

# UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA



**Dipartimento di Ingegneria Civile, Edile, ed Ambientale**

**Corso di Laurea in Ingegneria Civile**

**Tesi Magistrale**

**Modellazione numerica tridimensionale ad elementi finiti  
di un sistema di copertura alternativo per una discarica di  
rifiuti solidi speciali non pericolosi**

Tridimensional finite-element modeling of an alternative cover system for  
a non-hazardous solid waste landfill

Relatore: Prof. Ing. Giampaolo Cortellazzo

Correlatore: Ing. Stefano Busana

Laureando: Enrico Mantoan

Matricola: 1061267

Anno accademico 2014-2015



# Sommario

|                                                                                 |    |
|---------------------------------------------------------------------------------|----|
| Introduzione.....                                                               | 5  |
| 1 Produzione di Rifiuti Solidi Urbani (RSU).....                                | 7  |
| 2 Descrizione delle discariche controllate. ....                                | 13 |
| 2.1 Sistemi di rivestimento e coperture.....                                    | 17 |
| 2.2 Geosintetici utilizzati nelle discariche controllate. ....                  | 19 |
| 2.3 Stabilità delle discariche controllate. ....                                | 21 |
| 3 Descrizione della discarica di Torretta di Legnago (VR). ....                 | 25 |
| 4 Analisi di Stabilità dei sistemi di copertura. Metodi Analitici. ....         | 29 |
| 4.1 Metodo di Koerner and Soong (1998) per il terreno di copertura.....         | 31 |
| 4.1.1 Riprofilatura del pendio, Koerner and Soong (1998). ....                  | 32 |
| 4.2 Metodo di Druschel and Underwood (1993) per il pacchetto di copertura. .... | 34 |
| 4.3 Metodo di Koerner and Soong con rinforzo (1998). ....                       | 36 |
| 4.4 Metodo di Giroud (1995). ....                                               | 37 |
| 4.5 Sezioni multi-pendio. ....                                                  | 39 |
| 4.6 Risultati.....                                                              | 45 |
| 5 Modellazione Numerica. ....                                                   | 51 |
| 5.1 Descrizione dei metodi numerici.....                                        | 51 |
| 5.1.1 FEM.....                                                                  | 51 |
| 5.1.2 DEM.....                                                                  | 52 |
| 5.2 Descrizione del pacchetto di copertura standard ed alternativo. ....        | 53 |
| 5.3 Descrizione del modello numerico.....                                       | 58 |
| 6 Applicazioni e Risultati. ....                                                | 65 |
| 6.1 Geogriglia completamente immorsata nel terreno. ....                        | 65 |
| 6.2 Analisi del pacchetto di copertura. ....                                    | 70 |
| 6.2.1 Copertura Standard.....                                                   | 70 |
| 6.2.2 Copertura Alternativa.....                                                | 75 |
| 6.3 Confronti. ....                                                             | 85 |
| 7 Conclusioni. ....                                                             | 91 |
| 8 Bibliografia. ....                                                            | 93 |

## Indice delle Figure.

|                                                                                                                                                                                                         |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 1-1 Flusso dei rifiuti solidi urbani. ....                                                                                                                                                       | 8  |
| Figura 1-2 Ripartizione percentuali della gestione dei rifiuti nell'UE, anno 2012 - dati ordinati per percentuali crescenti di smaltimento in discarica (Fonte: ISPRA, 2014) .....                      | 10 |
| Figura 1-3 Produzione pro capite di RU nell'UE (kg/abitante per anno), anni 2010 – 2012.....                                                                                                            | 12 |
| Figura 1-4 Quantità pro capite di rifiuti urbani smaltiti in discarica nell'UE (kg/abitante per anno), anni 2010 – 2012. ....                                                                           | 12 |
| Figura 2-1 Posizione di una discarica all'interno del ciclo idrologico. ....                                                                                                                            | 13 |
| Figura 2-2 Sviluppo e chiusura per una discarica di rifiuti solidi. ....                                                                                                                                | 14 |
| Figura 2-3 Sezione di una discarica. ....                                                                                                                                                               | 17 |
| Figura 2-4 Evoluzione dei rivestimenti di base delle discariche controllate.....                                                                                                                        | 18 |
| Figura 2-5 Sistemi di copertura tipo. ....                                                                                                                                                              | 18 |
| Figura 2-6 Posizioni dei geosintetici in una discarica. ....                                                                                                                                            | 20 |
| Figura 2-7 Situazioni di instabilità. ....                                                                                                                                                              | 22 |
| Figura 3-1 Pianta del sito in esame. ....                                                                                                                                                               | 28 |
| Figura 4-4-1 Rappresentazione del modello Koerner and Soong. ....                                                                                                                                       | 31 |
| Figura 4-4-2 Posizione e dimensioni della berma aggiuntiva. ....                                                                                                                                        | 33 |
| Figura 4-4-3 Schema di riprofilatura del pendio. ....                                                                                                                                                   | 33 |
| Figura 4-4-4 Rappresentazione del modello Druschel and Underwood. ....                                                                                                                                  | 34 |
| Figura 4-4-5 Poligonale delle forze.....                                                                                                                                                                | 35 |
| Figura 4-4-6 Rappresentazione del modello Koerner and Soong con rinforzo. ....                                                                                                                          | 36 |
| Figura 4-4-7 Rappresentazione del modello di Giroud ....                                                                                                                                                | 38 |
| Figura 4-4-8 Cuneo 1 e poligonale delle forze ....                                                                                                                                                      | 38 |
| Figura 4-4-9 Cuneo 2 e poligonale delle forze ....                                                                                                                                                      | 38 |
| Figura 4-4-10 Posizione ancoraggio per pendio isolato. ....                                                                                                                                             | 40 |
| Figura 4-4-11 Sistema multipendio con ancoraggi multipli. ....                                                                                                                                          | 40 |
| Figura 4-4-12 Sistema multipendio con un unico ancoraggio. ....                                                                                                                                         | 41 |
| Figura 4-4-13 Schema per pendio isolato. ....                                                                                                                                                           | 41 |
| Figura 4-4-14 Schema di calcolo per angoli convessi. ....                                                                                                                                               | 42 |
| Figura 4-4-15 Schema di calcolo per angoli concavi. ....                                                                                                                                                | 42 |
| Figura 4-4-16 Schema di calcolo completo. ....                                                                                                                                                          | 43 |
| Figura 4-17 Lotto A e Secondo tratto in alveo. ....                                                                                                                                                     | 45 |
| Figura 4-18 Lotto B. ....                                                                                                                                                                               | 45 |
| Figura 5-1 Schematizzazione FE. ....                                                                                                                                                                    | 51 |
| Figura 5-2 Schematizzazione DE. ....                                                                                                                                                                    | 52 |
| Figura 5-3 Geogriglia tridimensionale. ....                                                                                                                                                             | 54 |
| Figura 5-4 Interlocking. ....                                                                                                                                                                           | 54 |
| Figura 5-5 Copertura standard con geogriglia tridimensionale.....                                                                                                                                       | 55 |
| Figura 5-6 Esempio di geogriglie piane.....                                                                                                                                                             | 56 |
| Figura 5-7 Meccanismi di resistenza. ....                                                                                                                                                               | 56 |
| Figura 5-8 Dimensioni del geocomposito forato, a sinistra; zone di geogriglia beneficianti dell'immorsamento, in centro (evidenziate di nero); vuoti riempiti dal materiale di copertura, a destra..... | 57 |
| Figura 5-9 Geocomposito drenante forato.....                                                                                                                                                            | 57 |
| Figura 5-10 Sezione della copertura alternativa.....                                                                                                                                                    | 58 |
| Figura 5-11 Modellazione del terreno di copertura.....                                                                                                                                                  | 59 |
| Figura 5-12 Modellazione della geogriglia.....                                                                                                                                                          | 59 |
| Figura 5-13 Geogriglia piana. ....                                                                                                                                                                      | 60 |
| Figura 5-14 Modellazione del geocomposito drenante. ....                                                                                                                                                | 60 |
| Figura 5-15 Impronta della GGR sul GCD.....                                                                                                                                                             | 61 |
| Figura 5-16 Zone del GCD nelle quali si colloca il terreno.....                                                                                                                                         | 61 |
| Figura 5-17 Modello generale con la geogriglia evidenziata in rosso.....                                                                                                                                | 63 |
| Figura 6-1 Modello per il pullout (GGR evidenziata in rosso). ....                                                                                                                                      | 65 |
| Figura 6-2 Spostamento 1cm; GGR 3D a sinistra e Piana a destra; S22. ....                                                                                                                               | 66 |

|                                                                                                                                                                                 |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 6-3 Spostamento 5cm; GGR 3D a sinistra e Piana a destra; S22. ....                                                                                                       | 66 |
| Figura 6-4 Spostamento 13.58cm; GGR 3D a sinistra e Piana a destra; S22. ....                                                                                                   | 66 |
| Figura 6-5 Spostamento 1cm; GGR 3D a sinistra e Piana a destra; S23. ....                                                                                                       | 68 |
| Figura 6-6 Spostamento 5cm; GGR 3D a sinistra e Piana a destra; S23. ....                                                                                                       | 68 |
| Figura 6-7 Spostamento 13.58cm; GGR 3D a sinistra e Piana a destra; S23. ....                                                                                                   | 68 |
| Figura 6-8 Spostamento 13.58cm; GGR 3D a sinistra e Piana a destra; U2. ....                                                                                                    | 69 |
| Figura 6-9 Spostamento 5cm; GGR 3D a sinistra e Piana a destra; E22 ....                                                                                                        | 69 |
| Figura 6-10 Modello per la copertura standard (GGR evidenziata in rosso).....                                                                                                   | 70 |
| Figura 6-11 Spostamento 1cm; GGR 3D Standard; S22 ....                                                                                                                          | 71 |
| Figura 6-12 Spostamento 2cm; GGR 3D Standard; S22 ....                                                                                                                          | 71 |
| Figura 6-13 Spostamento 5cm; GGR 3D Standard; S22 ....                                                                                                                          | 72 |
| Figura 6-14 Spostamento 13.58cm; GGR 3D Standard; S22 ....                                                                                                                      | 72 |
| Figura 6-15 Spostamento 1cm; GGR 3D; S23. ....                                                                                                                                  | 73 |
| Figura 6-16 Spostamento 2cm; GGR 3D; S23. ....                                                                                                                                  | 73 |
| Figura 6-17 Spostamento 5cm; GGR 3D; S23. ....                                                                                                                                  | 73 |
| Figura 6-18 Spostamento 13.58cm; GGR 3D; S23. ....                                                                                                                              | 74 |
| Figura 6-19 Spostamento 13.58cm; GGR 3D; PEMAG. ....                                                                                                                            | 74 |
| Figura 6-20 Spostamento 13.58cm; GGR 3D; U2. ....                                                                                                                               | 75 |
| Figura 6-21 Modello generale; evidenziati in rosso: a sinistra GGR Piana; in centro GCD; a destra i vuoti del<br>GCD riempiti di terreno. ....                                  | 75 |
| Figura 6-22 Elementi combacianti; a destra il terreno con l'asse 3 positivo verso l'alto. ....                                                                                  | 76 |
| Figura 6-23 Set per la localizzazione del terreno nei fori. ....                                                                                                                | 76 |
| Figura 6-24 Spostamento 1cm; copertura, geocomposito, terreno nei vuoti; U2. ....                                                                                               | 77 |
| Figura 6-25 Sezione per la visualizzazione delle tensioni S22. ....                                                                                                             | 78 |
| Figura 6-26 Step iniziale, 0%. ....                                                                                                                                             | 78 |
| Figura 6-27 Step 14%. ....                                                                                                                                                      | 79 |
| Figura 6-28 Step 22%. ....                                                                                                                                                      | 79 |
| Figura 6-29 Step 69%. ....                                                                                                                                                      | 79 |
| Figura 6-30 Step 100%.....                                                                                                                                                      | 80 |
| Figura 6-31 Spostamento 13.58cm; S22. ....                                                                                                                                      | 81 |
| Figura 6-32 Sviluppo delle S22 nei principali elementi del modello. ....                                                                                                        | 81 |
| Figura 6-33 Spostamento 5cm; Terreno di copertura; U2. ....                                                                                                                     | 82 |
| Figura 6-34 Spostamento 5cm; CSHEAR2. ....                                                                                                                                      | 83 |
| Figura 6-35 Spostamento 5cm; GGR; S22 e RF2. ....                                                                                                                               | 83 |
| Figura 6-36 Spostamento 13.58cm; Terreno di copertura a sinistra con le zone a contatto col materiale<br>sottostante evidenziate in rosso; terreno nel GCD a destra; PEEQ. .... | 84 |
| Figura 6-37 Volumi coinvolti; Pullout a sinistra (GGR 3D), Standard in centro (GGR3D), Alternativa a destra<br>(GGR Piana). ....                                                | 85 |

## **Indice delle Tabelle.**

|                                                                                                                     |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tabella 1 Quantità di rifiuti urbani prodotti e smaltiti in discarica in Italia (tonnellate*1000), anni 2011- 2013. | 9  |
| Tabella 2 Valori pro capite relativi a produzione e gestione RU, ripartizione percentuale gestione RU nell'UE.      | 11 |
| Tabella 3 Funzione e descrizione dei geosintetici.                                                                  | 19 |
| Tabella 4 Sintesi del metodo di Giroud.                                                                             | 39 |
| Tabella 5 Suddivisione dei Lotti con il materiale utilizzato.                                                       | 46 |
| Tabella 6 Caratteristiche geotecniche dei materiali.                                                                | 46 |
| Tabella 7 Lotto A e Secondo Tratto in alveo; Sezioni 1-13 Sinistra.                                                 | 47 |
| Tabella 8 Lotto A e Secondo Tratto in alveo; Sezioni 1-13 Destra.                                                   | 47 |
| Tabella 9 Lotto A e Secondo Tratto in alveo; Sezioni 15-21 Sinistra.                                                | 48 |
| Tabella 10 Lotto A e Secondo Tratto in alveo; Sezioni 15-21 Destra.                                                 | 48 |
| Tabella 11 Lotto B; Sezioni 1-7.                                                                                    | 49 |
| Tabella 12 Caratteristiche meccaniche del terreno.                                                                  | 59 |
| Tabella 13 Caratteristiche meccaniche della geogriglia.                                                             | 60 |
| Tabella 14 Coefficienti per l'attrito all'interfaccia usando una geogriglia tridimensionale.                        | 62 |
| Tabella 15 Coefficienti per l'attrito all'interfaccia usando una geogriglia piana.                                  | 62 |

## **Indice dei Grafici.**

|                                                                     |    |
|---------------------------------------------------------------------|----|
| Grafico 1 Soluzione Standard; Distanza-Tensione.                    | 86 |
| Grafico 2 Soluzione Standard vs. Alternativa; Distanza-Tensione.    | 87 |
| Grafico 3 Tensioni sulla Geogriglia; Distanza-Rapporto Tensioni.    | 88 |
| Grafico 4 Effetto del GCD a scacchiera; Distanza-Rapporto Tensioni. | 89 |

## Introduzione.

Il presente lavoro si propone di analizzare le problematiche di stabilità della copertura di una discarica per rifiuti speciali non pericolosi. Ciò, nell'ambito della fase progettuale relativa al ripristino della funzionalità della copertura di due lotti esauriti (oggi in gestione post operativa), della discarica sita in località Torretta di Legnago (VR). L'attuale capping sommitale risulta inidoneo a garantire un'adeguata impermeabilità, data la continua e crescente produzione di percolato, la quale dovrebbe essere meno consistente per un sito chiuso come quello citato. La formazione del percolato non è da attribuire alla naturale degradazione dei rifiuti ivi stoccati, bensì, come accennato, all'infiltrazione delle acque meteoriche attraverso la copertura.

Lo smaltimento del percolato è un'operazione tanto più costosa, quanto più grande è il volume di liquido da smaltire. Risulta evidente pertanto la necessità di rimettere in funzione l'effetto impermeabilizzante della copertura. La posa in opera di una geomembrana in LDPE al di sopra dell'esistente barriera minerale, sovrastata da un geocomposito drenante, rappresenta la migliore soluzione individuata. Tale integrazione del pacchetto di copertura richiede, ovviamente, il completamento della stessa con uno strato di finitura "vegetale", con spessore minimo pari a 70 centimetri. I lotti in esame sono chiusi da molti anni e fenomeni di subsidenza, cedimenti differenziali ed eventuali sink-holes, si sono esauriti, potendosi quindi considerare le geometrie di tali lotti stabili e definite.

La soluzione sopra descritta, che garantisce il ripristino della funzionalità della copertura, introduce tuttavia una problematica di stabilità, soprattutto nelle zone di scarpata, caratterizzate da pendenze elevate, a causa del potenziale scivolamento nell'interfaccia tra elementi polimerici (geomembrana e geocomposito). In assenza di un'adeguata resistenza per attrito nella citata interfaccia, si ricorre alla posa in opera di un rinforzo, costituito da una geogriglia in HDPE.

In prima istanza si utilizzano i comuni metodi di stabilità dei pendii descritti in letteratura per ricavare i parametri minimi di resistenza del terreno, affinché la verifica alla stabilità dei vari tratti dell'opera sia soddisfatta. Verificato il Fattore di Sicurezza (FS) a scivolamento, si analizzerà una soluzione alternativa alla costosa geogriglia "3D", tramite l'impiego di una geogriglia piana, più economica rispetto a quella comunemente impiegata per pendii molto ripidi.

Tale situazione è legata all'efficacia dell'interazione griglia-terreno attivata dal cosiddetto "effetto spacer" tra i due componenti. Tale effetto, nel caso indagato, dovrebbe essere assicurato dalla particolare geometria del sottostante geocomposito drenante: forato "a scacchiera", alternando, in questo modo, zone con contatto geocomposito – geogriglia a zone cave riempite di terreno.

La suddetta scelta viene modellata tridimensionalmente attraverso un programma ad elementi finiti. I risultati serviranno poi come guida per la realizzazione di un campo prova, che consentirà di validare anche sperimentalmente il modello matematico e di definire in maniera ancor più precisa i parametri che lo qualificano.

La finalità di questo elaborato è dunque la conferma o meno di utilizzo di una nuova soluzione innovativa, più economica, per le coperture in pendio, mediante analisi numeriche ad elementi finiti.

Si illustra di seguito una rapida descrizione dei Capitoli presenti.

Il Capitolo 1 prende in esame le problematiche connesse con la produzione dei rifiuti solidi urbani in Italia e in Europa, evidenziando la necessità, non solo di manutenzione per le discariche chiuse, ma anche del progetto di nuovi siti, data la persistente esigenza di conferimento in discarica come procedura di smaltimento.

Nel Capitolo 2 si descrivono le caratteristiche delle discariche, e si illustrano le principali problematiche di stabilità.

Il Capitolo 3 descrive il sito oggetto dell'intervento, con l'ausilio di una relazione tecnica elaborata nel 2014 dall'Ing. S. Busana.

Il Capitolo 4 esamina i principali metodi di letteratura utilizzati nello studio della stabilità dei pendii.

Il Capitolo 5 analizza i metodi numerici sia ad elementi distinti (DEM) che ad elementi finiti (FEM) e descrive in dettaglio la proposta di geocomposito drenante alternativo e il modello numerico impiegato per la sua rappresentazione.

Nel Capitolo 6 vengono esposti i risultati emersi dalle analisi effettuate e dal loro confronto.

Il Capitolo 7 illustra le considerazioni finali per le diverse modellazioni numeriche, al variare delle scelte progettuali, evidenziando pregi e difetti delle soluzioni adottate.

L'elaborato si conclude con l'elenco bibliografico.

# 1 Produzione di Rifiuti Solidi Urbani (RSU).

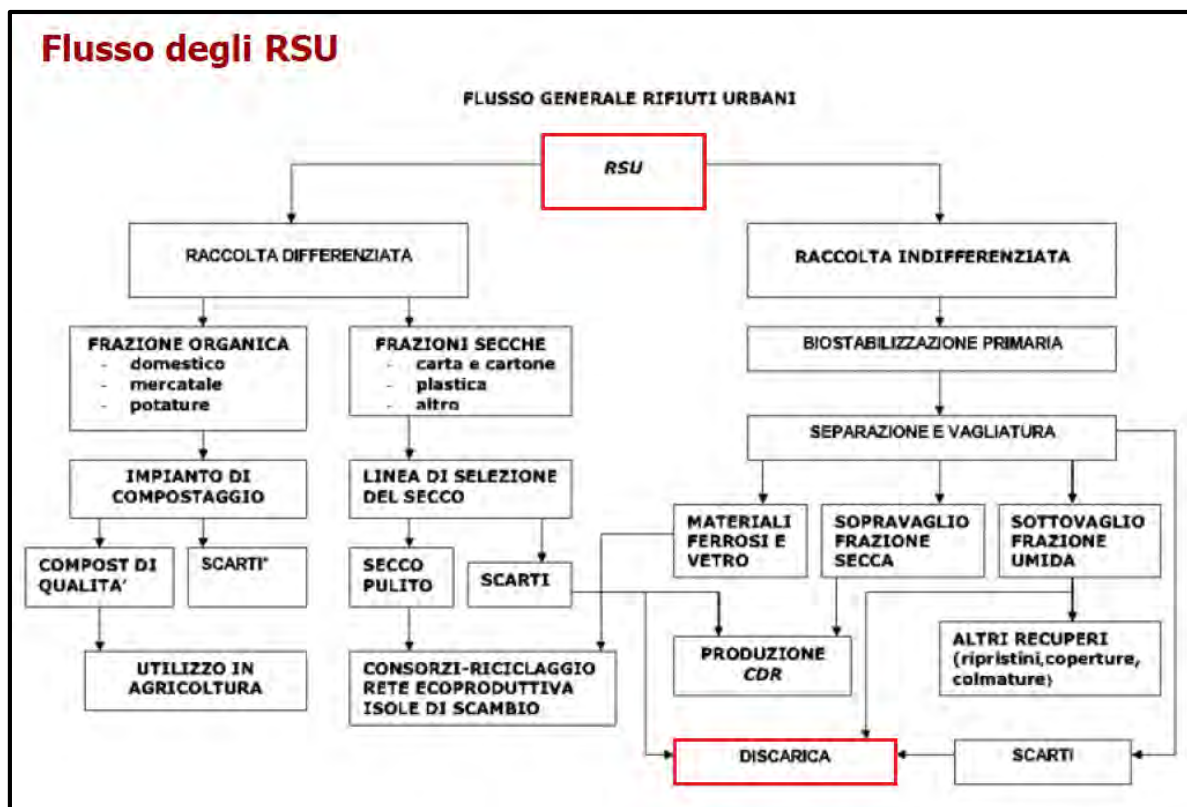
La discarica è un ambiente localizzato in grado di smaltire in maniera corretta e controllata ciò che in essa viene conferito, cioè il rifiuto. Quest'ultimo è definito, come riporta il D.Lgs. 205/2010 art. 10, "qualsiasi sostanza od oggetto di cui il detentore si disfi o abbia l'intenzione o l'obbligo di disfarsi". Ci si può occupare di questo materiale anche con approcci diversi, ad esempio:

- Riciclaggio: "qualsiasi operazione di recupero attraverso cui i rifiuti sono trattati per ottenere prodotti, materiali o sostanze da utilizzare per la loro funzione originaria o per altri fini. Include il trattamento di materiale organico, ma non il recupero di energia né il ritrattamento, per ottenere materiali da utilizzare quali combustibili o in operazioni di riempimento",
- Recupero: "qualsiasi operazione il cui principale risultato sia di permettere ai rifiuti di svolgere un ruolo utile, sostituendo altri materiali che sarebbero stati altrimenti utilizzati per assolvere una particolare funzione o di prepararli ad assolvere tale funzione, all'interno dell'impianto o all'economia in generale",
- Riutilizzo:  
"qualsiasi operazione attraverso la quale prodotti o componenti che non sono rifiuti, sono reimpiegati per la stessa finalità per la quale erano stati concepiti".

Qualora non si riesca a sviluppare una delle precedenti procedure si può ricorrere allo smaltimento, ovvero "qualsiasi operazione diversa dal recupero anche quando l'operazione ha come conseguenza secondaria il recupero di sostanze o di energia (ad esempio termovalorizzazione, prolisi, gassificazione). L'Allegato B alla parte IV riporta un elenco non esaustivo delle operazioni di smaltimento [...]: D1 - Deposito sul o nel suolo (ad esempio discarica). D2 - Trattamento in ambiente terrestre (ad esempio biodegradazione di rifiuti liquidi o fanghi nei suoli). D3 - Iniezioni in profondità (ad esempio iniezioni dei rifiuti pompabili in pozzi, in cupole saline o faglie geologiche naturali). D4 - Lagunaggio (ad esempio scarico di rifiuti liquidi o di fanghi in pozzi, stagni o lagune, ecc.). D5 - Messa in discarica specialmente allestita (ad esempio sistematizzazione in alveoli stagni, separati, ricoperti o isolati gli uni dagli altri e dall'ambiente). D6 - Scarico dei rifiuti solidi nell'ambiente idrico eccetto l'immersione. D7 - Immersione, compreso il seppellimento nel sottosuolo marino. D8 - Trattamento biologico non specificato altrove nel presente allegato, che dia origine a composti o a miscugli che vengono eliminati secondo uno dei procedimenti elencati nei punti da D1 a D12. D9 - Trattamento fisico-chimico non specificato altrove nel presente allegato, che dia origine a composti o a miscugli eliminati secondo uno dei procedimenti elencati nei punti da D1 a D12 (ad esempio

evaporazione, essiccazione, calcinazione, ecc.). D10 - Incenerimento a terra. D11 - Incenerimento in mare. D12 - Deposito permanente (ad esempio sistemazione di contenitori in una miniera).

Come si evidenzia in Figura 1-1, il conferimento in discarica è l'ultima modalità per liberarsi in maniera legale di rifiuti (con CDR si intende il combustibile da rifiuto).



*Figura 1-1 Flusso dei rifiuti solidi urbani.*

Almeno per il momento non è ancora realizzabile nel contesto Europeo ed in Italia il riutilizzo e/o recupero totale dei rifiuti prodotti. Nel nostro Paese, infatti, da un'analisi critica dei dati raccolti nel "Rapporto sui rifiuti urbani 2014" (curato dall'Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale – ISPRA), emerge che il conferimento in discarica è la forma di smaltimento finale più diffusa, rappresentandone il 37%. Pur esistendo una crescente sensibilità alle procedure di riciclo, le stesse non sono ancora uniformemente diffuse e sviluppate sul territorio nazionale, Tabella 1.

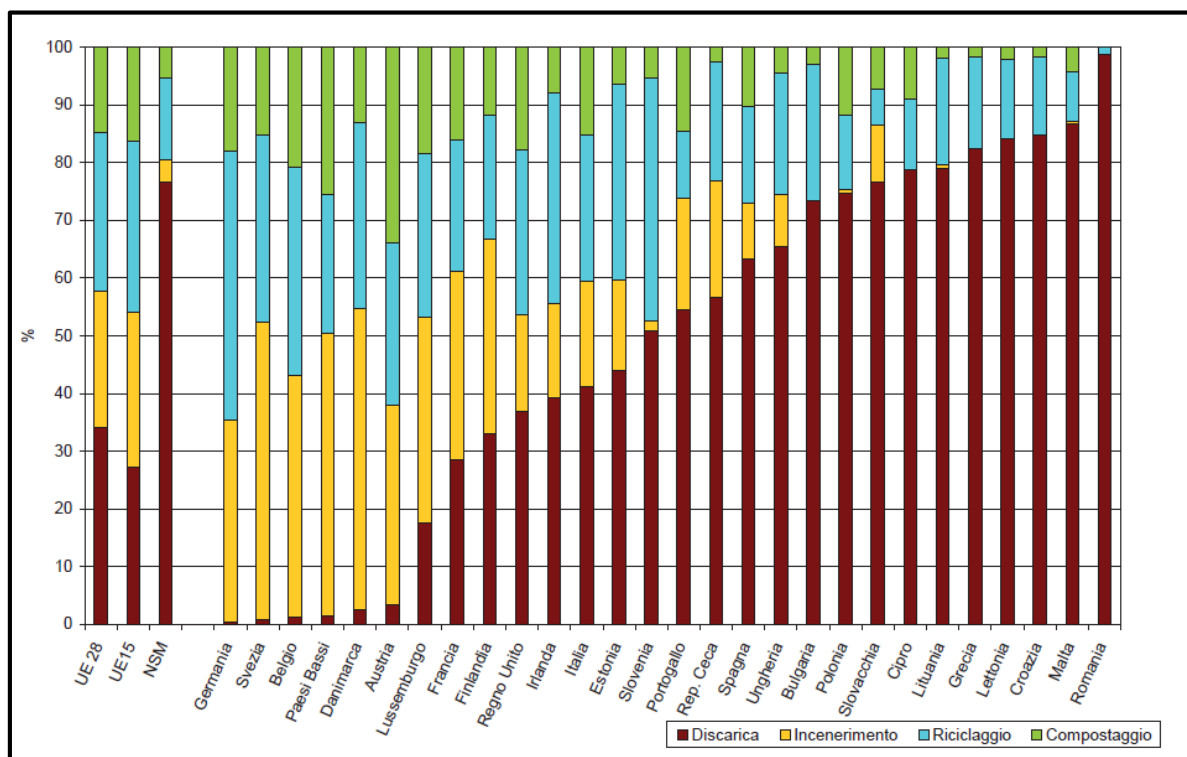
| Regioni               | 2011          |                       |           | 2012          |                       |           | 2013          |                       |           |
|-----------------------|---------------|-----------------------|-----------|---------------|-----------------------|-----------|---------------|-----------------------|-----------|
|                       | Produzione    | Smaltiti in discarica | %         | Produzione    | Smaltiti in discarica | %         | Produzione    | Smaltiti in discarica | %         |
| Piemonte              | 2.160         | 910                   | 42        | 2.027         | 736                   | 36        | 2.004         | 723                   | 36        |
| Valle d' Aosta        | 78            | 45                    | 58        | 77            | 42                    | 55        | 73            | 40                    | 55        |
| Lombardia             | 4.824         | 322                   | 7         | 4.627         | 366                   | 8         | 4.595         | 268                   | 6         |
| Trentino Alto Adige   | 522           | 134                   | 26        | 505           | 123                   | 24        | 495           | 94                    | 19        |
| Veneto                | 2.305         | 318                   | 14        | 2.214         | 241                   | 11        | 2.213         | 197                   | 9         |
| Friuli Venezia Giulia | 575           | 71                    | 12        | 551           | 40                    | 7         | 546           | 37                    | 7         |
| Liguria               | 962           | 714                   | 74        | 919           | 608                   | 66        | 890           | 569                   | 64        |
| Emilia Romagna        | 2.919         | 727                   | 25        | 2.801         | 839                   | 30        | 2.780         | 857                   | 31        |
| <b>Nord</b>           | <b>14.345</b> | <b>3.240</b>          | <b>23</b> | <b>13.720</b> | <b>2.995</b>          | <b>22</b> | <b>13.595</b> | <b>2.784</b>          | <b>20</b> |
| Toscana               | 2.373         | 1.008                 | 42        | 2.253         | 957                   | 42        | 2.234         | 833                   | 37        |
| Umbria                | 507           | 315                   | 62        | 488           | 292                   | 60        | 470           | 257                   | 55        |
| Marche                | 822           | 503                   | 61        | 801           | 455                   | 57        | 764           | 397                   | 52        |
| Lazio                 | 3.316         | 2.357                 | 71        | 3.199         | 2.085                 | 65        | 3.160         | 1.446                 | 46        |
| <b>Centro</b>         | <b>7.018</b>  | <b>4.183</b>          | <b>60</b> | <b>6.741</b>  | <b>3.790</b>          | <b>56</b> | <b>6.628</b>  | <b>2.933</b>          | <b>44</b> |
| Abruzzo               | 662           | 248                   | 37        | 627           | 118                   | 19        | 600           | 93                    | 15        |
| Molise                | 133           | 121                   | 91        | 127           | 133                   | 105       | 124           | 141                   | 113       |
| Campania              | 2.640         | 645                   | 24        | 2.554         | 320                   | 13        | 2.545         | 493                   | 19        |
| Puglia                | 2.095         | 1.229                 | 59        | 1.972         | 1.236                 | 63        | 1.928         | 1.284                 | 67        |
| Basilicata            | 220           | 175                   | 80        | 219           | 120                   | 55        | 207           | 119                   | 57        |
| Calabria              | 898           | 669                   | 75        | 852           | 697                   | 82        | 833           | 591                   | 71        |
| Sicilia               | 2.580         | 2.341                 | 91        | 2.426         | 2.023                 | 83        | 2.391         | 2.227                 | 93        |
| Sardegna              | 795           | 355                   | 45        | 755           | 289                   | 38        | 742           | 255                   | 34        |
| <b>Sud</b>            | <b>10.023</b> | <b>5.783</b>          | <b>58</b> | <b>9.532</b>  | <b>4.936</b>          | <b>52</b> | <b>9.371</b>  | <b>5.203</b>          | <b>56</b> |
| <b>Italia</b>         | <b>31.386</b> | <b>13.206</b>         | <b>42</b> | <b>29.994</b> | <b>11.720</b>         | <b>39</b> | <b>29.595</b> | <b>10.921</b>         | <b>37</b> |

**Tabella 1** *Quantità di rifiuti urbani prodotti e smaltiti in discarica in Italia (tonnellate\*1000), anni 2011-2013.*

Da una panoramica nei 28 Stati membri d'Europa si nota che tra le forme di gestione dei rifiuti adottate (conferimenti in discarica, incenerimento, riciclaggio, compostaggio), la media più alta, circa il 34% dei rifiuti urbani gestiti, è detenuta dallo smaltimento in discarica (Figura 1-2, Figura 1-3, Figura 1-4e Tabella 2). Pertanto anche se si punta ad una sempre maggiore riduzione dei rifiuti da smaltire, incentivando il riutilizzo, reimpiego, riciclaggio e recupero, per alcuni anni occorrerà in ogni caso prevedere la messa a dimora di almeno una parte residua di essi.

La realizzazione delle discariche rimane, quindi, una tematica importante e delicata in quanto, sia la localizzazione che la progettazione devono prediligere la massimizzazione delle garanzie relative alla salvaguardia dell'ambiente destinato ad ospitare i rifiuti, seppur non pericolosi.

Le discariche controllate sono ambienti localizzati e progettati per garantire, per un tempo sufficientemente lungo, una messa a dimora dei rifiuti la più sicura possibile. Di conseguenza, per una corretta progettazione e gestione di una discarica, si devono prevedere, oltre a idonee modalità di realizzazione, anche opportune operazioni relative alla coltivazione e alla post-gestione.



