova adottate sono conformi alle norme CNR-UNI10014.

Inoltre, sono stati ricavati i seguenti parametri fisici:

- Peso specifico dei grani (Gs)
- Contenuto in acqua (w)
- Peso di volume ( $\gamma$ )
- Grado di saturazione (sr)
- Porosità (n)
- Indice dei vuoti (e)

Nella seguente Figura 3-1 si riporta il profilo relativo ai pesi di volume di laboratorio.



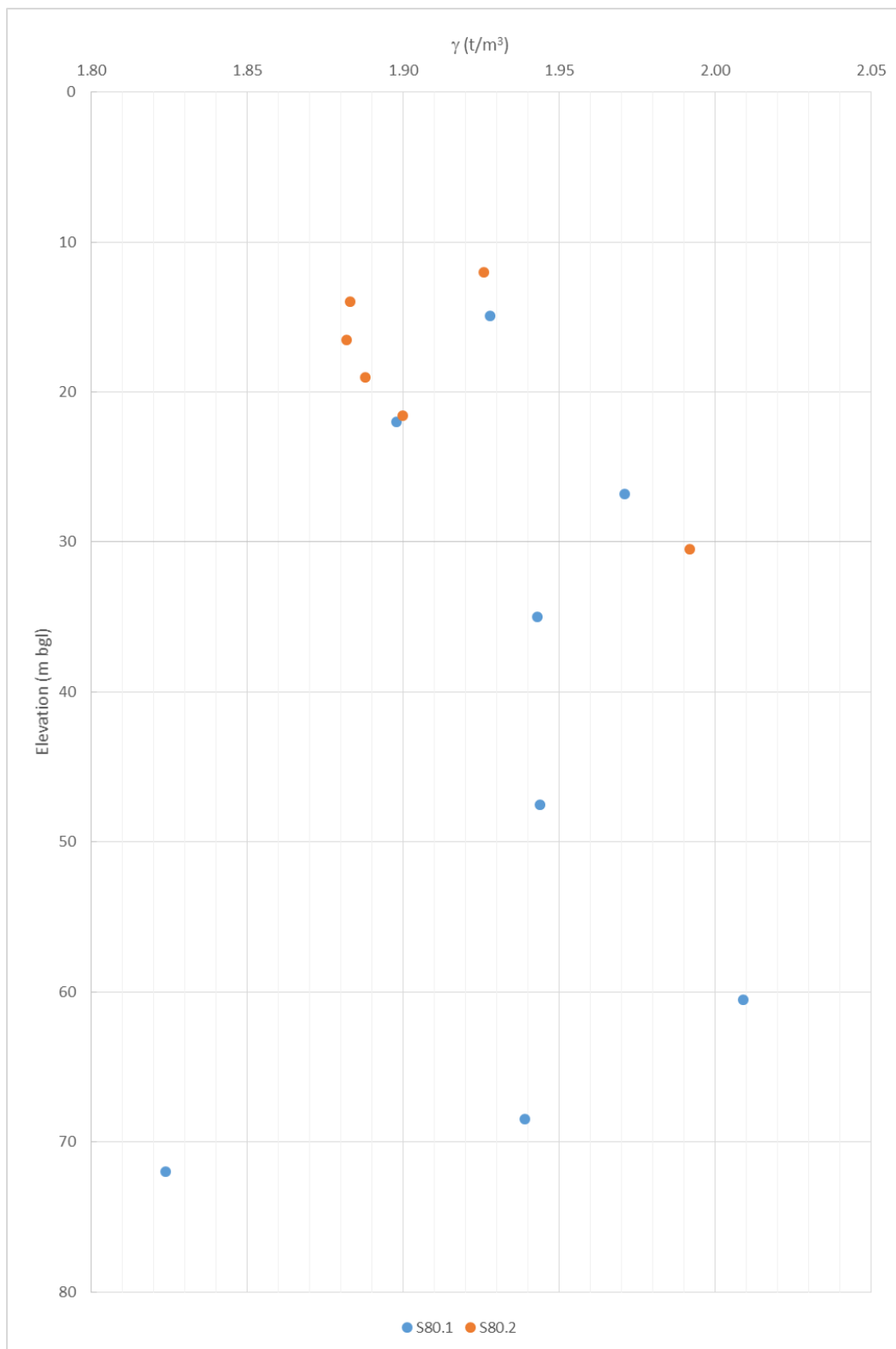
enser

**Committente:**  
Azienda Servizi Ambientali SpA

**Lavoro:**  
Completamento della valorizzazione a scopo energetico del sito con integrazione dell'impianto fotovoltaico esistente mediante costituzione di una seconda unità energetica

**Documento:**  
Relazione geotecnica

Codice: S24028-PE-RE001-0  
Data: Maggio 2024




	<b>Committente:</b> Azienda Servizi Ambientali SpA	<b>Documento:</b> Relazione geotecnica
	<b>Lavoro:</b> Completamento della valorizzazione a scopo energetico del sito con integrazione dell'impianto fotovoltaico esistente mediante costituzione di una seconda unità energetica	Codice: S24028-PE-RE001-0 Data: Maggio 2024

Figura 3-1. Peso di volume da laboratorio.

#### **3.2.1.4 Parametri di resistenza al taglio**

Sulle carote recuperate sono state eseguite prove di resistenza all'infissione con pocket penetrometer dotato di punta da 6 mm e prove di taglio con tor vane da campo; i risultati ottenuti sono restituiti nelle stratigrafie relative ai sondaggi meccanici.

I campioni indisturbati sono stati sottoposti a prove per la determinazione dei parametri di resistenza al taglio.

Dette analisi si sono articolate nell'esecuzione di:

- 4 prove di compressione triassiale con consolidazione isotropica con misura delle pressioni interstiziali: CIU, che hanno consentito l'individuazione dei valori di coesione non drenata ed angolo di attrito interno in termini di tensioni totali e coesione drenata,  $c'$  ed angolo di attrito interno  $\phi'$  in termini di tensioni efficaci. Le metodiche e strumentazioni di prova adottate sono conformi alle norme ASTM D 4767.
- 3 prove di taglio diretto CD con Scatola di Casagrande, con acquisizione dei parametri di resistenza al taglio in termini di tensioni efficaci.

Nei grafici riportati alle seguenti Figura 3-2 e Figura 3-3 si illustrano rispettivamente le coesioni e gli angoli di resistenza a taglio efficaci di picco dalle suddette prove.



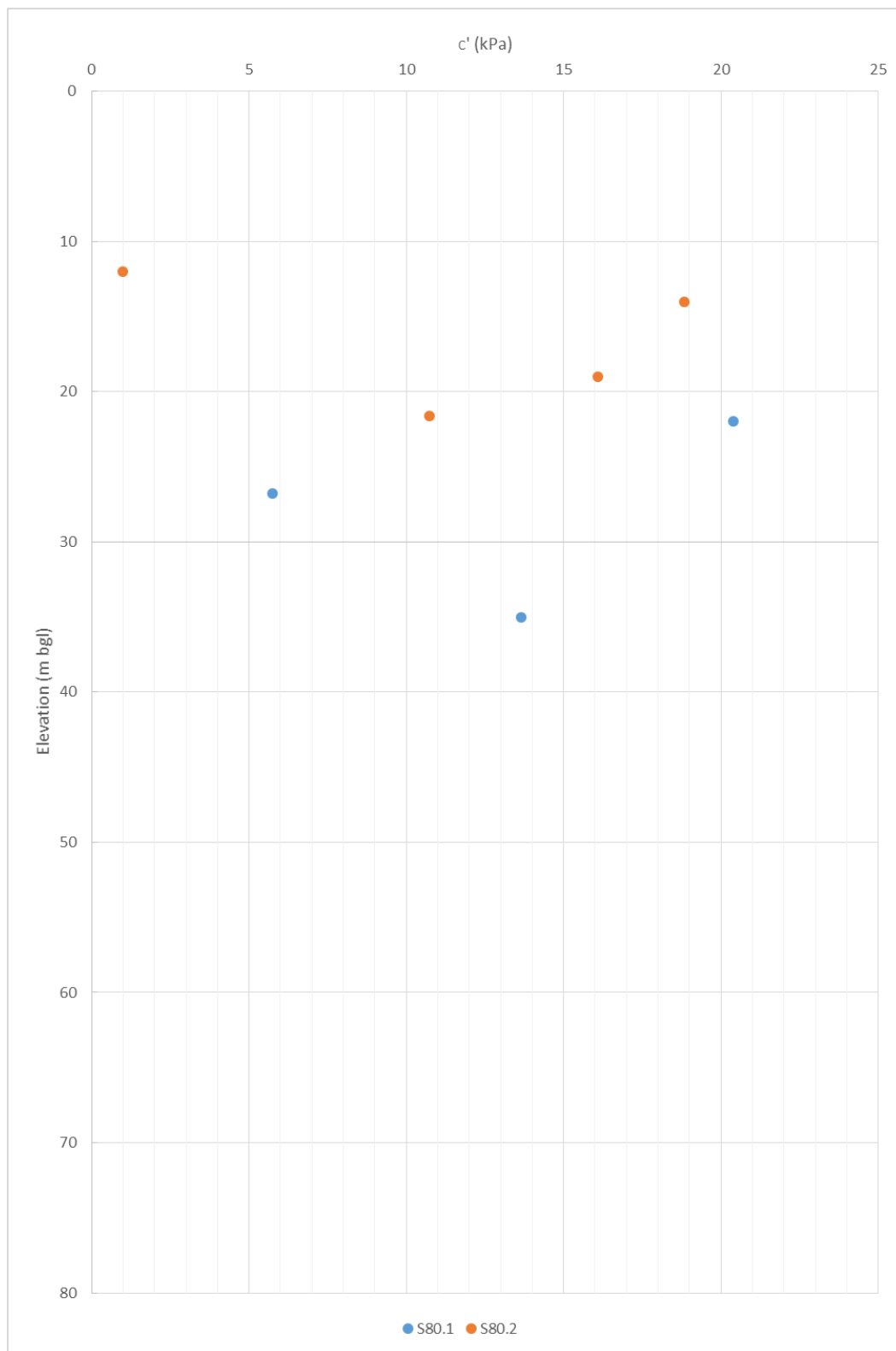
**enser**

**Committente:**  
Azienda Servizi Ambientali SpA

**Lavoro:**  
Completamento della valorizzazione a scopo energetico del sito con integrazione dell'impianto fotovoltaico esistente mediante costituzione di una seconda unità energetica

**Documento:**  
Relazione geotecnica

Codice: S24028-PE-RE001-0  
Data: Maggio 2024




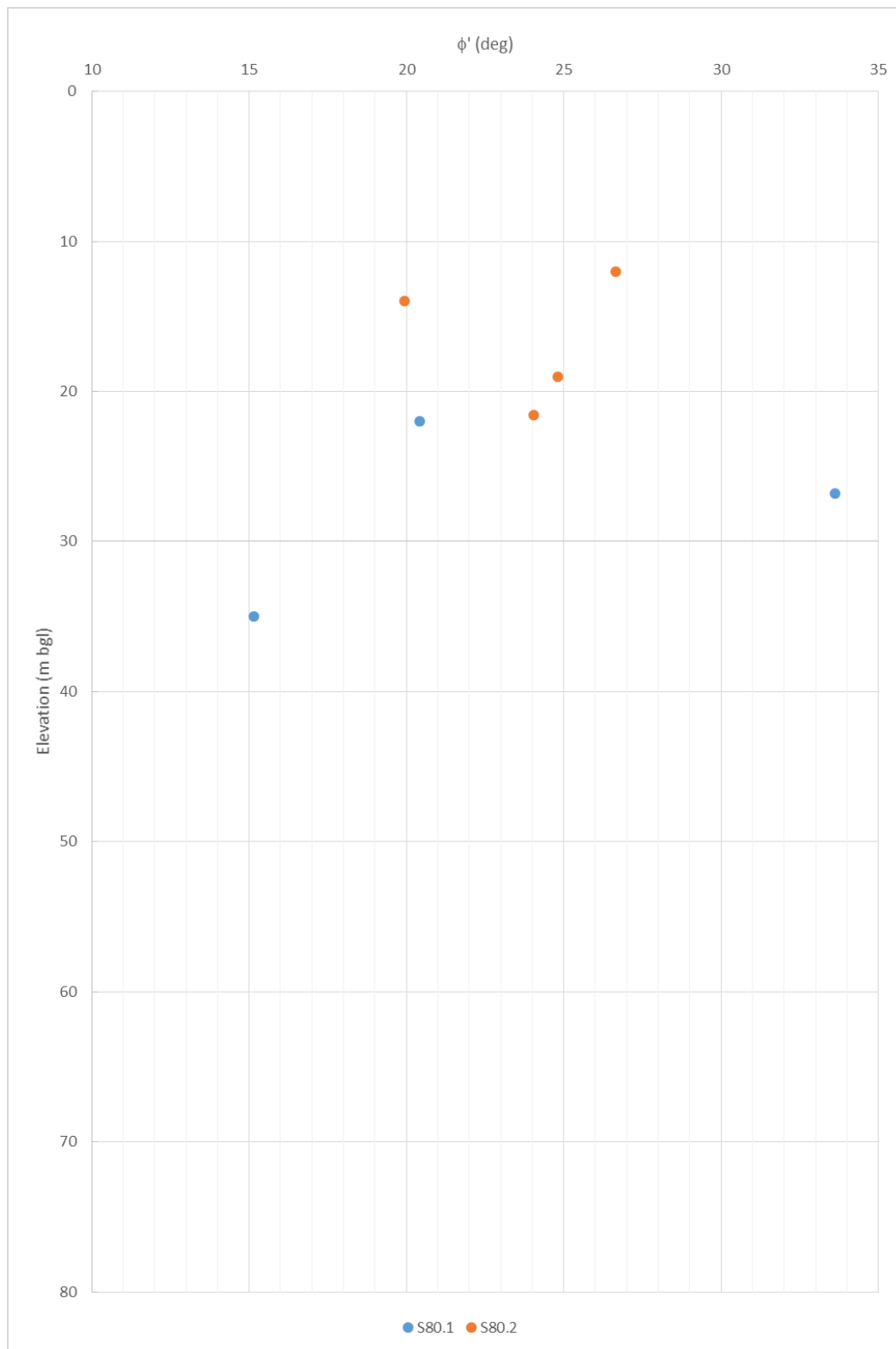
	<b>Committente:</b> Azienda Servizi Ambientali SpA	<b>Documento:</b> Relazione geotecnica
	<b>Lavoro:</b> Completamento della valorizzazione a scopo energetico del sito con integrazione dell'impianto fotovoltaico esistente mediante costituzione di una seconda unità energetica	Codice: S24028-PE-RE001-0 Data: Maggio 2024

Figura 3-2. Coesioni efficaci da laboratorio.






	<b>Committente:</b> Azienda Servizi Ambientali SpA	<b>Documento:</b> Relazione geotecnica
	<b>Lavoro:</b> Completamento della valorizzazione a scopo energetico del sito con integrazione dell'impianto fotovoltaico esistente mediante costituzione di una seconda unità energetica	Codice: S24028-PE-RE001-0 Data: Maggio 2024

Figura 3-3. Angoli di resistenza a taglio efficaci da laboratorio.

### 3.2.1.5 Caratteristiche di deformabilità


Per identificare le caratteristiche di deformabilità e determinare i coefficienti di consolidazione, sono state effettuate prove di compressione edometrica su diciotto campioni, registrando le variazioni e gli assestamenti che il provino subisce in funzione della variazione di carico verticale sia in compressione che in fase di scarico e la restituzione delle curve cedimenti / tempi per due gradini di carico.

Si è simulata inoltre la condizione degli scavi precedentemente effettuati nella cava, imponendo un ciclo di scarico e ricarico tra le pressioni geostatiche efficaci e le pressioni risultanti successivamente allo sbancamento.

Sono inoltre stati ricavati i coefficienti di consolidazione primaria e, indirettamente, i coefficienti di permeabilità.

Le metodiche e strumentazioni di prova adottate sono conformi alle norme ASTM D2435.

I valori dei moduli edometrici denotano un tendenziale graduale incremento con l'aumento della profondità. Il profilo di rigidità adottato nella relazione geotecnica 2011 [Ref 8] (pagg. 122÷125) viene indicato nella seguente Figura 3-4, a seguire si riportano l'andamento con la profondità dei coefficienti di consolidazione edometrica.

 <b>enser</b>	<b>Committente:</b> Azienda Servizi Ambientali SpA	<b>Documento:</b> Relazione geotecnica
	<b>Lavoro:</b> Completamento della valorizzazione a scopo energetico del sito con integrazione dell'impianto fotovoltaico esistente mediante costituzione di una seconda unità energetica	<b>Codice:</b> S24028-PE-RE001-0 <b>Data:</b> Maggio 2024

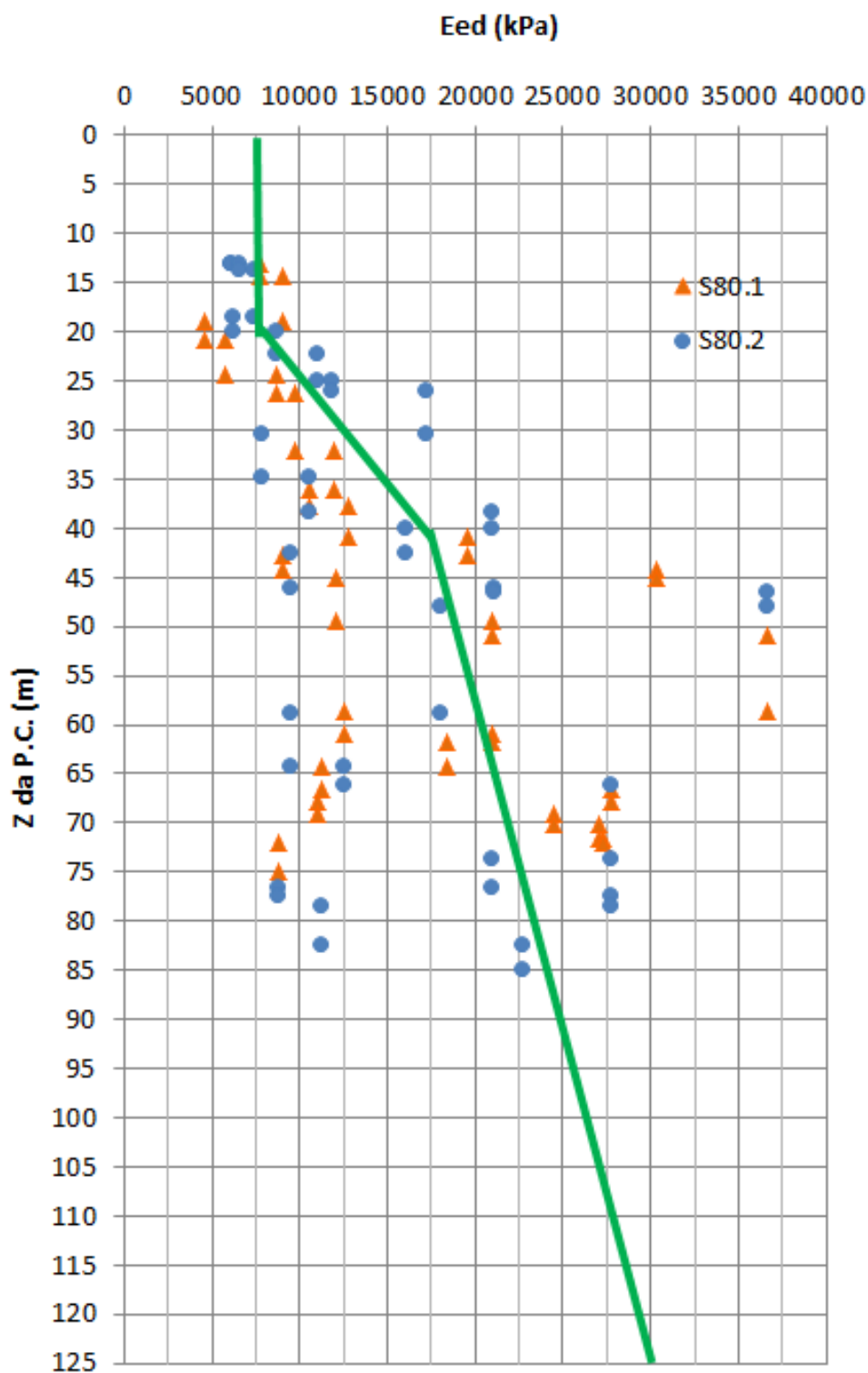


Figura 3-4. Profilo di rigidezza per i sondaggi S08.1 e S08.2



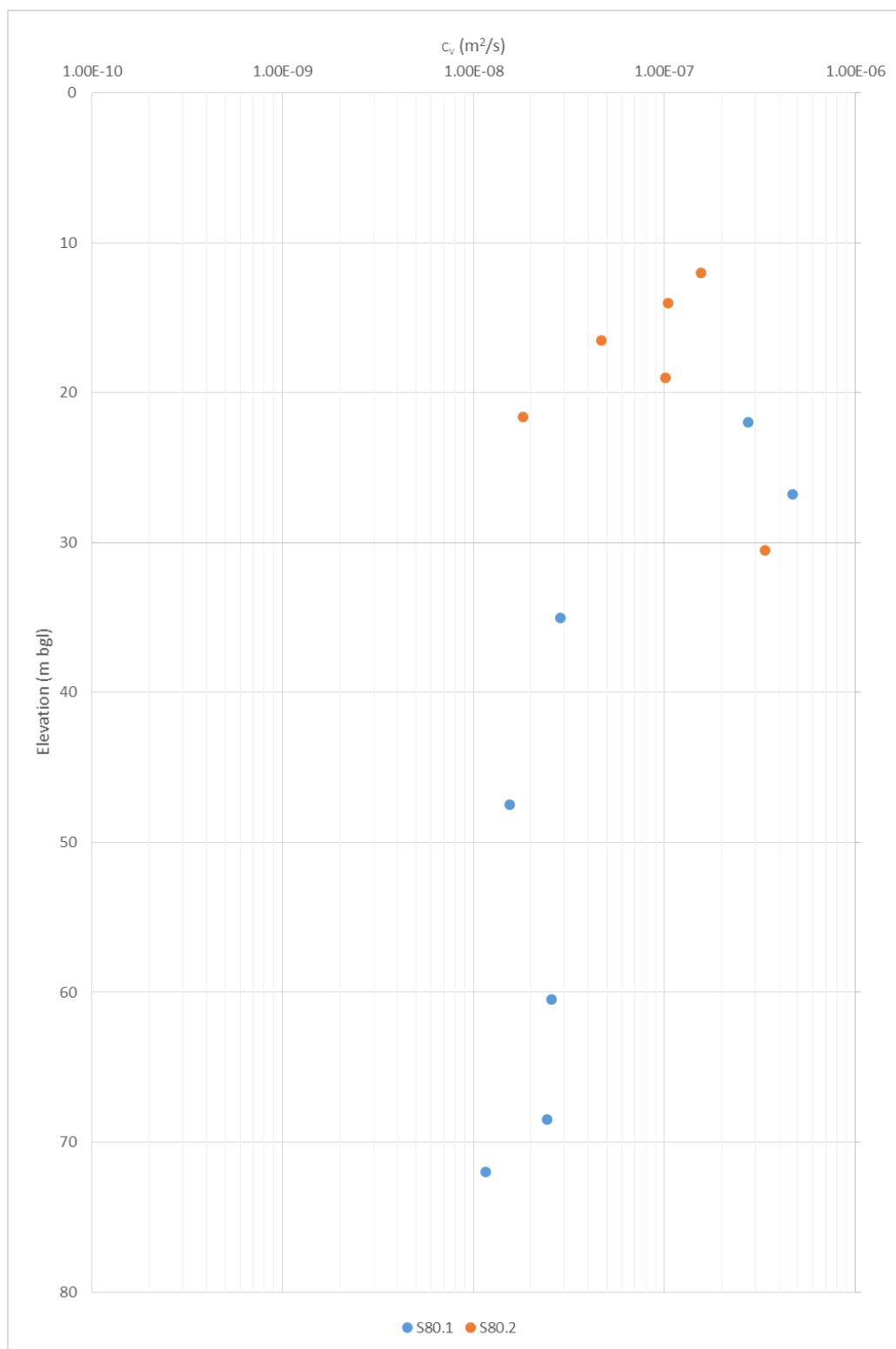
enser

**Committente:**  
Azienda Servizi Ambientali SpA

**Lavoro:**  
Completamento della valorizzazione a scopo energetico del sito con integrazione dell'impianto fotovoltaico esistente mediante costituzione di una seconda unità energetica

**Documento:**  
Relazione geotecnica

Codice: S24028-PE-RE001-0  
Data: Maggio 2024




	<b>Committente:</b> Azienda Servizi Ambientali SpA	<b>Documento:</b> Relazione geotecnica
	<b>Lavoro:</b> Completamento della valorizzazione a scopo energetico del sito con integrazione dell'impianto fotovoltaico esistente mediante costituzione di una seconda unità energetica	Codice: S24028-PE-RE001-0 Data: Maggio 2024

Figura 3-5. Valori di  $c_v$  da prove di consolidazione edometrica.

## 3.3 Rifiuti abbancati

### 3.3.1 Studio Centrogeo, 2011

Per la definizione delle geometrie adottabili per la realizzazione del corpo di discarica in elevazione, funzione delle caratteristiche geotecniche dei materiali che costituiscono la stessa, sono stati effettuati due sondaggi meccanici a carotaggio continuo, con rivestimento del foro, nei rifiuti abbancati nel terzo settore.

Dette indagini, che hanno investigato i rifiuti in essere sino a profondità di  $-11 \div -13$  m, sono state ubicate in due settori della discarica con diverse età di abbancamento al fine di valutare se al periodo intercorso dallo stoccaggio sono correlabili o meno differenti comportamenti meccanici.

Contestualmente alle perforazioni sono stati prelevati campioni indisturbati con campionatore a pareti sottili *Shelby*, eseguite prove di penetrazione codificate SPT e prove di assorbimento in foro con metodo *Lefranc*.


I campioni indisturbati sono stati conferiti al laboratorio geotecnico *SINERGEA srl*, Granarolo E. (BO).

Le strumentazioni e metodiche di analisi sui campioni indisturbati sono le medesime utilizzate sui campioni di terreno, precedentemente descritte, e le determinazioni eseguite risultano come di seguito elencate:

- Caratteristiche indice: densità naturale, umidità naturale, indice dei vuoti, porosità, peso specifico dei grani, grado di saturazione, n° 6
- Curva granulometrica per setacciatura in n° 2
- Prove di taglio diretto con Scatola di Casagrande, consolidata drenata, per la determinazione delle componenti coesione ed angolo d'attrito interno in termini di tensioni efficaci, n° 6; su un campione sono stati inoltre determinati i sopradetti parametri in condizioni residue: n° 1.
- Prove di deformabilità: determinazione del modulo edometrico e del valore del coefficiente di consolidazione, n° 6.

#### 3.3.1.1 Parametri di resistenza al taglio

Le determinazioni dei parametri di resistenza al taglio, mediante prove di taglio diretto consolidate drenate: CD, hanno fornito i valori riportati nella tabella di seguito esposta nella quale sono inoltre indicati anche i valori risultati dalle prove di penetrazione codificate SPT.


	<b>Committente:</b> Azienda Servizi Ambientali SpA	<b>Documento:</b> Relazione geotecnica
	<b>Lavoro:</b> Completamento della valorizzazione a scopo energetico del sito con integrazione dell'impianto fotovoltaico esistente mediante costituzione di una seconda unità energetica	Codice: S24028-PE-RE001-0 Data: Maggio 2024

Sondaggio n°	Campione n°/prova spt n°	Prof. Campione o di prova m	Caratteri granulometrici	Peso di volume kNmc	Coesione drenata c' kN/mq	Angolo attrito interno $\phi'$	Coesione residua cr: kN/mq	Angolo attrito interno residuo $\phi$	N <sub>SPT</sub>
SD 31	SH1	1,5 – 2,1	Fanghi: limi sabbiosi	14,28	27,7	34			
	SPT1	4,1 – 4,55	Scorie: sabbie ghiaiose						20
	SPT2	6,0 – 6,45	Scorie: sabbie ghiaiose						20
	SH4	8,0 – 8,4	Fanghi: limi argillosi con ghiaie fini	20,11	37,9	34			
	SPT3	8,6 – 9,05	Fanghi: limi argillosi con ghiaie fini						22
	SPT4	12,0 – 12,45	Fanghi: limi argilloso sabbiosi con ghiaie fini						29
SD 32	SH1	1,0 – 1,6	Fanghi: limoi sabbioso argillosi	17,1	27,0	36			
	SPT1	1,6 – 2,05	Fanghi: limi sabbioso argillosi						3
	SPT2	4,4 – 4,85	Fanghi: limi argilloso sabbiosi						5
	SH3	6,0 – 6,6	Fanghi: limi sabbioso argillosi	15,17	48	24			
	SPT3	6,6 – 7,05	Scorie: sabbie ghiaioso fini						20
	SH4	7,5 – 8,1	Scorie: sabbie ghiaioso fini	14,17	21,2	36	13,1	27	
	SPT4	8,1 – 8,45	Fanghi: limi sabbioso argillosi						8
	SH5	10,5 – 11,0	Scorie: sabbie ghiaioso fini	16,73	4,7	37			

I parametri di resistenza al taglio evidenziano valori medio elevati – elevati di angolo d'attrito interno e valori medi di coesione in termini di tensioni efficaci.

Quest'ultimo parametro, che si riscontra anche nei materiali granulari, è correlabile alle reazioni chimiche che si sviluppano nel reattore costituito dai rifiuti abbancati, in funzione sia dell'umidità e composizione dei rifiuti che dei fluidi di permeazione correlati alle infiltrazioni delle acque di pioggia, che producono processi di carbonatazione nei materiali stoccati nel sito.

Tali reazioni determinano effetti "cementanti" di modesta – media entità, che conferiscono una coesione di tipo meccanico agli aggregati costituiti dalle particelle solide del rifiuto.

	<b>Committente:</b> Azienda Servizi Ambientali SpA	<b>Documento:</b> Relazione geotecnica
	<b>Lavoro:</b> Completamento della valorizzazione a scopo energetico del sito con integrazione dell'impianto fotovoltaico esistente mediante costituzione di una seconda unità energetica	Codice: S24028-PE-RE001-0 Data: Maggio 2024

In riferimento alle prove SPT, si evidenziano valori relativi inferiori nei materiali smaltiti più recentemente, SD32, tempo intercorso dall'abbancamento circa 1 anno, per la parte più superficiale: 5 – 6 m dal capping provvisorio, e parametri di resistenza medio elevati – elevati per i materiali stoccati da tempi più lunghi SD3/2, parte basale da -6 a -11 m pc, abbancati da 2 anni e quelli stoccati in SD3/1 da 4 – 5 anni.

Dette caratteristiche evidenziano che il ruolo sviluppato dal periodo di abbancamento intercorso dalla messa a dimora dei rifiuti conferisce agli stessi un progressivo incremento dei valori di resistenza, correlato sia allo svilupparsi dei processi di costipazione che all'effetto legante dei fluidi di circolazione nell'ammasso dei rifiuti.

### 3.3.1.2 Caratteristiche di deformabilità


In funzione della valutazione dei processi di consolidazione che interessano i rifiuti abbancati conseguenti al sovraccarico esercitato dei materiali che saranno stoccati nel corpo di discarica in sopraelevazione, sono stati assoggettati a prove di compressione edometrica 6 campioni indisturbati prelevati da rifiuti con diverso periodo di stoccaggio e diverse profondità. Ciò ha consentito di identificare in modo statisticamente rappresentativo significativamente le caratteristiche di deformabilità di detti materiali.

Su questi ultimi, oltre ai moduli edometrici, sono stati determinati i coefficienti di consolidazione primaria ed indirettamente, i coefficienti di permeabilità.

I parametri ottenuti sono schematicamente riassunti nella seguente tabella

Sondaggio	Campione	Profondità m da pc	Caratteri granulometrici	Peso di volume kN/m <sup>3</sup>	M. edo- metrico Ed: kPa	Consolida- zione prima- ria Cv: m2/sec	Permeabilità m/sec
SD 3/1	SH1	1,5 – 2,1	Fanghi: limi sabbiosi	14,28	3900	$1,73 \cdot 10^{-6}$	$1,2 \cdot 10^{-9}$
	SH4	8,0 – 8,6	Fanghi: limi sabbiosi con ghiaia fine	20,11	5600	$7,36 \cdot 10^{-7}$	
SD 3/2	SH1	1,0 – 1,6	Fanghi: limi sabbiosi argillosi	17,10	3100	$4,35 \cdot 10^{-7}$	$1,28 \cdot 10^{-9}$
	SH3	6,0 – 6,6	Fanghi: limi sabbioso argillosi	15,17	3600	$3,42 \cdot 10^{-7}$	$9,31 \cdot 10^{-10}$
	SH4	7,5 – 8,1	Scorie: sabbie ghiaioso fini	14,17	1200	$7,27 \cdot 10^{-7}$	$6,19 \cdot 10^{-9}$
	SH5	10,5 – 11,1	Scorie: sabbie ghiaiose fini	16,73	700	$1,17 \cdot 10^{-7}$	$1,62 \cdot 10^{-9}$

### 3.3.1.3 Analisi granulometrica

 <b>enser</b>	<b>Committente:</b> Azienda Servizi Ambientali SpA	<b>Documento:</b> Relazione geotecnica
	<b>Lavoro:</b> Completamento della valorizzazione a scopo energetico del sito con integrazione dell'impianto fotovoltaico esistente mediante costituzione di una seconda unità energetica	Codice: S24028-PE-RE001-0 Data: Maggio 2024

Dai campioni prelevati sono stati selezionati 2 campioni a diverse caratteristiche rappresentative uno in campione dei rifiuti definiti come fanghi e l'altro campione classificato come scorie.

Le analisi granulometriche, mediante setacciatura hanno evidenziato le classificazioni di seguito descritte:

sondaggio n°	Campione n°	Profondità m	Tipo rifiuto	Classificazione granulometrica
SD3/1	SH3	6,8 – 7,4	scorie	Ghiaia sabbiosa
SD3/2	SH1	1,0 – 1,6	fanghi	Sabbia e ghiaia medio fine con limo

La composizione granulometrica dei rifiuti indica capacità di drenaggio degli stessi da elevata per le componenti più granulari: scorie, a media – medio elevata per i materiali relativamente più fini: fanghi.

### 3.3.2 Studio Enser, 2013


Le prove in laboratorio, in sito e di messa in opera dei cosiddetti "Rifiuti con buone caratteristiche meccaniche" svolte da Enser Srl durante i primi anni di costruzione della discarica epigea, sono riferibili ai rifiuti con codice CER 190112 (sono ceneri pesanti e scorie da inceneritore) e CER 190304\* (rifiuti pericolosi stabilizzati o parzialmente stabilizzati o solidificati prodotti da impianti di trattamento dei rifiuti e delle acque reflue fuori sito). Questi costituiscono la larga parte dei rifiuti conferiti in discarica. Qui di seguito si sintetizzano le conclusioni degli studi effettuati, rimandando a [Rif 9] per i dettagli.

#### 1.1.1.1 Rifiuti con codice CER 190112

Dalle ricerche di laboratorio sulla frazione fine del materiale, è emerso che le scorie, adeguatamente miscelate e proporzionate hanno già di per sé (vale a dire come semplice miscela) un comportamento geotecnico ottimo che garantisce l'ottenimento di prodotti con caratteristiche meccaniche eccellenti.

Dal punto di vista granulometrico, le scorie sono classificabili come una ghiaia sabbiosa. Le prove di compattazione mostrano come la densità del materiale non sia eccessivamente influenzata dall'umidità; i valori di umidità ottima sono dell'ordine del 16% mentre il peso per unità di volume secco massimo è dell'ordine di 1,6 Mg/m<sup>3</sup> corrispondente a un peso per unità di volume totale di 1,85 Mg/m<sup>3</sup>.

I parametri di resistenza al taglio appaiono decisamente buoni e stabili nel tempo. I valori degli angoli di attrito di picco sono compresi fra 40° e 60° e aumentano al crescere del grado di compattazione del materiale. Le prove ripetute a parità di condizione mostrano una buona stabilità del parametro. I valori di coesione non drenata

	<b>Committente:</b> Azienda Servizi Ambientali SpA	<b>Documento:</b> Relazione geotecnica
	<b>Lavoro:</b> Completamento della valorizzazione a scopo energetico del sito con integrazione dell'impianto fotovoltaico esistente mediante costituzione di una seconda unità energetica	Codice: S24028-PE-RE001-0 Data: Maggio 2024

ottenuti dalle prove sono più dispersi ma sempre maggiori a 30 kPa. Anche la prova di taglio a densità minima ha restituito valori confortanti con  $\varphi_P = 40^\circ$  e  $c'_P = 30$  kPa.

#### 1.1.1.2 Rifiuti con codice CER 190304\*

L'analisi delle caratteristiche geo-meccaniche dei rifiuti codice CER 190304\* presenta notevoli difficoltà, in quanto queste dipendono sia dalle caratteristiche del rifiuto di base (normalmente scarti di lavorazioni industriale) sia dalla modalità di stabilizzazione (normalmente a calce e/o cemento in funzione delle proprietà reagenti del prodotto di base). Lo studio Enser 1013 ha analizzato i prodotti provenienti dai seguenti impianti che conferiscono in discarica con una buona regolarità e frequenza:


- ✓ Navarra;
- ✓ PBR;
- ✓ Furia;
- ✓ Disidrat 04;
- ✓ Elettrometal
- ✓ IDAR.

Questi rifiuti, dal punto di vista prettamente granulometrico, possono essere classificati come limi sabbiosi o sabbie limose. Ad eccezione di quanto prodotto da PBR, le percentuali di componenti granulometriche con diametri minori di 0,004 mm si mantengono inferiori al 20 % e i rifiuti appaiono non plastici o poco plastici, ad esclusione di PBR che presenta un indice di plasticità pari a 20 giustificabile con la maggiore percentuale di fino.

I valori di umidità ottima si mantengono fra il 18% e il 30%, mentre i valori di  $\gamma_{\max}$  all'umidità ottima variano fra 1,3 Mg/mc (Elettrometal) e 1,75 Mg/mc (Navarra). Di conseguenza, anche a seguito di una perfetta compattazione, questo tipo di rifiuto non è sempre in grado di garantire una massa volumica superiore ai 1,7 Mg/mc.

Le prove di taglio diretto restituiscono valori di angolo di attrito di picco sempre superiori ai  $33^\circ$  e valore di coesione compresi fra i 9,26 kPa di PBR e i 36,63 kPa di Elettrometal. Laddove sono state svolte prove ripetute, è stata ricavata una buona stabilità dei parametri di resistenza al taglio. Tutto ciò porta a concludere che i materiali presentano un angolo di attrito  $\varphi \geq 33^\circ$  e una coesione drenata che mediamente può essere valutata in 20 kPa.



	<b>Committente:</b> Azienda Servizi Ambientali SpA	<b>Documento:</b> Relazione geotecnica
	<b>Lavoro:</b> Completamento della valorizzazione a scopo energetico del sito con integrazione dell'impianto fotovoltaico esistente mediante costituzione di una seconda unità energetica	Codice: S24028-PE-RE001-0 Data: Maggio 2024

## 4 PARAMETRI GEOTECNICI CARATTERISTICI

### 4.1 Terreni naturali

In riferimento ai risultati del modello geologico individuato e ai fini delle elaborazioni previste, la successione litostratigrafica dei terreni incassanti la discarica è schematizzata secondo 3 unità geotecniche a comportamento prevalentemente coesivo:

**I Unità:** Da piano campagna a -20 m p.c. (25 ÷ 5 m s.l.m.)

Unità a carattere coesivo prevalentemente argilloso limosi e limoso argillosi, subordinatamente limosi e limoso-sabbiosi.

**II Unità:** Da -20 m a -40m p.c. (5 ÷ -15 m s.l.m.)

Unità a carattere coesivo prevalentemente argilloso limosi e limoso argillosi, subordinatamente limosi e limoso-sabbiosi.

**III Unità:** Da -40m a -125m p.c. (-15/-110 m s.l.m.)

Litotipi prevalentemente argillosi – argilloso limosi

ID	Peso di volume naturale $\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	Angolo di resistenza a taglio $\varphi'$ (°)	Coesione efficace $c'$ (kPa)	Coesione non drenata $c_u$ (kPa)	Modulo edometrico $E_{ed}$ (kPa)	Coefficiente di consolidazione primaria $c_v$ (m <sup>2</sup> /s)
I	18÷19	20÷25	0÷15	80	5000÷10000	1E-08÷1E-06
II	19÷20	20÷25	5÷20	100	7000÷20000	
III	19÷20	20÷25	10÷20	150	15000÷36000	


Figura 4-1. Intervalli dei parametri geotecnici caratteristici.

### 4.2 Rifiuti abbancati

Si è già detto come il "rifiuto" rappresenti un materiale eterogeneo di difficile caratterizzazione geotecnica anche a fronte del cospicuo numero di indagini eseguite. Per cercare di rappresentare al meglio il comportamento, anche in relazione agli studi e alle modellazioni specifiche, il materiale è stato caratterizzato in modo diverso per la valutazione del cedimento e le analisi di stabilità.

#### CARATTERIZZAZIONE PER LA VALUTAZIONE DEI CEDIMENTI.

Si è distinto il rifiuto facente parte della discarica ipogea da quello della discarica epigea. Il primo, già in posto da qualche anno, ha già scontato un certo assestamento ed è stato soggetto alle reazioni chimiche che si sviluppano nel reattore costituito dai rifiuti abbancato che ne modificano le caratteristiche. Per ragioni di semplicità di modellazione e a vantaggio di sicurezza le componenti "Capping" e "Scorie" non vengono

	<b>Committente:</b> Azienda Servizi Ambientali SpA	<b>Documento:</b> Relazione geotecnica
	<b>Lavoro:</b> Completamento della valorizzazione a scopo energetico del sito con integrazione dell'impianto fotovoltaico esistente mediante costituzione di una seconda unità energetica	Codice: S24028-PE-RE001-0 Data: Maggio 2024

direttamente implementate nel modello che ma si assumono per l'intero "corpo delle discarica" le caratteristiche dei fanghi del nucleo della discarica stessa.

I parametri geotecnici caratteristici sono riassunti nella tabella che segue.

ID	$\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	$\phi'$ (°)	$c'$ (kPa)	$E_{ed}$ (kPa)	$c_v$ (m <sup>2</sup> /s)
Corpo discarica epigeo	17	30	20	3700	1E-07
Corpo discarica ipogeo	16	33	20	5000	1E-06

Figura 4-2. Parametri geotecnici caratteristici.

#### CARATTERIZZAZIONE PER LE ANALISI DI STABILITA'


In questo caso, visto il maggior dettaglio necessario per questo tipo di analisi, sono stati distinti i materiali "scorie" che compongono gli argini laterali di ogni livello di coltivazione, i materiali "fanghi" che costituiscono la parte centrale del corpo di discarica, il materiale costituente il capping della discarica e i rifiuti ipogei. I parametri geotecnici caratteristici sono riassunti nella tabella che segue.

ID	$\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	$\phi'$ (°)	$c'$ (kPa)	$c_u$ (kPa)
Corpo discarica epigeo - Scorie	17	36	20	200
Corpo discarica epigeo - Fanghi	18	30	20	200
Corpo discarica epigeo - Capping	20	20	5	50
Corpo discarica ipogeo	16	33	20	20

Figura 4-3. Parametri geotecnici caratteristici.

### 4.3 Falda di riferimento

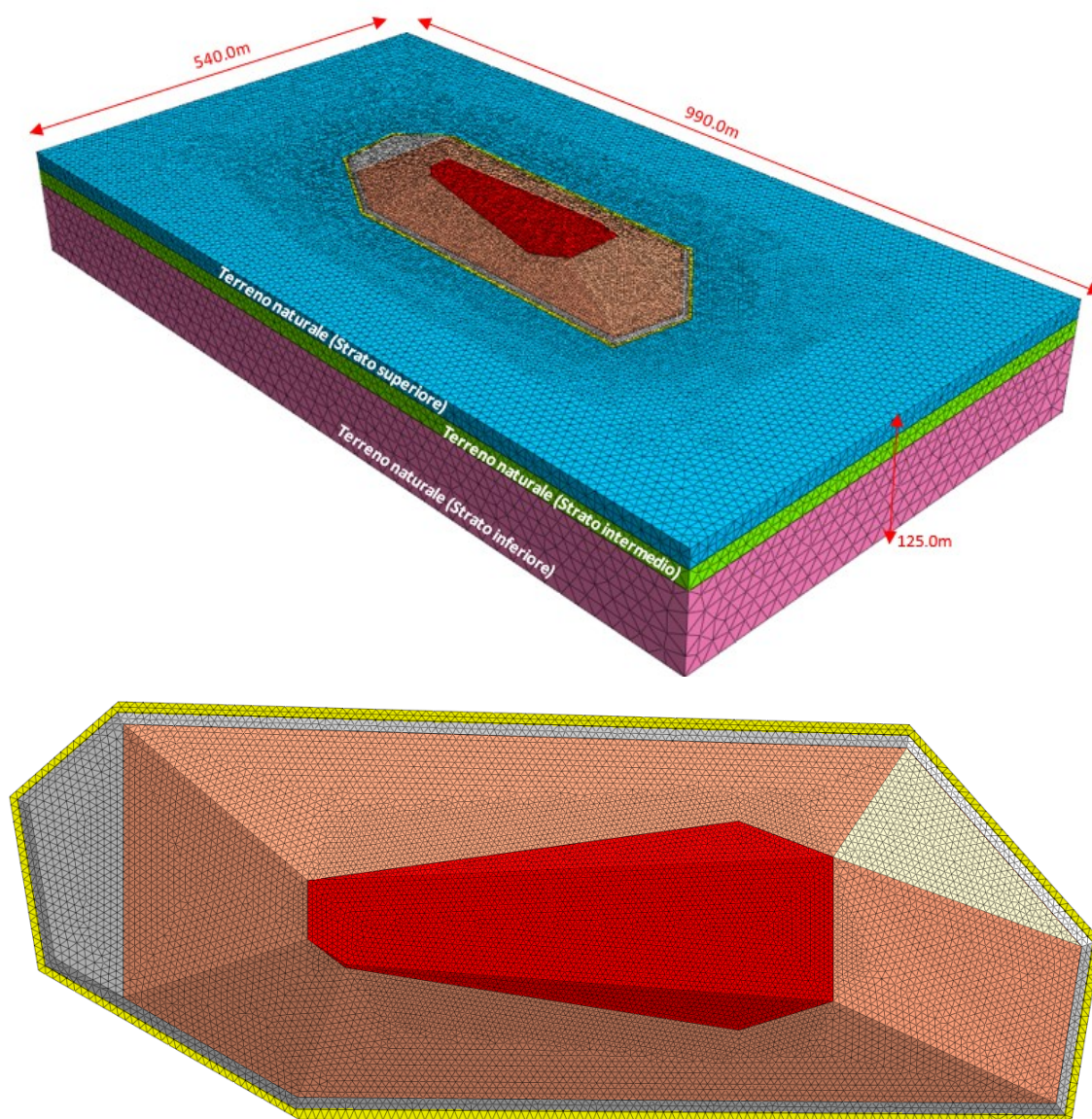
Il regime delle pressioni interstiziali è governato, per gli scenari statici di riferimento, da una falda a piano campagna. In condizioni sismiche cautelativamente si assume falda coincidente con il profilo della discarica stessa.

	<b>Committente:</b> Azienda Servizi Ambientali SpA	<b>Documento:</b> Relazione geotecnica
	<b>Lavoro:</b> Completamento della valorizzazione a scopo energetico del sito con integrazione dell'impianto fotovoltaico esistente mediante costituzione di una seconda unità energetica	Codice: S24028-PE-RE001-0 Data: Maggio 2024

## 5 CEDIMENTI DEI TERRENI DI SOTTOFONDAZIONE

### 5.1 Modello di calcolo

La stima dei cedimenti viene condotta con l'ausilio di una modellazione agli elementi finiti mediante il codice di calcolo Midas GTS NX in condizioni 3D. La geometria del modello e la terminologia utilizzata nel documento sono presentati nelle figure seguenti. Lo strato superiore del terreno naturale è stato sagomato tenendo conto della geometria delle scarpate dell'invaso della precedente cava il cui tombamento ha dato origine alla discarica.




 <b>enser</b>	<b>Committente:</b> Azienda Servizi Ambientali SpA	<b>Documento:</b> Relazione geotecnica
	<b>Lavoro:</b> Completamento della valorizzazione a scopo energetico del sito con integrazione dell'impianto fotovoltaico esistente mediante costituzione di una seconda unità energetica	Codice: S24028-PE-RE001-0 Data: Maggio 2024

Figura 5-1: Geometria modello elementi finiti.

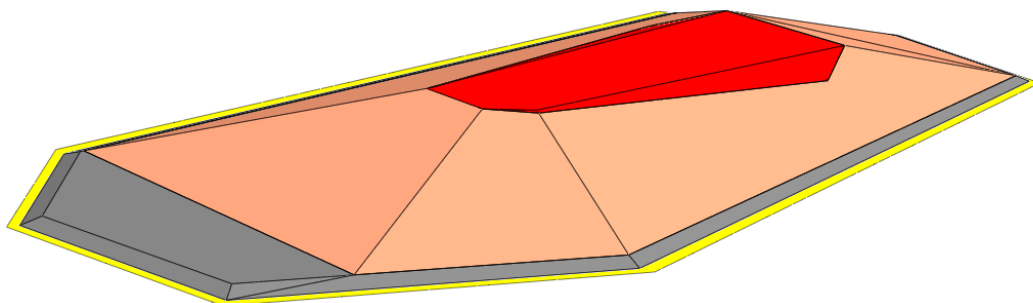


Figura 5-2: Vista assonometrica del volume di corpo discarica epigea.

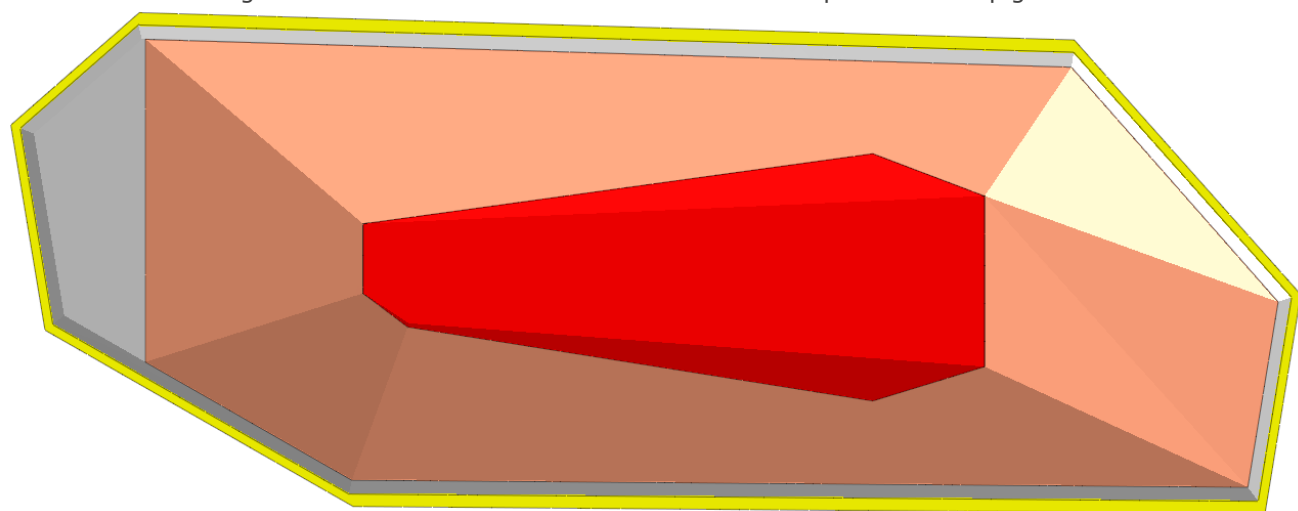
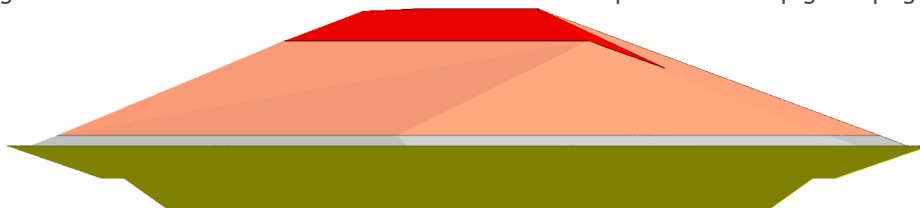


Figura 5-3: Vista dall'alto e laterali del volume di corpo discarica epigea+ipogea.




