

35⁺² 1985
2022
stava

C O N V E G N O

SCARTI MINERARI: DA RIFIUTO A RISORSA

**Rilevati in terra rinforzata con
geosintetici per il contenimento di scarti
di lavorazione mineraria**

**Daniele Cazzuffi, CESI SpA, Milano (MI)
Piergiorgio Recalcati, Tenax SpA, Viganò (LC)**

**7 Ottobre 2022
Stava di Tesero (TN) - Italia**

6/7 ottobre 2022

 **Stava di Tesero (TN), Italy**

**SAVE THE
DATE!**

Memorie della tragedia di Stava (19 Luglio 1985)



Riflessi sulla comunità geotecnica internazionale (ISSMGE Agosto 1985)



Conference participants leaving the headquarters hotel (Fairmont) for the wine country picnic in Napa Valley, California, Sunday, August 11, 1985.



Professor H. Bolton Seed (USA), Conference Chairman.

Riflessi sulla comunità geotecnica internazionale (ISSMGE Agosto 1985)

Fifth Plenary Session: Chairman and reporters

General reports on recent failures

Cinquième Séance Plénière: Président et rapporteurs

Rapports généraux sur des ruptures récentes



Introduzione

La costruzione di siti per il contenimento in sicurezza degli scarti della lavorazione minerarie è sicuramente una necessità riconosciuta in tutto il mondo.

L'aumento del volume utile accumulabile in un sito di nuova realizzazione o in uno già esistente può rappresentare una soluzione valida.

L'uso di rilevati con paramento ripido rinforzato con geogriglie per aumentare il volume e la stabilità dei materiali contenuti è sempre più diffuso.

La realizzazione di rilevati ripidi rinforzati consente un importante risparmio in termini di materiale di riempimento ed assicura un enorme aumento del volume di rifiuto disponibile.

Terreno rinforzato: cenni teorici

Un pendio rinforzato è un materiale composito che sfrutta il lavoro sinergico fra

un materiale resistente a compressione – il terreno
ed

un materiale resistente a trazione – il geosintetico

Questa sinergia si traduce in un incremento delle proprietà meccaniche del terreno rinforzato in termini di

resistenza a compressione
e di

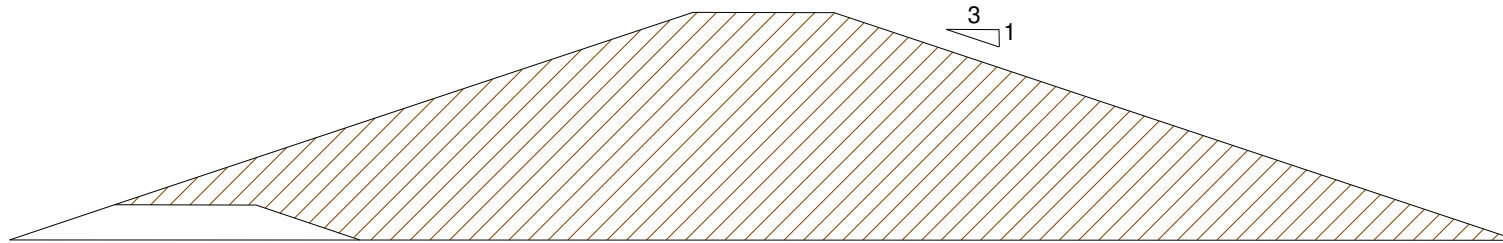
resistenza al taglio

L'impiego di rilevati ripidi rinforzati

Rilevati naturali



Materiale di riempimento necessario



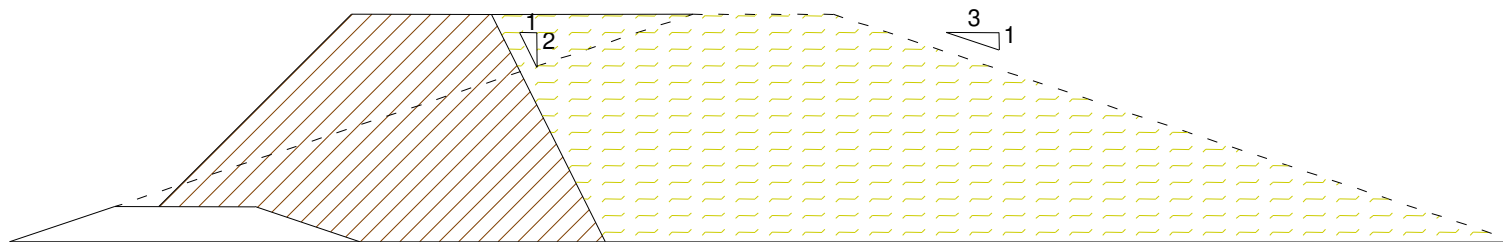
Rilevati rinforzati: incremento dei volumi contenuti e riduzione del materiale di riempimento



Materiale di riempimento necessario

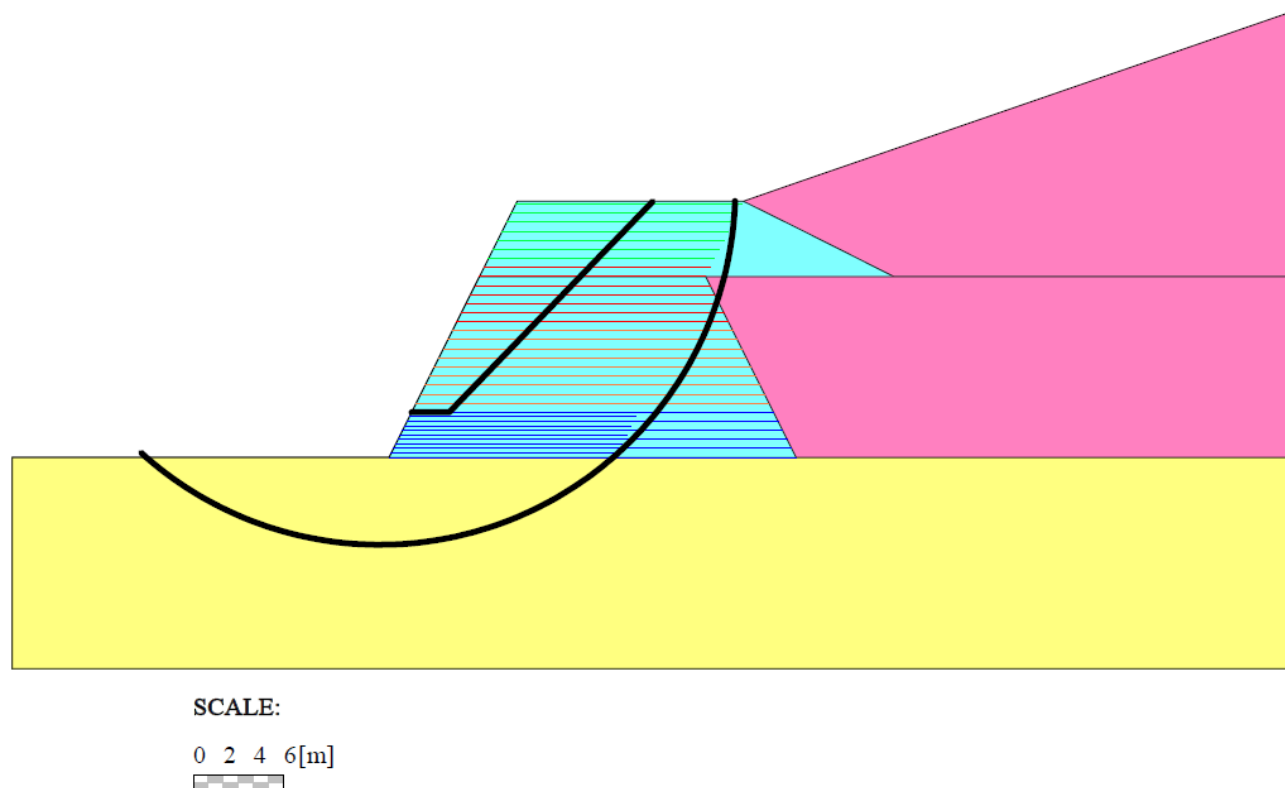


Incremento volumetrico



L'impiego di rilevati ripidi rinforzati

Considerando anche la spinta del materiale contenuto, l'analisi di stabilità deve comprendere sia superfici di rottura interne che esterne



Case Histories: rilevati rinforzati per discariche di scarti minerali

- ✓ Discarica di Baccu Locci - Confinamento dei rifiuti di estrazione mineraria (sterili minerali – fini di laveria - tailings)
Sardegna -Italia
- ✓ Discarica Genna e Luas per rifiuti industriali (scorie minerali)
Sardegna - Italia

Case Histories: rilevati rinforzati

Discarica di Baccu Locci



Case Histories: rilevati rinforzati

Discarica di Baccu Locci

La miniera dismessa di Baccu Locci fa parte del parco geominerario della Sardegna.



Le prime estrazioni (nel 600) furono di piombo, galena ed altri minerali.
L'ultima concessione (anni '50) fu impegnata nell'estrazione di arsenopirite per la preparazione di anidrite arseniosa (fertilizzante) a scopi agricoli

Case Histories: rilevati rinforzati

Discarica di Baccu Locci

Nel 2005, a causa dell'evidenza di contaminazione di arsenico ed altri metalli pesanti (cadmio, rame, piombo e zinco), fino a 3 ordini di grandezza maggiori dei limiti di legge, la miniera di Baccu Locci diventa oggetto di Accordo di Programma per la bonifica e recupero ambientale dell'aria mineraria dismessa stipulato fra il Ministero dell'Ambiente e della Tutela del Territorio, la Regione Autonoma della Sardegna e i comuni di Villaputzu e San Vito (Angeloni e Bavestrelli, 2008)



mg/kg	min	max	DM 471/99 col.B
As	3450	7947	50
Cd	129	304	15
Cu	172	281	600
Pb	1672	3876	1000
Zn	163	1072	1500

Case Histories: rilevati rinforzati

Discarica di Baccu Locci

L'area mineraria copre una superficie di circa 100 km² caratterizzata dalla contaminazione di del suolo e sottosuolo. Le principali criticità sono:

- ✓ Oltre 40 discariche (accumuli a cielo aperto) di sterili minerali (41000 m³) e di fini di laveria (4000 m³)
- ✓ Circa 180 abbancamenti compattati di residui di lavorazione (tailings) depositati lungo il corso del Rio Baccu Locci (6000 m³)



messa in sicurezza e contenimento di **51.000 m³** di rifiuti di estrazione mineraria

Case Histories: rilevati rinforzati

Discarica di Baccu Locci

L'opera principale per importanza e complessità progettuale e costruttiva è stata indubbiamente il sito di raccolta realizzato per mettere in sicurezza circa 41000 m³ di rifiuti minerali.