**Figura 1-2 Ripartizione percentuali della gestione dei rifiuti nell'UE, anno 2012 - dati ordinati per percentuali crescenti di smaltimento in discarica (Fonte: ISPRA, 2014)**

| Paese/<br>Raggruppamento | RU prodotto<br>(kg/abitante per<br>anno ) | RU trattato (kg/<br>abitante<br>per anno) | RU trattato (%) |               |             |              |
|--------------------------|-------------------------------------------|-------------------------------------------|-----------------|---------------|-------------|--------------|
|                          |                                           |                                           | Discarica       | Incenerimento | Riciclaggio | Compostaggio |
| UE 28                    | 489                                       | 475                                       | 34              | 24            | 27          | 15           |
| UE 15                    | 523                                       | 517                                       | 27              | 27            | 30          | 16           |
| NSM                      | 358                                       | 315                                       | 77              | 4             | 14          | 5            |
| Belgio                   | 456                                       | 458                                       | 1               | 42            | 36          | 21           |
| Bulgaria                 | 460                                       | 433                                       | 73              | 0             | 24          | 3            |
| Rep. Ceca                | 308                                       | 308                                       | 57              | 20            | 21          | 3            |
| Danimarca                | 668                                       | 668                                       | 3               | 52            | 32          | 13           |
| Germania (s)             | 611                                       | 610                                       | 0               | 35            | 47          | 18           |
| Estonia                  | 279                                       | 220                                       | 44              | 16            | 34          | 6            |
| Irlanda (s)              | 570                                       | 570                                       | 39              | 16            | 37          | 8            |
| Grecia                   | 503                                       | 493                                       | 82              | 0             | 16          | 2            |
| Spagna (s)               | 464                                       | 464                                       | 63              | 10            | 17          | 10           |
| Francia (s)              | 534                                       | 534                                       | 28              | 33            | 23          | 16           |
| Croazia                  | 391                                       | 381                                       | 85              | 0             | 14          | 2            |
| Italia                   | 505                                       | 476                                       | 41              | 18            | 26          | 15           |
| Cipro (s)                | 663                                       | 663                                       | 79              | 0             | 12          | 9            |
| Lettonia                 | 301                                       | 301                                       | 84              | 0             | 14          | 2            |
| Lituania (s)             | 469                                       | 458                                       | 79              | 1             | 19          | 2            |
| Lussemburgo (s)          | 662                                       | 662                                       | 18              | 36            | 28          | 19           |
| Ungheria                 | 402                                       | 402                                       | 65              | 9             | 21          | 5            |
| Malta                    | 589                                       | 559                                       | 87              | 0             | 9           | 4            |
| Paesi Bassi              | 551                                       | 551                                       | 2               | 49            | 24          | 26           |
| Austria (s)              | 552                                       | 528                                       | 3               | 35            | 28          | 34           |
| Polonia (s)              | 314                                       | 249                                       | 75              | 1             | 13          | 12           |
| Portogallo               | 453                                       | 453                                       | 54              | 20            | 12          | 15           |
| Romania (s)              | 389                                       | 313                                       | 99              | 0             | 1           | 0            |
| Slovenia                 | 362                                       | 301                                       | 51              | 2             | 42          | 5            |
| Slovacchia               | 324                                       | 313                                       | 77              | 10            | 6           | 7            |
| Finlandia                | 506                                       | 506                                       | 33              | 34            | 22          | 12           |
| Svezia                   | 462                                       | 462                                       | 1               | 52            | 32          | 15           |
| Regno Unito (s)          | 472                                       | 465                                       | 37              | 17            | 28          | 18           |

**Tabella 2 Valori pro capite relativi a produzione e gestione RU, ripartizione percentuale gestione RU nell'UE.**

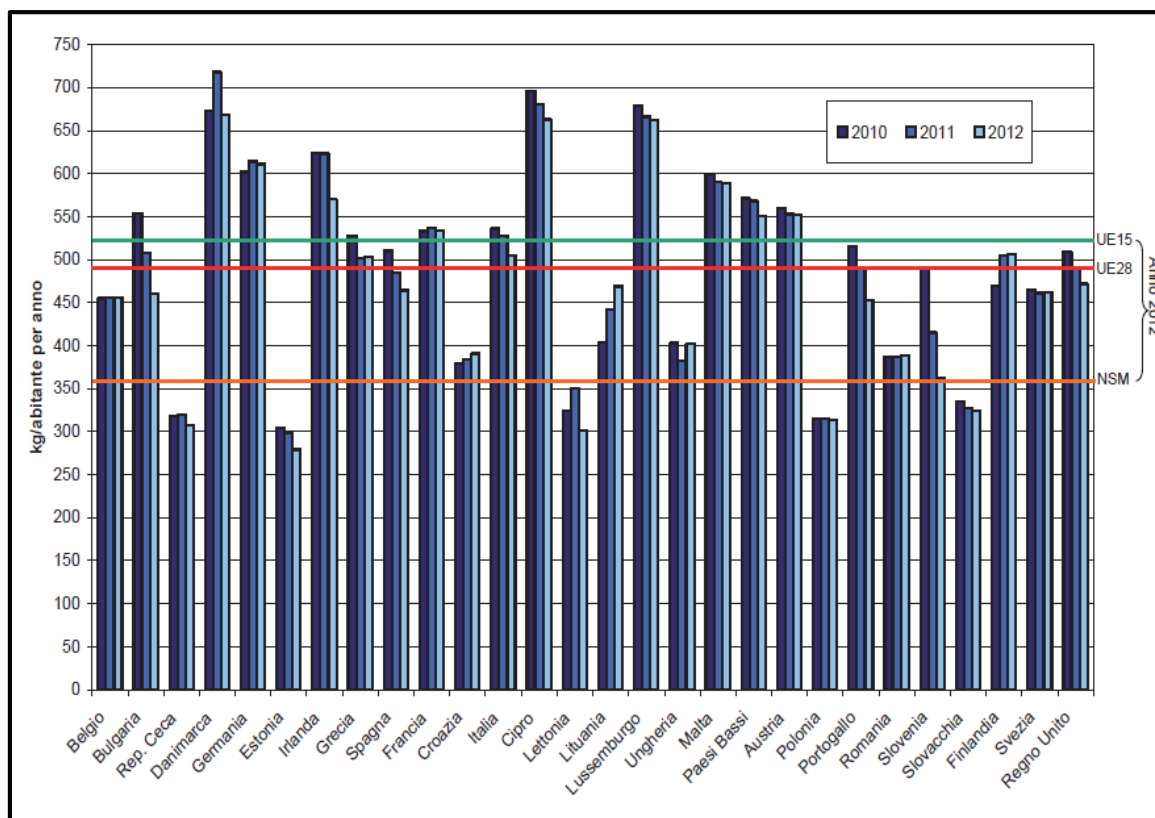


Figura 1-3 Produzione pro capite di RU nell'UE (kg/abitate per anno), anni 2010 – 2012.

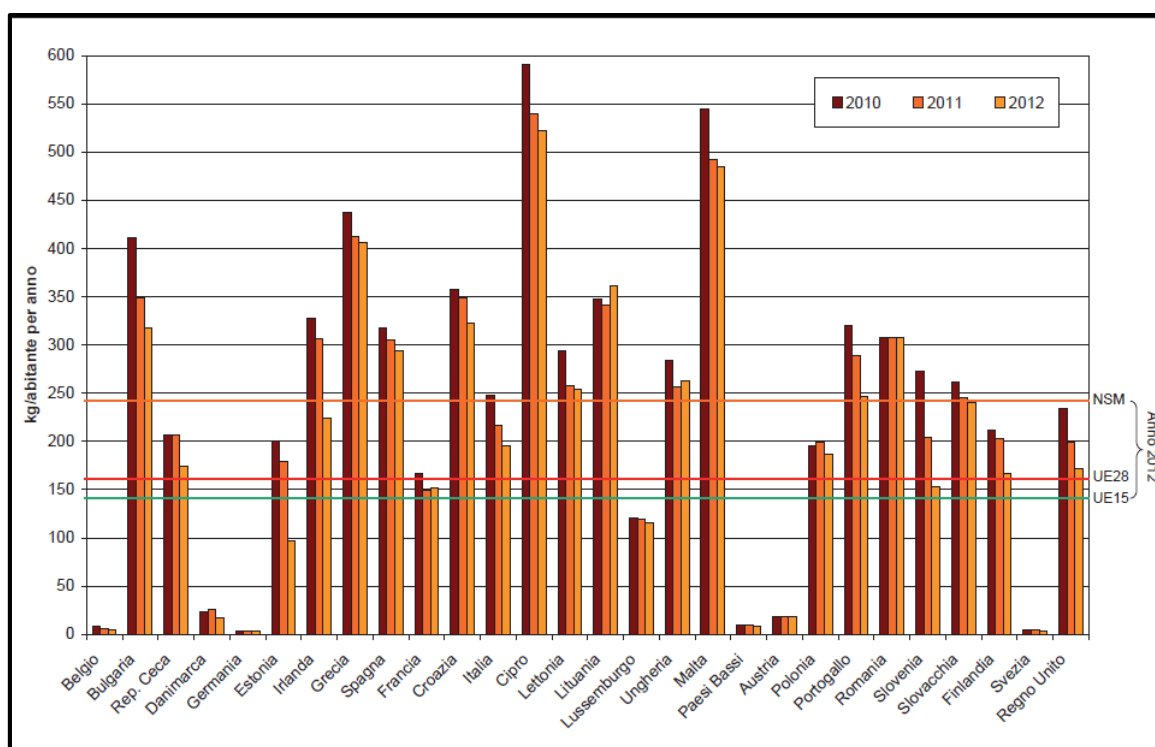


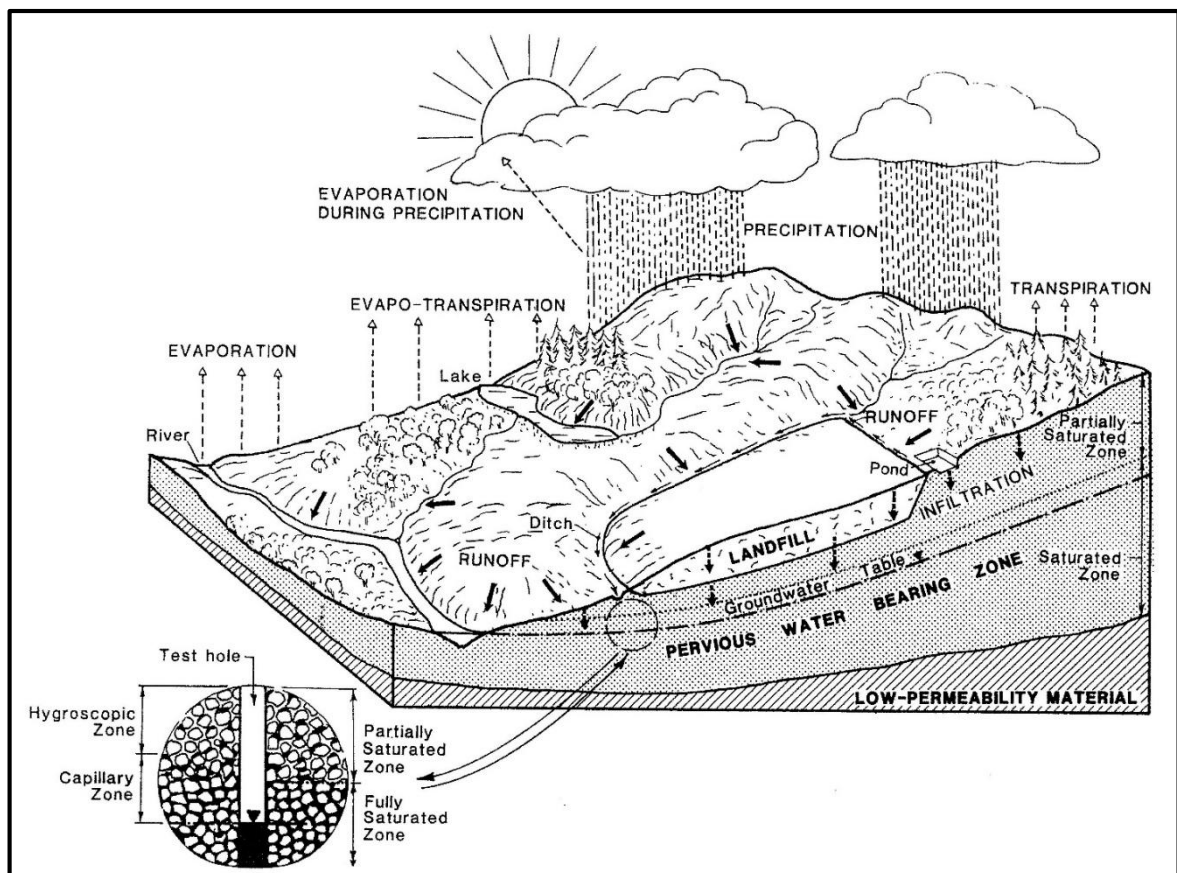
Figura 1-4 Quantità pro capite di rifiuti urbani smaltiti in discarica nell'UE (kg/abitate per anno), anni 2010 – 2012.

## 2 Descrizione delle discariche controllate.

Una discarica controllata è un impianto complesso che rappresenta un elemento indispensabile di qualsiasi strategia di smaltimento dei rifiuti. Rivestendo un ruolo di notevole rilevanza economica, esso richiede una specifica ed accurata progettazione, una realizzazione di qualità ed una gestione controllata e programmata. Tali attività devono prevenire o ridurre il più possibile le ripercussioni negative sull'ambiente, in particolare l'inquinamento delle acque superficiali e profonde, del suolo e dell'atmosfera, nonché i rischi per la salute umana durante l'intero ciclo della discarica (costruzione, gestione e post-gestione).

Occorre sottolineare che i danni possibili possono essere di notevole rilevanza, perdurare per lungo tempo e gravare sulla collettività con costi di recupero elevati. In particolare, la funzione fondamentale di una discarica è quella di assicurare e mantenere nel tempo l'isolamento dei rifiuti smaltiti mediante operazioni di deposito sul suolo e nel suolo, e di minimizzare e controllare le emissioni nell'ambiente esterno.

La Figura 2-1 rappresenta la complessità dell'ambiente idrologico nel quale si deve inserire una discarica.



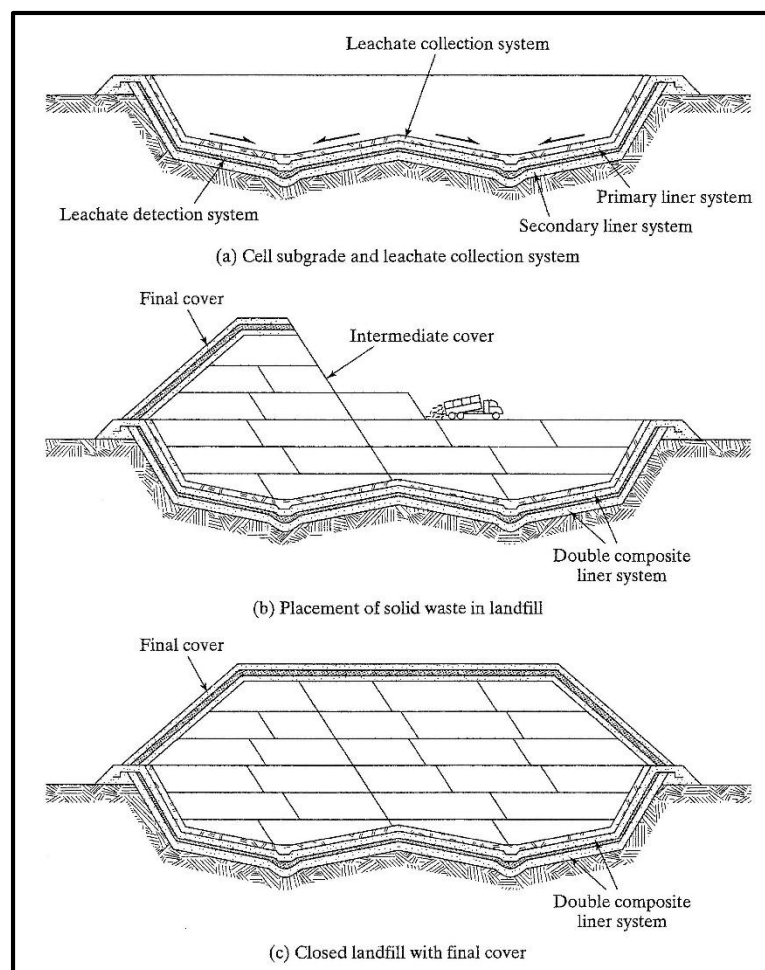
**Figura 2-1 Posizione di una discarica all'interno del ciclo idrologico.**

La progettazione costituisce una attività interdisciplinare che coinvolge molteplici aspetti, sia di carattere geologico (geologia, idrogeologia, geomorfologia), che di ingegneria civile ed ambientale (geotecnica, idraulica, chimica impiantistica), che di tipo agronomico e biologico.

Ad oggi esiste una consolidata pratica per quanto riguarda gli aspetti progettuali ed una matura esperienza nelle metodiche esecutive, nata dall'osservazione di opere già realizzate e dal loro monitoraggio.

La realizzazione di una discarica controllata per rifiuti inerti, non pericolosi o pericolosi prevede diverse fasi operative, come sintetizzato in Figura 2-2:

- a. Localizzazione del sito,
- b. Progettazione e realizzazione,
- c. Gestione nella fase di coltivazione,
- d. Chiusura e gestione nella fase di post chiusura.



**Figura 2-2 Sviluppo e chiusura per una discarica di rifiuti solidi.**

Per quanto riguarda la localizzazione del sito, in Italia essa risulta essere una tematica alquanto critica, in quanto l'ubicazione di una nuova discarica spesso nasce da un' emergenza e non sempre è il risultato di un'accurata valutazione comparativa tra diversi siti potenzialmente idonei ad accogliere una discarica. Difatti questo aspetto dovrebbe essere frutto di una rigorosa analisi comparativa tra diversi possibili siti e richiederebbe tempi tecnici stimabili in 18 – 36 mesi, in base al numero dei siti da comparare e dalla sollecitudine con cui gli enti pubblici forniscono i dati utili. A tali tempi poi si aggiungono quelli necessari per la progettazione e la costruzione, quindi tali manufatti dovrebbero essere il frutto di una responsabile programmazione.

Nonostante le diverse problematiche descritte, proprio in Italia a partire dagli anni '90 sono iniziati studi che hanno portato ad un metodo su cui basarsi per ottenere una localizzazione ottimale di nuove discariche controllate, utilizzando il cosiddetto "metodo matrice". La peculiarità del metodo si ispira alle metodologie di valutazione di impatto ambientale e perviene da una graduatoria dell'idoneità dei diversi siti analizzati valutando come tale manufatto possa essere meno dannoso per:

- la qualità delle acque,
- la qualità dell'aria,
- le caratteristiche del paesaggio,
- la qualità della vita degli abitanti dell'area,
- le reazioni biologiche,
- l'utilizzo del territorio.

Quindi i principali fattori analizzati sono: gli aspetti economici, la capacità del sito, i fattori di vincolo, i fattori geologici, i fattori meteo-climatici, i fattori sociali e lo stato del territorio.

Tale metodo è interdisciplinare e quindi sia competenze geologiche che geotecniche risultano essere fondamentali. Sono pertanto necessari studi relativi alla geomorfologia, alla franosità, alla idrogeologia, al dettaglio stratigrafico, alla caratterizzazione meccanica ed idraulica dei depositi, con particolare riferimento alla presenza o meno di barriere naturali e alla sismicità del sito. In definitiva il procedimento che porta alla localizzazione del sito è eseguito con lo scopo di ottenere la scelta dell'area in cui la presenza di una discarica produrrebbe il minor impatto sulle diverse componenti ambientali prese in esame.

Come detto, ai tempi relativi a questa fase, si sommano quelli relativi alla progettazione e alla realizzazione della discarica. E' opportuno sottolineare nuovamente che la discarica controllata rappresenta un'opera di ingegneria complessa ed importante: la complessità è

connessa a molteplici aspetti che devono essere analizzati e dimensionati in fase di progettazione e curati in fase di realizzazione; l'importanza di tali opere deriva soprattutto dalla gravità delle conseguenze ambientali che possono scaturire da errori commessi in fase di progettazione, costruzione e gestione delle stesse.

Anche le indagini geotecnica ed ambientale propedeutiche alla realizzazione, sono fondamentali per una corretta progettazione. Difatti è indispensabile individuare, oltre alle caratteristiche meccaniche dei terreni, la presenza o meno di barriere naturali o l'esistenza di problemi di instabilità nell'area scelta per la realizzazione dell'opera.

Inoltre, accertare la qualità delle acque sotterranee e superficiali, può evidenziare la presenza di contaminazione che altrimenti sarebbe associata agli effetti derivanti dalla messa in dimora e malfunzionamenti della discarica stessa, successivamente.

Relativamente alla progettazione in sé, tra le componenti più delicate si possono sinteticamente indicare le seguenti:

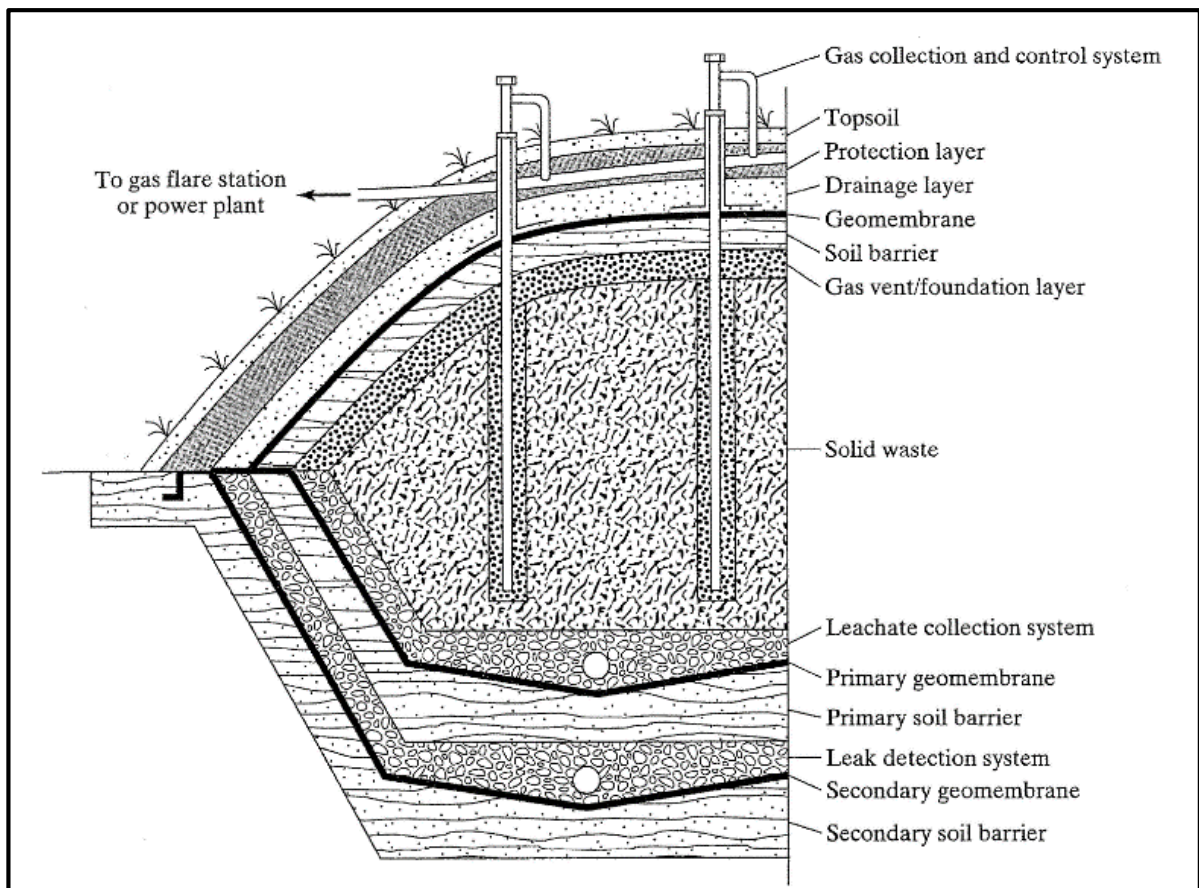
- il sistema di barriera di fondo (finalizzato a non permettere la migrazione del percolato nel sottosuolo),
- il sistema di raccolta e rimozione del percolato (un battente limitato è indispensabile al fine di minimizzare la migrazione del percolato e di migliorare la stabilità del sistema discarica),
- il sistema di copertura finale (per evitare l'infiltrazione di acqua meteorica nel corpo rifiuti e quindi l'aumento di percolato),
- il sistema di estrazione del biogas (ad oggi utilizzabile come fonte energetica).

Nel progetto si deve quindi valutare l'efficienza nel tempo delle sue componenti, al fine di garantire la stabilità locale e globale dell'opera e la compatibilità delle deformazioni con la funzionalità delle diverse componenti; ad esempio, elevate deformazioni dovute ad una instabilità del corpo rifiuti, possono portare ad un rischioso malfunzionamento dei pozzi di estrazione del percolato.

## 2.1 Sistemi di rivestimento e coperture.

Le componenti essenziali di una discarica sono:

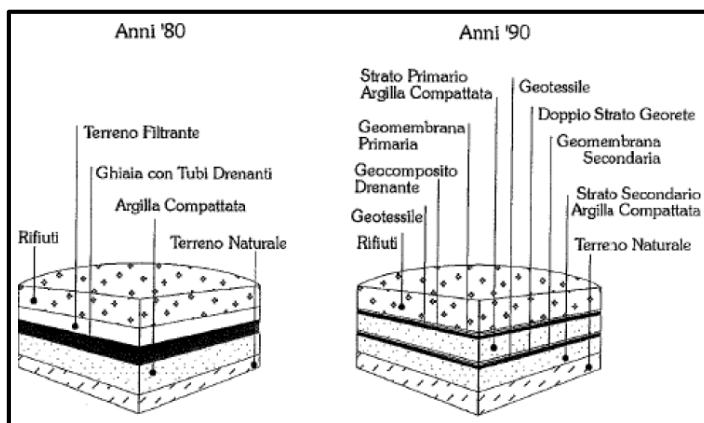
- il rivestimento di fondo,
- la copertura e i sistemi di drenaggio, raccolta e rimozione del percolato e dei gas che sono prodotti nei processi di decomposizione dei rifiuti urbani (Figura 2-3).



**Figura 2-3 Sezione di una discarica.**

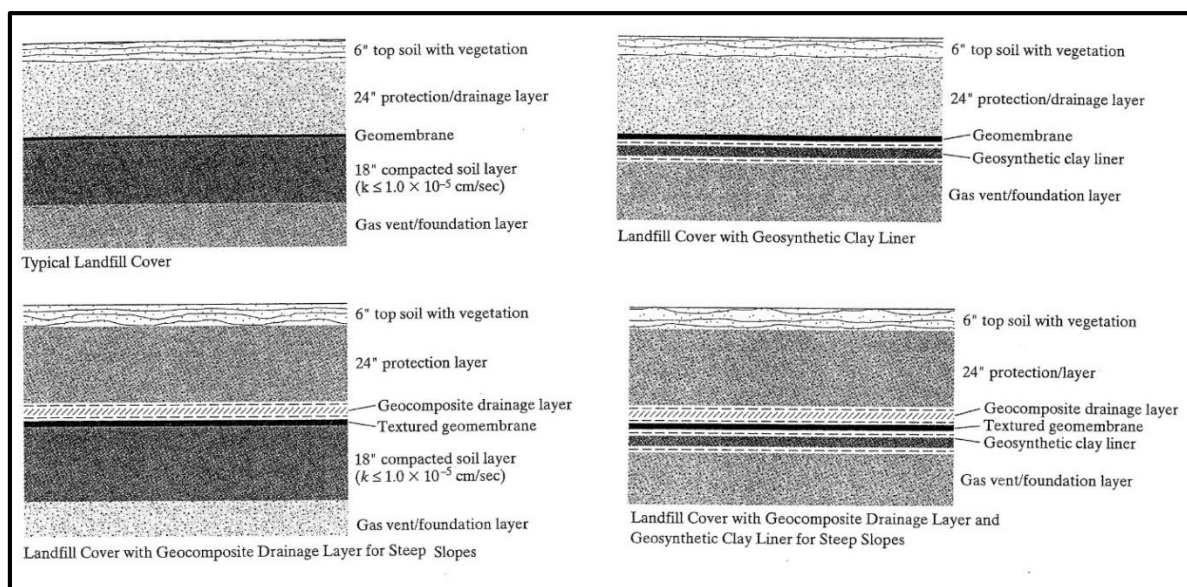
La Figura 2-4 rappresenta schematicamente l'evoluzione dei rivestimenti di fondo delle discariche controllate. In sintesi si è passati dall'utilizzo di un singolo rivestimento costituito da soli strati di argilla (o materiali con granulometria maggiore come i limi), all'impiego di rivestimenti compositi singoli o doppi (Daniel, 1993). I sistemi di rivestimento compositi sono realizzati con l'accoppiamento di materiali naturali ed artificiali, di cui la combinazione geomembrana-argilla compattata è l'elemento chiave. La geomembrana è la prima barriera per il contenimento del percolato, mentre l'argilla di fondo (in genere già presente in sito e/o compattata), immediatamente al di sotto, garantisce una difesa nel ritardare il flusso di percolato, nel caso di perdita attraverso le inevitabili lesioni della geomembrana. E' per questo

motivo che attualmente è imposta, dalle normative vigenti, l'adozione dei sistemi di rivestimento compositi nel progetto delle discariche.



**Figura 2-4 Evoluzione dei rivestimenti di base delle discariche controllate.**

Come i rivestimenti di fondo, anche le coperture hanno subito un'evoluzione, dai sistemi realizzati con materiali naturali a quelli misti ed artificiali. Le coperture sono utilizzate per prevenire le infiltrazioni delle precipitazioni all'interno dei cumuli di terreno o delle discariche e per limitare la formazione di percolato. Le geomembrane di copertura possono essere ricoperte con del materiale naturale di protezione o essere lasciate direttamente esposte agli agenti atmosferici. Comunque per la chiusura definitiva delle discariche e per il seppellimento permanente, viene utilizzata una copertura a strati del tipo riportato in Figura 2-5.

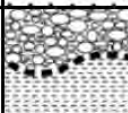
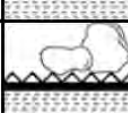
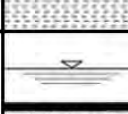
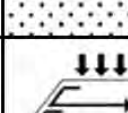
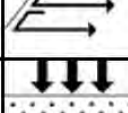
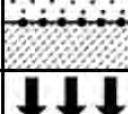
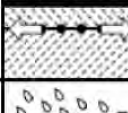
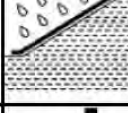


**Figura 2-5 Sistemi di copertura tipo.**

## 2.2 Geosintetici utilizzati nelle discariche controllate.

L'impiego di geosintetici nelle costruzioni geotecniche si è imposto vista la loro efficacia e versatilità nello svolgere funzioni specifiche. Esse vanno dal rinforzo strutturale (per esempio le terre armate), alla separazioni tra materiali diversi, al drenaggio di liquidi e/o gas, ecc.

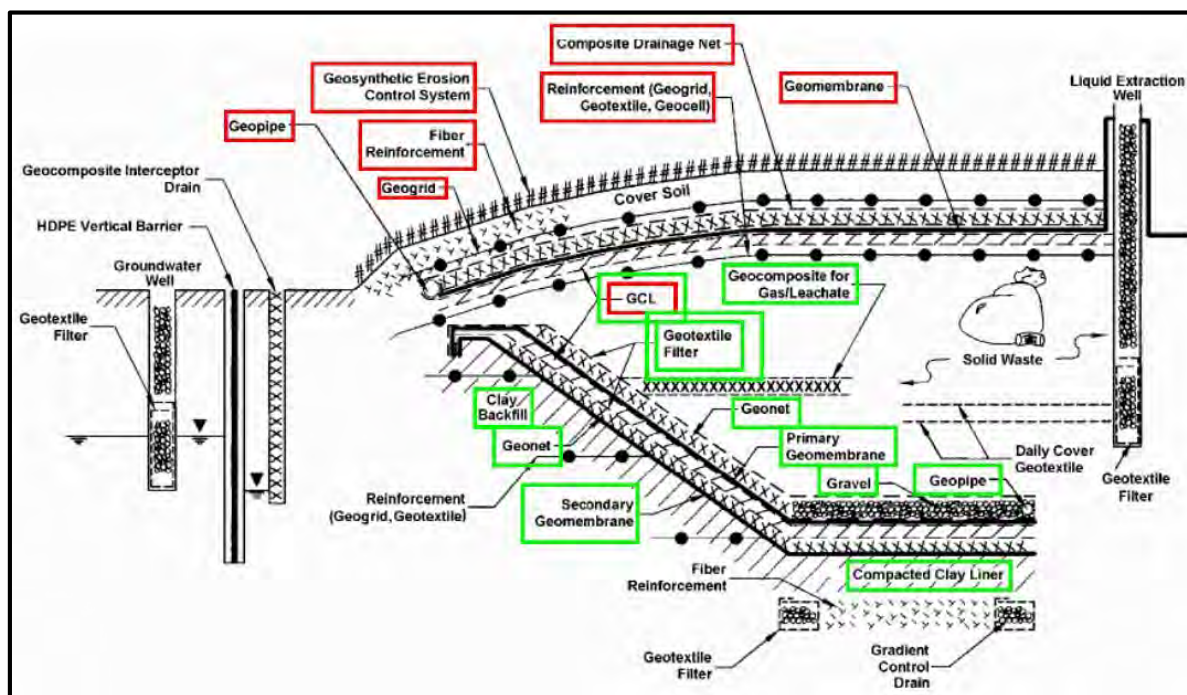
La Tabella 3 sintetizza le funzioni più comuni di questi prodotti.

| FUNZIONE                                          |                                                                                     | PRODOTTI                                                     | DESCRIZIONE                                                                                                                                            |
|---------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Filtrazione                                       |    | Geotessili,<br>Geocompositi                                  | Consentono il passaggio di fluidi impedendo il "pompaggio" di particelle di terreno                                                                    |
| Drenaggio                                         |    | Georeti,<br>Geocompositi                                     | Trasportano fluidi e gas                                                                                                                               |
| Separazione                                       |    | Geotessili,<br>Geocompositi                                  | Impediscono la contaminazione tra due differenti terreni o materiali di diversa granulometria                                                          |
| Protezione                                        |   | Geotessili non-tessuti, Georeti,<br>Geocompositi             | Impediscono il danneggiamento meccanico di strutture, materiali o di altri geosintetici                                                                |
| Impermeabilizzazione                              |  | Geomembrane,<br>Geocompositi                                 | Costituiscono una barriera ai fluidi                                                                                                                   |
| Rinforzo di muri e di pendii ripidi               |  | Geogriglie mono-dimensionali,<br>Geotessili,<br>Geocompositi | Aggiungono resistenza a trazione alla massa di terreno                                                                                                 |
| Rinforzo di terreni soffici                       |  | Geogriglie bi-direzionali,<br>Geotessili,<br>Geocompositi    | Migliorano la capacità portante                                                                                                                        |
| Rinforzo di cls, asfalto                          |  | Geogriglie bi-dimensionali                                   | Aggiungono resistenza a trazione e a fatica                                                                                                            |
| Controllo erosione e stabilizzazione superficiale |  | Geostuoie,<br>Geocelle,<br>Biostuoie,<br>Bioreti             | Evitano il distacco e il trasporto di particelle di terreno causato dalla pioggia, dal ruscellamento e dal vento, permettono l'ancoraggio delle radici |
| Confinamento                                      |  | Geocelle                                                     | Impediscono i movimenti laterali di volumi di terreno confinati al loro interno                                                                        |

**Tabella 3 Funzione e descrizione dei geosintetici.**

Nelle discariche essi rivestono un ruolo fondamentale (Figura 2-6), basti pensare all'effetto di impermeabilizzazione offerto con un peso ed un ingombro quasi nulli se confrontati allo spessore che dovrebbe avere il materiale coesivo equivalente in termini di permeabilità. Altro aspetto rilevante è quello del rinforzo del terreno di copertura posto al di sopra di ripidi pendii, caratterizzanti la quasi totalità delle discariche esistenti; un ridotto ingombro (in pianta) dell'impronta del sito della discarica, consente di risparmiare spazio e di poter collocare più rifiuto al di sopra dei cumuli già presenti e permette di non sottrarre superfici destinate ad altre attività. Nell'elaborato saranno presenti molteplici riferimenti ad alcune tipologie di geosintetici utilizzando gli acronimi suggeriti dall' IGS (International Geosynthetics Society) ovvero:

- GSY, geosintetico (generale),
- GTX, geotessile (generale),
- GMB, geomembrana,
- GCL, geocomposito bentonitico,
- GCD, geocomposito drenante,
- GGR, geogriglia.



*Figura 2-6 Posizioni dei geosintetici in una discarica.*

### 2.3 *Stabilità delle discariche controllate.*

E' risaputo che nei pendii naturali o nelle scarpate artificiali le tensioni di taglio indotte dalle forze gravitazionali tendono a muovere il terreno lungo potenziali superfici di scorrimento. Simili considerazioni valgono anche per il caso delle discariche controllate in pendio. Infatti nel caso in cui le tensioni tangenziali siano inferiori alla resistenza al taglio lungo ogni possibile superficie di scorrimento, l'ammasso risulta essere in equilibrio. Nel caso delle discariche però, possono intervenire alcune cause particolari ad indurre o un incremento delle tensioni tangenziali agenti o una riduzione della resistenza mobilitata, riducendo quindi i margini di sicurezza.

E' inoltre noto che le analisi di stabilità dei pendii sono mirate alla determinazione del rapporto tra le tensioni di taglio mobilitate e quelle resistenti lungo una qualsiasi potenziale superficie di scorrimento, ovvero il Fattore di Sicurezza globale. Con approcci più complessi, detti ai coefficienti parziali, è possibile tenere conto delle diverse approssimazioni che si hanno nella determinazione delle diverse componenti delle sollecitazioni o delle resistenze. In ogni caso è indispensabile, per una corretta analisi di stabilità, utilizzare metodi di calcolo corretti e disporre dei parametri in grado di rappresentare adeguatamente il comportamento meccanico dei materiali.

Per le discariche controllate i metodi di calcolo adoperati per le analisi di stabilità sono quelli classici impiegati nelle analisi dei pendii e pertanto si deve prestare particolare attenzione alla modalità di applicazione di tali metodi, considerando il fatto che si tratta di materiali distinti (con comportamenti differenti) e non di un ammasso omogeneo (come per i pendii naturali). Si devono quindi adottare programmi di calcolo, considerando che i sistemi di rivestimento sono caratterizzati da una notevole eterogeneità e deformabilità dei loro componenti.