 <b>enser</b>	<b>Committente:</b> Azienda Servizi Ambientali SpA	<b>Documento:</b> Relazione geotecnica
	<b>Lavoro:</b> Completamento della valorizzazione a scopo energetico del sito con integrazione dell'impianto fotovoltaico esistente mediante costituzione di una seconda unità energetica	Codice: S24028-PE-RE001-0 Data: Maggio 2024



Figura 5-4: Viste Frontali del volume di corpo discarica epigea+ipogea.

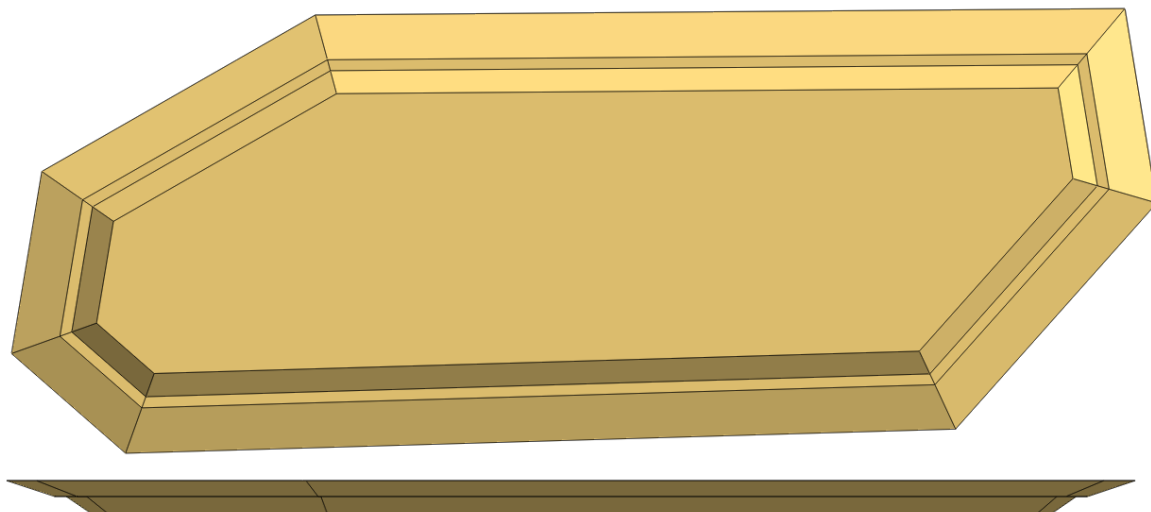


Figura 5-5: Vista dal basso del volume di corpo discarica ipogea.

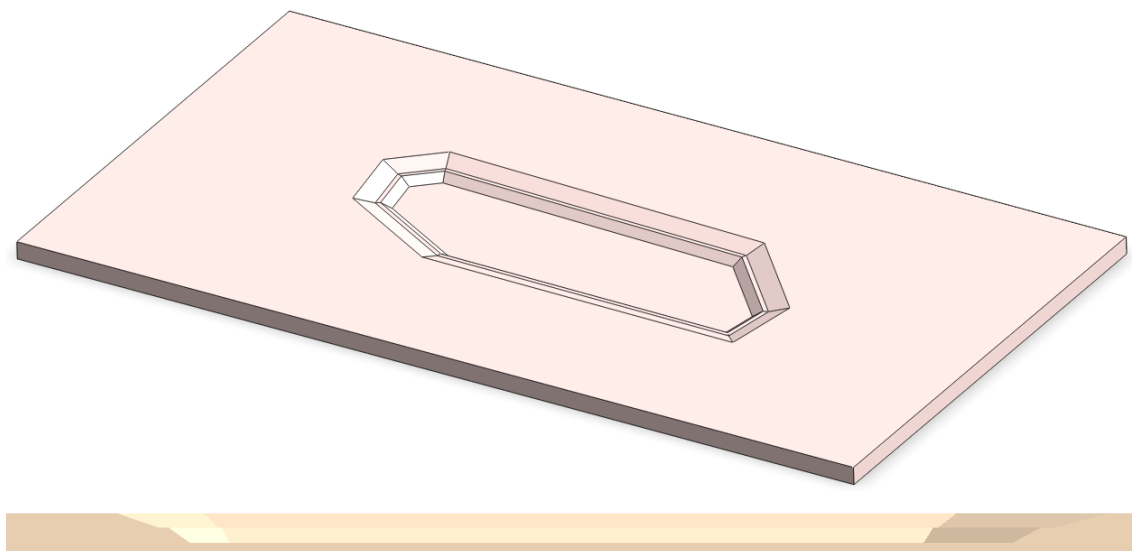



Figura 5-6: Strato superiore del terreno naturale.

Per il terreno naturale, il corpo discarica epigeo e quello ipogeo è stato assunto un modello costitutivo di tipo elasto-plastico alla Mohr Coulomb caratterizzato attraverso i parametri riportati in Figura 5-7.

	<b>Committente:</b> Azienda Servizi Ambientali SpA	<b>Documento:</b> Relazione geotecnica
	<b>Lavoro:</b> Completamento della valorizzazione a scopo energetico del sito con integrazione dell'impianto fotovoltaico esistente mediante costituzione di una seconda unità energetica	Codice: S24028-PE-RE001-0 Data: Maggio 2024

Materiale	$\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	$c'$ (kPa)	$\phi'$ (°)	Eed (kPa)
Corpo discarica Epigeo	17	20	30	3700
Corpo discarica Ipogeo	16	20	33	5000
Terreno naturale (strato superiore - da 0.0m a -20.0m)	19	5	25	7500
Terreno naturale (strato intermedio - da -20.0m a -40.0m)	19	10	25	var. linearmente da 7500 a 17500
Terreno naturale (strato inferiore -da -40.0m a -100.0m)	19	15	25	var. linearmente da 17500 a 30000

Figura 5-7 –Parametri geotecnici di calcolo.

## 5.2 Stima dei cedimenti

In Figura 5-8 si riporta la mappa di colore dei cedimenti nella sua globalità sulla superficie del corpo discarica e sul piano campagna circostante, nella Figura 5-20 e Figura 5-21 si riportano alcune immagini significative per mostrare la distribuzione dei cedimenti all'interno del corpo discarica e del terreno di fondazione:

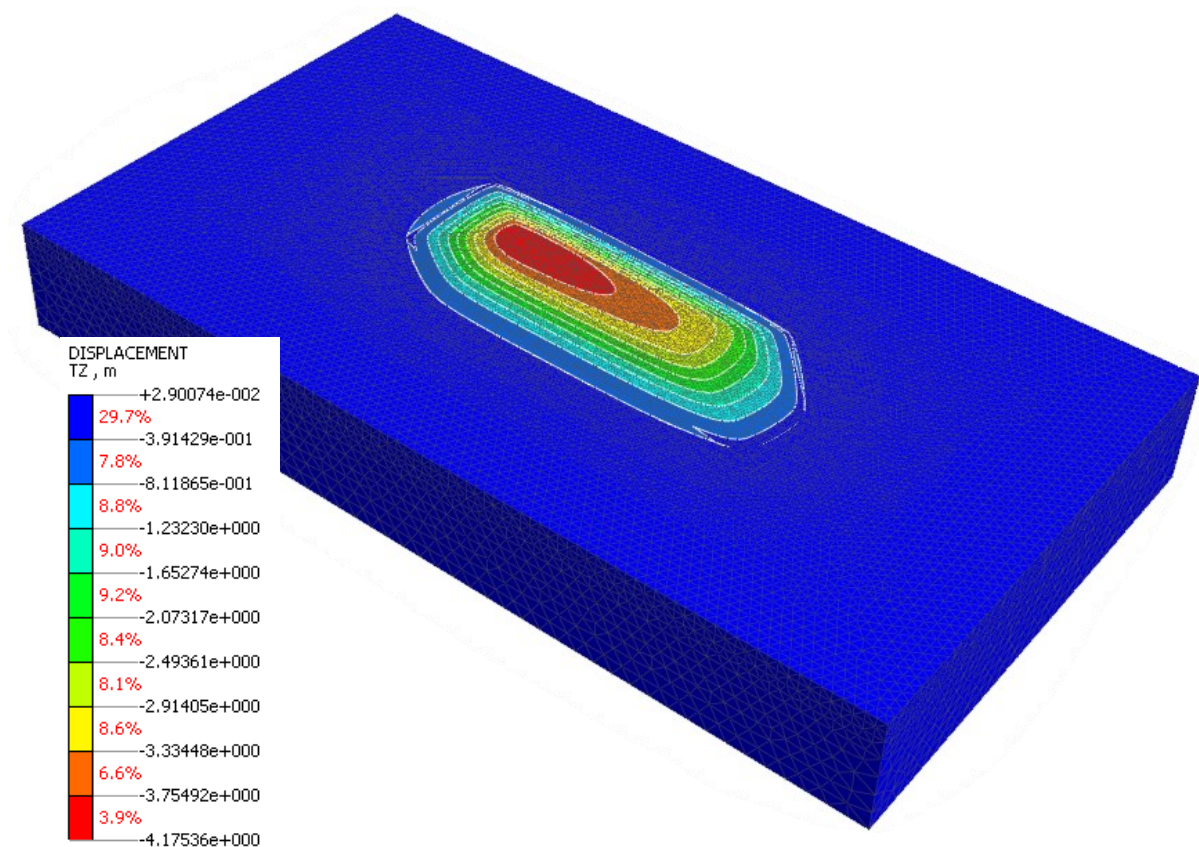



Figura 5-8: Vista globale degli spostamenti verticali.



	<b>Committente:</b> Azienda Servizi Ambientali SpA	<b>Documento:</b> Relazione geotecnica
	<b>Lavoro:</b> Completamento della valorizzazione a scopo energetico del sito con integrazione dell'impianto fotovoltaico esistente mediante costituzione di una seconda unità energetica	Codice: S24028-PE-RE001-0 Data: Maggio 2024

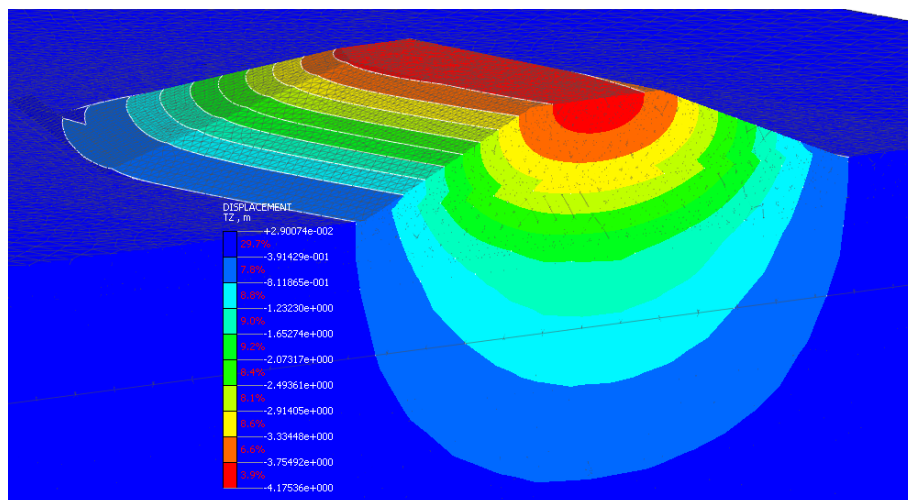


Figura 5-9: Distribuzione dei cedimenti nel sottosuolo.

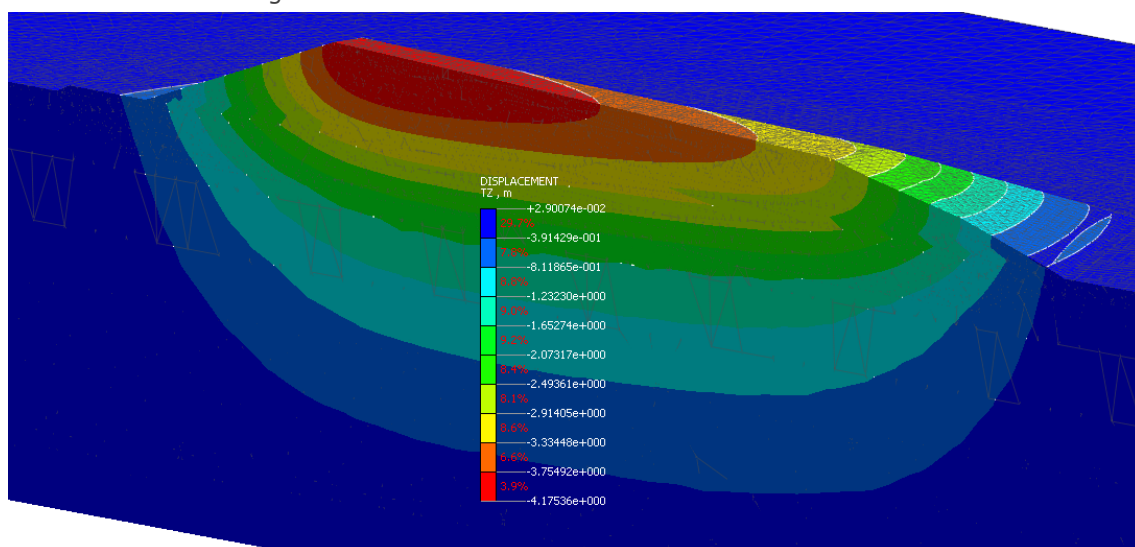



Figura 5-10: Distribuzione dei cedimenti nel sottosuolo.

	<b>Committente:</b> Azienda Servizi Ambientali SpA	<b>Documento:</b> Relazione geotecnica
	<b>Lavoro:</b> Completamento della valorizzazione a scopo energetico del sito con integrazione dell'impianto fotovoltaico esistente mediante costituzione di una seconda unità energetica	Codice: S24028-PE-RE001-0 Data: Maggio 2024

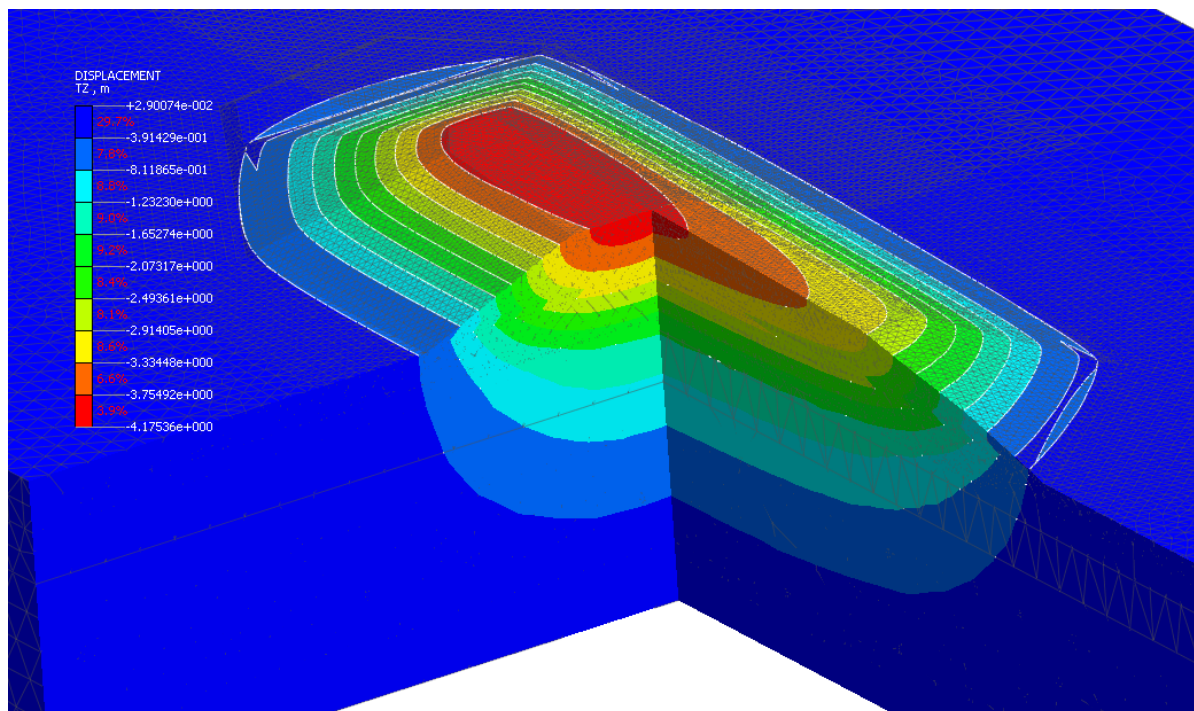


Figura 5-11: Distribuzione dei cedimenti nel sottosuolo.

In Figura 5-20 e Figura 5-21 si riportano le mappe di colore dei cedimenti con particolare riferimento al corpo scarica.

I cedimenti rappresentati sono quelli dovuti al peso proprio del corpo scarica, nell'analisi infatti i cedimenti vengono annullati al termine della fase di realizzazione del corpo ipogeo in cui viene aggiornato lo stato tensionale del terreno di fondazione al di sotto del piano campagna (+25mslm). Il peso proprio del corpo scarica si ipotizza venga applicato istantaneamente a partire da tale fase.

Considerato che lo scopo dell'analisi è quello di stimare i cedimenti a lungo termine, essa viene condotta considerando condizioni drenate sia per i terreni di fondazioni che per il corpo scarica.

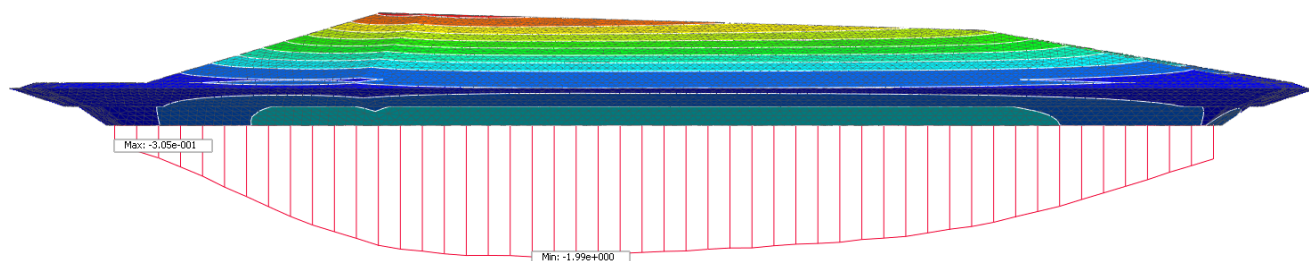



Figura 5-12: Diagramma dei cedimenti lungo l'asse longitudinale a livello del piano di imposta dell'ipogeo +10.4m s.l.m. ( $w_{max}=199\text{cm}$ ).



	<b>Committente:</b> Azienda Servizi Ambientali SpA	<b>Documento:</b> Relazione geotecnica
	<b>Lavoro:</b> Completamento della valorizzazione a scopo energetico del sito con integrazione dell'impianto fotovoltaico esistente mediante costituzione di una seconda unità energetica	Codice: S24028-PE-RE001-0 Data: Maggio 2024

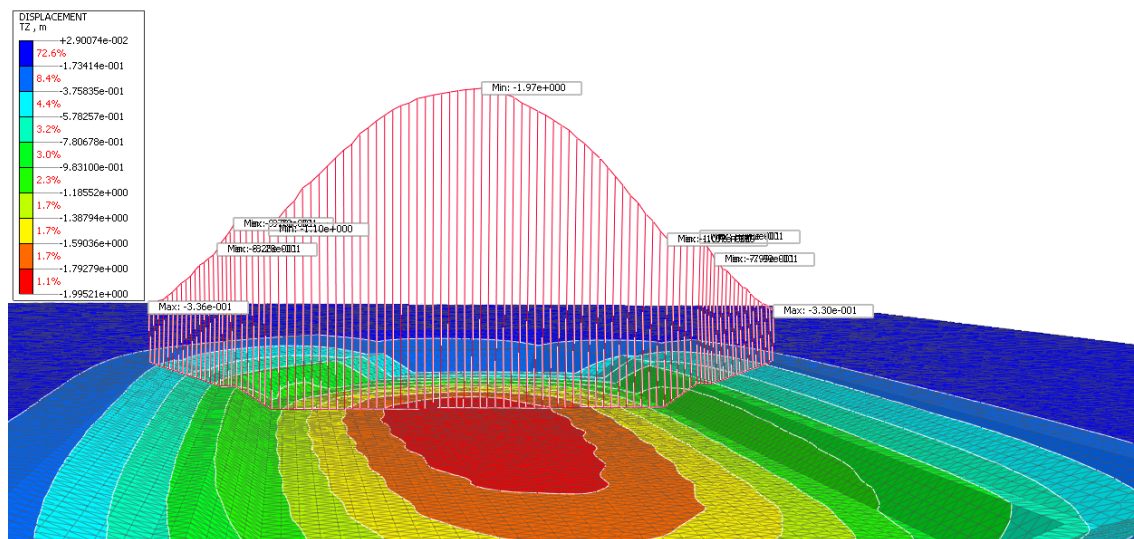


Figura 5-13: Diagramma dei cedimenti lungo la sezione trasversale di massimo cedimento riferiti all'estradosso del terreno naturale ( $w_{\max}=197\text{cm}$ ).

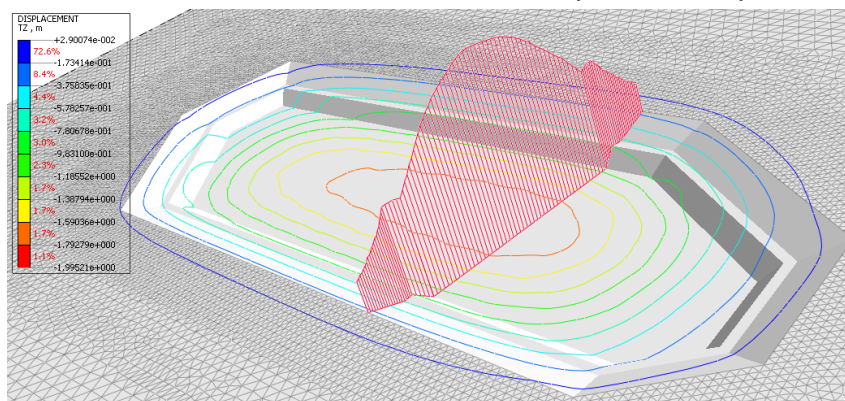


Figura 5-14: Vista assonometrica del diagramma dei cedimenti lungo la sezione trasversale di massimo cedimento riferiti all'estradosso del terreno naturale ( $w_{\max}=197\text{cm}$ ).

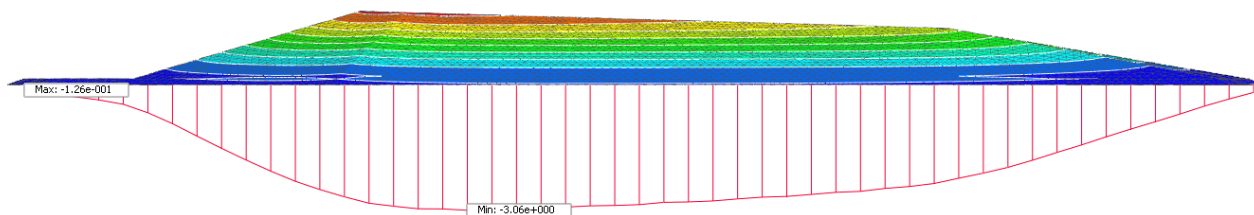



Figura 5-15: Diagramma dei cedimenti lungo l'asse longitudinale a livello del piano di imposta della discarica epigea +25.0m slm ( $w_{\max}=306\text{cm}$ ).





	<b>Committente:</b> Azienda Servizi Ambientali SpA	<b>Documento:</b> Relazione geotecnica
	<b>Lavoro:</b> Completamento della valorizzazione a scopo energetico del sito con integrazione dell'impianto fotovoltaico esistente mediante costituzione di una seconda unità energetica	Codice: S24028-PE-RE001-0 Data: Maggio 2024

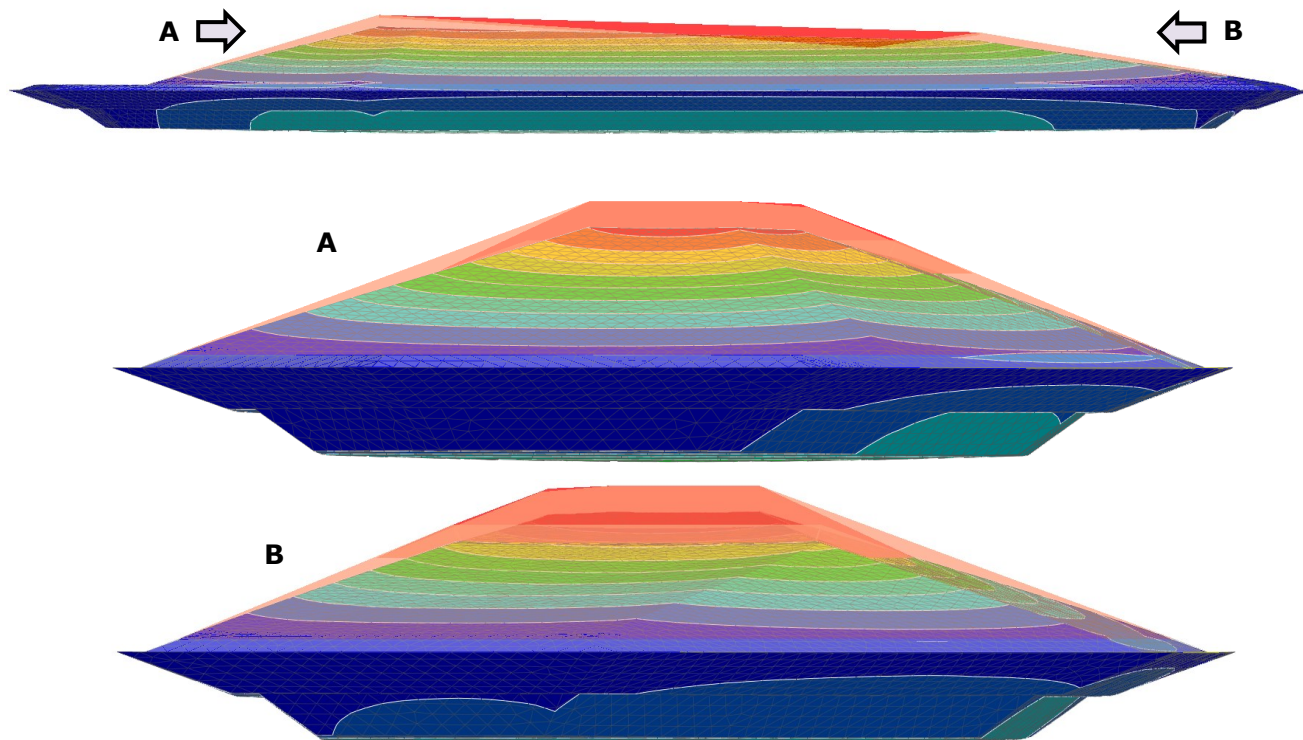



Figura 5-19: Configurazione deformata del corpo discarica e configurazione iniziale (in trasparenza).



 <b>enser</b>	<b>Committente:</b> Azienda Servizi Ambientali SpA	<b>Documento:</b> Relazione geotecnica
	<b>Lavoro:</b> Completamento della valorizzazione a scopo energetico del sito con integrazione dell'impianto fotovoltaico esistente mediante costituzione di una seconda unità energetica	Codice: S24028-PE-RE001-0 Data: Maggio 2024

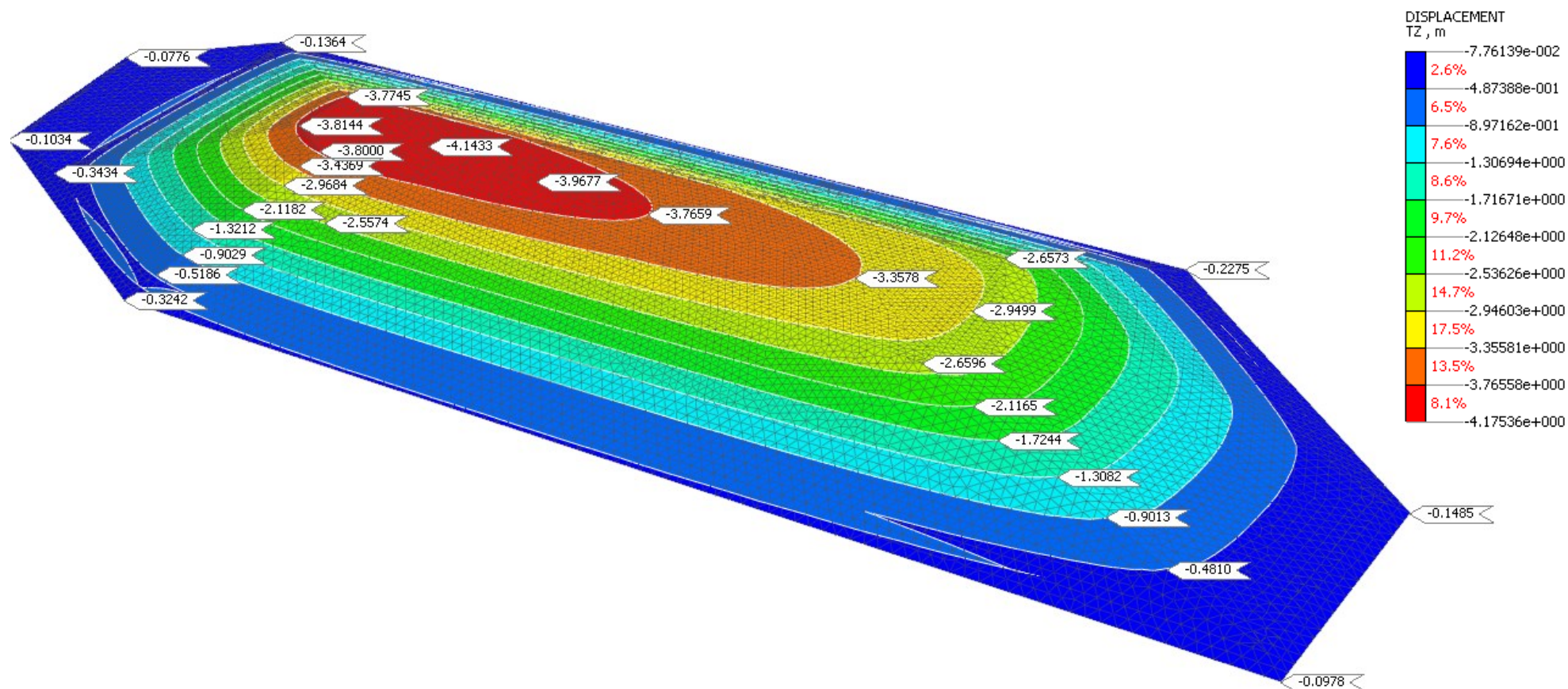



Figura 5-20: Mappa spostamenti verticali nel corpo scarica.

	<b>Committente:</b> Azienda Servizi Ambientali SpA	<b>Documento:</b> Relazione geotecnica
	<b>Lavoro:</b> Completamento della valorizzazione a scopo energetico del sito con integrazione dell'impianto fotovoltaico esistente mediante costituzione di una seconda unità energetica	Codice: S24028-PE-RE001-0 Data: Maggio 2024

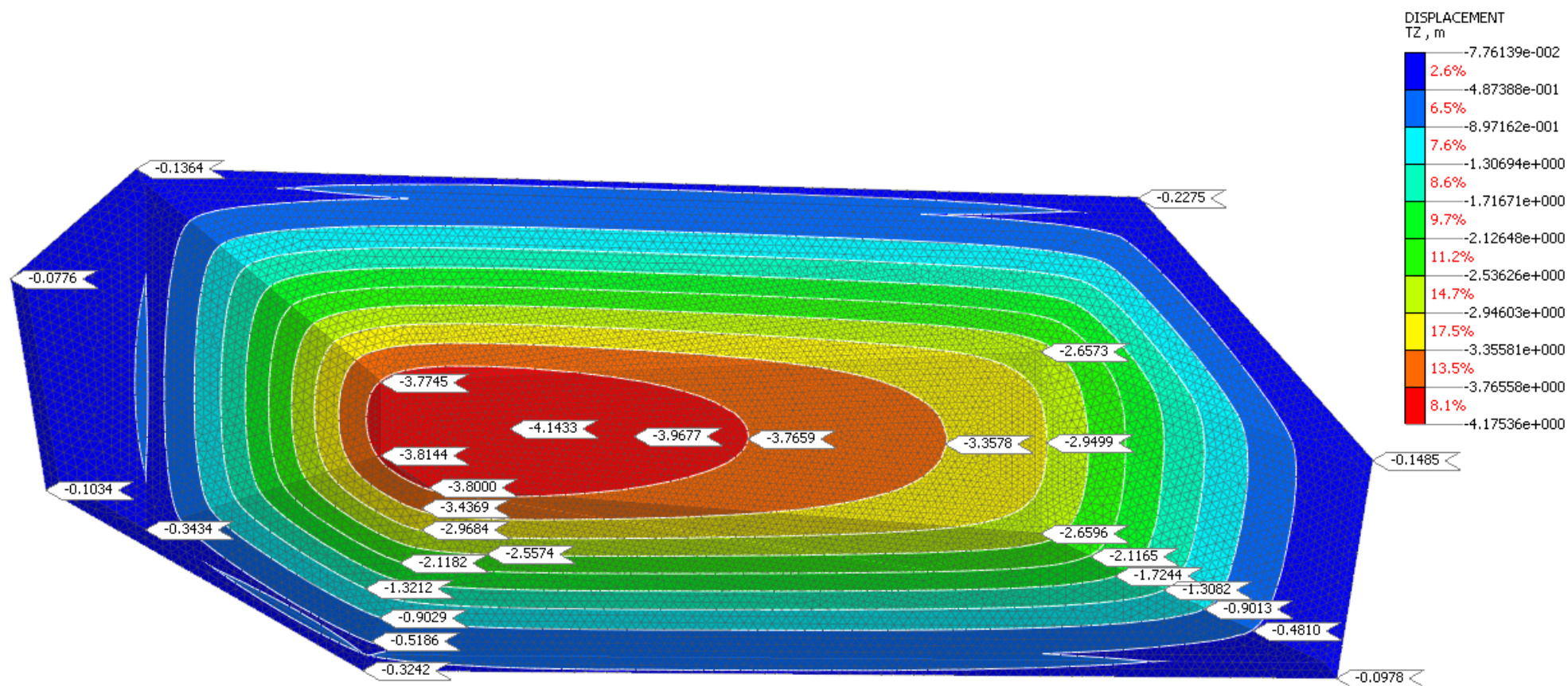



Figura 5-21: Mappa spostamenti verticali nel corpo discarica.

	<b>Committente:</b> Azienda Servizi Ambientali SpA	<b>Documento:</b> Relazione geotecnica
	<b>Lavoro:</b> Completamento della valorizzazione a scopo energetico del sito con integrazione dell'impianto fotovoltaico esistente mediante costituzione di una seconda unità energetica	Codice: S24028-PE-RE001-0 Data: Maggio 2024

## 5.3 Decorso cedimenti nel tempo

La stima del decorso dei cedimenti nel tempo, anche in considerazione delle fasi di costruzione che prevedono una realizzazione del corpo discarica lenta, è stata effettuata in maniera semplificata ricorrendo alla teoria della consolidazione monodimensionale di Terzaghi e adottando i coefficienti di consolidazione verticale ed i valori di permeabilità determinati al capitolo 3.

In particolare, a partire dai valori del cedimento finale forniti dal modello 3D e rappresentati in Figura 5-22, alla base del corpo Ipogeo (199 cm, vedi Figura 5-17 ), alla base del corpo Discarica (306 cm, vedi Figura 5-18 ) ed al tetto del corpo Discarica (417 cm, vedi Figura 5-16, Figura 5-20) si desumono i valori degli accorciamenti elastici  $w_r$  all'interno del corpo Discarica, corpo Ipogeo e Terreno Naturale mostrati in Figura 5-23)

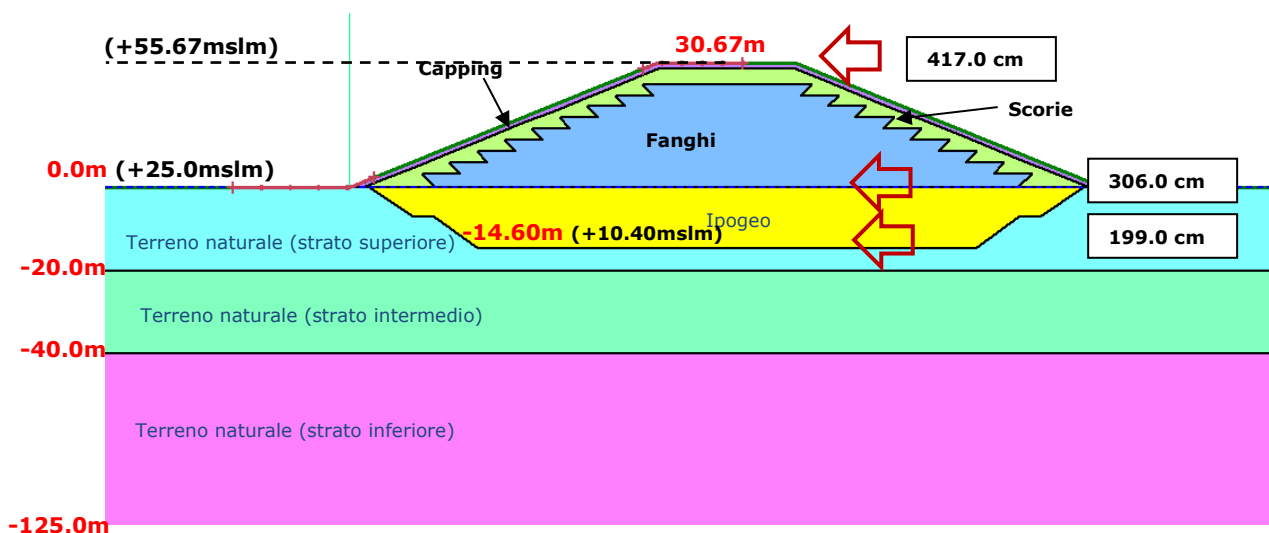



Figura 5-22: Cedimenti finali su una verticale di riferimento.

Materiale	H (m)	H/2	(H/2) <sup>2</sup>	Cv (m <sup>2</sup> /sec)	w <sub>r</sub> (cm)	Cv*H <sup>2</sup>
C. Discarica Epigeo	30.67	15.335	235.16	1.00E-07	111.00	2.35E-05
C. Discarica Ipogeo	14.6	7.3	53.29	1.04E-06	107.00	5.52E-05
Terreno Naturale	100	50	2500.00	2.30E-07	199.00	5.75E-04

Figura 5-23: Aliquota di cedimento a carico di C. Discarica Ipogeo, C. Discarica Epigeo e Terreno Naturale.

Il decorso nel tempo del cedimento del terreno naturale, del corpo ipogeo e del corpo discarica dovuto al peso proprio del corpo discarica è stato valutato ipotizzando che la costruzione avvenga istantaneamente; inoltre ogni tentativo di ricostruire con esattezza la reale storia di carico presente e futura incontra ostacoli ed incertezze tali da preferire un approccio approssimato ma semplice, in grado di fornire risposte



	<b>Committente:</b> Azienda Servizi Ambientali SpA	<b>Documento:</b> Relazione geotecnica
	<b>Lavoro:</b> Completamento della valorizzazione a scopo energetico del sito con integrazione dell'impianto fotovoltaico esistente mediante costituzione di una seconda unità energetica	Codice: S24028-PE-RE001-0 Data: Maggio 2024

altrettanto semplici; pertanto sulla scorta delle caratteristiche della consolidazione appena esaminate, di seguito viene mostrata l'evoluzione nel tempo dei cedimenti nei 3 corpi principali e di un punto al tetto della discarica.

In Figura 5-24 per le tre componenti in deformazione (Corpo Discarica Epigea, Corpo Discarica Ipogeo e Terreno Naturale) sono valutati i cedimenti corrispondenti in funzione di un prefissato valore del grado di consolidazione  $U\%$  ovvero del tempo fisico. Il cedimento riportato relativo al tetto della discarica è la somma dei 3 suddetti contributi. L'evoluzione nel tempo del cedimento all'interno del terreno naturale (199cm), del corpo discarica ipogeo ( $w_f=306-199=107\text{cm}$ ) e del corpo discarica epigeo ( $w_f=417-306=111\text{cm}$ ) viene restituita nel grafico cedimento-tempo di Figura 5-25, quella di un punto al tetto del Corpo Discarica in Figura 5-26.

**Decorso cedimenti nell'ipogeo**

t (anni)	0.083	0.167	0.25	0.416667	0.5	1	1.5	2	3	5	10	20	50	70	100
t (mesi)	1	2	3	5	6	12	18	24	36	60	120	240	600	840	1200
T	0.051	0.102	0.153	0.256	0.307	0.613	0.920	1.227	1.840	3.067	6.134	12.268	30.669	42.937	61.338
U	26%	36%	44%	57%	62%	82%	91%	96%	98%	99%	100%	100%	100%	100%	99%
w(cm)	27.29	38.58	47.19	60.58	66.04	87.93	97.89	102.22	105.22	106.41	106.68	107.00	107.00	107.00	107.00
w <sub>∞</sub> -W	79.71	68.42	59.81	46.42	40.96	19.07	9.11	4.78	1.78	0.59	0.32	0.00	0.00	0.00	0.00
	107.00	107.00	107.00	107.00	107.00	107.00	107.00	107.00	107.00	107.00	107.00	107.00	107.00	107.00	107.00

**Decorso cedimenti nel banco di terreno naturale**

t (anni)	0.083	0.167	0.25	0.416667	0.5	1	1.5	2	3	5	10	20	50	70	100
t (mesi)	1	2	3	5	6	12	18	24	36	60	120	240	600	840	1200
T	2.42E-04	0.000484	0.000725	0.001209	0.001451	0.002901	0.004352	0.005803	0.008704	0.014507	0.029013	0.058026	0.145066	0.203092	0.290131
U	2%	2%	3%	4%	4%	6%	7%	9%	11%	14%	19%	27%	43%	51%	60%
w(cm)	3.49	4.94	6.05	7.81	8.55	12.09	14.81	17.10	20.95	27.05	38.25	54.08	85.39	100.79	119.66
w <sub>∞</sub> -W	195.51	194.06	192.95	191.19	190.45	186.91	184.19	181.90	178.05	171.95	160.75	144.92	113.61	98.21	79.34
	199.00	199.00	199.00	199.00	199.00	199.00	199.00	199.00	199.00	199.00	199.00	199.00	199.00	199.00	199.00


**Decorso cedimenti corpo discarica**

t (anni)	0.083	0.167	0.25	0.416667	0.5	1	1.5	2	3	5	10	20	50	70	100
t (mesi)	1	2	3	5	6	12	18	24	36	60	120	240	600	840	1200
T	0.001	0.002	0.003	0.006	0.007	0.013	0.020	0.027	0.040	0.067	0.134	0.268	0.671	0.939	1.341
U	4%	5%	7%	8%	9%	13%	16%	18%	23%	29%	41%	58%	85%	92%	96%
w(cm)	4.19	5.92	7.25	9.36	10.26	14.50	17.76	20.51	25.12	32.43	45.81	64.31	93.85	101.94	106.99
w <sub>∞</sub> -W	106.81	105.08	103.75	101.64	100.74	96.50	93.24	90.49	85.88	78.57	65.19	46.69	17.15	9.06	4.01
	111.00	111.00	111.00	111.00	111.00	111.00	111.00	111.00	111.00	111.00	111.00	111.00	111.00	111.00	111.00

**Decorso cedimenti di un punto al tetto della discarica w<sub>∞</sub>= 417.00 cm**

t (anni)	0.083	0.167	0.25	0.416667	0.5	1	1.5	2	3	5	10	20	50	70	100
t (mesi)	1	2	3	5	6	12	18	24	36	60	120	240	600	840	1200
w(cm)	34.97	49.44	60.49	77.75	84.85	114.53	130.47	139.84	151.29	165.88	190.73	225.39	286.24	309.73	333.66
w <sub>∞</sub> -W	382.03	367.56	356.51	339.25	332.15	302.47	286.53	277.16	265.71	251.12	226.27	191.61	130.76	107.27	83.34
	417.00	417.00	417.00	417.00	417.00	417.00	417.00	417.00	417.00	417.00	417.00	417.00	417.00	417.00	417.00

Figura 5-24: Decorso dei cedimenti nel tempo.

	<b>Committente:</b> Azienda Servizi Ambientali SpA	<b>Documento:</b> Relazione geotecnica
	<b>Lavoro:</b> Completamento della valorizzazione a scopo energetico del sito con integrazione dell'impianto fotovoltaico esistente mediante costituzione di una seconda unità energetica	Codice: S24028-PE-RE001-0 Data: Maggio 2024

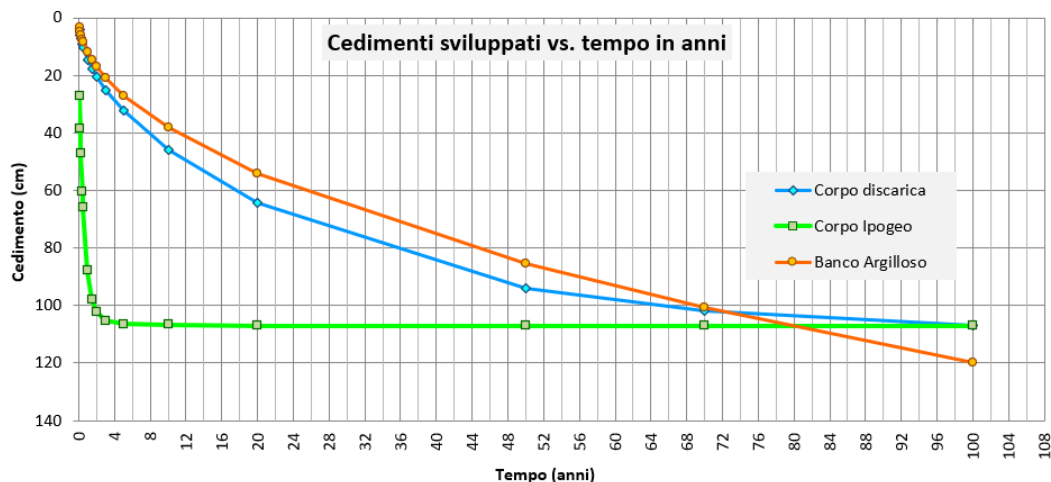


Figura 5-25: Decorso dei cedimenti nel tempo.

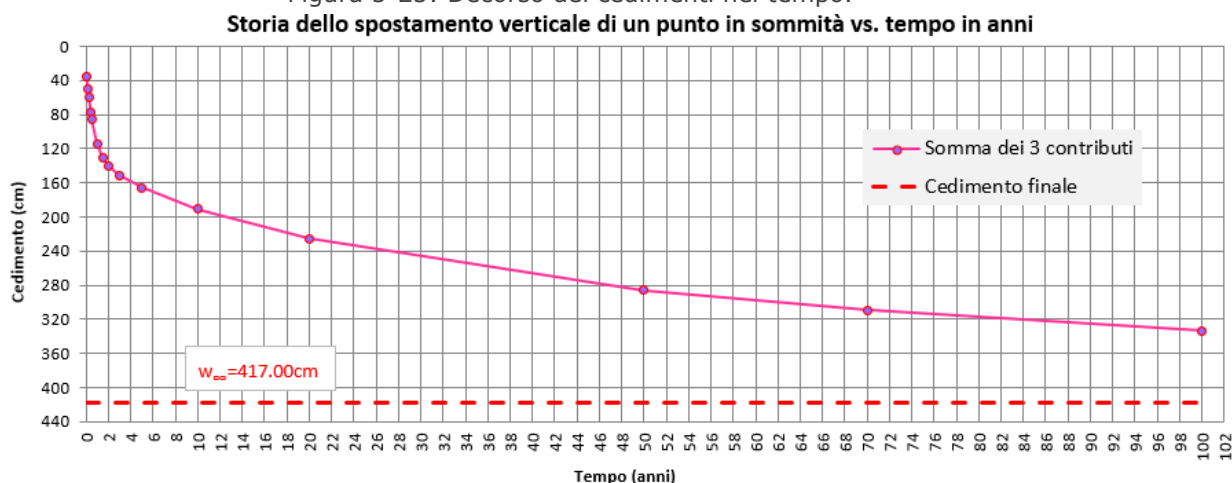


Figura 5-26: Decorso dei cedimenti nel tempo.


I diagrammi e le tabelle riportati in Figura 5-24 ÷ Figura 5-26 si prestano ad essere usati in svariati modi; si evince infatti che l'effetto di un carico sul cedimento del corpo ipogeo si esaurisce pressoché completamente in 3 anni mentre sul terreno di fondazione il decorso è decisamente più lento.

Dal grafico in Figura 5-26 e dall'ultima tabella di Figura 5-24 che fa riferimento ad un punto al tetto della discarica,

Decorso cedimenti di un punto al tetto della discarica $w_{\infty}=417.00$ cm														
t (anni)	0.083	0.167	0.25	0.416667	0.5	1	1.5	2	3	5	10	20	50	100
t (mesi)	1	2	3	5	6	12	18	24	36	60	120	240	600	1200
w (cm)	34.97	49.44	60.49	77.75	84.85	114.53	130.47	139.84	151.29	165.88	190.73	225.39	286.24	333.66
$w_{\infty}-W$	382.03	367.56	356.51	339.25	332.15	302.47	286.53	277.16	265.71	251.12	226.27	191.61	130.76	83.34
	417.00	417.00	417.00	417.00	417.00	417.00	417.00	417.00	417.00	417.00	417.00	417.00	417.00	417.00

si può vedere che dopo 10 anni dalla costruzione è stato scontato un cedimento pari a circa 191 cm sui 417 cm complessivi e che il cedimento che resta da scontare



	<b>Committente:</b> Azienda Servizi Ambientali SpA	<b>Documento:</b> Relazione geotecnica
	<b>Lavoro:</b> Completamento della valorizzazione a scopo energetico del sito con integrazione dell'impianto fotovoltaico esistente mediante costituzione di una seconda unità energetica	Codice: S24028-PE-RE001-0 Data: Maggio 2024

è quindi di 226 cm circa; a 50 anni il cedimento avrà raggiunto i 286 cm circa e rimangono da scontare ancora 131cm circa e a 100 anni il cedimento avrà raggiunto 334 cm circa rimanendo da scontare ancora 83cm circa.

Inoltre, poiché la deformazione è dovuta all'assestamento degli strati di terreno più profondi, il bacino di deflessione sarà talmente ampio e steso da generare effetti distorsivi trascurabili.

Volendo invece studiare il decorso nel tempo delle deformazioni del terreno naturale, si può fare riferimento alla sezione trasversale dove si sviluppa il massimo cedimento. Qui, alla luce della geometria delle scarpate della originaria cava, sono identificati i seguenti punti notevoli:

- ✓ A: Sommità della scarpata;
- ✓ B: Banchina al piede della prima scarpata;
- ✓ C: Banchina alla sommità della seconda scarpata;
- ✓ D: Fondo al piede della seconda scarpata;
- ✓ E: Fondo nel punto di massimo cedimento.

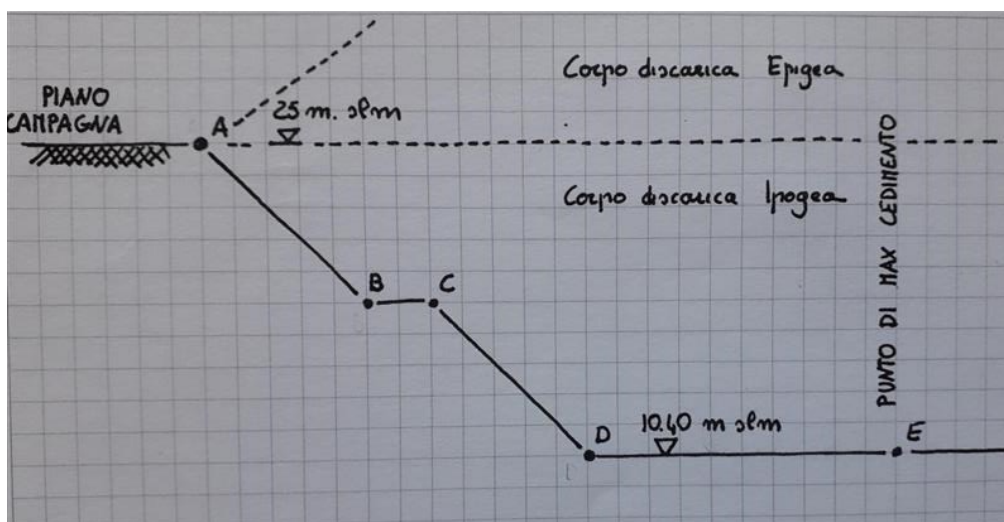



Figura 5-27: Punti notevoli per lo studio del cedimento del terreno naturale.