Un'opera ardita che è stata considerare come un landmark per le attività di recupero ambientale dei siti minerali nella regione Sardegna

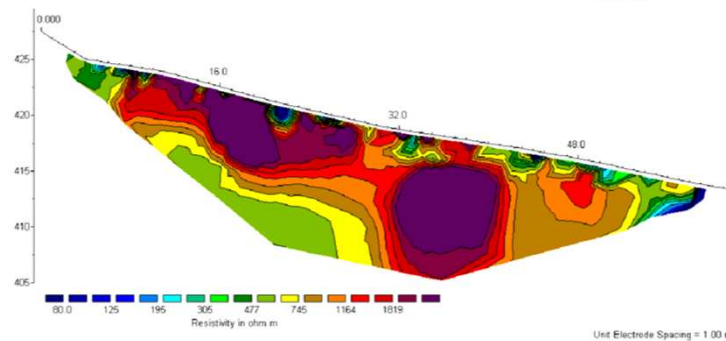
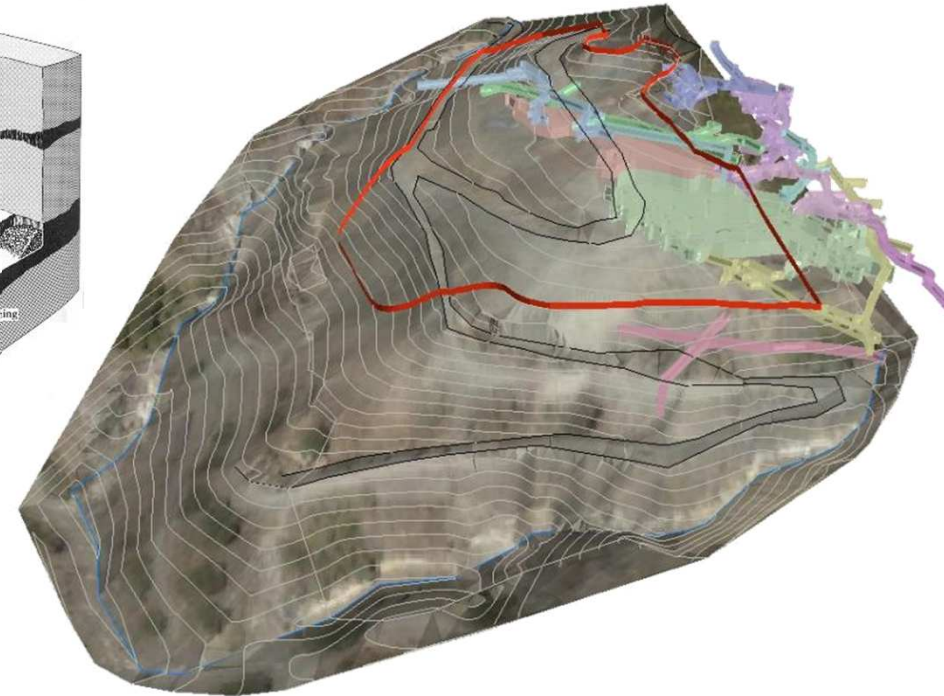
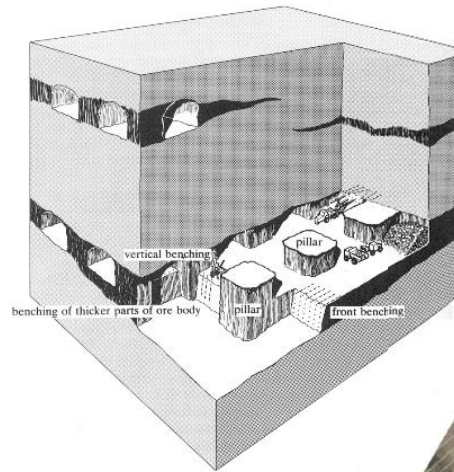


Case Histories: rilevati rinforzati

Discarica di Baccu Locci

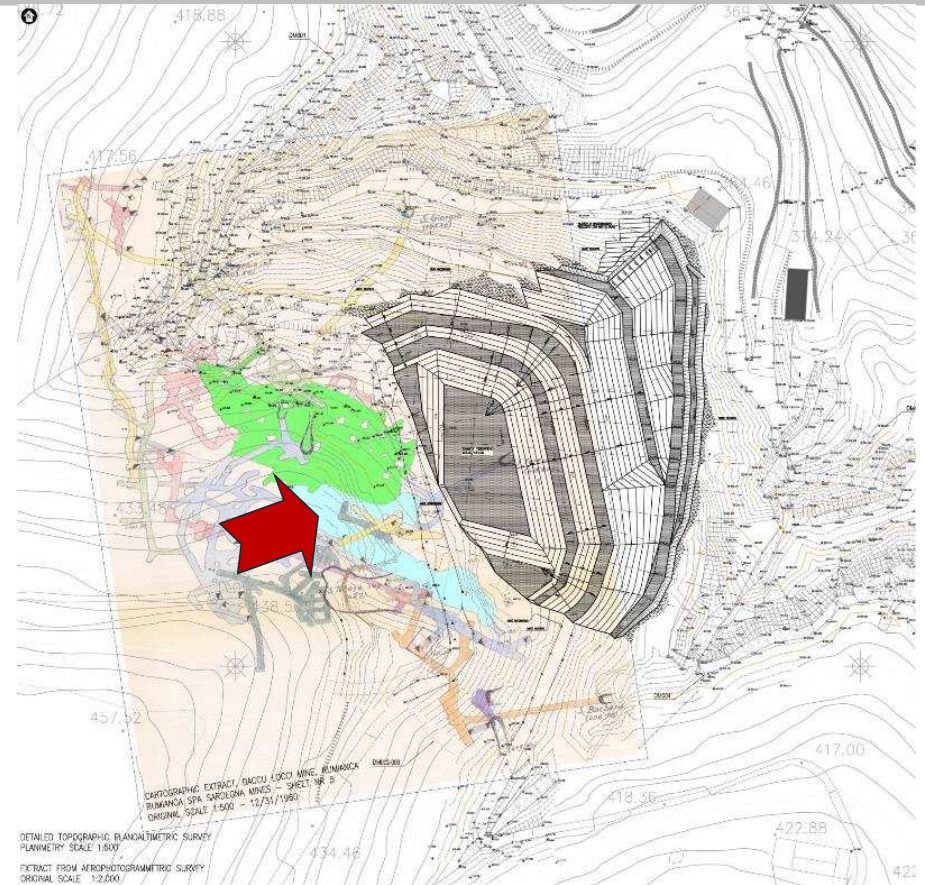
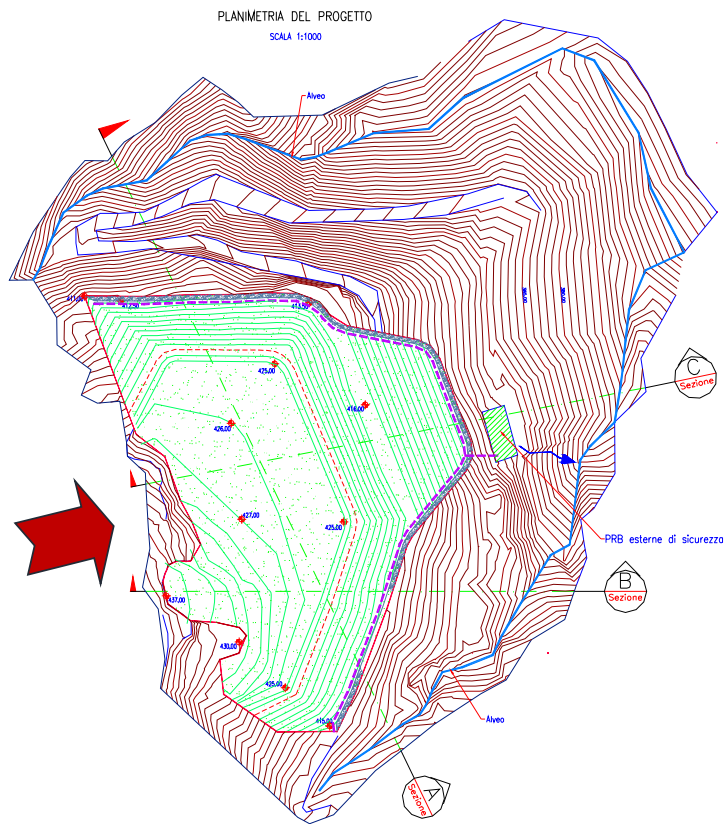
Nella fase di progettazione preliminare è emerso che la parte sommitale piana del sito era interessata da una fitta rete di cavità e gallerie sotterranee.

Le condizioni locali sono state verificare con rilievo strutturale, rilievo geofisico con tecnica in tomografia elettrica, sondaggi e rilievo topografico speleologico interno.



Case Histories: rilevati rinforzati

Discarica di Baccu Locci



Dopo valutazioni su alternative di intervento (consolidamento/sfondamento) si è considerata come soluzione ottimale lo spostamento a valle del 'sito di raccolta', evitando di caricare la porzione sommitale interessata da gallerie.

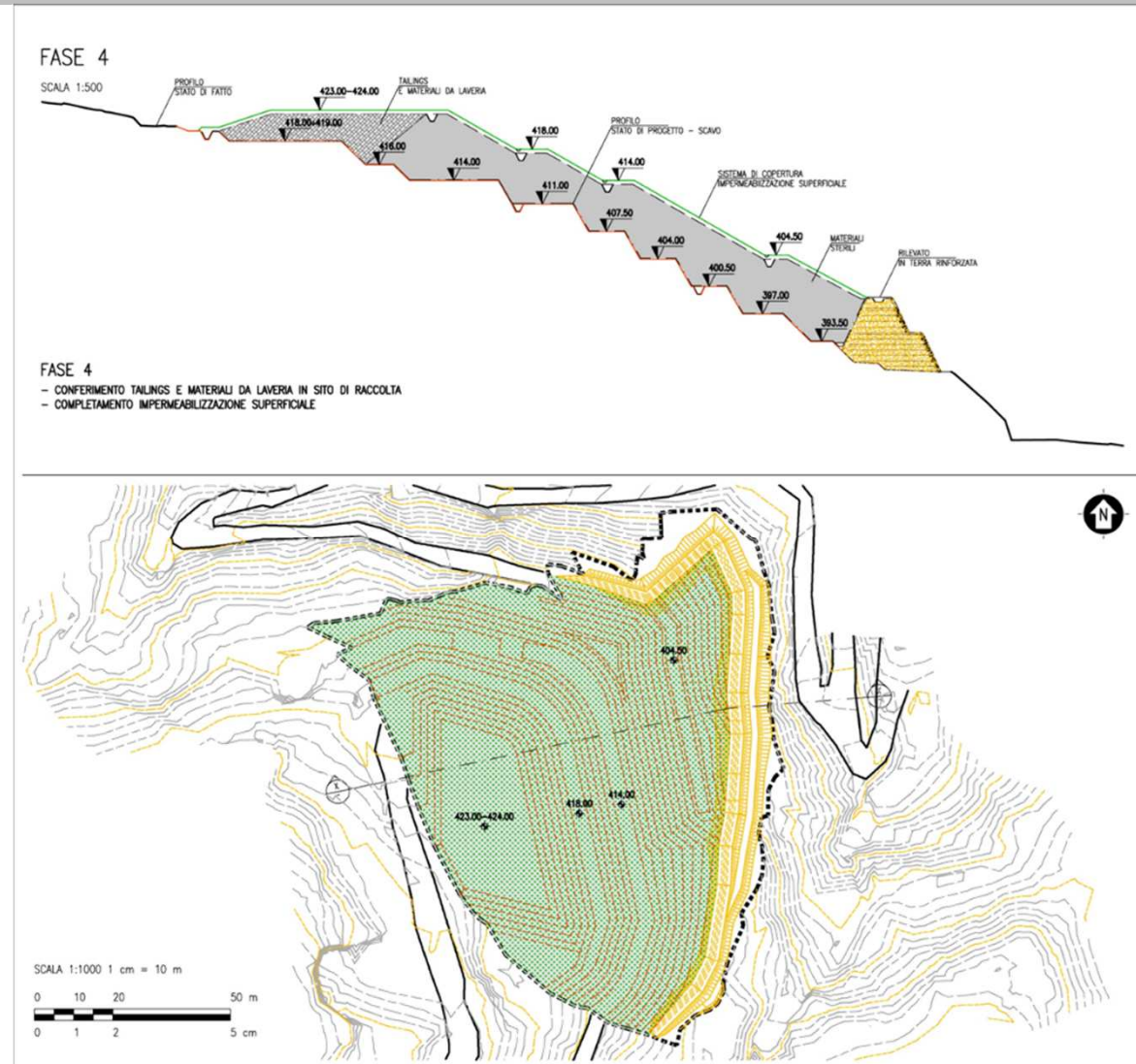
Case Histories: rilevati rinforzati

Discarica di Baccu Locci

La soluzione progettuale adottata è stata quella di un sito principale di raccolta appoggiato sul versante più a valle, fondato sulla roccia più consistente.