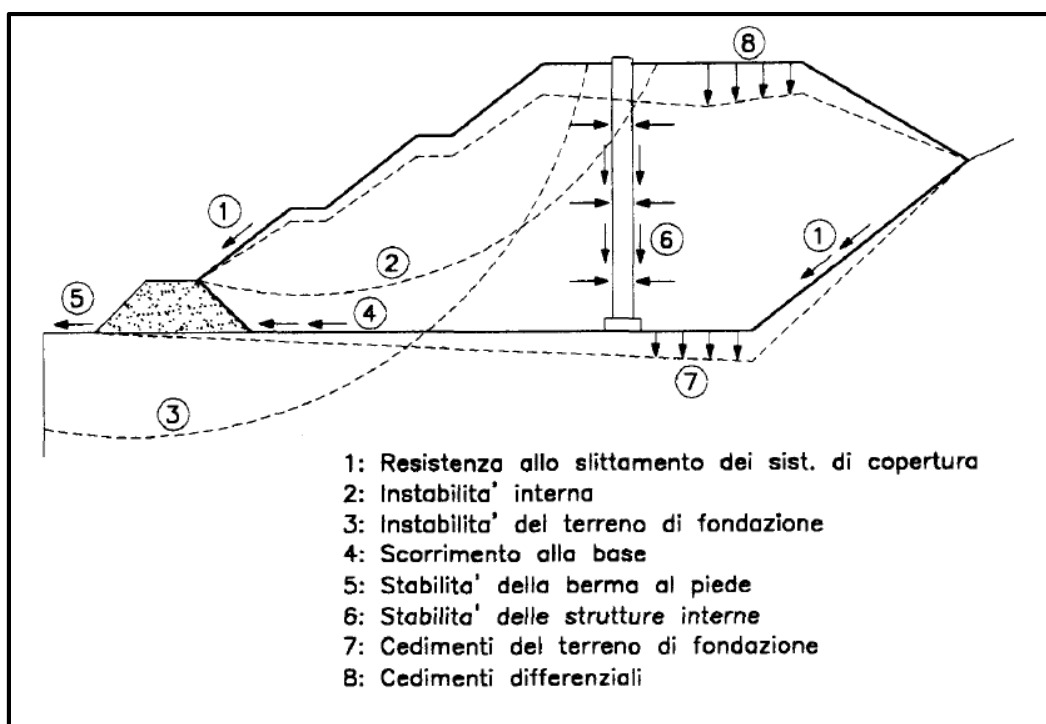
La stabilità delle discariche controllate è emersa come un problema rilevante dopo la rottura della Unit B-19 della discarica di Kettleman Hills nel 1988. Essa era una grande discarica per rifiuti tossici e nocivi della California, con una dimensione totale di circa 145'000 m<sup>2</sup>, di cui 60'000 m<sup>2</sup> circa relativi alla zona interessata dallo scivolamento. L'altezza del cumulo dei rifiuti al 15 marzo 1988 (3 giorni prima della rottura) nella zona di analisi, era di circa 21 metri, lo scivolamento è stato di 10.5 m in orizzontale e 4 m in verticale. In seguito sono state documentate molte altre rotture in discariche controllate, all'interno del corpo rifiuti, attraverso il terreno di fondazione della discarica e lungo i sistemi compositi, tutte a conferma che, nell'ambito delle problematiche connesse con le discariche controllate, quella della stabilità rimane una questione centrale.

L'interesse primario degli studiosi diventò la ricerca dei diversi meccanismi che si possono instaurare nelle discariche, per comprendere le cause che hanno provocato il collasso

strutturale del rivestimento della discarica. Da quegli studi è emerso che lo scivolamento è avvenuto all'interno del sistema di rivestimento (con due elementi differenti a contatto). In particolare si è riscontrato che la fase più critica di uno studio di stabilità delle discariche, riguarda la scelta degli appropriati valori per caratterizzare la resistenza allo scorrimento lungo tutte le possibili superfici di scivolamento, in particolare passanti per le interfacce di fondo.

Nelle progettazione delle discariche controllate, infatti, non si può fare riferimento unicamente alle nozioni della geotecnica tradizionale; si rischierebbe di trascurare aspetti che possono avere grande influenza sui risultati delle analisi e di conseguenza sulla stabilità della discarica. A questo scopo grande attenzione deve essere posta sui sistemi di rivestimento, poiché per migliorare le prestazioni idrauliche globali, essi sono costituiti dall'accoppiamento di materiali diversi. Per le discariche in pendio proprio queste interfacce presenti nei rivestimenti composti delle barriere di base e di copertura costituiscono potenziali superfici di scivolamento. Pertanto è di fondamentale importanza "valutare la stabilità lungo superfici di scorrimento che comprendano anche le interfacce tra i diversi materiali utilizzati" (come specificato nelle nuove norme tecniche per le costruzioni NTC08– D.M. Infrastrutture 14.01.2008, §6.11.1.4). Sottovalutare tale aspetto può condurre ad un pericoloso sottodimensionamento degli argini di contenimento costruiti a valle delle discariche ubicate in pendio.

Tutti i meccanismi di rottura, rappresentati in Figura 2-7, possono essere innescati, non solo dai carichi statici, ma anche dagli effetti sismici. Le vibrazioni possono indurre movimenti tra i rifiuti e il terreno di fondazione che possono danneggiare il rivestimento di fondo creando anche problemi di tenuta idraulica.



**Figura 2-7 Situazioni di instabilità.**

Un altro aspetto da tenere presente, soprattutto per le tipologie di instabilità che interessano i rivestimenti, le scarpate, la capacità portante della fondazione e gli argini di contenimento, è quello delle condizioni di falda esterna (freatica) e interna alla discarica (percolato). La determinazione di questa ultima in genere risulta complessa per la presenza di accumuli sospesi e non continui di percolato, dovuti alla presenza di strati provvisori di copertura (giornaliera) a bassa permeabilità, e di sovrappressioni dovute alla consolidazione dei rifiuti. Per chiarezza si aggiunge che quando i rifiuti sono tali da produrre gas, bisogna tenere conto di questo aspetto, che può produrre pressioni interne rilevanti le quali, se non abbattute tramite un apposito sistema di estrazione, possono influire negativamente sulla stabilità globale della discarica.

Con riferimento ai fenomeni di instabilità che interessano il terreno di fondazione, in fase di progetto, la possibilità che avvenga questo tipo di rottura può essere studiata ricorrendo ai metodi tradizionali di indagine geotecnica e di analisi di stabilità dei pendii.

Fenomeni di instabilità all'interno dell'ammasso dei rifiuti possono verificarsi quando il corpo rifiuti raggiunge altezze ed angoli di scarpata critici, non sopportabili dalla resistenza al taglio dei materiali. Le analisi di stabilità anche in questo caso possono essere effettuate utilizzando i metodi tradizionali. La maggiore difficoltà risiede nella assegnazione di appropriati parametri di resistenza al taglio ai rifiuti, in considerazione della loro eterogeneità ed alla loro elevata deformabilità.

Come detto, fenomeni di instabilità in discariche controllate possono anche avvenire lungo sistemi di rivestimento. La stabilità nei confronti di questo tipo di rottura è subordinata sia alla resistenza al taglio lungo le interfacce del sistema di rivestimento composito, sia alla resistenza al taglio interna di ciascun elemento del sistema di rivestimento composito.

Pertanto, per cautelarsi nei confronti di questo tipo di rotture, occorre porre particolare attenzione, in fase di progettazione, nella scelta delle pendenze da adottare per le scarpate delle vasche di raccolta dei rifiuti; tuttavia è evidente che un accorgimento di questo tipo, a parità di superficie occupata, tende a ridurre la capacità della discarica e potrebbe risultare impraticabile per ragioni economiche.

Al fine di analizzare e definire tale problema di stabilità, devono essere evidenziati alcuni aspetti:

- come valutare, modellare e migliorare la resistenza al taglio delle interfacce,
- come migliorare la resistenza al taglio di ogni elemento del sistema di rivestimento composito.

Per l'analisi di stabilità delle discariche, possono essere applicati i metodi di stabilità tradizionalmente adottati per i pendii. In particolare vengono utilizzati i metodi dell'equilibrio limite; per studiare le distribuzioni delle deformazioni e delle tensioni sono state inoltre utilizzate analisi agli elementi finiti considerando rotture progressive che possono avvenire durante le operazioni di abbancamento. L'utilizzo di metodi di analisi tridimensionali è consigliabile in discariche con una configurazione topografica articolata: in questi casi la determinazione della direzione preferenziale del potenziale movimento a cui corrisponde il coefficiente di sicurezza minimo, può essere effettuata utilizzando analisi 3D.

Tuttavia le incertezze derivanti dalla scelta del metodo di analisi possono comportare errori dell'ordine del 10–30%, mentre incertezze sulla valutazione dei parametri di resistenza possono facilmente comportare errori in percentuali ben superiori.

L'utilizzo di metodi di analisi più complessi come analisi ad elementi finiti, che tengono conto del meccanismo di rottura progressivo, richiede una affidabile conoscenza dei legami costitutivi dei materiali e delle interfacce.

### 3 Descrizione della discarica di Torretta di Legnago (VR).

Si riporta un estratto dalla relazione dell'Ing. Busana "Relazione Tecnico Illustrativa, Progetto definitivo di ripristino della funzionalità della copertura relativa ai lotti a, b e 2° tratto in alveo (a seguito degli assestamenti)" per una precisa ed efficace descrizione della zona di intervento.

L'utilizzo del sito di Torretta di Legnago per il trattamento di RSU tal quale (solo mediante stoccaggio definitivo in discarica) è presente fin dal 1982, ad uso del Comune di Legnago e, in tempi e modi diversi, anche di alcuni comuni limitrofi della provincia di Verona e Rovigo.

Inizialmente venne realizzata una discarica sfruttando come "catino" di contenimento naturale l'alveo dismesso del Fiume Tartaro, già da lungo tempo deviato a monte ed unificato al Canal Bianco, e dotandolo degli opportuni apprestamenti secondo le norme di "buona tecnica" allora in uso.

Successivamente, vennero realizzati diversi ampliamenti plano-altimetrici fino ad occupare anche aree fuori alveo. Ciò in conseguenza di un notevole aumento dei conferimenti giornalieri dovuto all'allargamento del bacino di utenza sia in ambito provinciale che regionale, e in alcuni casi anche extra-regionale. Per ciò che attiene alla discarica, quindi, la configurazione che si è venuta a creare negli anni è frutto di una successione di interventi, alcuni dei quali conclusi definitivamente. Fra questi si possono annoverare i cosiddetti Lotti A e B, caratterizzati dalla sovrapposizione di interventi fuori alveo con ribaulatura dei tratti in alveo denominati 1° e 2°.

Più nel dettaglio, per quanto riguarda tali lotti, si possono identificare quattro distinte fasi successive di utilizzo del sito per discarica, caratterizzate come riportato nei punti successivi:

1. 1<sup>a</sup> discarica in alveo per RSU tal quale, con costruzione e gestione principalmente comunale svolta direttamente;
2. "risagomatura" della 1<sup>a</sup> discarica in alveo (vale a dire un ampliamento altimetrico senza occupazione di nuove aree), sempre per RSU tal quale, con costruzione e gestione in concessione;
3. 2<sup>a</sup> discarica in alveo per RSU tal quale (vale a dire un ampliamento planimetrico con occupazione di nuove aree in alveo), con costruzione e gestione in concessione;
4. discarica fuori alveo per RSU tal quale e per RSU frazione secca, con distinzione temporale-funzionale di utilizzo (vale a dire ampliamento sia planimetrico, con occupazione di nuove aree, che altimetrico con sormonto di parti già costruite), con costruzione e gestione in concessione.

La coltivazione della discarica è stata pertanto condotta per lotti successivi che hanno interessato inizialmente i due tratti del vecchio alveo del fiume Tartaro (Tratto 1 e Tratto 2),

quindi i due lotti di ampliamento esterni all'alveo con sormonto dei tratti in alveo, secondo il seguente schema.

| Discarica        | Alveo Tratto 1         | Alveo Tratto 2         | Lotto A                                                            | Lotto B                                                            |
|------------------|------------------------|------------------------|--------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------|
| Ubicazione       | Alveo ex fiume Tartaro | Alveo ex fiume Tartaro | Esterno alveo ex fiume Tartaro e in sormonto sul Tratto 2 in alveo | Esterno alveo ex fiume Tartaro e in sormonto sul Tratto 1 in alveo |
| Periodo Attività | 1982-1990              | 1992-1996              | 1996-1998                                                          | 1998-2002                                                          |
| Superfici (ha)   | 6,3                    | 7,1                    | 3,6+2,1 (sorm.)                                                    | 4,8+2,1 (sorm.)                                                    |

In definitiva, quindi, il Lotto A si presenta come un ampliamento esterno e in parte in sormonto del Tratto 2, mentre il Lotto B comprende il sormonto di parte del Tratto 1 e un ampliamento esterno.

Il 1° tratto in alveo è attualmente oggetto di una messa in sicurezza per svuotamento della discarica e trasferimento dei rifiuti in altro lotto, sempre nell'ambito del sito.

La copertura finale dei Lotti A, B e 2° tratto in alveo, realizzata con 30 cm di terreno argilloso compattato sormontati da 80 cm di terreno di finitura e di coltivo, sagomata a "schiena d'asino" con pendenza del 5%, è stata oggetto di collaudo funzionale ai sensi degli art. 25 e 26 della L.R. 3/2000, a cura del Dott. Ing. Roberto Casarin, in data 30 dicembre 2005.

La notevole produzione di percolato fin dal completamento della copertura, che non tende a ridursi negli anni, ha indotto la società Concessionaria Legnago Servizi (LE.SE.) S.p.A., nell'ambito della gestione post-operativa di tali lotti, a valutare modalità e costi di ripristino della funzionalità della succitata copertura, a seguito degli assestamenti maturati nel tempo, ritenuta, insieme con altre cause che saranno trattate oltre, la principale causa della riferita produzione di percolato. Detto ripristino si inquadra nelle attività di gestione post-operativa dei lotti in esame.

In una recente Perizia redatta dall' Ing. Busana Stefano – "Gestione post-operativa dei lotti A, B e 2° tratto in alveo: analisi dei costi pregressi e dei costi residui al 1°/1/2013", gennaio 2013 – al sottopar. 5.3.3: Stima dei costi dell'intervento di adeguamento, veniva prospettata la necessità di « ... attuare in prima istanza l'adeguamento del capping sommitale e della berma di riposo, valutando in seguito alla risposta in termini di trend di produzione di percolato, l'opportunità di completare il pacchetto anche nelle zone di scarpata». Nel seguito del sottoparagrafo si leggeva la seguente frase: «Una stima sommaria dei costi di tale primo intervento di adeguamento della copertura, basata su interventi similari, stante la notevole

estensione dei lotti in oggetto, conduce ad un importo dell'ordine dei 4.000.000,00 €. Tale valutazione va ritenuta del tutto indicativa del solo ordine di grandezza. Solo in sede di progettazione dell'intervento sarà possibile esprimere una valutazione più attendibile.»

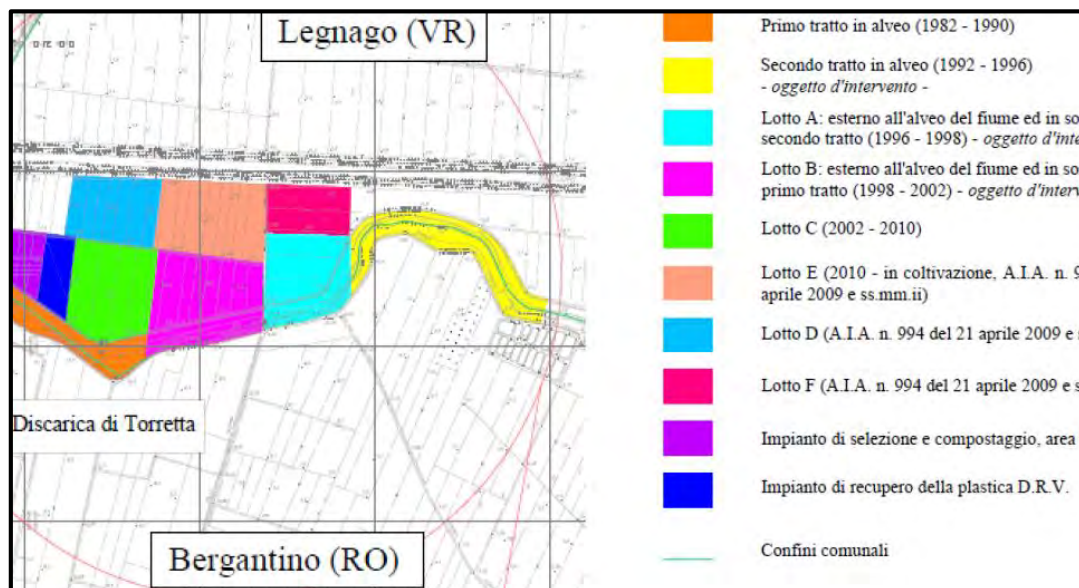
Una successiva valutazione delle modalità di progettazione e realizzazione della copertura ha evidenziato l'opportunità di completare, in soluzione unica, anche le zone di scarpata.

La necessità di valutare preventivamente le modalità di finanziamento dei costi residui di gestione post-operativa dei lotti in esame, stimati nella testè citata Perizia, alla luce anche della complessa situazione economico-finanziaria del Sistema Integrato di Torretta, richiede l'approfondimento della stima relativa all'intervento in esame, indicata, solamente nell'ordine di grandezza e al netto delle zone di scarpata, nella Perizia del gennaio 2013. Tale approfondimento è conseguibile esclusivamente tramite la redazione del Computo Metrico Estimativo di un'elaborazione avente i tratti minimi della progettazione definitiva, una volta sottoposta alla valutazione tecnica dell'Ente preposto.

Tale ripristino è ispirato ai principi posti dal D.Lgs 36/2003; in tal senso la copertura proposta è del tutto equivalente, se non migliorativa, rispetto a quella prospettata dal succitato decreto.

Va opportunamente precisato che il progetto in parola si limita a proporre soluzioni di ripristino della copertura della discarica esaurita rispetto a quanto stabilito dal progetto primigenio. Trattasi, pertanto, come già detto, di un intervento inquadrabile nell'ambito della gestione post-operativa dei lotti di discarica in esame. La modifica non sostanziale dell'A.I.A. è riferibile al comma 1bis – Art.5 del D.Lgs 152/2006 e ss.mm.ii.

Per meglio comprendere le zone oggetto d'intervento si veda la planimetria relativa all'impianto così come appare oggi allorchè sono indicati anche i lotti di discarica realizzati successivamente alla chiusura dei lotti oggetto del progetto di ripristino qui illustrato.



**Figura 3-1 Pianta del sito in esame.**

Esaminando l'elaborato grafico sulle sezioni del corpo discarica si intuisce subito la notevole diversità tra di esse e la necessità quindi di selezionare alcune "sezioni tipo" che verranno utilizzate per il dimensionamento e la verifica del nuovo pacchetto di copertura.

## 4 Analisi di Stabilità dei sistemi di copertura. Metodi Analitici.

In letteratura sono presenti numerose proposte per la verifica di stabilità per i pacchetti di copertura utilizzati nelle discariche, enfatizzando l'incertezza che ancora oggi affligge questo problema. Esse vengono accomunate dal problema della definizione di superficie critica di scorrimento, ovvero quella superficie passante per l'interfaccia più debole tra i diversi materiali a composizione dello strato. L'involuppo di rottura passa attraverso questa interfaccia ed è quindi necessaria una sua attenta individuazione prima e caratterizzazione dopo. Di norma, la superficie di rottura si trova al contatto tra gli elementi che generano l'attrito all' interfaccia minore, qualora si possa verificare il cinematismo corrispondente. Le analisi vengono tutte sviluppate in stato piano, semplificando lo svolgimento dei calcoli. Il terreno è schematizzato come un blocco rigido, non soggetto quindi a fenomeni di instabilità. Risulta quindi necessario provvedere alla stabilità del terreno stesso, garantendo un angolo di attrito interno e una coesione sufficienti. Verificata preliminarmente questa necessità, si può passare al controllo e al dimensionamento della geogriglia necessaria a sgravare la geomembrana (o GCL) e il GCD da stress non compatibili con la loro caratterizzazione reologica.

I metodi sono stati implementati in un foglio elettronico che raggruppa tutte le sezioni della discarica, mettendo in luce quali tra di esse siano le più problematiche. Esso fornisce anche le tensioni sulla geogriglia (necessarie per il dimensionamento) e le dimensioni della trincea di ancoraggio in sommità (rettangolare, rettangolare a "L", a "V").

Prima di affrontare nello specifico gli algoritmi che si è deciso di proporre, è doveroso introdurre brevemente quali sono stati nel tempo i passaggi fondamentali nell'elaborazione dei modelli di calcolo, che hanno consentito la formulazione delle attuali teorie. I primi a sviluppare studi specifici sull'argomento sono stati Giroud e Ah-Line.

### **Giroud e Ah-Line (1984).**

I due studiosi proposero infatti il primo modello concettuale che prendeva in considerazione le forze stabilizzanti presenti al piede del pendio, la resistenza mobilitata in corrispondenza della superficie critica da parte dei geosintetici posti superiormente la medesima e la resistenza offerta dalla trincea di ancoraggio sommitale.

### **Koerner e Martin (1985).**

Koerner e Martin proposero un modello analitico, considerando un pendio indefinito, per il caso di spessore uniforme di terreno sopra gli strati geosintetici, mentre un modello a doppio cuneo nel caso di non perfetta uniformità di rivestimento. Giunsero alla formulazione del solo caso di pendio indefinito.

**Giroud e Bech (1989).**

Giroud e Bech, successivamente, pubblicarono uno studio dettagliato, analizzando i tre possibili meccanismi che possono essere interessati nel corso della verifica di stabilità di un sistema geosintetico composito. Considerarono il fenomeno correlato alle forze generate dall'angolo di interfaccia lungo la superficie critica, analizzarono l'entità della forza resa disponibile dal riporto di terreno posto al piede e considerarono la componente stabilizzante fornita al sistema da parte dei geosintetici posti nella parte superiore della superficie critica. Infine vi sono i due approcci dimensionali più comunemente utilizzati, che prevedono il ricorso ad un modello concettuale valido per pendio definito scorporato in due cunei (cuneo attivo e cuneo passivo), sviluppati separatamente da Giroud e Koerner and Soong.

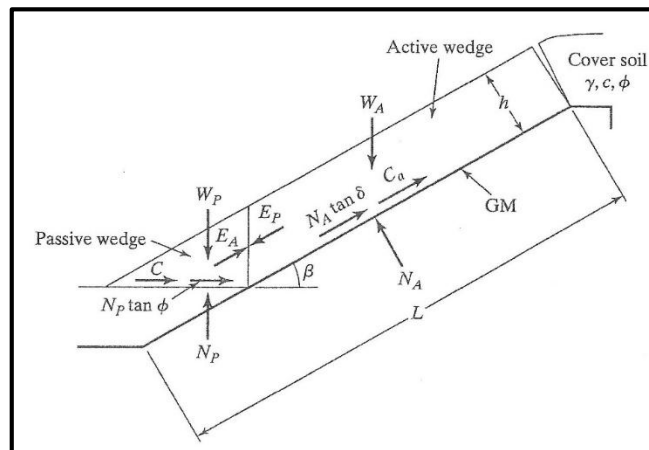
**Giroud e altri (1995) e Koerner and Soong (1998).**

La geometria adottata dai due modelli di calcolo prevede il ricorso alla suddivisione geometrica della porzione di pendio definito, quale oggetto dell'intervento di chiusura, in due cunei di tipo attivo e passivo. Il modello di Giroud et al. non prevede l'introduzione del Fattore di Sicurezza in corrispondenza della superficie di scivolamento orizzontale, definendolo come il rapporto tra le forze resistenti e quelle instabilizzanti. Con questo tipo di approccio lo studioso definisce ed introduce nella sua formulazione del FS cinque componenti separate. In questo modo è agevole impostare una analisi di sensitività che permetterà al progettista di identificare e quantificare in termini numerici l'apporto di ciascun parametro alle performance del sistema.

Il modello di Koerner and Soong prevede, invece, la quantificazione delle forze stabilizzanti e di quelle instabilizzanti, dal rapporto delle quali determinare il valore del FS. L'equazione risoltrice del modello è una equazione di secondo grado nell'incognita FS.

#### 4.1 Metodo di Koerner and Soong (1998) per il terreno di copertura.

La Figura 4-4-1 illustra la situazione di pendio definito, terreno di copertura con spessore uniforme posto al di sopra di un GTX, inclinato con angolo  $\beta$ . E' previsto un cuneo passivo posizionato al piede e una frattura in sommità del pendio. L'analisi proposta è quella fornita da Koerner e Soong nel 1998 ma altre soluzioni molto simili si possono trovare in Koerner and Hwu (1991).



**Figura 4-4-1 Rappresentazione del modello Koerner and Soong.**

I simboli utilizzati vengono così sintetizzati:

$W_a$ , peso totale del cuneo attivo,

$W_p$ , peso totale del cuneo passivo,

$N_a$ , forza risultante normale alla superficie di scorrimento del cuneo attivo,

$N_p$ , forza risultante normale alla superficie di scorrimento del cuneo passivo,

$\gamma$ , peso di volume del terreno,

$L$ , lunghezza del pendio misurata lungo lo sviluppo della geomembrana,

$\beta$ , angolo tra l'orizzontale e il piano su cui giace la GMB,

$\phi$ , angolo di attrito del terreno,

$c$ , coesione del terreno,

$\delta$ , angolo di attrito all'interfaccia terreno vs. GMB,

$c_a$ , adesione tra il terreno del cuneo attivo e la GMB,

$C_a$ , forza di adesione tra il terreno del cuneo attivo e la GMB,

C, forza di coesione attraverso il piano di scivolamento del cuneo passivo,

Ea, forza di interconco agente dal cuneo passivo sul cuneo attivo,

Ep, forza di interconco agente dal cuneo attivo sul cuneo passivo,

FS, Fattore di Sicurezza contro lo scivolamento del terreno sopra la GMB.

La soluzione del problema si ottiene attraverso la risoluzione di una equazione di secondo grado con incognita il Fattore di Sicurezza:

$$a \cdot FS^2 + b \cdot FS + c = 0$$

E quindi:

$$FS = \frac{-b \pm \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a}$$

Con:

$$a = (Wa - Na \cdot \cos \beta) \cdot \cos \beta$$

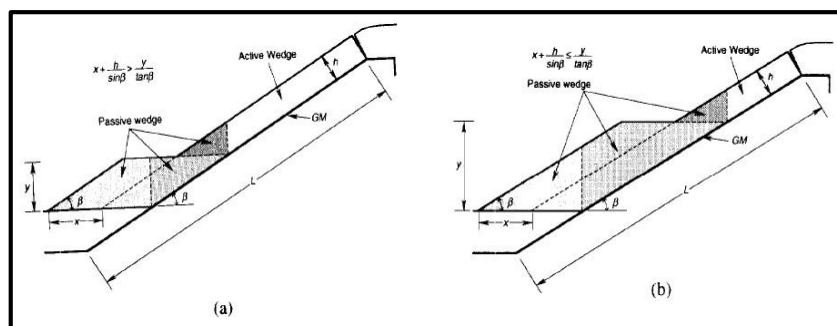
$$b = -[(Wa - Na \cdot \cos \beta) \cdot \sin \beta \cdot \tan \phi + (Na \cdot \tan \delta + Ca) \cdot \sin \beta \cdot \cos \beta + (Ca + Wp \cdot \tan \phi) \cdot \sin \beta]$$

$$c = (Na \cdot \tan \delta + Ca) \cdot (\sin \beta)^2 \cdot \tan \phi$$

Quando il Fattore di Sicurezza si attesta su valori inferiori all'unità, lo scivolamento del terreno sulla superficie di contatto è assicurato. Un valore maggiore all'unità deve essere raggiunto per avere condizioni di stabilità; di quanto superiore ad uno, dovrà poi essere o progettato o imposto dal normatore.

#### 4.1.1 Riprofilatura del pendio, Koerner and Soong (1998).

Qualora la verifica di stabilità del solo terreno di copertura non dovesse essere soddisfatta, si può ricorrere a modifiche riguardanti solo l'apporto di nuovo materiale e la risagomatura della (o delle) sezione più problematica. La Figura 4-4-2 illustra il posizionamento di una piccola berma al piede del declivio in modo da aumentare il volume del cuneo passivo atto a stabilizzare il fronte.



**Figura 4-4-2 Posizione e dimensioni della berma aggiuntiva.**

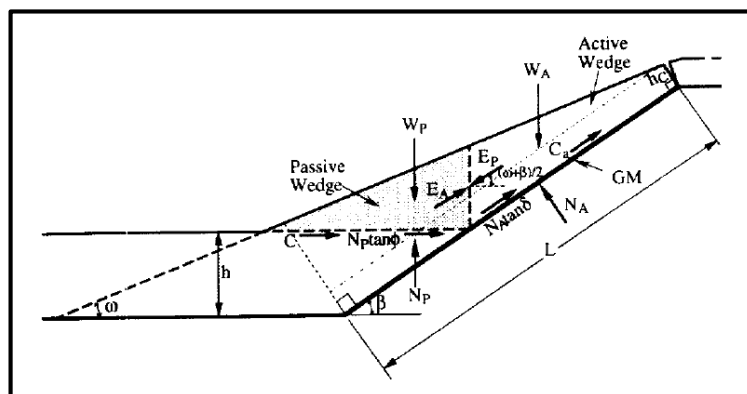
Questa possibilità, però, non è la soluzione più valida a stabilizzare coperture con spessori limitati. Accade infatti che il materiale del cuneo attivo scorra sopra la sommità della berma; esso si viene ridotto in entità ma tale situazione si realizza soltanto con l'apporto di significative quantità di materiale (si è in condizioni di stato piano quindi questa sezione si svilupperà anche per diverse centinaia di metri): artificio dunque da scartare. Al contrario, risulta essere l'intervento migliore per rilevati ed opere di tenuta idraulica, dove la necessità di sviluppare una forza orizzontale stabilizzante è maggiore.

L'intervento invece utilizzato nel nostro caso (Figura 4-4-3) consiste nella riprofilatura del pendio con una copertura a spessore gradualmente vario. Il Fattore di Sicurezza aumenta in proporzione con il nuovo spessore di terreno al piede. Anche in questo caso si ricorrerà alla soluzione di un'equazione di secondo grado con incognita il Fattore di Sicurezza. L'analisi prevede la presenza di una frattura in cresta e la definizione della nuova perdenza del profilo,  $\omega$  con l'ovvia imposizione  $\omega < \beta$ . La simbologia è identica al metodo precedente salvo per le nuove variabili:

$h$ , spessore del terreno al piede

$hc$ , spessore della copertura in sommità

$$y = \left( L - \frac{h}{\sin \beta} - hc \cdot \tan \beta \right) (\sin \beta - \cos \beta \cdot \tan \omega)$$



**Figura 4-4-3 Schema di riprofilatura del pendio.**

La soluzione è:

$$FS = \frac{-b \pm \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a}$$

$$a = (Wa - Na \cdot \cos \beta) \cos \left( \frac{\omega + \beta}{2} \right)$$

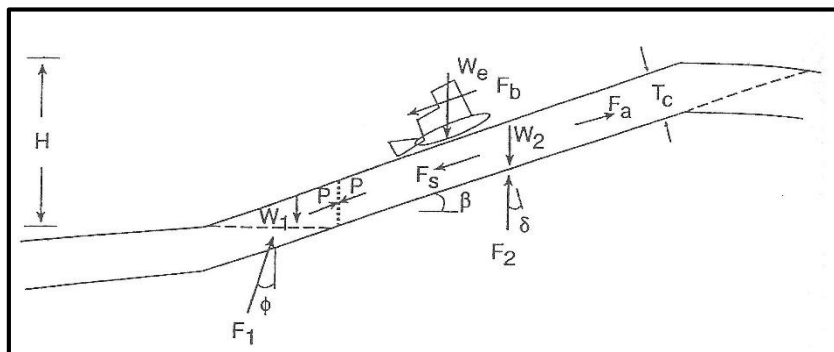
$$b = - \left[ (Wa - Na \cdot \cos \beta) \cdot \sin \left( \frac{\omega + \beta}{2} \right) \cdot \tan \phi + (Na \cdot \tan \delta + Ca) \cdot \sin \beta \cdot \cos \left( \frac{\omega + \beta}{2} \right) + (Ca + Wp \cdot \tan \phi) \cdot \sin \left( \frac{\omega + \beta}{2} \right) \right]$$

$$c = (Na \cdot \tan \delta + Ca) \cdot \sin \left( \frac{\omega + \beta}{2} \right) \cdot \sin \beta \cdot \tan \phi$$

L'incremento del Fattore di Sicurezza è notevole ma lo si paga sia con un aumento sensibile dei volumi dei cunei, sia con il progressivo allontanamento del profilo dal piede originario con il diminuire di  $\omega$ . Questa soluzione deve essere attentamente valutata, ma risulta ottimale perché non sconvolge la geometria originale e perché può essere adottata ad hoc, ovvero solo nelle porzioni di rilevato più gravose (sezioni molto pendenti e di moderata estensione).

#### 4.2 Metodo di Druschel and Underwood (1993) per il pacchetto di copertura.

Data la notevole differenza di dimensioni tra lo spessore del terreno di ricoprimento e la lunghezza del declivio, il problema può essere modellato come lo scorrimento di un blocco rigido su di un piano inclinato. Il metodo è utilizzato non per la caratterizzazione e dimensionamento della copertura ma per una prima valutazione della forza di trazione necessaria a garantire la stabilità di essa; questa richiesta di tiro rappresenta lo sforzo presente sulla GGR, avendo imposto su di essa il compito di rinforzo, sgravando quindi il GCD e la GMB da trazioni non compatibili con la loro struttura. La formulazione prevede l'equilibrio delle forze; quindi la  $F_a$  (forza di ancoraggio) è definita solo dalla chiusura del diagramma del corpo libero, Figura 4-4-4.



**Figura 4-4-4 Rappresentazione del modello Druschel and Underwood.**

Si definiscono:

H, altezza della scarpata,

Tc, spessore del terreno in copertura,

$\beta$ , angolazione del pendio rispetto all'orizzontale,

$\gamma$ , peso del terreno di copertura,

$\phi$ , angolo di attrito del terreno,

$\delta$ , angolo di attrito all'interfaccia terreno vs. GMB,

W1, peso del cuneo passivo al piede,

W2, peso del cuneo attivo di monte,

W<sub>e</sub>, peso di un eventuale macchinario,

F<sub>b</sub>, forza destabilizzante prodotta dal macchinario quando percorre in discesa il pendio (in prima approssimazione si prende il 30% del peso del mezzo operativo),

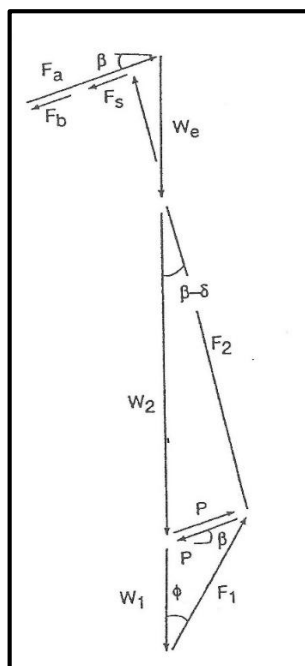
F<sub>a</sub>, forza di ancoraggio (o tensione) sul GSY di rinforzo,

F1, forza di reazione sul cuneo passivo al piede,

F2, forza di reazione sul cuneo attivo di monte,

P, forza di interconciò.

Il diagramma del corpo libero è il seguente, Figura 4-4-5:



**Figura 4-4-5 Poligonale delle forze.**

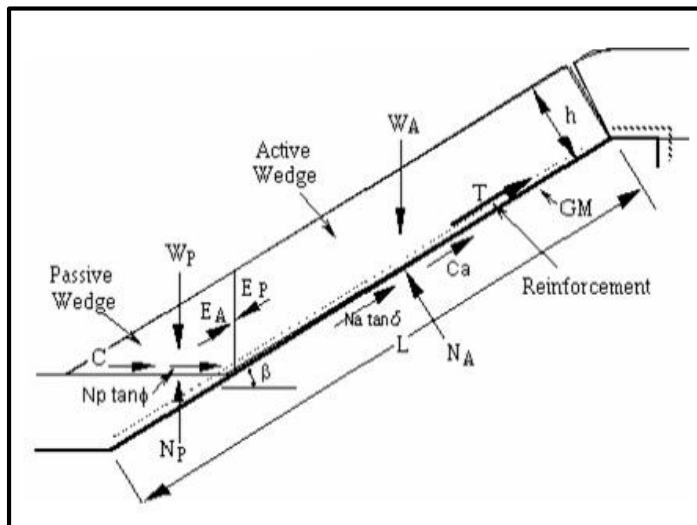
Omettendo i passaggi della dimostrazione si ottiene la seguente equazione:

$$Fa = We \cdot \left( 0.3 + \frac{\sin(\beta - \delta)}{\cos \delta} \right) - \frac{\gamma \cdot Tc^2 \cdot \sin(\beta - \delta)}{2 \cdot \sin \beta \cdot \cos \beta \cdot \cos \delta} \cdot \left[ \frac{\sin \phi \cdot \cos \delta}{\cos(\beta + \phi) \cdot \sin(\beta - \delta)} + 1 - \frac{2 \cdot H \cdot \cos \beta}{Tc} \right]$$

Seppur visivamente scoraggiante, la formula sopra proposta è estremamente semplice poiché i parametri in input sono di facile caratterizzazione. Verrà dunque usato, come rinforzo di primo tentativo, un GSY in grado di sviluppare una resistenza pari a  $Fa$  esprimendo deformazioni elastiche non superiori al 5%, o quantomeno limitate al campo elastico.

#### 4.3 Metodo di Koerner and Soong con rinforzo (1998).

Con il rinforzo di primo tentativo ottenuto precedentemente, si utilizza la formulazione proposta dal R.M. Koerner e dal T.Y. Soong per ottenere il Fattore di Sicurezza allo scivolamento avendo a disposizione una riserva di trazione nella geogriglia di rinforzo (Figura 4-4-6). In questo caso, alla GGR è stato conferito il compito di sopportare tutto il peso del terreno; inoltre per l'interfaccia tra copertura e GSY è stata scelta quella più svantaggiosa.