I valori di cedimento a lungo termine sono rappresentati nelle mappe grafiche qui sotto riportate.

	<b>Committente:</b> Azienda Servizi Ambientali SpA	<b>Documento:</b> Relazione geotecnica
	<b>Lavoro:</b> Completamento della valorizzazione a scopo energetico del sito con integrazione dell'impianto fotovoltaico esistente mediante costituzione di una seconda unità energetica	Codice: S24028-PE-RE001-0 Data: Maggio 2024

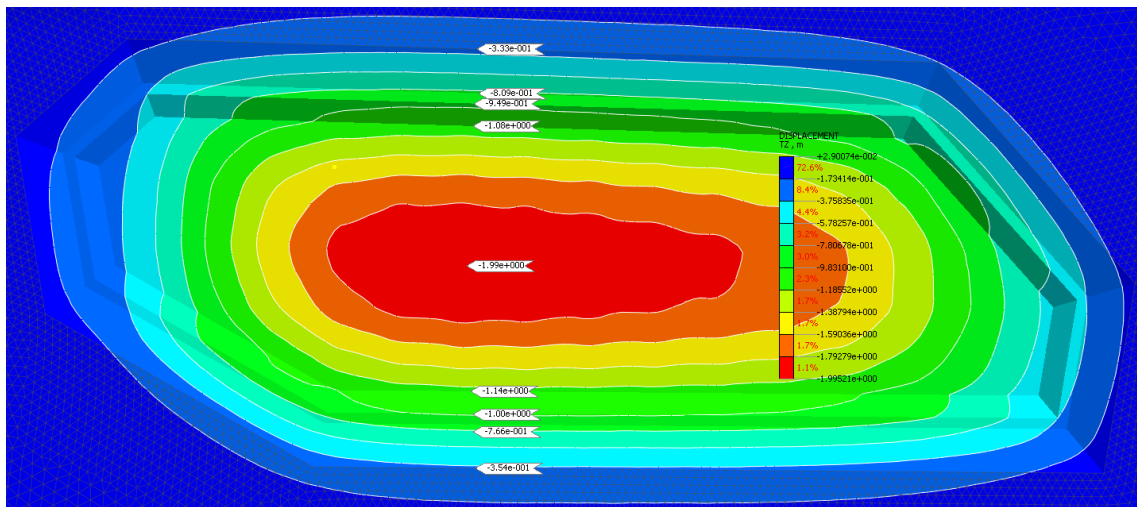


Figura 5-28: Cedimenti nella sezione di massimo cedimento – Vista dall’alto.

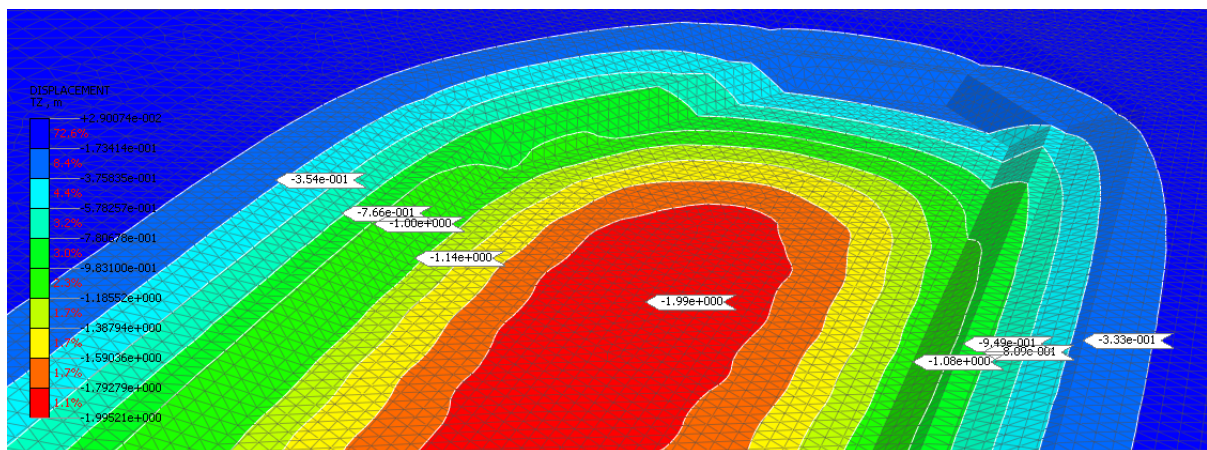



Figura 5-29: Cedimenti nella sezione di massimo cedimento – Vista assonometrica.

Il decorso nel tempo dei cedimenti nei punti notevoli A,B,C,D e E è riportato nella tabella di Figura 5-30 e nel grafico di Figura 5-31. I valori dei cedimenti assoluti in cm assunti per le elaborazioni sono la media dei valori letti sulla mappa di Figura 5-28 e Figura 5-29 e sono di seguito riassunti:

		<b>bordo1</b>	<b>bordo2</b>	<b>media</b>
A	Sommità della scarpata	35.4	33.3	<b>34.4</b>
B	Banchina al piede della prima scarpata	76.6	80.9	<b>78.8</b>
C	Banchina alla sommità della seconda scarpata	100	94.9	<b>97.5</b>
D	Fondo al piede della seconda scarpata	114	108	<b>111.0</b>

	<b>Committente:</b> Azienda Servizi Ambientali SpA	<b>Documento:</b> Relazione geotecnica
	<b>Lavoro:</b> Completamento della valorizzazione a scopo energetico del sito con integrazione dell'impianto fotovoltaico esistente mediante costituzione di una seconda unità energetica	Codice: S24028-PE-RE001-0 Data: Maggio 2024

Decorso cedimenti Punto A		w <sub>∞</sub> =		34.40		cm									
t (anni)	0.083	1.000	5	10	15	20	25	30	40	50	60	70	80	90	100
T	1.84E-04	2.21E-03	1.10E-02	2.21E-02	3.31E-02	4.42E-02	5.52E-02	6.63E-02	8.84E-02	1.10E-01	1.33E-01	1.55E-01	1.77E-01	1.99E-01	2.21E-01
U	2%	5%	12%	17%	21%	24%	27%	29%	34%	37%	41%	44%	47%	50%	53%
w(cm)	0.53	1.82	4.08	5.77	7.07	8.16	9.12	9.99	11.53	12.89	14.11	15.24	16.27	17.24	18.15
w <sub>∞</sub> -W	33.87	32.58	30.32	28.63	27.33	26.24	25.28	24.41	22.87	21.51	20.29	19.16	18.13	17.16	16.25

Decorso cedimenti punto B			$w_{\infty} =$		78.80 cm										
t (anni)	0.083	1.000	5	10	15	20	25	30	40	50	60	70	80	90	100
T	2.09E-04	2.51E-03	1.26E-02	2.51E-02	3.77E-02	5.02E-02	6.28E-02	7.53E-02	1.00E-01	1.26E-01	1.51E-01	1.76E-01	2.01E-01	2.26E-01	2.51E-01
U	2%	6%	13%	18%	22%	25%	28%	31%	36%	40%	44%	47%	50%	53%	56%
w(cm)	1.29	4.46	9.96	14.09	17.25	19.92	22.27	24.40	28.16	31.47	34.45	37.18	39.69	42.04	44.23
$w_{\infty}-W$	77.51	74.34	68.84	64.71	61.55	58.88	56.53	54.40	50.64	47.33	44.35	41.62	39.11	36.76	34.57

Decorso cedimenti Punto C			$w_{\infty} =$	97.50	cm										
t (anni)	0.083	1.000	5	10	15	20	25	30	40	50	60	70	80	90	100
T	2.09E-04	2.51E-03	1.26E-02	2.51E-02	3.77E-02	5.02E-02	6.28E-02	7.53E-02	1.00E-01	1.26E-01	1.51E-01	1.76E-01	2.01E-01	2.26E-01	2.51E-01
U	2%	6%	13%	18%	22%	25%	28%	31%	36%	40%	44%	47%	50%	53%	56%
w(cm)	1.59	5.51	12.33	17.43	21.35	24.65	27.56	30.19	34.84	38.94	42.63	46.00	49.11	52.02	54.73
$w_{\infty}-W$	95.91	91.99	85.17	80.07	76.15	72.85	69.94	67.31	62.66	58.56	54.87	51.50	48.39	45.48	42.77

Decorso cedimenti Punto D			$w_{\infty} =$	111.00 cm											
t (anni)	0.083	1.000	5	10	15	20	25	30	40	50	60	70	80	90	100
T	2.42E-04	2.90E-03	1.45E-02	2.90E-02	4.35E-02	5.80E-02	7.25E-02	8.70E-02	1.16E-01	1.45E-01	1.74E-01	2.03E-01	2.32E-01	2.61E-01	2.90E-01
U	2%	6%	14%	19%	24%	27%	30%	33%	38%	43%	47%	51%	54%	57%	60%
w(cm)	1.95	6.75	15.09	21.33	26.13	30.17	33.72	36.94	42.63	47.63	52.12	56.22	59.99	63.49	66.75
$w_{\infty}-W$	109.05	104.25	95.91	89.67	84.87	80.83	77.28	74.06	68.37	63.37	58.88	54.78	51.01	47.51	44.25

Decorso cedimenti Punto E		w <sub>∞</sub> =		199.00 cm											
t (anni)	0.083	1.000	5	10	15	20	25	30	40	50	60	70	80	90	100
T	2.42E-04	2.90E-03	1.45E-02	2.90E-02	4.35E-02	5.80E-02	7.25E-02	8.70E-02	1.16E-01	1.45E-01	1.74E-01	2.03E-01	2.32E-01	2.61E-01	2.90E-01
U	2%	6%	14%	19%	24%	27%	30%	33%	38%	43%	47%	51%	54%	57%	60%
w(cm)	3.49	12.09	27.05	38.25	46.84	54.08	60.46	66.22	76.43	85.39	93.44	100.79	107.56	113.83	119.66
w <sub>∞</sub> -W	195.51	186.91	171.95	160.75	152.16	144.92	138.54	132.78	122.57	113.61	105.56	98.21	91.44	85.17	79.34

Figura 5-30: Decorso dei cedimenti nel tempo nei punti notevoli A,B,C,D e E.

Decorso dello spostamento verticale di alcuni punti significativi alla base dell'ipogeo vs. tempo in anni

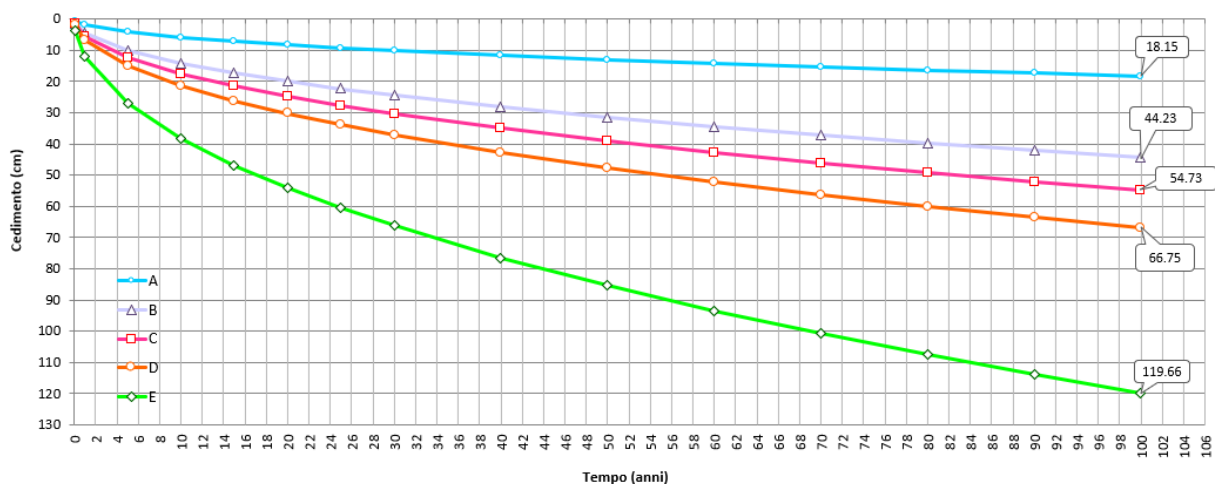



Figura 5-31: Decorso dei cedimenti nel tempo nei punti notevoli A,B,C,D e E.

	<b>Committente:</b> Azienda Servizi Ambientali SpA	<b>Documento:</b> Relazione geotecnica
	<b>Lavoro:</b> Completamento della valorizzazione a scopo energetico del sito con integrazione dell'impianto fotovoltaico esistente mediante costituzione di una seconda unità energetica	Codice: S24028-PE-RE001-0 Data: Maggio 2024

## 6 CEDIMENTI INDOTTI SUL CORPO DEL RILEVATO AUTOSTRADALE

Di seguito vengono riportati i cedimenti a tempo infinito (oltre 500 anni) lungo 3 allineamenti significativi le cui tracce (linee in rosso) sono rappresentate nella Figura 6-1:

**1-Bordo discarica**

**2-Recinzione Autostrada** posto a 27.0m dal bordo della discarica

**3-Asse Autostrada** posto a 47.0m dal bordo della discarica

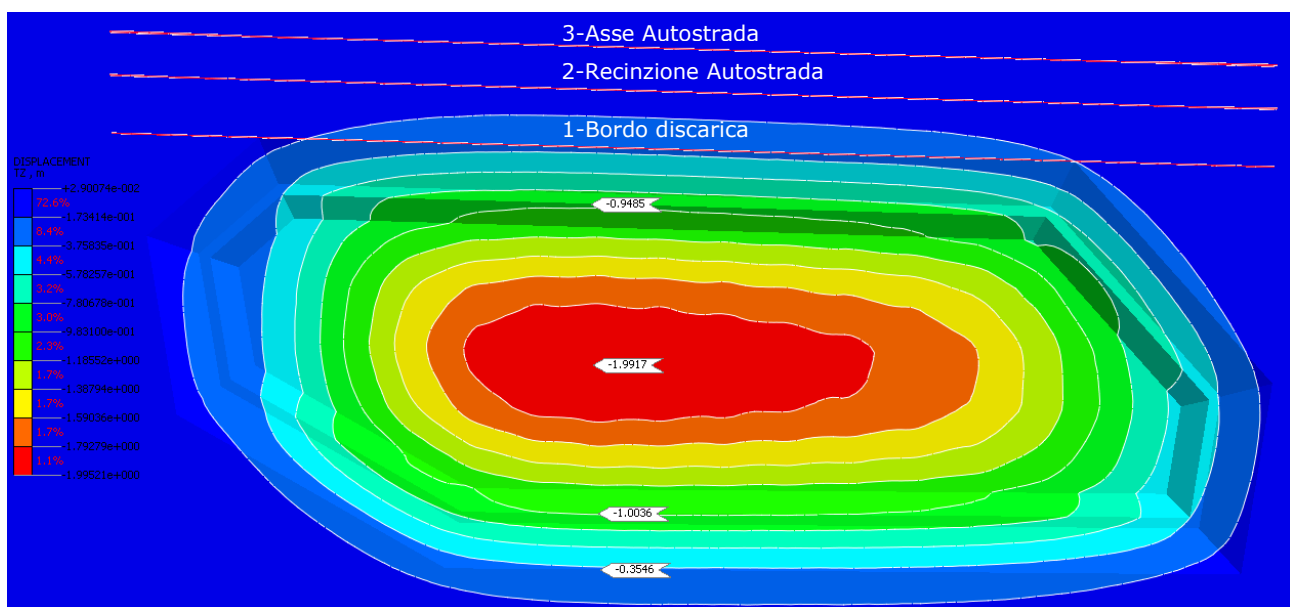
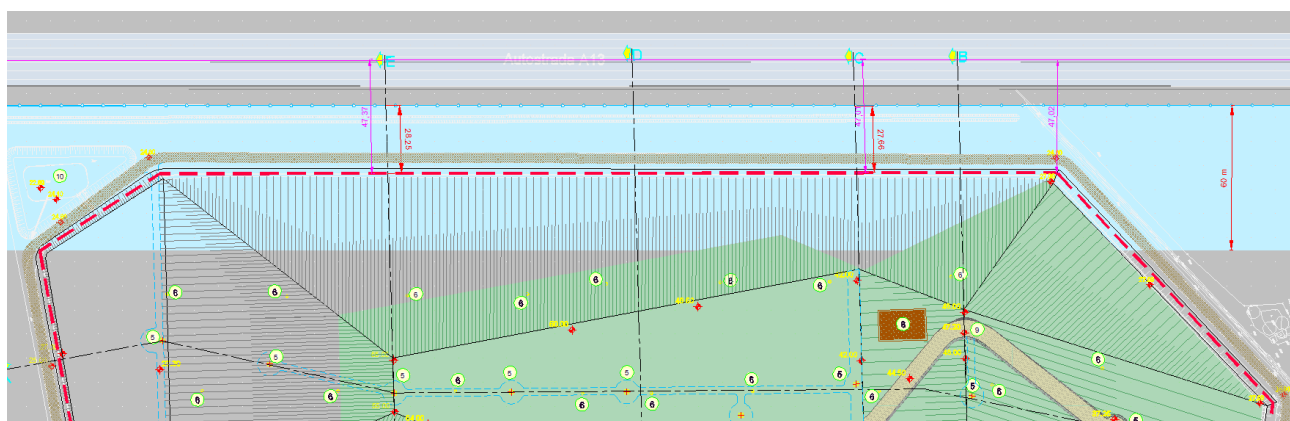



Figura 6-1: Definizione degli allineamenti di misura.

	<b>Committente:</b> Azienda Servizi Ambientali SpA	<b>Documento:</b> Relazione geotecnica
	<b>Lavoro:</b> Completamento della valorizzazione a scopo energetico del sito con integrazione dell'impianto fotovoltaico esistente mediante costituzione di una seconda unità energetica	Codice: S24028-PE-RE001-0 Data: Maggio 2024

Nelle Figura 6-2÷Figura 6-4 si mostrano le curve di subsidenze relativamente ai tre allineamenti presi in considerazione; il cedimento massimo a tempo infinito (oltre 500 anni) passa da **33.4 cm** circa per l'allineamento 1 a **9.6 cm** circa per l'allineamento 2 e a **3.04 cm** circa per l'allineamento 3. Come si può osservare in Figura 6-5 dove le 3 curve di subsidenza vengono rappresentate insieme, i cedimenti indotti dalla discarica degradano velocemente, il fattore di riduzione tra il bordo della discarica e l'asse autostradale è pari 100.

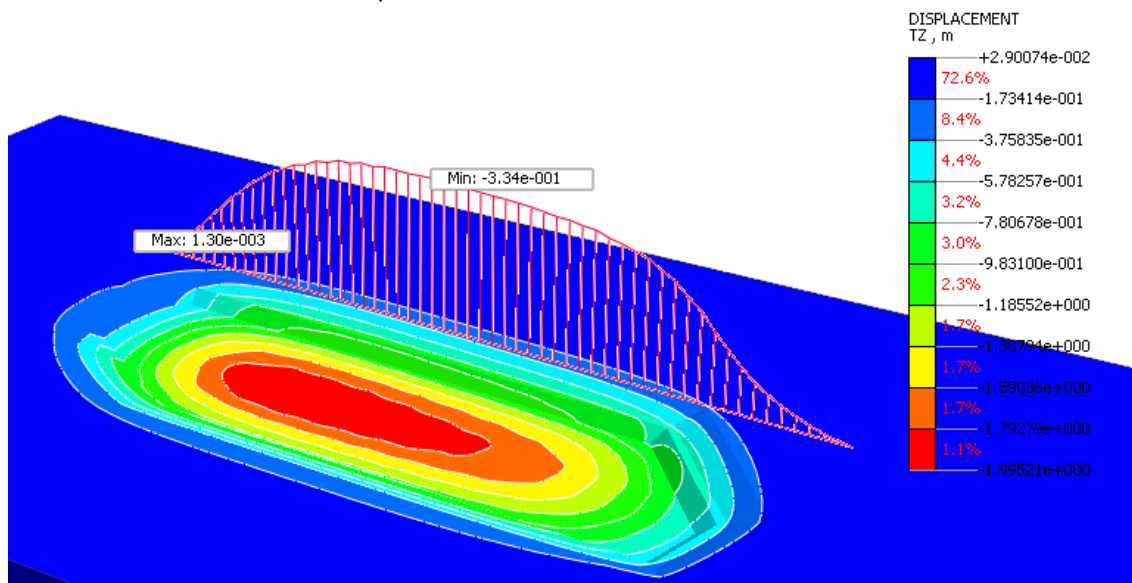


Figura 6-2: Curva di subsidenza Allineamento 1-Bordo discarica.

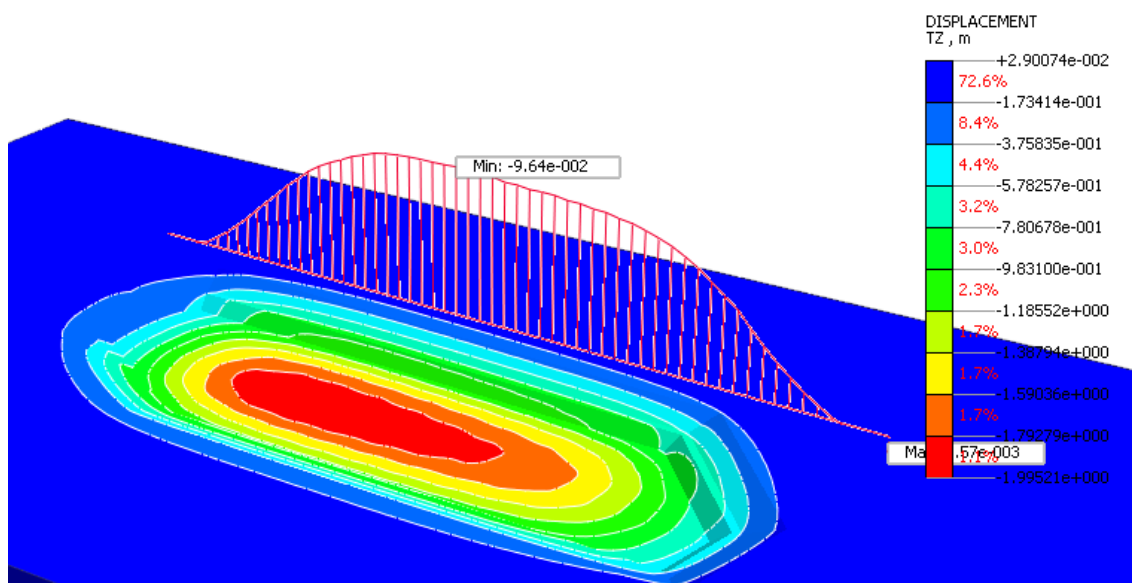



Figura 6-3: Curva di subsidenza Allineamento 2-Recinzione Autostrada.



	<b>Committente:</b> Azienda Servizi Ambientali SpA	<b>Documento:</b> Relazione geotecnica
	<b>Lavoro:</b> Completamento della valorizzazione a scopo energetico del sito con integrazione dell'impianto fotovoltaico esistente mediante costituzione di una seconda unità energetica	Codice: S24028-PE-RE001-0 Data: Maggio 2024

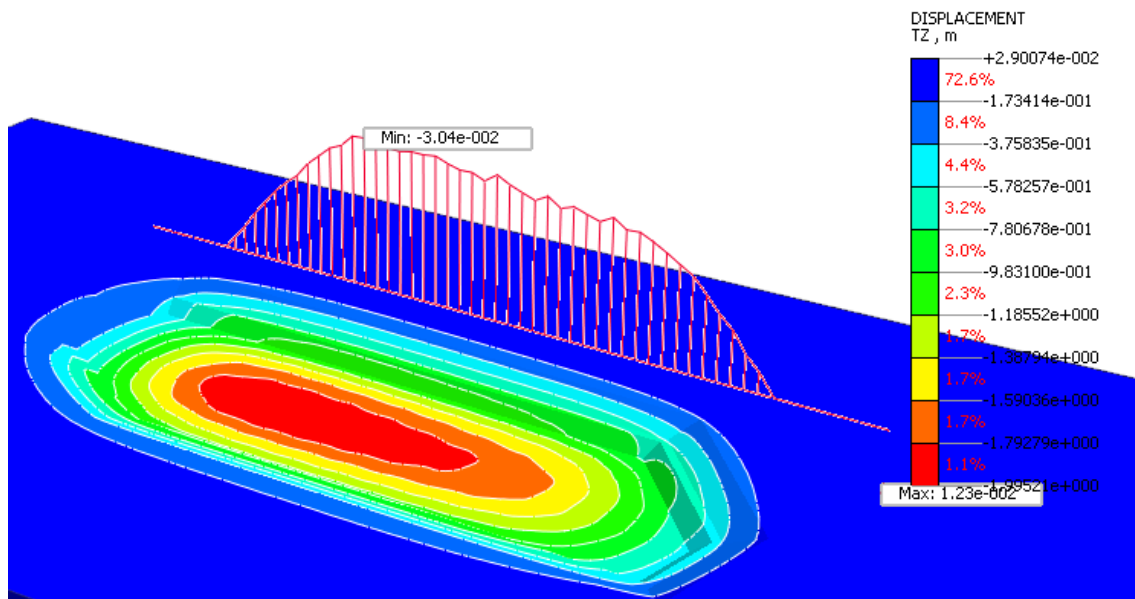
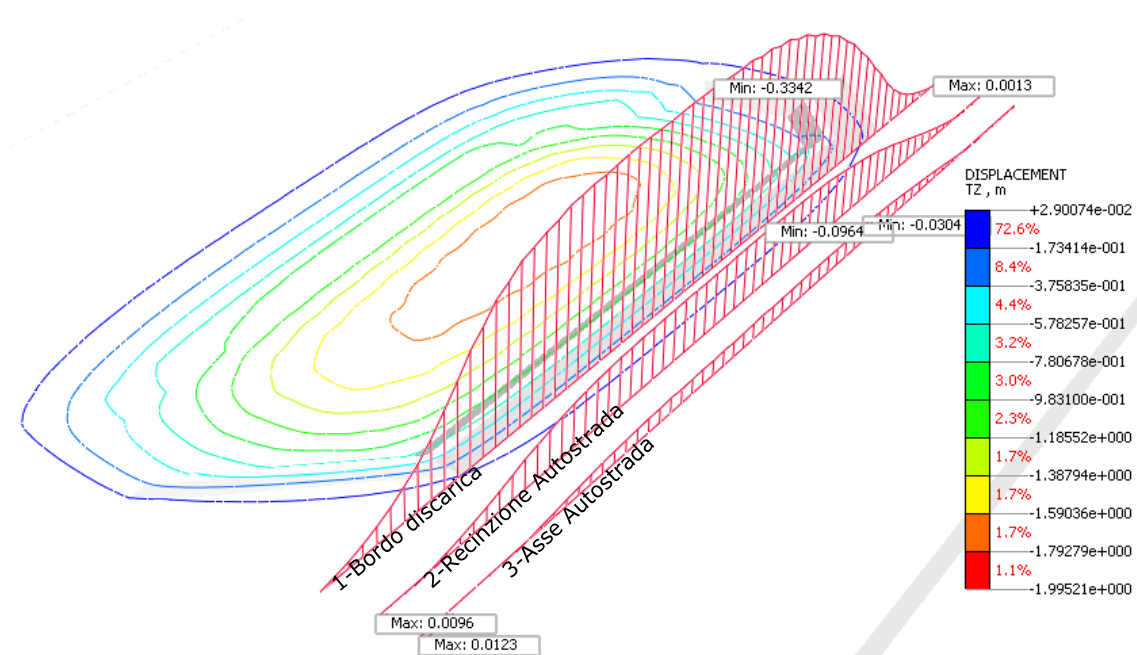



Figura 6-4: Curva di subsidenza Allineamento 3-Asse Autostrada.



	<b>Committente:</b> Azienda Servizi Ambientali SpA	<b>Documento:</b> Relazione geotecnica
	<b>Lavoro:</b> Completamento della valorizzazione a scopo energetico del sito con integrazione dell'impianto fotovoltaico esistente mediante costituzione di una seconda unità energetica	Codice: S24028-PE-RE001-0 Data: Maggio 2024

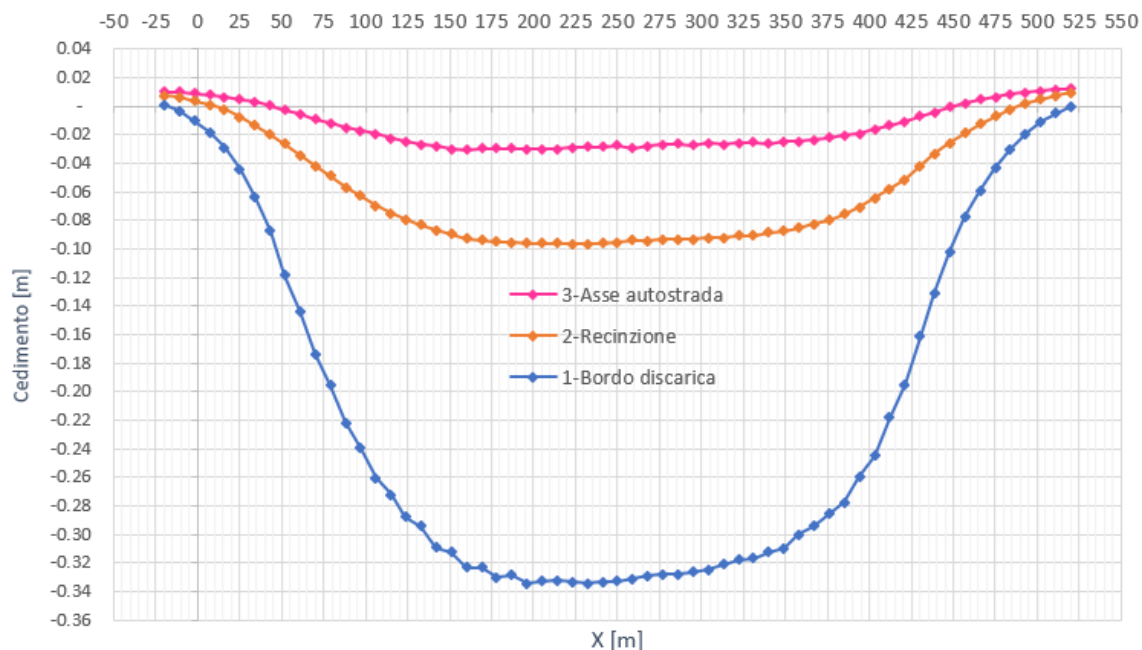



Figura 6-5: Confronto delle 3 curve di subsidenza a tempo infinito (oltre 500 anni).

Il decorso dei cedimenti nel tempo è rappresentato in Figura 6-6 dalla quale emerge che, in asse al rilevato autostradale, il 90% della consolidazione si attinge dopo 300 anni dalla fine della costruzione (cedimento raggiunto pari a 2.75 cm), mentre il cedimento raggiunge il valore massimo  $w_{\infty}=3.04\text{cm}$  solo oltre i 500 anni.

Decorso cedimenti nel banco di terreno naturale

t (anni)	0.083	0.167	0.25	0.416667	0.5	1	5	10	25	50	70	100	200	300	500
t (mesi)	1	2	3	5	6	12	60	120	300	600	840	1200	2400	3600	6000
T	2.42E-04	0.000484	0.000725	0.001209	0.001451	0.002901	0.014507	0.029013	0.072533	0.145066	0.203092	0.290131	0.580262	0.870394	1.450656
U	2%	2%	3%	4%	4%	6%	14%	19%	30%	43%	51%	60%	81%	90%	97%
w(cm)	0.05	0.08	0.09	0.12	0.13	0.18	0.41	0.58	0.92	1.30	1.54	1.83	2.45	2.75	2.95
$w_{\infty}-W$	2.99	2.96	2.95	2.92	2.91	2.86	2.63	2.46	2.12	1.74	1.50	1.21	0.59	0.29	0.09

	<b>Committente:</b> Azienda Servizi Ambientali SpA	<b>Documento:</b> Relazione geotecnica
	<b>Lavoro:</b> Completamento della valorizzazione a scopo energetico del sito con integrazione dell'impianto fotovoltaico esistente mediante costituzione di una seconda unità energetica	Codice: S24028-PE-RE001-0 Data: Maggio 2024

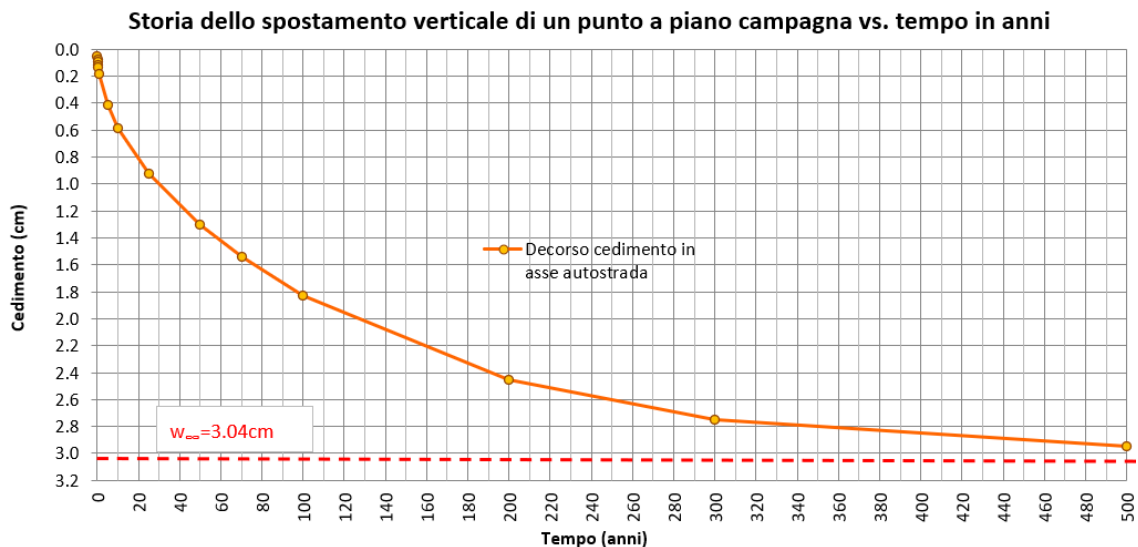



Figura 6-6: Sviluppo nel tempo del cedimento massimo in asse all'autostrada.

Allo scopo di verificare l'ammissibilità dei cedimenti indotti sul rilevato autostradale, si fa riferimento ai seguenti 2 criteri usualmente adottati da RFI/Italferr per i rilevati ferroviari, che per garantire la stabilità del binario devono garantire limiti di distorsione estremamente ridotti e decisamente più bassi di quelli richiesti al piano viabile stradale.

- CRITERIO 1: Incremento di cedimento per anno nei primi 25 anni dalla costruzione:  $\Delta w < 1\text{cm}$
- CRITERIO 2: Cedimento totale dopo 25 anni dalla costruzione:  $w_{25} < 10\text{cm}$

Relativamente al criterio 1, gli incrementi di cedimento indotti sul rilevato autostradale rientrano abbondantemente nel limite di 1cm/anno come si evince dalla tabella seguente.




	<b>Committente:</b> Azienda Servizi Ambientali SpA	<b>Documento:</b> Relazione geotecnica
	<b>Lavoro:</b> Completamento della valorizzazione a scopo energetico del sito con integrazione dell'impianto fotovoltaico esistente mediante costituzione di una seconda unità energetica	Codice: S24028-PE-RE001-0 Data: Maggio 2024

t (anni)	T	U	w(cm)	$\Delta w$ (cm)	Dw <1?
1	2.90E-03	6.1%	0.18	0.18	SI
2	5.80E-03	8.6%	0.26	0.08	SI
3	8.70E-03	10.5%	0.32	0.06	SI
4	1.16E-02	12.2%	0.37	0.05	SI
5	1.45E-02	13.6%	0.41	0.04	SI
6	1.74E-02	14.9%	0.45	0.04	SI
7	2.03E-02	16.1%	0.49	0.04	SI
8	2.32E-02	17.2%	0.52	0.03	SI
9	2.61E-02	18.2%	0.55	0.03	SI
10	2.90E-02	19.2%	0.58	0.03	SI
11	3.19E-02	20.2%	0.61	0.03	SI
12	3.48E-02	21.1%	0.64	0.03	SI
13	3.77E-02	21.9%	0.67	0.03	SI
14	4.06E-02	22.7%	0.69	0.03	SI
15	4.35E-02	23.5%	0.72	0.02	SI
16	4.64E-02	24.3%	0.74	0.02	SI
17	4.93E-02	25.1%	0.76	0.02	SI
18	5.22E-02	25.8%	0.78	0.02	SI
19	5.51E-02	26.5%	0.81	0.02	SI
20	5.80E-02	27.2%	0.83	0.02	SI
21	6.09E-02	27.8%	0.85	0.02	SI
22	6.38E-02	28.5%	0.87	0.02	SI
23	6.67E-02	29.1%	0.89	0.02	SI
24	6.96E-02	29.8%	0.90	0.02	SI
25	7.25E-02	30.4%	0.92	0.02	SI

Relativamente al criterio 2, questo è soddisfatto in quanto il cedimento dopo 25 anni dalla costruzione è  $w_{25}=1.15\text{cm}<10\text{cm}$ .

Si può quindi concludere che i cedimenti indotti dalla costruzione della discarica hanno effetto trascurabile sul corpo del rilevato autostradale.

	<b>Committente:</b> Azienda Servizi Ambientali SpA	<b>Documento:</b> Relazione geotecnica
	<b>Lavoro:</b> Completamento della valorizzazione a scopo energetico del sito con integrazione dell'impianto fotovoltaico esistente mediante costituzione di una seconda unità energetica	Codice: S24028-PE-RE001-0 Data: Maggio 2024

## 7 ANALISI DI STABILITA' DEL CORPO DELLA DISCARICA

### 7.1 Premessa

I metodi di analisi della stabilità dei pendii più diffusi ed utilizzati nella pratica professionale sono metodi all'equilibrio limite, che ipotizzano per il terreno un comportamento rigido – perfettamente plastico. Si immagina cioè che il terreno non si deformi fino al raggiungimento della condizione di rottura, e che, in tali condizioni, la resistenza al taglio si mantenga costante e indipendente dalle deformazioni accumulate. Da tale ipotesi, semplificativa, consegue che:


- la rottura si manifesta lungo una superficie netta di separazione tra la massa in frana e il terreno stabile;
- la massa in frana è un blocco indeformato in moto di roto-traslazione rigida;
- la resistenza mobilitata lungo la superficie di scorrimento in condizioni di equilibrio limite è costante nel tempo, indipendente dalle deformazioni e, quindi, dai movimenti della frana, nonché ovunque pari alla resistenza al taglio;
- non è possibile determinare né le deformazioni precedenti la rottura, né l'entità dei movimenti del blocco in frana, né la velocità del fenomeno.

Le analisi di stabilità saranno svolte avendo a riguardo i seguenti aspetti.

- ✓ **Analisi di stabilità delle scarpate:** tali analisi sono finalizzate a verificare la stabilità del corpo della discarica, indipendentemente dal terreno di fondazione.
- ✓ **Analisi di stabilità globale della discarica:** tali verifiche di stabilità interressano sia il corpo della discarica, sia il terreno di fondazione dello stesso.

Le analisi di stabilità sono state condotte secondo la geometria del corpo discarica considerando le quote di fine coltivazione. In queste condizioni il colmo superiore si trova a quota 55.0 m slm ovvero a 30.0m dal piano campagna assunto alla quota media di 25 m slm. Questa situazione è la più sfavorevole, infatti, nel lungo termine, a seguito dell'assestamento del corpo di discarica si avrà una riduzione delle quote di colmo così come illustrato nel precedente paragrafo. Le verifiche saranno condotte rispetto alla sezione piana più sfavorevole determinata mediante una analisi 3D descritta al paragrafo 7.2.1. Le verifiche di stabilità sono sviluppate in accordo con la normativa vigente, in particolare:

- ✓ **D.M. 17/01/2018** – “Nuove norme tecniche per le costruzioni”
- ✓ **Circolare n. 7 - 21/01/2019** – “Istruzioni per l'applicazione dell'aggiornamento delle norme tecniche per le costruzioni di cui al decreto ministeriale 17 gennaio 2018”.

	<b>Committente:</b> Azienda Servizi Ambientali SpA	<b>Documento:</b> Relazione geotecnica
	<b>Lavoro:</b> Completamento della valorizzazione a scopo energetico del sito con integrazione dell'impianto fotovoltaico esistente mediante costituzione di una seconda unità energetica	Codice: S24028-PE-RE001-0 Data: Maggio 2024

Le norme suddette indicano che le verifiche consistono nel soddisfacimento della seguente condizione:  $E_d \leq R_d$ , dove:

- ✓  $E_d$  rappresenta il valore di progetto dell'azione o dell'effetto dell'azione;
- ✓  $R_d$  rappresenta il valore di progetto della resistenza del sistema geotecnico.

Le verifiche devono essere condotte secondo l'**Approccio 1 - Combinazione 2: A2+M2+R2** in cui:

- ✓ A2 rappresenta il gruppo di coefficienti parziali  $\gamma_F$  da applicare alle azioni o all'effetto delle azioni (
- ✓ Figura 7-1);
- ✓ M2 rappresenta il gruppo di coefficienti parziali  $\gamma_M$  da applicare ai parametri del terreno (
- ✓ Figura 7-2);
- ✓ R2 rappresenta il gruppo di coefficienti parziali  $\gamma_R$  per le verifiche di sicurezza (Figura 7-3).

Figura 7-1 – Coefficienti parziali per le azioni o per l'effetto delle azioni - (tab. 6.2.I NTC2018).

	Effetto	Coefficiente Parziale $\gamma_F$ (o $\gamma_E$ )	EQU	(A1)	(A2)
Carichi permanenti $G_1$	Favorevole	$\gamma_{G1}$	0,9	1,0	1,0
	Sfavorevole		1,1	1,3	1,0
Carichi permanenti $G_2^{(1)}$	Favorevole	$\gamma_{G2}$	0,8	0,8	0,8
	Sfavorevole		1,5	1,5	1,3
Azioni variabili Q	Favorevole	$\gamma_Q$	0,0	0,0	0,0
	Sfavorevole		1,5	1,5	1,3

<sup>(1)</sup> Per i carichi permanenti  $G_2$  si applica quanto indicato alla Tabella 2.6.I. Per la spinta delle terre si fa riferimento ai coefficienti  $\gamma_{G1}$

Figura 7-2 – Coefficienti parziali per i parametri geotecnici delle azioni - (tab 6.2.II – NTC2018).

Parametro	Grandezza alla quale applicare il coefficiente parziale	Coefficiente parziale $\gamma_M$	(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	$c_{uk}$	$\gamma_{cu}$	1,0	1,4
Peso dell'unità di volume	$\gamma$	$\gamma_\gamma$	1,0	1,0


	<b>Committente:</b> Azienda Servizi Ambientali SpA	<b>Documento:</b> Relazione geotecnica
	<b>Lavoro:</b> Completamento della valorizzazione a scopo energetico del sito con integrazione dell'impianto fotovoltaico esistente mediante costituzione di una seconda unità energetica	Codice: S24028-PE-RE001-0 Data: Maggio 2024

Figura 7-3 – Coefficienti parziali per le verifiche di sicurezza di opere di materiali sciolti e di fronti di scavo – (tabella 6.8.I – NTC2018)

Coefficiente ( $\gamma_R$ )	R2	Condizione
$\gamma_R$	1.1	Statica
$\gamma_R$	1.2	Sismica

## 7.2 Condizioni di analisi

Le verifiche rispetto al raggiungimento della condizione di stato limite ultimo sono sviluppate considerando le seguenti condizioni di analisi:

- ✓ Condizione statica drenata e falda coincidente con il piano campagna;
- ✓ Condizione SISMA + (-):
  - parametri non drenati per i terreni interessati dalla verifica e falda coincidente con il piano campagna;
  - accelerazione sismica orizzontale, accelerazione sismica verticale diretta verso il basso (verso l'alto);

Per la stabilità in condizioni sismiche è stato utilizzato il metodo pseudostatico che consente di rappresentare l'azione sismica mediante un'azione statica equivalente, costante nello spazio e nel tempo, proporzionale al peso  $W$  del volume di terreno potenzialmente instabile. Nelle verifiche allo Stato Limite Ultimo le componenti orizzontale e verticale di tale forza possono esprimersi come:

$$F_h = k_h \cdot W \quad \text{e} \quad F_v = k_v \cdot W$$


con  $k_h$  e  $k_v$  rispettivamente pari ai coefficienti sismici orizzontale e verticale:

$$k_h = \beta_s \cdot \frac{a_{\max}}{g} \quad \text{e} \quad k_v = \pm 0.5 \cdot k_h$$

dove:

- ✓  $\beta_s$  rappresenta il coefficiente di riduzione dell'accelerazione massima attesa al sito;
- ✓  $a_{\max}$  rappresenta l'accelerazione massima orizzontale attesa al sito;
- ✓  $g$  rappresenta l'accelerazione di gravità.

I valori di  $\beta_s$  sono riportati nella tabella seguente in funzione del valore dell'accelerazione orizzontale massima attesa su suolo rigido  $a_g$  e della categoria di sottosuolo.

	<b>Committente:</b> Azienda Servizi Ambientali SpA	<b>Documento:</b> Relazione geotecnica
	<b>Lavoro:</b> Completamento della valorizzazione a scopo energetico del sito con integrazione dell'impianto fotovoltaico esistente mediante costituzione di una seconda unità energetica	Codice: S24028-PE-RE001-0 Data: Maggio 2024

	Categoria di sottosuolo	
	A	B,C,D,E
	$\beta_s$	$\beta_s$
$0.2 < a_g(g) \leq 0.4$	0.30	0.28
$0.1 < a_g(g) \leq 0.2$	0.27	0.24
$a_g(g) \leq 0.1$	0.20	0.20

Figura 7-4 – Coefficienti di riduzione dell'accelerazione massima attesa al sito – (tabella 7.11.I- NTC2018)

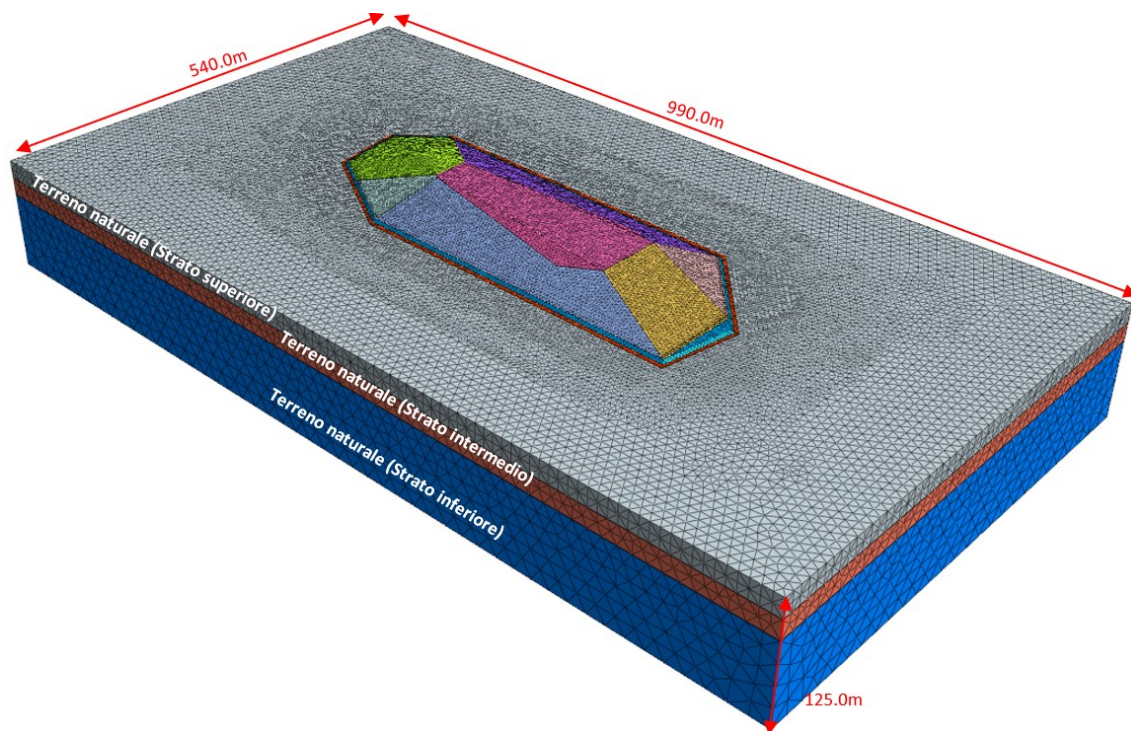
Una sintesi dei parametri sismici relativi al sito di intervento ed adottati nelle analisi di stabilità sono raccolti in Figura 7-5.

Parametri sismici - Castel Maggiore (BO) - 44° 34' 49,94" N; 11° 23' 27,90" E											
$V_N$	Classe d'uso	$C_U$	$V_R$	$a_g$	$F_0$	$S_s$ (cat. C)	$S_T$ (cat. T1)	$a_{max}=a_g \cdot S_s$ $\cdot S_T=a_g \cdot S$	$\beta_s$	$k_h$	$k_v$
100 anni	IV	2	200	0,277 g	2,420	1,298	1,000	0,359	0,28	0,10	+/- 0,05

Figura 7-5 –Parametri sismici.

### 7.2.1 Individuazione delle sezioni significative

Al fine di individuare le sezioni maggiormente sensibili a instabilità è stata condotta una analisi di stabilità agli elementi finiti secondo la procedura Strength Reduction Method (SRM) sul medesimo modello predisposto per la stima dei cedimenti (v. Figura 5-6).




	<b>Committente:</b> Azienda Servizi Ambientali SpA	<b>Documento:</b> Relazione geotecnica
	<b>Lavoro:</b> Completamento della valorizzazione a scopo energetico del sito con integrazione dell'impianto fotovoltaico esistente mediante costituzione di una seconda unità energetica	Codice: S24028-PE-RE001-0 Data: Maggio 2024

Figura 7-6 –Vista globale mesh modello ad elementi finiti.

Per il terreno naturale, per il corpo discarica e per l'ipogeo è stato assunto un modello costitutivo di tipo elasto-plastico alla Mohr Coulomb caratterizzato attraverso i parametri riportati in Figura 7-7. Il piano campagna nel modello è a quota +25.00m.

Materiale	$\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	$c'$ (kPa)	$\phi'$ (°)	Eed (kPa)
Corpo discarica epigeo	17	20	30	3700
Corpo discarica Ipogeo	16	20	33	5000
Terreno naturale (strato superiore da 25.0m a +5.0m)	19	5	25	7500
Terreno naturale (strato intermedio - da +5.0m a -15.0m)	19	10	25	var. linearmente da 7500 a 17500
Terreno naturale (strato inferiore -da -15.0m a -100.0m)	19	15	25	var. linearmente da 17500 a 30000

Figura 7-7 –Parametri geotecnici di calcolo.

Nel corso della SRM i parametri di resistenza  $c'$  e  $\tan\phi'$  vengono progressivamente ridotti per il Fattore di sicurezza corrente SF secondo le seguenti relazioni:

$$C_{n+1} = \frac{C}{SF_{n+1}} \quad (\text{scale the cohesion})$$

$$\tan\phi'_{n+1} = \frac{\tan\phi'}{SF_{n+1}} \quad (\text{scale the tangent of friction angle})$$


In altre parole la procedura numerica applica in maniera del tutto analoga alla tabella 6.2.II – NTC2018 un Coefficiente parziale per i parametri geotecnici.

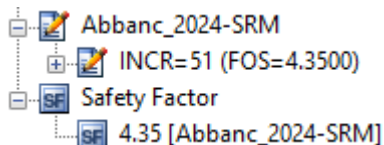
PARAMETRO	GRANDEZZA CUI APPLICARE IL COEFFICIENTE PARZIALE	Coefficiente parziale ( $\gamma_M$ )	(M1)	(M2)
<i>Tangente dell'angolo di resistenza al taglio</i>	$\tan\phi'_k$	$\gamma_{\phi'}$	1.0	1.25
<i>Coesione efficace</i>	$c'_k$	$\gamma_c$	1.0	1.25
<i>Resistenza non drenata</i>	$c'_{uk}$	$\gamma_{cu}$	1.0	1.40
<i>Peso dell'unità di volume</i>	$\gamma$	$\gamma_\gamma$	1.0	1.00

Ne consegue che il fattore di sicurezza fornito dall'analisi SRM condotta a partire dai valori caratteristici dei parametri geotecnici debba essere diviso per 1.25 al fine di renderlo paragonabile a quello ottenibile con un'analisi piana convenzionale nella combinazione fattorizzata (A2+M2+R2).