Al fine di garantire la stabilità dell'abbancamento e dell'opera nel suo complesso ed evitare ulteriori inquinamenti si è reso necessario:

- ✓ sagomare a gradoni il fondo roccioso;
- ✓ realizzare al piede un rilevato di contenimento in terra rinforzata di altezza max di 10 m (in giallo).
- ✓ impermeabilizzare il fondo con una barriera artificiale costituita da GCL e geomembrana in HDPE



Case Histories: rilevati rinforzati

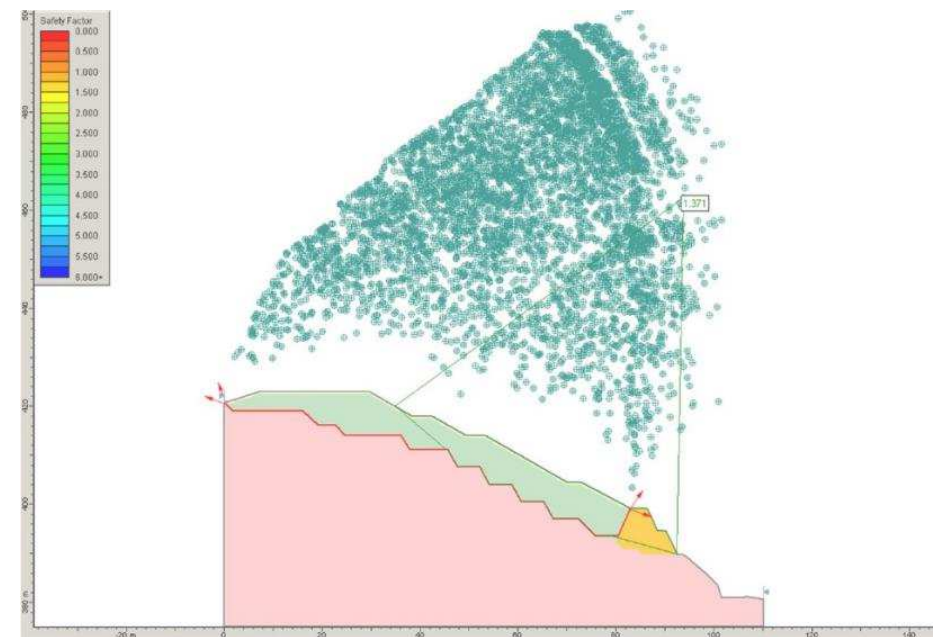
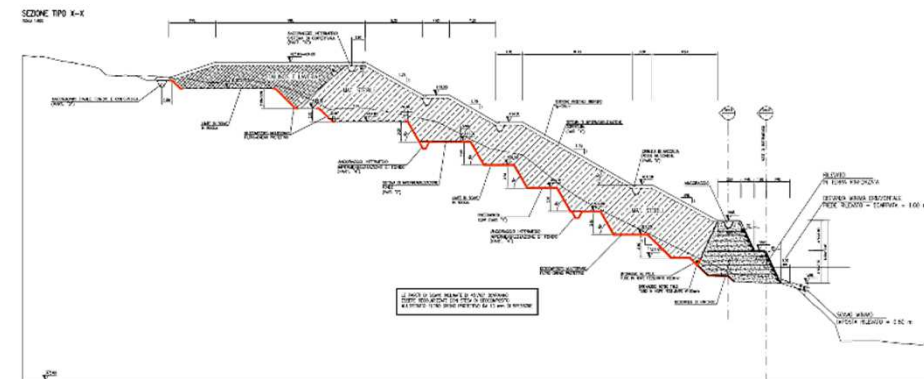
Discarica di Baccu Locci

La verifica di “stabilità globale del sito di raccolta” è stata condotta con simulazioni numeriche 2D ed con modellazione FEM, considerando la sezione tipologica riportata, con le seguenti semplificazioni:

- ✓ contatto tra roccia e sterili con gradoni come da progetto;
- ✓ contatto sterili e rilevato di contenimento senza gradoni e con un angolo di 65° .

Come ci si aspettava, il punto di criticità per la stabilità è stato la bassa resistenza al taglio disponibile lungo il sistema d'impermeabilizzazione (costituito da un GCL e da una geomembrana in HDPE).

Tale superficie da luogo ad un piano di scivolamento preferenziale. E' stato quindi necessario **dimensionare il rilevato rinforzato alla base della discarica** in modo che fosse in grado di sostenere le spinte indotte a tergo dal corpo di sterili.

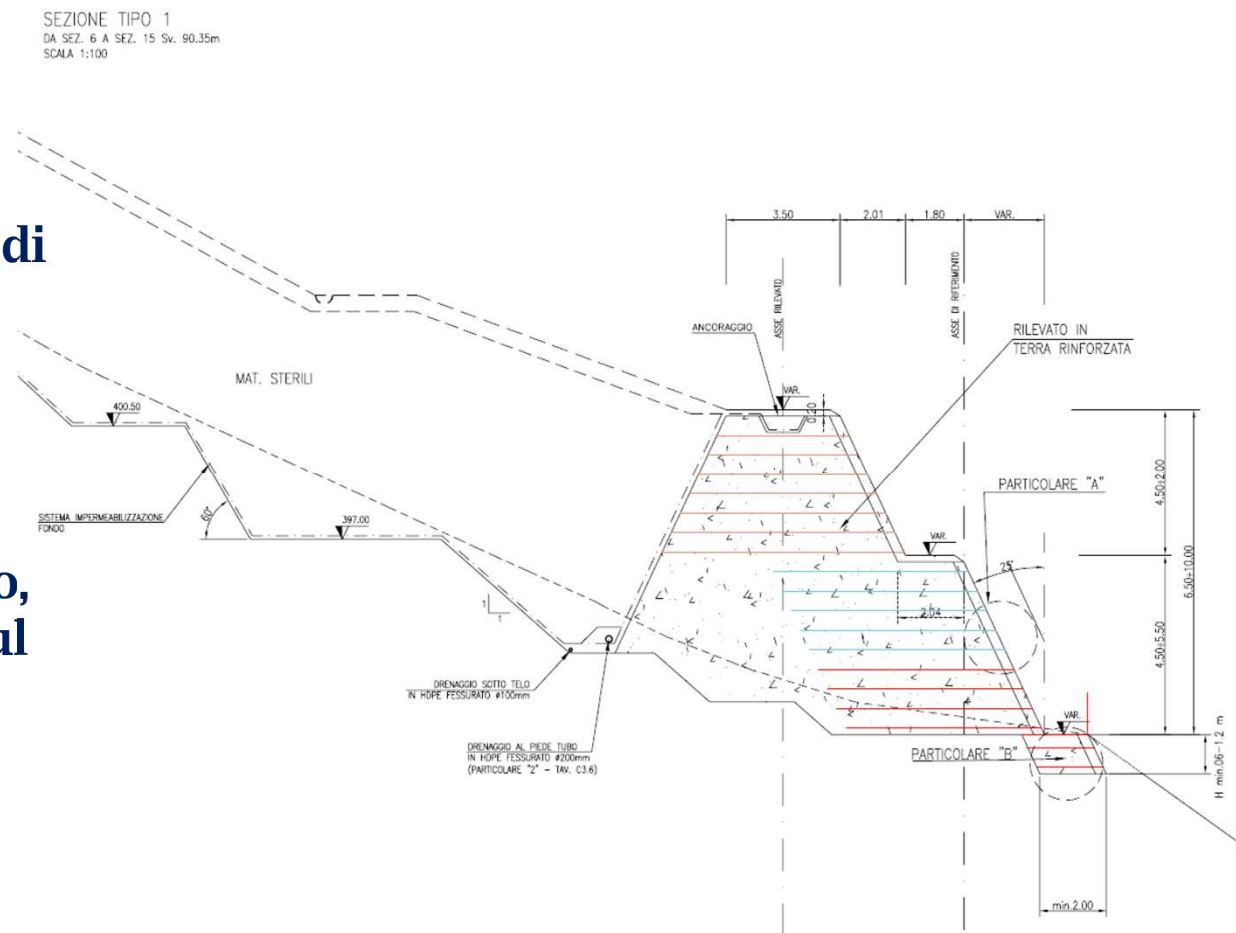


Case Histories: rilevati rinforzati

Discarica di Baccu Locci

Nello specifico, l'analisi condotta ha portato al dimensionamento del rilevato rinforzato di sottoscampa che presenta le seguenti caratteristiche:

- sviluppo di 130 m ed altezza media di 10 m;
- inclinazione di facciata pari a 65° ;
- geogriglie estruse mono-orientate in HDPE spaziate 0.60m e di resistenza a trazione e lunghezza dipendenti dalle caratteristiche geometriche del rilevato, del terreno in sito, dai carichi agenti sul rilevato stesso e da eventuali sollecitazioni sismiche;
- cassero di guida e di appoggio "a perdere" in rete elettrosaldata;
- rivestimento in facciata con un feltro vegetativo preseminato.