**Figura 4-4-6 Rappresentazione del modello Koerner and Soong con rinforzo.**

I calcoli sono identici al caso proposto in precedenza ed anche in questo caso si deve risolvere una equazione di secondo grado. I coefficienti  $a$ ,  $b$ ,  $c$  vengono così rielaborati:

$$a = (Wa - Na \cdot \cos \beta - T \cdot \sin \beta) \cdot \cos \beta$$

$$b = -[(Wa - Na \cdot \cos \beta - T \cdot \sin \beta) \cdot \sin \beta \cdot \tan \phi + (Na \cdot \tan \delta + Ca) \cdot \sin \beta \cdot \cos \beta + (Ca + Wp \cdot \tan \phi) \cdot \sin \beta]$$

$$c = (Na \cdot \tan \delta + Ca) \cdot (\sin \beta)^2 \cdot \tan \phi$$

Questo approccio prevede il calcolo del Fattore di Sicurezza limitato ad un pendio isolato soggetto a scivolamento attraverso il contatto tra diversi materiali. La discarica in esame è costituita però da alcune sezioni che comprendono più declivi intervallati da banche di riposo ed altre invece schematizzabili come pendio semplice. Per le sezioni più complesse il dimensionamento e la verifica della GGR verranno effettuati utilizzando l'approccio proposto dall'Ing. L. E. Russo; per la stabilità dei singoli pendii si fa riferimento al Koerner and Soong, mentre per le GGR al secondo approccio. Utilizzando la stessa geogriglia di rinforzo per la medesima sezione si avrà dunque un sovra dimensionamento del geosintetico per alcune zone (prendendo in considerazione la sola traslazione della copertura), ma al contempo si otterrà la corretta valutazione della forza di trazione che andrà a caratterizzare la progettazione della trincea di ancoraggio.

#### *4.4 Metodo di Giroud (1995).*

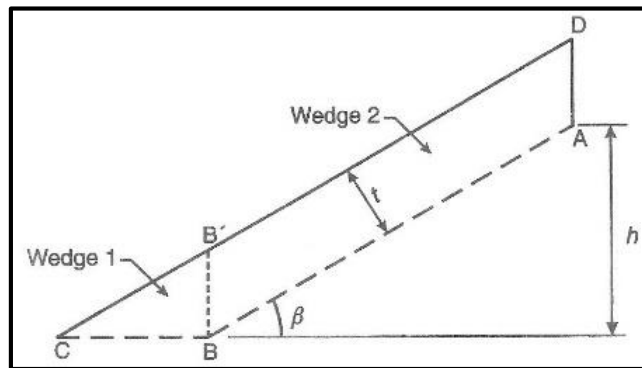
L'ultimo metodo di verifica di stabilità per un terreno di ricoprimento di una discarica è quello proposto inizialmente nel 1989 da Giroud and Beech e successivamente riarrangiato da Giroud nel 1995. Con questo metodo si ha un'ulteriore possibilità di verificare le decisioni proposte con i metodi precedenti garantendo una correttezza di soluzione ancora più ampia. In questo elaborato vengono proposte alcune tra le più comuni soluzioni disponibili in letteratura andando poi a confrontare i risultati ottenuti. Si preannuncia il fatto che tutti i metodi implementati nel foglio elettronico forniscono risultati molto simili, confortandoci sulla effettiva validità dei modelli. Le ipotesi su cui si fonda il modello sono le seguenti:

- non è prevista l'insorgenza di forze di filtrazione lungo il pendio definito utilizzato per impostare la verifica di stabilità. Ciò non significa che il modello non sia in grado di gestire questa eventualità; è necessario però introdurre altri parametri che in questa fase non vengono indicati,
- il pendio non può essere interessato da un battente idraulico che riguarda lo sviluppo del versante medesimo,
- il sistema di geosintetico utilizzato dispone di uno spessore uniforme lungo tutto lo sviluppo lineare del pendio.

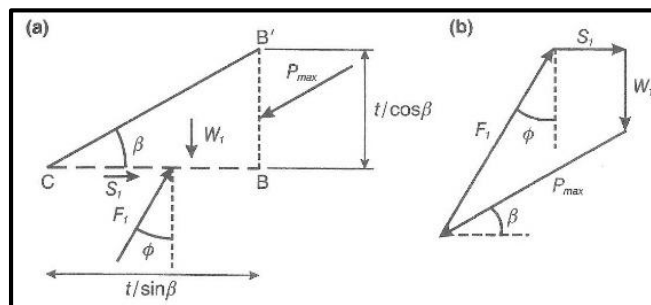
Le componenti principali di cui si compone il modello sono rappresentate da:

- superficie critica (linea in corrispondenza della quale potenzialmente può avvenire lo scivolamento del sistema composito terreno-geosintetico),
- terreno di riporto, posto sopra la superficie critica di potenziale di scivolamento,
- geosintetici, posti sopra la superficie critica di scivolamento.

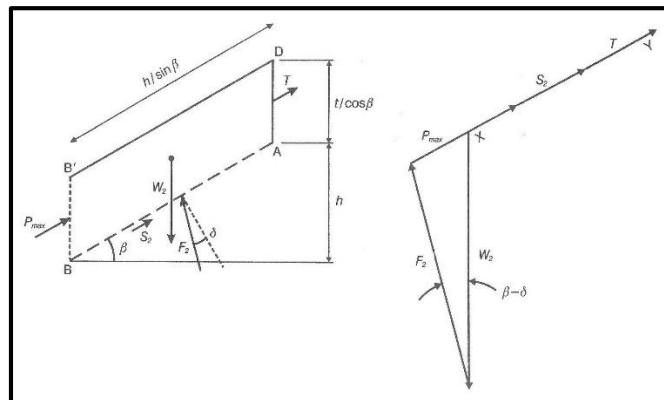
Il metodo adottato da Giroud si basa sulla teoria dell'equilibrio limite, assumendo un pendio definito, geometricamente suddiviso in due cunei. La superficie di separazione tra i due cunei è assunta verticale. I dati geometrici di partenza da considerarsi validi per la determinazione del pendio sono lo spessore  $t$  del terreno di riporto, l'altezza  $h$  e l'inclinazione  $\beta$  (Figura 4-4-7, Figura 4-4-8, Figura 4-4-9).



**Figura 4-4-7 Rappresentazione del modello di Giroud**



**Figura 4-4-8 Cuneo 1 e poligonale delle forze**



**Figura 4-4-9 Cuneo 2 e poligonale delle forze**

$$FS = \frac{\tan \delta}{\tan \beta} + \frac{a}{\gamma \cdot t \cdot \sin \beta} + \frac{t}{h} \cdot \frac{\sin \phi}{\sin 2\beta \cdot \cos(\beta + \phi)} + \frac{c}{\gamma \cdot h} \cdot \frac{\cos \phi}{\sin \beta \cdot \cos(\beta + \phi)} + \frac{T}{\gamma \cdot h \cdot t}$$

Si riporta di seguito la tabella proposta da Giroud nel suo articolo, estremamente valida per prendere dimestichezza con i diversi meccanismi che coinvolgono la stabilità di un pendio.

| Slope                    | Infinite slope                                                                                                                                                                                                                                                   |                    | Additional terms for finite slope |                   |                      |
|--------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------|-----------------------------------|-------------------|----------------------|
| Mechanism                | Interface shear                                                                                                                                                                                                                                                  |                    | Toe buttressing                   |                   | Geosynthetic         |
| Parameter                | Interface friction                                                                                                                                                                                                                                               | Interface adhesion | Soil internal friction            | Soil cohesion     | Geosynthetic tension |
| Symbol                   | $\delta$                                                                                                                                                                                                                                                         | $a$                | $\phi$                            | $c$               | $T$                  |
| General<br>(Equation 12) | $\frac{\tan \delta}{\tan \beta} + \frac{a}{\gamma t \sin \beta} + \frac{t}{h} \frac{\sin \phi}{\sin(2\beta) \cos(\beta + \phi)} + \frac{c}{\gamma h} \frac{\cos \phi}{\sin \beta \cos(\beta + \phi)} + \frac{T}{\gamma h t}$                                     |                    |                                   |                   |                      |
| General<br>(Equation 13) | $\frac{\tan \delta}{\tan \beta} + \frac{a}{\gamma t \sin \beta} + \frac{t}{h} \frac{\tan \phi / (2 \sin \beta \cos^2 \beta)}{1 - \tan \beta \tan \phi} + \frac{c}{\gamma h} \frac{1 / (\sin \beta \cos \beta)}{1 - \tan \beta \tan \phi} + \frac{T}{\gamma h t}$ |                    |                                   |                   |                      |
| $\phi = 0$               | $\frac{\tan \delta}{\tan \beta} + \frac{a}{\gamma t \sin \beta} + 0 + \frac{c}{\gamma h \sin \beta \cos \beta} + \frac{T}{\gamma h t}$                                                                                                                           |                    |                                   |                   |                      |
| $\phi \nearrow$          | $\leftrightarrow$                                                                                                                                                                                                                                                | $\leftrightarrow$  | $\nearrow$                        | $\nearrow$        | $\leftrightarrow$    |
| $\beta \nearrow$         | $\searrow$                                                                                                                                                                                                                                                       | $\searrow$         | $\searrow$                        | $\searrow$        | $\leftrightarrow$    |
| $h \nearrow$             | $\leftrightarrow$                                                                                                                                                                                                                                                | $\leftrightarrow$  | $\searrow$                        | $\searrow$        | $\searrow$           |
| $\gamma \nearrow$        | $\leftrightarrow$                                                                                                                                                                                                                                                | $\searrow$         | $\leftrightarrow$                 | $\searrow$        | $\searrow$           |
| $t \nearrow$             | $\leftrightarrow$                                                                                                                                                                                                                                                | $\searrow$         | $\nearrow$                        | $\leftrightarrow$ | $\searrow$           |

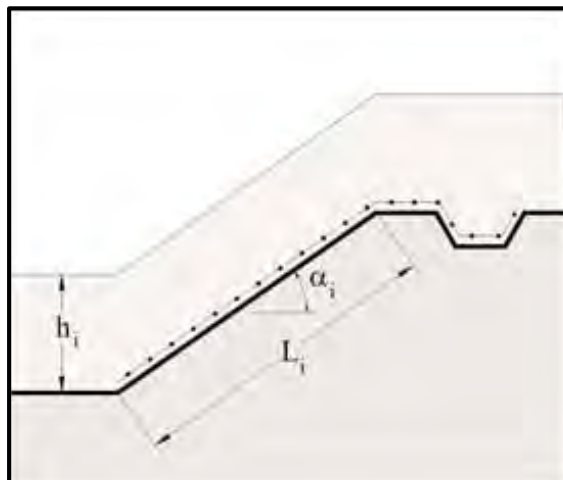
**Tabella 4 Sintesi del metodo di Giroud.**

Le equazioni chiamate 12 (proposta sopra) e 13 (non riportata direttamente nell'elaborato) sono equivalenti. Una freccia verso l'alto indica un incremento del valore della variabile corrispondente ( $\phi$ ,  $\beta$ ,  $h$ ,  $\gamma$ ,  $t$ ), verso il basso un decremento; una doppia freccia orizzontale indica assenza di variazioni. Per esempio, se lo spessore  $t$  aumenta: il primo termine dell'equazione non varia, il secondo decresce, il terzo aumenta (salvo per angolo di attrito nullo, in qual caso esso è zero) il quarto non varia e l'ultimo decresce.

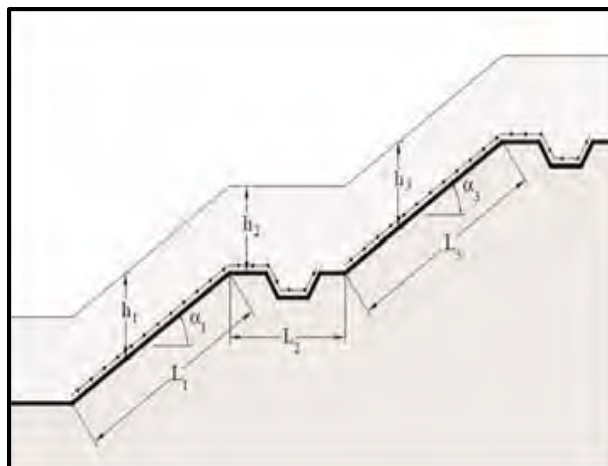
#### 4.5 Sezioni multi-pendio.

In merito al dimensionamento di geosintetici di rinforzo da applicare a profili caratterizzati dalla presenza di berme intermedie si riportano le considerazioni presenti nell'articolo dell'Ing. L. E. Russo.

I modelli di calcolo più diffusi contemplano un pendio unico; in presenza di una banca di riposo essi prevedono la valutazione separata di singoli pendii, come riportato nelle Figure dalla 4-4-10 alla 4-4-16.



**Figura 4-4-10 Posizione ancoraggio per pendio isolato.**

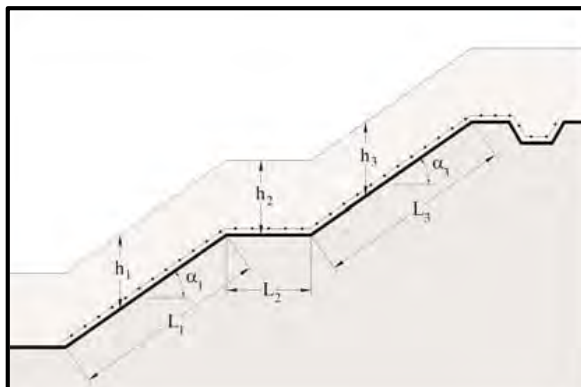


**Figura 4-4-11 Sistema multipendio con ancoraggi multipli.**

Questa assunzione comporta l'interruzione della continuità delle geogriglie, con due effetti negativi, quali la difficoltà di installazione e la necessità di realizzare più ancoraggi. Quest'ultima condizione non è sempre attuabile nelle banche di riposo delle vecchie coperture di discarica.

Il vantaggio di minimizzare le trincee di ancoraggio e di disporre un unico tipo di geogriglia su tutto il pendio risulta del tutto evidente.

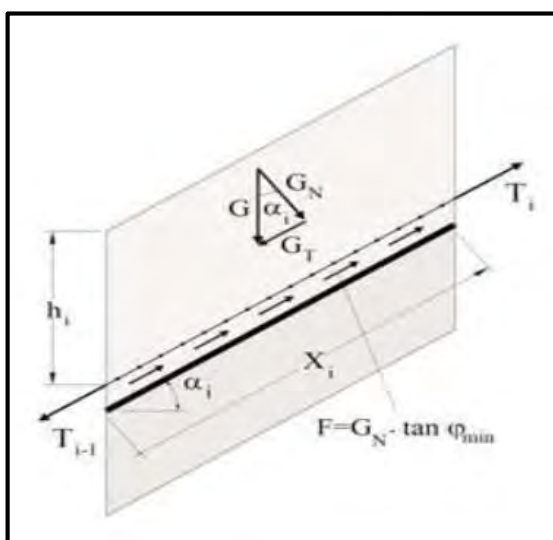
Nella Figura 4-4-12 è riportato lo schema di calcolo multipendio con unica geogriglia.



**Figura 4-4-12 Sistema multipendio con un unico ancoraggio.**

Come accennato, una sequenza di pendii e banche di riposo intermedie, con trincea di ancoraggio in sommità, porta ad analizzare tre casi tipici:

1) Pendii rettilinei:



**Figura 4-4-13 Schema per pendio isolato.**

$$T_i = \gamma \cdot h \cdot x \cdot (\sin \alpha - \cos \alpha \cdot \tan \varphi_{min}) + T_{i-1}$$

Indicando con:

$\gamma$  = peso di volume del suolo [kN/m<sup>3</sup>],

$h$  = spessore del suolo [m],

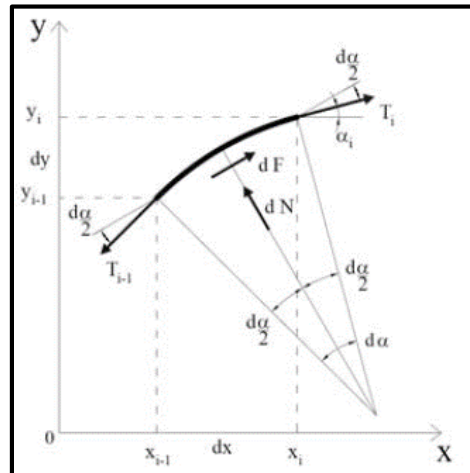
$x$  = ascissa variabile lungo il pendio, compresa fra 0 e  $L$  – lunghezza del pendio [m],

$\varphi_{min}$  = minimo angolo di attrito dell'interfaccia critica [°],

$T$  = Tensione di trazione nella geogriglia [kN/m].

Nel caso di coperture multistrato, come quella in esame, con diversi tipi di geosintetici (geocompositi, geomembrane, ecc.), l'angolo  $\varphi_{min}$  è relativo all'interfaccia critica, vale a dire quella che presenta il minimo angolo di attrito fra i diversi strati. La geogriglia ha la funzione di supplire le deficienze delle forze stabilizzanti; pertanto devono essere in grado di resistere alle tensioni di lavoro nel corso della vita utile dell'opera con un adeguato Fattore di Sicurezza.

2) Trasmissione della tensione di trazione nella geogriglia attraverso angoli convessi:

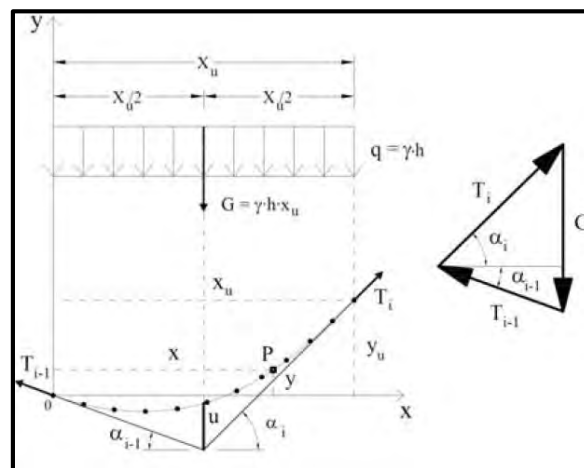


**Figura 4-4-14 Schema di calcolo per angoli convessi.**

$$T_i = \frac{T_{i-1}}{e^{\tan \varphi_{min} \cdot \Delta \alpha}}$$

Dall'analisi dell'equazione si evince che: a) la forma della curva può essere trascurata nel calcolo della riduzione della trazione nella geogriglia, b)  $T_i$  decresce esponenzialmente con l'incremento di  $\varphi_{min}$  e  $\Delta$ . Da ciò deriva che maggiore è l'angolo di attrito e il cambiamento di direzione, maggiore è la riduzione della trazione nella geogriglia.

3) Trasmissione della tensione di trazione nella geogriglia attraverso angoli concavi e controlli del sollevamento:



**Figura 4-4-15 Schema di calcolo per angoli concavi.**

Le geogriglie sono in grado di assorbire esclusivamente tensioni di trazione. Se sono disposte in un angolo, tendono ad esercitare una pressione su di esso se sottoposte a trazione. Nel caso di angoli concavi, la pressione è scaricata sullo strato di terreno sovrastante. Se la risultante di questa pressione ha una componente verticale è possibile il sollevamento di tale strato di terreno.

La tensione di trazione  $T_i$ , che sarà trasmessa al successivo tratto:

$$T_i = T_{i-1} \cdot \frac{\cos \alpha_{i-1}}{\cos \alpha_i}$$

La distanza di sollevamento  $x_u$  è:

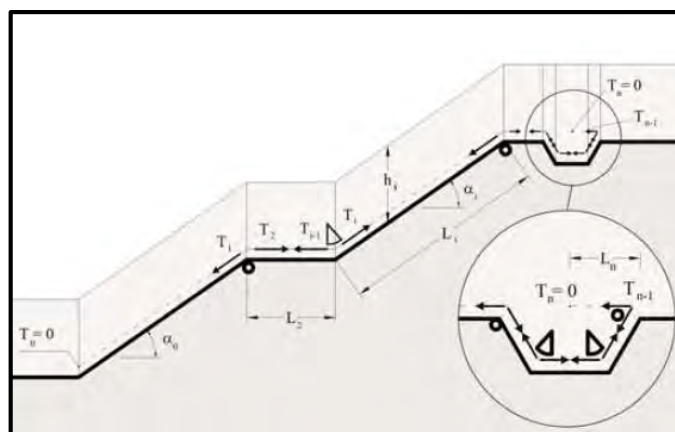
$$x_u = \frac{T_{i-1}}{\gamma \cdot h} \cdot (\cos \alpha_{i-1} \cdot \tan \alpha_i + \sin \alpha_{i-1})$$

La distanza  $x_u$  indica il tratto totale soggetto a sollevamento, in proiezione orizzontale, distribuito in due metà  $x_u/2$  per ogni tratto. Dall'osservazione dell'equazione possiamo notare che negli angoli concavi c'è sempre un effetto di sollevamento. Infatti, lo spessore della copertura dovrebbe essere infinito per ottenere un valore di  $x_u = 0$  ( $x_u \rightarrow 0$  se  $h \rightarrow \infty$ ). Dalla Figura 4-4-15 si evince che il valore del sollevamento verticale "u" può essere determinato con la seguente espressione:

$$u = \frac{\gamma \cdot h \cdot x_u^2}{8 \cdot T_{i-1} \cdot \cos \alpha_{i-1}}$$

Osservando le ultime due equazioni possiamo dedurre che negli angoli concavi con  $T_{i-1} \neq 0$ , c'è sempre un effetto di sollevamento (anche se piccolo) che non può essere evitato, ma deve essere limitato. Questo effetto può essere ridotto incrementando lo spessore "h", il peso di volume del suolo di copertura sul tratto in oggetto (berma), e/o assegnando una contro-inclinazione alla berma (incrementando  $\alpha_{i-1}$ ).

I calcoli di progetto saranno condotti come indicato nella Figura 4-4-16, che riporta la sequenza delle procedure di progetto.



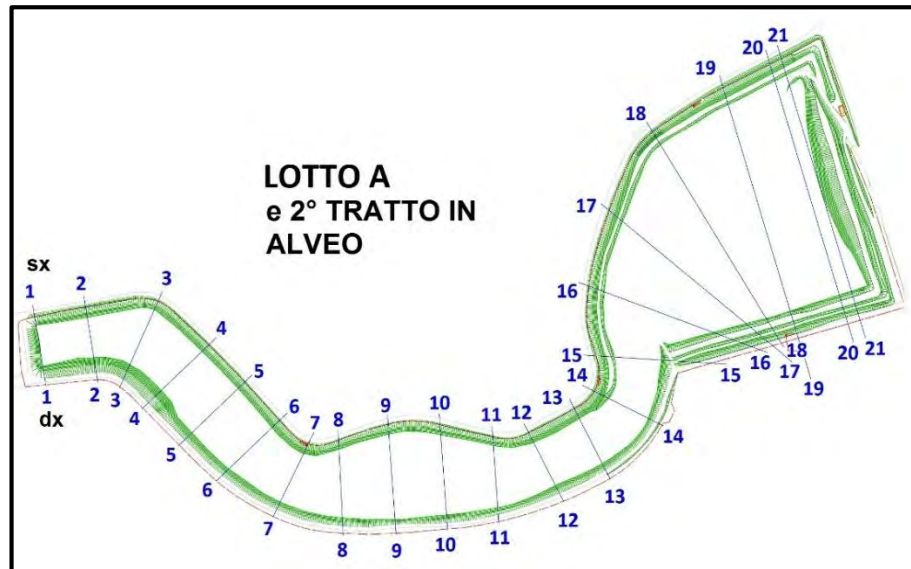
**Figura 4-4-16 Schema di calcolo completo.**

Una volta definita la geometria del profilo dell'intero pendio (scarpate e berme) e lo spessore del terreno di copertura (che può essere successivamente modificato, se necessario), il calcolo inizia considerando il sistema multipendio dal basso verso l'alto, così le forze di trazione nella geogriglia sono calcolate progressivamente. Dapprima è necessario individuare ogni situazione locale con le proprie caratteristiche geometriche, quali: lunghezza dei vari tratti, angoli convessi (simboli circolari nella Figura 4-4-16) e angoli concavi che inducono sollevamento (simboli triangolari nella Figura 4-4-16). Poi, si procede dal piede del pendio, laddove la tensione di trazione sulla geogriglia è nulla ( $T_0 = 0$ ), fino alla cresta, seguendo il verso dell'incremento della trazione nella geogriglia.

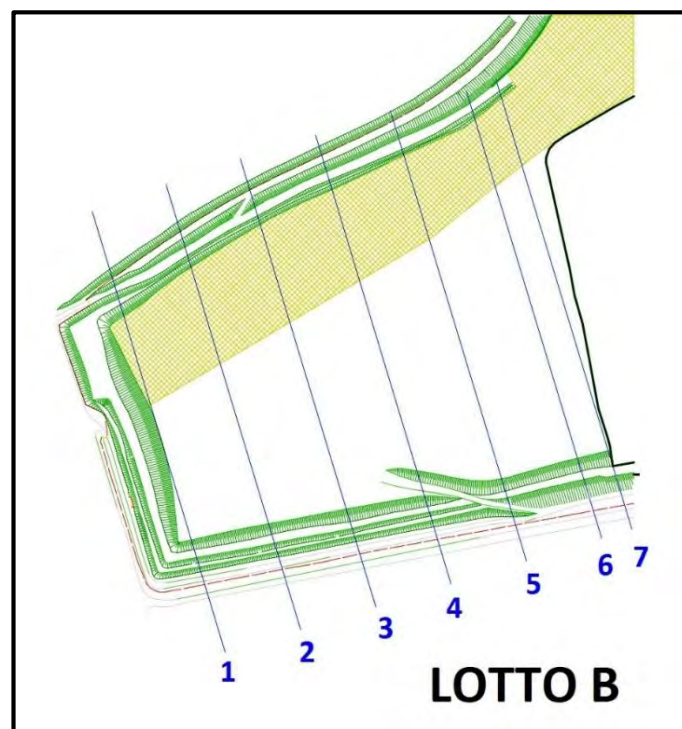
La procedura di costruzione deve essere tenuta in conto in sede di progettazione. In fase di installazione possono infatti verificarsi, per un breve periodo di tempo, situazioni critiche tali da generare problemi di instabilità o sovraccarichi in particolari punti (ad esempio a seguito di azioni dinamiche indotte dai macchinari in fase di posa in opera). Nei sistemi multipendio realizzati con rinforzi continui, il suolo di copertura dev'essere in primis posto in opera nelle superfici orizzontali (le banche di riposo) e nelle trincee di ancoraggio, così da fissare la geogriglia ed evitare problemi di sollevamento. Quindi, nel progetto è necessario indicare la sequenza di realizzazione tenendo in conto i carichi di breve termine nella fase di realizzazione, che potrebbero generare situazioni più critiche di quelle relative ai carichi nella configurazione finale. In questi casi la tensione ammissibile nella geogriglia può essere assunta maggiore rispetto ai carichi permanenti, stante la scarsa influenza del creep nel rinforzo.

#### 4.6 Risultati.

Nelle Figure 4-17, 4-18 è riportata la pianta dei Lotti considerati, numerando le sezioni per identificarle al meglio.



*Figura 4-17 Lotto A e Secondo tratto in alveo.*



*Figura 4-18 Lotto B.*

Il materiale di copertura è stato particolareggiato per gruppi di sezioni in modo da rendere più agevoli le operazioni di posa in opera.

La Tabella 5 riporta questa divisione ed il tipo di terreno utilizzato. La Tabella 6 ne sintetizza i parametri geotecnici principali. Maggiori dettagli sono presenti nella Tesi di Laurea di Giuffrida Stefano: “VERIFICA DI STABILITÀ E DIMENSIONAMENTO DEL SISTEMA DI ANCORAGGIO DEL PACCHETTO DI COPERTURA DI UNA DISCARICA DI RIFIUTI SOLIDI SPECIALI NON PERICOLOSI”.

| Lotto A e 2T     |           |
|------------------|-----------|
| Sezioni          | Materiale |
| 1 – 13 Sinistra  | A         |
| 1- 13 Destra     | A         |
| 15 – 21 Sinistra | A         |
| 15 – 21 Destra   | B         |
| Lotto B          |           |
| 1 – 7            | A         |

**Tabella 5 Suddivisione dei Lotti con il materiale utilizzato.**

| Materiale | Peso Secco<br>[kN/m <sup>3</sup> ] | Peso Saturo<br>[kN/m <sup>3</sup> ] | Angolo di<br>Attrito [grad] | Coesione<br>[kPa] | Indice di<br>Plasticità [%] |
|-----------|------------------------------------|-------------------------------------|-----------------------------|-------------------|-----------------------------|
| A         | 16                                 | 19                                  | 24                          | 4                 | 10                          |
| B         | 16                                 | 19                                  | 26                          | 7                 | 10                          |

**Tabella 6 Caratteristiche geotecniche dei materiali.**

Le Tabelle dalla 7 alla 11 riportano i risultati della stabilità dei pendii. Si utilizzano i seguenti acronimi:

- K.S.: metodo di Koerner and Soong per il solo terreno in copertura (al di sopra dell'interfaccia critica),
- K.S. Rinforzo: metodo di Koerner and Soong con rinforzo per il pacchetto completo di copertura (attrito diverso tra geosintetici),
- G.: metodo di Giroud,
- D.U.: metodo di Druschel and Underwood.

Il metodo di Druschel and Underwood fornisce il valore di primo tentativo di trazione sul geosintetico di rinforzo, utilizzato nelle analisi di stabilità dei pendii rinforzati.

|     | L [m] | $\beta$ [grad] | Fattore di Sicurezza |                  |      | Tiro [kN/m] |
|-----|-------|----------------|----------------------|------------------|------|-------------|
|     |       |                | K.S.                 | K.S.<br>Rinforzo | G.   | D.U.        |
| 1s  | 7,20  | 25,64          | 1,29                 | 1,75             | 2,02 | 15,20       |
| 2s  | 10,00 | 20,81          | 1,44                 | 1,54             | 2,23 | 12,86       |
| 3s  | 10,80 | 18,78          | 1,59                 | 1,50             | 2,41 | 8,86        |
| 4s  | 9,30  | 25,17          | 1,16                 | 1,57             | 1,91 | 21,79       |
| 5s  | 10,90 | 21,31          | 1,34                 | 1,49             | 2,13 | 16,45       |
| 6s  | 9,90  | 24,23          | 1,19                 | 1,54             | 1,94 | 21,51       |
| 7s  | 8,00  | 25,17          | 1,25                 | 1,67             | 1,99 | 17,19       |
| 8s  | 9,50  | 24,70          | 1,18                 | 1,56             | 1,93 | 21,35       |
| 9s  | 11,80 | 20,30          | 1,39                 | 1,45             | 2,19 | 15,55       |
| 10s | 11,40 | 19,29          | 1,50                 | 1,48             | 2,32 | 11,54       |
| 11s | 10,00 | 21,80          | 1,35                 | 1,53             | 2,13 | 15,50       |
| 12s | 11,20 | 23,27          | 1,19                 | 1,47             | 1,95 | 22,99       |
| 13s | 10,50 | 21,31          | 1,36                 | 1,51             | 2,15 | 15,44       |

**Tabella 7 Lotto A e Secondo Tratto in alveo; Sezioni 1-13 Sinistra.**

|     | L [m] | $\beta$ [grad] | Fattore di Sicurezza |                  |      | Tiro [kN/m] |
|-----|-------|----------------|----------------------|------------------|------|-------------|
|     |       |                | K.S.                 | K.S.<br>Rinforzo | G.   | D.U.        |
| 1d  | 12,00 | 17,74          | 1,64                 | 1,46             | 2,47 | 7,68        |
| 2d  | 15,66 | 15,91          | 1,72                 | 1,36             | 2,60 | 5,47        |
| 3d  | 17,63 | 16,17          | 1,62                 | 1,32             | 2,51 | 8,84        |
| 4d  | 18,20 | 16,96          | 1,51                 | 1,31             | 2,38 | 13,43       |
| 5d  | 10,10 | 20,05          | 1,50                 | 1,53             | 2,30 | 11,05       |
| 6d  | 7,00  | 23,75          | 1,45                 | 1,77             | 2,18 | 11,11       |
| 7d  | 8,00  | 25,17          | 1,25                 | 1,67             | 1,98 | 17,19       |
| 8d  | 8,60  | 23,99          | 1,28                 | 1,62             | 2,03 | 16,70       |
| 9d  | 5,20  | 27,02          | 1,49                 | 2,07             | 2,16 | 9,62        |
| 10d | 8,50  | 23,51          | 1,32                 | 1,63             | 2,07 | 15,32       |
| 11d | 7,30  | 29,68          | 1,07                 | 1,75             | 1,77 | 22,80       |
| 12d | 9,00  | 23,27          | 1,30                 | 1,59             | 2,06 | 16,31       |
| 13d | 6,70  | 29,03          | 1,15                 | 1,82             | 1,85 | 18,93       |

**Tabella 8 Lotto A e Secondo Tratto in alveo; Sezioni 1-13 Destra.**

|     |       |                | Fattore di Sicurezza |                  |      | Tiro [kN/m] |
|-----|-------|----------------|----------------------|------------------|------|-------------|
|     | L [m] | $\beta$ [grad] | K.S.                 | K.S.<br>Rinforzo | G.   | D.U.        |
| 15s | 12,20 | 22,05          | 1,09                 | 1,30             | 1,42 | 22,11       |
| 16s | 12,30 | 21,06          | 1,15                 | 1,42             | 1,48 | 19,15       |
| 17s | 12,50 | 23,03          | 1,03                 | 1,16             | 1,35 | 26,14       |
| 18s | 10,50 | 23,75          | 1,04                 | 1,36             | 1,40 | 22,18       |
| 19s | 13,90 | 21,06          | 1,12                 | 1,23             | 1,42 | 23,06       |
| 20s | 14,60 | 22,29          | 1,04                 | 1,05             | 1,32 | 29,57       |
| 21s | 14,90 | 22,29          | 1,03                 | 1,04             | 1,31 | 30,40       |

|     |      |       |       |      |      |      |
|-----|------|-------|-------|------|------|------|
| 15s | 3,30 | 30,54 | 1,48  | 1,64 | 2,12 | 4,52 |
| 16s | 3,50 | 24,23 | 2,03  | 2,56 | 2,54 | 0,44 |
| 17s | 3,40 | 28,37 | 1,60  | 1,80 | 2,22 | 3,41 |
| 18s | 1,80 | 34,22 | 10,07 | 9,86 | 3,03 | 0,00 |
| 19s | 2,77 | 21,80 | 5,08  | 4,73 | 3,33 | 0,00 |
| 20s | 3,00 | 27,92 | 1,97  | 2,68 | 2,46 | 1,37 |
| 21s | 3,50 | 30,96 | 1,36  | 1,43 | 2,01 | 5,82 |

**Tabella 9 Lotto A e Secondo Tratto in alveo; Sezioni 15-21 Sinistra.**

|     |       |                | Fattore di Sicurezza |                  |      | Tiro [kN/m] |
|-----|-------|----------------|----------------------|------------------|------|-------------|
|     | L [m] | $\beta$ [grad] | K.S.                 | K.S.<br>Rinforzo | G.   | D.U.        |
| 18d | 7     | 28,81079       | 1,26                 | 2,54             | 2,52 | 19,04       |
| 19d | 7,6   | 33,42481       | 1,02                 | 1,42             | 2,20 | 29,87       |
| 20d | 6,6   | 31,38319       | 1,18                 | 2,30             | 2,31 | 21,20       |
| 21d | 6,7   | 31,79891       | 1,15                 | 2,12             | 2,21 | 22,34       |

|     |     |          |      |      |      |      |
|-----|-----|----------|------|------|------|------|
| 18d | 3   | 27,02158 | 3,39 | 3,89 | 3,08 | 0,00 |
| 19d | 2,7 | 31,38319 | 3,07 | 3,53 | 2,87 | 1,08 |
| 20d | 3   | 32,38319 | 2,38 | 2,48 | 2,62 | 3,20 |
| 21d | 2,2 | 32,61924 | 5,09 | 8,22 | 3,13 | 0,00 |

|     |     |          |          |      |      |       |
|-----|-----|----------|----------|------|------|-------|
| 18d | 5   | 26,10485 | 1,80572  | 2,97 | 2,07 | 6,83  |
| 19d | 4,7 | 31,79891 | 1,45776  | 2,05 | 1,80 | 11,82 |
| 20d | 6,9 | 25,40772 | 1,48448  | 1,65 | 1,97 | 12,83 |
| 21d | 6,4 | 27,47443 | 1,403879 | 1,59 | 1,94 | 14,29 |

**Tabella 10 Lotto A e Secondo Tratto in alveo; Sezioni 15-21 Destra.**

|   |       |                | Fattore di Sicurezza |                  |      | Tiro [kN/m] |
|---|-------|----------------|----------------------|------------------|------|-------------|
|   | L [m] | $\beta$ [grad] | K.S.                 | K.S.<br>Rinforzo | G.   | D.U.        |
| 1 | 4     | 36,12944       | 1,30                 | 5,74             | 5,74 | 12,47       |
| 2 | 4,3   | 36,50144       | 1,21                 | 3,33             | 3,33 | 14,67       |
| 3 | 4,5   | 35,75389       | 1,19                 | 2,91             | 2,91 | 15,32       |
| 4 | 5,8   | 34,99          | 1,02                 | 1,49             | 1,49 | 22,54       |

|   |      |          |      |      |      |      |
|---|------|----------|------|------|------|------|
| 1 | 4    | 24,70243 | 2,24 | 2,16 | 2,16 | 2,56 |
| 2 | 4    | 24,46554 | 2,28 | 2,20 | 2,20 | 2,33 |
| 3 | 3,44 | 22,29363 | 3,60 | 3,99 | 3,99 | 0,00 |
| 4 | 3,4  | 21,9     | 3,87 | 4,41 | 4,41 | 0,00 |

|   |     |          |      |      |      |       |
|---|-----|----------|------|------|------|-------|
| 1 | 7,3 | 29,24883 | 1,09 | 1,77 | 1,77 | 22,04 |
| 2 | 8,5 | 30,75265 | 0,96 | 1,21 | 1,21 | 30,64 |
| 3 | 9,6 | 29,68314 | 0,95 | 1,10 | 1,10 | 33,66 |
| 4 | 6,7 | 24,23    | 1,45 | 4,94 | 4,94 | 10,98 |

|   |       |          |      |      |      |       |
|---|-------|----------|------|------|------|-------|
| 6 | 12,94 | 21,80141 | 1,30 | 1,50 | 1,50 | 23,27 |
| 7 | 11    | 25,17352 | 1,09 | 1,38 | 1,38 | 27,81 |

|   |      |          |      |      |      |       |
|---|------|----------|------|------|------|-------|
| 6 | 8,38 | 21,80141 | 1,47 | 1,56 | 1,56 | 11,21 |
| 7 | 17,5 | 16,17216 | 1,62 | 1,35 | 1,35 | 8,69  |

**Tabella 11 Lotto B; Sezioni 1-7.**

Le sezioni 2 e 3 di Tabella 11 Lotto B hanno fattori di sicurezza inferiori all'unità e per questo non risultano verificate. Data la loro posizione all'interno della discarica, si è scelto un intervento di riprofilatura (Paragrafo 4.1.1) così da non sconvolgere eccessivamente la geometria attuale e da non ricorrere a terreni di più elevate prestazioni e quindi di maggior costo.