Nel caso in esame, l'analisi SRM indica che il sistema non è più in equilibrio quando il FS diviene



	<b>Committente:</b> Azienda Servizi Ambientali SpA	<b>Documento:</b> Relazione geotecnica
	<b>Lavoro:</b> Completamento della valorizzazione a scopo energetico del sito con integrazione dell'impianto fotovoltaico esistente mediante costituzione di una seconda unità energetica	Codice: S24028-PE-RE001-0 Data: Maggio 2024



Applicando a questo valore, i coefficienti parziali della tabella 6.2.II – DM 14/01/2018, il FS equivalente è  $FS = 4.35 / 1.25 = 3.48 > 1.1$ . La verifica 3D soddisfa quindi i requisiti di norma.

Ai fini delle analisi di stabilità in condizioni di deformazione la sezione più significativa su cui effettuare le verifiche viene scelta sulla base dell'analisi del modello 3D, a riguardo nelle Figura 7-8 e Figura 7-9 si individuano le zone più sensibili ad una eventuale instabilità attraverso la localizzazione delle concentrazioni plastiche derivanti dall'abbattimento progressivo delle resistenze.

Nelle Figura 7-10 si mostrano le potenziali superfici di scivolamento nella zona prossima alla cresta a +55.0m slm (+30.00m da piano campagna) mentre nella Figura 7-11 quelle nella zona dell'impluvio a + 49.36m slm (+24.36m da piano campagna). Infine in Figura 7-12 e Figura 7-13 si mostra la distribuzione delle concentrazioni plastiche da cui discende che il più probabile meccanismo di collasso si sviluppa in corrispondenza della zona della cresta a +55.0m slm dal momento che procedendo in direzione opposta le deformazioni plastiche decrescono e non riescono a raggiungere la superficie superiore del corpo discarica.

Sulla scorta di quanto sopra le analisi piane verranno condotte su una sezione trasversale prossima alla cresta (vd linea bianca in Figura 7-8), in particolare al fine di minimizzare i coefficienti di sicurezza forniti dalle analisi bidimensionali notoriamente molto influenzate dall'altezza del pendio si assumerà un'altezza pari a quella della cresta a +30.00 da p.c.

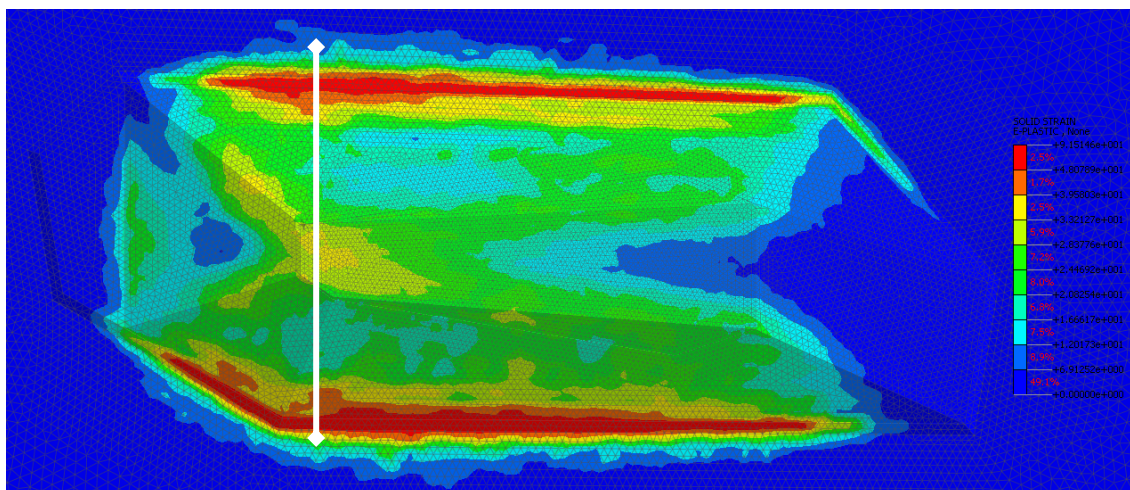



Figura 7-8: Localizzazione delle concentrazioni plastiche (vista in pianta).

	<b>Committente:</b> Azienda Servizi Ambientali SpA	<b>Documento:</b> Relazione geotecnica
	<b>Lavoro:</b> Completamento della valorizzazione a scopo energetico del sito con integrazione dell'impianto fotovoltaico esistente mediante costituzione di una seconda unità energetica	Codice: S24028-PE-RE001-0 Data: Maggio 2024

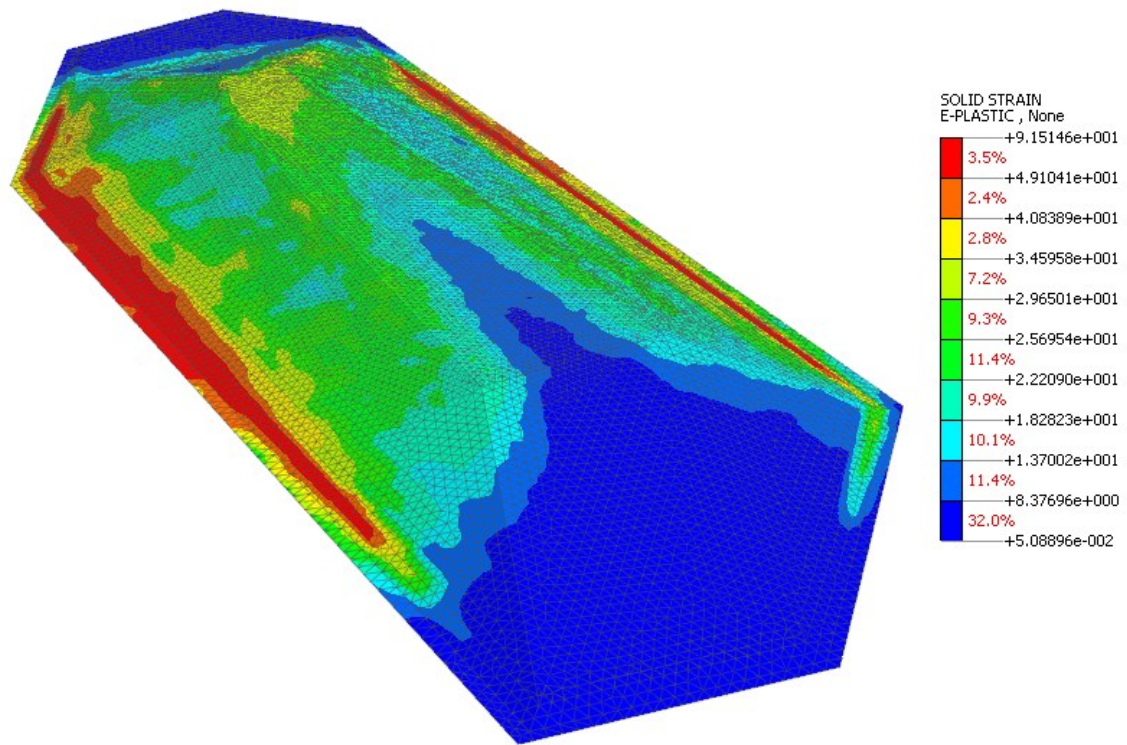


Figura 7-9: Localizzazione delle concentrazioni plastiche (3D superficie).

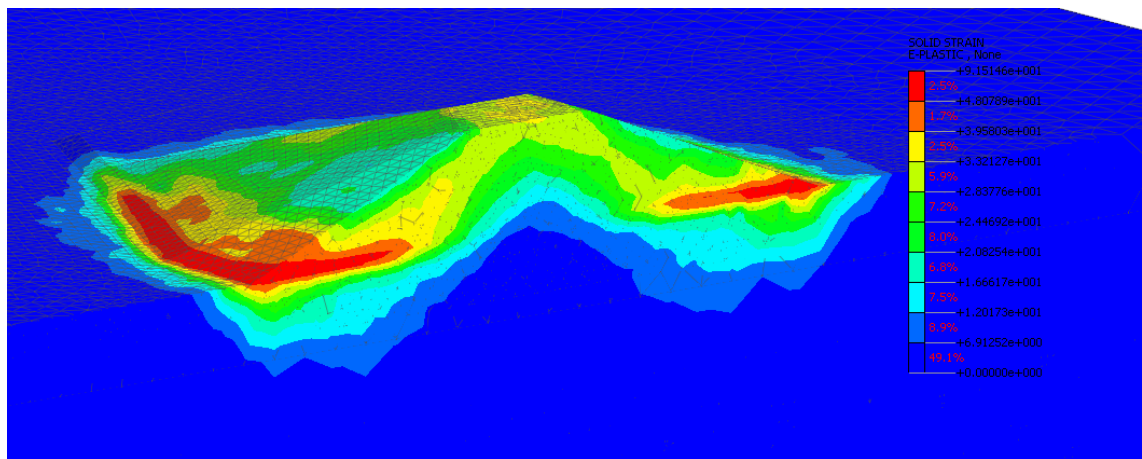



Figura 7-10: Sezione trasversale G-G (cresta a + 55.0m) ed individuazione delle superfici di scivolamento preferenziali.



	<b>Committente:</b> Azienda Servizi Ambientali SpA	<b>Documento:</b> Relazione geotecnica
	<b>Lavoro:</b> Completamento della valorizzazione a scopo energetico del sito con integrazione dell'impianto fotovoltaico esistente mediante costituzione di una seconda unità energetica	Codice: S24028-PE-RE001-0 Data: Maggio 2024

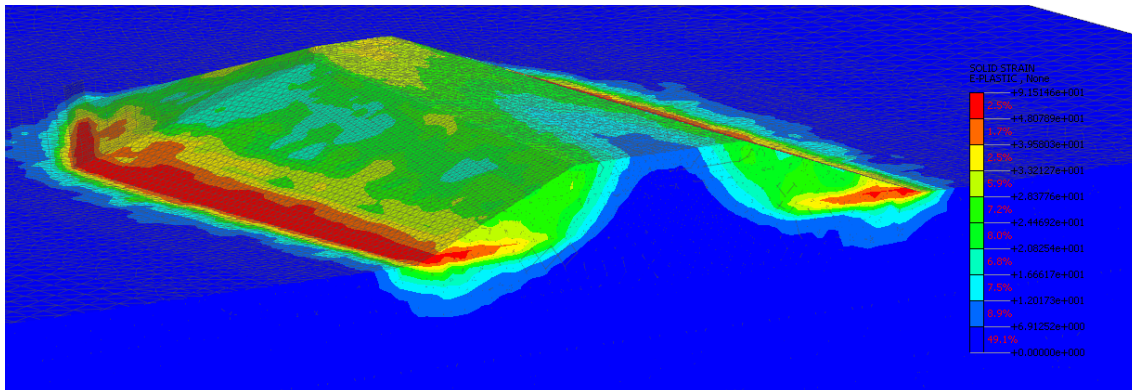


Figura 7-11: Sezione trasversale C-C (cresta a + 49.36) ed individuazione delle superfici di scivolamento preferenziali.

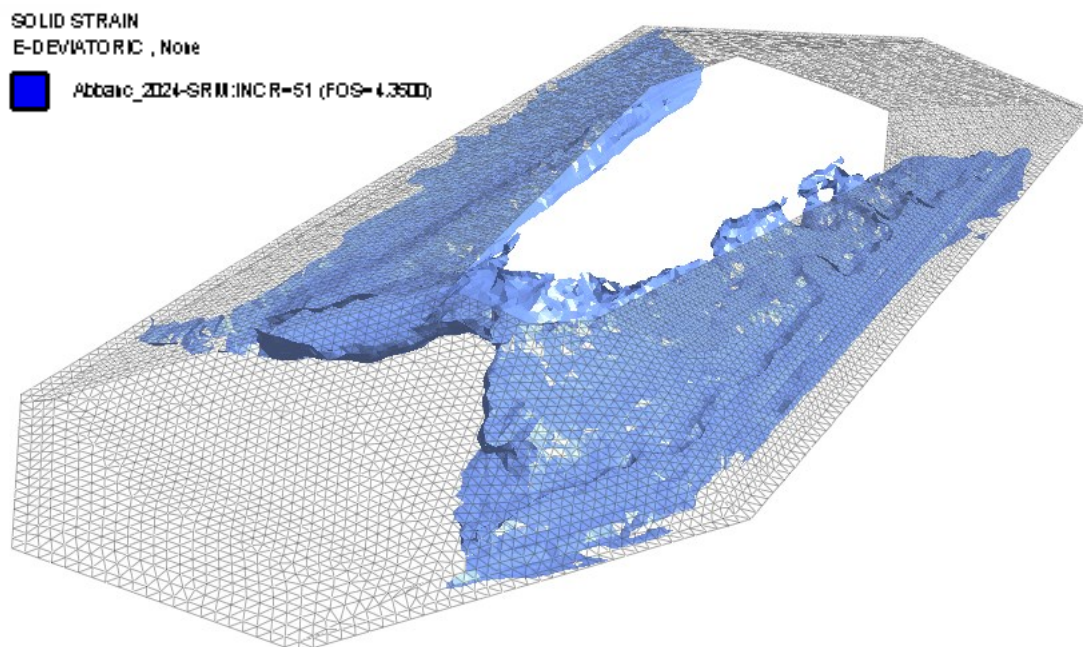
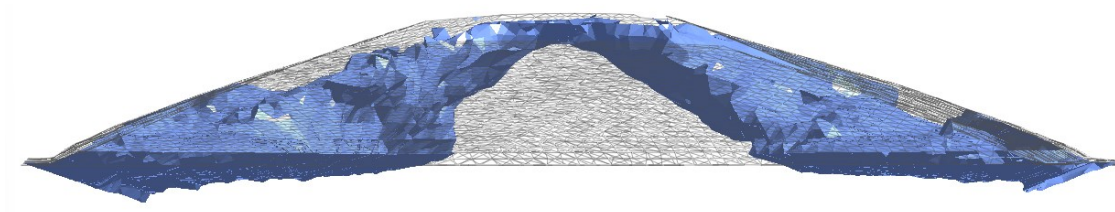



Figura 7-12: Vista 3D localizzazione concentrazioni plastiche nel corpo della discarica.



	<b>Committente:</b> Azienda Servizi Ambientali SpA	<b>Documento:</b> Relazione geotecnica
	<b>Lavoro:</b> Completamento della valorizzazione a scopo energetico del sito con integrazione dell'impianto fotovoltaico esistente mediante costituzione di una seconda unità energetica	Codice: S24028-PE-RE001-0 Data: Maggio 2024

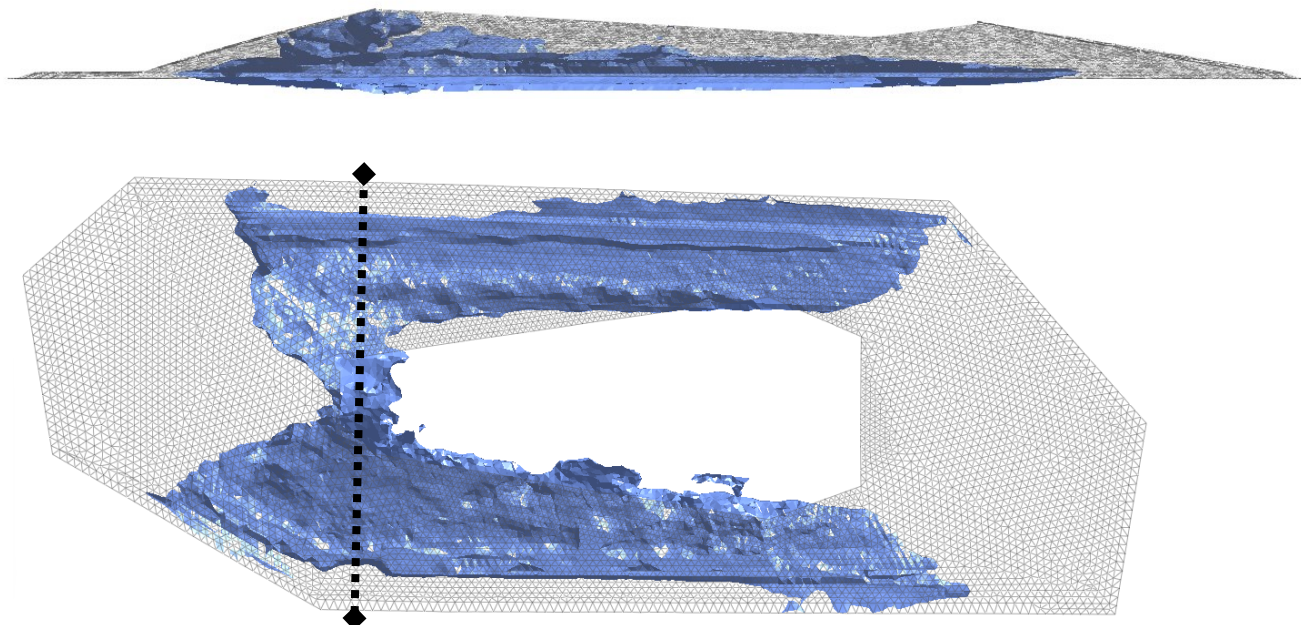


Figura 7-13: Localizzazione del più probabile meccanismo di collasso 3D.


## 7.3 Verifiche di stabilità all'equilibrio limite

La valutazione dei fattori di sicurezza per la stabilità è condotta mediante il modulo "Slope/W" del programma GeoStudio 2020 versione 10.2.1.19666 della GEO-SLOPE International, che consente di effettuare un'analisi di stabilità all'equilibrio limite tenendo conto di terreni variamente stratificati, dell'eventuale falda idrica, della presenza di pressioni neutre diverse dalle pressioni idrostatiche, di sollecitazioni sismiche mediante un'analisi di tipo pseudostatico, di tiranti di ancoraggio e di eventuali altri elementi di rinforzo (ad esempio geogriglie). Il programma è in grado di fornire una soluzione generale al problema bidimensionale di stabilità ricavandone il coefficiente di sicurezza (FS) secondo differenti criteri (nel caso in esame si è adottato il criterio di Spencer) come rapporto tra la resistenza al taglio disponibile lungo la superficie di possibile scorrimento e quella effettivamente mobilitata dal volume di terreno coinvolto nel movimento; il criterio di rottura adottato è quello classico di Mohr - Coulomb.

La valutazione del coefficiente di sicurezza è effettuata per tentativi, generando un elevato numero di superfici mediante un algoritmo pseudo - casuale.

Nei paragrafi seguenti si presentano i risultati relativamente a 2 sezioni di calcolo:

- La sezione di altezza massima (sez G-G) con colmo a +55.0m così come indicato dall'analisi 3D di cui al paragrafo 7.2.1. Un inquadramento generale delle geometrie di calcolo è mostrato nella Figura 7-14.

	<b>Committente:</b> Azienda Servizi Ambientali SpA	<b>Documento:</b> Relazione geotecnica
	<b>Lavoro:</b> Completamento della valorizzazione a scopo energetico del sito con integrazione dell'impianto fotovoltaico esistente mediante costituzione di una seconda unità energetica	Codice: S24028-PE-RE001-0 Data: Maggio 2024

- b) La sezione con la massima altezza di abbancamento di materiale nuovo (sez C-C) rispetto alla geometria del precedente progetto (il cui colmo era a +41.00m slm), avente il colmo a +49.36m. Un inquadramento generale delle geometrie di calcolo è mostrato nella Figura 7-15.

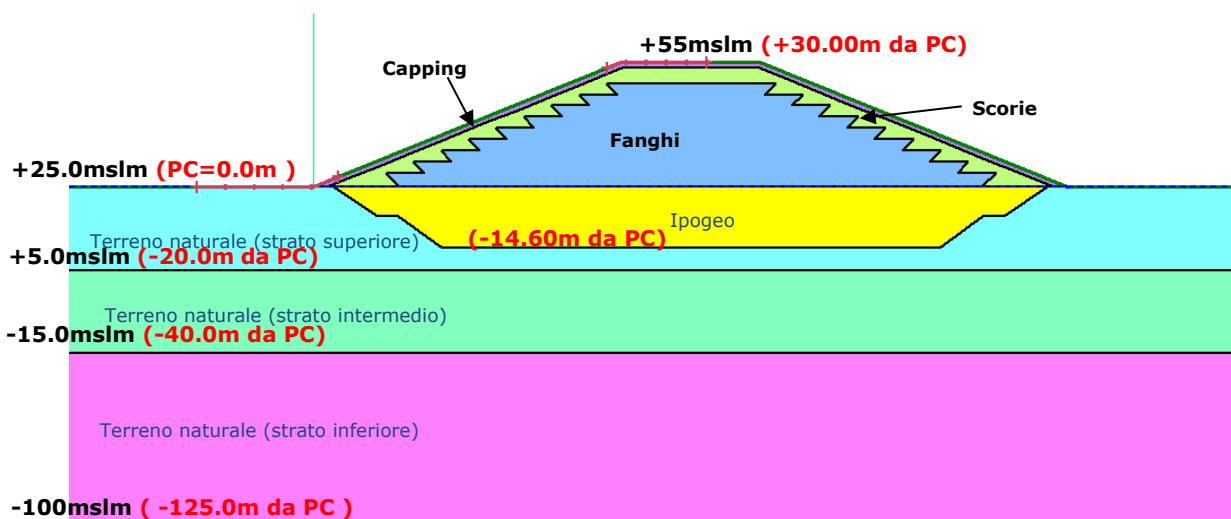


Figura 7-14: Sez G-G: Colmo superiore a quota +55.0 m slm.

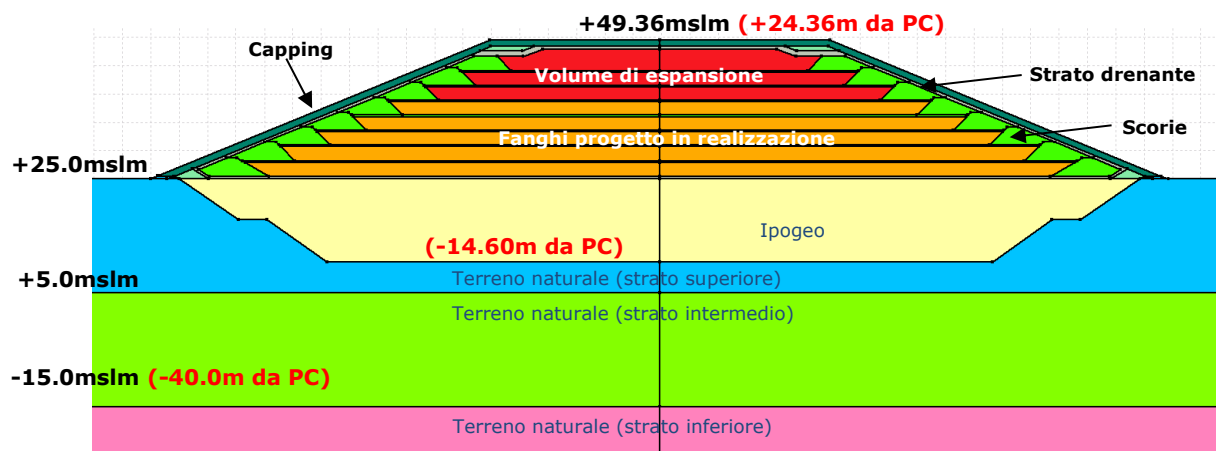



Figura 7-15: Sez C-C: Colmo superiore a quota +49.36 m slm.

	<b>Committente:</b> Azienda Servizi Ambientali SpA	<b>Documento:</b> Relazione geotecnica
	<b>Lavoro:</b> Completamento della valorizzazione a scopo energetico del sito con integrazione dell'impianto fotovoltaico esistente mediante costituzione di una seconda unità energetica	Codice: S24028-PE-RE001-0 Data: Maggio 2024

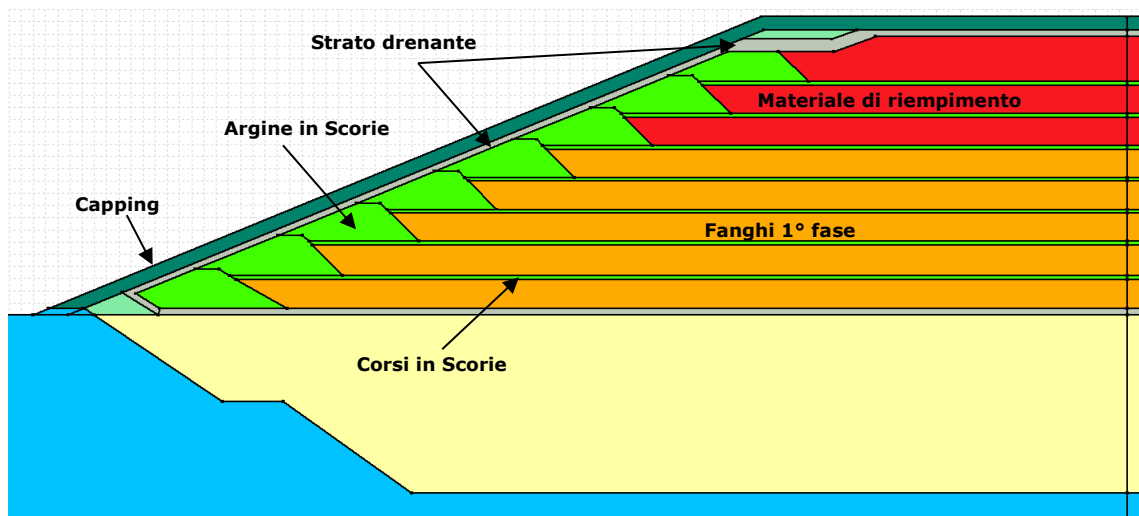


Figura 7-16: Dettaglio stratificazione corpo discarica.

Nella Figura 7-17 e Figura 7-18 sono riportati i parametri di resistenza al taglio caratteristici ( $R_k$ ) e di progetto ( $R_d$ ) per il terreno di fondazione e per il corpo discarica utilizzati per la verifica di stabilità in condizioni statiche e sismiche della sez. G-G.


Materiale	$\phi'_k (^\circ)$	$c'_k$ (kPa)	$\gamma_k$ (kN/m <sup>3</sup> )	$\phi'_d (^\circ)$	$c'_d$ (kPa)	$\gamma_d$ (kN/m <sup>3</sup> )
Scorie	36	20	17	30.2	16.0	17
Fanghi	30	20	15	24.8	16.0	15
Capping	20	5	20	16.2	4.0	20
Ipogeo	33	20	16	27.5	16.0	16
Terreno naturale (strato superiore)	25	5	19	20.5	4.0	19
Terreno naturale (strato intermedio)	25	10	19	20.5	8.0	19
Terreno naturale (strato inferiore)	25	15	19	20.5	12.0	19
Materiale drenante	35	5	19	29.3	4.0	19

Figura 7-17: Parametri caratteristici e di progetto (Stabilità statica).

Materiale	$c_{u_k}$ (kPa)	$\gamma_k$ (kN/m <sup>3</sup> )	$c_{u_d}$ (kPa)	$\gamma_d$ (kN/m <sup>3</sup> )
Scorie	200	17	142.9	17
Fanghi	200	15	142.9	15
Capping	50	20	35.7	20
Ipogeo	200	16	142.9	16
Terreno naturale (strato superiore)	80	19	57.1	19
Terreno naturale (strato intermedio)	100	19	71.4	19
Terreno naturale (strato inferiore)	150	19	107.1	19

Figura 7-18: Parametri caratteristici e di progetto (Stabilità sismica).

Relativamente alla sezione C-C in considerazione delle incertezze sulle caratteristiche dei materiali abbancati per la profilatura in progetto, viene adottato per la componente Materiale di riempimento (evidenziata in rosso nella Figura 7-17 e Figura

	<b>Committente:</b> Azienda Servizi Ambientali SpA	<b>Documento:</b> Relazione geotecnica
	<b>Lavoro:</b> Completamento della valorizzazione a scopo energetico del sito con integrazione dell'impianto fotovoltaico esistente mediante costituzione di una seconda unità energetica	Codice: S24028-PE-RE001-0 Data: Maggio 2024

7-18) posta al di sopra della quota di 41.0 mslm un range di parametri così come mostrato in Figura 7-19 e Figura 7-20.

Materiale	$\phi'_k$ (°)	$c'_k$ (kPa)	$\gamma_k$ (kN/m <sup>3</sup> )	$\phi'_d$ (°)	$c'_d$ (kPa)	$\gamma_d$ (kN/m <sup>3</sup> )
Fanghi 2	20÷30	0÷20	15	16.2÷24.8	0÷16	15

Figura 7-19: Parametri caratteristici e di progetto (Stabilità statica sez C-C).

Materiale	$c_{u_k}$ (kPa)	$\gamma_k$ (kN/m <sup>3</sup> )	$c_{u_d}$ (kPa)	$\gamma_d$ (kN/m <sup>3</sup> )
Fanghi 2	0÷200	15	0÷142.9	15

Figura 7-20: Parametri caratteristici e di progetto (Stabilità sismica sez C-C).

## 7.4 Risultati Stabilità Globale

### 7.4.1 Sezione G-G

I risultati relativi alle analisi della stabilità globale interessanti sia il corpo discarica sia il terreno di fondazione sono sintetizzati nella seguente

		F.S. calcolato		F.S. minimo	
Condizione statica	(A <sub>2</sub> +M <sub>2</sub> +R <sub>2</sub> ) Statico	1.557	≥	1.1	Figura 7-19
Condizione sismica	(M <sub>1</sub> +R <sub>2s</sub> ) Sisma +	1.444		1.2	Figura 7-20
	(M <sub>1</sub> +R <sub>2s</sub> ) Sisma -	1.346		1.2	Figura 7-22


Figura 7-21 da cui si evince che le verifiche soddisfano i requisiti di norma:

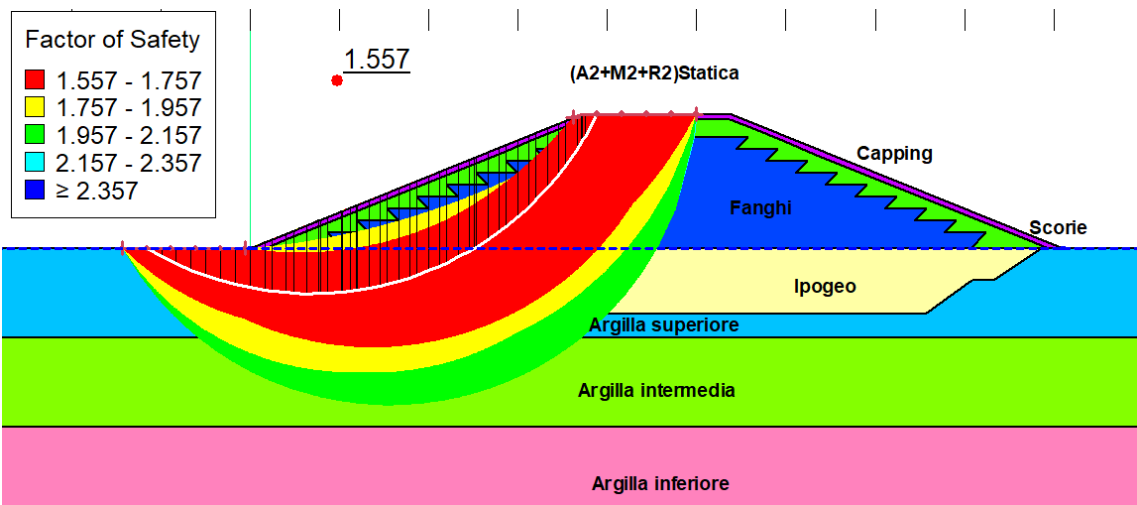
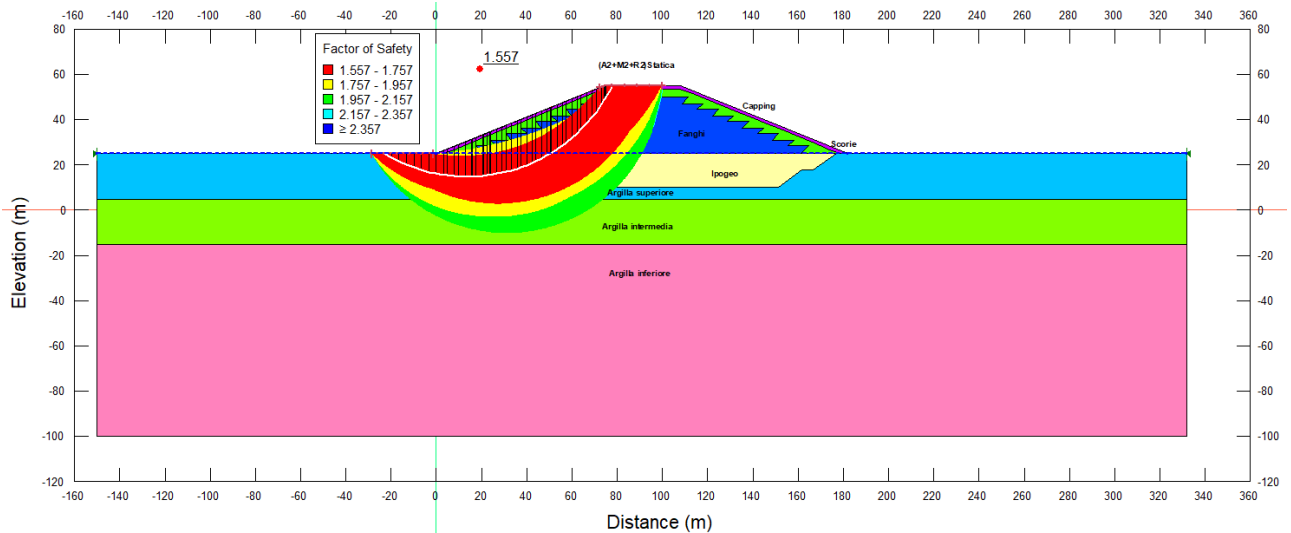
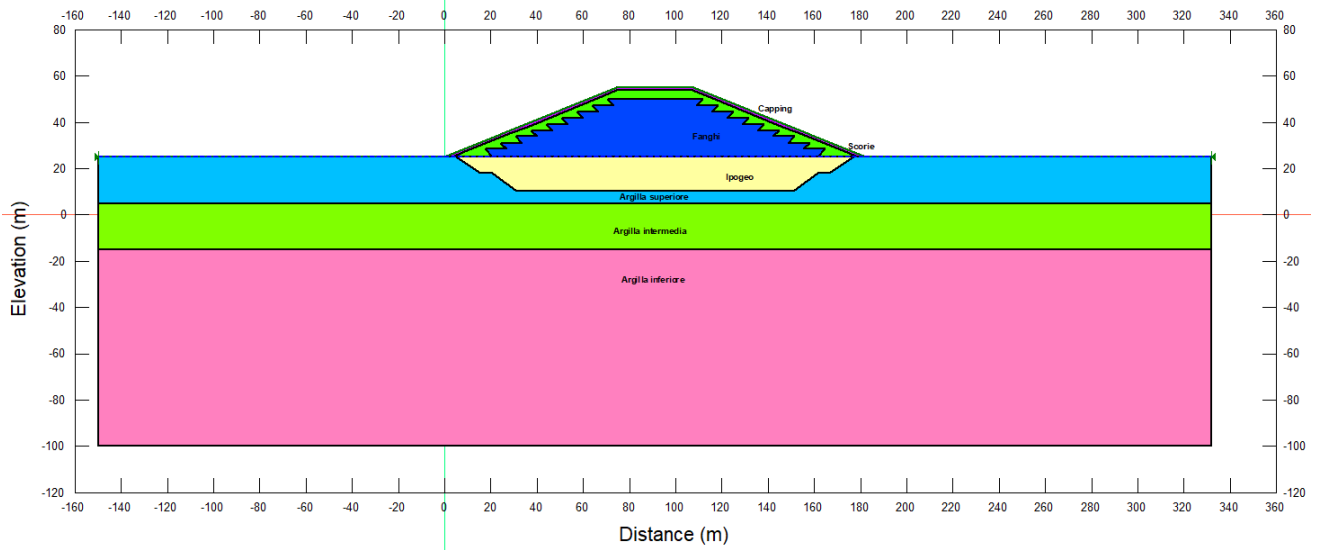
		F.S. calcolato		F.S. minimo	
Condizione statica	(A <sub>2</sub> +M <sub>2</sub> +R <sub>2</sub> ) Statico	1.557	≥	1.1	Figura 7-19
Condizione sismica	(M <sub>1</sub> +R <sub>2s</sub> ) Sisma +	1.444		1.2	Figura 7-20
	(M <sub>1</sub> +R <sub>2s</sub> ) Sisma -	1.346		1.2	Figura 7-22

Figura 7-21: Sintesi coefficienti di sicurezza Stabilità globale.

Nelle successive figure viene mostrata per ogni combinazione la superficie di scioglimento critica ed il corrispondente coefficiente di sicurezza.



	<b>Committente:</b> Azienda Servizi Ambientali SpA	<b>Documento:</b> Relazione geotecnica
	<b>Lavoro:</b> Completamento della valorizzazione a scopo energetico del sito con integrazione dell'impianto fotovoltaico esistente mediante costituzione di una seconda unità energetica	Codice: S24028-PE-RE001-0 Data: Maggio 2024




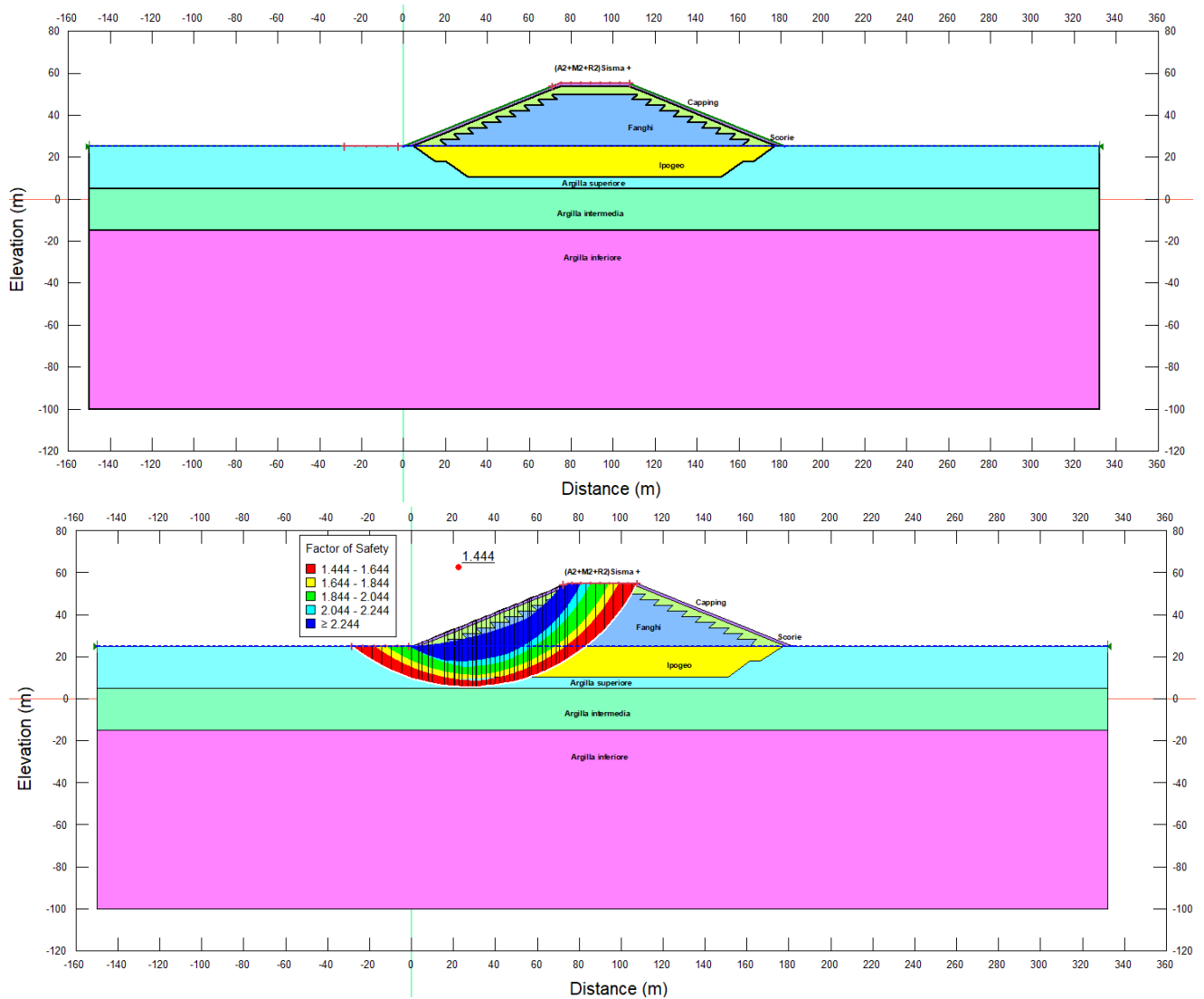

	<b>Committente:</b> Azienda Servizi Ambientali SpA	<b>Documento:</b> Relazione geotecnica
	<b>Lavoro:</b> Completamento della valorizzazione a scopo energetico del sito con integrazione dell'impianto fotovoltaico esistente mediante costituzione di una seconda unità energetica	Codice: S24028-PE-RE001-0 Data: Maggio 2024

Figura 7-22: Stabilità (A2+ M2+R2) statica.





	<b>Committente:</b> Azienda Servizi Ambientali SpA	<b>Documento:</b> Relazione geotecnica
	<b>Lavoro:</b> Completamento della valorizzazione a scopo energetico del sito con integrazione dell'impianto fotovoltaico esistente mediante costituzione di una seconda unità energetica	Codice: S24028-PE-RE001-0 Data: Maggio 2024

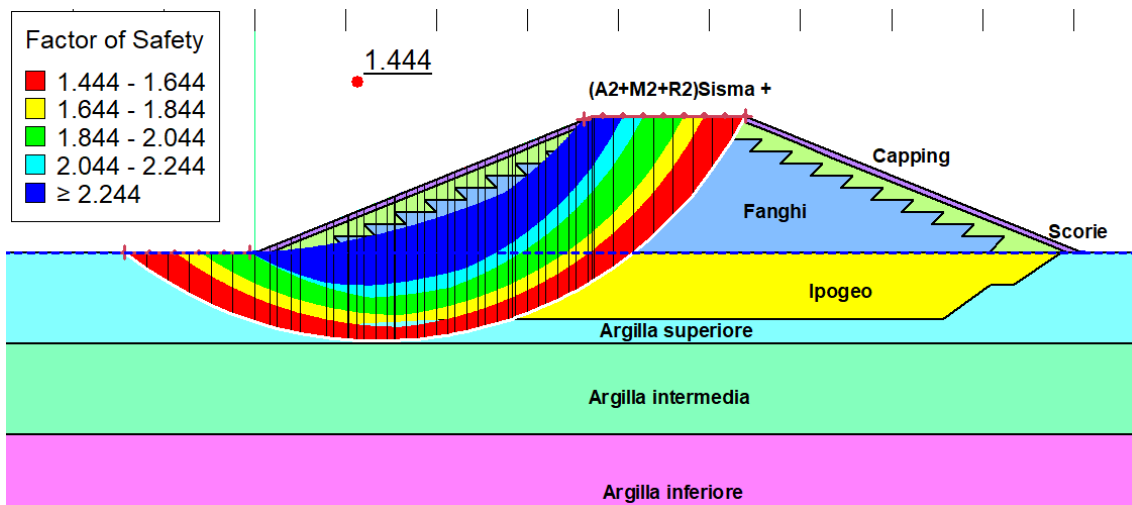
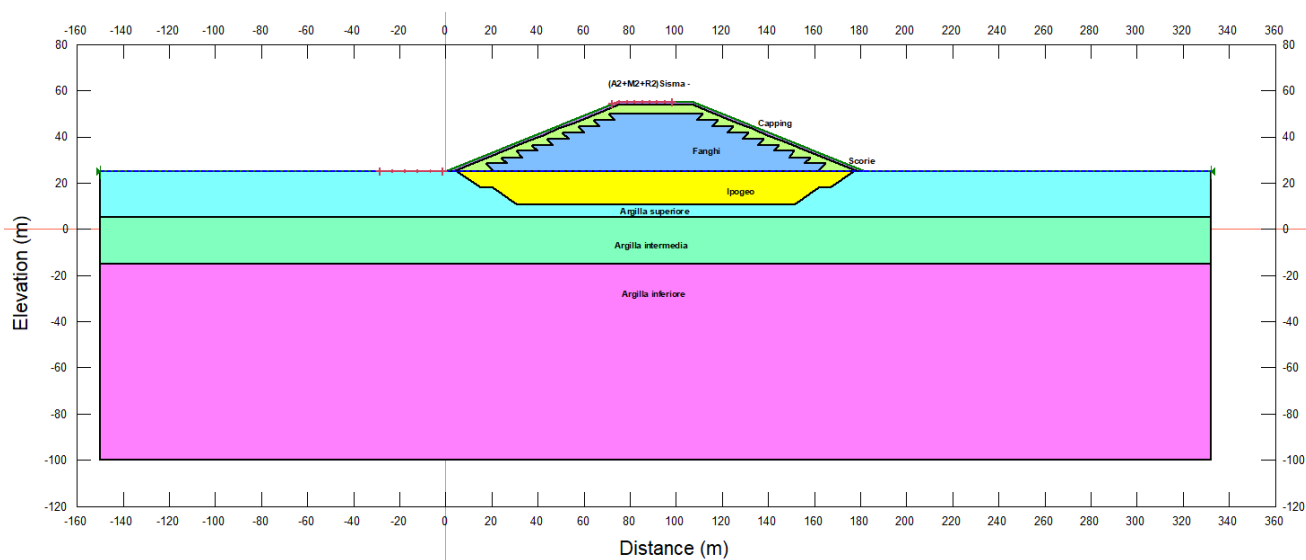



Figura 7-23: Stabilità (A2+ M2+R2) sisma +.



	<b>Committente:</b> Azienda Servizi Ambientali SpA	<b>Documento:</b> Relazione geotecnica
	<b>Lavoro:</b> Completamento della valorizzazione a scopo energetico del sito con integrazione dell'impianto fotovoltaico esistente mediante costituzione di una seconda unità energetica	Codice: S24028-PE-RE001-0 Data: Maggio 2024

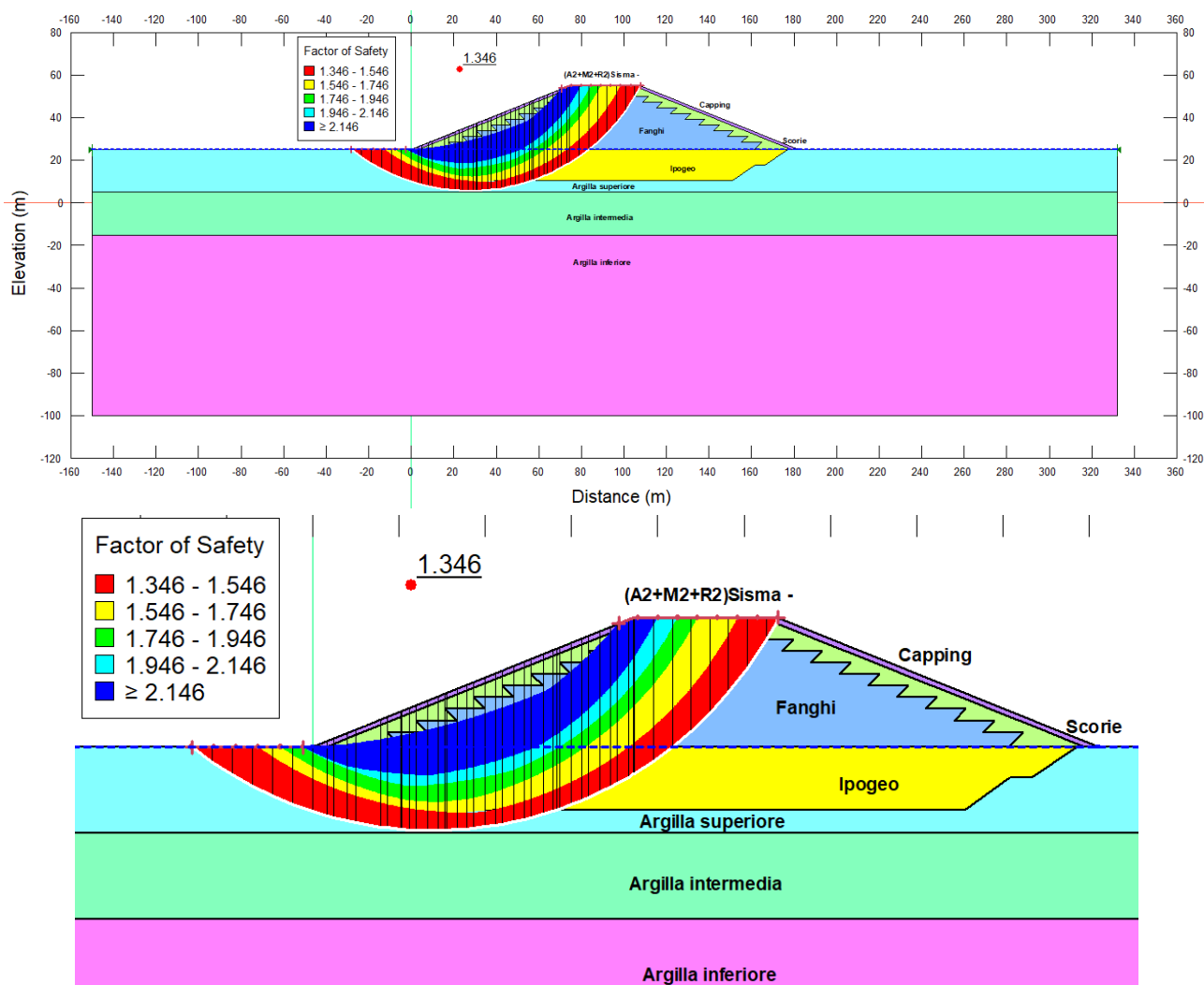



Figura 7-24: Stabilità (A2+ M2+R2) sisma -.

## 7.4.2 Sezione C-C

### 7.4.2.1 Condizione statica

L'analisi di stabilità statica è condotta sul modello di Figura 7-25, in forma parametrica al fine di tener conto delle incertezze sulle caratteristiche meccaniche dei materiali abbancati in questa fase del progetto (in rosso nella figura): la variabilità dell'angolo d'attrito è implementata attraverso 11 valori equidistanziati di 1° che

	<b>Committente:</b> Azienda Servizi Ambientali SpA	<b>Documento:</b> Relazione geotecnica
	<b>Lavoro:</b> Completamento della valorizzazione a scopo energetico del sito con integrazione dell'impianto fotovoltaico esistente mediante costituzione di una seconda unità energetica	Codice: S24028-PE-RE001-0 Data: Maggio 2024

coprono il range  $\phi'_k=20^\circ \div 30^\circ$  i quali si combinano con 9 valori della coesione equidistanziati di 2.5kPa che coprono il range  $c'_k=0 \div 20$  kPa. In totale sono state eseguite  $11 \cdot 9 = 99$  analisi di stabilità.

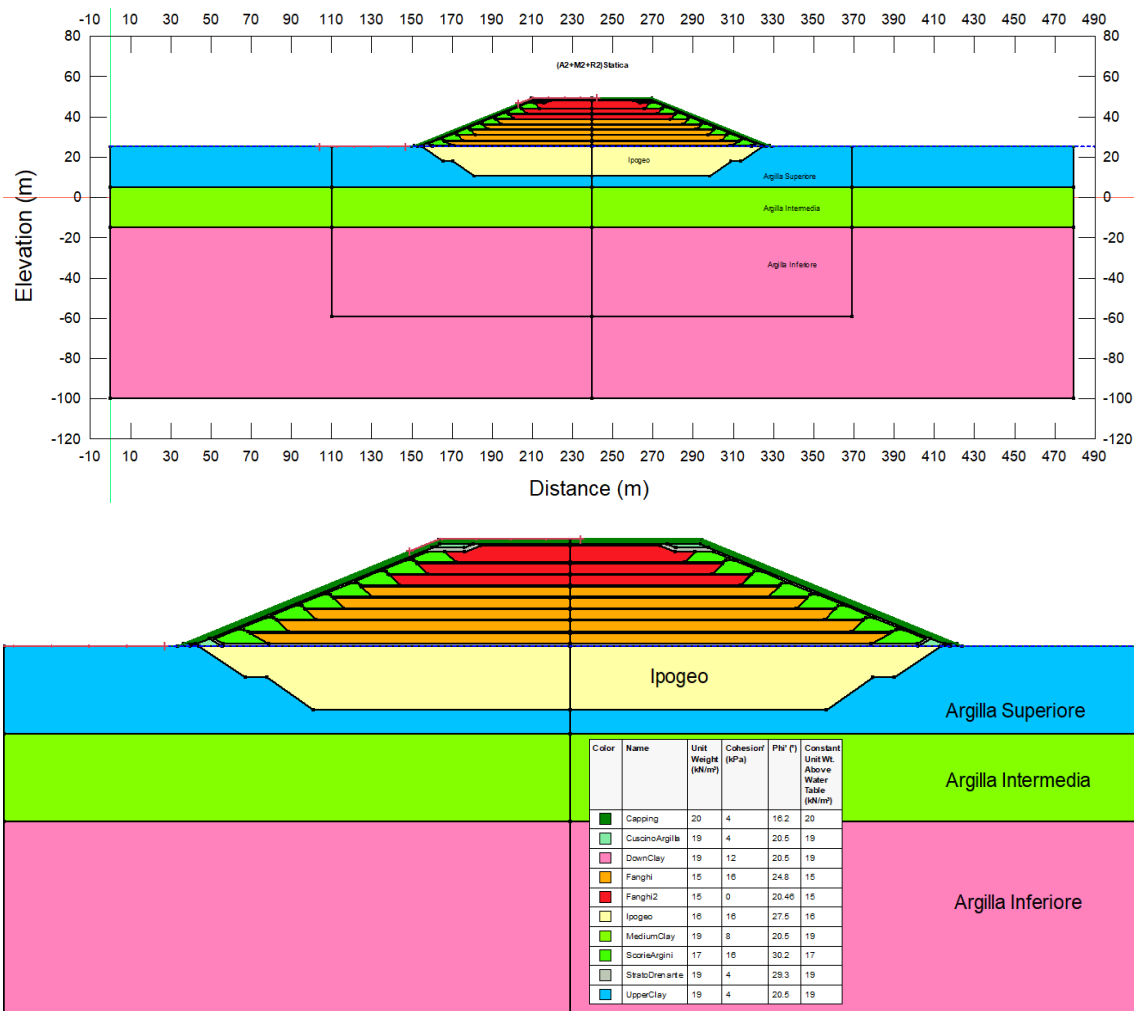



Figura 7-25: Modello di calcolo Stabilità globale statica.