Case Histories: rilevati rinforzati
Discarica di Baccu Locci
rinverdimento dopo 20 gg



Case Histories: rilevati rinforzati
Discarica di Baccu Locci
Particolari costruttivi

Case Histories: rilevati rinforzati **Discarica di Baccu Locci** - fasi costruttive



Case Histories: rilevati rinforzati

Discarica di Baccu Locci





Case Histories: rilevati rinforzati
Discarica di Baccu Locci (2012)



Case Histories: rilevati rinforzati
Discarica di Baccu Locci (2012)



Case Histories: rilevati rinforzati
Discarica di Baccu Locci: oggi (foto Montana Ambiente, 2022)

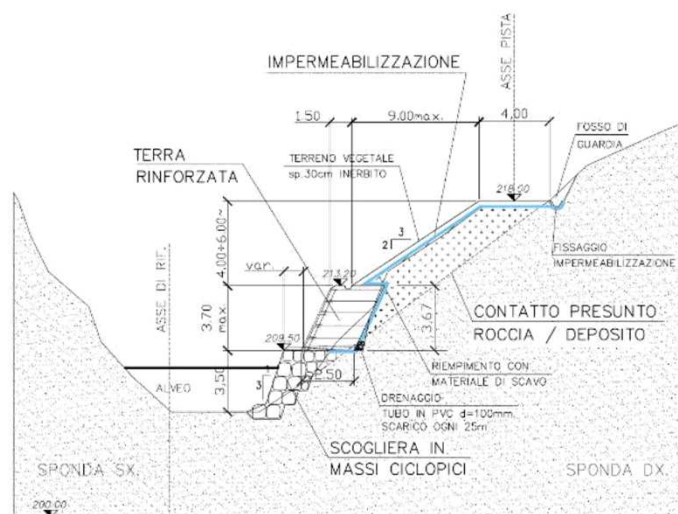
Case Histories: rilevati rinforzati

Discarica di Baccu Locci

A causa di problemi di accessibilità, lungo il Rio Baccu Locci, alcuni accumuli minerali sono stati messi in sicurezza in loco (3 discariche per complessivi di 9000 m³).

La soluzione di bonifica adottata ha previsto una serie di interventi:

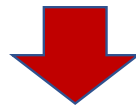
- Muri in massi ciclopici per regimazione idraulica
- Rilevati in terra rinforzata per il contenimento degli sterili
- Impermeabilizzazione con geosintetici
- Uso di geostuoie per contenimento della copertura vegetale.



Particolare attenzione è stata posta all'inserimento paesaggistico delle opere nel contesto locale.

L'impiego di rilevati ripidi rinforzati nelle discariche

Avendo il materiale composito (terreno + geogriglie) un migliore comportamento a compressione e al taglio



un terrapieno rinforzato può assorbire apprezzabili deformazioni senza perdere la sua integrità e funzionalità della struttura.

Questo vantaggio è particolarmente importante quando invece di avere un singolo argine, vengono previsti **una serie di rilevati** di dimensioni minori sovrapposti.

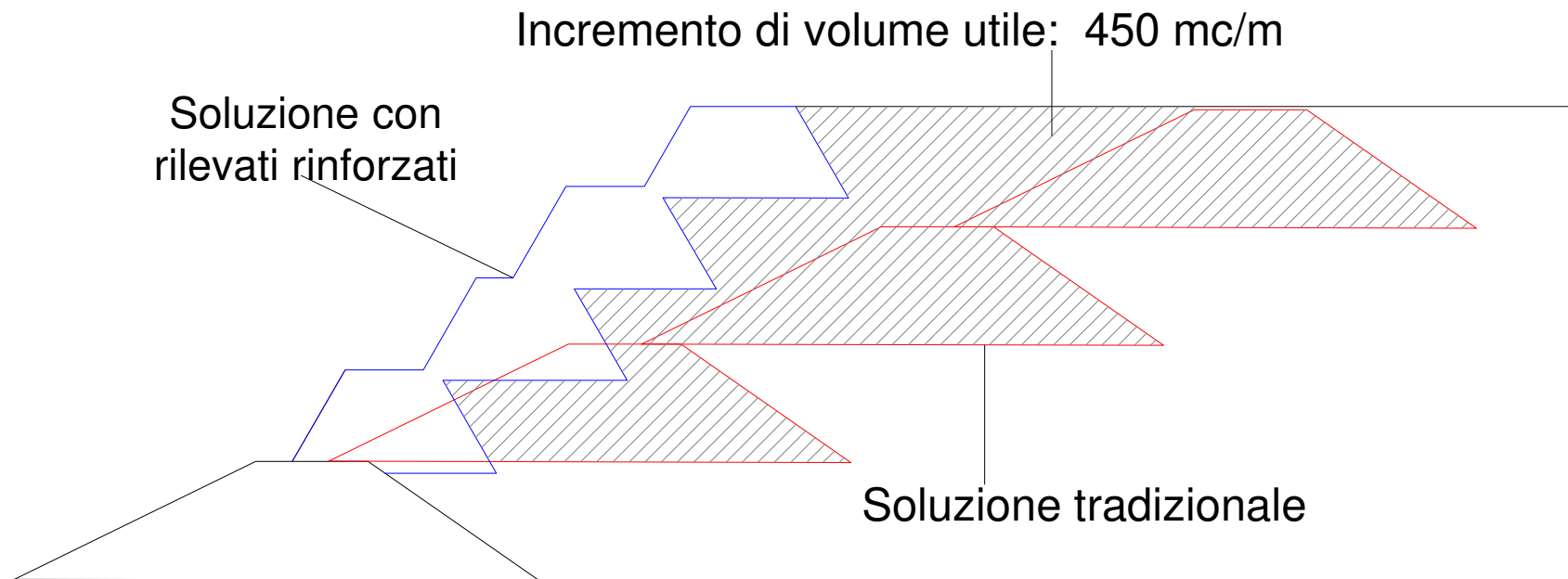
Case Histories: rilevati rinforzati sovrapposti

Discarica Genna e Luas



Case Histories: rilevati rinforzati sovrapposti

Discarica Genna e Luas

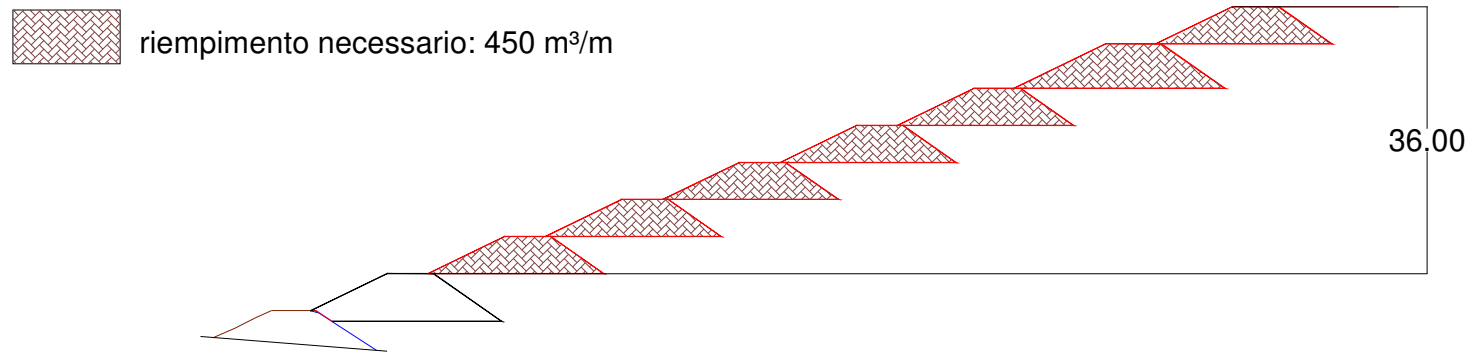


Confronto tra la soluzione con rilevati non rinforzati e rinforzati
Discarica per rifiuti industriali (in progress)

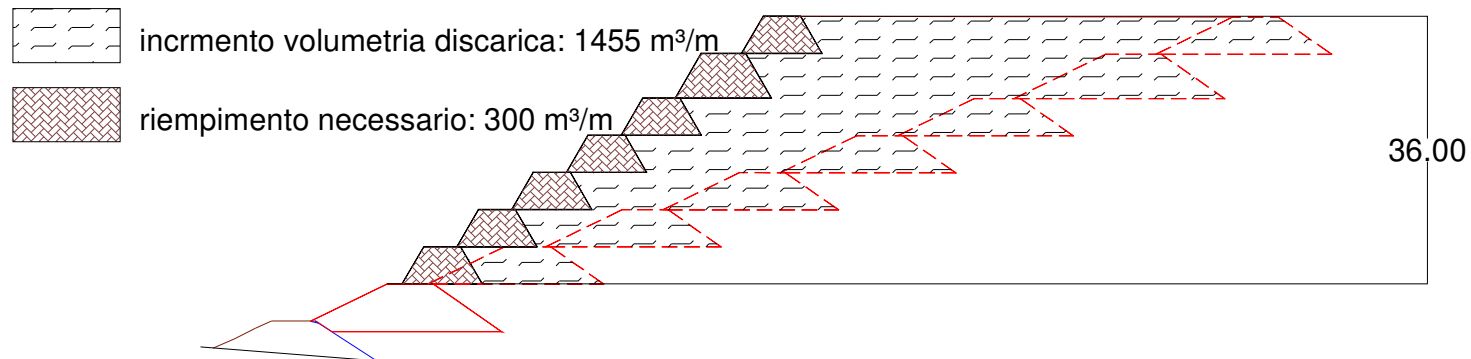
Case Histories: rilevati rinforzati sovrapposti