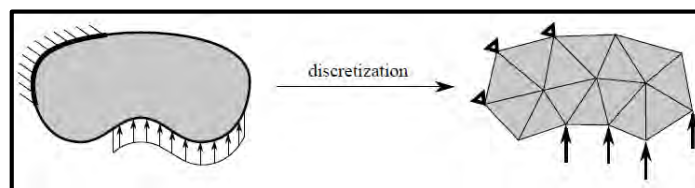
## 5 Modellazione Numerica.

### 5.1 Descrizione dei metodi numerici.

Attualmente si può ricorrere a soluzioni di tipo numerico per problemi difficilmente risolvibili analiticamente dati l'elevato numero di incognite e/o l'elevata mole di iterazioni da eseguire.

L'interazione tra materiali di diversa natura, in questo caso materiali plastici e terreno, è molto complessa e l'utilizzo di un codice di calcolo deve essere ben impostato. Si può ricorrere a due approcci distinti ovvero utilizzando Metodi a Elementi Finiti (FEM, Figura 5-1), Metodi a Elementi Distinti (DEM, Figura 5-2) o, se necessario, all'uso simultaneo di entrambi. Per esempio una griglia può essere ben rappresentata utilizzando un codice a Elementi Finiti (FE) mentre una porzione di materiale granulare attraverso Elementi Distinti (DE); qualora si volesse simulare una prova di pullout, entrambi i metodi dovranno essere utilizzati assieme, se accoppiati con validi codici in grado di far collaborare questi due strumenti apparentemente incompatibili.

#### 5.1.1 FEM.



**Figura 5-1 Schematizzazione FE.**

Per materiale elastico lineare con le particolari condizioni al contorno, la soluzione si esprime come combinazione delle seguenti equazioni:

$$\varepsilon = \nabla^{sym} \cdot u ; x \in \Omega$$

$$\sigma = {}^4D : \varepsilon ; x \in \Omega$$

$$\nabla \cdot \sigma + b = 0 ; x \in \Omega$$

$$u = \bar{u} ; x \in \Gamma_u$$

$$n \cdot \sigma = \bar{t} ; x \in \Gamma_f$$

Dove:  $x$ = vettore posizione in coordinate cartesiane;  $u=u(x)$  vettore spostamento;  $\varepsilon=\varepsilon(x)$  vettore deformazione;  $\sigma=\sigma(x)$  vettore tensione;  ${}^4D={}^4D(x)$  tensore di rigidezza di quarto ordine;  $b=b(x)$  forze di massa;  $t=t(x)$  forze di superficie;  $\Omega$ = dominio del corpo;  $\Gamma_u$ = contorno del corpo con spostamenti assegnati;  $\Gamma_t$ = contorno del corpo con forze di superficie assegnate;  $n=n(x)$

vettore unitario normale al contorno;  $\nabla$ =vettore di derivate direzionali; “.”=prodotto interno; “.”=prodotto esterno; il soprassegno indica valori prestabiliti.

Combinando le prime tre equazioni si ottiene la formulazione in senso forte del problema:

$$\nabla \cdot [{}^4D: (\nabla u)] + b = 0$$

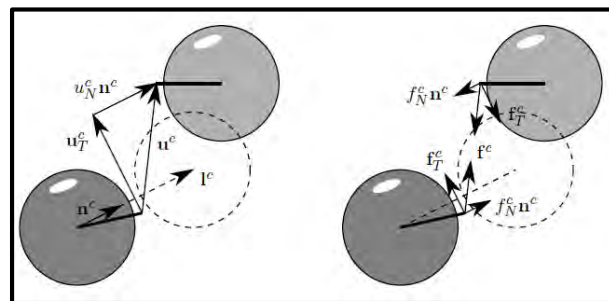
L’idea che sta alla base del metodo FE è quella di suddividere il dominio in un numero finito di elementi. Su ogni elemento  $e$ , il campo di spostamenti  $u^e(x)$  è approssimato come combinazione di spostamenti nodali  $\{d\}^e$ . Dalla geometria e dal tipo di materiale, la matrice di rigidezza  $[K]^e$  può essere costruita, rappresentando la relazione tra gli spostamenti nodali  $\{d\}^e$  e le forze nodali  $\{f\}^e$ .

Approssimando il carico esterno come forze nodali, la soluzione al problema è rappresentata da:

$$[K]^e \{d\}^e = \{f\}^e \rightarrow [K]^g \{d\}^g = \{f\}^g$$

Essa dovrà essere risolta in funzione degli spostamenti nodali per assegnate condizioni al contorno. L’equazione precedente può essere ricavata anche utilizzando il Principio Dei Lavori Virtuali che descrive il problema elastico lineare in formulazione debole.

#### 5.1.2 DEM.



**Figura 5-2 Schematizzazione DE.**

Si consideri un assemblato di particelle rigide. Il contatto  $c$  tra le particelle è creato o all’inizio della simulazione oppure quando le particelle si sovrappongono. Il contatto può essere descritto tramite un vettore  $l^c$  con normale  $n^c = l^c / \|l^c\|$ . Gli spostamenti di contatto relativi  $u^c$  possono essere espressi in termini di spostamenti della particella  $x^p$  e rotazioni della particella  $\varphi^p$ , scomposti nella componente normale  $u_N^c$  e in quella tangenziale  $u_T^c$ . La legge costitutiva (elastica lineare) di contatto è anch’essa proiettata in direzione normale e tangenziale, ma in termini di forze e rigidezze ( $f_N^c$  e  $f_T^c$  e  $k_N^c$  e  $k_T^c$ ). La forza di contatto agisce sul punto di tangenza in comune tra le particelle e la componente tangenziale genera un momento che influisce su entrambe.

Quindi:

$$u_N^c = u^c \cdot n^c ; u^c = u_N^c n^c + u_T^c$$

$$f_N^c = k_N^c \cdot u_N^c ; f_T^c = k_T^c u_T^c ; f^c = f_N^c n^c + f_T^c$$

Per ciascuna particella  $p$ , le forze sono sommate su tutti i punti di contatto e l'equazione di Newton per il moto diventa:

$$f^p = \sum_{c \in p} f^c ; \ddot{u}^p = f^p / m^p$$

Con  $m^p$ = massa della particella  $p$ ,  $\ddot{u}^p$ = accelerazione della particella  $p$ . Il problema viene risolto tramite somma e integrazione dell'equazione del moto, valida anche per i momenti e le accelerazioni angolari.

## 5.2 Descrizione del pacchetto di copertura standard ed alternativo.

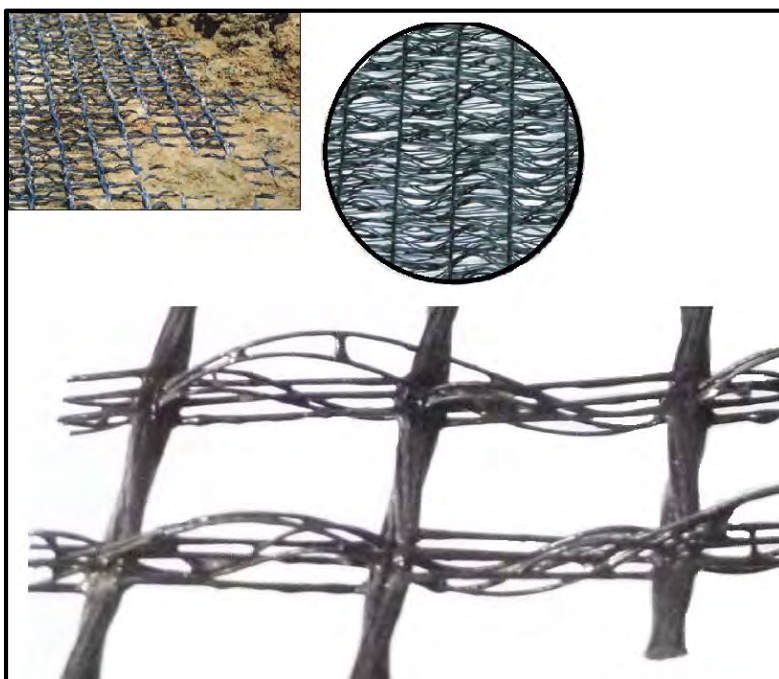
Il “pacchetto” di copertura di una discarica per rifiuti non pericolosi come quella di Torretta di Legnago (VR) prevede, ai sensi delle B.A.T. (Best Available Technology) del settore discariche (costituito dalle norme tecniche del D.Lgs 36/2003), una serie di strati di terreni e materiali svolgenti funzioni diverse, essenzialmente di impermeabilizzazione e drenaggio.

Segnatamente, il progetto della copertura in esame, trattandosi dell'adeguamento della copertura di vecchi lotti ormai esauriti, prevede il seguente pacchetto:

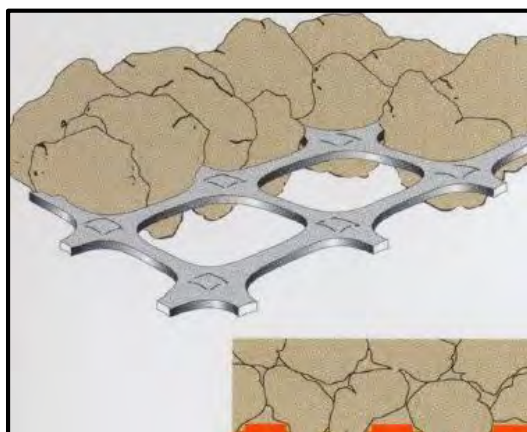
- 50cm di materiale coesivo già presente in loco e predisposto in passato alla funzione di copertura impermeabile, ormai fessurato ed insufficiente,
- Geomembrana in LDPE corrugata in superficie per garantire un attrito di interfaccia più consistente (GeoSil HL o similari),
- Geocomposito drenante ad anima cuspidata con spessore di 0.5cm confinato solo nella superficie superiore da uno strato di geosintetico tessuto/non tessuto (Pozidrain 6s250/nw8 o similari),
- 70cm di stato a bassa permeabilità ( $k < 10^{-8}$ ) a funzione impermeabile,
- 10-20cm di terreno di coltivo per garantire un inerbimento ad apparato radicale ridotto.

Trattandosi, nel caso in oggetto, della copertura assai inclinata della scarpata della discarica (3:2), appare evidente come il problema della stabilità del pendio sia particolarmente presente nell'interfaccia fra la geomembrana e il geocomposito drenante, entrambi di materiali polimerici caratterizzati da basso coefficiente di attrito. Per questo motivo, la stabilità del sovrastante terreno di finitura è affidata a una Geogriglia in HDPE con resistenza a trazione adeguata (Fortrac RT 150 o similari).

Dall'analisi di stabilità accuratamente presentata nella Tesi di Laurea di Giuffrida Stefano: "VERIFICA DI STABILITÀ E DIMENSIONAMENTO DEL SISTEMA DI ANCORAGGIO DEL PACCHETTO DI COPERTURA DI UNA DISCARICA DI RIFIUTI SOLIDI SPECIALI NON PERICOLOSI" si ottiene lo sforzo di trazione agente sul geosintetico di rinforzo, in questo caso una GGR. Nel mercato le ditte specializzate in questo settore sono molteplici e molteplici sono i prodotti che esse propongono. Le griglie che più diffusamente si utilizzano per il rinforzo di pendii molto pendenti sono le cosiddette GGR tridimensionali come si vede dalla Figura 5-3.



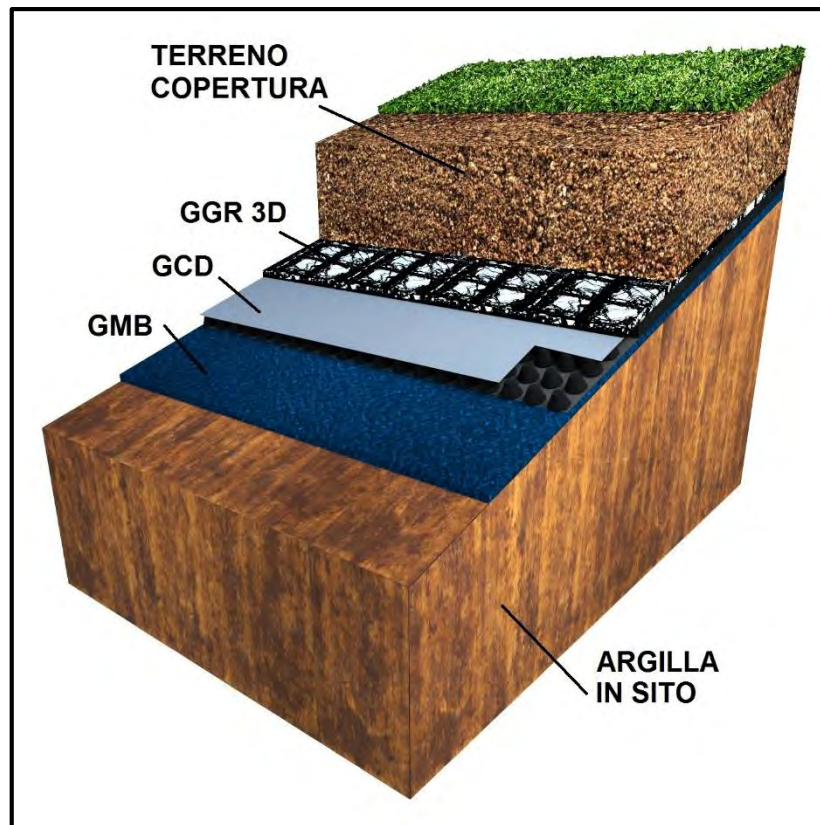
*Figura 5-3 Geogriglia tridimensionale.*



*Figura 5-4 Interlocking.*

Esse esprimono elevate resistenze a trazione e si caratterizzano per una struttura che ha uno sviluppo anche nella terza dimensione andando ad inglobare una porzione di terreno pari a circa 5-10cm a seconda dei prodotti. Esse hanno la caratteristica di poter contare su un

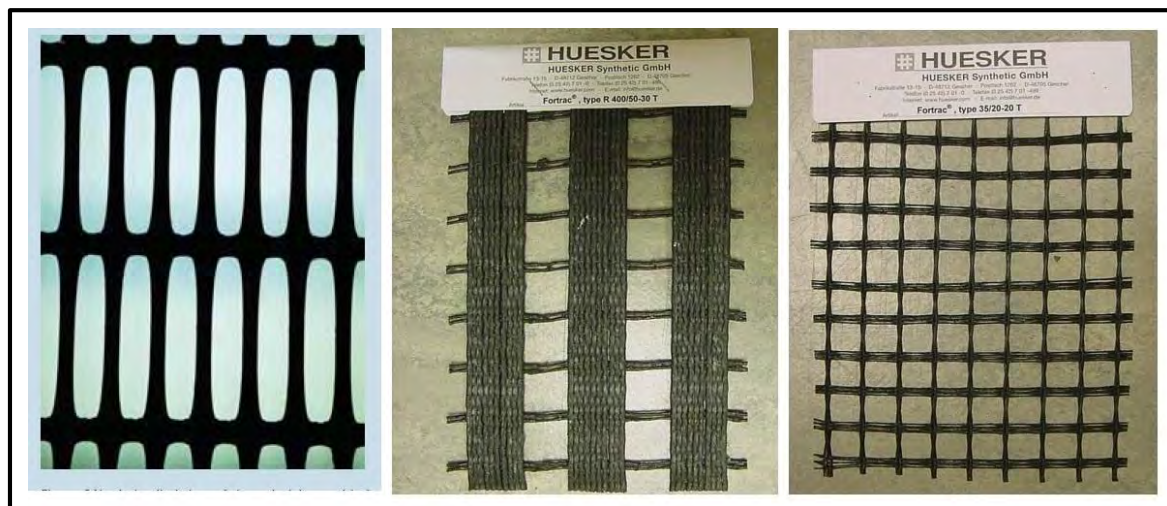
intrinseco “effetto spacer”, cioè un completo immersionamento nel terreno (Figura 5-4). Da un punto di vista statico esse riescono a trasferire la superficie di rottura dall'interfaccia GSY/GSY a quella terreno/terreno e quindi permettono di impostare una verifica di stabilità del solo terreno, molto meno gravosa. Le geogriglie tridimensionali abbinano prestazioni elevate e rapidità di installazione, ma sono un dispositivo molto costoso dal punto di vista economico. In Figura 5-5 viene proposto lo schema di una copertura standard.



*Figura 5-5 Copertura standard con geogriglia tridimensionale.*

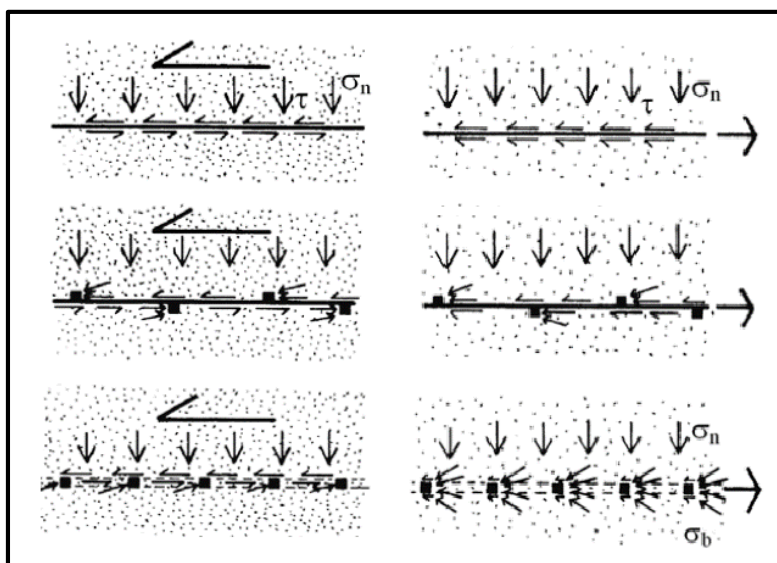
E' stata anche esplorata la possibilità di utilizzare una più economica geogriglia piana anziché quella tridimensionale garantendo un identico o superiore Fattore di Sicurezza. Le GGR piane si caratterizzano per spessori molto ridotti (mm o decimi di mm) e trazioni esprimibili molto alte, utilizzate soprattutto nella realizzazione di rilevati stradali e terre rinforzate.

In Figura 5-6 è proposta una selezione di geogriglie piane.



**Figura 5-6 Esempio di geogriglie piane.**

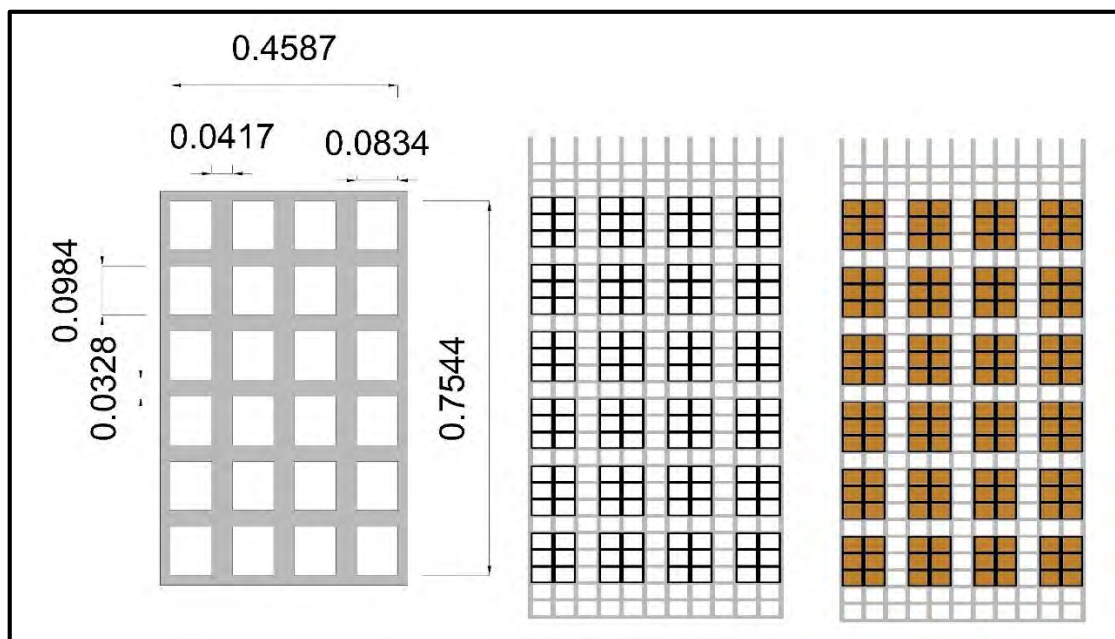
Lo svantaggio delle GGR piane è quello di non poter coinvolgere abbastanza terreno attorno a loro (ancor più se posizionate direttamente sopra un GSY). La resistenza sviluppata dal sistema è solamente ad attrito, anziché una resistenza composta da attrito e resistenza degli elementi trasversali (Figura 5-7).



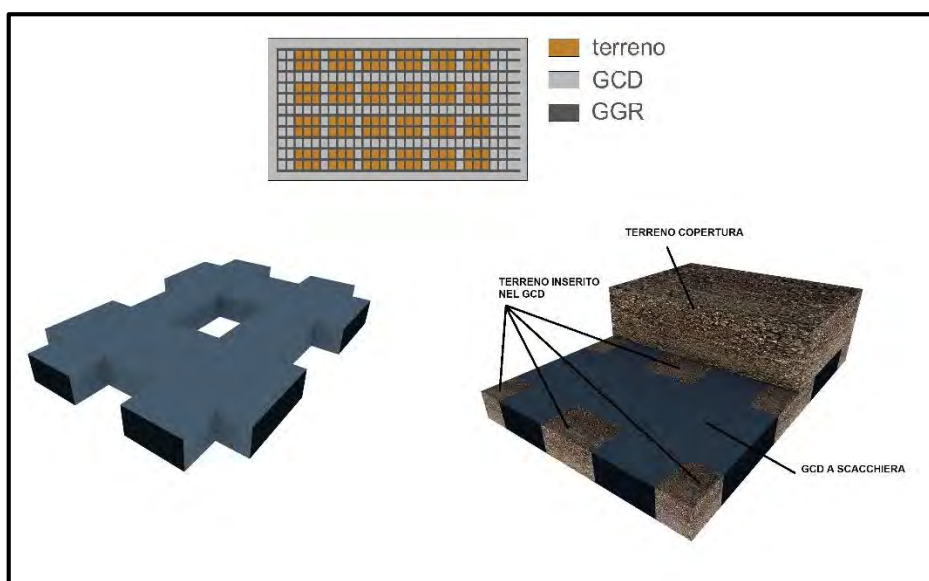
**Figura 5-7 Meccanismi di resistenza.**

L'idea sta nel fornire alla griglia uno spessore di terreno anche al di sotto di essa in modo da immorsarsi pienamente nel terreno ed attivare il meccanismo completo di resistenza. Questo spessore lo si realizza forando il sistema drenante con fori rettangolari 8.34x9.84 cm e saldando le facce scoperte dei fori per preservare la conducibilità idraulica all'interno di esso (va peraltro tenuta in conto la circostanza che tale dispositivo insiste su una superficie assai

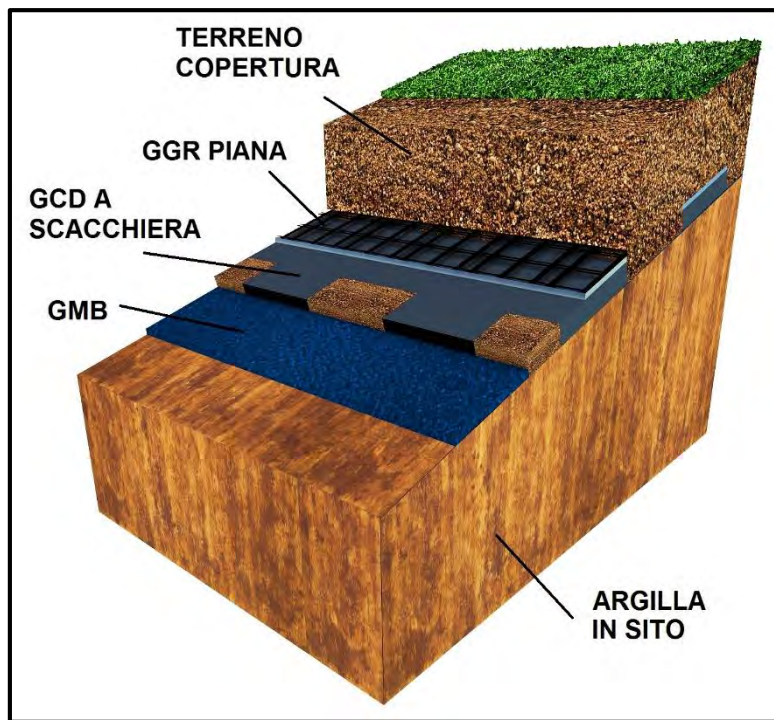
pendente, ove, pertanto, è richiesta una minor trasmissività idraulica del geocomposito drenante). In Figura 5-8, 5-9, 5-10 viene rappresentato quanto suesposto.



**Figura 5-8 Dimensioni del geocomposito forato, a sinistra; zone di geogriglia beneficianti dell'immorsamento, in centro (evidenziate di nero); vuoti riempiti dal materiale di copertura, a destra.**



**Figura 5-9 Geocomposito drenante forato.**



**Figura 5-10 Sezione della copertura alternativa.**

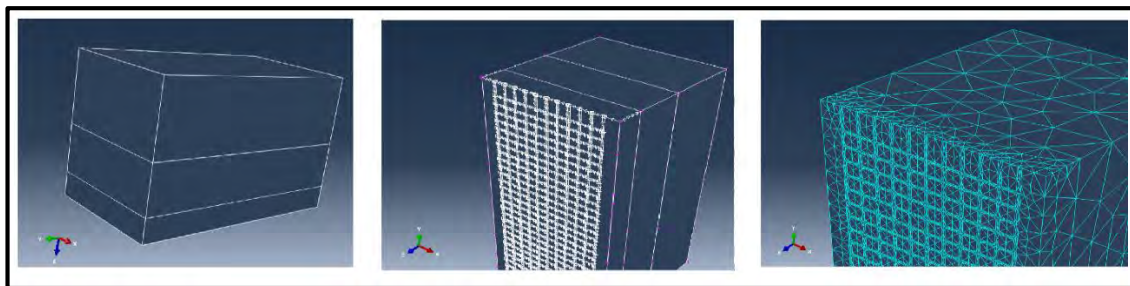
Questo provvedimento di ancoraggio del terreno “per punti” impone un’analisi tensionale tridimensionale per comprendere lo stato di sollecitazione all’interno del terreno ed i benefici o difetti che il diverso posizionamento della griglia comporta. Si andranno a modellare due situazioni distinte: la prima, collocando la GGR piana direttamente sul GCD intatto per analizzare tensioni, deformazioni e spostamenti della configurazione standard. La seconda, posizionando la GGR sul GCD forato analizzando i cambiamenti di stato tensionale e nel terreno e nel geosintetico di rinforzo. Per avere un riferimento alle due modellazioni ne viene creata una terza; si simula una geogriglia completamente immersa nel terreno soggetta alle medesime sollecitazioni dei due casi precedentemente esposti.

### *5.3 Descrizione del modello numerico.*

La modellazione avviene creando tre corpi distinti ovvero il terreno di copertura, la geogriglia e il geocomposito drenante (forato e non), così da gestire al meglio le numerose interfacce presenti.

Il terreno in copertura viene realizzato con tetraedri tridimensionali a quattro nodi, addensando la mesh in prossimità della faccia a contatto con la geogriglia.

In Figura 5-11 è riportato quanto detto.



**Figura 5-11 Modellazione del terreno di copertura.**

Si noti come sulla faccia inferiore del parallelepipedo (ovvero quella a contatto con i geosintetici), siano già state create le “impronte” di essi così da definire in maniera esatta le zone di interfaccia e avere una perfetta corrispondenza tra le mesh dei diversi elementi.

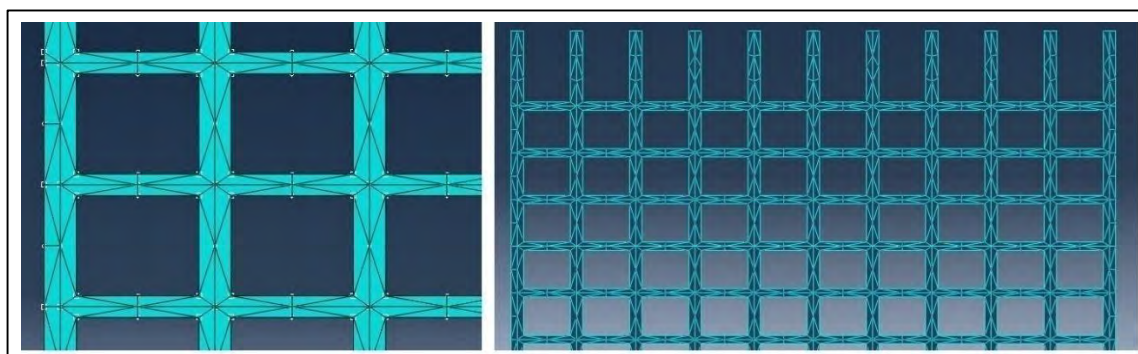
In Tabella 12 si sintetizzano le caratteristiche meccaniche del terreno.

| COPERTURA                 |     |         |
|---------------------------|-----|---------|
| Densità, $\rho$           | 1.6 | tonn/mc |
| Angolo di attrito, $\Phi$ | 26  | gradi   |
| Coesione, $c$             | 6   | kPa     |
| Modulo Elastico, $E$      | 20  | MPa     |
| Coeff. di Poisson, $\nu$  | 0.3 | //      |

**Tabella 12 Caratteristiche meccaniche del terreno.**

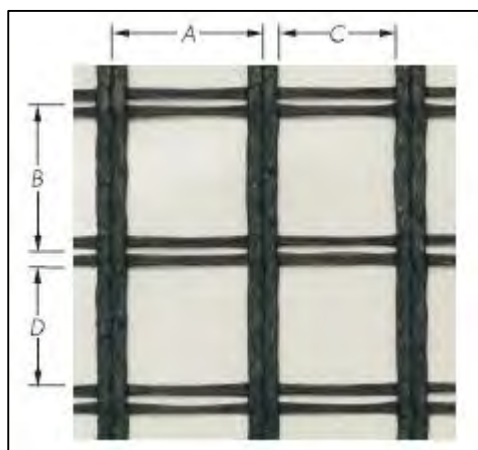
Per valutare le possibili zone di plasticizzazione al materiale è stato conferito un comportamento elasto-plastico con criterio di rottura alla Mohr-Coulomb.

La geogriglia piana (e tridimensionale) viene rappresentata mediante elementi triangolari a tre nodi con comportamento membranale; questi elementi reagiscono appunto come una membrana, presentando resistenza flessionale nulla, resistendo solamente a sforzi agenti nel piano come trazioni e compressioni. In Figura 5-12 si presenta la mesh ed un ingrandimento per le zone di giunzione.



**Figura 5-12 Modellazione della geogriglia.**

Il prodotto commerciale utilizzato è un Fortrac RT 150 (Figura 5-13) con le proprietà riportate in Tabella 13.

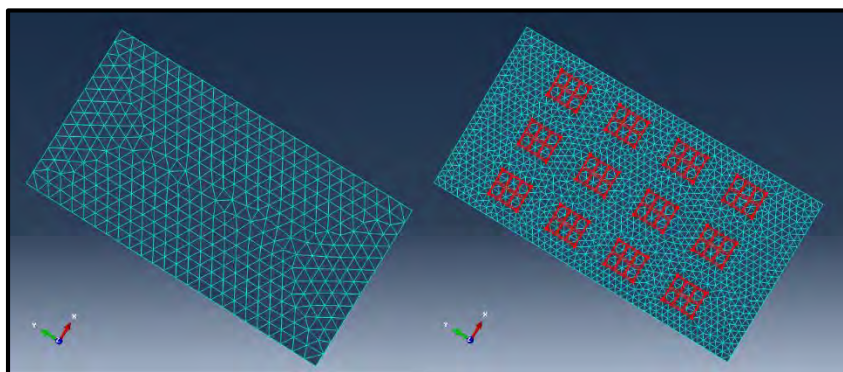


**Figura 5-13 Geogriglia piana.**

| GEOGRIGLIA               |           |         |
|--------------------------|-----------|---------|
| Densità, $\rho$          | 0.85      | tonn/mc |
| Aperure, AxB             | 41.7x32.8 | mm      |
| Aperture, CxD            | 33x27     | mm      |
| Spessore, mm             | 0.2       | mm      |
| Modulo Elastico, E       | 472       | MPa     |
| Coeff. di Poisson, $\nu$ | 0.3       | //      |

**Tabella 13 Caratteristiche meccaniche della geogriglia.**

Per quanto riguarda il geocomposito drenante esso presenta i medesimi elementi del terreno (tetraedri a 4 nodi), ma lo si dovrà partizionare a seconda della tipologia di copertura da realizzare. Nella prima sarà formato da elementi omogenei mentre per la soluzione “a scacchiera” lo si partiziona per inserire dove stabilito il terreno. Nella Figura 5-14 viene rappresentato quanto detto.



**Figura 5-14 Modellazione del geocomposito drenante.**

Anche per questa componente del sistema di copertura si è scelto di impostare a priori le “impronte” che sia la GGR che i vuoti del GCD vengono a creare su di esso. Le Figure 5-15 e 5-16 rappresentano le zone di contatto distinte.



**Figura 5-15 Impronta della GGR sul GCD.**



**Figura 5-16 Zone del GCD nelle quali si colloca il terreno.**

In questa modellazione lo stato tensionale all'interno del geocomposito drenante non è richiesto, salvo quello che si sviluppa all'interfaccia; esso quindi ha la sola funzione di supporto del terreno in copertura, non viene caratterizzato nel dettaglio e gli si attribuisce un comportamento rigido. Esso presenta uno spessore pari a 1 centimetro e le medesime dimensioni, in pianta, del terreno soprastante.

Particolare attenzione viene data alle interfacce essendo la parte più problematica della modellazione. Fra le molteplici formulazioni per caratterizzare il contatto tra diverse superfici, viene adottata una legge ad attrito di tipo Coulombiano ovvero  $\tau = \mu \cdot p$  dove  $\tau$  è lo sforzo tangenziale sviluppato al contatto tra le superfici [kPa],  $\mu$  il coefficiente di attrito che in questo caso corrisponde alla tangente dell'angolo di attrito  $\delta$ , e  $p$  corrisponde alla pressione verticale a livello del contatto tra i corpi. In questa modellazione gli effetti diversi delle due geogriglie vengono tradotti in un aggiornamento dei coefficienti di attrito; saranno più elevati per il modello

tridimensionale, poiché la struttura di questa griglia produce benefici a tutte le interfacce presenti, a fronte della sua particolare fabbricazione. Per la caratterizzazione di questi angoli si è svolta una ricerca approfondita in letteratura ed i risultati scelti sono sintetizzati nelle Tabelle 14 e 15.

| Geogriglia 3D |       |                 |
|---------------|-------|-----------------|
| Interfaccia   | $\mu$ | $\delta$ [grad] |
| Terreno – GGR | 0.45  | 24.2            |
| Terreno – GCD | 0.38  | 20.8            |
| GGR – GCD     | 0.40  | 21.8            |

***Tabella 14 Coefficienti per l'attrito all'interfaccia usando una geogriglia tridimensionale.***

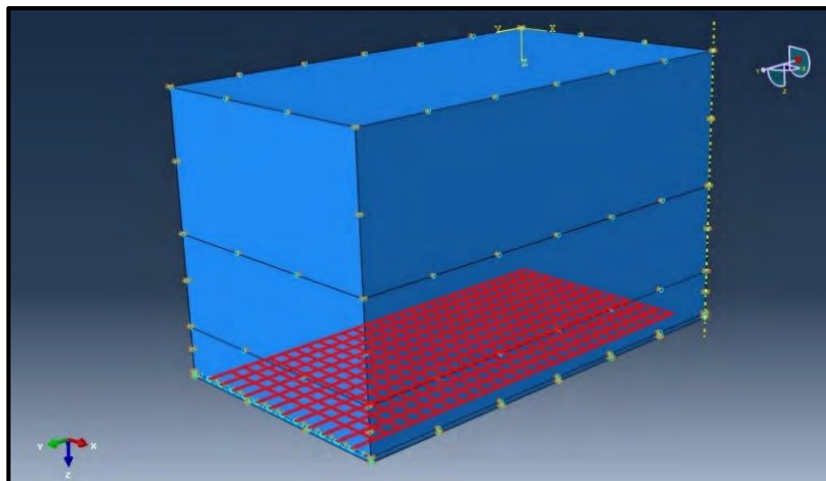
| Geogriglia PIANA |       |                 |
|------------------|-------|-----------------|
| Interfaccia      | $\mu$ | $\delta$ [grad] |
| Terreno – GGR    | 0.27  | 15.1            |
| Terreno – GCD    | 0.19  | 10.7            |
| GGR – GCD        | 0.22  | 12.4            |

***Tabella 15 Coefficienti per l'attrito all'interfaccia usando una geogriglia piana.***

Per quanto riguarda le forze applicate e le condizioni al contorno esse vengono così sintetizzate:

- carico esterno da 5 kPa applicato sulla faccia superiore del modello generale,
- condizione geostatica iniziale: equilibrio delle tensioni con il carico gravitazionale,
- facce ortogonali all'asse Y: bloccate alla traslazione in Y,
- facce ortogonali all'asse X: bloccate alla traslazione in X,
- faccia inferiore del modello generale: incastrata.