I risultati in termini di Coefficiente di Sicurezza FS relativi alle analisi della stabilità globale statica interessanti sia il corpo discarica sia il terreno di fondazione sono sintetizzati nella seguente Figura 7-26: Il coefficiente di sicurezza corrispondente alla coppia di valori  $\phi'_k=30^\circ, c'_k=20$  kPa (ovvero ipotizzando che i nuovi fanghi abbiano gli stessi parametri di progetto assunti per i fanghi della parte di discarica sottostante - ancora in fase di realizzazione- è pari a  $FS=1.591$ ; al diminuire dell'angolo d'attrito  $\phi$  e della coesione  $c$  il coefficiente di sicurezza FS si riduce attingendo il minimo valore  $FS=1.563$  per la coppia  $\phi'_k=20^\circ, c'_k=0$  kPa ma rimane comunque al di sopra di 1.1 che è il minimo richiesto dalla norma.


	<b>Committente:</b> Azienda Servizi Ambientali SpA	<b>Documento:</b> Relazione geotecnica
	<b>Lavoro:</b> Completamento della valorizzazione a scopo energetico del sito con integrazione dell'impianto fotovoltaico esistente mediante costituzione di una seconda unità energetica	Codice: S24028-PE-RE001-0 Data: Maggio 2024

Una rappresentazione della variabilità del coefficiente di sicurezza al variare dei parametri  $\phi'$  e  $c'$  è riportata in Figura 7-27 in forma di mappa a curve di livello.

**Stabilità Globale - Condizione Statica: (A2+M2+R2)**

	$\phi'_k$	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
$c'_k$	$c'_d / \phi'_d$	16.13	16.99	17.86	18.73	19.59	20.46	21.32	22.19	23.06	23.92	24.79
20	16	1.584	1.585	1.586	1.587	1.588	1.59	1.591	1.592	1.593	1.59	1.591
17.5	14	1.582	1.583	1.584	1.585	1.586	1.588	1.589	1.59	1.587	1.588	1.589
15	12	1.58	1.581	1.582	1.583	1.584	1.585	1.587	1.584	1.585	1.586	1.587
12.5	10	1.578	1.579	1.58	1.581	1.582	1.579	1.581	1.582	1.583	1.584	1.585
10	8	1.576	1.577	1.578	1.579	1.576	1.577	1.578	1.58	1.581	1.582	1.583
7.5	6	1.573	1.575	1.576	1.573	1.574	1.575	1.576	1.578	1.579	1.58	1.581
5	4	1.571	1.568	1.569	1.571	1.572	1.573	1.574	1.575	1.577	1.578	1.579
2.5	2	1.565	1.566	1.567	1.568	1.57	1.571	1.572	1.573	1.575	1.576	1.577
0	0	1.563	1.564	1.565	1.566	1.568	1.569	1.57	1.571	1.573	1.574	1.575

Figura 7-26: Sintesi coefficienti di sicurezza Stabilità globale statica.

	<b>Committente:</b> Azienda Servizi Ambientali SpA	<b>Documento:</b> Relazione geotecnica
	<b>Lavoro:</b> Completamento della valorizzazione a scopo energetico del sito con integrazione dell'impianto fotovoltaico esistente mediante costituzione di una seconda unità energetica	Codice: S24028-PE-RE001-0 Data: Maggio 2024

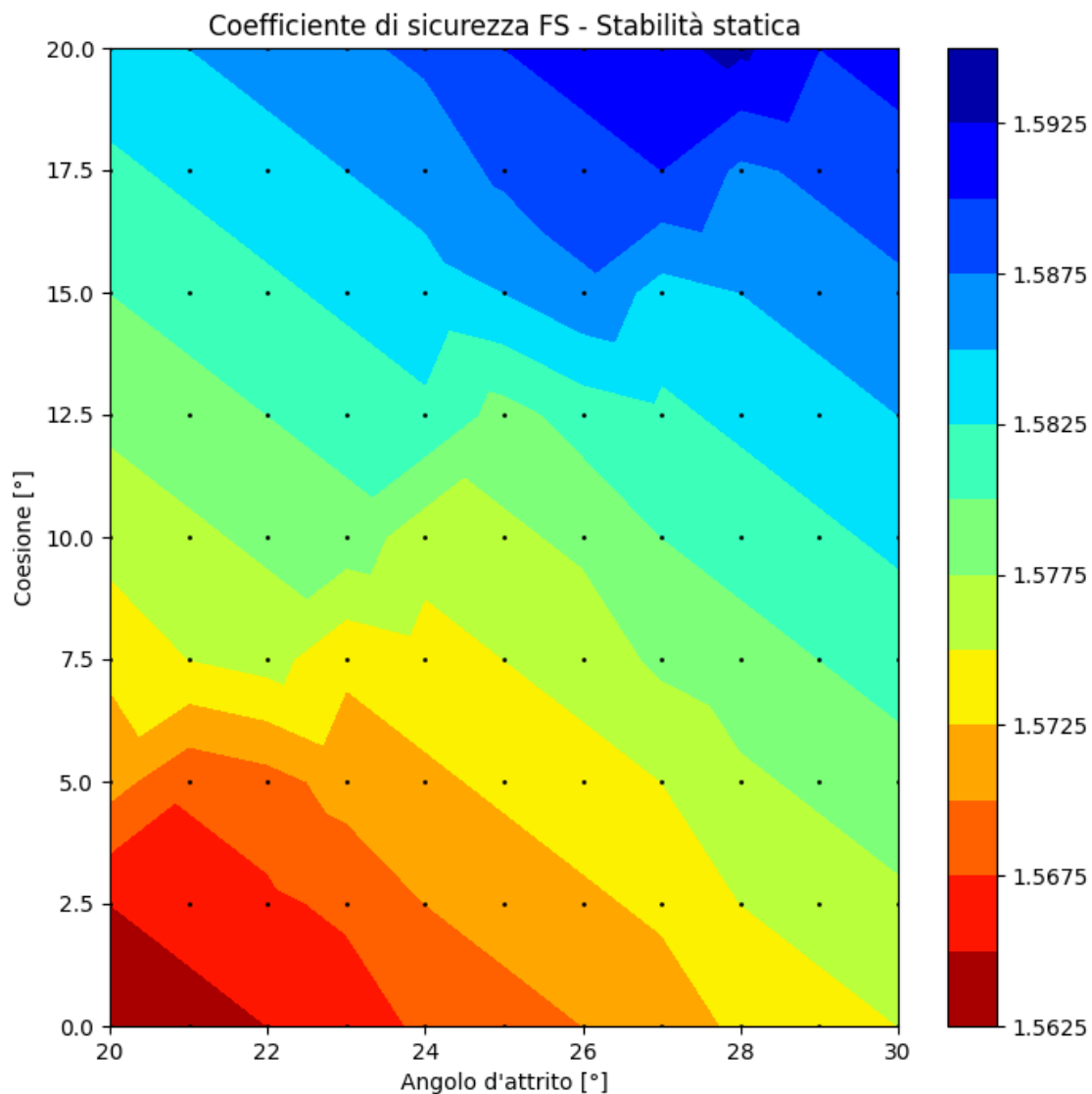



Figura 7-27: Mappa dei coefficienti di sicurezza Stabilità globale statica.

Nella Figura 7-28 viene mostrata la superficie di scivolamento critica ed il corrispondente coefficiente di sicurezza per il caso  $\phi'_k=30^\circ$ ,  $c'_k=20\text{kPa}$  (**FS=1.591**) mentre in Figura 7-29 si riporta quella relativa al caso  $\phi'_k=20^\circ$ ,  $c'_k=0\text{kPa}$  (**FS=1.563**).

	<b>Committente:</b> Azienda Servizi Ambientali SpA	<b>Documento:</b> Relazione geotecnica
	<b>Lavoro:</b> Completamento della valorizzazione a scopo energetico del sito con integrazione dell'impianto fotovoltaico esistente mediante costituzione di una seconda unità energetica	Codice: S24028-PE-RE001-0 Data: Maggio 2024

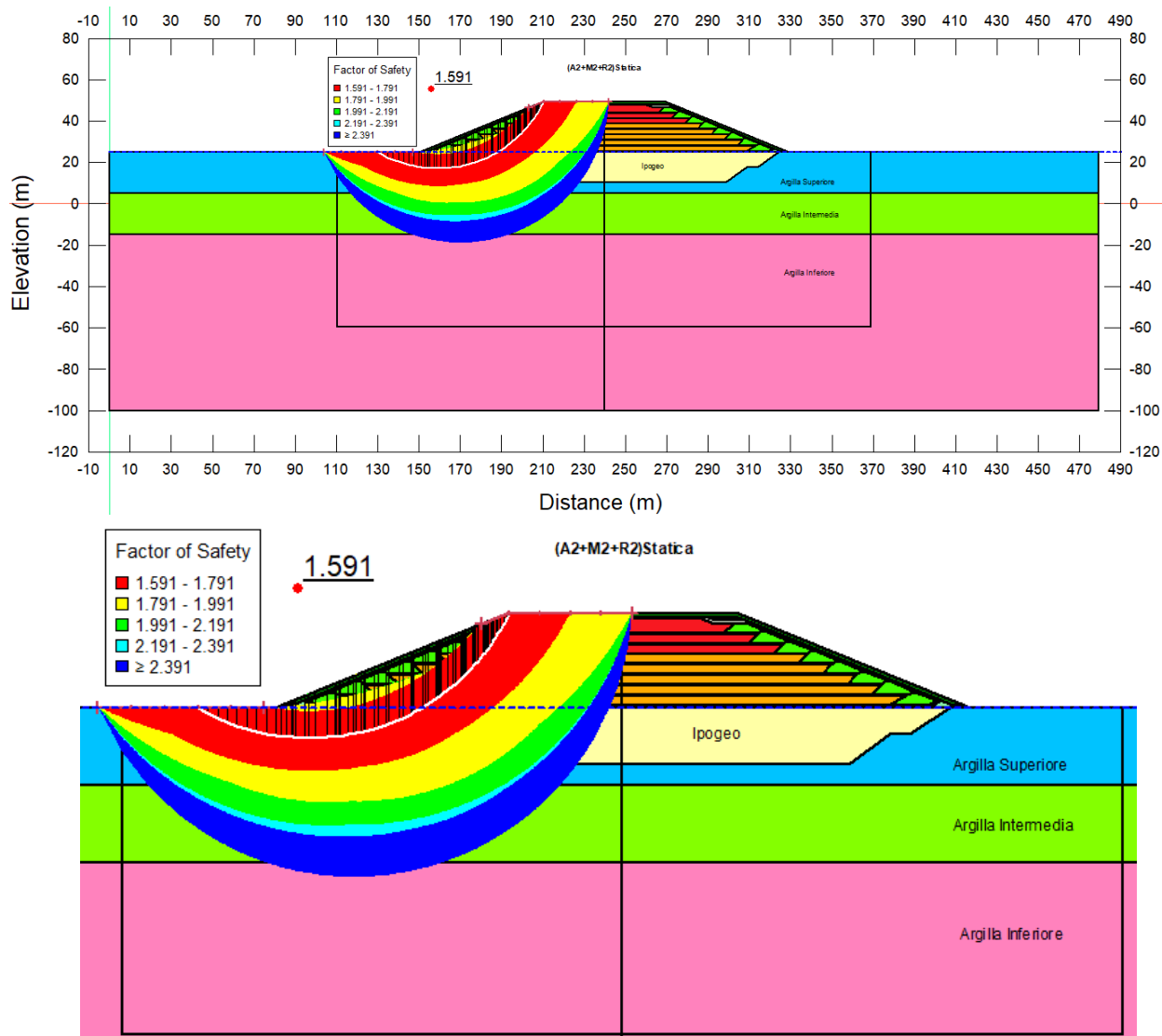



Figura 7-28: Stabilità (A2+ M2+R2) statica (caso  $\phi'_k=30^\circ$ ,  $c'_k=20\text{kPa}$ ).

	<b>Committente:</b> Azienda Servizi Ambientali SpA	<b>Documento:</b> Relazione geotecnica
	<b>Lavoro:</b> Completamento della valorizzazione a scopo energetico del sito con integrazione dell'impianto fotovoltaico esistente mediante costituzione di una seconda unità energetica	Codice: S24028-PE-RE001-0 Data: Maggio 2024

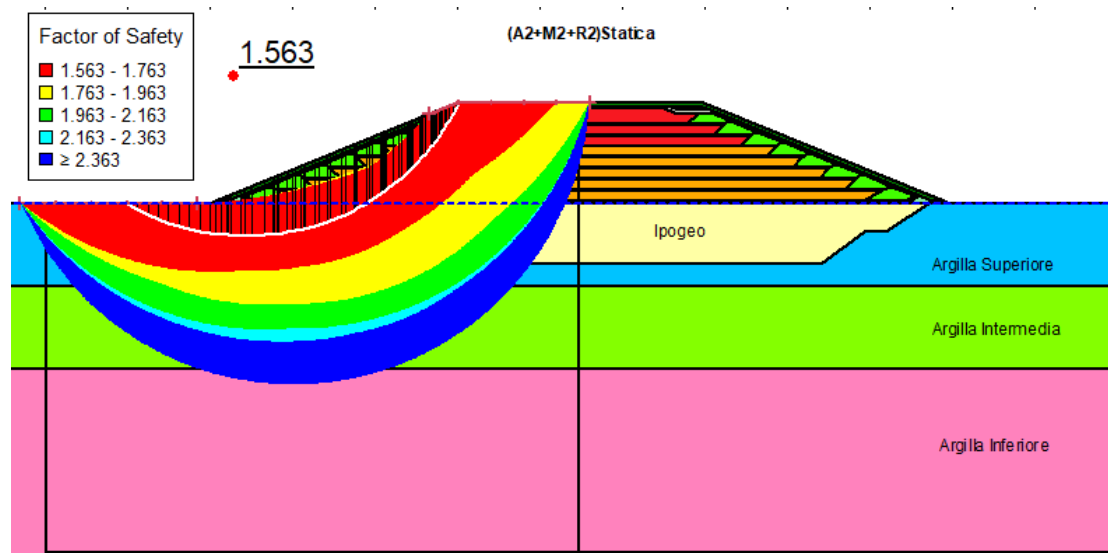
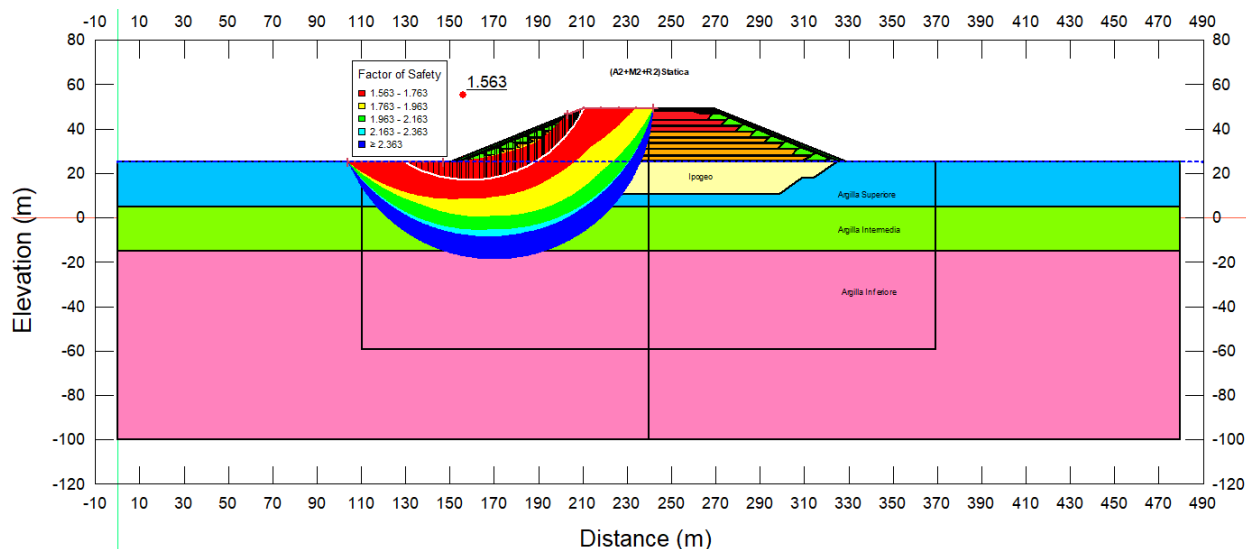



Figura 7-29: Stabilità (A2+ M2+R2) statica (caso  $\phi'_k=20^\circ$ ,  $c'_k=0\text{kPa}$ ).

#### 7.4.2.2 Condizione sismica

L'analisi di stabilità sismica è condotta sul modello di Figura 7-30, in forma parametrica al fine di tener conto delle incertezze sulle caratteristiche meccaniche dei materiali abbancati in questa fase del progetto (in rosso nella figura): la variabilità della coesione non drenata è implementata attraverso 11 valori che coprono il range  $c_{uk}=0\div 200\text{kPa}$ . In totale sono state eseguite 9 analisi di stabilità per ciascun dei 2 scenari (sisma + e sisma-).



	<b>Committente:</b> Azienda Servizi Ambientali SpA	<b>Documento:</b> Relazione geotecnica
	<b>Lavoro:</b> Completamento della valorizzazione a scopo energetico del sito con integrazione dell'impianto fotovoltaico esistente mediante costituzione di una seconda unità energetica	Codice: S24028-PE-RE001-0 Data: Maggio 2024

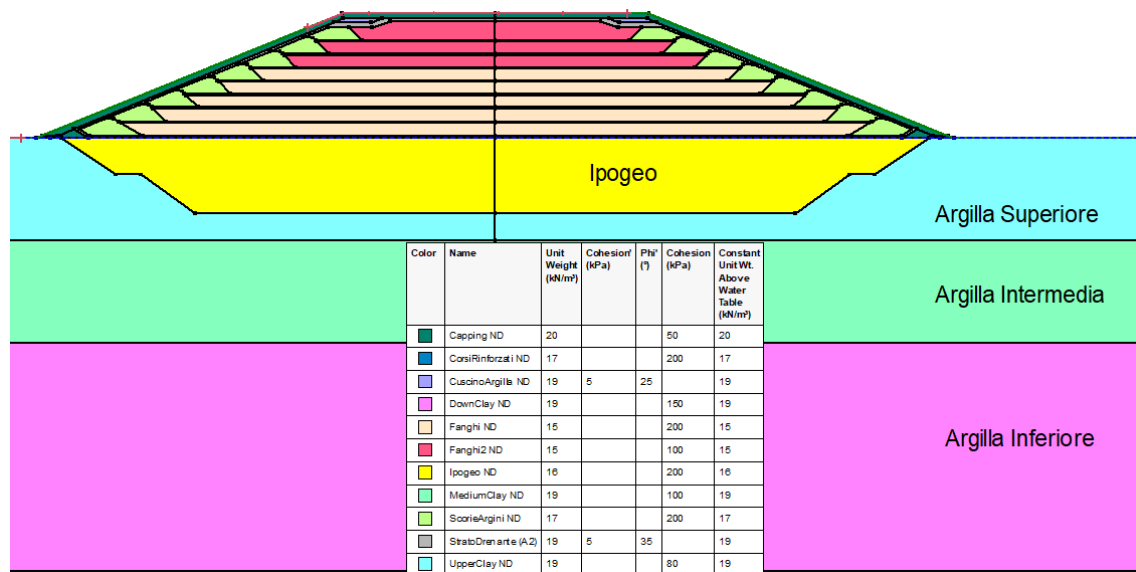


Figura 7-30: Modello di calcolo Stabilità globale sismica.

I risultati in termini di Coefficiente di Sicurezza FS relativi alle analisi della stabilità globale sismica interessanti sia il corpo discarica sia il terreno di fondazione sono sintetizzati nella seguente Figura 7-31.

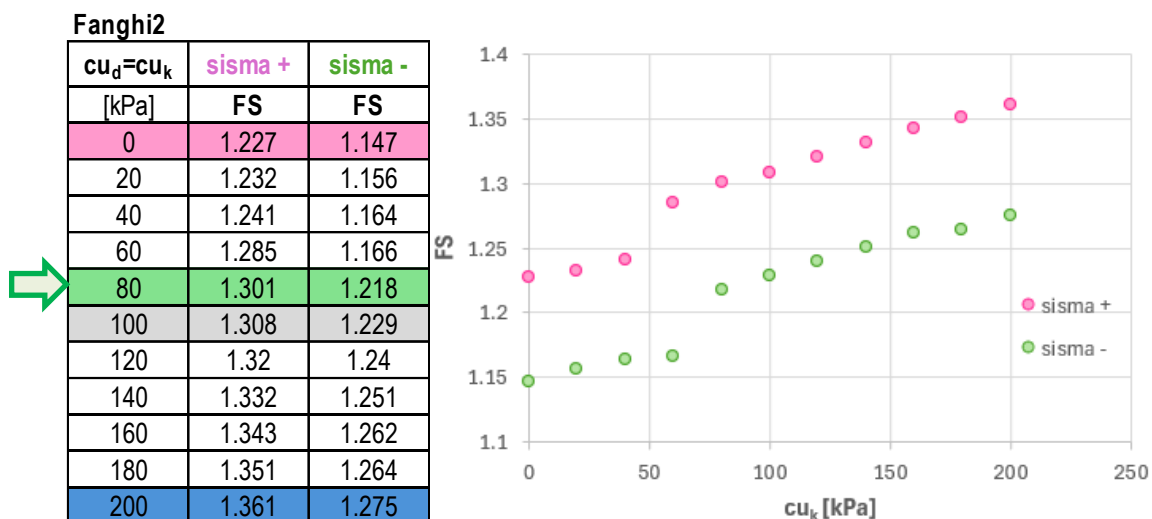



Figura 7-31: Coefficiente di sicurezza FS Stabilità sismica (A2+ M2+R2).

Il coefficiente di sicurezza corrispondente al valore  $c_{u,k}=200\text{kPa}$  lo stesso adottato per i fanghi della parte di discarica sottostante – ancora in fase di realizzazione- è

	<b>Committente:</b> Azienda Servizi Ambientali SpA	<b>Documento:</b> Relazione geotecnica
	<b>Lavoro:</b> Completamento della valorizzazione a scopo energetico del sito con integrazione dell'impianto fotovoltaico esistente mediante costituzione di una seconda unità energetica	Codice: S24028-PE-RE001-0 Data: Maggio 2024

pari a  $FS=1.361$  (sisma +) e  $FS=1.275$  (sisma -), al diminuire della coesione  $c_{uk}$  il coefficiente di sicurezza  $FS$  si riduce attingendo il minimo valore  $FS=1.227$  (sisma +) e  $FS=1.147$  (sisma -) per  $c_{uk}=0\text{kPa}$ . Dovendo essere  $FS \geq 1.2$  (valore minimo richiesto dalla norma) pur essendo la verifica di stabilità sempre soddisfatta nello scenario sisma+, per il soddisfacimento della verifica di stabilità nello scenario sisma - **i fanghi devono avere una  $c_{uk} \geq 80\text{kPa}$**  cui corrisponde un  $FS=1.218$ .

Nelle successive figure viene mostrata la superficie di scivolamento critica ed il corrisponde coefficiente di sicurezza per il caso  **$c_{uk}=80\text{kPa}$** .

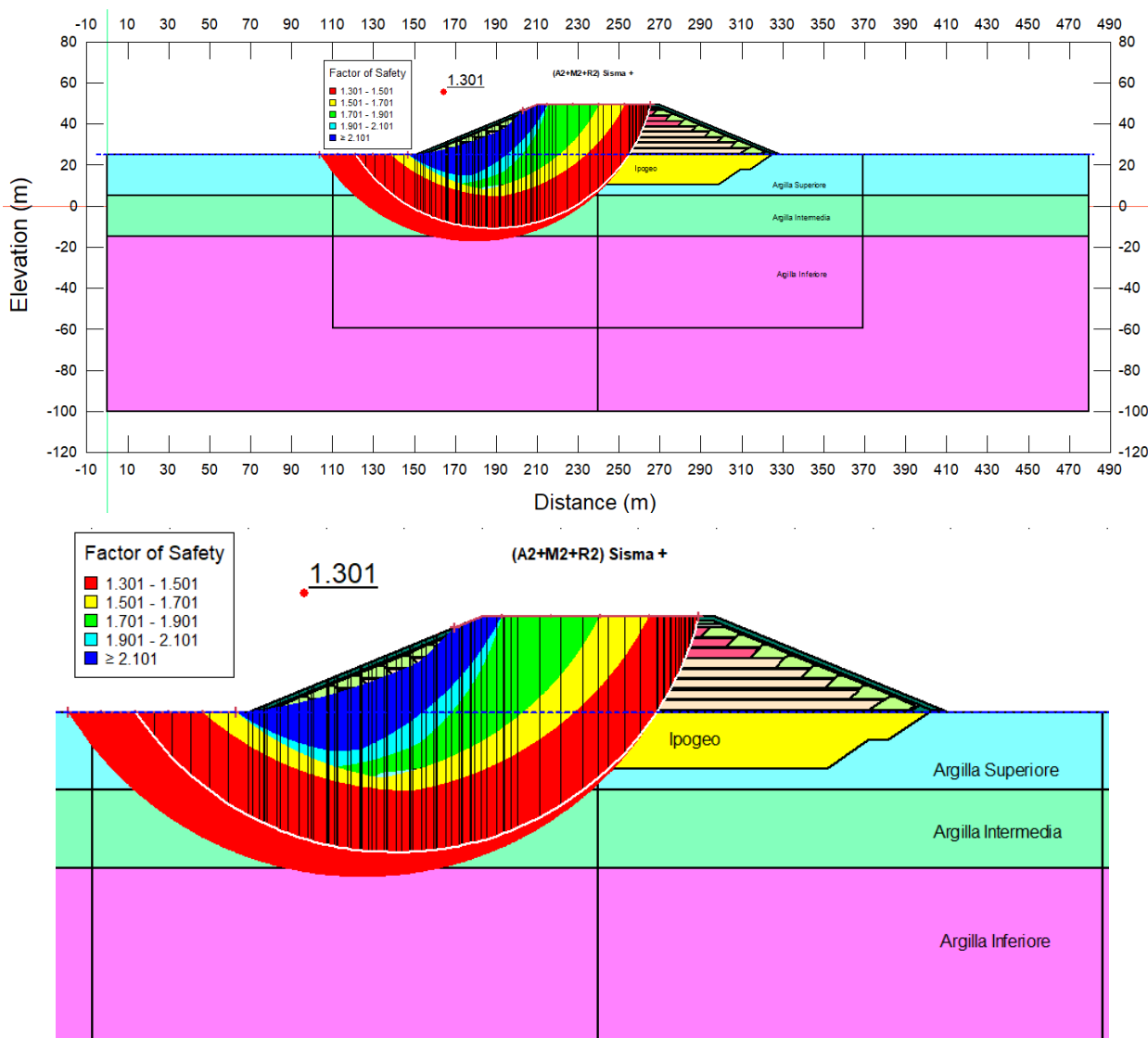



Figura 7-32: Stabilità (A2+ M2+R2) sisma +.

	<b>Committente:</b> Azienda Servizi Ambientali SpA	<b>Documento:</b> Relazione geotecnica
	<b>Lavoro:</b> Completamento della valorizzazione a scopo energetico del sito con integrazione dell'impianto fotovoltaico esistente mediante costituzione di una seconda unità energetica	Codice: S24028-PE-RE001-0 Data: Maggio 2024

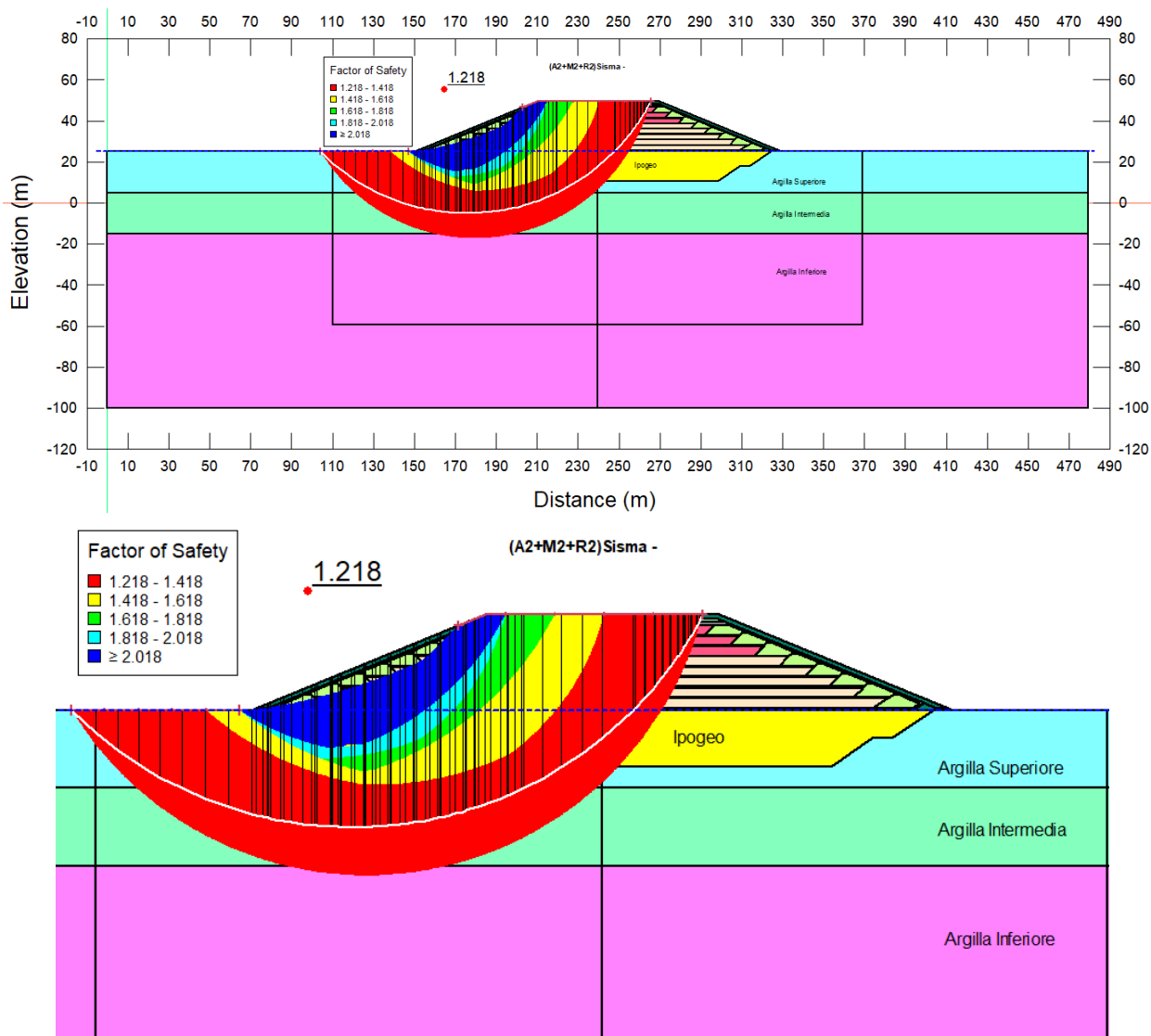



Figura 7-33: Stabilità (A2+ M2+R2) sisma -.

## 7.5 Risultati Stabilità Locale

### 7.5.1 Sezione G-G

I risultati relativi alle analisi della stabilità locale interessanti il corpo discarica sono sintetizzati nella

		F.S. calcolato		F.S. minimo	
Condizione statica	(A <sub>2</sub> +M <sub>2</sub> +R <sub>2</sub> ) Statico	1.777	≥	1.1	Figura 7-35
Condizione sismica	(M <sub>1</sub> +R <sub>2s</sub> ) Sisma +	3.273		1.2	Figura 7-36

	<b>Committente:</b> Azienda Servizi Ambientali SpA	<b>Documento:</b> Relazione geotecnica
	<b>Lavoro:</b> Completamento della valorizzazione a scopo energetico del sito con integrazione dell'impianto fotovoltaico esistente mediante costituzione di una seconda unità energetica	Codice: S24028-PE-RE001-0 Data: Maggio 2024

	(M <sub>1</sub> +R <sub>2s</sub> ) Sisma -	3.220	1.2	Figura 7-37
--	--	-------	-----	-------------

Figura 7-34 da cui si evince che le verifiche soddisfano i requisiti di norma:

		F.S. calcolato		F.S. minimo	
Condizione statica	(A <sub>2</sub> +M <sub>2</sub> +R <sub>2</sub> ) Statico	1.777	≥	1.1	Figura 7-35
Condizione sismica	(M <sub>1</sub> +R <sub>2s</sub> ) Sisma +	3.273		1.2	Figura 7-36
	(M <sub>1</sub> +R <sub>2s</sub> ) Sisma -	3.220		1.2	Figura 7-37

Figura 7-34: Sintesi coefficienti di sicurezza Stabilità Locale.

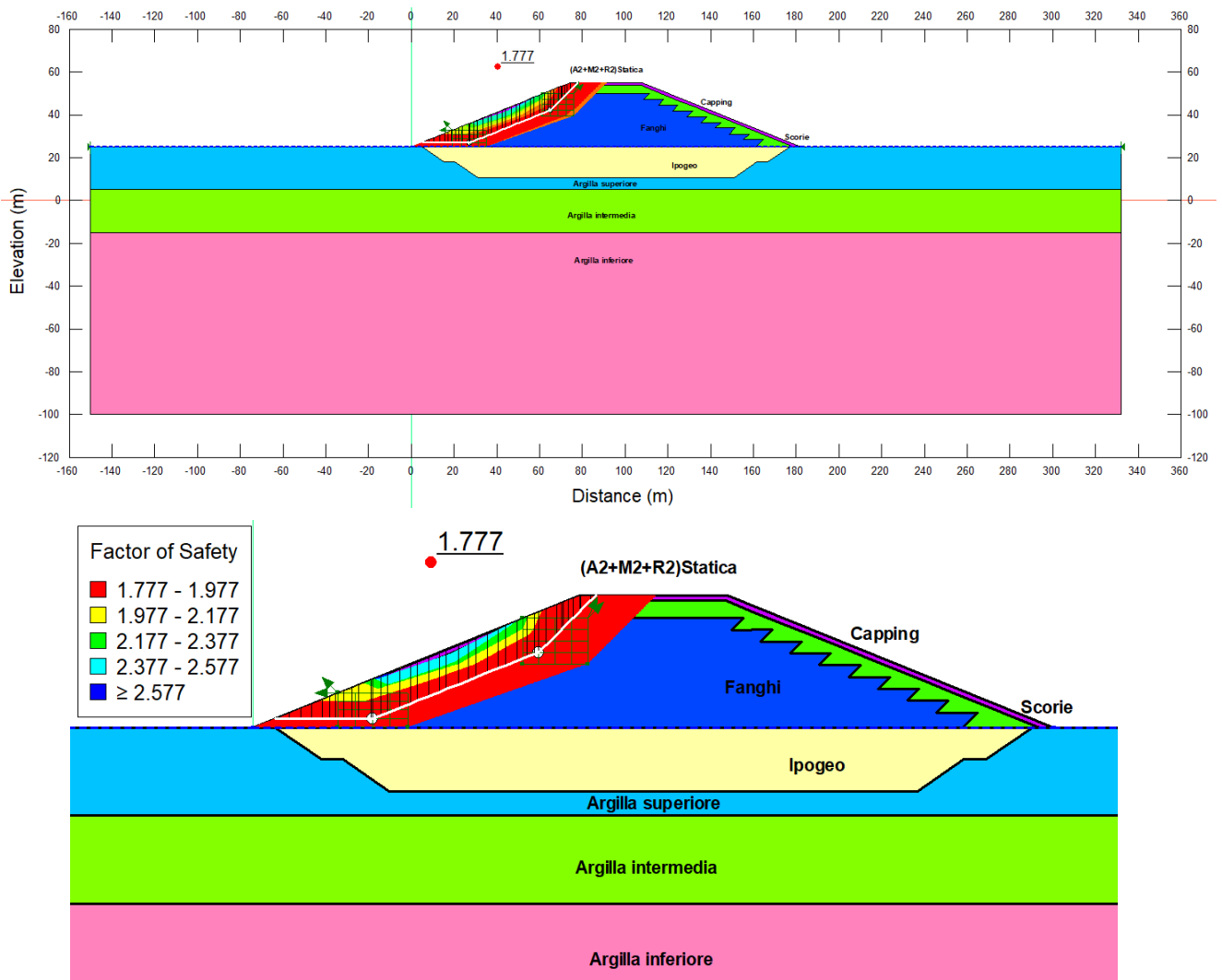



Figura 7-35: Stabilità (A<sub>2</sub>+ M<sub>2</sub>+R<sub>2</sub>) statica.

	<b>Committente:</b> Azienda Servizi Ambientali SpA	<b>Documento:</b> Relazione geotecnica
	<b>Lavoro:</b> Completamento della valorizzazione a scopo energetico del sito con integrazione dell'impianto fotovoltaico esistente mediante costituzione di una seconda unità energetica	Codice: S24028-PE-RE001-0 Data: Maggio 2024

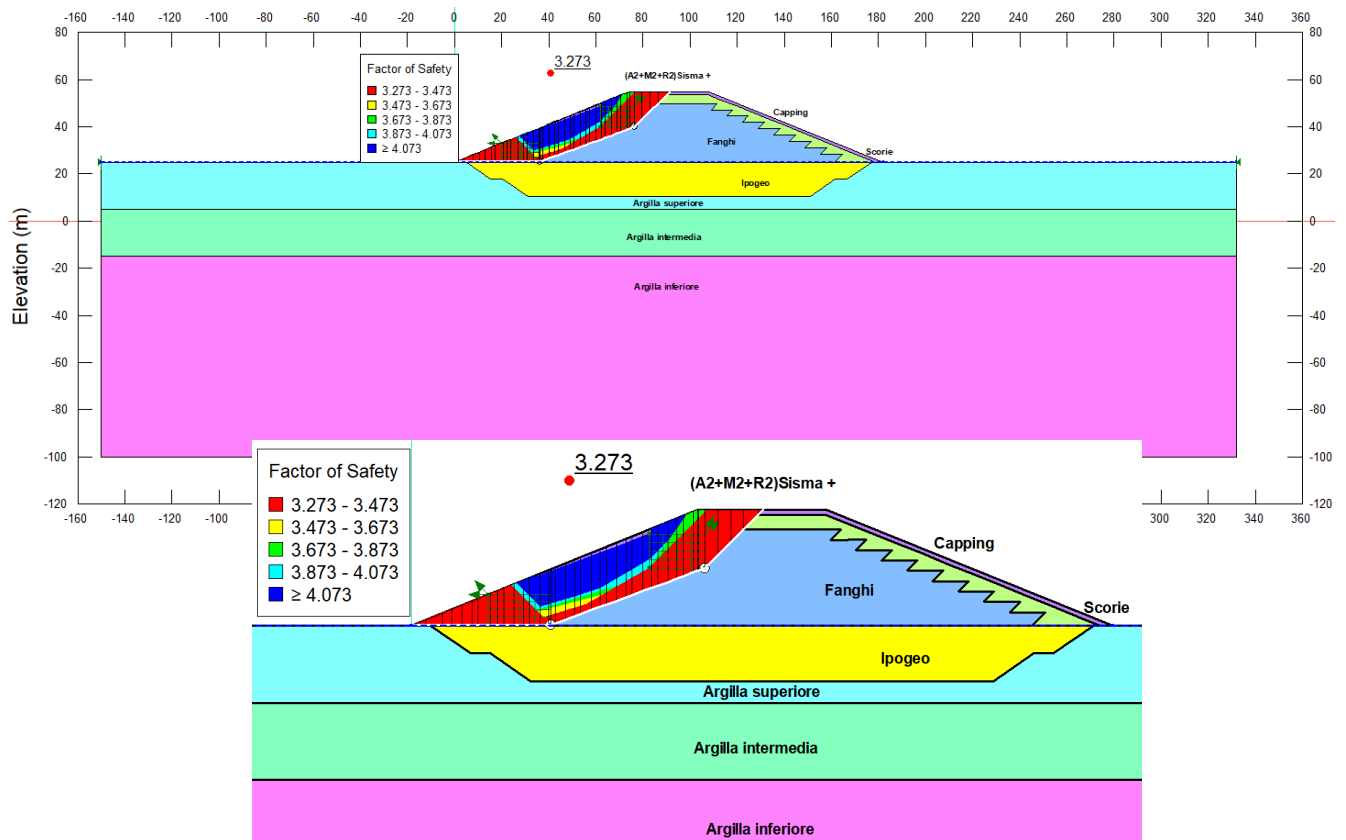
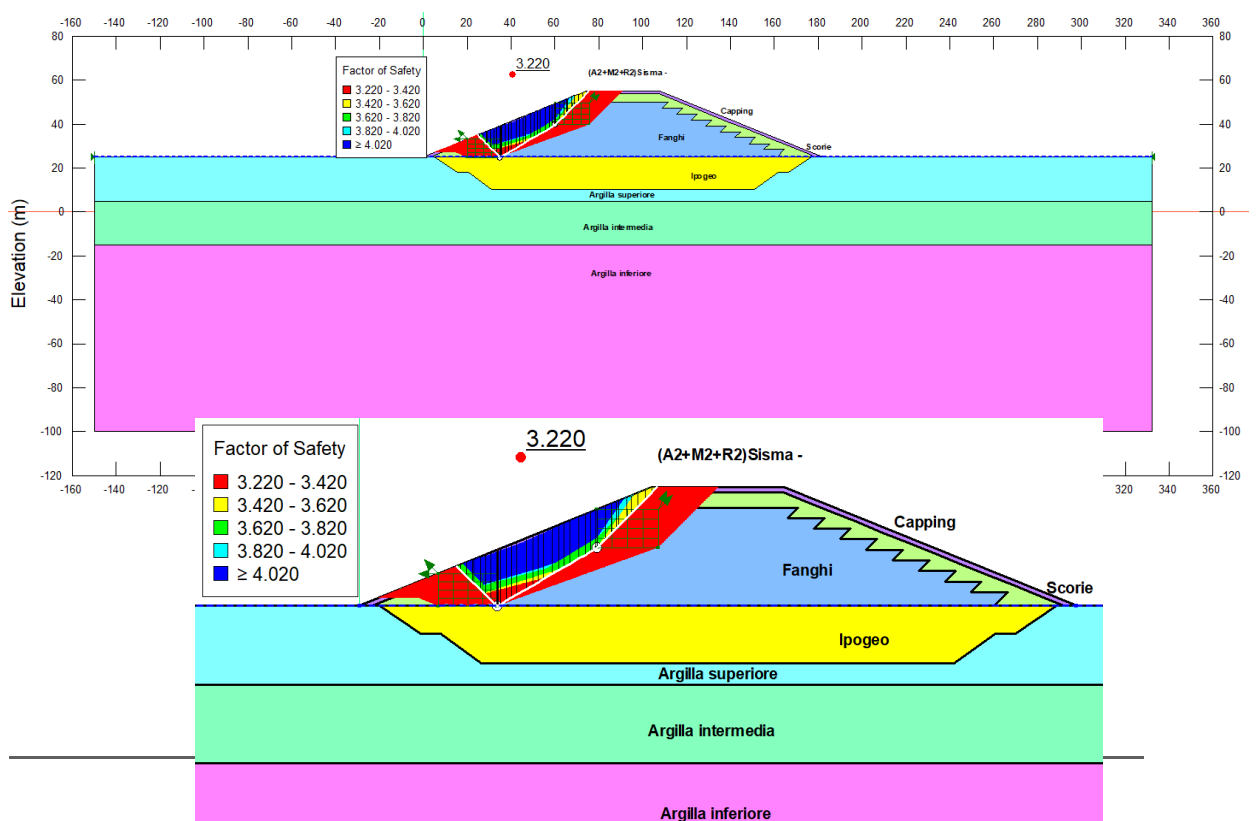


Figura 7-36: Stabilità (A2+ M2+R2) sisma +.




	<b>Committente:</b> Azienda Servizi Ambientali SpA	<b>Documento:</b> Relazione geotecnica
	<b>Lavoro:</b> Completamento della valorizzazione a scopo energetico del sito con integrazione dell'impianto fotovoltaico esistente mediante costituzione di una seconda unità energetica	Codice: S24028-PE-RE001-0 Data: Maggio 2024

Figura 7-37: Stabilità (A2+ M2+R2) sisma -.

## 7.5.2 Sezione C-C

### 7.5.2.1 Condizione statica

L'analisi di stabilità statica è condotta sul modello di Figura 7-25, in forma parametrica al fine di tener conto delle incertezze sulle caratteristiche meccaniche dei materiali abbancati in questa fase del progetto (in rosso nella figura): la variabilità dell'angolo d'attrito è implementata attraverso 11 valori equidistanziati di  $1^\circ$  che coprono il range  $\phi'_k=20^\circ \div 30^\circ$  i quali si combinano con 9 valori della coesione equidistanziati di 2.5kPa che coprono il range  $c'_k=0 \div 20$  kPa. In totale sono state eseguite  $11 \cdot 9 = 99$  analisi di stabilità.


I risultati in termini di Coefficiente di Sicurezza FS relativi alle analisi della stabilità locale statica interessanti il corpo discarica sono sintetizzati nella seguente Figura 7-38.

Stabilità Locale - Condizione Statica: (A2+M2+R2)

	$\phi'_k$	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
$c'_k$	$c'_d / \phi'_d$	16.13	16.99	17.86	18.73	19.59	20.46	21.32	22.19	23.06	23.92	24.79
20	16	1.799	1.809	1.819	1.828	1.838	1.848	1.858	1.868	1.879	1.89	1.900
17.5	14	1.787	1.796	1.806	1.816	1.826	1.836	1.846	1.856	1.866	1.876	1.887
15	12	1.774	1.784	1.793	1.803	1.813	1.823	1.833	1.843	1.854	1.864	1.874
12.5	10	1.763	1.772	1.781	1.791	1.8	1.81	1.821	1.831	1.841	1.851	1.862
10	8	1.75	1.76	1.769	1.779	1.788	1.798	1.808	1.818	1.828	1.839	1.849
7.5	6	1.736	1.747	1.757	1.767	1.777	1.786	1.795	1.806	1.816	1.826	1.837
5	4	1.723	1.733	1.745	1.754	1.764	1.774	1.784	1.794	1.803	1.814	1.824
2.5	2	1.711	1.721	1.73	1.742	1.752	1.762	1.772	1.782	1.792	1.802	1.812
0	0	1.692	1.704	1.716	1.726	1.738	1.749	1.759	1.769	1.78	1.79	1.801

Figura 7-38: Sintesi coefficienti di sicurezza Stabilità globale statica.

Il coefficiente di sicurezza corrispondente alla coppia di valori  $\phi'_k=30, c'_k=20$  kPa adottati per i fanghi della parte di discarica sottostante – ancora in fase di realizzazione- è pari a  $FS=1.900$ , al diminuire dell'angolo d'attrito  $\phi$  e della coesione  $c$  il coefficiente di sicurezza  $FS$  si riduce attingendo il minimo valore  $FS=1.692$  per la coppia  $\phi'_k=20, c'_k=0$  kPa ma rimane comunque al di sopra di 1.1 che è il minimo richiesto dalla norma.

	<b>Committente:</b> Azienda Servizi Ambientali SpA	<b>Documento:</b> Relazione geotecnica
	<b>Lavoro:</b> Completamento della valorizzazione a scopo energetico del sito con integrazione dell'impianto fotovoltaico esistente mediante costituzione di una seconda unità energetica	Codice: S24028-PE-RE001-0 Data: Maggio 2024

Una rappresentazione della variabilità del coefficiente di sicurezza al variare dei parametri  $\phi'$  e  $c'$  è riportata in Figura 7-39 in forma di mappa a curve di livello.

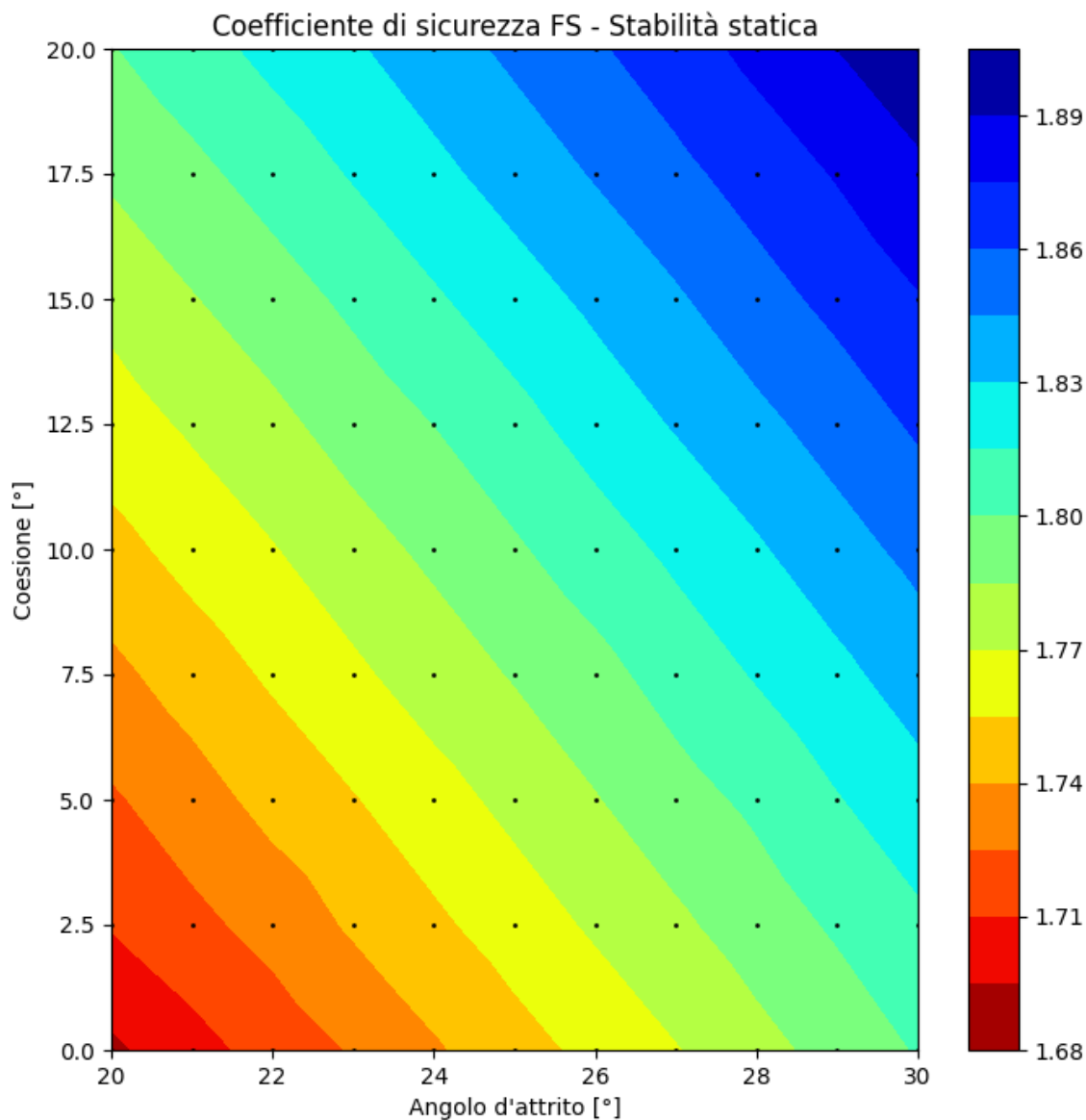



Figura 7-39: Mappa dei coefficienti di sicurezza Stabilità globale statica.