Discarica Genna e Luas

Soluzione iniziale



Soluzione proposta



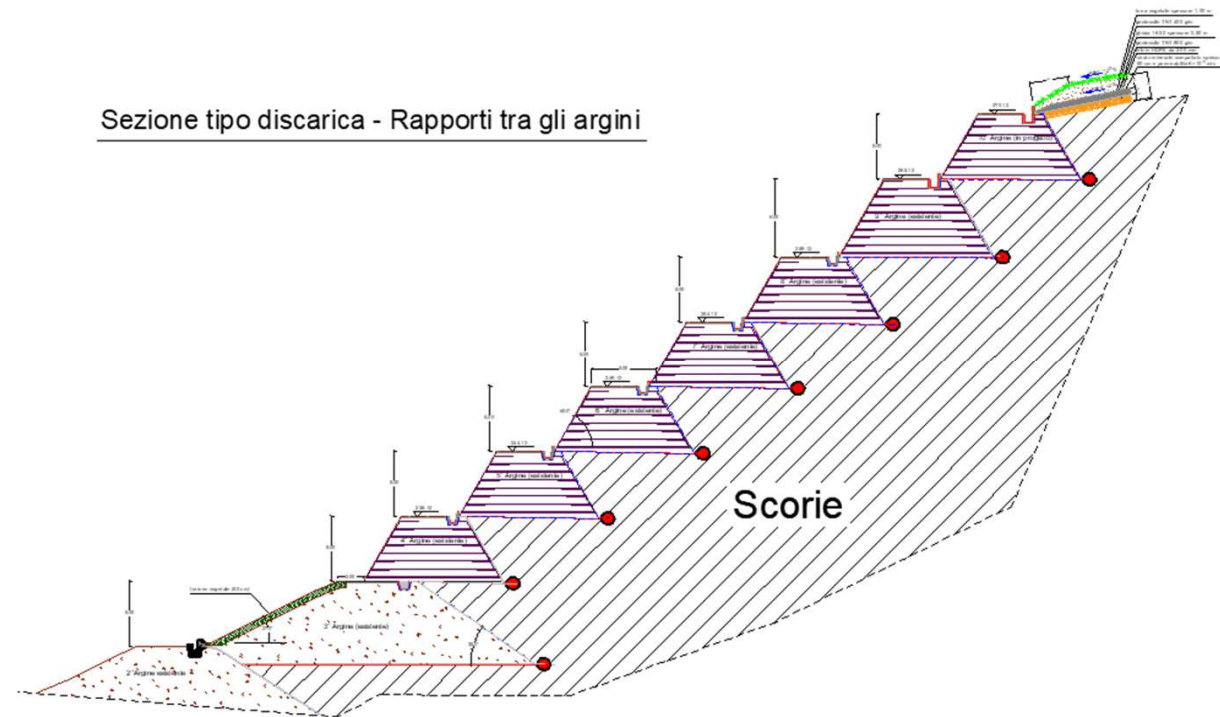
**Aggiunta di altri
3 rilevati**

Confronto tra la soluzione con rilevati non rinforzati e rinforzati

Case Histories: rilevati rinforzati sovrapposti

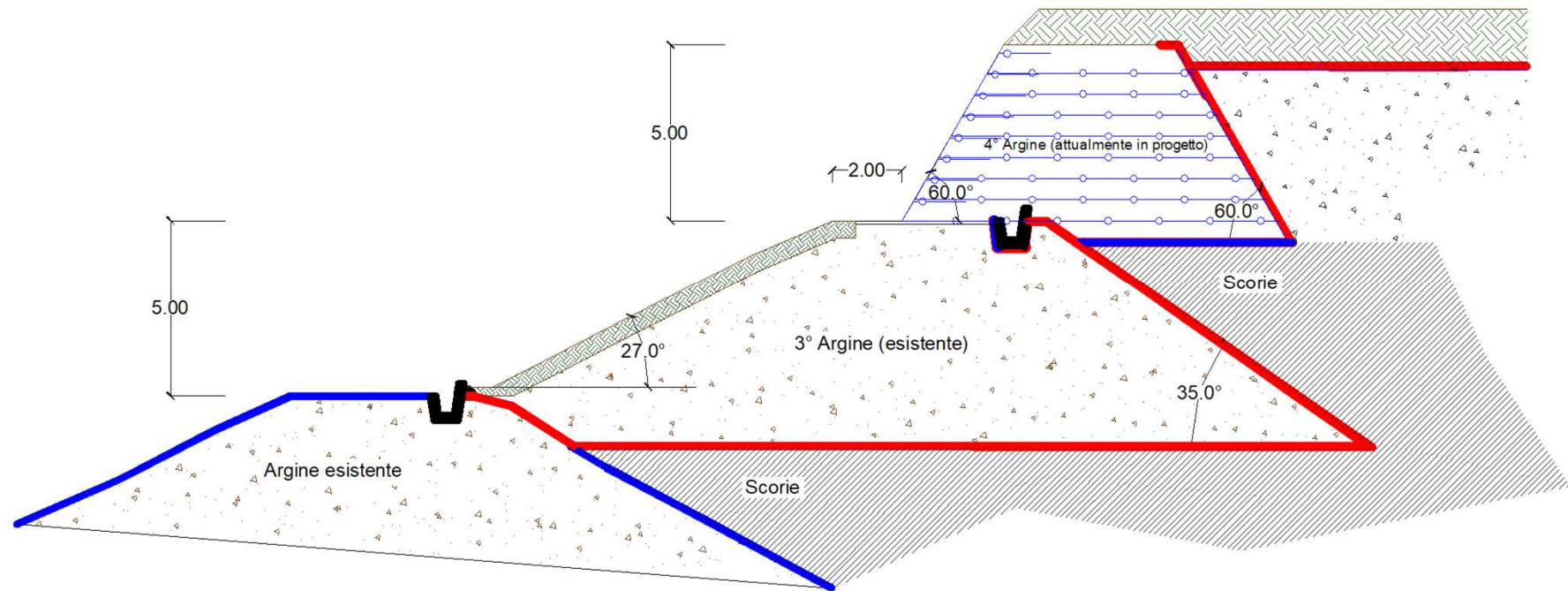
Discarica Genna e Luas

Per la realizzazione del sistema di contenimento laterale delle scorie della discarica Genna Luas, a partire dal 2006 fino all'anno 2018, sono stati realizzati 7 strutture in terra rinforzata (rilevati) di forma trapezia per sopraelevare la struttura esistente costituita da 3 rilevati non rinforzati. Le arginature trapezie in terra rinforzata sono caratterizzate da una inclinazione dei paramenti esterni ed interni pari a 60° , larghezza in cresta costante e pari a 5.00 m, altezza pari a 6.00 m per l'argine 9 e 5.00 m per i rimanenti rilevati (4, 5, 6, 7, 8 e 10).