Il modello generale è rappresentato in Figura 5-17.



**Figura 5-17 Modello generale con la geogriglia evidenziata in rosso.**

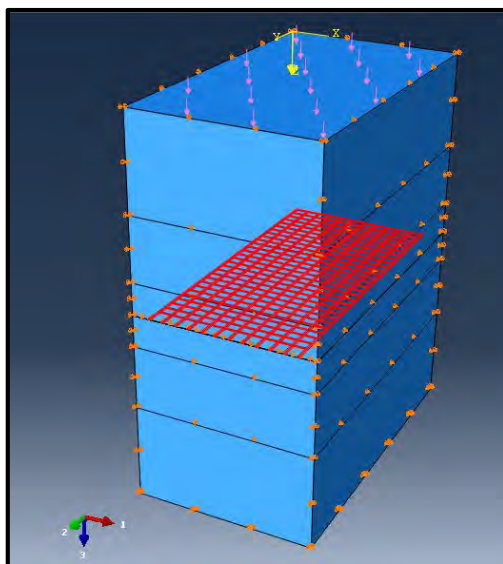
Le azioni esterne che si implementano sono degli spostamenti imposti ai punti estremi della geogriglia. Si realizzano all'interno del programma quattro Step di carico ognuno corrispondente ad uno spostamento definito. Le entità degli spostamenti sono pari a 1, 2, 5, 13.58 centimetri nel verso positivo dell'asse Y. Essi verranno applicati ai diversi modelli creati e si studieranno le relative risposte in termini di tensioni, deformazioni (plastiche e non) e spostamenti



## 6 Applicazioni e Risultati.

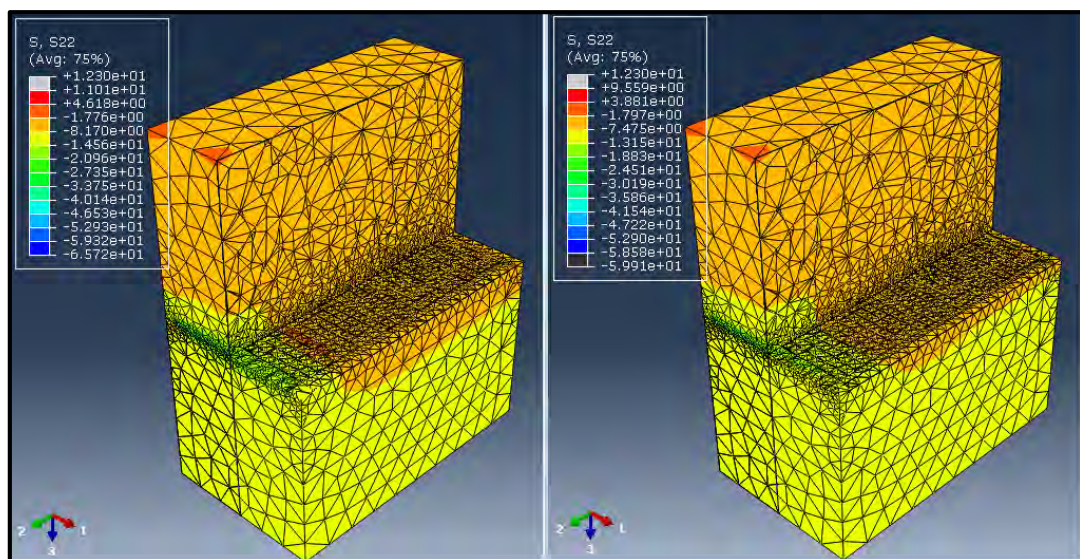
### 6.1 Geogriglia completamente immersata nel terreno.

Per valutare l'efficacia della modellazione del pacchetto di copertura, si è deciso di creare un modello preliminare di confronto. Essa, come precedentemente accennato, consiste nel ricreare le condizioni di pullout ovvero un progressivo spostamento della geogriglia rispetto alla condizione iniziale. Non essendo questo elaborato focalizzato sulla specifica rappresentazione del test, esso viene preso come riferimento limitatamente alle entità da assegnare agli spostamenti della geogriglia. L'interfaccia terreno/terreno ha un coefficiente  $\mu$  pari a 10 (nessuno scorrimento tra i materiali). Il modello presentato in Figura 6-1 ha dimensioni 0.5627x0.9914x1.2 metri e verranno imposti spostamenti da 1, 5 e 13.58 centimetri.

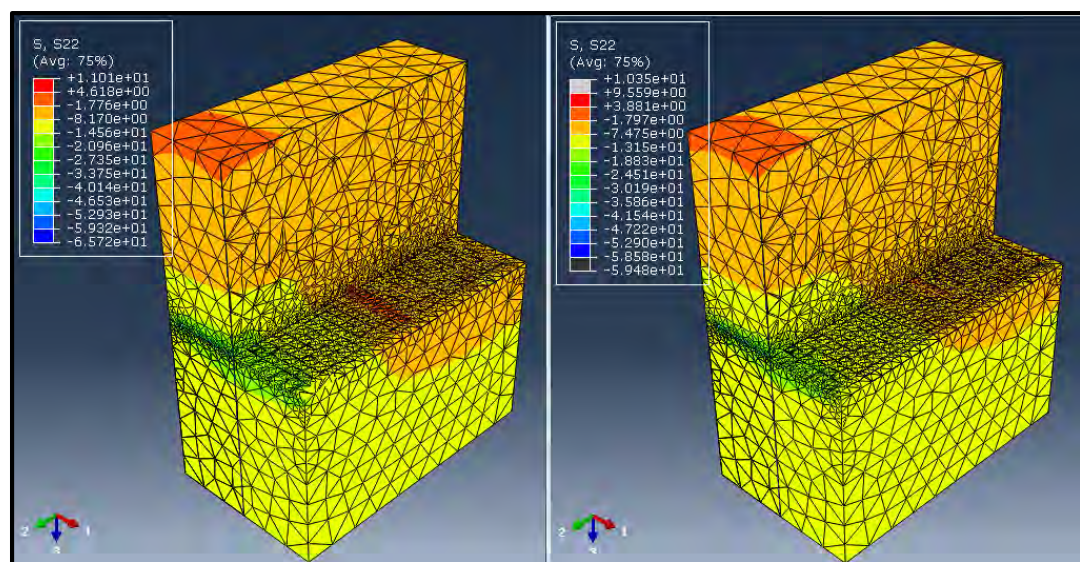


**Figura 6-1 Modello per il pullout (GGR evidenziata in rosso).**

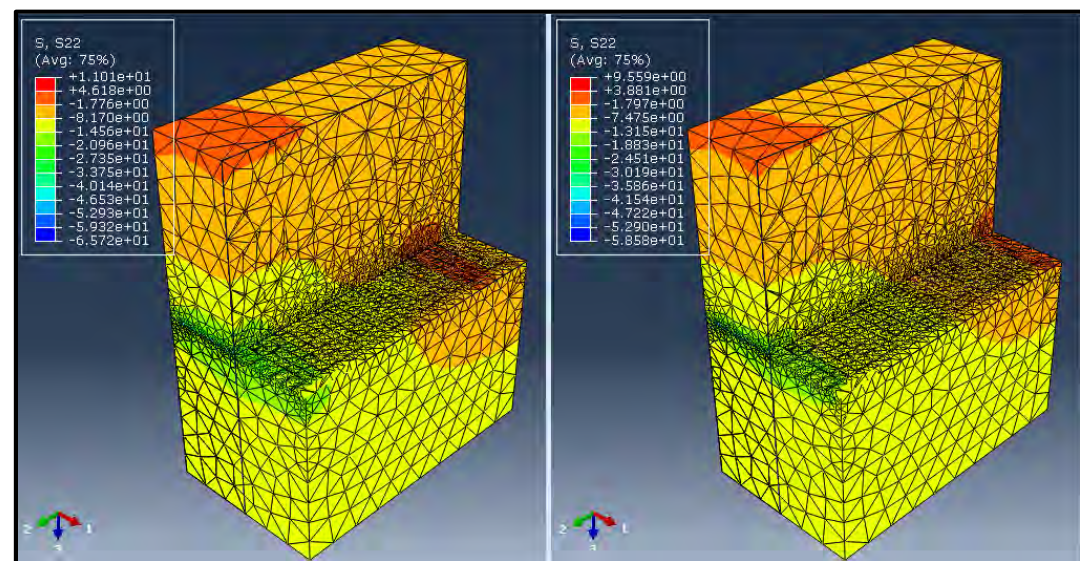
La prima variabile tensionale analizzata è la S22, ovvero la componente di sollecitazione principale in direzione 2, (la medesima nella quale si impongono gli spostamenti della GGR).



**Figura 6-2 Spostamento 1cm; GGR 3D a sinistra e Piana a destra; S22.**



**Figura 6-3 Spostamento 5cm; GGR 3D a sinistra e Piana a destra; S22.**

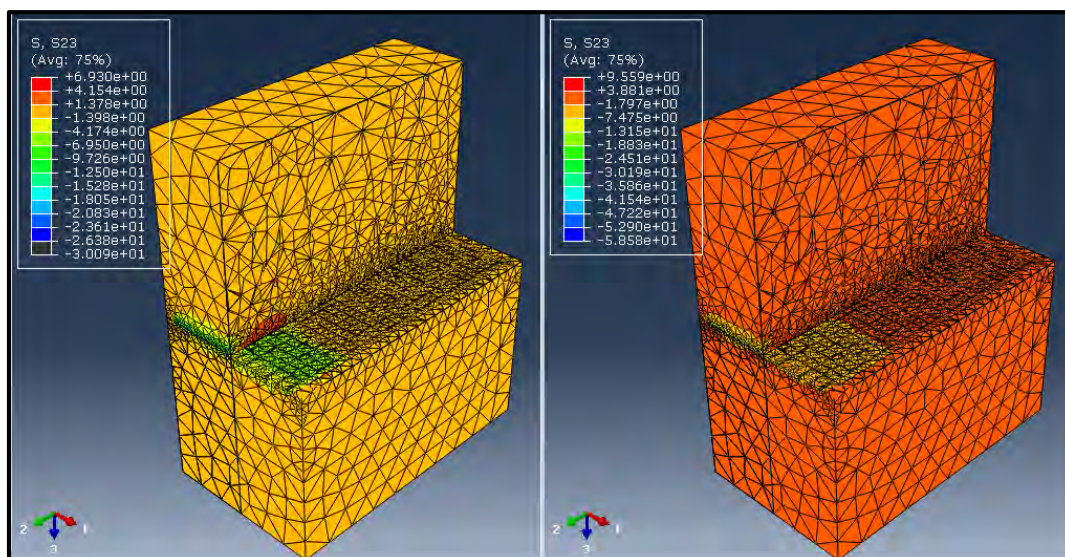


**Figura 6-4 Spostamento 13.58cm; GGR 3D a sinistra e Piana a destra; S22.**

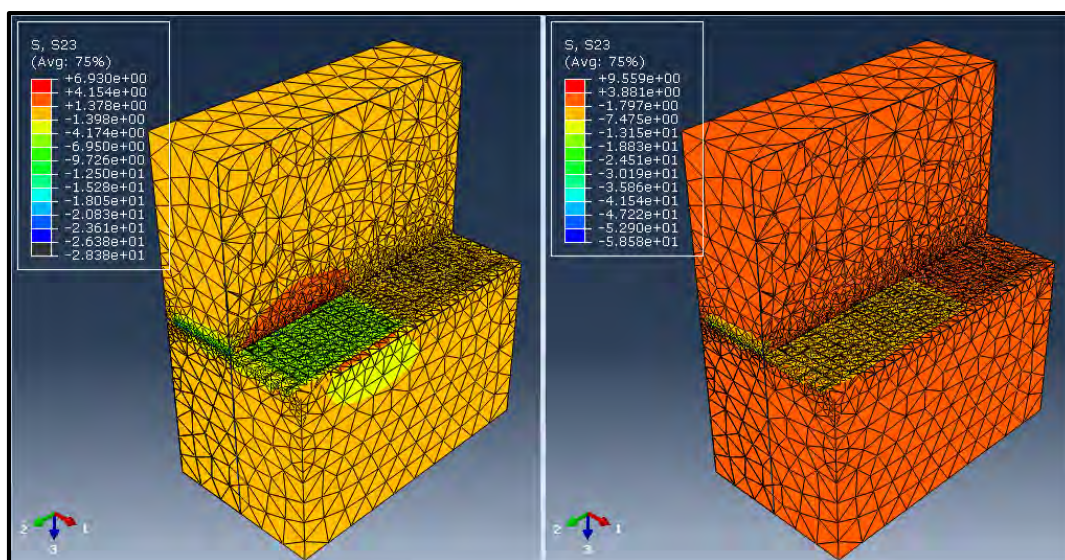
Dalle Figure 6-2, 6-3, 6-4 si possono rilevare i valori ottenuti utilizzando sia la GGR 3D che quella piana. Il modello è stato sezionato con un piano parallelo ad 1-2, a quota 0.6 metri in direzione 3.

Si osserva come, all'aumentare dello spostamento, venga coinvolto un sempre maggior volume di terreno sollecitato da significative variazioni di S22. Nelle immagini della GGR 3D questo fenomeno è particolarmente evidente; si nota come la zona rossa nella metà inferiore del modello arretri sempre di più fino a coinvolgere l'estremità opposta del modello. E' proprio questa la funzione principale delle geogriglie tridimensionali, cioè quella di poter "attivare" una porzione maggiore di terreno rispetto a quelle piane; ciò risulta ovvio ad un confronto con le immagini di destra delle Figure 6-2, 6-3, 6-4 (tipologia piana). Questo coinvolgimento viene ancor più evidenziato dalla variabile S23 (sforzi di taglio ortogonali alla direzione 2 e orientati in 3). Le zone sollecitate sono evidenti nell'utilizzo di griglie tridimensionali (immagini sulla sinistra), mentre risultano praticamente inesistenti per quelle piane (immagini a destra).

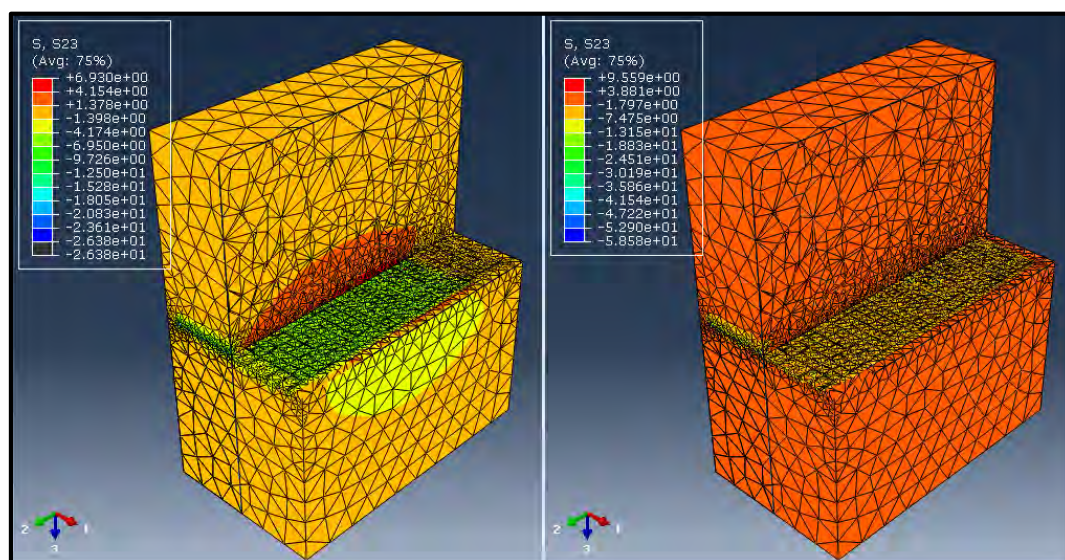
Nelle Figure 6-5, 6-6, 6-7 (pagina successiva), viene rappresentato lo sviluppo della sollecitazione all'aumentare dello spostamento impresso, avendo sezionato il modello con un piano parallelo a 1-2 a quota 0.6 metri e uno parallelo a 2-3 in mezzeria. Si ricorda che i valori dell'attrito all'interfaccia sono molto elevati nel caso di elementi di rinforzo tridimensionali, mentre sono ridotti nel caso di elementi piani. Essi trovano piena corrispondenza nel modello; difatti le zone nelle quali si sviluppano gli sforzi tangenziali aumentano proporzionalmente rispetto allo spostamento della geogriglia. Nel caso di rinforzo piano, questi sforzi tangenziali non si sviluppano quasi per nulla facendo scorrere la GGR molto più facilmente. Questo fatto è avvalorato anche dall'analisi degli spostamenti del terreno. Essi risentono dell'effetto del vincolo posto sia sulla faccia anteriore del parallelepipedo (nessun movimento in direzione 2), sia sulla faccia posteriore, maturando i valori più elevati nella zona centrale del solido. Dalla Figura 6-8 si nota come, per entrambi i modelli, si verifichi la situazione appena descritta, ma con entità che differiscono tra loro per ben un ordine di grandezza nei valori massimi; viene rappresentata solo la metà superiore del modello, data la sua simmetria.



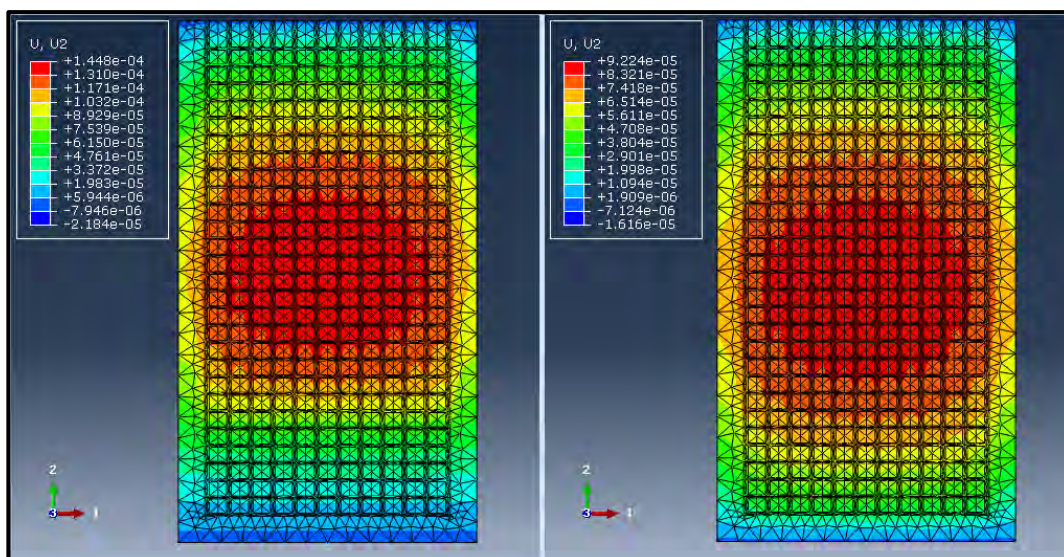
**Figura 6-5 Spostamento 1cm; GGR 3D a sinistra e Piana a destra; S23.**



**Figura 6-6 Spostamento 5cm; GGR 3D a sinistra e Piana a destra; S23.**

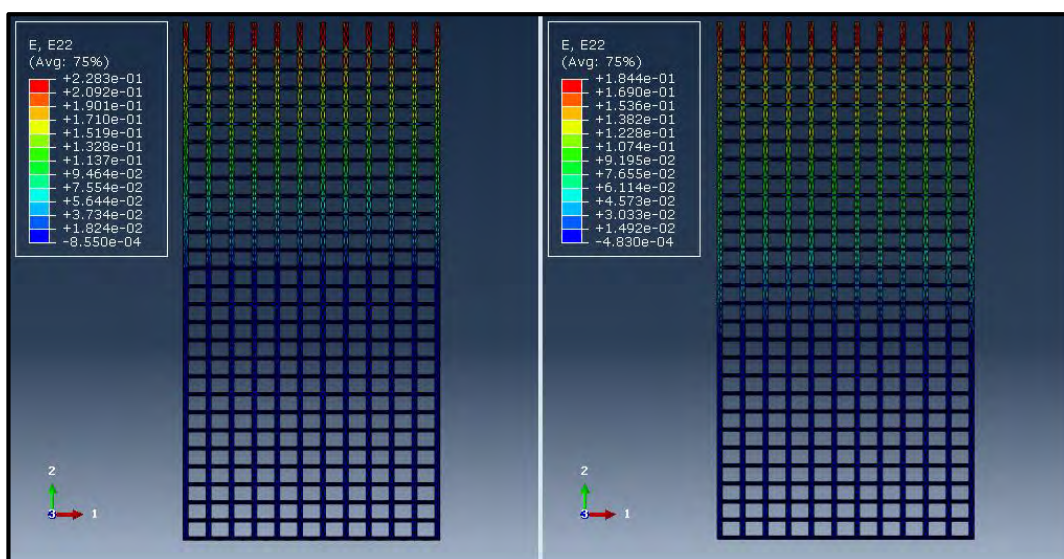


**Figura 6-7 Spostamento 13.58cm; GGR 3D a sinistra e Piana a destra; S23.**



**Figura 6-8 Spostamento 13.58cm; GGR 3D a sinistra e Piana a destra; U2.**

Per quanto riguarda le geogriglie, esse non risentono di particolari benefici. Si propone lo stato deformativo elastico in direzione 2 (la medesima direzione, si ricorda, dello spostamento imposto). In perfetta sintonia con quanto precedentemente esposto, si denota una progressiva “attivazione” delle deformazioni all’aumentare dello spostamento assegnato. Confrontando il caso in presenza della GGR 3D con quello della GGR piana, si registra come per la GGR 3D lo stato deformativo si smorzi a una distanza di circa 40 centimetri dall’estremità sollecitata; per la GGR piana, esso si annulli a circa 53 centimetri, in totale analogia con le tensioni presenti nel terreno. La Figura 6-9 rappresenta la situazione esposta, presentata a spostamento imposto da 5 centimetri.



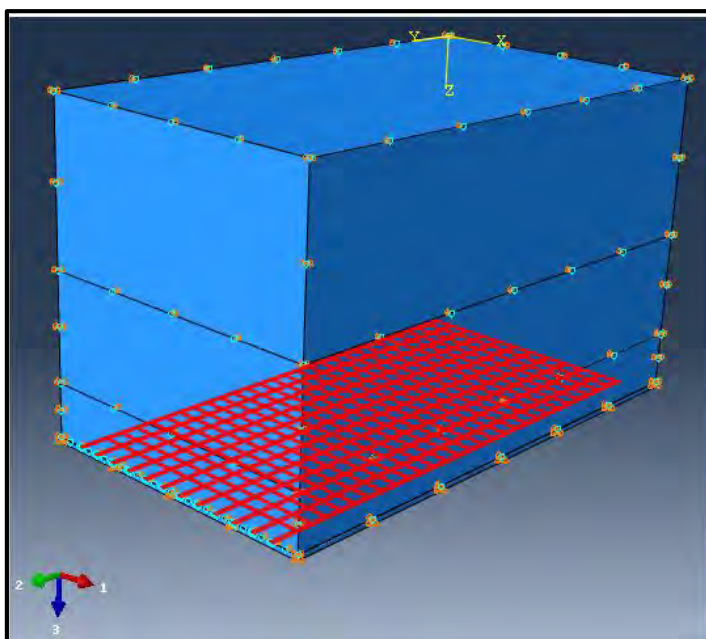
**Figura 6-9 Spostamento 5cm; GGR 3D a sinistra e Piana a destra; E22**

## 6.2 Analisi del pacchetto di copertura.

In questa sezione si studieranno in dettaglio i comportamenti relativi alle due soluzioni per il pacchetto di copertura caratterizzate nel Capitolo 5. Con la definizione “alternativa” si intende quella soluzione per la quale il GCD viene forato con fori rettangolari, i quali permettono l'intrusione del materiale coesivo, aumentando così le zone di contatto della GGR col terreno attorno ad essa. Le variabili ricercate sono diverse, sia dal punto di vista tensionale che deformativo. A quelle già precedentemente esposte si aggiungono le deformazioni plastiche irreversibili che il materiale di copertura sviluppa al suo interno. Queste zone sono le più problematiche, dato che esse, quando sviluppate, non riescono più a contribuire all'equilibrio delle sollecitazioni esterne, producendo un aumento di sforzi alle zone adiacenti. Qualora le zone di plasticizzazione fossero molto estese, si avrebbe una maggior difficoltà di convergenza della soluzione dal punto di vista numerico e dunque una porzione di terreno instabile dal punto di vista fisico. Porzioni di terreno in copertura con ampie zone di deformazioni plastiche sono estremamente pericolose dato che il loro comportamento è il più delle volte imprevedibile.

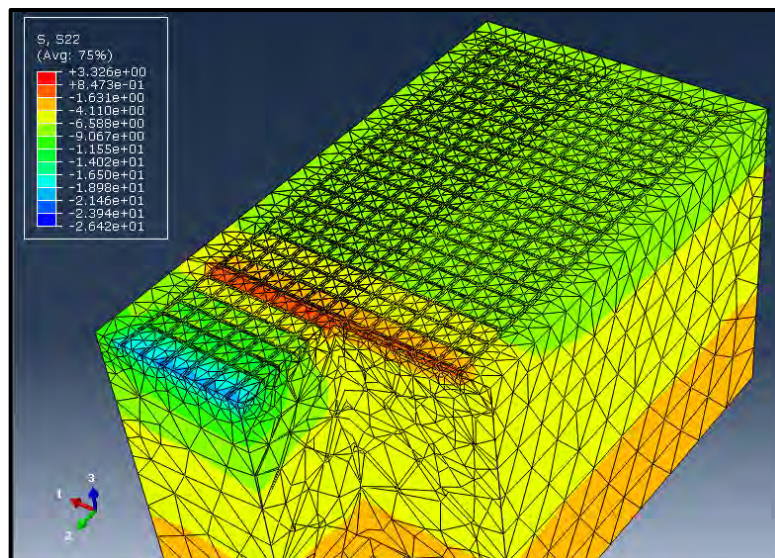
### 6.2.1 Copertura Standard.

Gli effetti positivi di un rinforzo tridimensionale sono stati descritti ampiamente nel Paragrafo 6.1. Si studierà ora una modellazione per la copertura standard cercando di qualificare e quantificare le variabili più importanti del problema. Si ricorda come in questo caso il GCD sia intatto; quindi la sua presenza si traduce soltanto in un diverso coefficiente di attrito all'interfaccia sia con la geogriglia, sia col terreno di copertura. Il modello è presentato in Figura 6-10.

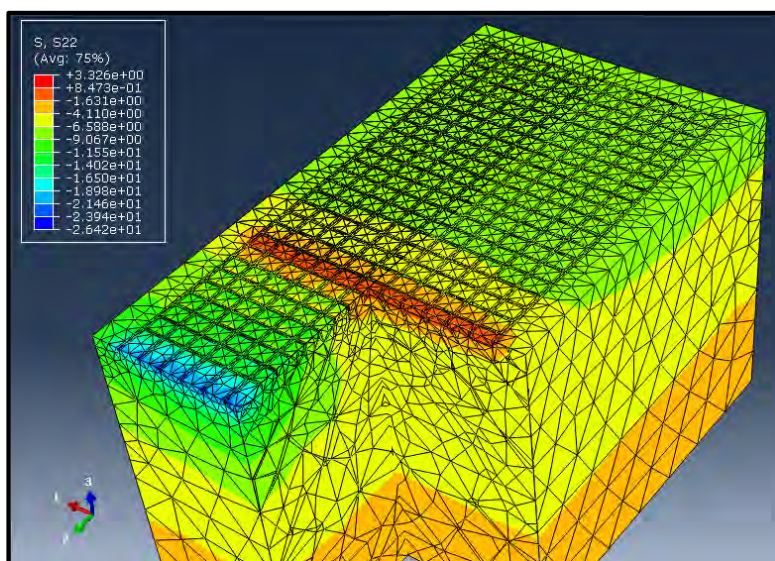


**Figura 6-10 Modello per la copertura standard (GGR evidenziata in rosso).**

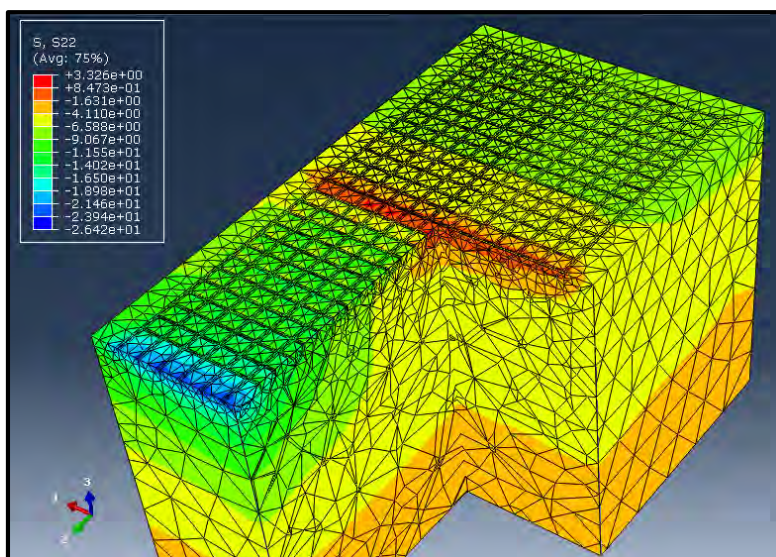
In questa occasione vengono proposti i risultati per tutte le entità di spostamenti assegnati, per analizzare al meglio lo sviluppo delle incognite. Si inizia presentando la tensione principale S22 nelle Figure 6-11, 6-12, 6-13, 6-14. Viene rappresentato il solido sezionato con un piano di sezione che arretra con l'arretrare del fronte delle tensioni.



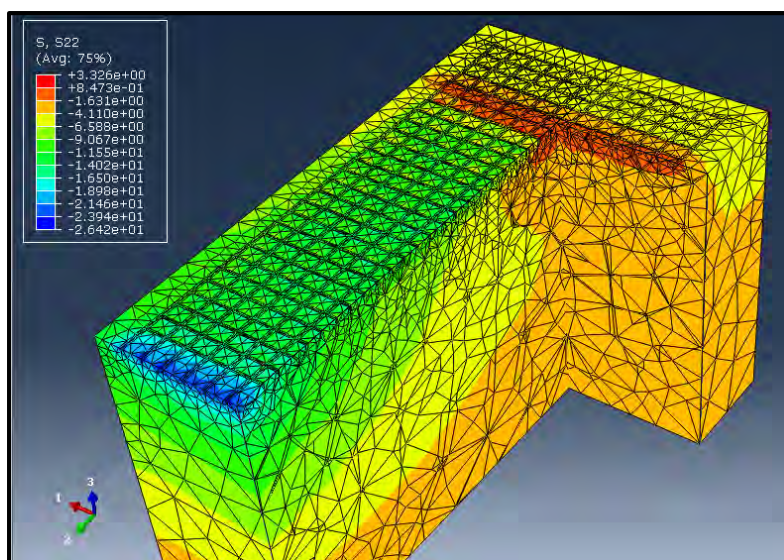
**Figura 6-11 Spostamento 1cm; GGR 3D Standard; S22**



**Figura 6-12 Spostamento 2cm; GGR 3D Standard; S22**

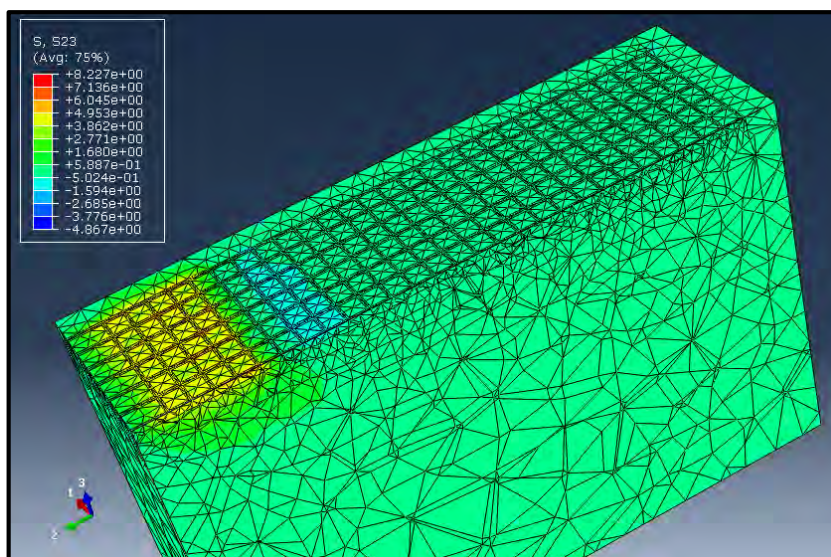


**Figura 6-13 Spostamento 5cm; GGR 3D Standard; S22**

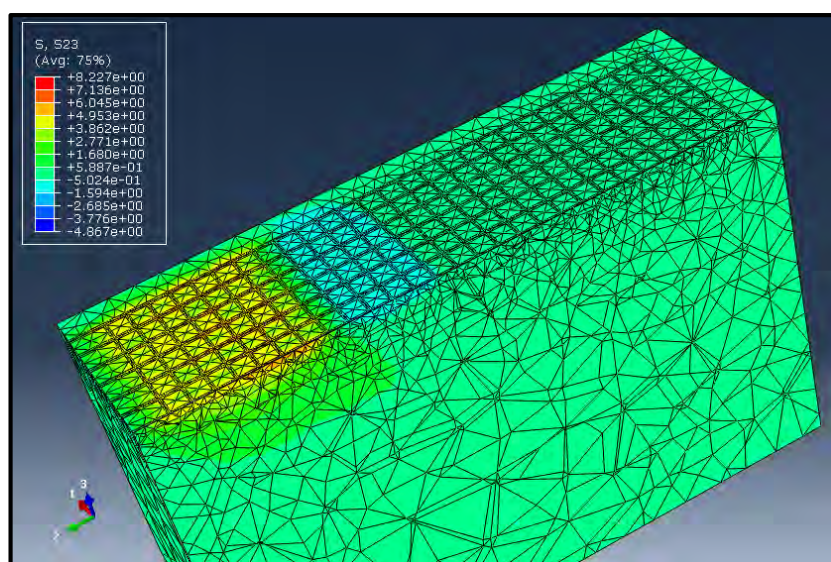


**Figura 6-14 Spostamento 13.58cm; GGR 3D Standard; S22**

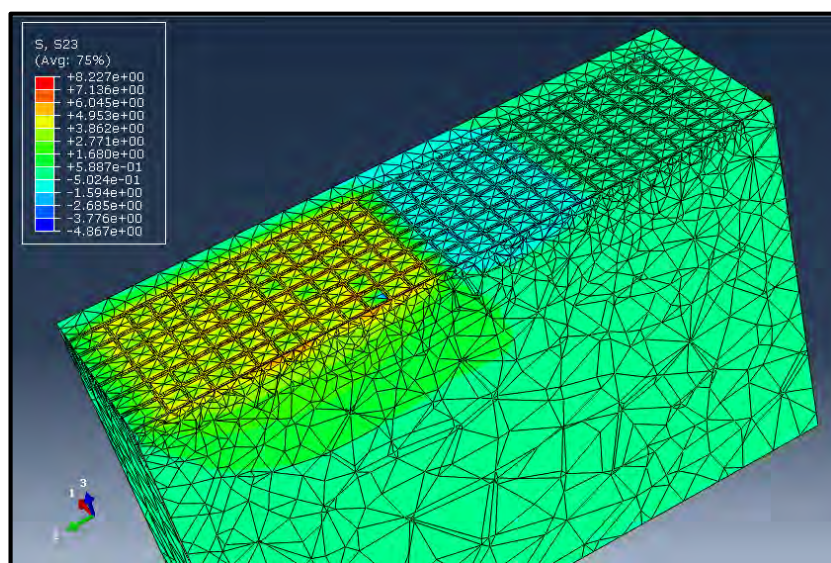
Coerentemente con quanto trovato per il caso del pullout, si assiste al progressivo arretramento del fronte dei valori massimi positivi della tensione, a ennesima dimostrazione del fatto che, più lo spostamento aumenta e più il volume di terreno collaborante aumenta. Anche in questo caso si associa l'output della tensione S23 sulla stessa guisa di quanto fatto nel Paragrafo 6.1. Le Figure dalla 6-15 alla 6-18 sono sezionate con un piano 2-3 a metà del modello.