Nella Figura 7-40 viene mostrata la superficie di scivolamento critica ed il corrispondente coefficiente di sicurezza per il caso  $\phi'_k=30^\circ$ ,  $c'_k=20\text{kPa}$  (**FS=1.900**) mentre in Figura 7-41 si riporta quella relativa al caso  $\phi'_k=20^\circ$ ,  $c'_k=0\text{kPa}$  (**FS=1.692**).



	<b>Committente:</b> Azienda Servizi Ambientali SpA	<b>Documento:</b> Relazione geotecnica
	<b>Lavoro:</b> Completamento della valorizzazione a scopo energetico del sito con integrazione dell'impianto fotovoltaico esistente mediante costituzione di una seconda unità energetica	Codice: S24028-PE-RE001-0 Data: Maggio 2024

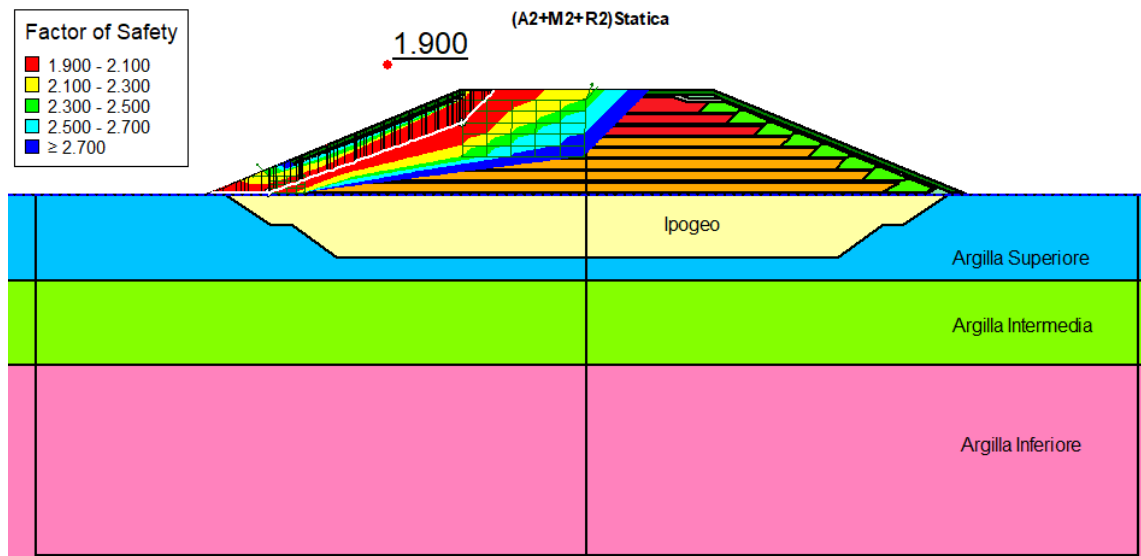
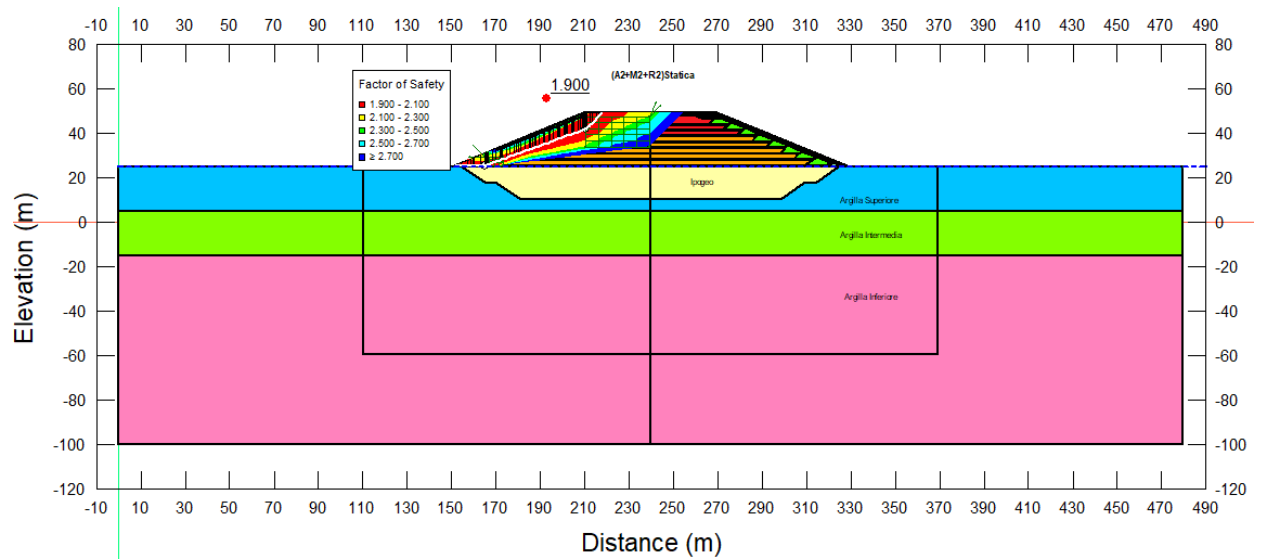



Figura 7-40: Stabilità (A2+ M2+R2) statica (caso  $\phi'_k=30^\circ$ ,  $c'_k=20\text{kPa}$ ).

	<b>Committente:</b> Azienda Servizi Ambientali SpA	<b>Documento:</b> Relazione geotecnica
	<b>Lavoro:</b> Completamento della valorizzazione a scopo energetico del sito con integrazione dell'impianto fotovoltaico esistente mediante costituzione di una seconda unità energetica	Codice: S24028-PE-RE001-0 Data: Maggio 2024

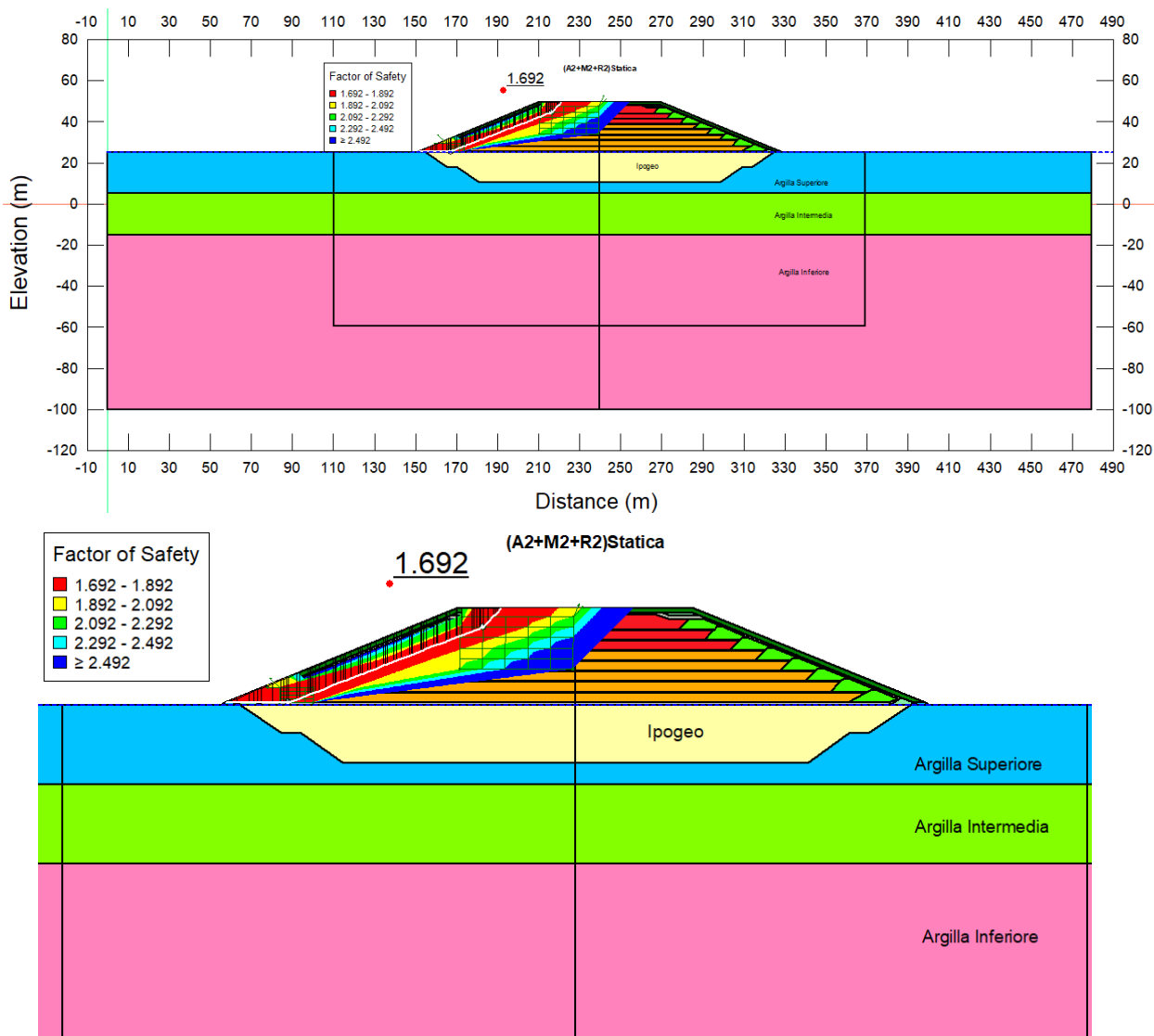



Figura 7-41: Stabilità (A2+ M2+R2) statica (caso  $\phi'_k=20^\circ$ ,  $c'_k=0\text{kPa}$ ).

### 7.5.2.2 Condizione sismica

L'analisi di stabilità sismica è condotta sul modello di Figura 7-30, in forma parametrica al fine di tener conto delle incertezze sulle caratteristiche meccaniche dei materiali abbancati in questa fase del progetto (in rosso nella figura): la variabilità della coesione non drenata è implementata attraverso 11 valori che coprono il range  $c_{uk}=0\div 200\text{kPa}$ . In totale sono state eseguite 9 analisi di stabilità per ciascun dei 2 scenari (sisma + e sisma-).

	<b>Committente:</b> Azienda Servizi Ambientali SpA	<b>Documento:</b> Relazione geotecnica
	<b>Lavoro:</b> Completamento della valorizzazione a scopo energetico del sito con integrazione dell'impianto fotovoltaico esistente mediante costituzione di una seconda unità energetica	Codice: S24028-PE-RE001-0 Data: Maggio 2024

I risultati in termini di Coefficiente di Sicurezza FS relativi alle analisi della stabilità locale sismica interessanti il corpo discarica sono sintetizzati nella seguente Figura 7-42.

#### Fanghi2

$cu_d = cu_k$	sisma +	sisma -
[kPa]	FS	FS
0	3.104	2.852
20	3.24	2.976
40	3.372	3.103
60	3.435	3.228
80	3.498	3.354
100	3.561	3.48
120	3.623	3.61
140	3.686	3.738
160	3.749	3.869
180	3.812	4.001
200	3.876	4.14

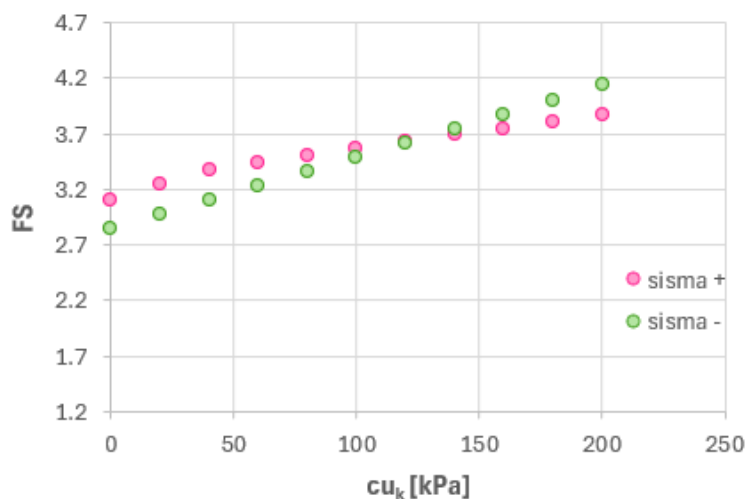
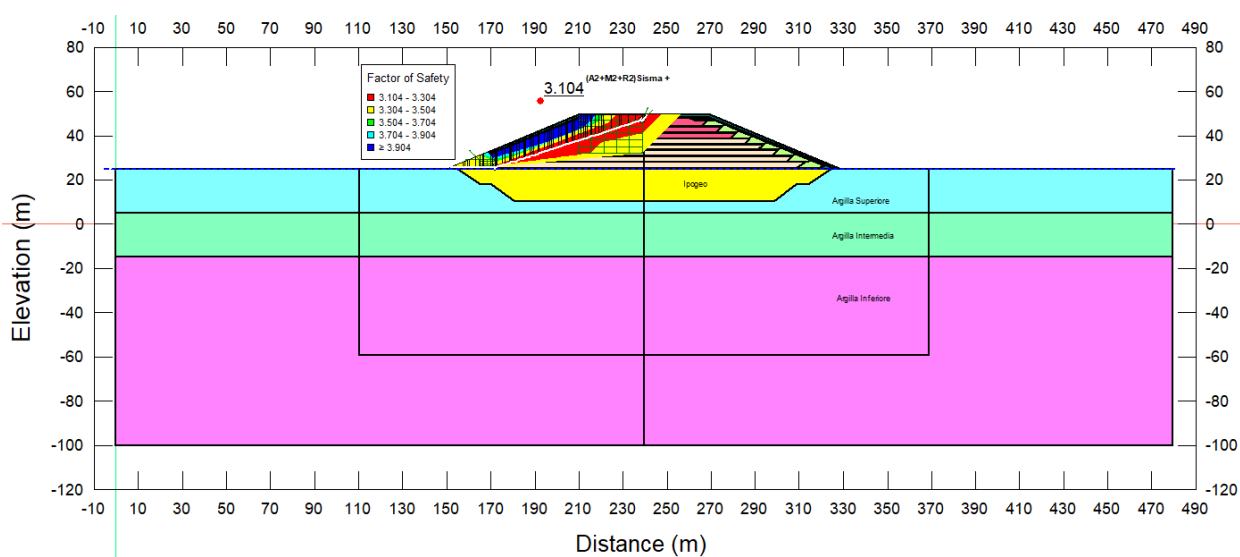



Figura 7-42: Coefficiente di sicurezza FS Stabilità sismica (A2+ M2+R2).



	<b>Committente:</b> Azienda Servizi Ambientali SpA	<b>Documento:</b> Relazione geotecnica
	<b>Lavoro:</b> Completamento della valorizzazione a scopo energetico del sito con integrazione dell'impianto fotovoltaico esistente mediante costituzione di una seconda unità energetica	Codice: S24028-PE-RE001-0 Data: Maggio 2024

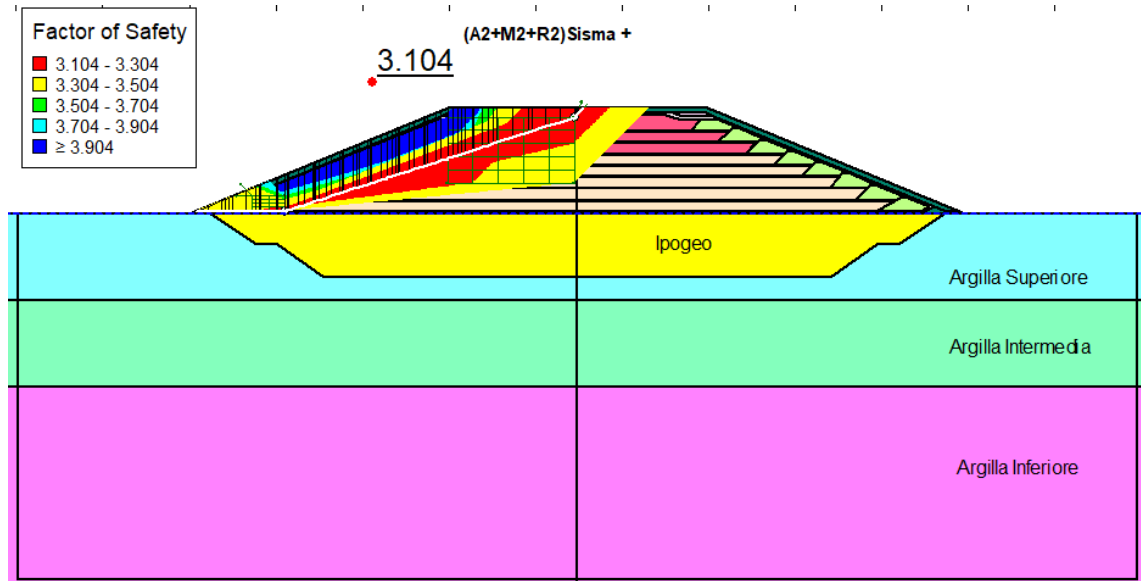
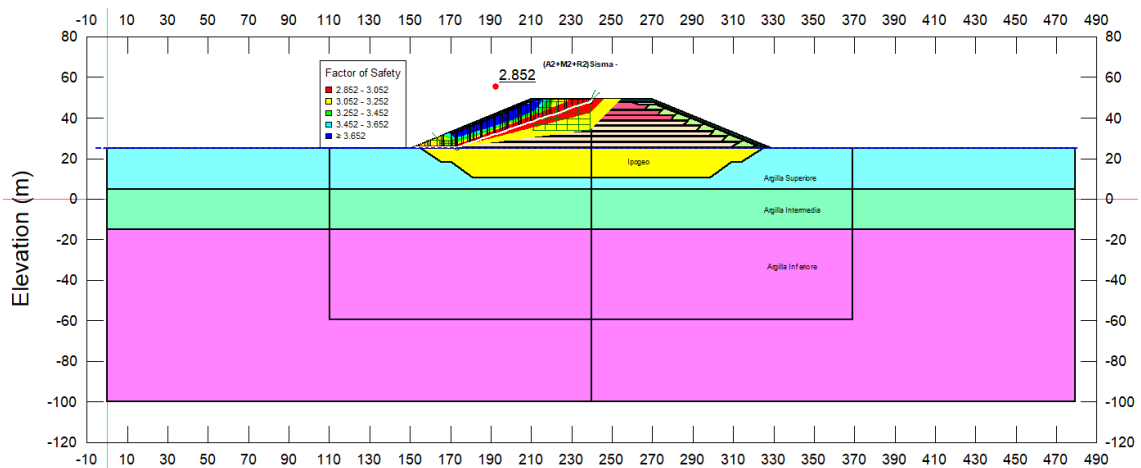



Figura 7-43: Stabilità (A2+ M2+R2) sisma + (caso  $c_{uk}=0$ ).



	<b>Committente:</b> Azienda Servizi Ambientali SpA	<b>Documento:</b> Relazione geotecnica
	<b>Lavoro:</b> Completamento della valorizzazione a scopo energetico del sito con integrazione dell'impianto fotovoltaico esistente mediante costituzione di una seconda unità energetica	Codice: S24028-PE-RE001-0 Data: Maggio 2024

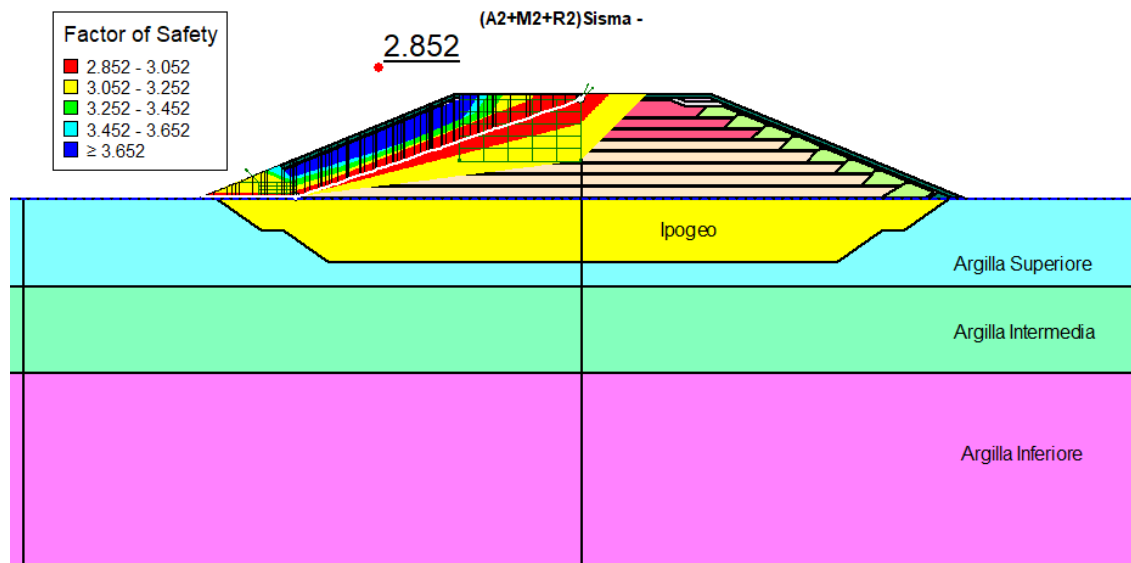


Figura 7-44: Stabilità (A2+ M2+R2) sisma - (caso  $c_{uk}=0$ ).

## 7.6 Conferma mediante analisi dinamiche avanzate


Nel seguito verrà descritta l'analisi dinamica bidimensionale svolta, al fine di valutare la stabilità globale del corpo rifiuti durante un evento sismico con un metodo numerico in grado di valutare con maggior attendibilità rispetto al metodo pseudo-statico l'effetto delle forze d'inerzia indotte dal sisma all'interno del corpo discarica.

L'analisi si articola nei seguenti step:

1. Definizione dell'input sismico
2. Analisi RSL 1D
3. Definizione dei parametri geotecnici-sismici per l'analisi dinamica 2D
4. Analisi dinamica 2D di stabilità

### 7.6.1 Definizione dell'input sismico

Il valore della  $a_g$  di riferimento, con probabilità di eccedenza dell'evento sismico del 10% in 50 anni, riportato nell'allegato A4 della Delibera dell'Assemblea Legislativa della Regione Emilia Romagna n°112/2007, per il comune di Castel Maggiore, corrisponde a:  $a_{ref} = 0,166$  g. I segnali di riferimento assunti per le analisi sono quelli distribuiti dal *Servizio Geologico, Sismico e dei Suoli della Regione Emilia Romagna*, selezionati dalla banca dati accelerometrica "European Strong Motion database".

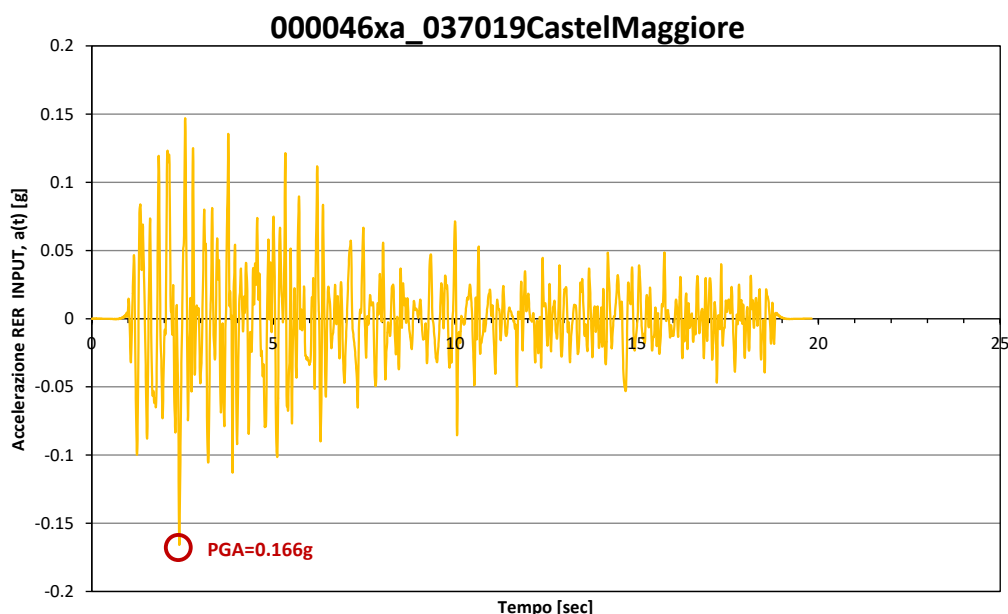
	<b>Committente:</b> Azienda Servizi Ambientali SpA	<b>Documento:</b> Relazione geotecnica
	<b>Lavoro:</b> Completamento della valorizzazione a scopo energetico del sito con integrazione dell'impianto fotovoltaico esistente mediante costituzione di una seconda unità energetica	Codice: S24028-PE-RE001-0 Data: Maggio 2024


(<http://www.isesd.cv.ic.ac.uk/ESD/> nel seguito citata come ISED) attraverso una procedura che valuta la similarità tra una forma spettrale di riferimento (nel caso questa forma spettrale corrisponde alla forma dello spettro di risposta isoprobabile con il 10% di probabilità di eccedenza in 50 anni) e la forma degli spettri di risposta dei segnali contenuti nella banca dati ISED.

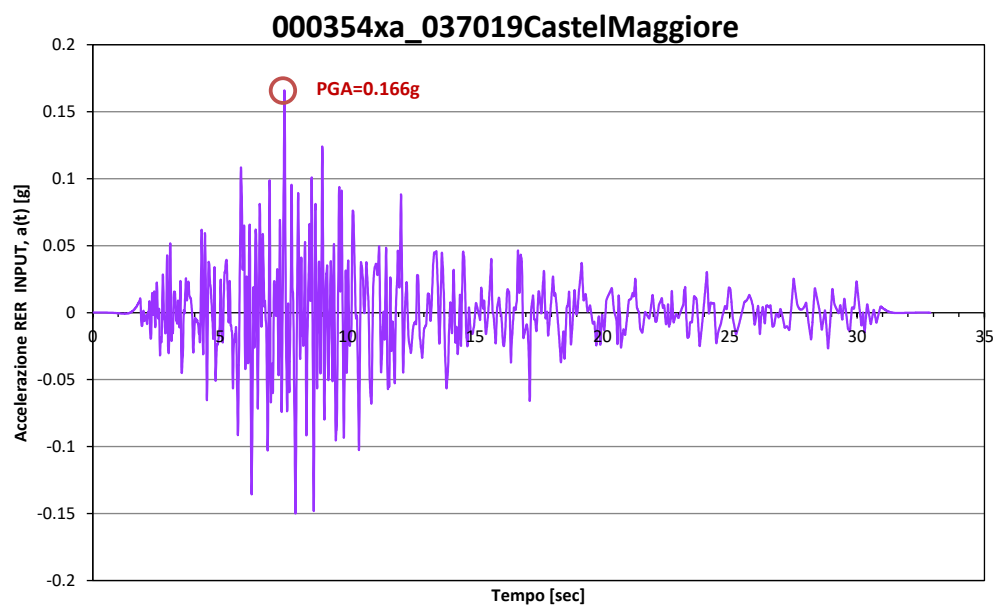
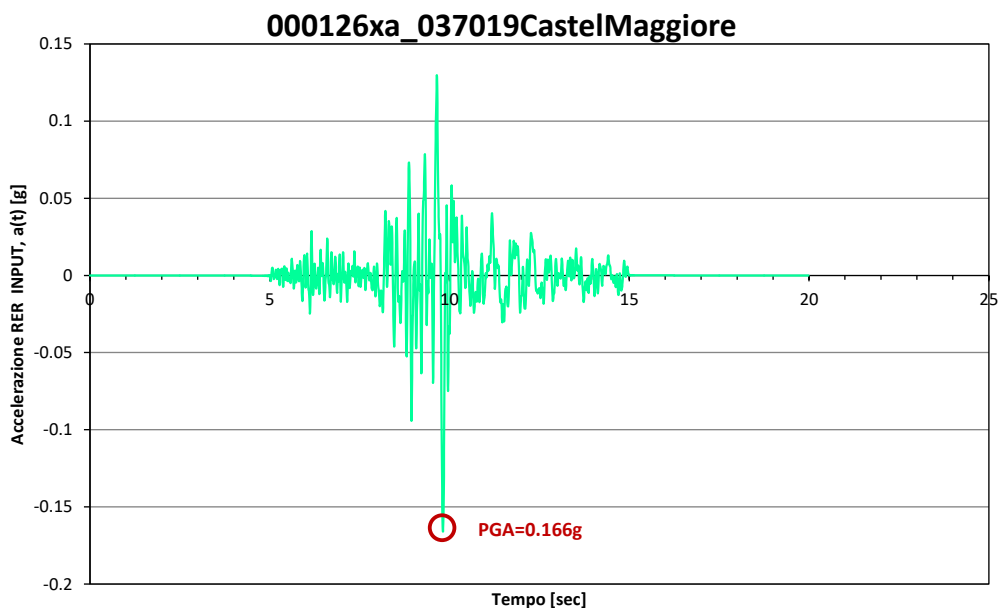
I files con i segnali di riferimento distribuiti per il Comune di Castelmaggiore sono identificati nel seguente modo:

- 1) 000046xa\_037019CastelMaggiore
- 2) 000126xa\_037019CastelMaggiore
- 3) 000354xa\_037019CastelMaggiore

Si tratta di accelerogrammi registrati da stazioni poste su sito roccioso affiorante e quindi non influenzati da eventuali fenomeni di amplificazione stratigrafica locale; per poterli utilizzare nei modelli numerici occorre scalarli secondo la  $a_g$  di progetto desunta dall'analisi probabilistica di pericolosità sismica per un periodo di ritorno di 1898 anni corrispondente al 10% di probabilità di eccedenza in 200 anni (infatti nel caso in esame risulta Vita Utile=100anni e Coefficiente d'uso=2) che risulta pari a  $a_g=0.277g$ ; successivamente occorre mediante RSL 1D operare una loro deconvoluzione alla profondità della base del modello numerico. Per evitare problemi di deriva della velocità e dello spostamento durante l'integrazione è stata applicata la baseline correction secondo il metodo di Chiu, 1997.




	<b>Committente:</b> Azienda Servizi Ambientali SpA	<b>Documento:</b> Relazione geotecnica
	<b>Lavoro:</b> Completamento della valorizzazione a scopo energetico del sito con integrazione dell'impianto fotovoltaico esistente mediante costituzione di una seconda unità energetica	Codice: S24028-PE-RE001-0 Data: Maggio 2024



### 7.6.2 Analisi Risposta sismica locale RSL 1D

La caratterizzazione geotecnica sismica del terreno naturale è stata effettuata utilizzando le informazioni ricavate dalle indagini sismiche in sito previste in progetto; in particolare la variazione della velocità delle onde di taglio di progetto è stata calibrata sulla base delle risultanze delle misure di Vs eseguite mediante prove in sito di sismica passiva (tipo Re.mi) e mediante Down Hole in corrispondenza del sondaggio S80.2.



	<b>Committente:</b> Azienda Servizi Ambientali SpA	<b>Documento:</b> Relazione geotecnica
	<b>Lavoro:</b> Completamento della valorizzazione a scopo energetico del sito con integrazione dell'impianto fotovoltaico esistente mediante costituzione di una seconda unità energetica	Codice: S24028-PE-RE001-0 Data: Maggio 2024

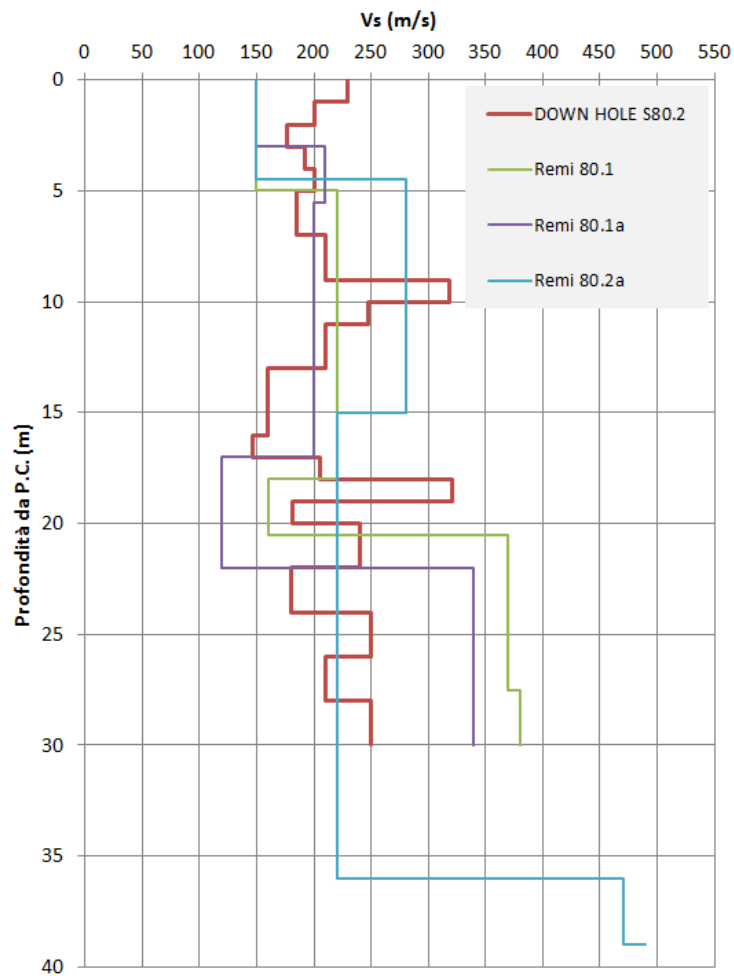



Figura 7-45: Misura in sito della velocità delle onde di taglio  $V_s$ .

Per tenere in conto la dipendenza del comportamento non lineare dei terreni sono state utilizzate le curve proposte da Vucetic e Dobry (vd Figura 7-46).

Materiale	$\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	$V_s$ (m/s)	Curva di decadimento $G/G_0$	Rapporto di Smorzamento $D$ [%]
Terreno naturale (strato superiore - da 0.0m a -20.0m)	19	210	Secondo Dobry & Vucetic, IP=20%	Secondo Dobry & Vucetic, IP=20%
Terreno naturale (strato intermedio - da -20.0m a -40.0m)	19	300		
Terreno naturale (strato inferiore - da -40.0m a -125.0m)	19	500		

	<b>Committente:</b> Azienda Servizi Ambientali SpA	<b>Documento:</b> Relazione geotecnica
	<b>Lavoro:</b> Completamento della valorizzazione a scopo energetico del sito con integrazione dell'impianto fotovoltaico esistente mediante costituzione di una seconda unità energetica	Codice: S24028-PE-RE001-0 Data: Maggio 2024

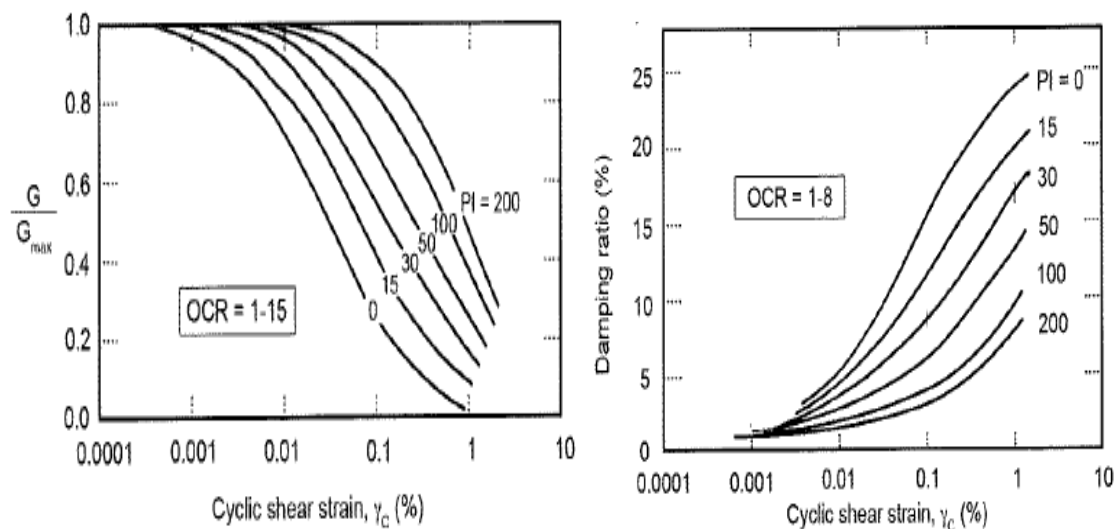



Figura 7-46: Evoluzione del modulo di taglio normalizzato e dello smorzamento D in funzione dell'ampiezza della deformazione di taglio (Vucetic & Dobry, 1991).

L'analisi di Risposta Sismica Locale 1D è stata condotta mediante il codice di calcolo STRATA operante nel dominio delle frequenze adottando un modello costitutivo lineare equivalente.

Attraverso questo tipo di analisi è possibile cogliere il complesso di modifiche in ampiezza, durata e contenuto in frequenza che un moto sismico, relativo ad una formazione rocciosa di base (Bedrock Motion, BM), subisce attraversando gli strati di terreno soprastanti sino alla superficie (Surface Motion, SM).

Una rappresentazione sintetica del fenomeno di risposta sismica locale è illustrata in Figura 7-47.

	<b>Committente:</b> Azienda Servizi Ambientali SpA	<b>Documento:</b> Relazione geotecnica
	<b>Lavoro:</b> Completamento della valorizzazione a scopo energetico del sito con integrazione dell'impianto fotovoltaico esistente mediante costituzione di una seconda unità energetica	Codice: S24028-PE-RE001-0 Data: Maggio 2024

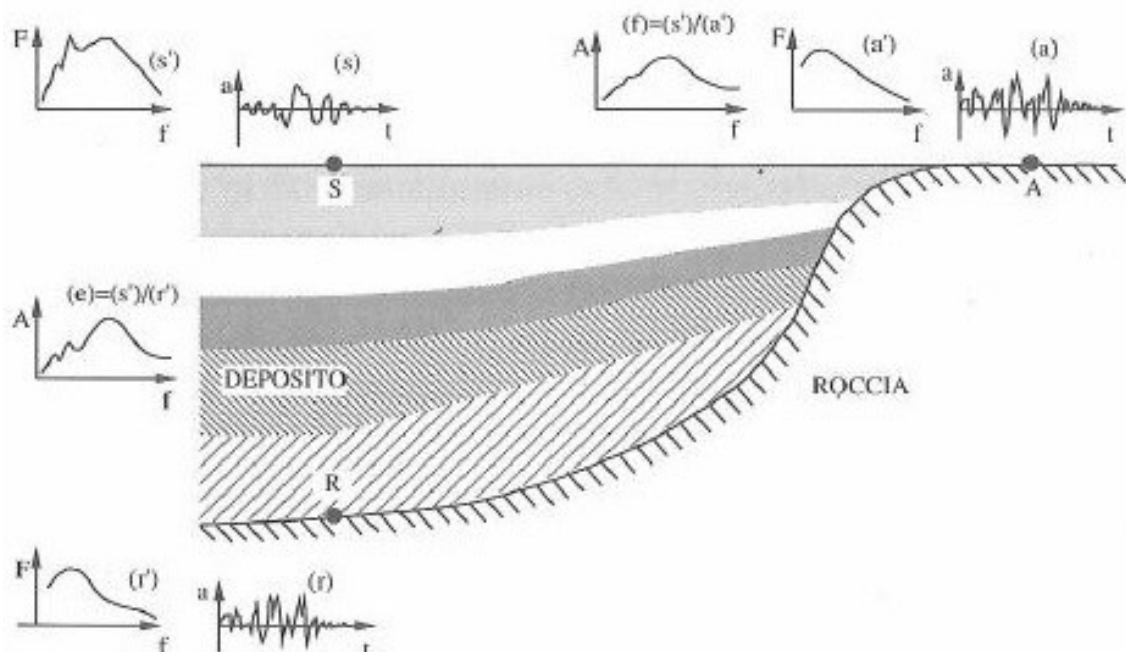

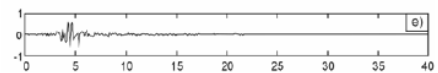
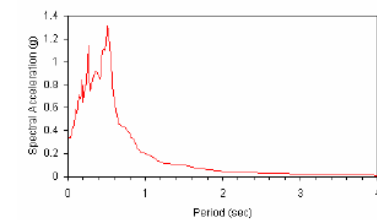


Figura 7-47. Schema di riferimento per l'analisi della risposta sismica locale.

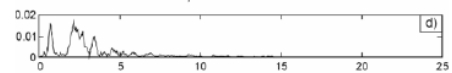
Per ciascuno dei 3 accelerogrammi di input definiti al paragrafo 7.6.1, viene determinato il relativo spettro di Fourier (attraverso la funzione trasformata di Fourier) e si determina la funzione di trasferimento del deposito sulla base di una stima iniziale di  $G$  e  $D$  valutati per bassi valori di deformazione, ed una successiva serie di analisi lineari, con aggiornamento continuo dei valori della rigidezza a taglio  $G(\gamma)$  e dello smorzamento  $D(\gamma)$  che dipendono dallo stato di deformazione del terreno, fino al soddisfacimento di un prefissato criterio di convergenza delle deformazioni.

	<b>Committente:</b> Azienda Servizi Ambientali SpA	<b>Documento:</b> Relazione geotecnica
	<b>Lavoro:</b> Completamento della valorizzazione a scopo energetico del sito con integrazione dell'impianto fotovoltaico esistente mediante costituzione di una seconda unità energetica	Codice: S24028-PE-RE001-0 Data: Maggio 2024

#### SPETTRO DI RISPOSTA IN OUTPUT



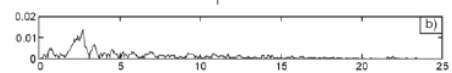
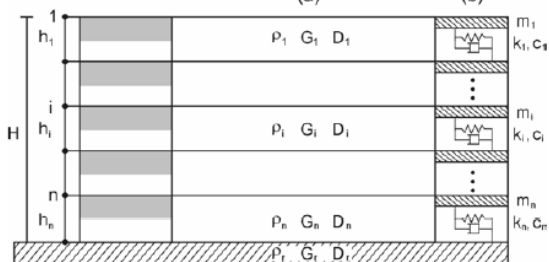
Antitrasformata di Fourier



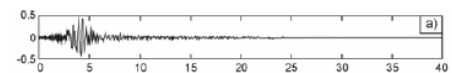
(a) (b)



Funzione di trasferimento  
relativa al contesto  
sismostratigrafico del sito  
in esame




Trasformata di Fourier



#### SPETTRO DI RISPOSTA IN INPUT

Figura 7-48: Rappresentazione schematica dell'algoritmo per l'analisi lineare equivalente 1D.

	<b>Committente:</b> Azienda Servizi Ambientali SpA	<b>Documento:</b> Relazione geotecnica
	<b>Lavoro:</b> Completamento della valorizzazione a scopo energetico del sito con integrazione dell'impianto fotovoltaico esistente mediante costituzione di una seconda unità energetica	Codice: S24028-PE-RE001-0 Data: Maggio 2024

### 7.6.2.1 Risultati analisi 1D

Oltre allo spettro di Fourier di output ed al relativo accelerogramma di output (attraverso la funzione anti trasformata di Fourier), nel caso in esame siamo interessati a ricavare l'input motion all'interfaccia bedrock-deposito o segnale deconvoluto.

Nelle Figura 7-49÷Figura 7-51 si riportano i segnali di input per l'analisi 1D relativi ad una probabilità di superamento del 10% in 1898anni e caratterizzati da una PGA pari a 0.277g e con la linea nera il corrispondente segnale di input per le analisi 2D valutato all'interfaccia bedrock-deposito collocata a -125.0m dal Piano campagna originale.

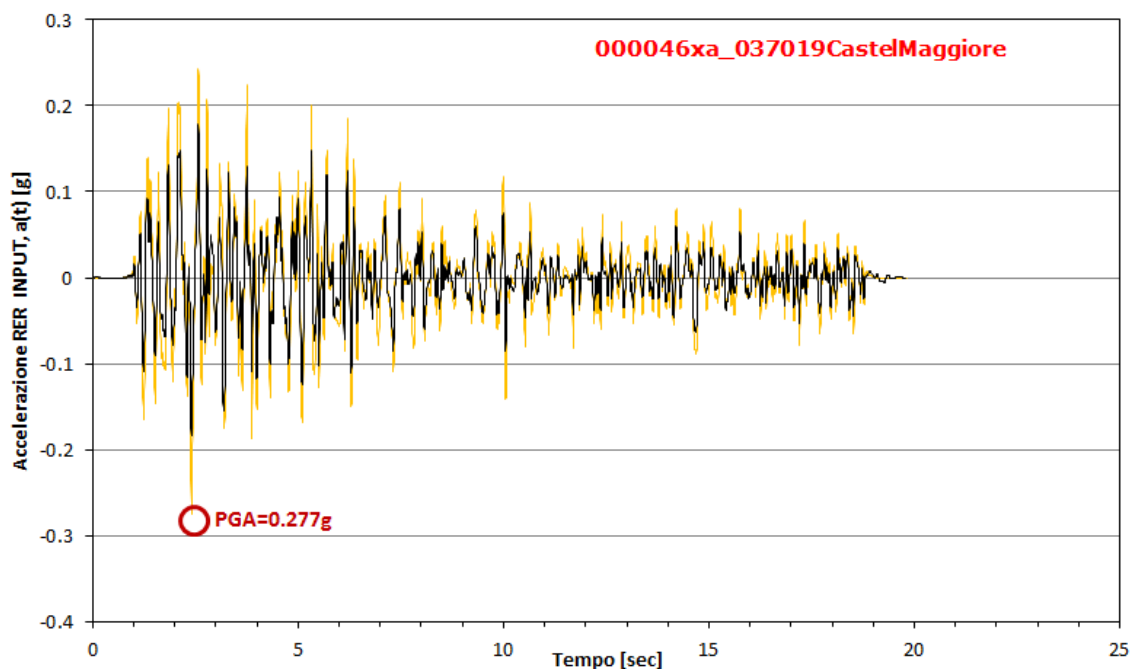



Figura 7-49: Segnale accelerometrico outcrop di progetto, segnale deconvoluto linea nera.

	<b>Committente:</b> Azienda Servizi Ambientali SpA	<b>Documento:</b> Relazione geotecnica
	<b>Lavoro:</b> Completamento della valorizzazione a scopo energetico del sito con integrazione dell'impianto fotovoltaico esistente mediante costituzione di una seconda unità energetica	Codice: S24028-PE-RE001-0 Data: Maggio 2024

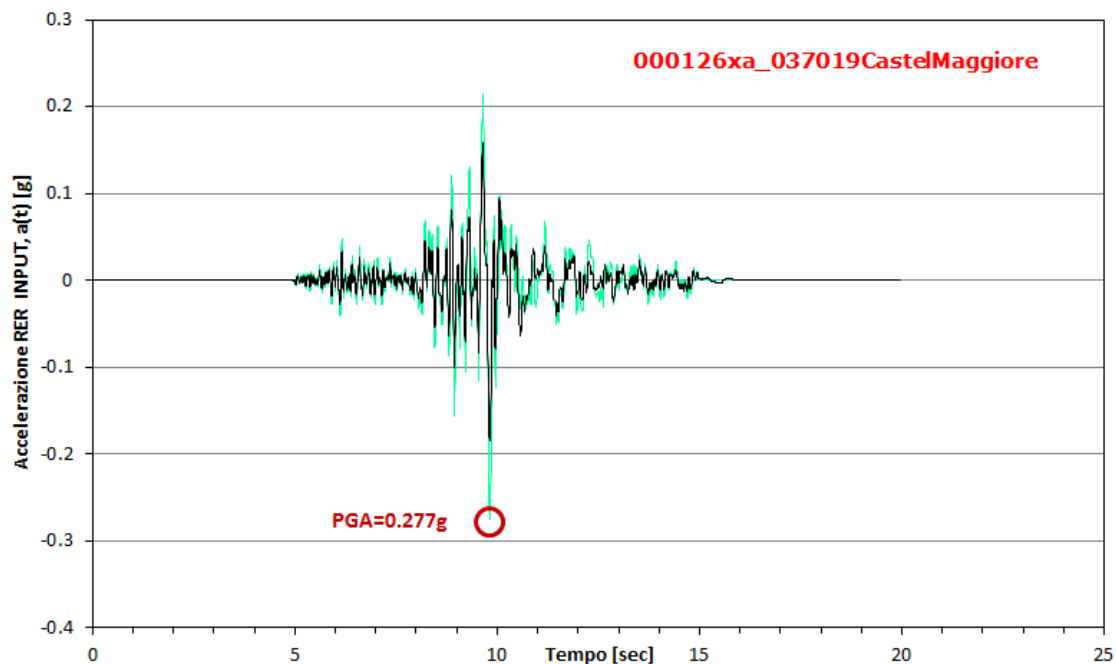


Figura 7-50: Segnale accelerometrico outcroup di progetto, segnale deconvoluto linea nera.

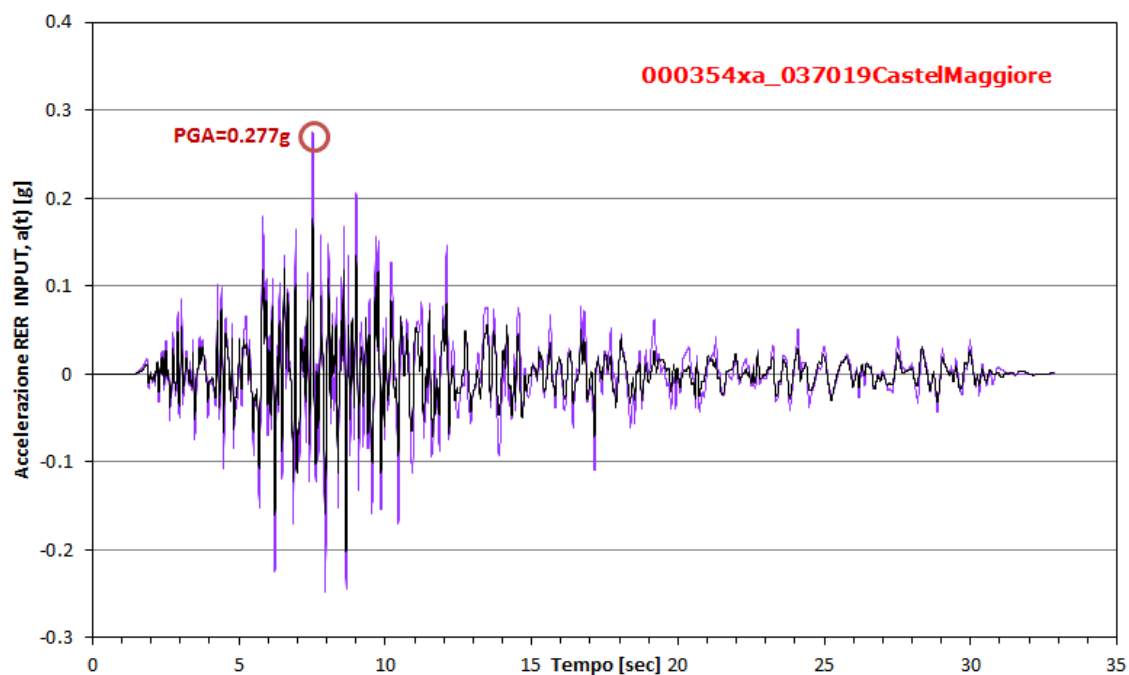



Figura 7-51: Segnale accelerometrico outcroup di progetto, segnale deconvoluto linea nera.

	<b>Committente:</b> Azienda Servizi Ambientali SpA	<b>Documento:</b> Relazione geotecnica
	<b>Lavoro:</b> Completamento della valorizzazione a scopo energetico del sito con integrazione dell'impianto fotovoltaico esistente mediante costituzione di una seconda unità energetica	Codice: S24028-PE-RE001-0 Data: Maggio 2024

In Figura 7-53 si riporta per ciascun segnale di input su roccia affiorante il relativo spettro di risposta elastico per uno smorzamento del 5% e confrontato con lo spettro output del segnale che raggiunge la superficie del deposito. Come evidenziato in Figura 7-52 dal confronto degli spettri di input e output si può osservare che il campo di amplificazione significativo si colloca fra 0.5 e 1.4s.