Case Histories: rilevati rinforzati sovrapposti

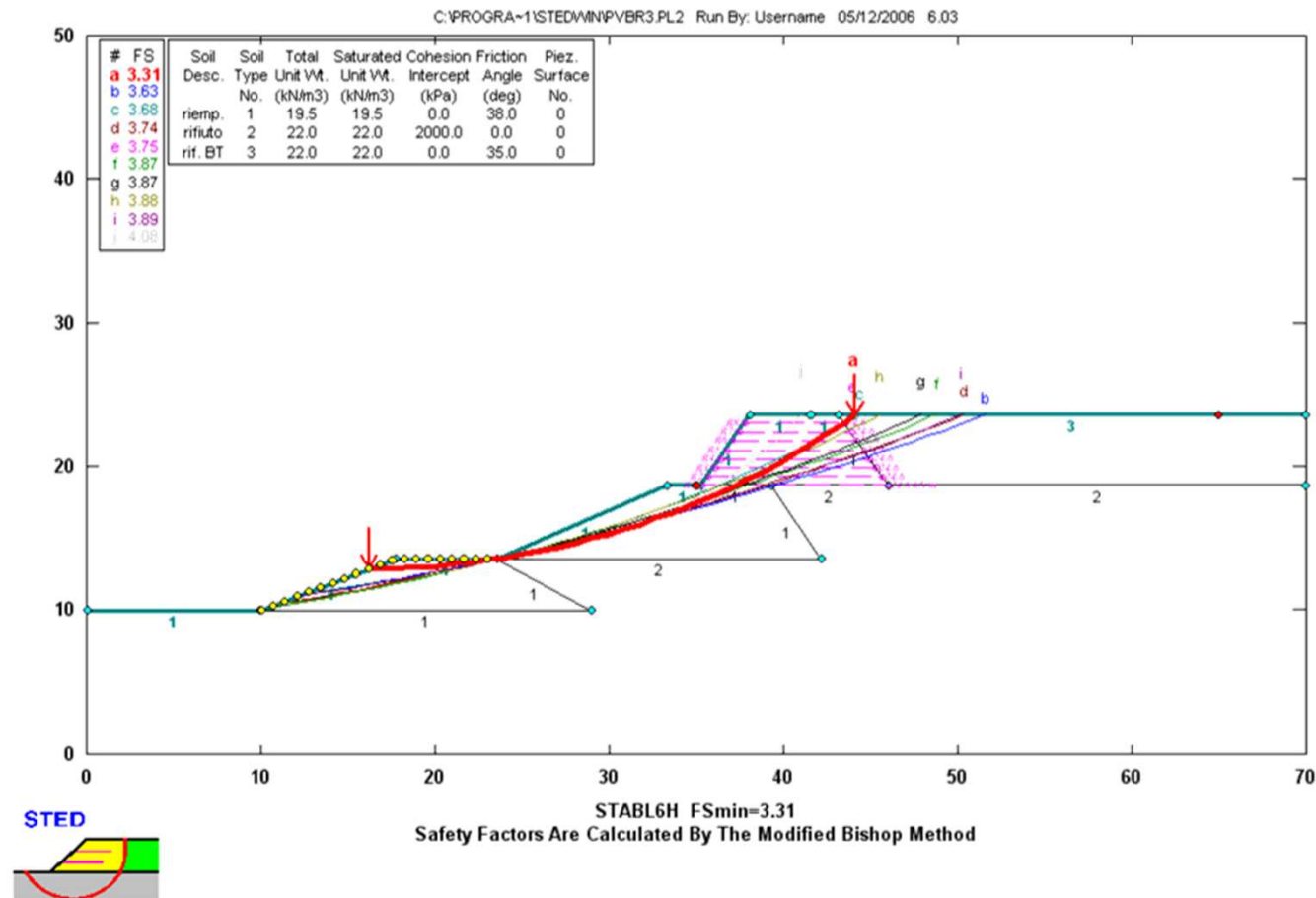
Discarica Genna e Luas



I° Fase Costruttiva

Case Histories: rilevati rinforzati sovrapposti

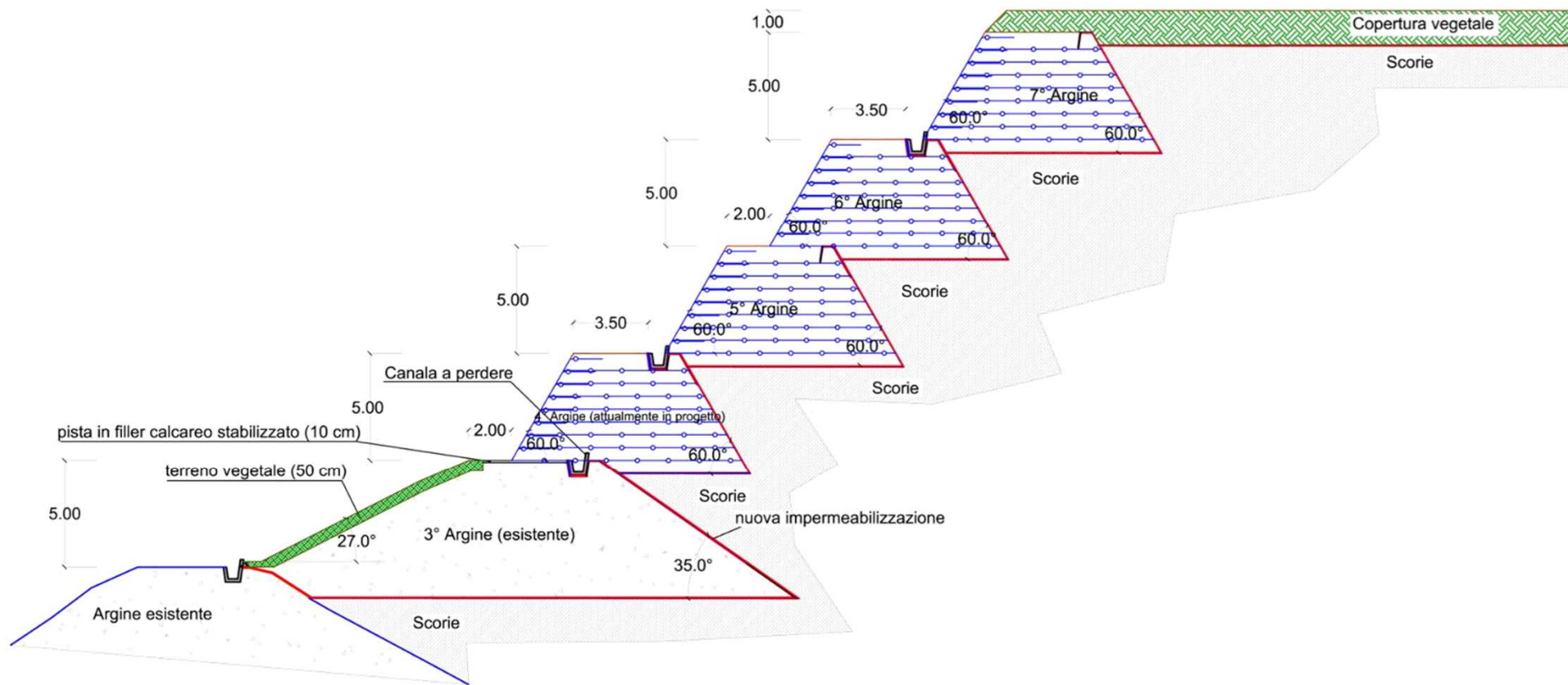
Discarica Genna e Luas



Analisi di stabilità a breve termine: rifiuti freschi
non consolidati

Case Histories: rilevati rinforzati sovrapposti

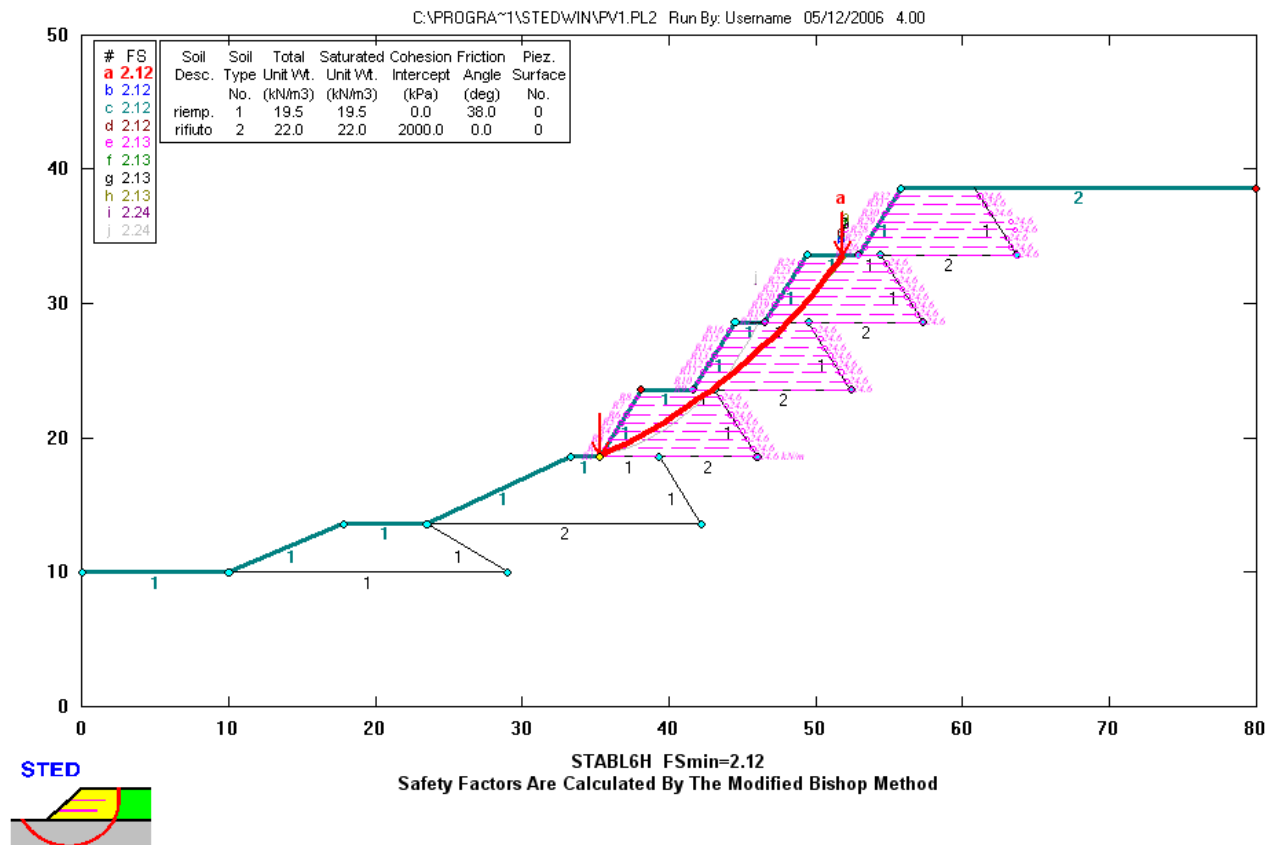
Discarica Genna e Luas



Fine della fase di costruzione 1 con rifiuti consolidati

Case Histories: rilevati rinforzati sovrapposti

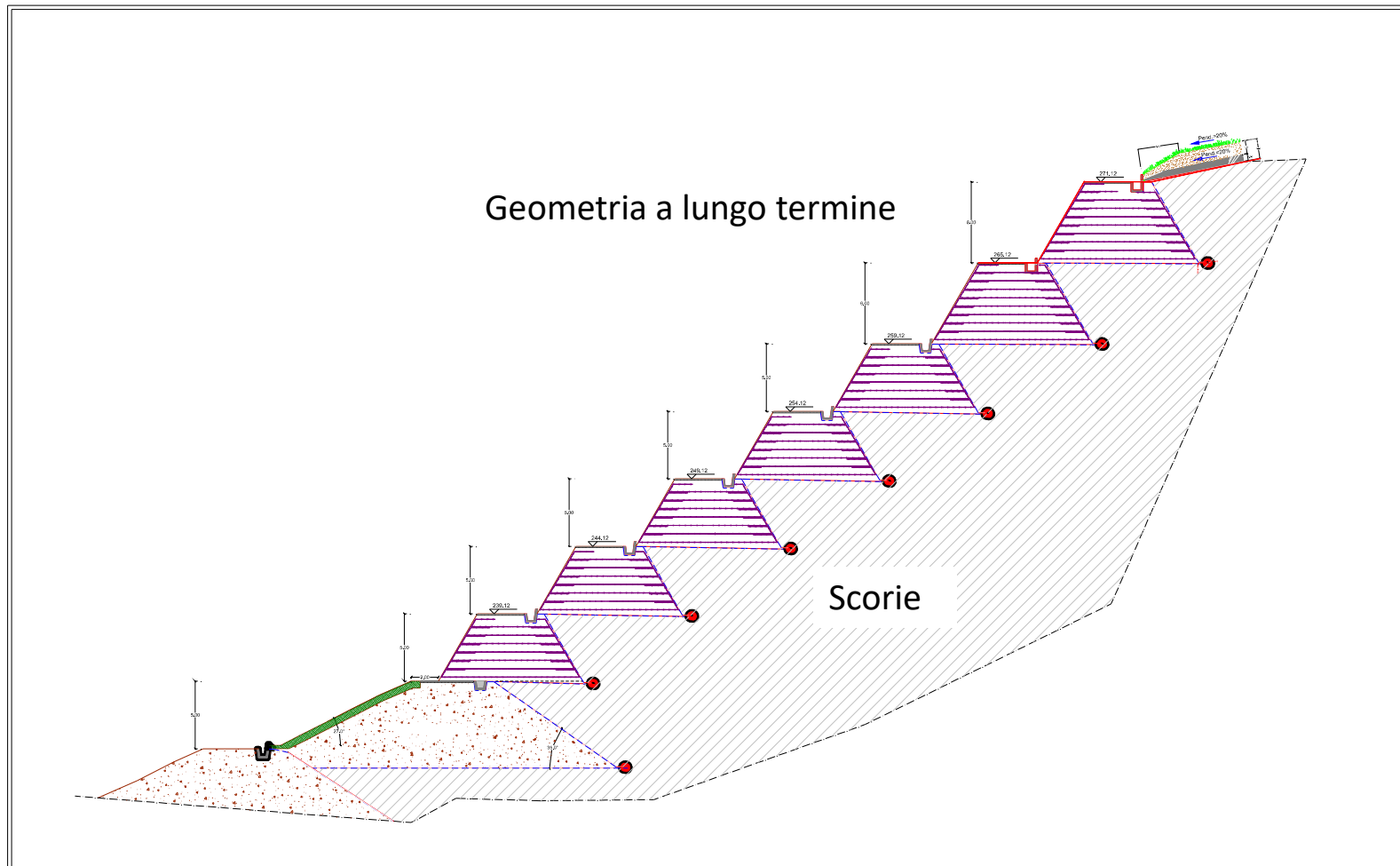
Discarica Genna e Luas



Analisi di stabilità a lungo termine: fine della fase di costruzione 1 con rifiuti consolidati

Case Histories: rilevati rinforzati

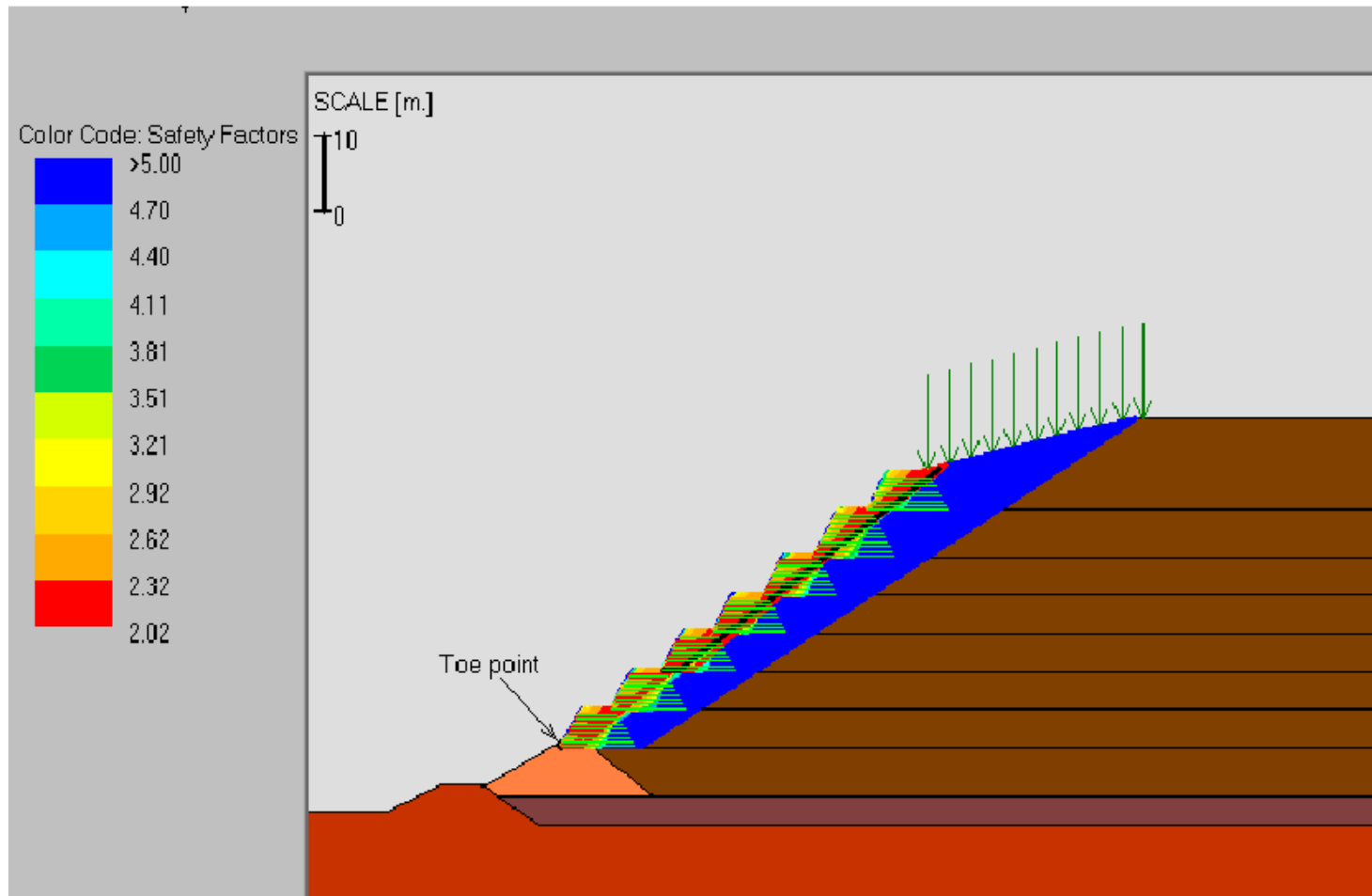
Discarica Genna e Luas



Situazione finale: fase 4 - aggiunta di altri 3 rilevati.