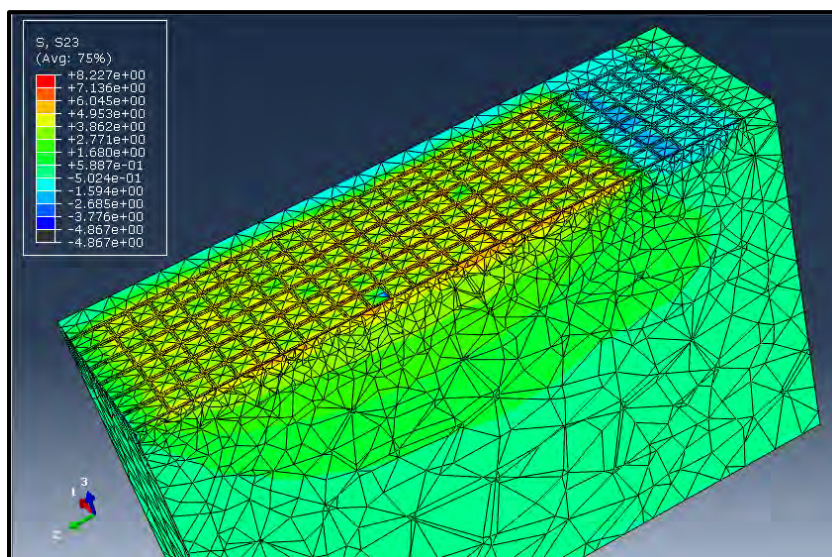
**Figura 6-15 Spostamento 1cm; GGR 3D; S23.**



**Figura 6-16 Spostamento 2cm; GGR 3D; S23.**

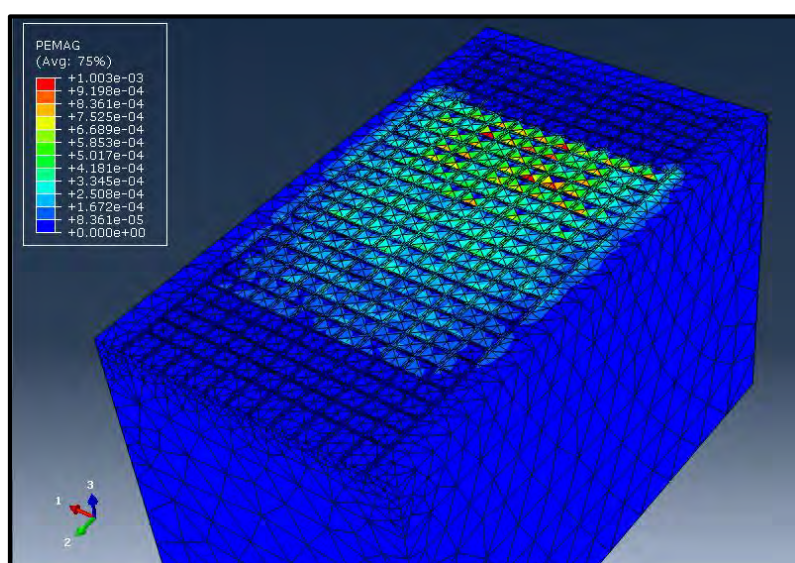


**Figura 6-17 Spostamento 5cm; GGR 3D; S23.**



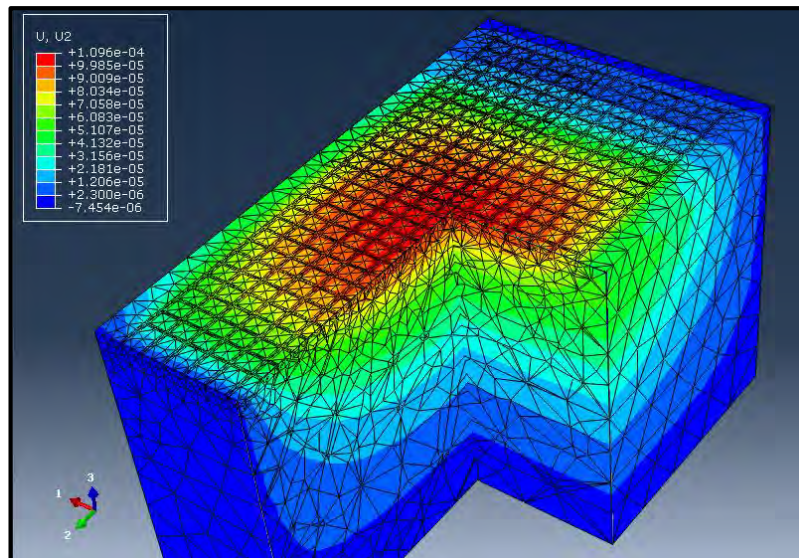
**Figura 6-18 Spostamento 13.58cm; GGR 3D; S23.**

La prossima variabile indagata riguarda la deformazione plastica. Viene rappresentato solo lo Step finale per valutare la massima estensione di questa zona. Nella Figura 6-19 si vede come essa sia sviluppata a circa 25 centimetri dalla faccia inferiore del modello, propagandosi quasi fino all'estremità sollecitata. L'area coinvolta dai valori massimi è lunga 23 centimetri e larga quanto il modello.



**Figura 6-19 Spostamento 13.58cm; GGR 3D; PEMAG.**

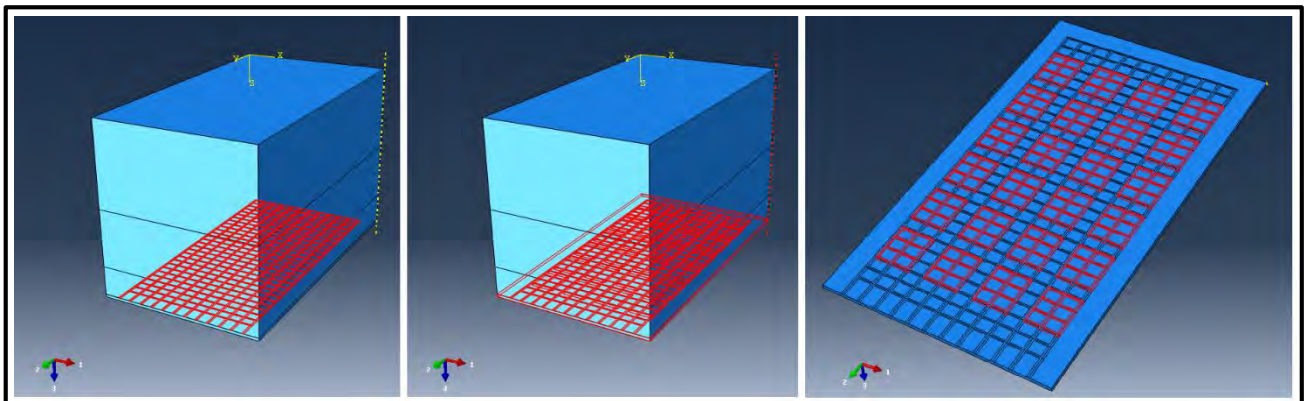
Per aver un altro termine di paragone tra le diverse modellazioni, si analizzano gli spostamenti del terreno di copertura, Figura 6-20. Gli effetti di bordo producono un concentrarsi degli spostamenti U2 nella zona centrale, dissipandosi verso le estremità e annullandosi sui nodi delle facce laterali in presenza delle condizioni al contorno.



**Figura 6-20 Spostamento 13.58cm; GGR 3D; U2.**

### 6.2.2 Copertura Alternativa.

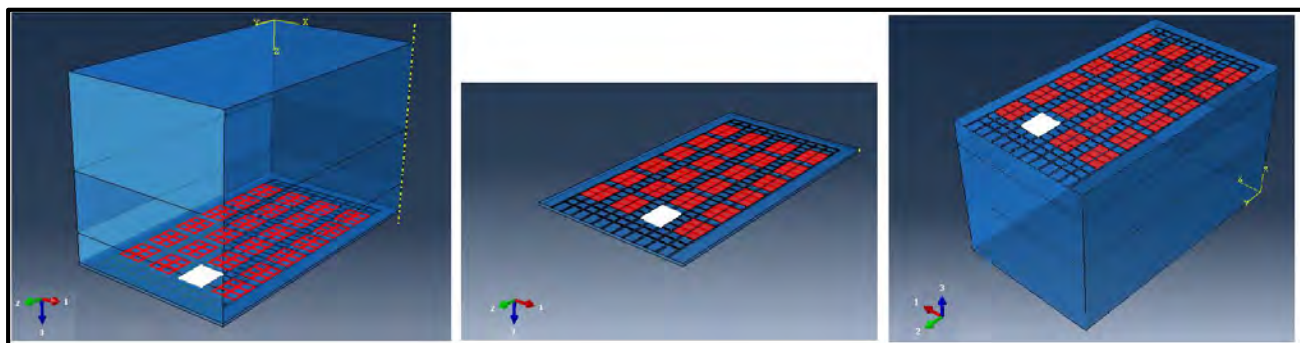
Questo Paragrafo viene interamente dedicato all'analisi dei diversi componenti del sistema di copertura con il GCD forato a scacchiera, costituendo l'aspetto peculiare dell'elaborato. Anche il geocomposito drenante sarà oggetto di attenzione; infatti al suo interno è presente il medesimo materiale della copertura ed è dunque soggetto alle medesime problematiche di deformazioni plastiche. In questa situazione la GGR utilizzata è quella piana. La Figura 6-21 rappresenta le diverse componenti del sistema.



**Figura 6-21 Modello generale; evidenziati in rosso: a sinistra GGR Piana; in centro GCD; a destra i vuoti del GCD riempiti di terreno.**

Per maggior chiarezza visiva si sottolinea il seguente fatto. Dato che il terreno e il geocomposito hanno le facce sovrapposte, si sceglie di visualizzare il materiale “sottosopra” ovvero con il verso positivo dell'asse 3 verso l'alto, in relazione alla terna di assi cartesiani visibili in Figura 6-21. I vuoti di terreno e le rispettive impronte risulteranno quindi “specchiate”

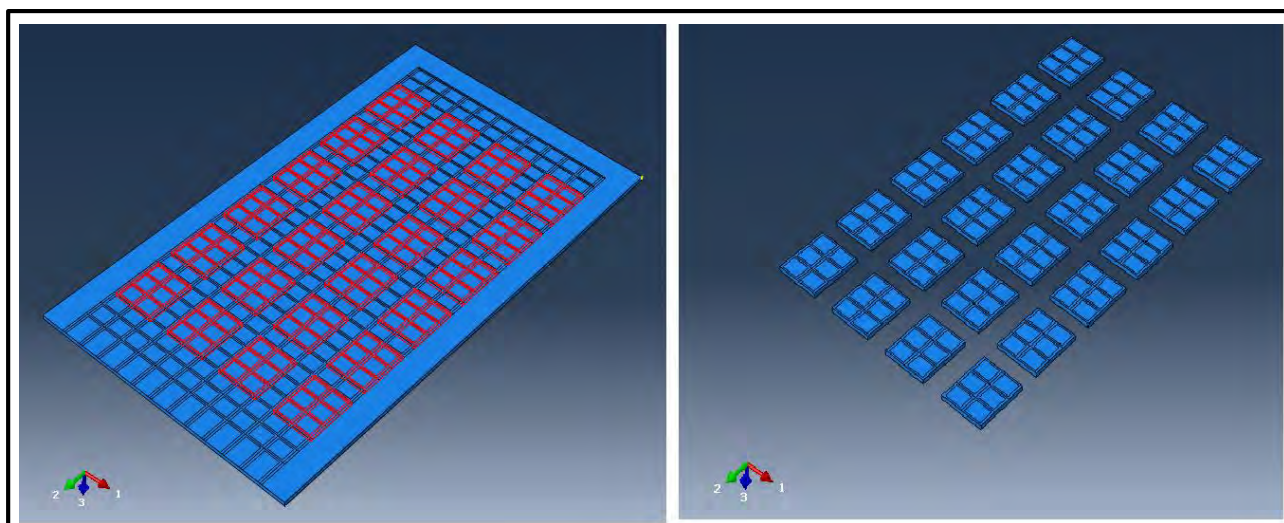
rispetto al piano 1-2. In Figura 6-22 si chiarisce quanto esposto evidenziando in bianco gli elementi combacianti.



**Figura 6-22 Elementi combacianti; a destra il terreno con l'asse 3 positivo verso l'alto.**

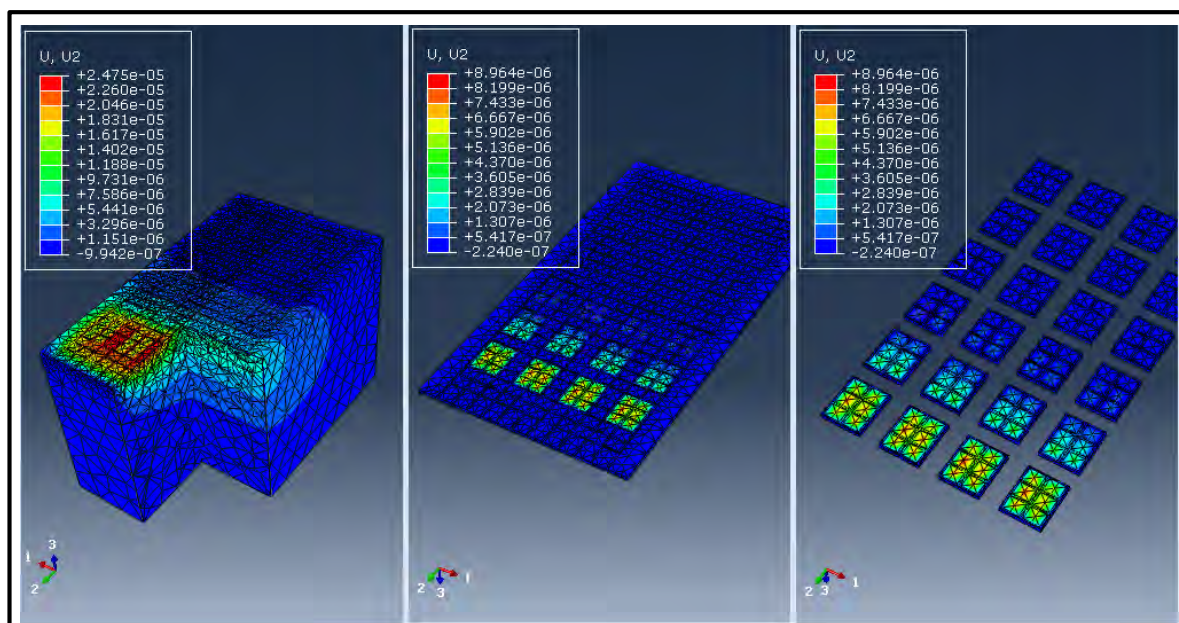
Un ulteriore elemento da caratterizzare preliminarmente è il terreno di riempimento dei fori. E' stato creato un apposito Set per poter rapidamente isolare questi elementi, così da rendere più agevole la visualizzazione degli stati tensionali.

In Figura 6-23 viene proposto il GCD con il terreno evidenziato in rosso nell'immagine di sinistra, e i "blocchetti" di terreno in quella di destra.



**Figura 6-23 Set per la localizzazione del terreno nei fori.**

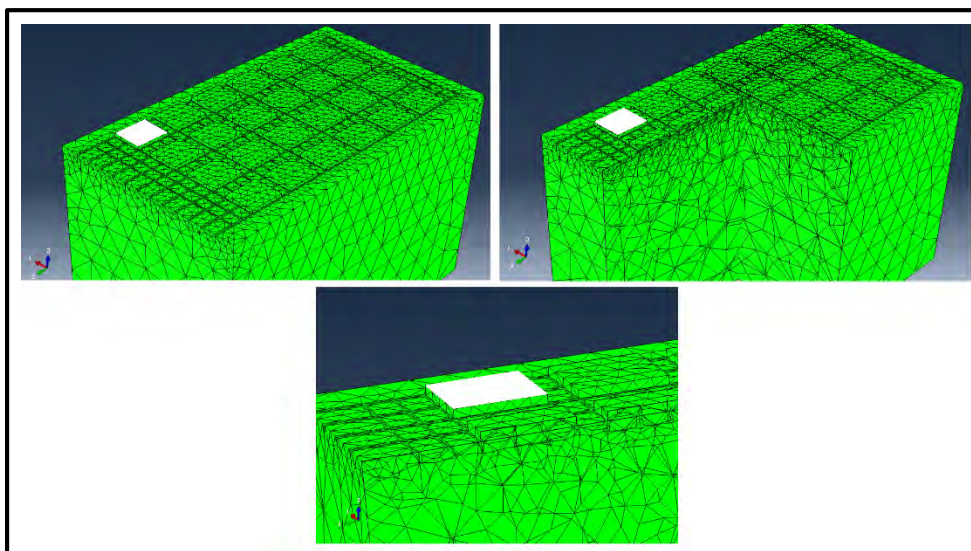
Assunto uno spostamento da 1 centimetro, si analizzano in successione le più importanti variabili statiche, deformative e cinematiche per gli elementi più rappresentativi della modellazione.



**Figura 6-24 Spostamento 1cm; copertura, geocomposito, terreno nei vuoti; U2.**

Nell'immagine di sinistra della Figura 6-24, si vede chiaramente come gli spostamenti assumano connotazioni diverse a seconda della loro posizione; i valori più alti si instaurano proprio nelle “corsie” tra un vuoto e l'altro (basso coefficiente di attrito), mentre all'interno dei fori riducono il loro valore. Il materiale coesivo nel GCD è costretto ad assumere valori nulli sulle facce laterali ed è per questo che si nota una lieve differenza tra i punti combacianti. Le aree “attive” sono limitate alla prima fila di fori, quindi circa 9 centimetri, intaccando solo lievemente la seconda fila. I valori sono sicuramente molto ridotti, ma il loro sviluppo all'interno del solido è coerente con le ipotesi sul funzionamento del sistema.

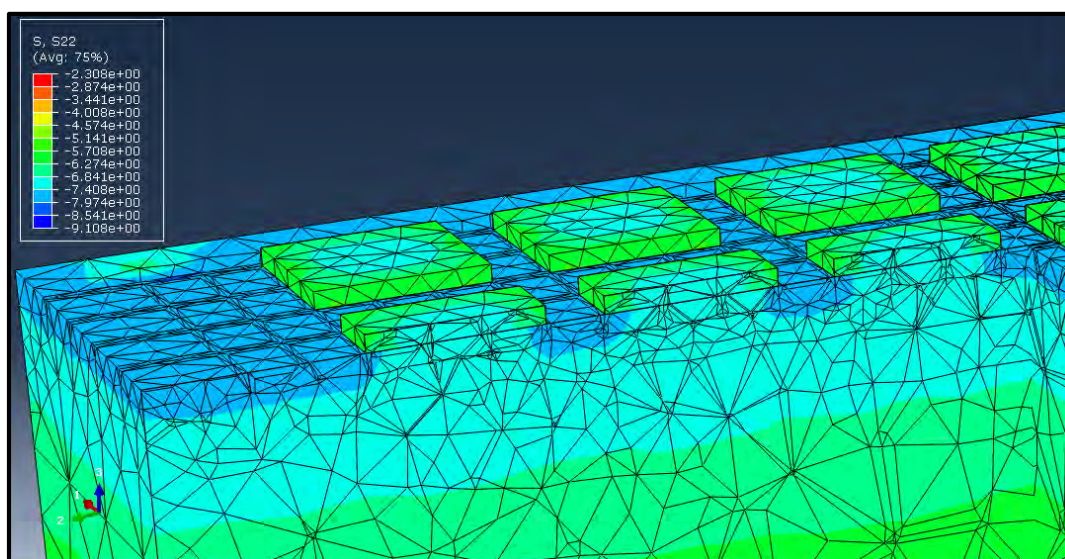
Per l'analisi delle S22 si utilizzerà una particolare sezione del corpo, al fine di comprendere in maniera corretta lo svilupparsi della tensione. Le componenti visualizzate sono il terreno in copertura e quello intrappolato nel GCD. Il piano di sezione 2-3 taglia a metà il secondo blocchetto di materiale nonché la copertura. In Figura 6-25 viene chiarito tale concetto (in bianco è evidenziato il blocchetto di estremità non sezionato; l'immagine centrale è uno zoom sull'area principale).



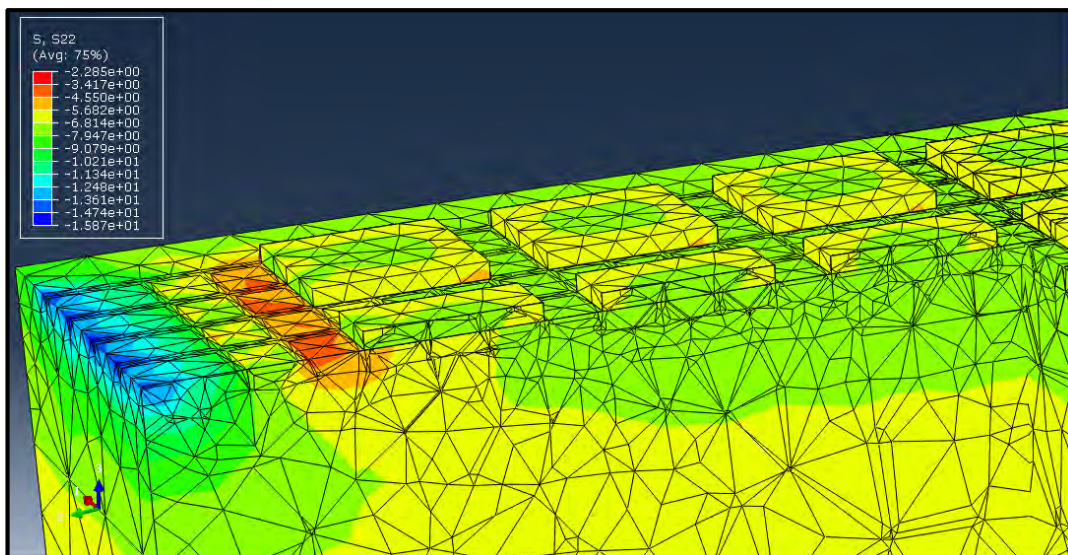
**Figura 6-25 Sezione per la visualizzazione delle tensioni S22.**

Il programma fornisce il valore di tutte le incognite per ogni Step di carico utilizzato per far convergere la soluzione, ed in questo frangente viene richiesta la tensione principale in direzione 2.

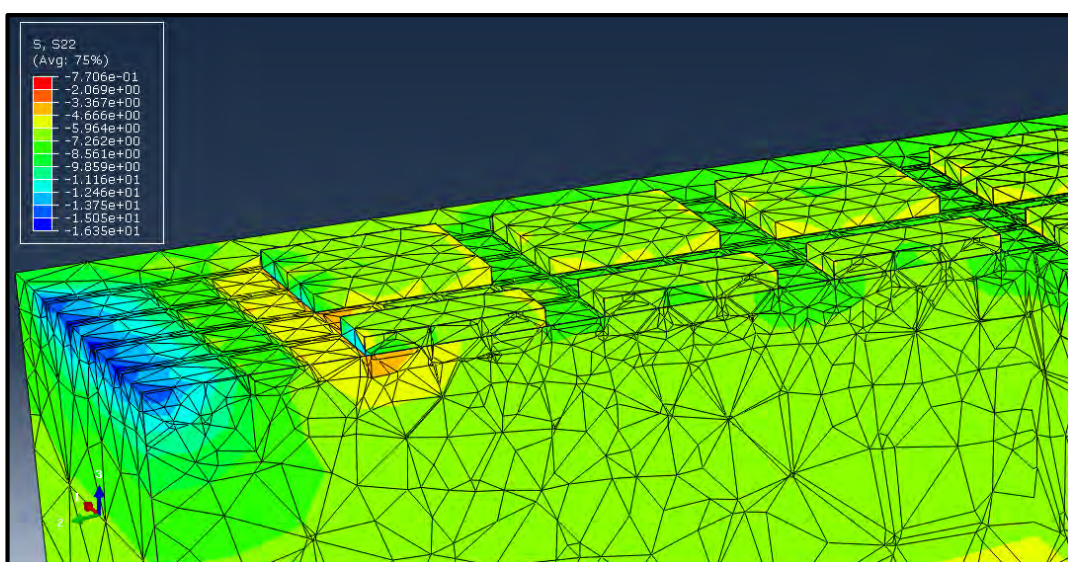
Nelle Figure 6-26, 6-27, 6-28, 6-29, 6-30 si rappresenta lo sviluppo di S22 a percentuali definite di spostamento (il 100% rappresenta 1cm).



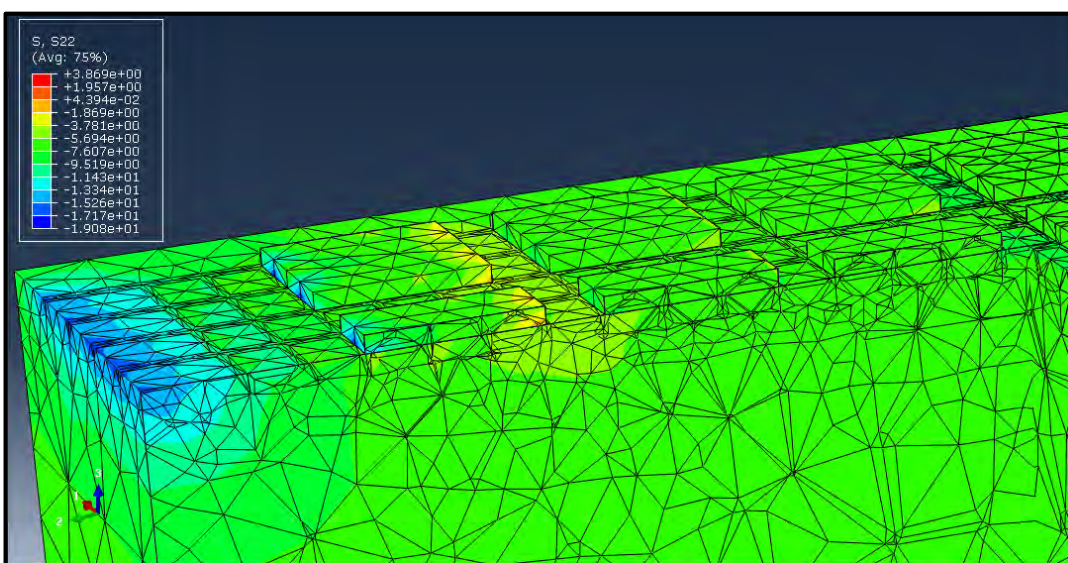
**Figura 6-26 Step iniziale, 0%.**



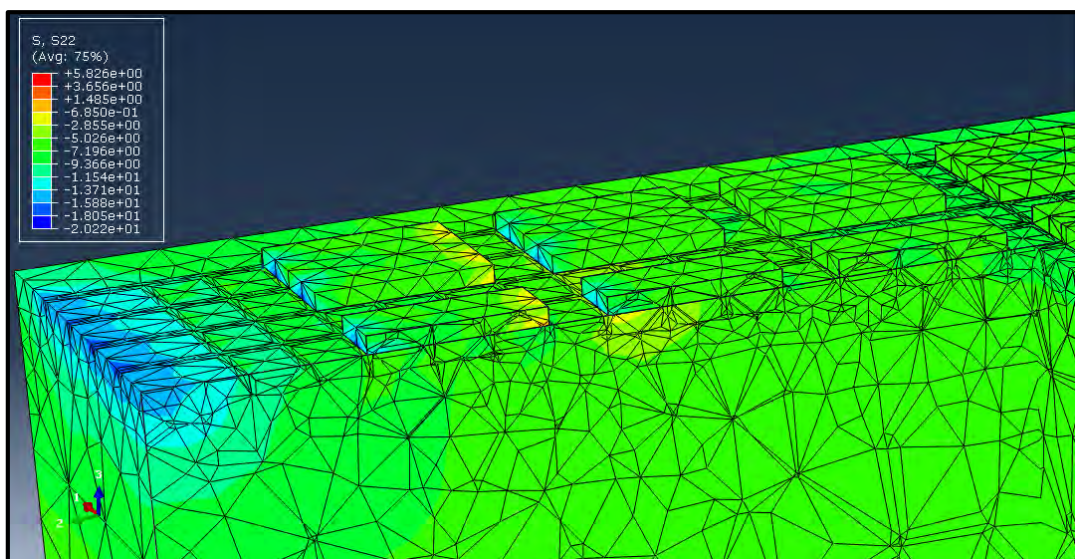
**Figura 6-27 Step 14%.**



**Figura 6-28 Step 22%.**



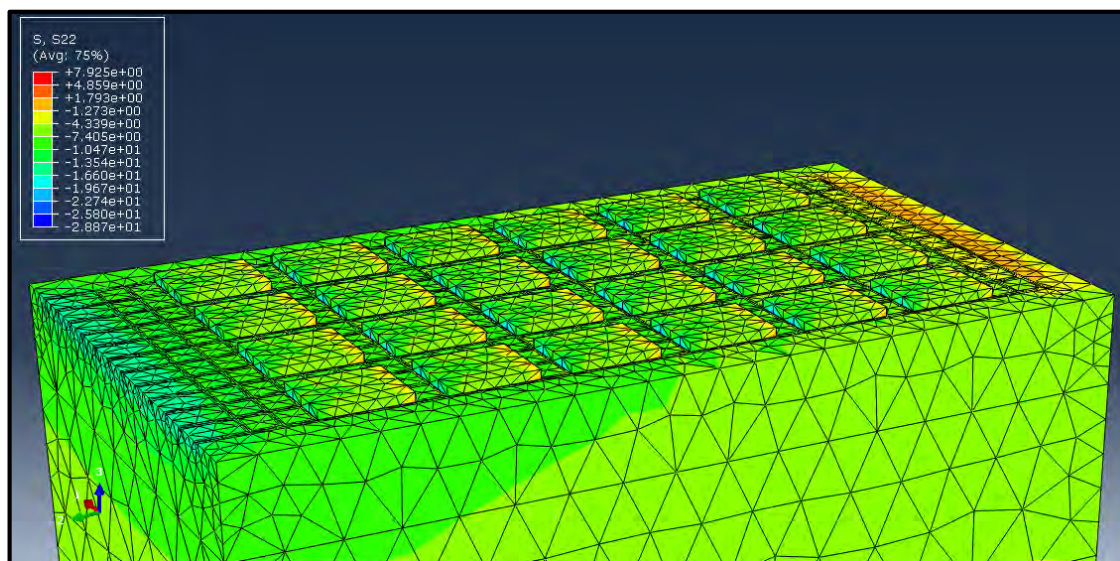
**Figura 6-29 Step 69%.**



**Figura 6-30 Step 100%.**

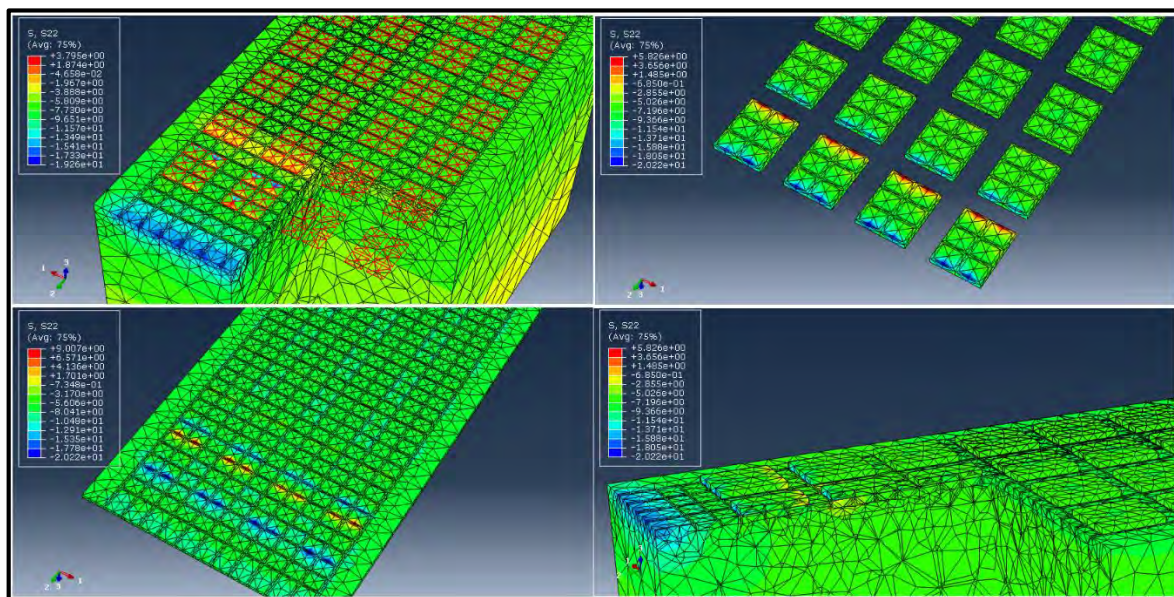
Allo Step 14% si individuano zone di compressione (negative) sul bordo anteriore del modello e zone di decompressione (positive). Via via che lo spostamento aumenta, la zona di trazione arretra (comportamento già descritto nei Paragrafi precedenti), ma al contrario del caso standard, non appena incontra la prima fila di blocchi di terreno, si smorza. La faccia anteriore del blocco entra in compressione (Step 22%) e le trazioni si attenuano andando a coinvolgere tutto il terreno immerso del foro. Quando il fronte d'onda lascia il blocco allo Step 69%, la faccia posteriore entra in decompressione e ci rimane anche quando lo spostamento della GGR cresce ancora. Nello Step 100% è chiaro come questo meccanismo si ripeta identico per la fila successiva di fori. Il fatto che le zone di trazione non si tramutino in compressione all'interno dei blocchetti di terreno, è dovuto al fatto che, per realizzare il GCD forato, si è partizionato un solido omogeneo; quindi, per equilibrio e congruenza, le tensioni devono equilibrarsi al suo interno producendo delle lievi discrepanze tra le facce di terreno a contatto. Inoltre un ruolo fondamentale è giocato dall'attrito di interfaccia che mobilita tensioni trasversali diverse a seconda dei materiali coinvolti.

A grandi spostamenti (Figura 6-31) tutti i blocchi di terreno sono stati attivati e perfino la faccia posteriore del solido risulta sollecitata.



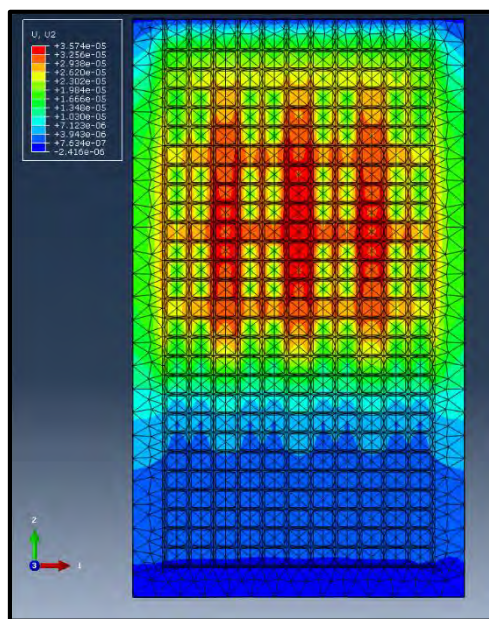
**Figura 6-31 Spostamento 13.58cm; S22.**

Il completo sviluppo della tensione S22 è riportato in Figura 6-32; in alto a sinistra il terreno di copertura con evidenziate in rosso le impronte dei fori del geocomposito; in alto a destra i singoli blocchetti di materiale intrappolato; in basso a destra la sezione di tutto il materiale presente; in basso a sinistra il GCD.



**Figura 6-32 Sviluppo delle S22 nei principali elementi del modello.**

Per quanto riguarda la condizione con spostamento 5 centimetri, la prima variabile indagata è la consueta U2 (Figura 6-33).