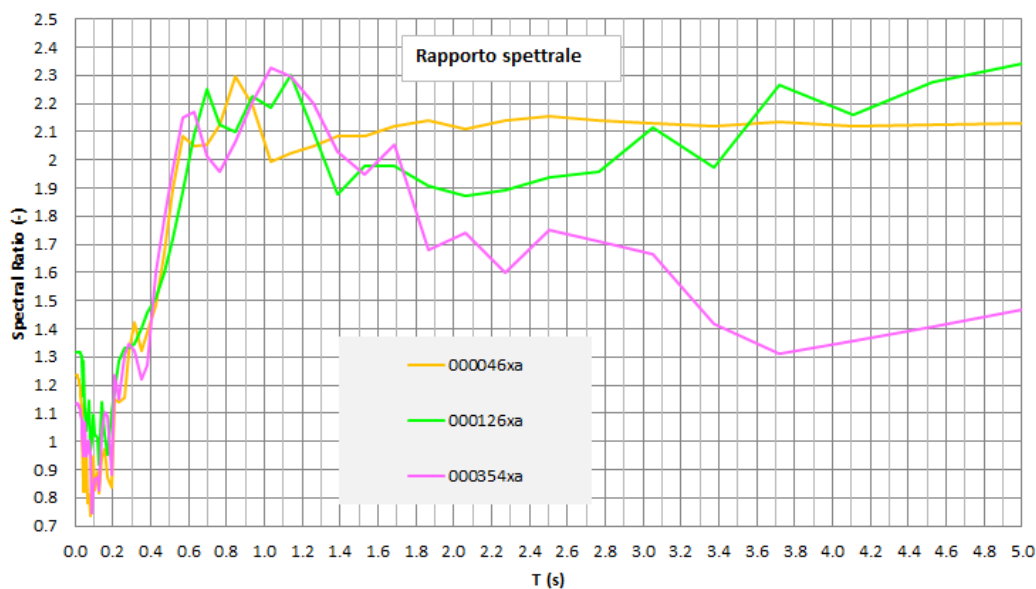
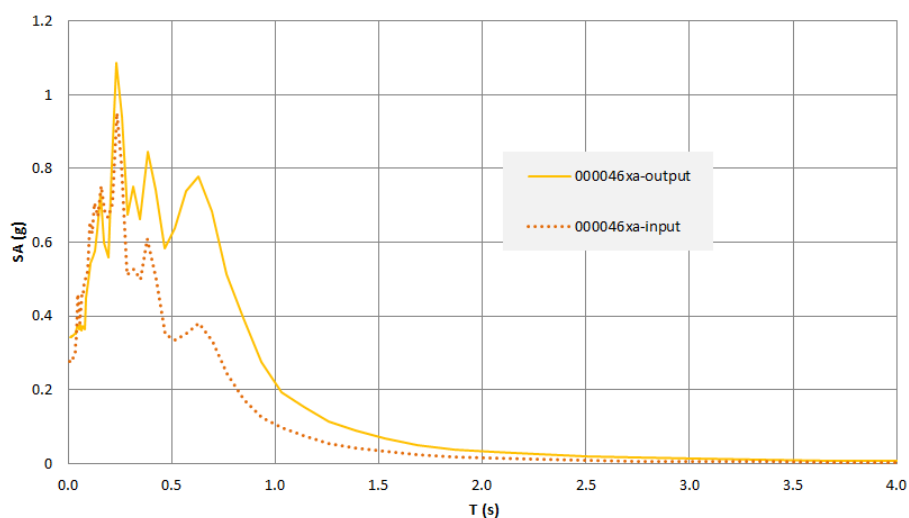



Figura 7-52: Rapporto spettrale.





	<b>Committente:</b> Azienda Servizi Ambientali SpA	<b>Documento:</b> Relazione geotecnica
	<b>Lavoro:</b> Completamento della valorizzazione a scopo energetico del sito con integrazione dell'impianto fotovoltaico esistente mediante costituzione di una seconda unità energetica	Codice: S24028-PE-RE001-0 Data: Maggio 2024

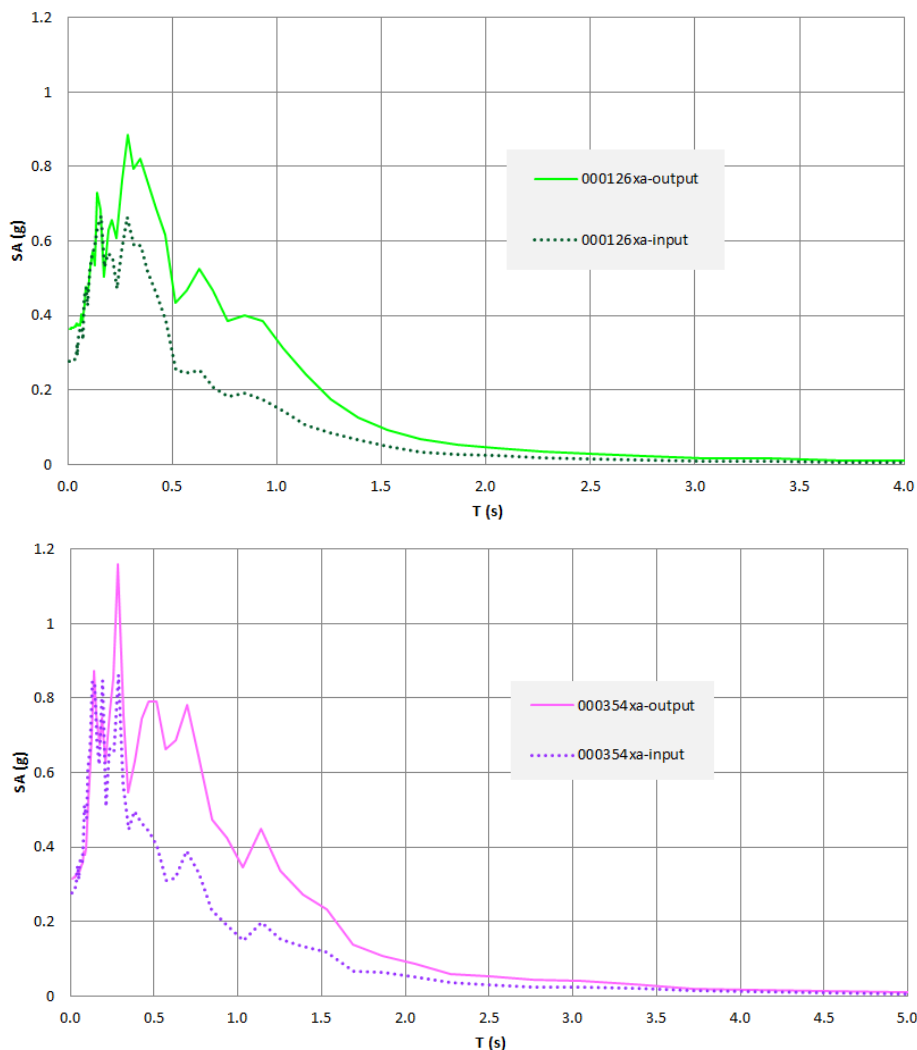



Figura 7-53: Confronto Spettri elastici D=5% su roccia affiorante ed in superficie. L'analisi RSL fornisce valori del fattore di amplificazione della PGA compresi tra 1.14 e 1.24, solo leggermente inferiori a quello ricavabile dalle NTC2018 (FA=1.298), a testimoniare che le indicazioni normative colgono bene le caratteristiche di amplificazione del sito.

		Suolo Tipo A	Suolo Tipo C			
		NTC 2008				
Input motion ID	Duration (sec)	PGA (g)	PGA (g)	FA	PGA (g)	FA
000046xa_037019CastelMaggiore	19.810	0.277	0.359	1.298	0.342	1.24
000126xa_037019CastelMaggiore	19.985	0.277	0.359	1.298	0.364	1.31
000354xa_037019CastelMaggiore	32.875	0.277	0.359	1.298	0.314	1.14

Figura 7-54: Fattore di amplificazione della PGA.

	<b>Committente:</b> Azienda Servizi Ambientali SpA	<b>Documento:</b> Relazione geotecnica
	<b>Lavoro:</b> Completamento della valorizzazione a scopo energetico del sito con integrazione dell'impianto fotovoltaico esistente mediante costituzione di una seconda unità energetica	Codice: S24028-PE-RE001-0 Data: Maggio 2024

In Figura 7-55 gli spettri del segnale alla superficie del deposito vengono confrontati con l'analogo spettro NTC2008 (curva rossa tratteggiata) relativo ad un suolo C, Vita Utile 100 anni, Classe d'uso 2, coefficiente di amplificazione stratigrafica e topografica pari rispettivamente a  $S_S=1.298$  e  $S_T=1.0$ . Si evince un ottimo accordo con lo spettro di norma almeno nel tratto dei periodi più significativi ( $T < 1.0$ sec), oltre nel campo dei periodi alti la risposta sismica locale prevede accelerazioni spettrali più basse risultando quindi meno onerosa per strutture maggiormente deformabili.

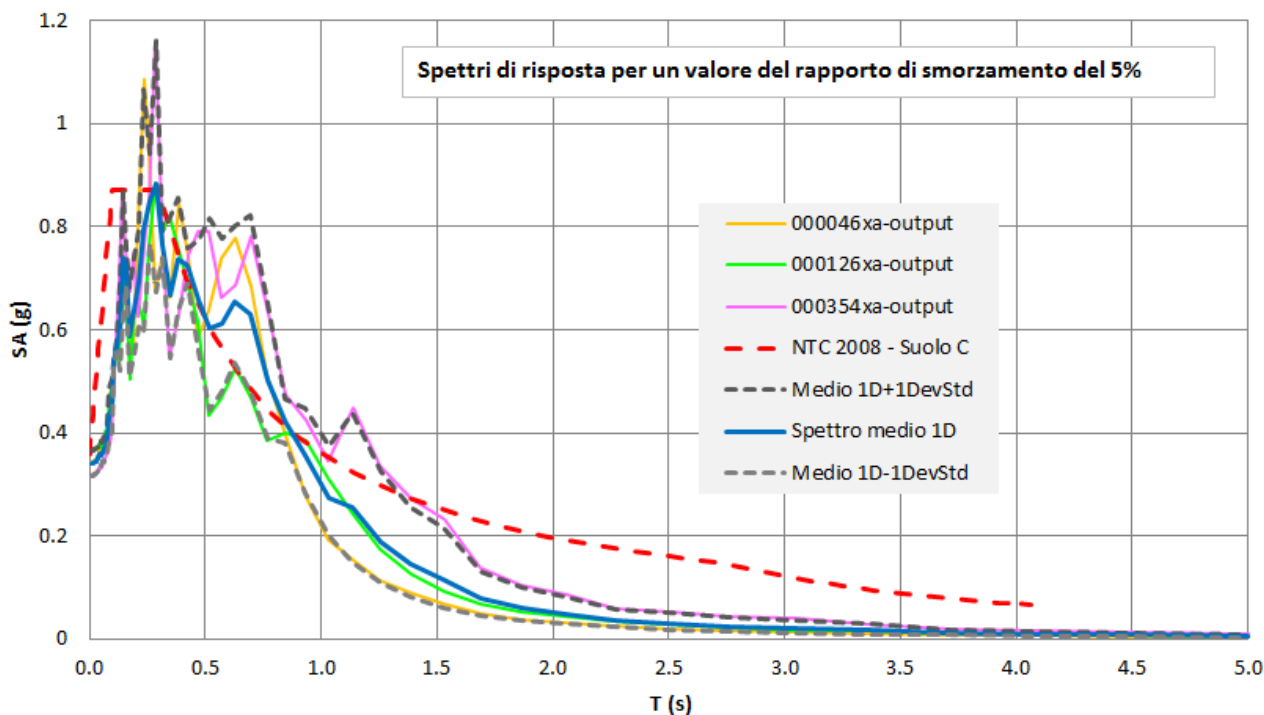



Figura 7-55: Spettro di risposta in superficie secondo Analisi 1D e NTC2008.

Nella Figura 7-56 si mostra la funzione di trasferimento per i 3 segnali adottati nelle analisi, emerge che il contenuto in frequenza prossimo ad 1 Hz è quello soggetto alla maggiore amplificazione e risulta in linea con il comportamento della pianura emiliana così come confermato anche dall'analisi degli spettri di Fourier in Figura 7-57 e Figura 7-58.

	<b>Committente:</b> Azienda Servizi Ambientali SpA	<b>Documento:</b> Relazione geotecnica
	<b>Lavoro:</b> Completamento della valorizzazione a scopo energetico del sito con integrazione dell'impianto fotovoltaico esistente mediante costituzione di una seconda unità energetica	Codice: S24028-PE-RE001-0 Data: Maggio 2024

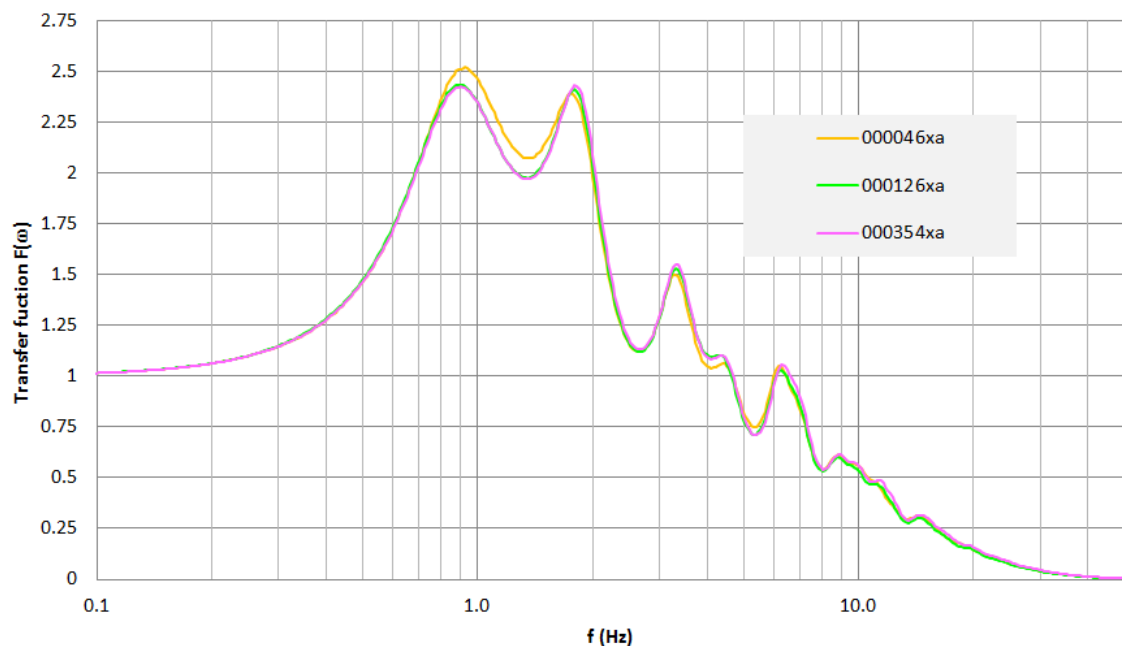


Figura 7-56: Funzione di trasferimento per i 3 segnali di input.

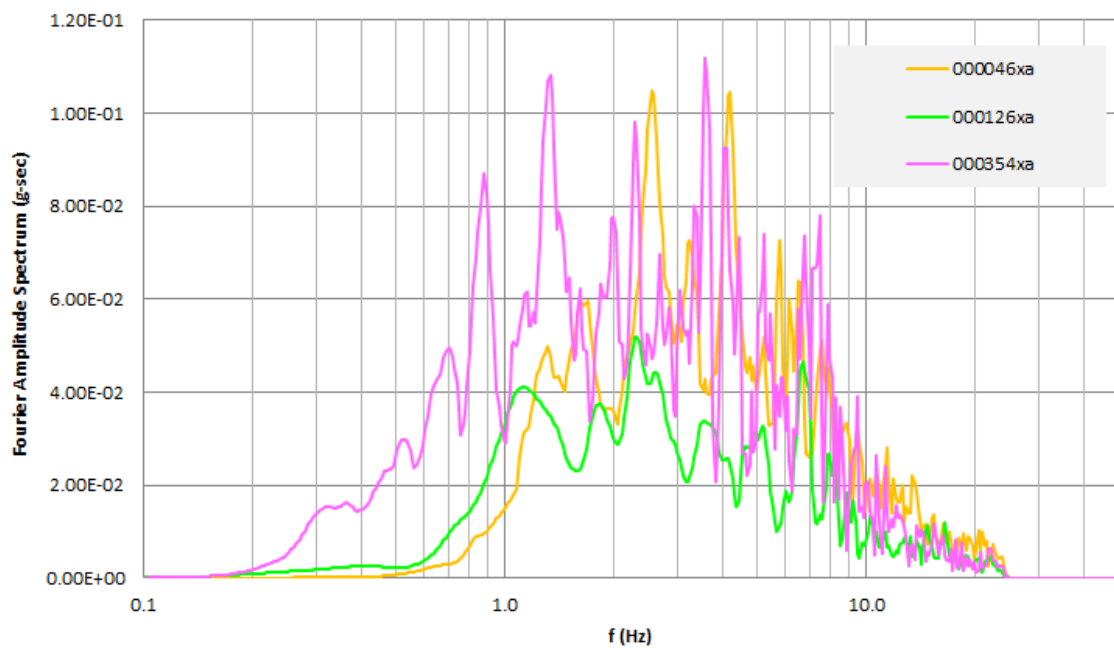



Figura 7-57: Spettro di Fourier per i 3 segnali di input.

	<b>Committente:</b> Azienda Servizi Ambientali SpA	<b>Documento:</b> Relazione geotecnica
	<b>Lavoro:</b> Completamento della valorizzazione a scopo energetico del sito con integrazione dell'impianto fotovoltaico esistente mediante costituzione di una seconda unità energetica	Codice: S24028-PE-RE001-0 Data: Maggio 2024

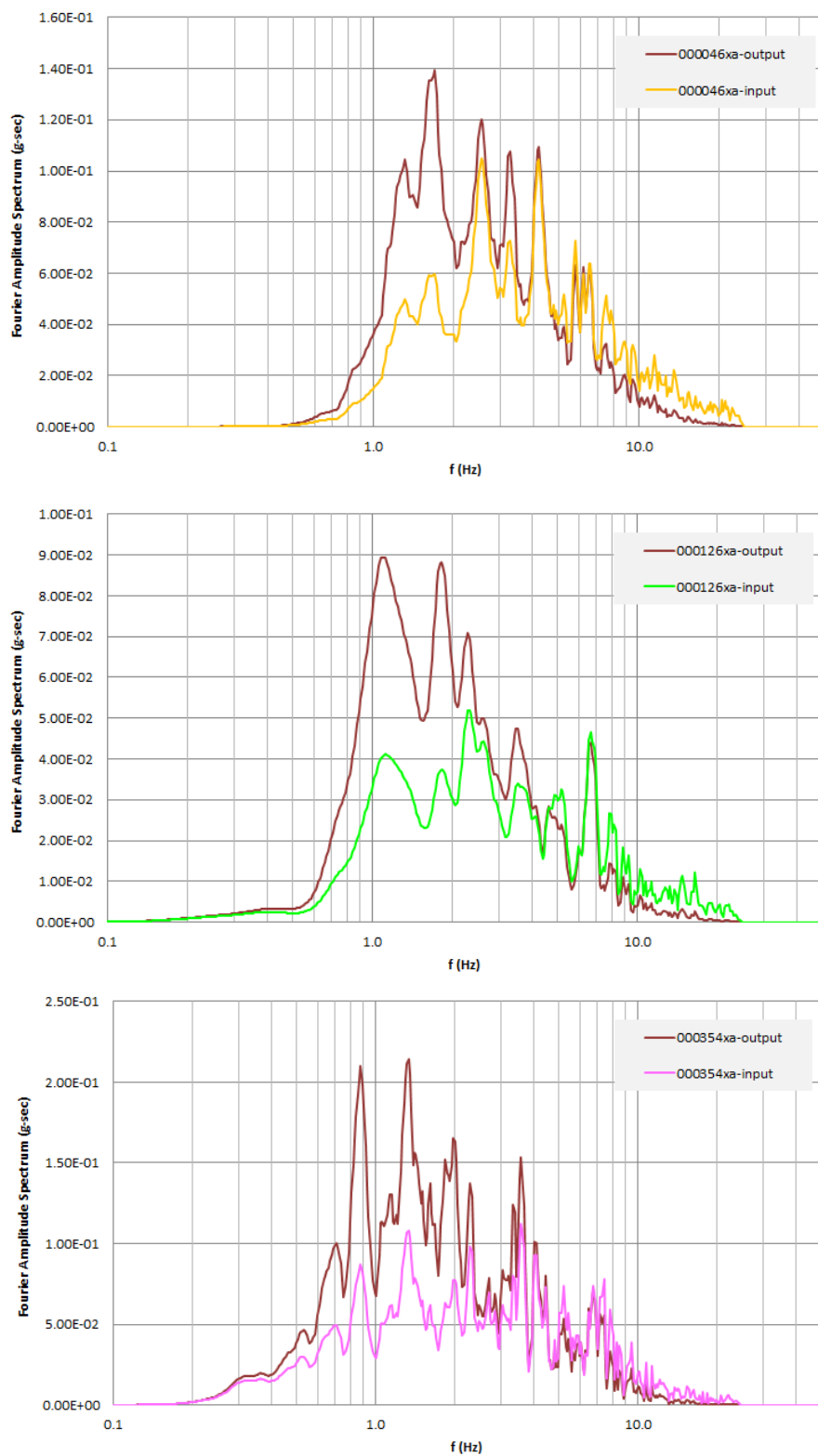



Figura 7-58: Confronto Spettro di Fourier per i 3 segnali in input e output.

	<b>Committente:</b> Azienda Servizi Ambientali SpA	<b>Documento:</b> Relazione geotecnica
	<b>Lavoro:</b> Completamento della valorizzazione a scopo energetico del sito con integrazione dell'impianto fotovoltaico esistente mediante costituzione di una seconda unità energetica	Codice: S24028-PE-RE001-0 Data: Maggio 2024

### 7.6.3 Definizione dei parametri geotecnici-sismici per l'analisi dinamica 2D

Il modello numerico 2D comprende oltre al terreno naturale anche il corpo della discarica e la sua porzione interrata di seguito denominata Ipogeo. Nella figura seguente se ne mostra la geometria, il bedrock sismico è stato assunto a -125.0m al di sotto del piano campagna naturale.

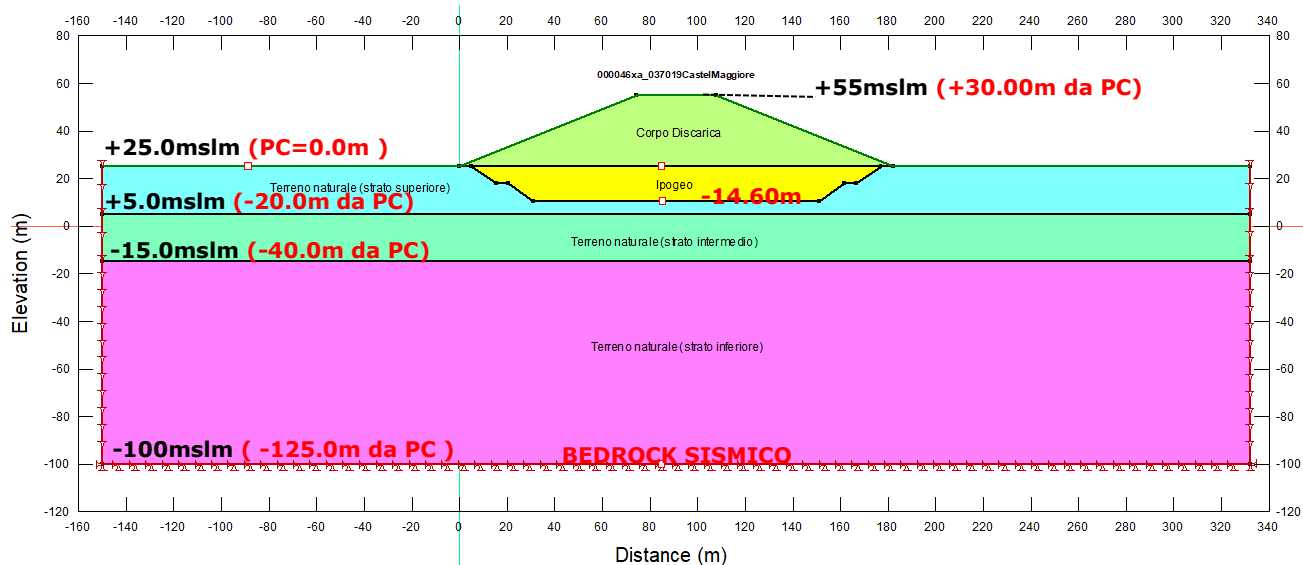



Figura 7-59: Identificazione materiali adottati nel modello.

La caratterizzazione geotecnica sismica del terreno naturale è stata effettuata utilizzando le informazioni ricavate dalle indagini sismiche in sito previste in progetto. Per quanto riguarda la caratterizzazione sismica dei rifiuti si sono utilizzati i risultati ottenuti da indagini eseguite da Enser. Per tenere in conto la dipendenza del comportamento non lineare dei terreni sono state utilizzate le curve proposte da Vucetic e Dobry.

Materiale	$\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	$V_s$ (m/s)	Curva di decadimento $G/G_0$	Rapporto di Smorzamento $D$ [%]
Corpo discarica	16	200	Secondo Dobry & Vucetic, IP=10%	Secondo Dobry & Vucetic, IP=10%
Ipogeo	16	200		Secondo Dobry & Vucetic, IP=10%
Terreno naturale (strato superiore - da 0.0m a -20.0m)	19	210	Secondo Dobry & Vucetic, IP=20%	Secondo Dobry & Vucetic, IP=20%
Terreno naturale (strato intermedio - da -20.0m a -40.0m)	19	300		
Terreno naturale (strato inferiore - da -40.0m a -125.0m)	19	500		

L'analisi dinamica 2D è stata condotta mediante una modellazione agli elementi finiti con il codice di calcolo QUAKE/W operante nel dominio del tempo adottando per il terreno un modello costitutivo lineare equivalente.

La procedura di calcolo basata su un tale modello costitutivo mantiene costanti le proprietà del terreno durante un intero ciclo di calcolo lungo l'accelerogramma al fine

	<b>Committente:</b> Azienda Servizi Ambientali SpA	<b>Documento:</b> Relazione geotecnica
	<b>Lavoro:</b> Completamento della valorizzazione a scopo energetico del sito con integrazione dell'impianto fotovoltaico esistente mediante costituzione di una seconda unità energetica	Codice: S24028-PE-RE001-0 Data: Maggio 2024

di stimare la deformazione a taglio di picco  $\gamma_{\max}$  per quel ciclo, negli step di calcolo successivi iterativamente il modulo di rigidezza  $G$  e lo smorzamento  $D$  vengono aggiornati in base al valore corrente di  $\gamma_{\max}$  finché la differenza nel risultato finale tra 2 cicli successivi di calcolo non differisce di una quantità inferiore alla tolleranza specificata.

Al fine di tarare il modello numerico in termini di estensione e dimensioni della mesh, è stato effettuato un confronto con i risultati dell'analisi 1D di cui al paragrafo precedente, attraverso un modello preliminare Free-Field che riproduce la situazione ante operam: corpo discarica assente ed ipogeo avente le stesse caratteristiche del terreno naturale (strato superiore); la geometria è riportata in Figura 7-60.

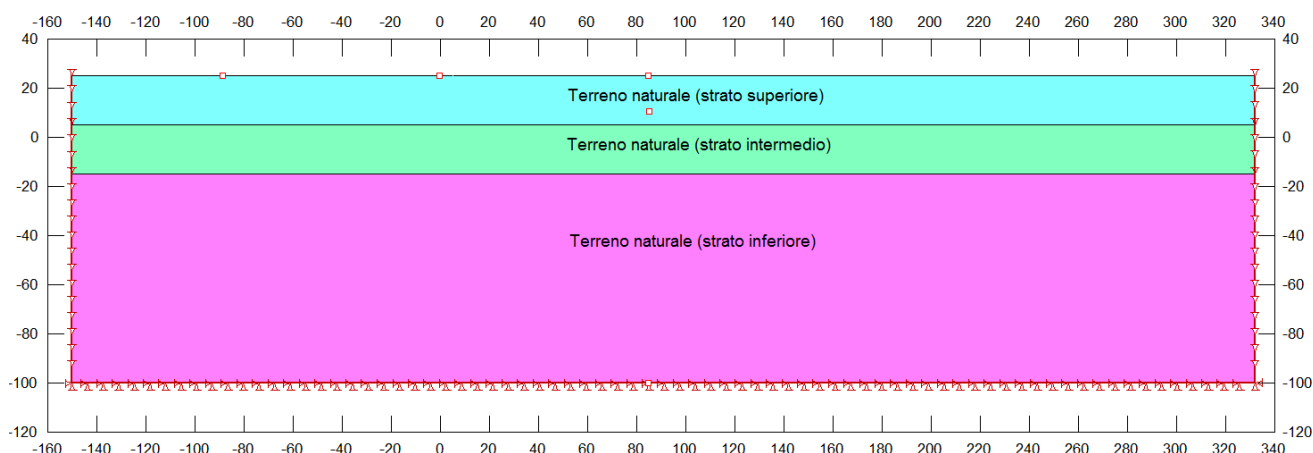



Figura 7-60: Geometria modello analisi 2D Free-Field.

Nella figura seguente a titolo esemplificativo vengono confrontati i profili dell'accelerazione massima con la profondità ricavati dall'analisi 1D (Risposta sismica locale) e con l'analisi 2D Free-Field (corpo discarica assente) e completo del corpo discarica e dell'ipogeo facendo riferimento al segnale 000046xa.

 <b>enser</b>	<b>Committente:</b> Azienda Servizi Ambientali SpA	<b>Documento:</b> Relazione geotecnica
	<b>Lavoro:</b> Completamento della valorizzazione a scopo energetico del sito con integrazione dell'impianto fotovoltaico esistente mediante costituzione di una seconda unità energetica	<b>Codice:</b> S24028-PE-RE001-0 <b>Data:</b> Maggio 2024

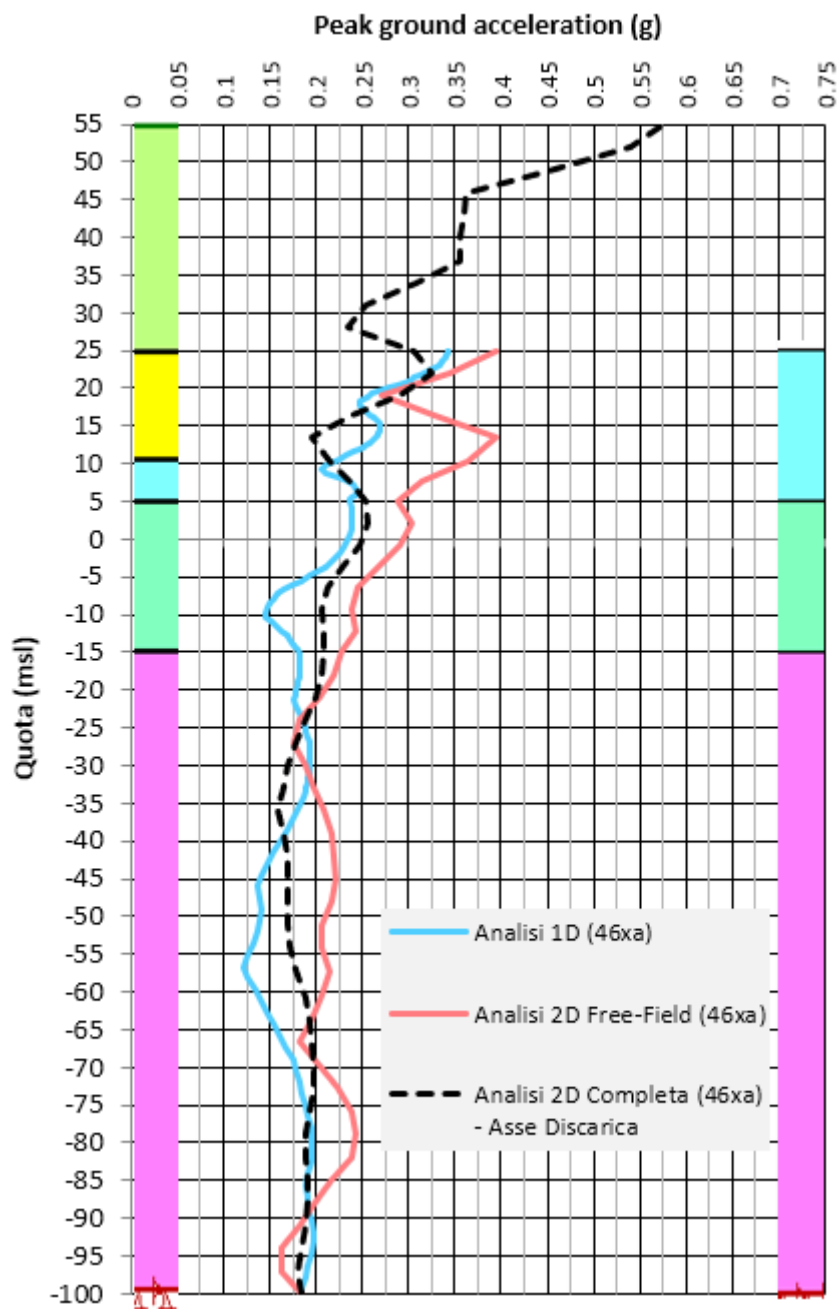



Figura 7-61: Andamento della PGA con la profondità.

Nella seguente Figura 7-62 si riporta la mappa di colori relativa all'involuppo delle accelerazioni sul dominio analizzato del terreno naturale, dell'ipogeo e della discarica, si osserva l'effetto di focalizzazione ai bordi del corpo discarica dove per l'appunto si attingono i massimi valori (in cresta si raggiungono 0.55g, sulle sponde 0.35g), i valori puntuali massimi sono pertanto circa 1.5 volte più grandi della PGA di normativa



	<b>Committente:</b> Azienda Servizi Ambientali SpA	<b>Documento:</b> Relazione geotecnica
	<b>Lavoro:</b> Completamento della valorizzazione a scopo energetico del sito con integrazione dell'impianto fotovoltaico esistente mediante costituzione di una seconda unità energetica	Codice: S24028-PE-RE001-0 Data: Maggio 2024

in superficie  $a_{max}=0.359g$  e circa 5 volte più grandi dell'accelerazione media di calcolo prevista dalla normativa  $a_g=K_h=0.10g$  ma evidentemente quelli rappresentati sono i massimi valori attinti nel corso della time history ed oltre a non essere contemporanei in segno e modulo hanno un tempo di persistenza inferiore a 0.005sec.

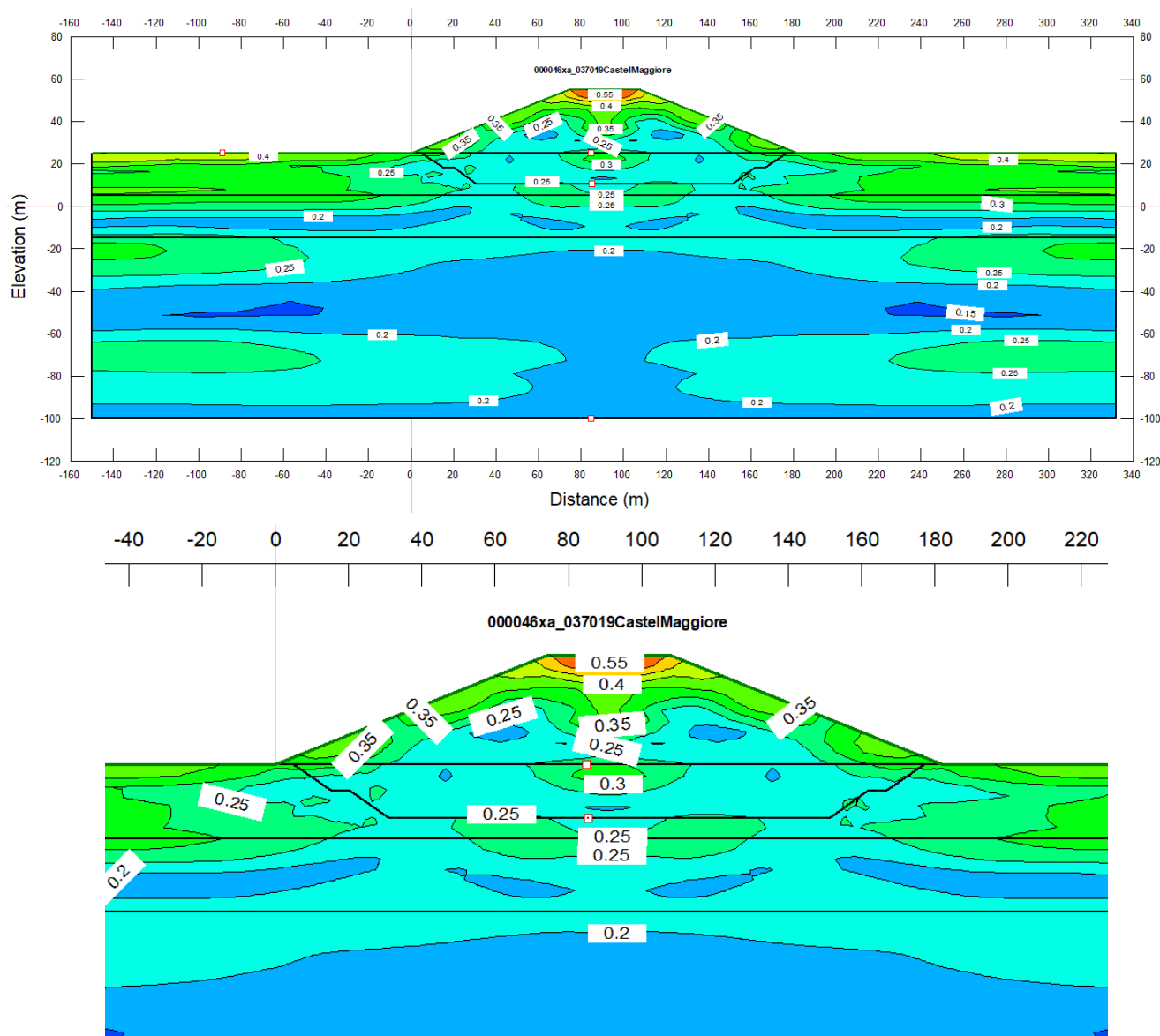



Figura 7-62: Peak Ground Acceleration Contour Map (g)-000046ax.

Nella Figura 7-63 si riporta la configurazione deformata al termine del sisma, nelle successive le mappe di colori degli spostamenti orizzontali e verticali, si evince che l'ordine di grandezza degli spostamenti è il millimetro:

	<b>Committente:</b> Azienda Servizi Ambientali SpA	<b>Documento:</b> Relazione geotecnica
	<b>Lavoro:</b> Completamento della valorizzazione a scopo energetico del sito con integrazione dell'impianto fotovoltaico esistente mediante costituzione di una seconda unità energetica	Codice: S24028-PE-RE001-0 Data: Maggio 2024

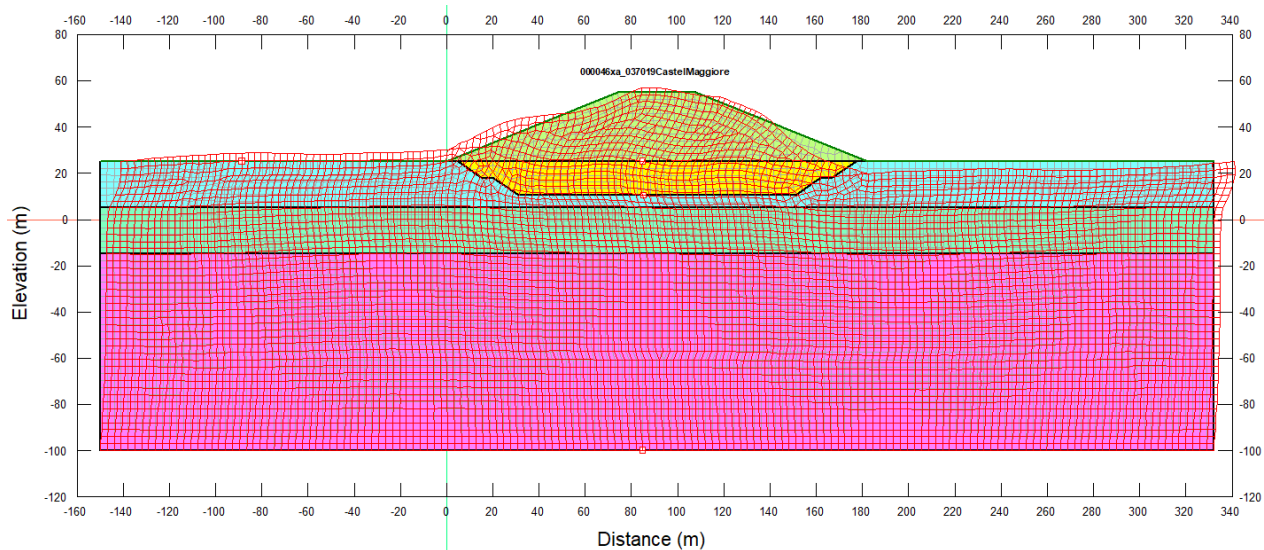


Figura 7-63: Sistema deformato alla fine dello shock sismico-000046ax.

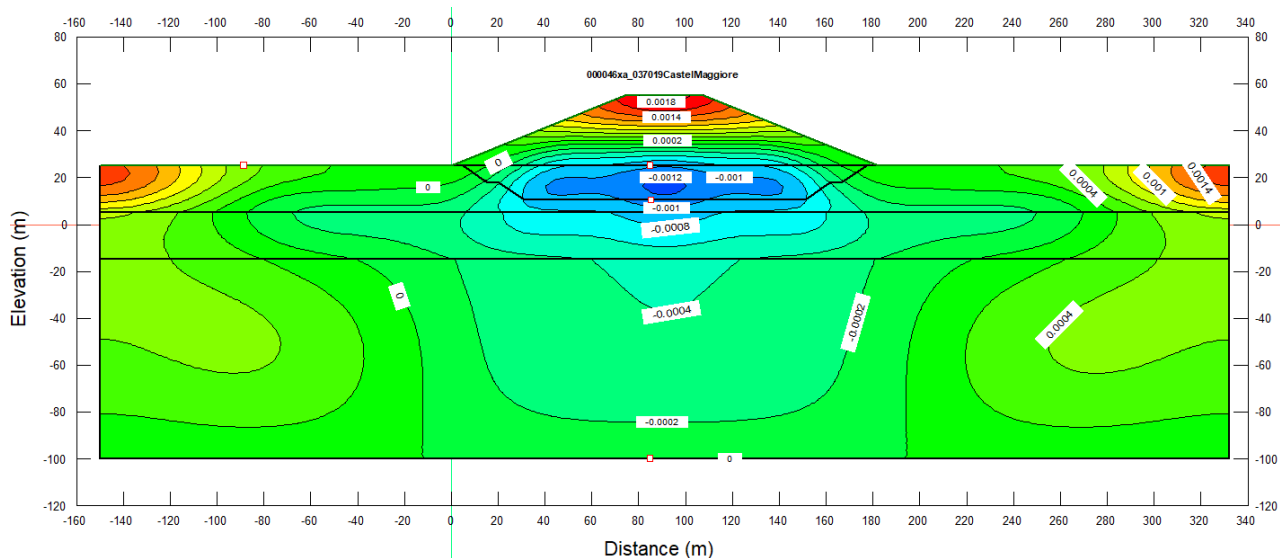



Figura 7-64: Mappa degli spostamenti orizzontali alla fine dello shock sismico-000046ax.

	<b>Committente:</b> Azienda Servizi Ambientali SpA	<b>Documento:</b> Relazione geotecnica
	<b>Lavoro:</b> Completamento della valorizzazione a scopo energetico del sito con integrazione dell'impianto fotovoltaico esistente mediante costituzione di una seconda unità energetica	Codice: S24028-PE-RE001-0 Data: Maggio 2024

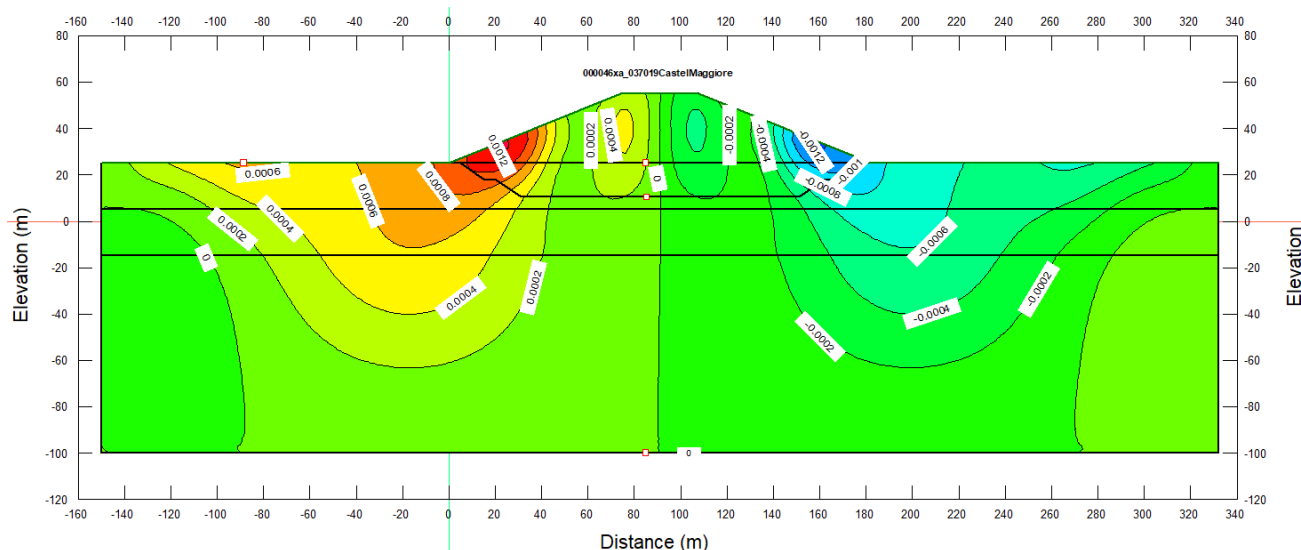



Figura 7-65: Mappa degli spostamenti verticali alla fine dello shock sismico-000046ax.

#### 7.6.4 Analisi dinamica 2D di stabilità

Al paragrafo 7.4 e 7.5 sono stati esposti i risultati relativi all'analisi di stabilità in condizioni sismiche condotta impiegando il metodo pseudostatico il quale secondo quanto riportato al par. 7.11.3.5.2 del D.M. 14/01/2008 prevede che : *".. l'azione sismica è rappresentata da un'azione statica equivalente, costante nello spazio e nel tempo, proporzionale al peso in volume  $W$  del volume del terreno potenzialmente instabile. Tale forza dipende dalle caratteristiche del moto sismico atteso nel volume di terreno potenzialmente instabile e dalla capacità di tale volume di subire spostamenti senza significative riduzioni di resistenza"*.

Di seguito si esporranno invece i risultati dell'analisi di stabilità in condizioni sismiche condotta impiegando il cosiddetto "metodo degli spostamenti" così come previsto al par. 7.11.3.5.2 del D.M. 14/01/2008 *"la massa di terreno potenzialmente in frana viene assimilata ad un corpo rigido che può muoversi rispetto al terreno stabile lungo una superficie di scorrimento. Il metodo permette la valutazione dello spostamento permanente indotto dal sisma nella massa di terreno potenzialmente instabile. Nel metodo degli spostamenti, la valutazione delle condizioni di stabilità del pendio è effettuata mediante il confronto tra lo spostamento calcolato per il cinematismo di collasso critico e valori limite o di soglia dello spostamento. La scelta dei valori limite di spostamento nei riguardi di condizioni di stato limite ultimo o di servizio deve essere effettuata e motivata dal progettista."*

L'ammissibilità delle deformazioni permanenti calcolate verrà valutata con riferimento ai valori limite di riferimento suggeriti dall' Alaska Geotechnical Evaluation Criteria Committee presieduto da Idriss (1985) e riportati in Figura 7-66.

	<b>Committente:</b> Azienda Servizi Ambientali SpA	<b>Documento:</b> Relazione geotecnica
	<b>Lavoro:</b> Completamento della valorizzazione a scopo energetico del sito con integrazione dell'impianto fotovoltaico esistente mediante costituzione di una seconda unità energetica	Codice: S24028-PE-RE001-0 Data: Maggio 2024

	livello di danno	spostamento (cm)
V	irrelevante	< 3
IV	modesto	15
III	moderato	30
II	elevato	90
I	catastrofico	300

Figura 7-66: Livello di danno post sismico atteso vs spostamento atteso (Idriss, 1985).

L'analisi con il metodo degli spostamenti o metodo del blocco rigido di Newmark consiste nello stimare la deformazione permanente che può insorgere lungo una superficie di scivolamento per effetto delle forze d'inerzia associate ad un terremoto; essa si fonda sul concetto che durante un terremoto ci possono essere istanti o lassi di tempo in cui le forze d'inerzia insieme alle forze statiche preesistenti al sisma superano la resistenza al taglio disponibile cioè in altre parole possono esserci istanti in cui  $FS < 1$  e si verifica una temporanea perdita di stabilità che si traduce in un accumulo di deformazioni non recuperabili (per questo detto permanenti); le suddette deformazioni permanenti rimangono anche quando lo shock sismico è terminato.


L'obiettivo dell'analisi è quello di determinare quante volte e per quanto tempo succede che il fattore di sicurezza sia inferiore all'unità ( $FS < 1.0$ ) e contemporaneamente valutare l'entità delle deformazioni accumulate contestualmente alla momentanea perdita di stabilità.

Allo scopo sono stati impiegati in combinazione i codici di calcolo QUAKE e SLOPE; il primo ha la funzione di valutare le forze d'inerzia agenti all'interno del volume in scivolamento, per ciascuna superficie di scivolamento da analizzare, il secondo ha la funzione di valutare il fattore di sicurezza nei confronti della stabilità tenendo conto contemporaneamente delle forze statiche e dinamiche.

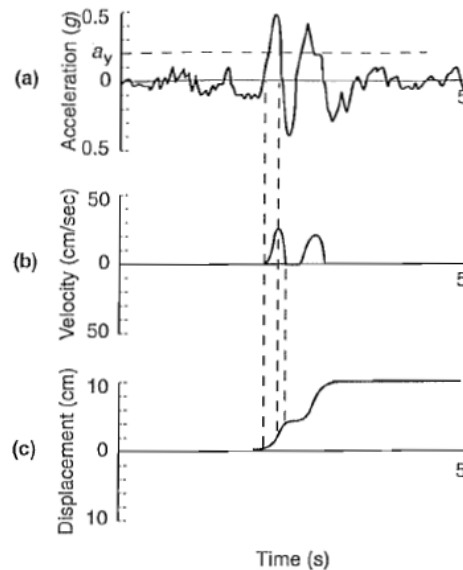
Per ciascun meccanismo di collasso o volume in scivolamento e per ciascun istante dell'accelerogramma di input è possibile determinare:

- un'accelerazione media **avgAcc** espressa in g come il rapporto della risultante delle forze d'inerzia e del volume in scivolamento stesso;
- un fattore di sicurezza **FS** nei confronti della stabilità.

I dati relativi ai vari istanti dell'accelerogramma possono essere plottati sullo stesso grafico al fine di individuare quel valore dell'accelerazione cui compete  $FS=1$ , suddetto valore è denominato accelerazione critica  $a_y$ , esprimendo  $a_y$  in g si ottiene facilmente un minorante del coefficiente sismico equivalente  $K_h$  per il quale un'analisi pseudostatica condurrebbe a ritenere il pendio instabile.

	<b>Committente:</b> Azienda Servizi Ambientali SpA	<b>Documento:</b> Relazione geotecnica
	<b>Lavoro:</b> Completamento della valorizzazione a scopo energetico del sito con integrazione dell'impianto fotovoltaico esistente mediante costituzione di una seconda unità energetica	Codice: S24028-PE-RE001-0 Data: Maggio 2024

Mediante doppia integrazione dell'area della curva accelerazione media vs tempo dove l'accelerazione è maggiore dell'accelerazione critica  $a_y$  si ottiene la deformazione permanente da confrontare con il valore limite espresso in Figura 7-66:



#### 7.6.4.1 Risultati 000046xa\_037019CastelMaggiore

In Figura 7-67 vengono riportate le superfici di scivolamento esaminate per la determinazione delle deformazioni permanenti.