Case Histories: rilevati rinforzati sovrapposti

Discarica Genna e Luas

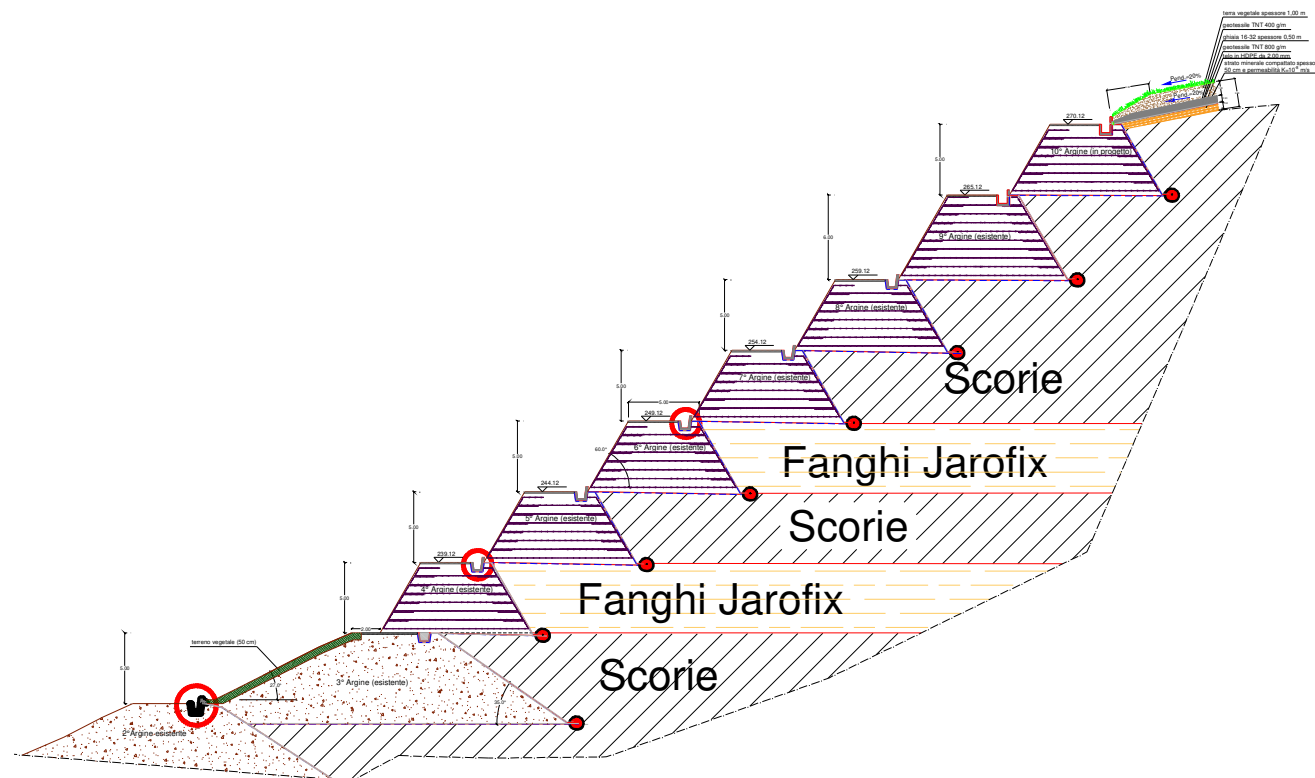


Nuova Analisi: verifica di stabilità dell'intera discarica

Case Histories: rilevati rinforzati sovrapposti

Discarica Genna e Luas

Nel febbraio 2021 è stata richiesta una nuova verifica di stabilità dell'intera discarica, in quanto, dalle informazioni ricevute si è appreso che a tergo delle arginature numero 4 e 6, per necessità logistiche di gestione dell'impianto, sono stati conferiti oltre che alle scorie anche materiali provenienti da fasi differenti della lavorazione (Fanghi Jarofix), caratterizzati da un maggiore contenuto d'acqua e da una minore consistenza.

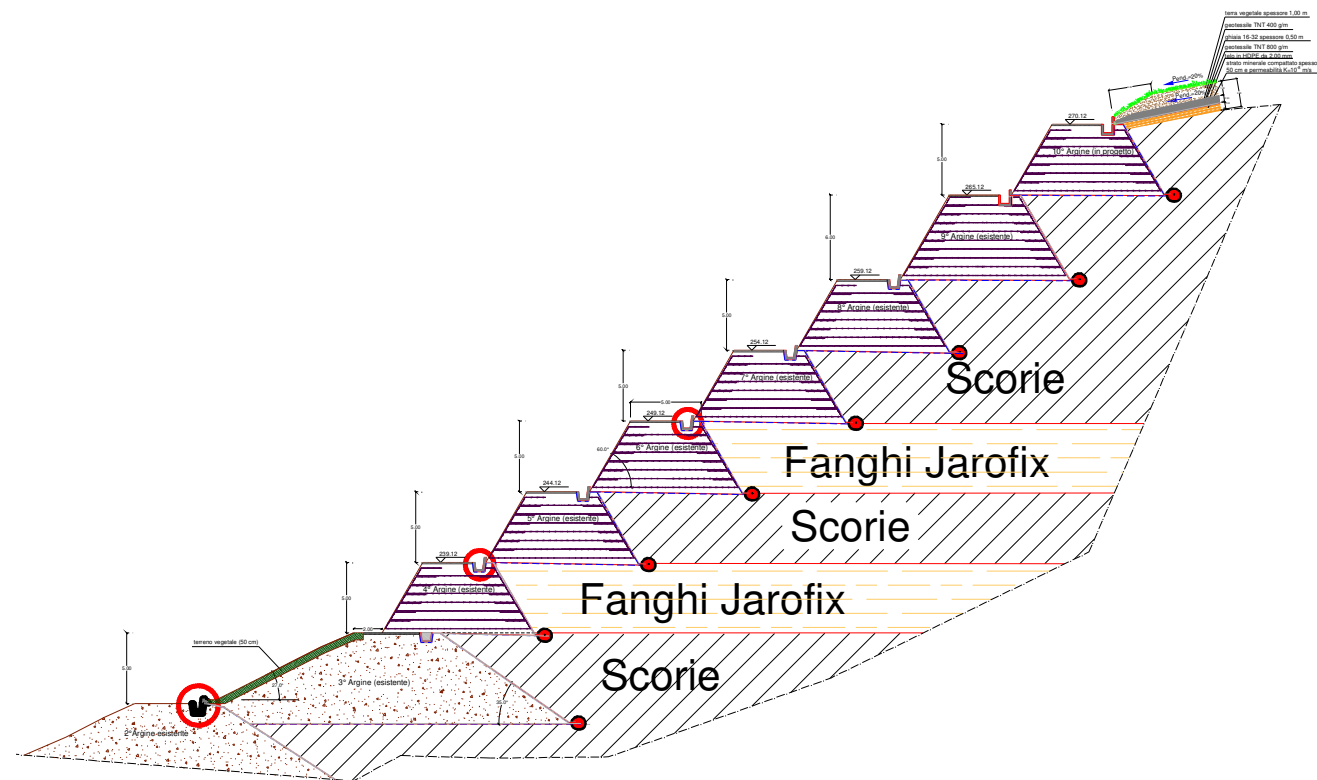


Nuova Analisi 2021: verifica di stabilità dell'intera discarica

Case Histories: rilevati rinforzati sovrapposti

Discarica Genna e Luas

Rispetto alle verifiche complessive dell'intero versante, che erano state effettuate considerando i parametri a lungo termine per le scorie ed un riempimento omogeneo per tutti gli strati di coltivazione, l'analisi della situazione reale ha evidenziato la presenza di due strati con una rilevante presenza di materiali di natura diversa, con caratteristiche meccaniche decisamente minori.



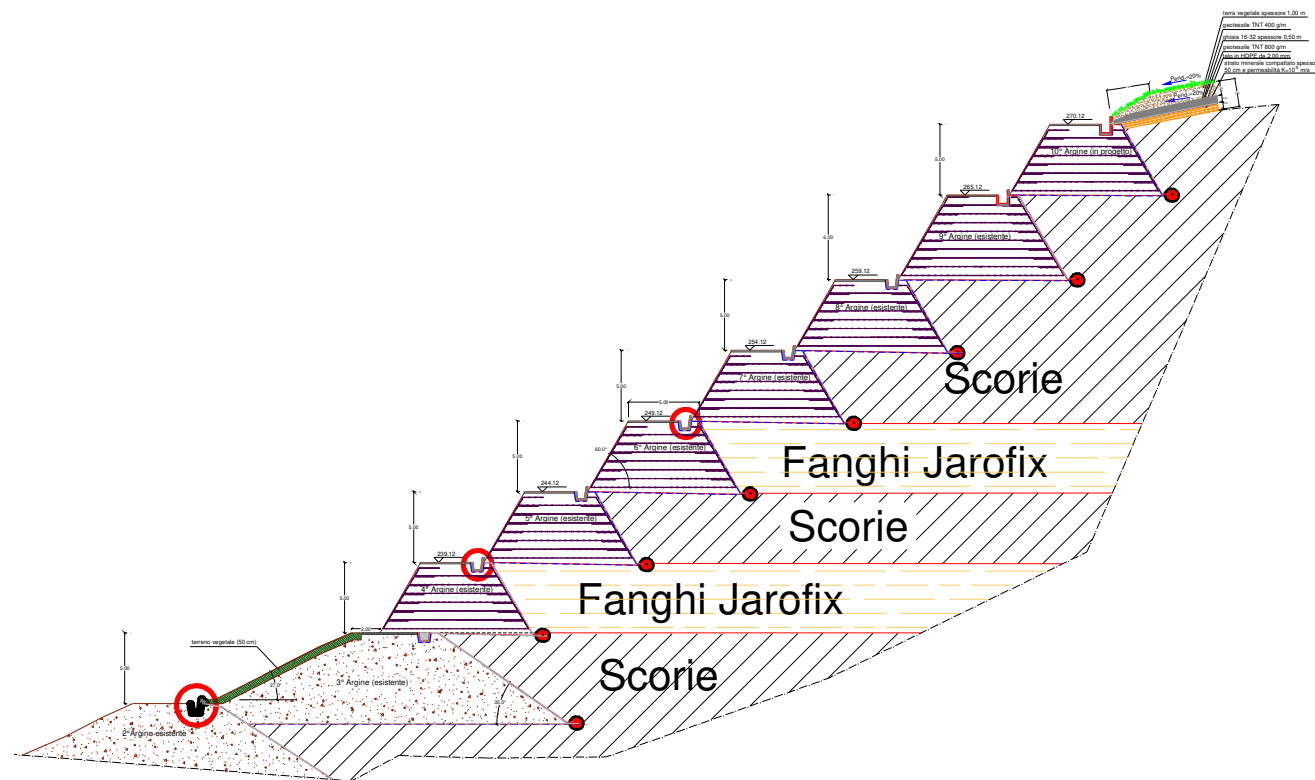
Nuova Analisi 2021: verifica di stabilità dell'intera discarica

Case Histories: rilevati rinforzati sovrapposti

Discarica Genna e Luas

Non essendo possibile stabilire l'esatta ubicazione dei fanghi all'interno della discarica si è preferito conservativamente fare l'ipotesi che:

- tutto il materiale conferito a tergo del 4° e del 6° argine sia fango Jarofix.
- gli strati di fango Jarofix siano presenti contemporaneamente sui due livelli della sezione di studio.