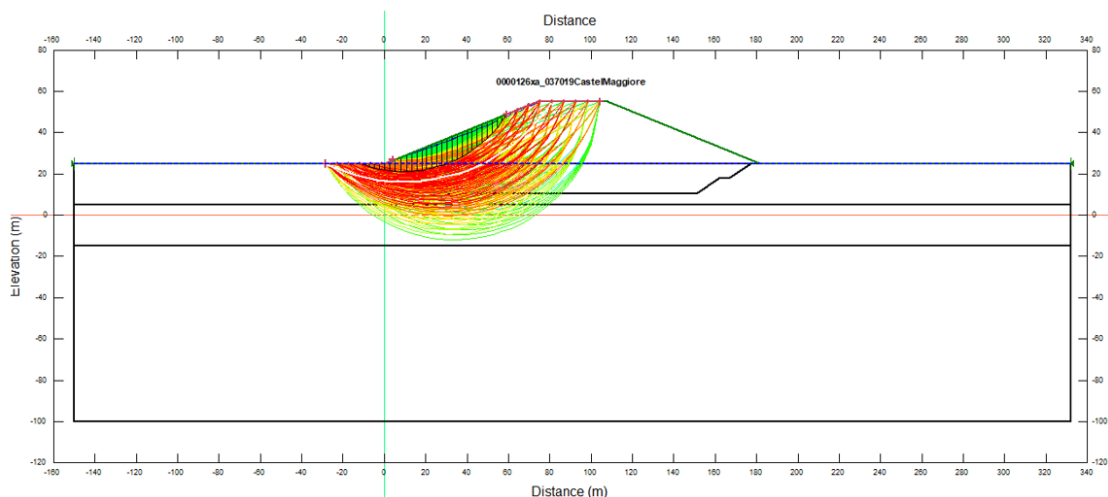



Figura 7-67: Slip surface esaminate.

In Figura 7-68 e Figura 7-69 si riporta rispettivamente l'andamento nel tempo dell'accelerazione media **avgAcc** e l'andamento nel tempo del fattore di sicurezza **FS** per le 6 superfici di scivolamento (meccanismi di collasso) selezionate tra le 315 analizzate nei 3963 tempi dell'accelerogramma (durata=19.81sec con campionamento ogni 0.005sec) per le quali risultano deformazioni permanenti non nulle.

	<b>Committente:</b> Azienda Servizi Ambientali SpA	<b>Documento:</b> Relazione geotecnica
	<b>Lavoro:</b> Completamento della valorizzazione a scopo energetico del sito con integrazione dell'impianto fotovoltaico esistente mediante costituzione di una seconda unità energetica	Codice: S24028-PE-RE001-0 Data: Maggio 2024

In Figura 7-70 si riporta per le medesime superfici di scivolamento la valutazione dell'accelerazione critica,

Accelerazione critica (m/sec<sup>2</sup>)

Slip #3	Slip #48	Slip #93	Slip #138	Slip #143	Slip #188
0.184	0.190	0.195	0.202	0.195	0.209

In Figura 7-71 si riporta il calcolo della deformazione permanente,

**Deformazione permanente accumulata (m)**

Slip #3	Slip #48	Slip #93	Slip #138	Slip #143	Slip #188
0.00434	0.00395	0.00338	0.00265	0.00189	0.00055

si osserva che essa è sempre inferiore a 3cm cui corrisponde secondo la tabella di Idriss (vd Figura 7-66) dei valori soglia di riferimento un livello di danno "irrilevante" e pertanto la verifica è soddisfatta.

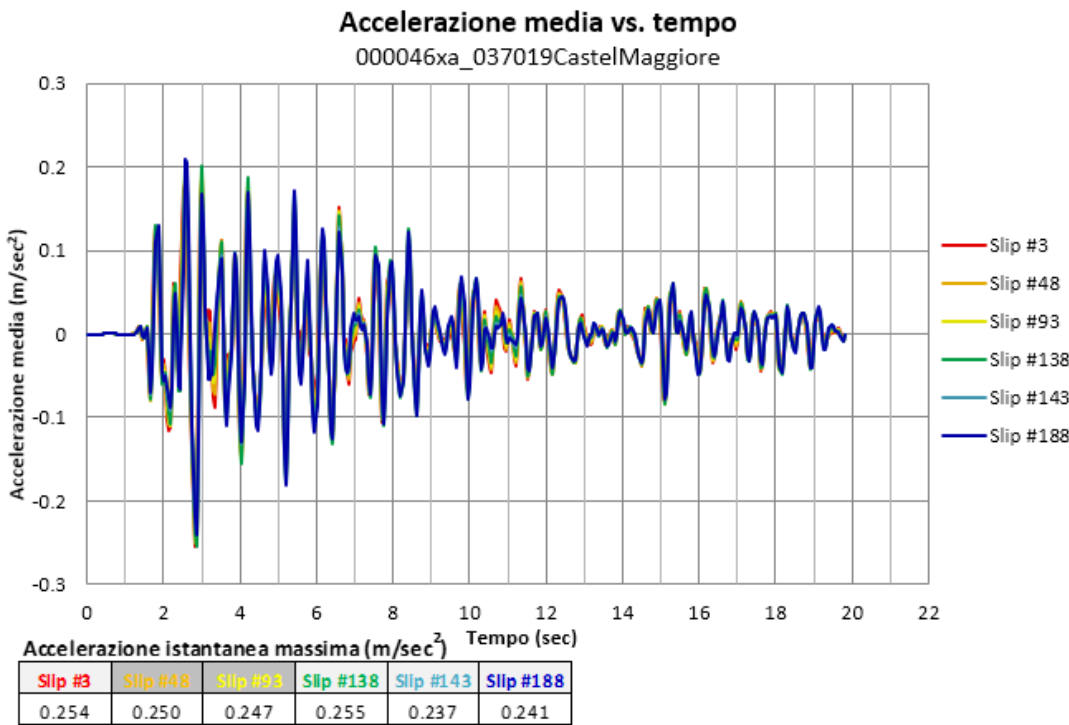

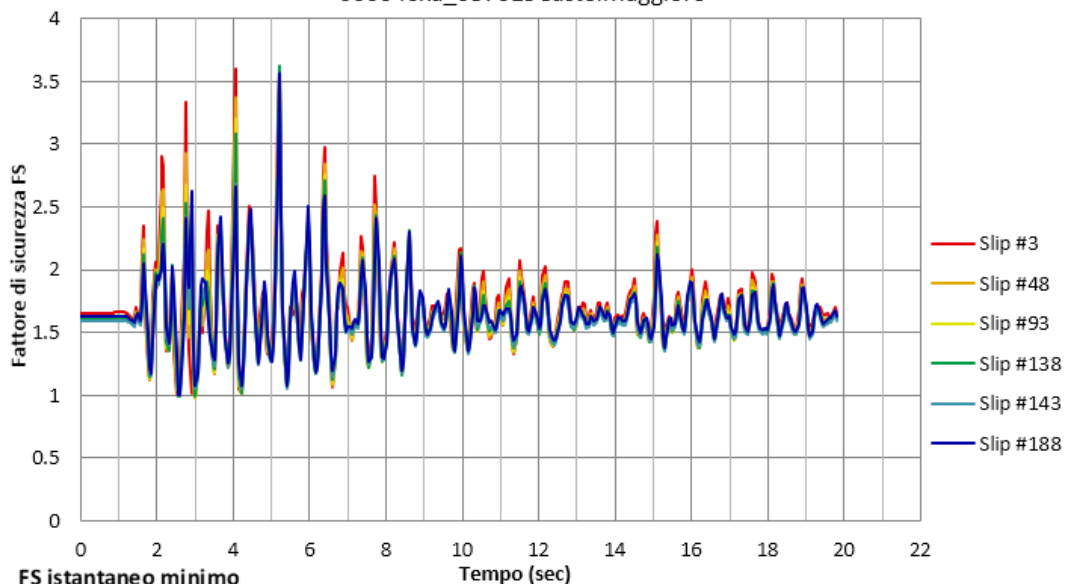


Figura 7-68: Andamento dell'accelerazione media durante lo shock sismico 000046xa.

	<b>Committente:</b> Azienda Servizi Ambientali SpA	<b>Documento:</b> Relazione geotecnica
	<b>Lavoro:</b> Completamento della valorizzazione a scopo energetico del sito con integrazione dell'impianto fotovoltaico esistente mediante costituzione di una seconda unità energetica	Codice: S24028-PE-RE001-0 Data: Maggio 2024

### Fattore di sicurezza vs. tempo

000046xa\_037019CastelMaggiore



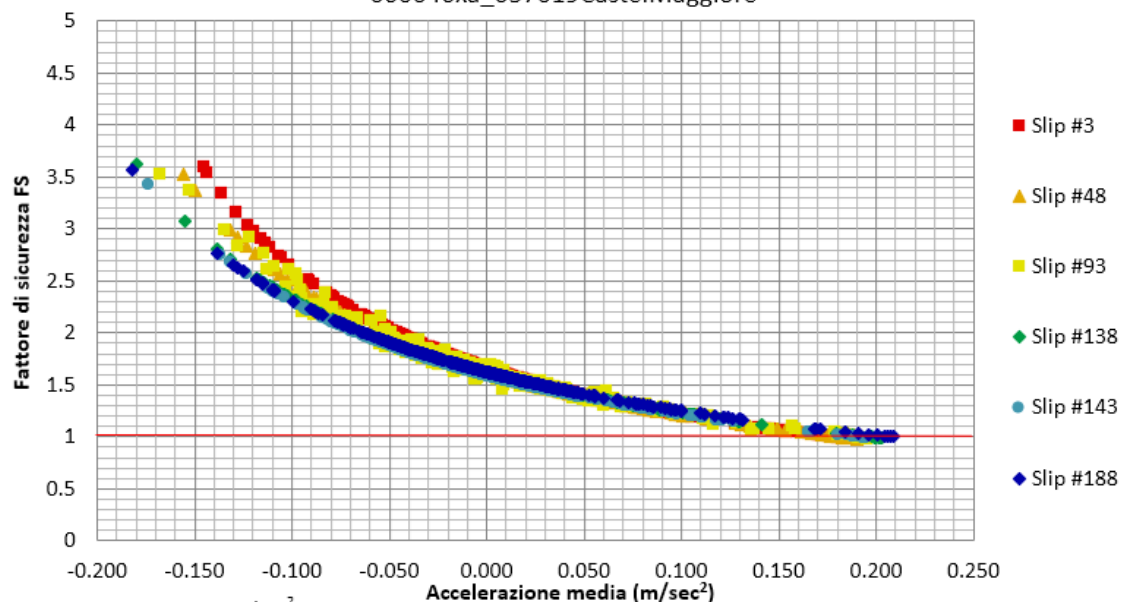
FS istantaneo minimo

Slip #3	Slip #48	Slip #93	Slip #138	Slip #143	Slip #188
0.985	0.983	0.985	0.990	0.995	1.000

Figura 7-69: Andamento del fattore di sicurezza durante lo shock sismico 000046xa.

### Fattore di sicurezza vs. Accelerazione media


000046xa\_037019CastelMaggiore



Accelerazione critica (m/sec<sup>2</sup>)

Slip #3	Slip #48	Slip #93	Slip #138	Slip #143	Slip #188
0.184	0.190	0.195	0.202	0.195	0.209

Figura 7-70: Determinazione dell'accelerazione critica 000046xa.

	<b>Committente:</b> Azienda Servizi Ambientali SpA	<b>Documento:</b> Relazione geotecnica
	<b>Lavoro:</b> Completamento della valorizzazione a scopo energetico del sito con integrazione dell'impianto fotovoltaico esistente mediante costituzione di una seconda unità energetica	Codice: S24028-PE-RE001-0 Data: Maggio 2024

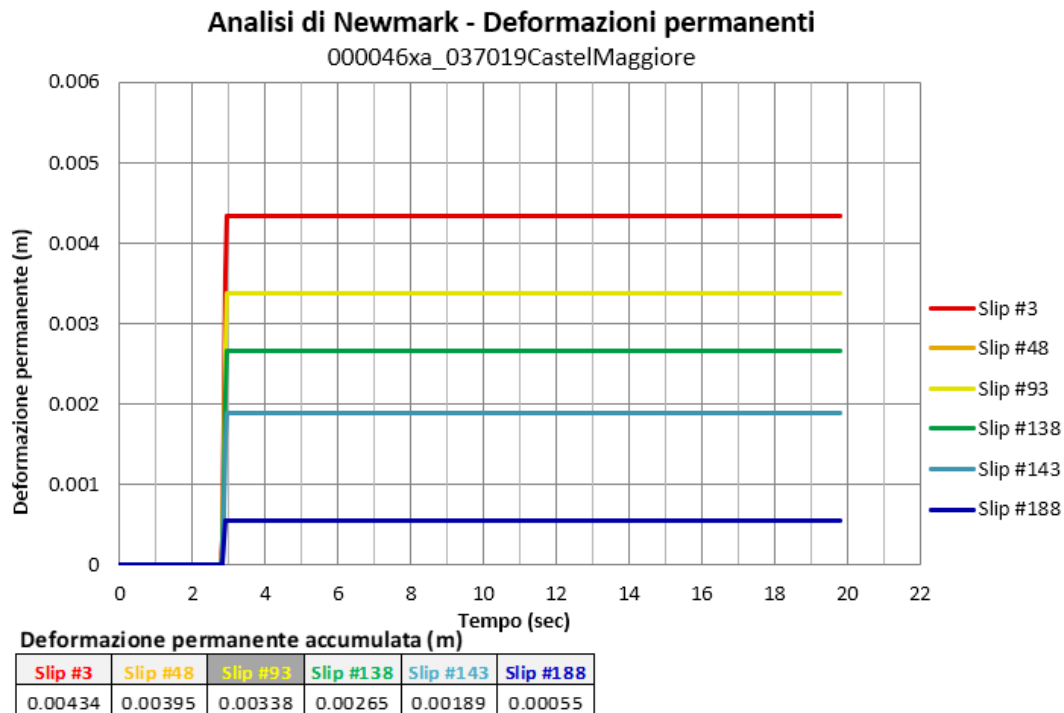



Figura 7-71:Storia delle deformazioni permanenti accumulate 000046xa.

#### 7.6.4.2 Risultati 000126xa\_037019CastelMaggiore

In Figura 7-72 vengono riportate le superfici di scivolamento esaminate per la determinazione delle deformazioni permanenti.



	<b>Committente:</b> Azienda Servizi Ambientali SpA	<b>Documento:</b> Relazione geotecnica
	<b>Lavoro:</b> Completamento della valorizzazione a scopo energetico del sito con integrazione dell'impianto fotovoltaico esistente mediante costituzione di una seconda unità energetica	Codice: S24028-PE-RE001-0 Data: Maggio 2024

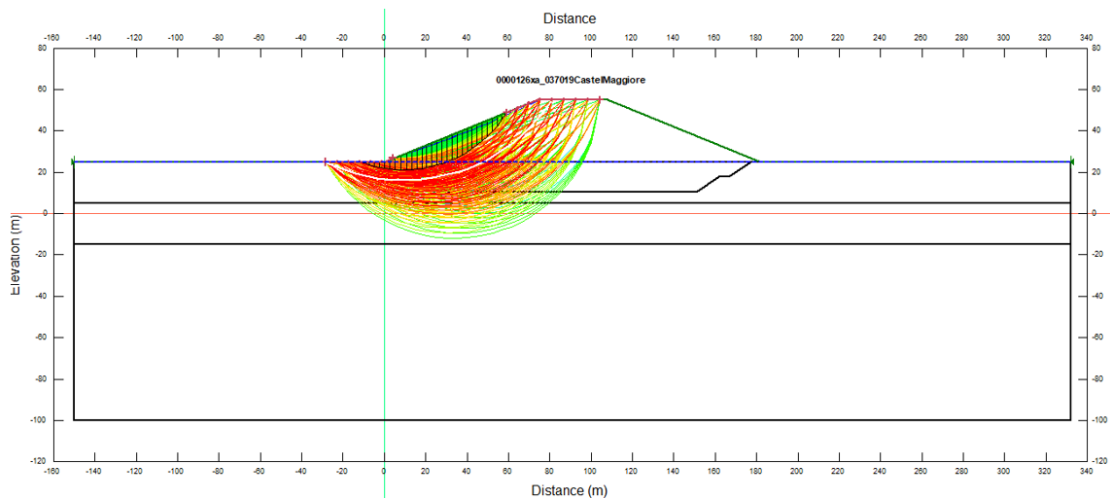


Figura 7-72: Slip surface esaminate.

In Figura 7-73 e Figura 7-74 si riporta rispettivamente l'andamento nel tempo dell'accelerazione media **avgAcc** e l'andamento nel tempo del fattore di sicurezza **FS** per le 4 superfici di scivolamento (meccanismi di collasso) selezionate tra le 315 analizzate nei 3998 tempi dell'accelerogramma (durata=19.985sec con campionamento ogni 0.005sec) per le quali risultano deformazione permanenti non nulle.

In Figura 7-75 si riporta per le medesime superfici di scivolamento la valutazione dell'accelerazione critica

Accelerazione critica (m/sec<sup>2</sup>)

Slip #138	Slip #183	Slip #143	Slip #188
0.198	0.216	0.192	0.209


per la quattro superfici per le quali la deformazione permanente è risultata non nulla.

In Figura 7-76 si riporta il calcolo della deformazione permanente,

Deformazione permanente accumulata (m)

Slip #138	Slip #183	Slip #143	Slip #188
0.00116	0.00085	0.00077	0.00058

si osserva che essa è sempre inferiore a 3cm cui corrisponde secondo la tabella di Idriss (vd Figura 7-66) dei valori soglia di riferimento un livello di danno "irrilevante" e pertanto la verifica è soddisfatta.

	<b>Committente:</b> Azienda Servizi Ambientali SpA	<b>Documento:</b> Relazione geotecnica
	<b>Lavoro:</b> Completamento della valorizzazione a scopo energetico del sito con integrazione dell'impianto fotovoltaico esistente mediante costituzione di una seconda unità energetica	Codice: S24028-PE-RE001-0 Data: Maggio 2024

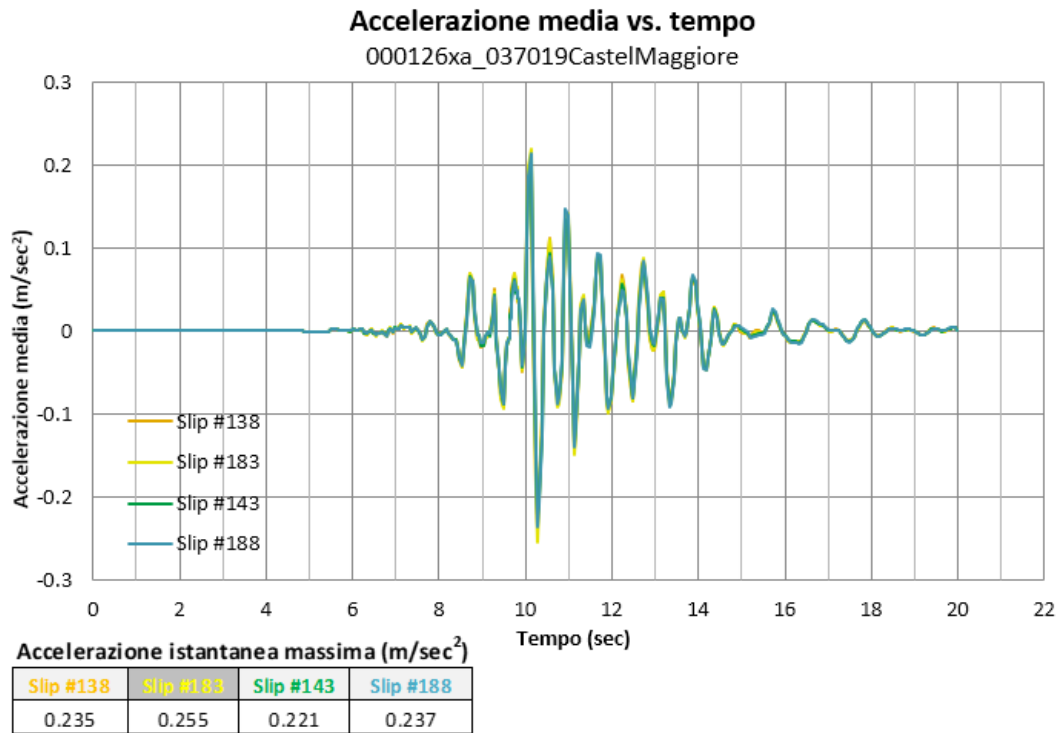
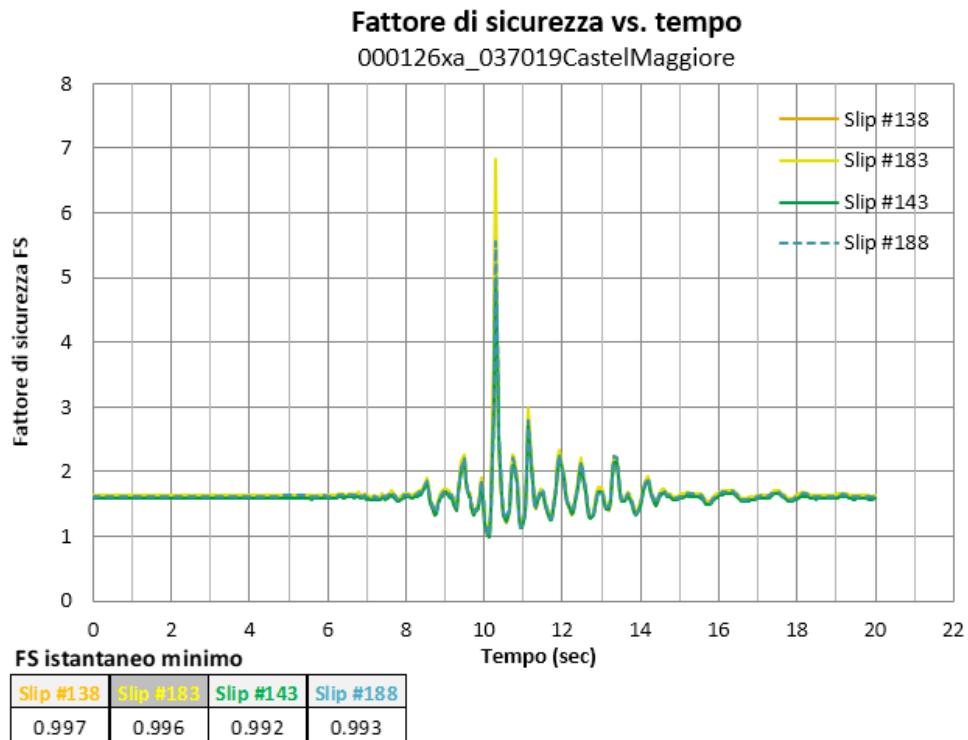


Figura 7-73: Andamento dell'accelerazione media durante lo shock sismico 000126xa.




	<b>Committente:</b> Azienda Servizi Ambientali SpA	<b>Documento:</b> Relazione geotecnica
	<b>Lavoro:</b> Completamento della valorizzazione a scopo energetico del sito con integrazione dell'impianto fotovoltaico esistente mediante costituzione di una seconda unità energetica	Codice: S24028-PE-RE001-0 Data: Maggio 2024

Figura 7-74: Andamento del fattore di sicurezza durante lo shock sismico 000126xa.

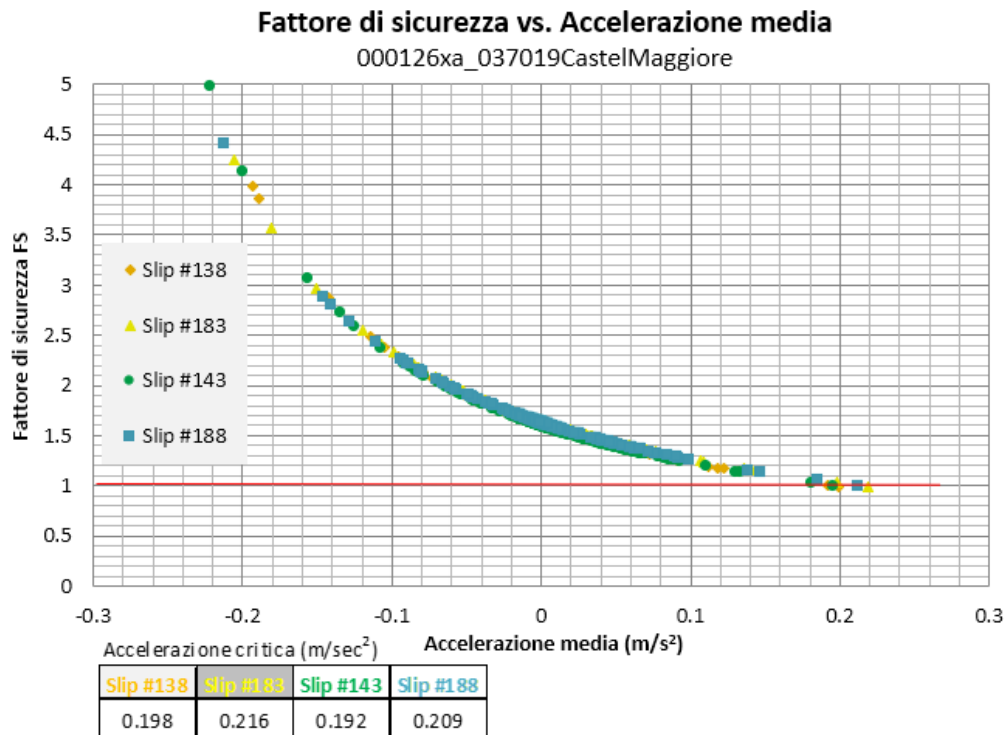
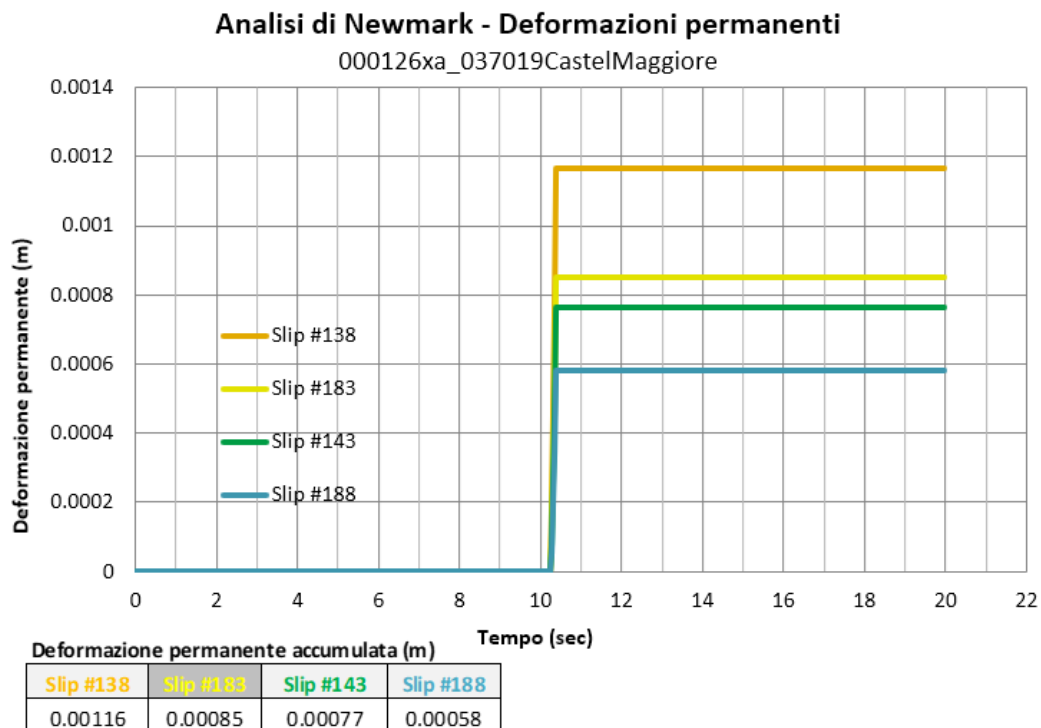


Figura 7-75: Determinazione dell'accelerazione critica 000126xa.




	<b>Committente:</b> Azienda Servizi Ambientali SpA	<b>Documento:</b> Relazione geotecnica
	<b>Lavoro:</b> Completamento della valorizzazione a scopo energetico del sito con integrazione dell'impianto fotovoltaico esistente mediante costituzione di una seconda unità energetica	Codice: S24028-PE-RE001-0 Data: Maggio 2024

Figura 7-76: Storia delle deformazioni permanenti accumulate 000126xa.

#### 7.6.4.3 Risultati 000354xa\_037019CastelMaggiore

In Figura 7-77 vengono riportate le superfici di scivolamento esaminate per la determinazione delle deformazioni permanenti.

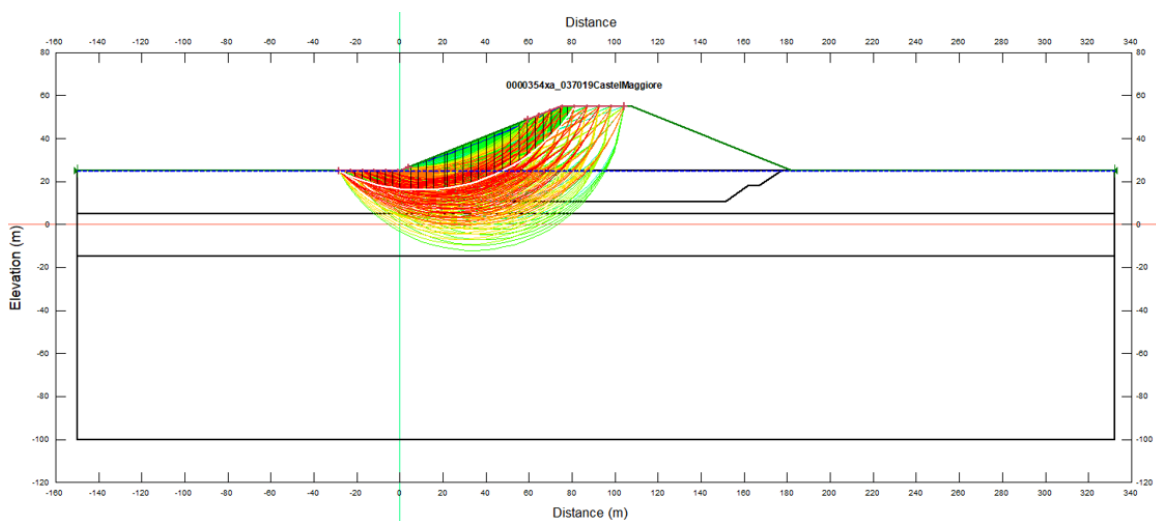


Figura 7-77: Slip surface esaminate.


In Figura 7-78 e Figura 7-79 si riporta rispettivamente l'andamento nel tempo dell'accelerazione media **avgAcc** e l'andamento nel tempo del fattore di sicurezza **FS** per 10 superfici di scivolamento (meccanismi di collasso) selezionate tra le 315 analizzate nei 6576 tempi dell'accelerogramma (durata=32.875sec con campionamento ogni 0.005sec) in quanto ad esse competono i 10 valori più alti della deformazione permanente.

In Figura 7-80 si riporta per le medesime superfici di scivolamento la valutazione dell'accelerazione critica,

**Accelerazione critica (m/sec<sup>2</sup>)**

Slip #138	Slip #143	Slip #93	Slip #98	Slip #153	Slip #108	Slip #148	Slip #48	Slip #103	Slip #18
0.197	0.192	0.188	0.183	0.178	0.170	0.188	0.182	0.180	0.157

In Figura 7-81 si riporta il calcolo della deformazione permanente,

	<b>Committente:</b> Azienda Servizi Ambientali SpA	<b>Documento:</b> Relazione geotecnica
	<b>Lavoro:</b> Completamento della valorizzazione a scopo energetico del sito con integrazione dell'impianto fotovoltaico esistente mediante costituzione di una seconda unità energetica	Codice: S24028-PE-RE001-0 Data: Maggio 2024

#### Deformazione permanente accumulata (m)

Slip #138	Slip #143	Slip #93	Slip #98	Slip #153	Slip #108	Slip #148	Slip #48	Slip #103	Slip #18
0.00376	0.00349	0.00326	0.00316	0.00303	0.00298	0.00295	0.00291	0.00270	0.00259

si osserva che essa è sempre inferiore a 3cm cui corrisponde secondo la tabella di Idriss (vd Figura 7-66) dei valori soglia di riferimento un livello di danno "irrilevante" e pertanto la verifica è soddisfatta.

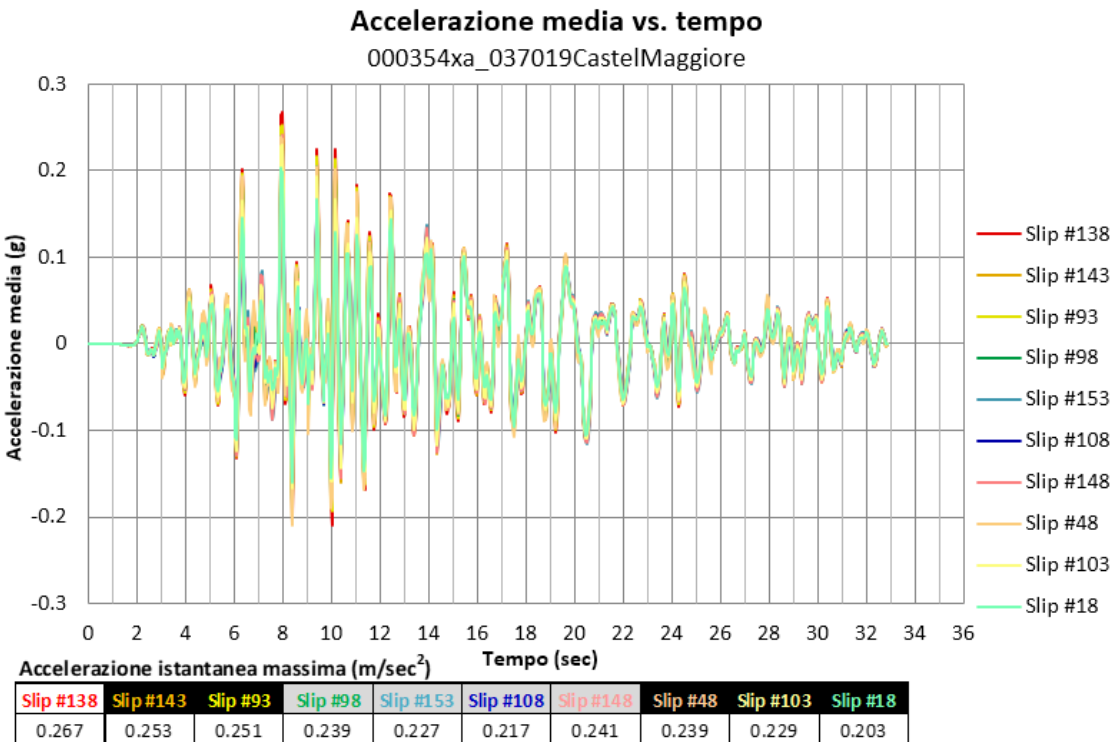



Figura 7-78: Andamento dell'accelerazione media durante lo shock sismico 000354xa.

	<b>Committente:</b> Azienda Servizi Ambientali SpA	<b>Documento:</b> Relazione geotecnica
	<b>Lavoro:</b> Completamento della valorizzazione a scopo energetico del sito con integrazione dell'impianto fotovoltaico esistente mediante costituzione di una seconda unità energetica	Codice: S24028-PE-RE001-0 Data: Maggio 2024

### Fattore di sicurezza vs. tempo

000354xa\_037019CastelMaggiore

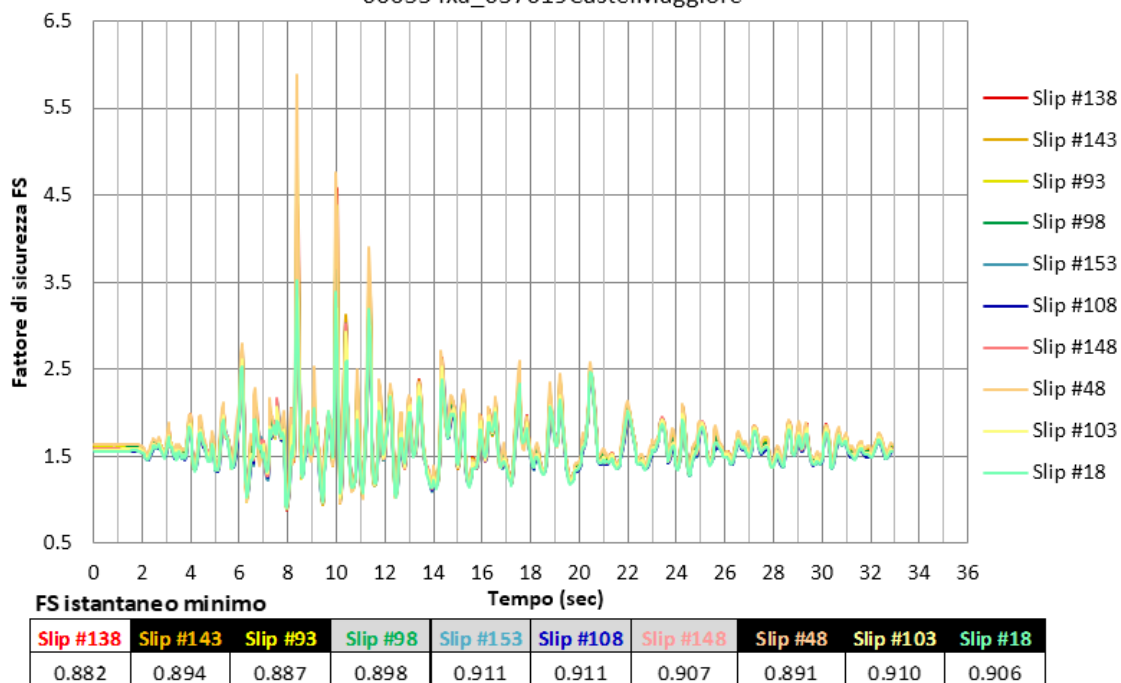


Figura 7-79: Andamento del fattore di sicurezza durante lo shock sismico 000354xa.

### Fattore di sicurezza vs. Accelerazione media

000354xa\_037019CastelMaggiore

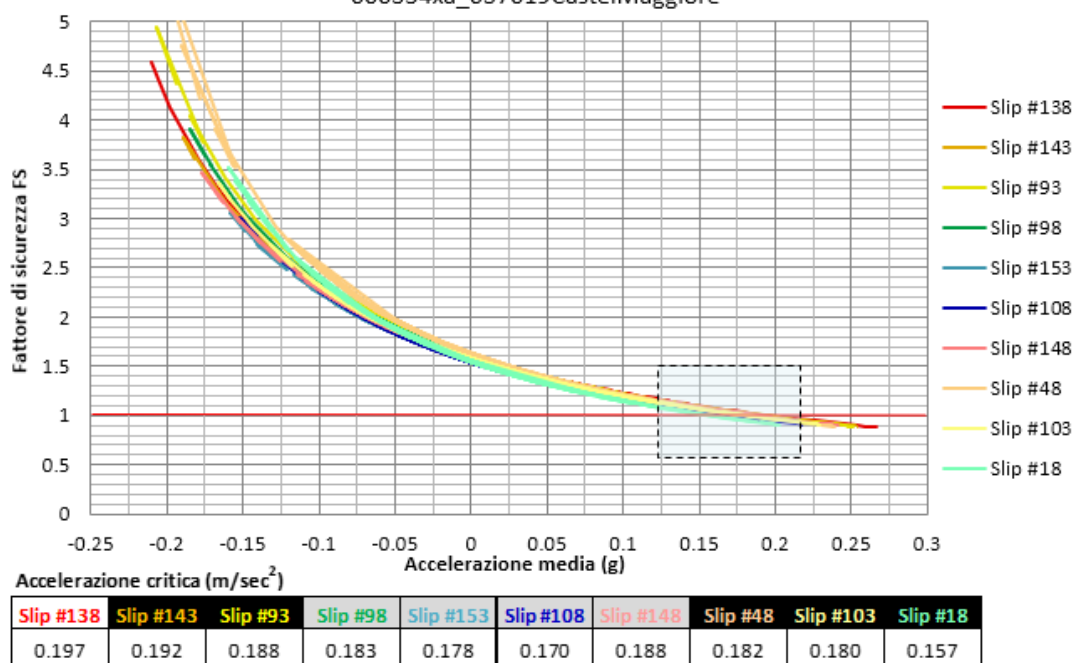



Figura 7-80: Determinazione dell'accelerazione critica 000354xa.

	<b>Committente:</b> Azienda Servizi Ambientali SpA	<b>Documento:</b> Relazione geotecnica
	<b>Lavoro:</b> Completamento della valorizzazione a scopo energetico del sito con integrazione dell'impianto fotovoltaico esistente mediante costituzione di una seconda unità energetica	Codice: S24028-PE-RE001-0 Data: Maggio 2024

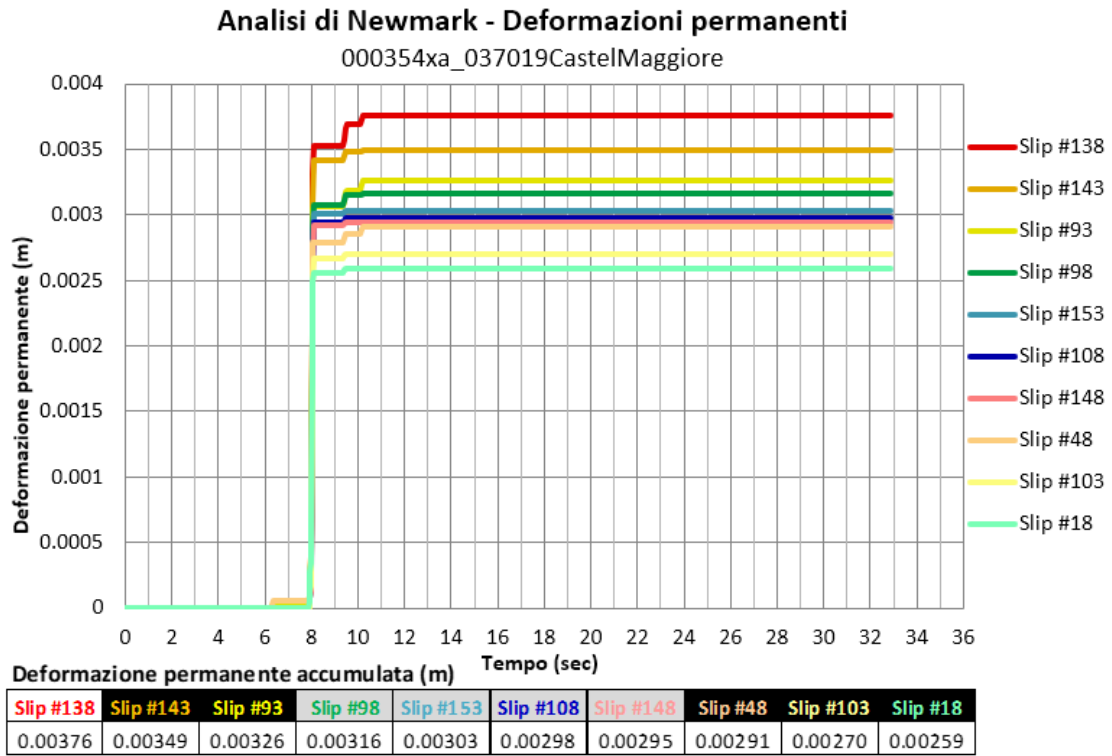



Figura 7-81:Storia delle deformazioni permanenti accumulate 000354xa.

	<b>Committente:</b> Azienda Servizi Ambientali SpA	<b>Documento:</b> Relazione geotecnica
	<b>Lavoro:</b> Completamento della valorizzazione a scopo energetico del sito con integrazione dell'impianto fotovoltaico esistente mediante costituzione di una seconda unità energetica	Codice: S24028-PE-RE001-0 Data: Maggio 2024

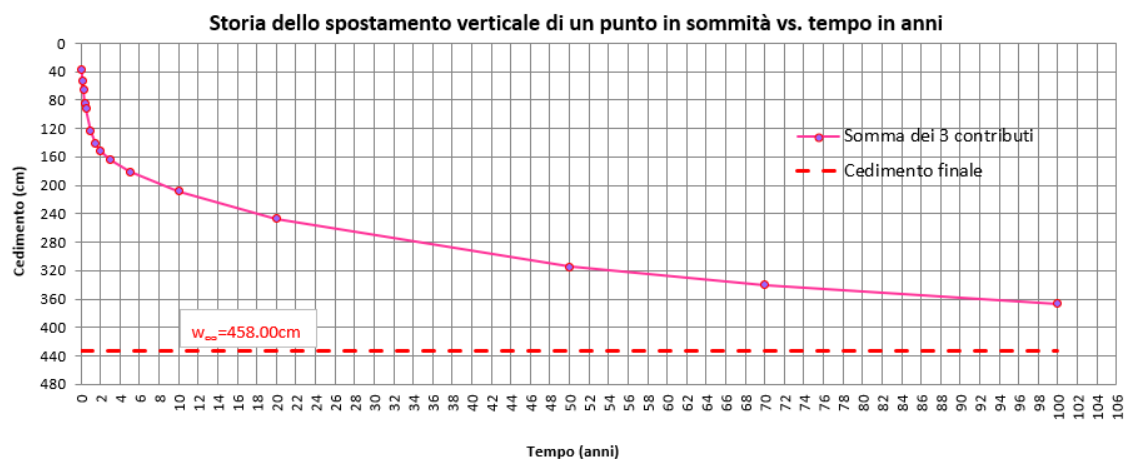
## 8 CONCLUSIONI

La presente relazione ha analizzato gli aspetti geotecnici connessi alla costruzione della discarica per rifiuti speciali non pericolosi di Castel Maggiore (BO), gestita dall'Azienda Servizi Ambientali SCpA anche alla luce dell'adeguamento morfologico della sagoma sommitale dell'abbancamento necessario per la costruzione di un impianto fotovoltaico. Inoltre, viste le peculiarità dell'opera costituita da un abbancamento di rifiuto, la stessa si configura anche come relazione di calcolo delle strutture in quanto la garanzia della stabilità dell'opera è un problema di carattere unicamente geotecnico.

In prima battuta si è proceduto alla caratterizzazione geotecnica dei terreni naturali in sito e dei rifiuti abbancati. Per questi ultimi si è fatto riferimento anche agli studi eseguiti da Enser Srl nel 2013, riportati anche nella relazione sui materiali.

Successivamente si è proceduto con la stima dei cedimenti attesi e del loro decorso temporale sia con riferimento al corpo della discarica che con riferimento alla vicina autostrada.


Le analisi eseguite sono riassunte nel grafico seguente che mostra come il cedimento massimo di circa 458 cm si manifesterà in modo progressivo nel tempo: si può osservare infatti che dopo 10 anni dalla costruzione è stato scontato un cedimento pari a 208 cm sui 458 cm complessivi e che il cedimento che resta da scontare è quindi di 250 cm circa; a 50 anni il cedimento avrà raggiunto i 314 cm e rimangono da scontare ancora 144 cm circa e a 100 anni il cedimento avrà raggiunto 366 cm rimanendo da scontare ancora 91 cm circa.



Decorso cedimenti di un punto al tetto della discarica $w_{\infty} = 458.00$ cm													
t (anni)	0.083	0.167	0.25	0.416667	0.5	1	1.5	2	3	5	10	20	50
t (mesi)	1	2	3	5	6	12	18	24	36	60	120	240	600
w (cm)	37.88	53.54	65.51	84.20	91.89	124.09	141.44	151.70	164.32	180.51	208.14	246.67	314.23
$w_{\infty} - w$	420.12	404.46	392.49	373.80	366.11	333.91	316.56	306.30	293.68	277.49	249.86	211.33	143.77
	458.00	458.00	458.00	458.00	458.00	458.00	458.00	458.00	458.00	458.00	458.00	458.00	458.00

Figura 8-1: Decorso dei cedimenti nel tempo.



	<b>Committente:</b> Azienda Servizi Ambientali SpA	<b>Documento:</b> Relazione geotecnica
	<b>Lavoro:</b> Completamento della valorizzazione a scopo energetico del sito con integrazione dell'impianto fotovoltaico esistente mediante costituzione di una seconda unità energetica	Codice: S24028-PE-RE001-0 Data: Maggio 2024

Al capitolo 6 è stato mostrato che i cedimenti indotti dalla costruzione della discarica hanno effetto trascurabile sul corpo del rilevato autostradale posto a circa 47m di distanza dal bordo della stessa.


Relativamente alla tematica della stabilità del corpo discarica, l'esame è stato svolto a più livelli di approfondimento, mediante analisi 3D agli elementi finiti e 2D in regime pseudostatico e con analisi dinamiche agli spostamenti basate su un modello per l'analisi di risposta sismica che parte dall'esame di 3 accelerogrammi reali di riferimento per il comune di Castelmaggiore.

I risultati dell'analisi RSL in termini di caratterizzazione del moto sismico non si discostano molto da quelli ottenibili utilizzando il metodo tabellare di stima dell'amplificazione locale suggerito dalle Norme Tecniche NTC 2018; questo implica che le analisi di stabilità condotte con il metodo pseudostatico sono già in grado di cogliere con sufficiente attendibilità il comportamento sismico della discarica, ciò nonostante le analisi dinamiche avanzate permettono di evidenziare ulteriori margini di sicurezza tanto da far ritenere le prime più che cautelative. I risultati delle analisi di stabilità condotte attraverso il metodo pseudostatico in condizioni 2D, con modellazione agli elementi finiti 3D ed in condizioni sismiche anche mediante analisi dinamiche agli spostamenti, conducono a ritenere che nessun tipo di rinforzo è da prevedersi in quanto la stabilità è garantita dal materiale-rifiuti qual è.

Relativamente ai materiali necessari per formare il riempimento dell'adeguamento morfologico sommitale necessario per la posa dell'impianto fotovoltaico, è stata condotta una analisi di sensitività sui parametri meccanici (angolo di attrito, della coesione efficace e della coesione non drenata) al fine di determinarne i valori minimi ammissibili per garantire la loro stabilità. I valori ottenuti, intesi come caratteristiche medie dell'ammasso, sono i seguenti:

$$\phi' \geq 20^\circ; c' \geq 8^\circ; c_u \geq 80 \text{ kPa}$$

Questi valori definiscono un criterio di resistenza che può essere anche valutato mediante prove di taglio diretto ed è da intendere soddisfatto se le coppie sperimentali tensione normale-tensione tangenziale ricadono nella zona collocata al di sopra della curva tratteggiata di Figura 8-2.

	<b>Committente:</b> Azienda Servizi Ambientali SpA	<b>Documento:</b> Relazione geotecnica
	<b>Lavoro:</b> Completamento della valorizzazione a scopo energetico del sito con integrazione dell'impianto fotovoltaico esistente mediante costituzione di una seconda unità energetica	Codice: S24028-PE-RE001-0 Data: Maggio 2024

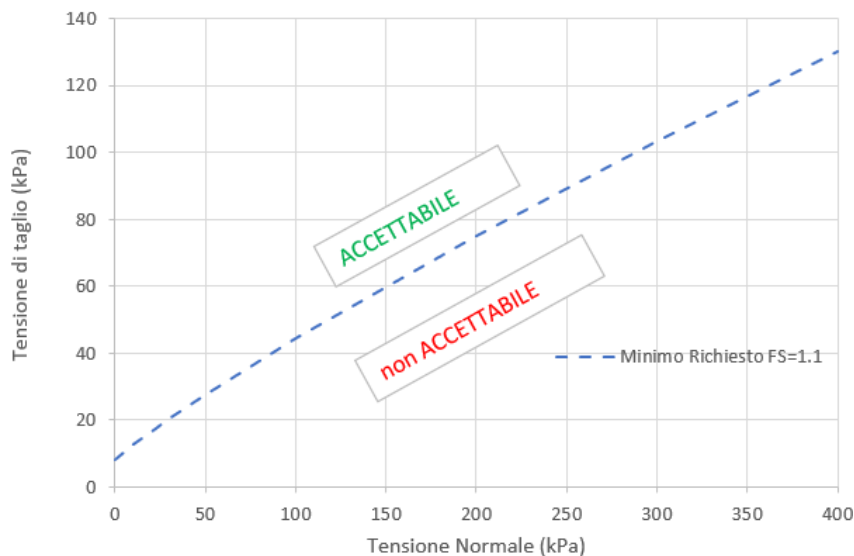


Figura 8-2: Regione di accettabilità del materiale di riempimento sulla base delle prove di taglio diretto.

Prudenzialmente l'abaco riportato nella figura precedente è stato costruito con riferimento ad un involucro di rottura curvilineo che tiene conto dell'accoppiamento della componente attritiva della resistenza a taglio con la tensione di confinamento, al fine di meglio interpretare i valori sperimentali. Esso è descritto dalle equazioni seguenti:

$$\tau = c + \sigma_n \cdot \tan \varphi_\sigma$$

$$\varphi_\sigma = \varphi_0 + \Delta\varphi \cdot \log\left(\frac{\sigma'_n}{p_a}\right)$$

dove:

$\tau$ : resistenza al taglio;

$\sigma'_n$ : tensione normale;

$c$ : coesione di progetto 8kPa

$\varphi_0$ : angolo d'attrito di progetto 20°

$\Delta\varphi$ : -5° come suggerito dalla letteratura tecnica.