Nuova Analisi 2021: verifica di stabilità dell'intera discarica

Case Histories: rilevati rinforzati sovrapposti

Discarica Genna e Luas

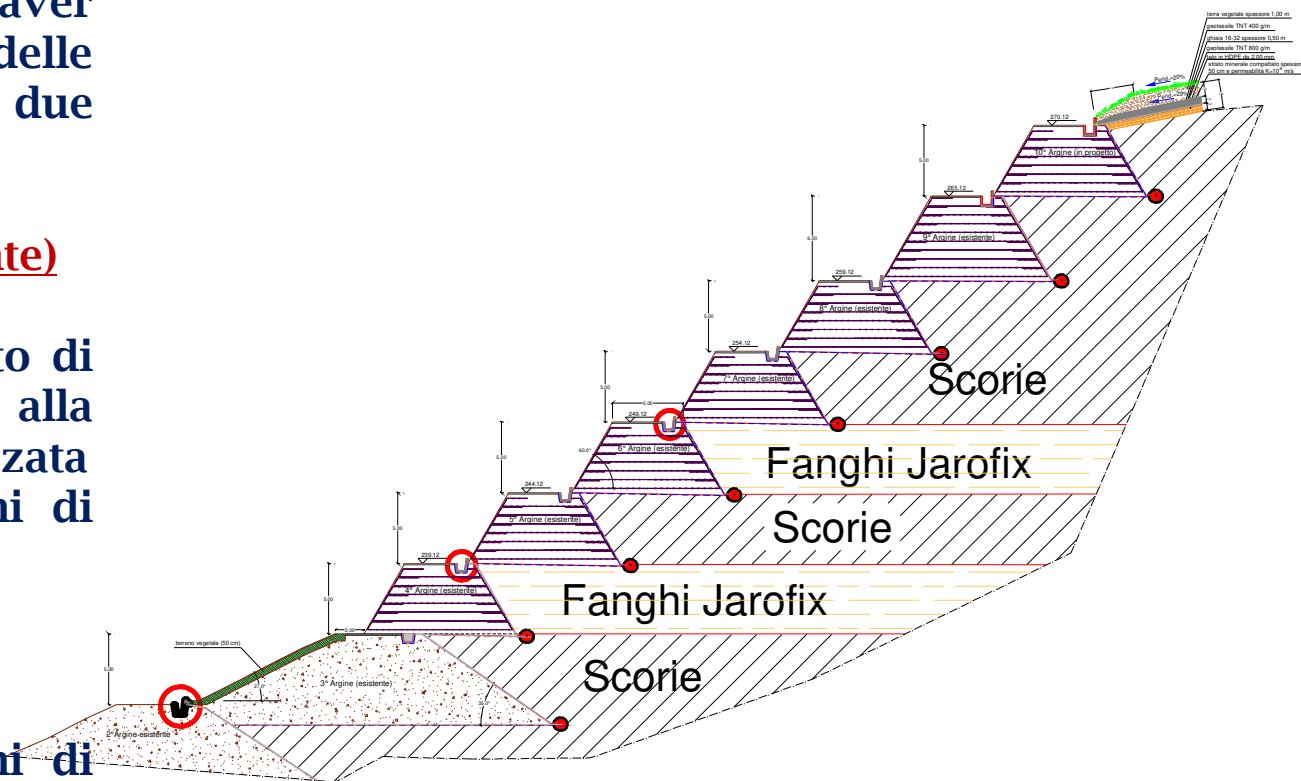
La percolazione di liquidi durante i processi di consolidazione dei fanghi può, inoltre, aver rallentato i processi di coesione delle scorie, sono quindi state aggiunte due verifiche:

Scenario A (medio termine – attuale o recente)

- 1: fanghi Jarofix a breve termine
- 2: scorie a tergo dell'argine 3 e al di sotto di esso a lungo termine (perché pre-esistenti alla costruzione del primo argine in terra rinforzata)
- 3: tutte le scorie rimanenti in condizioni di breve termine

Scenario B (lungo termine – finale)

- 1: fanghi Jarofix a breve termine
- 3: tutte le scorie rimanenti in condizioni di breve termine

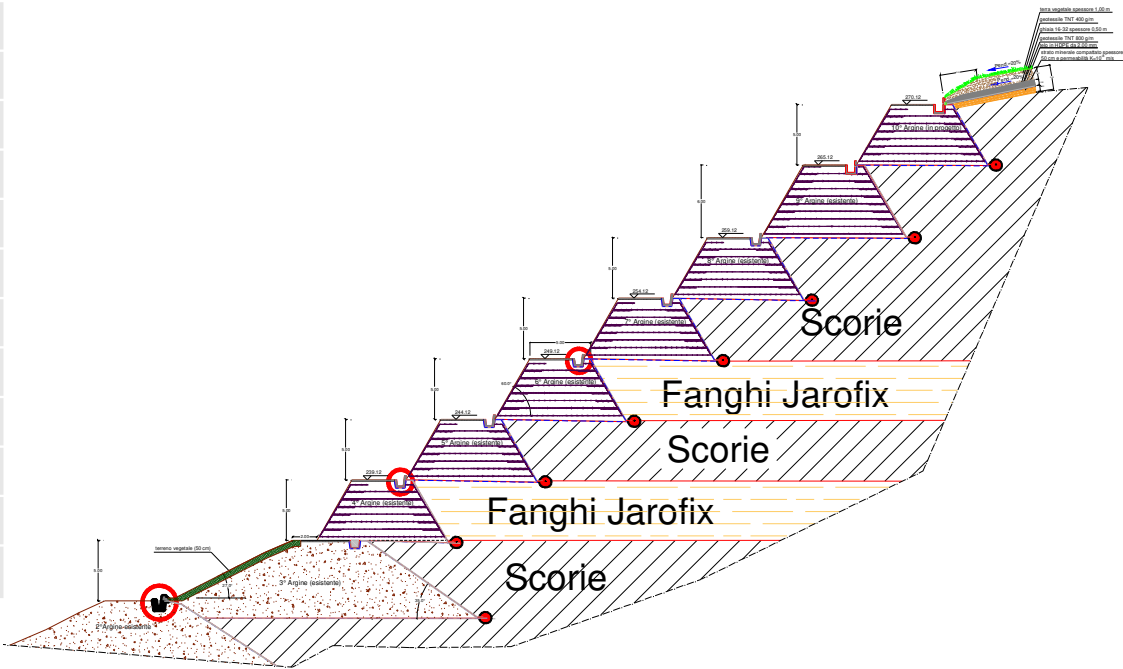


Nuova Analisi 2021: verifica di stabilità dell'intera discarica

Case Histories: rilevati rinforzati sovrapposti

Discarica Genna e Luas

Tipo analisi	Tipo verifica	Combinazione	FS richiesto	FS statico
Stabilità globale	SCENARIO A	A1+M1+R1	1.10	1.40
		A2+M2+R2	1.10	1.13
Verifica a scorrimento		A1+M1+R1	1.00	1.46
		A2+M2+R2	1.00	1.17
Stabilità globale	SCENARIO B	A1+M1+R1	1.10	7.86
		A2+M2+R2	1.10	6.39
Verifica a scorrimento		A1+M1+R1	1.00	1.90
		A2+M2+R2	1.00	1.65
Stabilità globale	VERIFICA PROGETTO ORIGINARIO	A1+M1+R1	1.10	8.31
		A2+M2+R2	1.10	6.76
Verifica a scorrimento		A1+M1+R1	1.00	2.02
		A2+M2+R2	1.00	1.85



Conclusioni:
 non sussistono dubbi sulla stabilità dell’opera.

Nuova Analisi 2021: verifica di stabilità dell’intera discarica

Case Histories: rilevati rinforzati sovrapposti Discarica Genna e Luas



Fasi di posa: allineamento dei casseri metallici

Case Histories: rilevati rinforzati sovrapposti Discarica Genna e Luas



Fasi di posa: stesa delle geogriglie di rinforzo

Case Histories: rilevati rinforzati sovrapposti

Discarica Genna e Luas



**Fasi di posa: stesa del terreno di riempimento
e compattazione**

Case Histories: rilevati rinforzati sovrapposti

Discarica Genna e Luas



Fasi di posa: Facciata esterna

Case Histories: rilevati rinforzati sovrapposti

Discarica Genna e Luas



Impermeabilizzazione: Geotessile antipunzonante - GCL - membrana HDPE

Case Histories: rilevati rinforzati sovrapposti

Discarica Genna e Luas



Fase di riempimento con rifiuti industriali (scorie minerarie)

Case Histories: rilevati rinforzati sovrapposti

Discarica Genna e Luas



Costruzione della trincea in cemento

Case Histories: rilevati rinforzati sovrapposti

Discarica Genna e Luas



Vista satellitare copertura finale

L'impiego di rilevati ripidi rinforzati: conclusioni

L'impiego di rilevati ripidi rinforzati fornisce molti vantaggi:

- un importante risparmio in termini di materiale di riempimento ed assicura un enorme aumento del volume disponibile;
- possibilità di realizzare i sistemi di barriera e di drenaggio durante le fasi di posa, riducendo il danneggiamento dovuto all'esposizione agli agenti atmosferici e distribuendo nel tempo i costi.
- un limite possono essere i possibili cedimenti della porzione di rilevato direttamente poggiante sui materiali di scarto (specialmente se deformabili).
- la possibilità di appoggiare parte del rilevato direttamente su quello inferiore e la capacità della struttura di assorbire sforzi e deformazioni piuttosto importanti senza perderne la funzionalità limita questo problema;
- i materiali costituenti i sistemi barriera potrebbero però subire deformazioni eccessive: una valutazione delle deformazioni è comunque necessaria.

Grazie per l'attenzione!!



Piergiorgio



Daniele