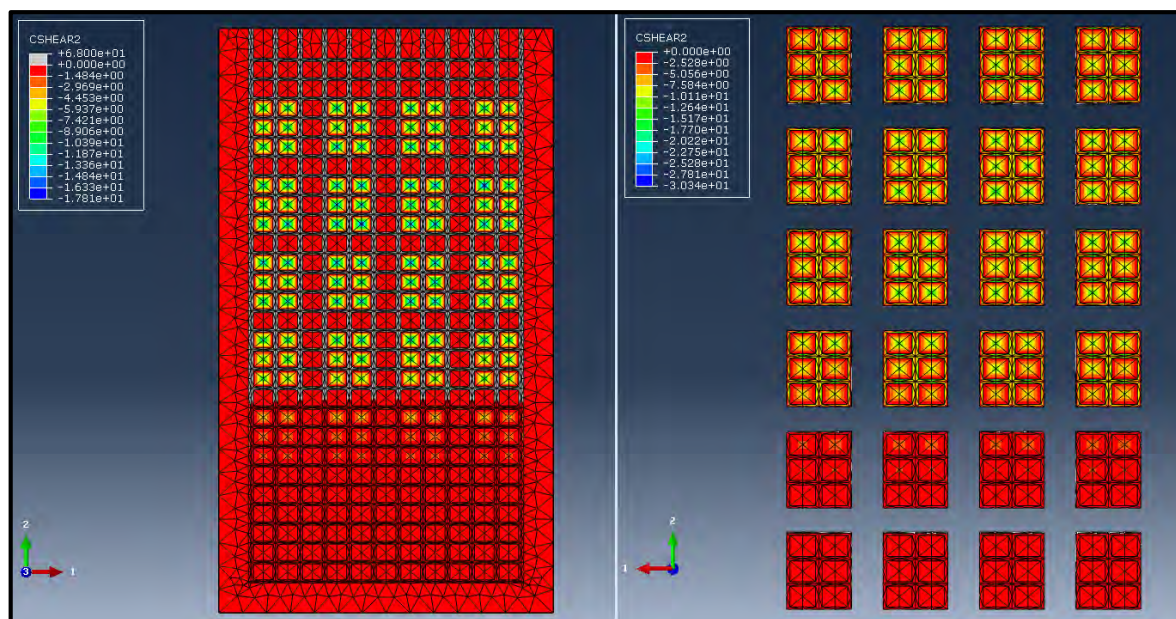


**Figura 6-33 Spostamento 5cm; Terreno di copertura; U2.**

Con questa entità di spostamento le “corsie” di spostamento sono evidenti. Le zone rosse (spostamenti concordi al verso del movimento della griglia) si collocano proprio dove il materiale di copertura combacia con il GCD, ovvero le zone con un’interfaccia ad attrito ridotto. Nelle aree a contatto col terreno nel geocomposito sottostante, gli spostamenti U2 sono il 47% rispetto ai valori massimi, evidenziando l’efficacia che queste zone forniscono a ridurre i movimenti.

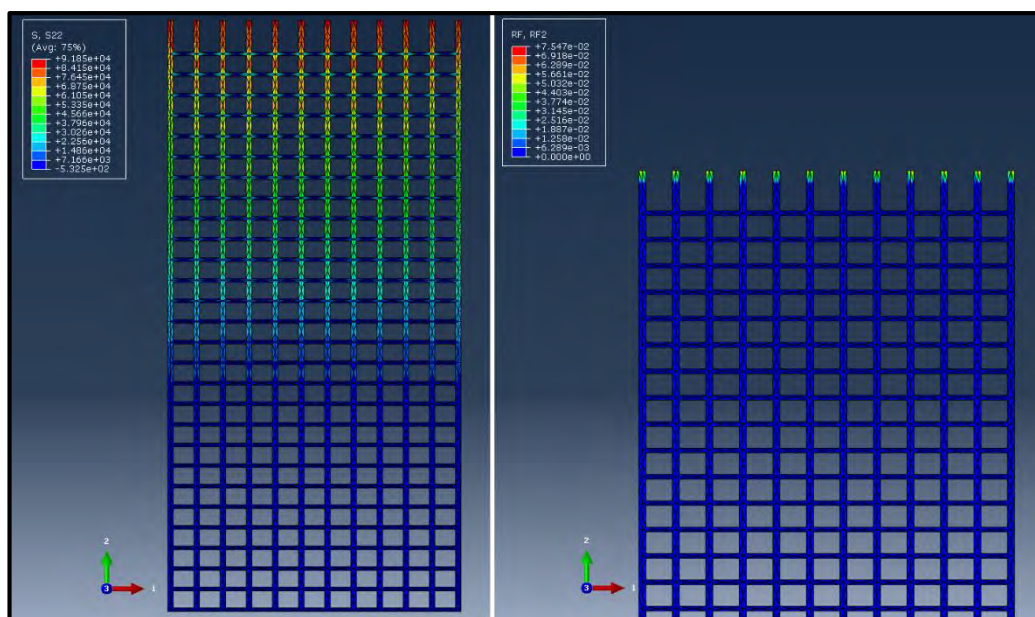
Tale risultato trova piena corrispondenza se confrontato con le tensioni tangenziali che si sviluppano all’interfaccia, definite dal programma come CSHEAR2.

La Figura 6-34 fornisce sia per il terreno coesivo (in sinistra), che per quello bloccato nel drenaggio (in destra), i valori dello sforzo tangente alla direzione di movimento. Essi sono tutti negativi, ovvero orientati nel verso contrario allo spostamento della GGR tendenti a “richiamare” all’interno del solido l’elemento sollecitato.



**Figura 6-34 Spostamento 5cm; CSHEAR2.**

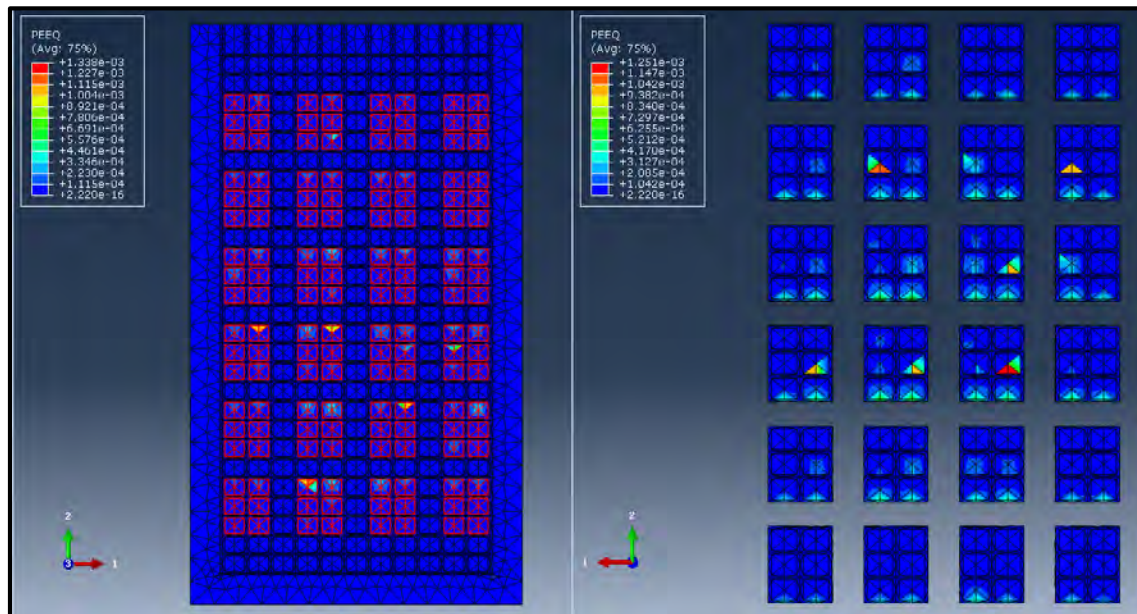
La GGR è l'ultimo elemento analizzato per questo campo di spostamento. Essa sviluppa le tensioni principali S22 lungo i suoi elementi longitudinali. In Figura 6-35 sono rappresentate sia le tensioni (dimensionalmente forze/superfici) che le reazioni ai nodi (forze).



**Figura 6-35 Spostamento 5cm; GGR; S22 e RF2.**

Per quanto riguarda lo spostamento massimo applicato al modello, lo sviluppo delle variabili finora analizzate è lo stesso, ciò che cambia è solo l'entità in valore assoluto. Si sceglie quindi di non commentarne nessuna, lasciando spazio poi al Paragrafo 6.3 per i confronti tra le diverse modellazioni.

L'incognita che invece merita una riflessione è quella che rappresenta le deformazioni plastiche: il PEEQ (equivalent plastic strain at integration points) ed il PEMAG (magnitude of plastic strain at integration points).



**Figura 6-36 Spostamento 13.58cm; Terreno di copertura a sinistra con le zone a contatto col materiale sottostante evidenziate in rosso; terreno nel GCD a destra; PEEQ.**

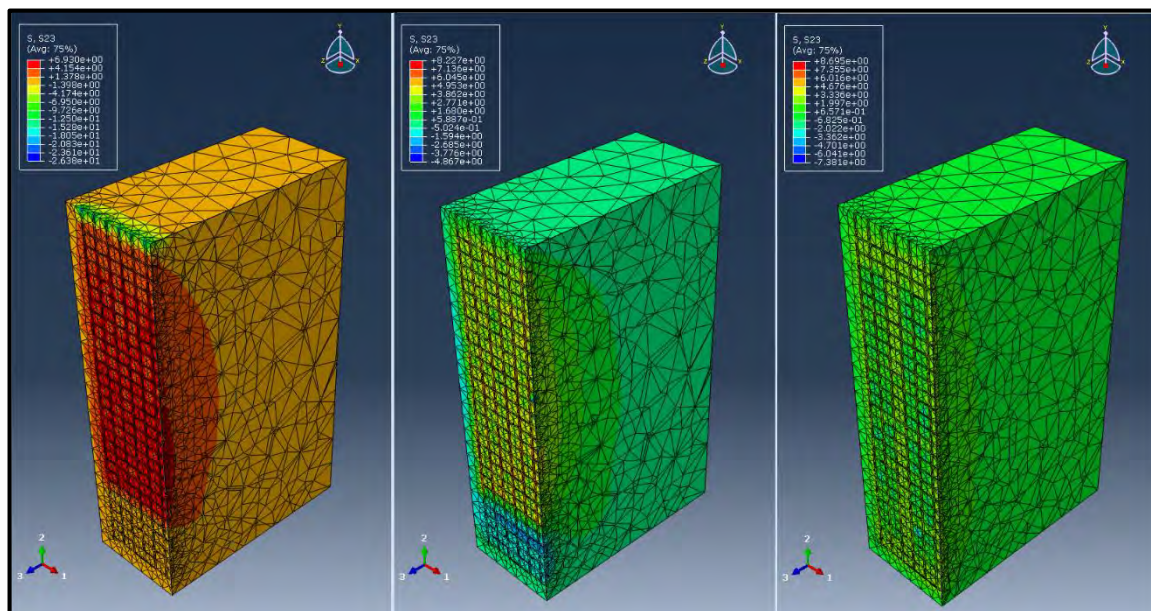
Le zone soggette a questo tipo di deformazione sono di entità limitata in entrambi gli elementi (circa dell'1.3 %, Figura 6-36). Esse inoltre sono localizzate e sparse all'interno del modello e non creano una ben definita area soggetta ad eventuale collasso plastico.

### 6.3 Confronti.

La descrizione dei meccanismi di resistenza che si instaurano all'interno degli elementi è stata compiutamente descritta nei Paragrafi precedenti; questa sezione propone dei confronti tra i risultati più significativi.

Per quanto riguarda il terreno in copertura vengono commentati i volumi coinvolti nel fenomeno a spostamento massimo. La Figura 6-37 ne dimostra le entità.

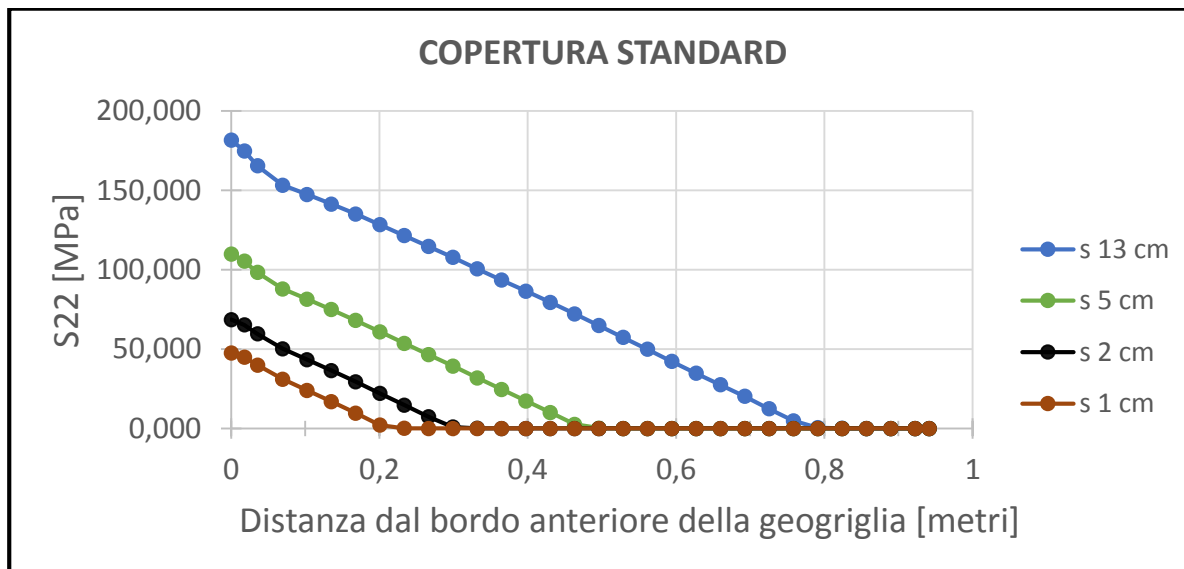
L'effetto che i diversi attriti producono sui diversi modelli sono del tutto evidenti. L'immagine a sinistra, che rappresenta una griglia completamente immersa nel terreno, attesta la condizione di miglior collaborazione terreno-GGR potendo usufruire anche dell'interazione terreno-terreno. Anche nella copertura standard si riesce a godere di molti benefici; però il merito è solamente delle alte prestazioni della geogriglia tridimensionale che si ripercuotono nella parte superiore del modello, cioè il terreno di copertura. In termini di volumi coinvolti, la tecnologia alternativa non riesce a fornire, purtroppo, dei risultati soddisfacenti. Il terreno in copertura viene poco coinvolto (in termini di tensioni tangenziali S23), ma può contare sul supporto del materiale inglobato nel GCD che riesce a ridistribuire in maniera efficace le tensioni principali S22 (compressione e decompressione) e a ridurre in estensione le zone di deformazione plastiche (PEEQ e PEMAG).



**Figura 6-37 Volumi coinvolti; Pullout a sinistra (GGR 3D), Standard in centro (GGR3D), Alternativa a destra (GGR Piana).**

Si sceglie di utilizzare dei grafici per descrivere il confronto fra le tensioni principali di trazione nell'elemento longitudinale centrale di entrambe le geogriglie, a rappresentazione del pacchetto standard ed alternativo.

Data la natura discontinua dei nodi sui quali ottenere gli sforzi di tensione, i grafici proposti in automatico dal programma hanno la classica forma "a denti di sega". Si stabilisce pertanto di rappresentare solamente i valori di tensione più elevati.



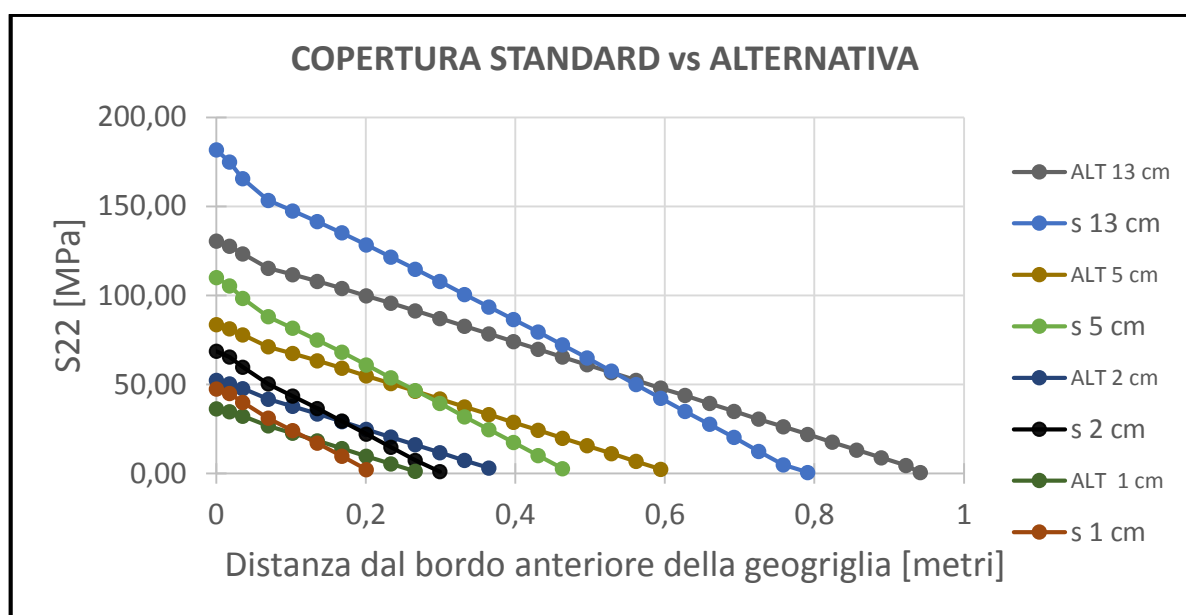
**Grafico 1 Soluzione Standard; Distanza-Tensione.**

Per il sistema standard (griglia tridimensionale), le tensioni aumentano all'aumentare dello spostamento imposto. Esse si annullano rispettivamente a 0.2333, 0.3317, 0.4629, 0.7909 metri dal bordo sollecitato, denotando un decremento che può essere approssimato come lineare. Le linee di tendenza che il foglio elettronico implementato fornisce sono le seguenti:

- spostamento 13.58 cm: " $y = -221770 \cdot x + 174047$ ",
- spostamento 5 cm: " $y = -225763 \cdot x + 106660$ ",
- spostamento 5 cm: " $y = -226750 \cdot x + 67685$ ",
- spostamento 5 cm: " $y = -228739 \cdot x + 47841$ ".

Il coefficiente angolare è molto simile, attestandosi su un valor medio di -225'755.5, mentre l'intercetta non presenta particolari tendenze, salvo un incremento monotono.

Utilizzando il Grafico 1 come riferimento si sovrappongono i risultati della soluzione alternativa (Grafico 1Grafico 2).

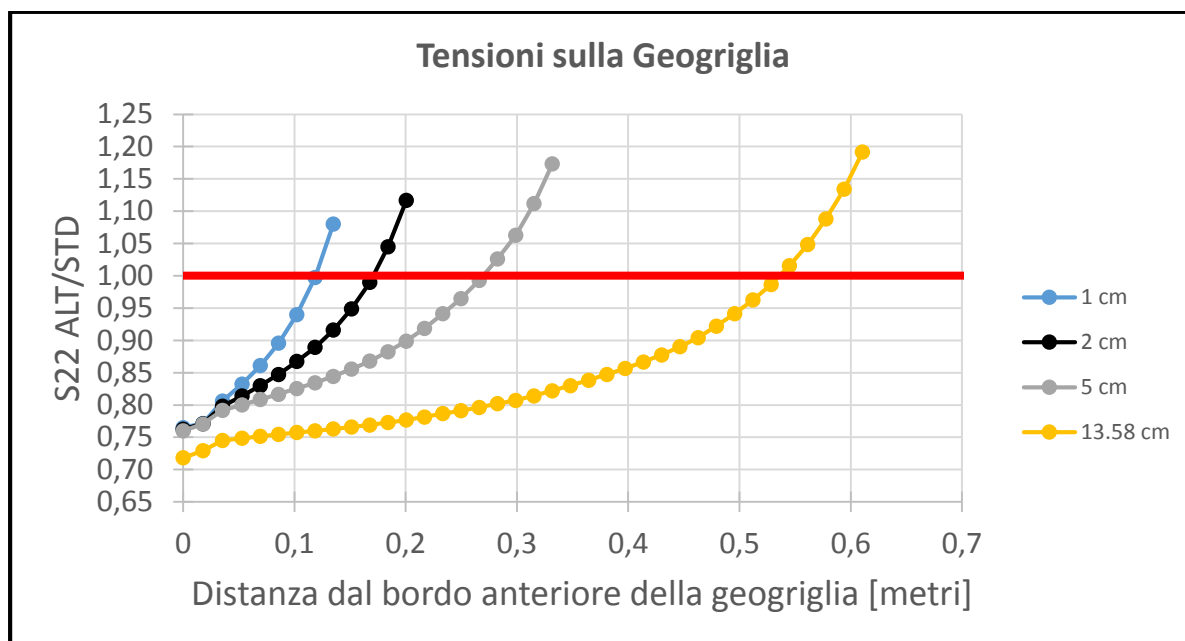


**Grafico 2 Soluzione Standard vs. Alternativa; Distanza-Tensione.**

Il coefficiente angolare nel caso alternativo è minore rispetto alla soluzione standard, ennesima conferma della difficoltà di attivazione della geogriglia in presenza di attriti ridotti. Anche in questo caso, ricorrendo alle linee di tendenza, può essere calcolato il valor medio del coefficiente angolare, pari a -134'241.5.

Si riporta di seguito la percentuale di incremento di sollecitazione sulle geogriglie. Questo rapporto è un parametro molto importante, in quanto rappresenta l'incremento di resistenza tra il sistema alternativo e quello standard, e consentirà, in coerenza con i precedenti risultati, di approvare o meno l'utilizzo della geogriglia piana come elemento di rinforzo. Il valore che si desidera ottenere è, almeno, pari all'unità, e ciò dimostrerebbe l'equivalenza tra le due coperture. Valori superiori all'unità consentirebbero di scegliere senza dubbio la proposta alternativa, data la maggior prestazione del sistema. Entrambi gli scenari vengono disattesi. Il rapporto è sempre minore dell'unità per tutte le condizioni di spostamento imposte.

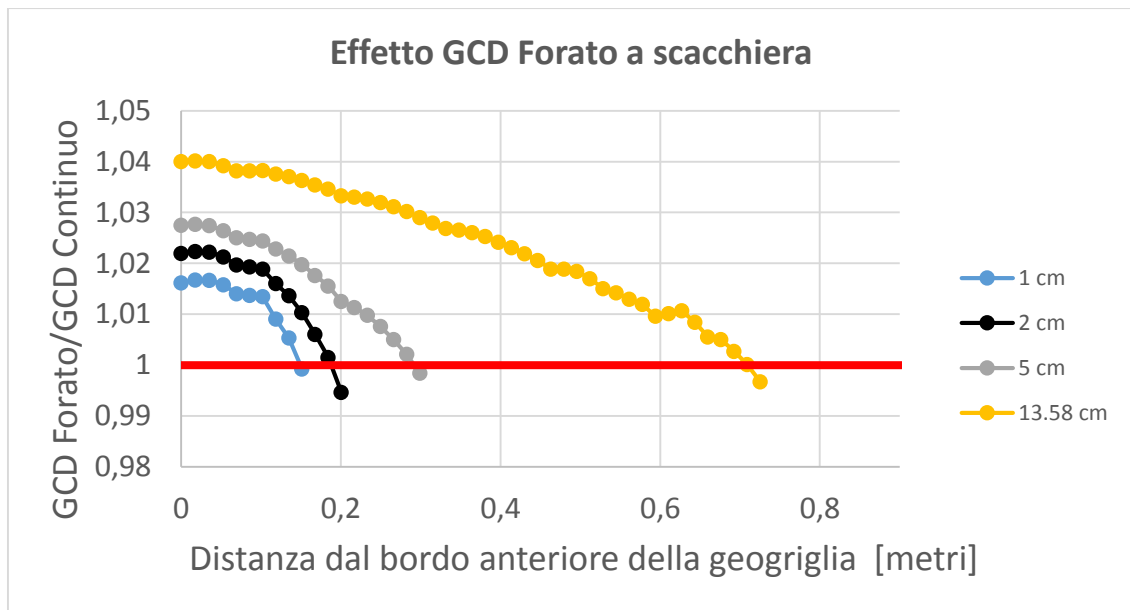
Dal Grafico 3 si vede come tale rapporto sia di poco superiore al 75% in corrispondenza del bordo sollecitato.



**Grafico 3 Tensioni sulla Geogriglia; Distanza-Rapporto Tensioni.**

Per valutare quale sia l'effettivo incremento di resistenza fornito al sistema dal materiale incastrato nel GCD, si confrontano due modelli, entrambi costituiti da una geogriglia piana. Oltre alla tipologia alternativa, se ne modella una equivalente alla prima, privata dei fori nel GCD. Ci si avvale del rapporto tra le tensioni sugli elementi di rinforzo per analizzare il risultato.

Dal Grafico 4 si evince che la soluzione alternativa produce effetti positivi, in quanto il rapporto è maggiore dell'unità. Gli sforzi sono circa lo 0.15–0.4% più alti; tale entità non risulta soddisfacente ad attribuire una valutazione sufficiente alle prestazioni della soluzione alternativa. Inoltre questo lieve beneficio decresce molto velocemente, con un andamento che può essere approssimato attraverso un polinomio di terzo grado.



**Grafico 4 Effetto del GCD a scacchiera; Distanza-Rapporto Tensioni.**



## 7 Conclusioni.

Il presente elaborato analizza la stabilità del sistema di copertura di una discarica, allorché sia richiesta l'adozione di rinforzi che suppliscano alla carenza di resistenza per attrito all'interfaccia critico.

I rinforzi comunemente usati in pendii artificiali molto ripidi, come quelli di scarpata dei lotti esauriti della discarica di Torretta di Legnago (VR) sono le geogriglie tridimensionali

Dall'analisi di stabilità, condotta con i metodi di stabilità dei pendii reperibili in letteratura, si è giunti all'individuazione delle caratteristiche meccaniche minime del terreno dello strato di finitura esterno, nonché delle tensioni di trazione sulla geogriglia, a fronte di un accettabile Fattore di Sicurezza. Il terreno idoneo a garantire tali caratteristiche è classificato come un'argilla limosa.

Il tratto saliente dello studio, tuttavia, ha riguardato la fattibilità dell'impiego, in sicurezza, di una geogriglia piana, più economica rispetto alla geogriglia 3D comunemente utilizzata in questi casi.

L'analisi numerica a elementi finiti utilizzata nello studio ha, dapprima, generato un modello preliminare, finalizzato ad acquisire gli elementi propedeutici alla successiva modellazione del comportamento dell'interfaccia in esame.

È stata successivamente simulata l'estrazione progressiva di una geogriglia tridimensionale completamente immersa al terreno, che ha fornito risultati, nel complesso, soddisfacenti, poiché appaiono coerenti con le sollecitazioni di progetto.

La modellazione della soluzione con geogriglia piana ha poi consentito il confronto tra le due suddette soluzioni. Per entrambe è emerso un andamento coerente degli stati di sollecitazione negli elementi del pacchetto di copertura oggetto di studio.

A commento degli esiti delle analisi è emerso che l'utilizzo di una geogriglia piana non consente di garantire una sufficiente stabilità del pacchetto di copertura. La griglia piana, infatti, non riesce a coinvolgere sufficienti volumi di terreno, data l'esiguità del coefficiente di attrito all'interfaccia geogriglia - terreno.

Appare tuttavia opportuno valutare il comportamento della geogriglia piana in un campo prova o, eventualmente, con prove di laboratorio in scala ridotta, per valutare i coefficienti di interfaccia, elemento fondamentale, quanto di complessa determinazione, nella modellazione numerica oggetto del presente studio.



## 8 Bibliografia.

**Abu-Farsakh M., Coronel J., Tao M. (2007).** Effect of Soil Moisture Content and Dry Density on Cohesive Soil–Geosynthetic Interactions Using Large Direct Shear Tests, *Journal of Materials in Civil Engineering*, Vol. 19, No. 7.

**Blatz James A., Bathurst Richard J. (2003).** Limit equilibrium analysis of large-scale reinforced and unreinforced embankments loaded by a strip footing, *Canadian Geotechnical Journal* Vol. 40, 1084–1092.

**Battilà, Gian Vittorio.** Discariche Controllate In Pendio Aspetti Critici. Università Politecnica delle Marche Scuola di Dottorato di Ricerca in Scienze dell'Ingegneria Curriculum in Ingegneria dei Materiali, delle Acque e dei Terreni.

**Bayoumia Ahmed, Bobetb Antonio, Leec Junhwan (2008).** Pullout capacity of a reinforced soil in drained and undrained conditions. *Finite Elements in Analysis and Design* 44, 525 – 536.

**Bergado D.T., Lo K.H., Chai J.C., Shivashankar R., Alfaro M.C., Anderson L.R. (1992).** Pullout tests using steel grid reinforcements with low-quality backfill, *Journal of Geotechnical Engineering* Vol. 118, No 7.

**Bergado D.T., Chai J.C., Abiera H.O., Alfaro M.C., Balasubramaniam A.S. (1992).** Interaction between cohesive-frictional soil and various grid reinforcements, *Geotextiles and Geomembranes* No 12, 327-349.

**Busana S. (2014).** Relazione Tecnico Illustrativa, Progetto definitivo di ripristino della funzionalità della copertura relativa ai lotti a, b e 2° tratto in alveo (a seguito degli assestamenti), Le.Se. Sistema Integrato di Trattamento e Smaltimento RSU di Torretta di Legnago (VR).

**Busana S. (2014).** Relazione di Approfondimento e Specifiche tecniche dei materiali, Progetto definitivo di ripristino della funzionalità della copertura relativa ai lotti a, b e 2° tratto in alveo (a seguito degli assestamenti), Le.Se. Sistema Integrato di Trattamento e Smaltimento RSU di Torretta di Legnago (VR).

**Carbone Laura (2014).** Interface behaviour of geosynthetics in landfill cover systems under static and seismic loading conditions, Dottore di Ricerca dell'Università "Mediterranea" di Reggio Calabria SCUOLA DI DOTTORATO IN INGEGNERIA GEOTECNICA E CHIMICA DEI MATERIALI XXVI CICLO – S.S.D. ICAR/07 DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA CIVILE, DELL'ENERGIA, DELL'AMBIENTE E DEI MATERIALI (DICEAM) and Docteur de l'Université

de Grenoble ÉCOLE DOCTORALE TERRE, UNIVERS, ENVIRONNEMENT SPECIALITE: SCIENCES DE LA TERRE ET DE L'UNIVERS ET DE L'ENVIRONNEMENT.

**Carrubba Paolo, Brusarosco Daniele (2004).** Analisi FEM del comportamento dinamico di un rilevato in terra rinforzata con geosintetici, Rivista Italiana Di Geotecnica.

**Chao-Sheng Tang, Xiang-Jun Pei, De-Yin Wang, Bin Shi, Jian Li (2014).** Tensile Strength of Compacted Clayey Soil, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering 141.

**Chen Cheng (2013).** Discrete Element Modelling Of Geogrid-Reinforced Railway Ballast and Track Transition Zones, The University of Nottingham.

**Chen Cheng-Wei, Wu Jason Y. (2007).** Effects of Wetting on the Pullout Resistance of Geogrids in Compacted Silty Sand, EJGE Vol. 17, 2529-2540.

**Chen Rong, Luan Maotian, Hao Dongxue (2011).** Improved Simulation Method for Soil-Geogrid Interaction of Reinforced Earth Structure in FEM, Tianjin Univ. 2011, 17: 220-228.

**Daniel D. E. (1993).** Geotechnical practice for waste disposal, Chapman & Hall, London

**Decreto Legislativo 13 gennaio 2003, n. 36.** Attuazione della direttiva 1999/31/CE relativa alle discariche di rifiuti.

**Di Matteo Lucio, Brunelli Simone, Capponi Enrica (2008).** Strength Parameters Of Compacted Cohesive Soils: Analysis Of Sandy-Clayey Soils Of The “Lisciani Di Pantalla” (Todi – Central Italy), Italian Journal of Engineering Geology and Environment.

**Fox, P. J. (2010).** Internal and Interface Shear Strengths of Geosynthetic Clay Liners, 3rd International Symposium on Geosynthetic Clay Liners Würzburg, Germany 15 / 16 September 2010.

**Feng Xiaojing, Yang Qing, Li Shoulong (2008).** Pullout Behavior of Geogrid in Red Clay and the Prediction of Ultimate Resistance, EJGE Vol. 13.

**Fredlund D. G. (2006).** Unsaturated Soil Mechanics in Engineering Practice, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, Vol. 132, No. 3.

**Fredlund D.G., Xing Anqing, Fredlund M.D., Barbour S.L. (1995).** The Relationship of the Unsaturated Soil Shear Strength Functions to the Soil-Water Characteristic Curve, Canadian Geotechnical Journal Vol. 32, 40-448.

**Giuffrida Stefano (2015):** Verifica di stabilità e dimensionamento del sistema di ancoraggio del pacchetto di copertura di una discarica di rifiuti solidi speciali non pericolosi, Università degli Studi di Padova, Tesi di Laurea Magistrale in Ingegneria Civile.

**Huang J., Bhandari A., Yang X. (2011).** Numerical Modeling of Geosynthetic-Reinforced Earth Structures and Geosynthetic-Soil Interactions, Geotechnical Engineering Journal of the SEAGS & AGSSEA Vol. 42 No.1 March 2011.

**Huesker.** Brochures, schede tecniche e materiale informativo.

**Hussein M. GadElRab, Meguid Assi Mohamed, Mowafy Yousry (2009).** On the 3D Modelling of Soil-Geogrid Interaction, Geo Alifax.

**Hussein Mahmoud G., Meguid Mohamed A. (2013).** Three-Dimensional Finite Element Analysis of Soil-Geogrid Interaction under Pull-out Loading Condition, Geo Montreal 2013.

**Ivšić Tomislav, Verić Franjo, Zlatoper Hrvoje D.** The influence of clay wetting on geomembrane-clay interface strength, Department of Geotechnics, Faculty of Civil Engineering, University of Zagreb.

**Jacobs F., Ziegler M., Vollmert L., Ehrenberg H.** Explicit Design of Geogrids with a Nonlinear Interface Model.

**Jewell R.A., Paine N., Woods R.I. (1985).** Designs methods for steep reinforced embankments. Polymer grid reinforcement. Thomas Telford Limited, London.

**Jha JN, Gill KS, Singh Harvinder, Singh Jagbir (2012).** Ground Improvement and Ground Control including Waste Containment with Geosynthetics, Department of Civil Engineering, published by Guru Nanak Dev Engineering College Ludhiana (Punjab).

**Jie Gu (2011).** Computational Modeling of Geogrid Reinforced Soil Foundation and Geogrid Reinforced Base in Flexible Pavement.

**Khoury Charbel N., Miller Gerald A., Hatami Kianoosh (2010).** Shear Strength of Unsaturated Soil-Geotextile Interfaces, GeoFlorida 2010: Advances in Analysis, Modeling & Design (GSP 199), 307-316.

**Koerner R. M., Soong Te-Yang (1998).** Analysis and Design of Veneer Cover Soils, Sixth International Conference on Geosynthetics.

**Koerner R. M. (2005).** Designing with Geosynthetics 5<sup>th</sup> Edition, Pearson Prentice Hall, Upper Saddle River, NJ, USA.

**Liu Chia-Nan, Zornberg Jorge G., Chen Tsong-Chia, Ho Yu-Hsien, Lin Bo-Hung (2009).** Behavior of Geogrid-Sand Interface in Direct Shear Mode, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, Vol. 135, No. 12.

**Lopes Maria-Lurdes, Ferreira Fernanda, Carneiro Jose´ Ricardo Vieira, Castorina Silva (2014).** Soil–geosynthetic inclined plane shear behavior: influence of soil moisture content and geosynthetic type, *International Journal of Geotechnical Engineering*.

**Manandhar S., Yasufuku N., Kobayashi T., Taniyama M., (2012).** Quality assessment of high water content embankment slope based on compaction energy, *Advances in Transportation Geotechnics II – Miura et al. (eds) 2012 Taylor & Francis Group, London*.

**McCartney J. S., Zornberg J. G., R. H. Swan Jr. (2009).** Analysis of a Large Database of GCL-Geomembrane Interface Shear Strength Results, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering* 135, 209-223.

**McCartney J. S., Zornberg J. G., R. H. Swan Jr. (2010).** Discussion of “Analysis of a Large Database of GCL-Geomembrane Interface Shear Strength Results”, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*.

**McCartney J. S., Zornberg J. G., R. H. Swan Jr. (2009).** Closure to “Analysis of a Large Database of GCL-Geomembrane Interface Shear Strength Results, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*.

**Md. Jahid Iftekhar Alam, S.R. Lo, M.R. Karim (2014).** Pull-out behaviour of steel grid soil reinforcement embedded in silty sand, *Computers and Geotechnics* 56, 216–226.

**Nandakumaran P., Richardson G.N. (1999).** Landfill cover failure prompts standards upgrade, *GFR Magazine* Vol. 17 No. 7.

**Palmeira E. M. (2004).** Bearing force mobilisation in pull-out tests on geogrids, Geotextiles and Geomembranes.

**Palmeira E. M. (2008).** Soil-Geosynthetic Interaction: Modelling and Analysis, *Mercer Lecture 2007-2008*.

**Pavanello Paolo, Carrubba Paolo, Carbone Laura, Moraci Nicola (2013).** Resistenza al Taglio d'interfaccia di Geosintetici In Campo Statico e Dinamico, *Incontro Annuale dei Ricercatori di Geotecnica 2013- IARG 2013 Perugia, 16-18 settembre 2013*.

**Pham Ha T.V., D. G. Fredlund (2003).** The application of dynamic programming to slope stability analysis, *Canadian Geotechnical Journal* Vol. 40, 830–847.

**Quian X., Koerner R.M., Gray D. H. (2002).** Geotechnical aspects of Landfill Design and Construction, *Prentice-Hall Inc*.

**Rowe R. K., Soderman K. L. (1985).** An approximate method for estimating the stability of geotextile-reinforced embankments, *Canadian Geotechnical Journal* 22, 392-398.

**Russo L.E. (2008).** Design Method for Cover Soil Stability of Lined Multi-slope/berm Systems using Continuous Geogrid Reinforcement, The First Pan American Geosynthetics Conference & Exhibition 2-5 March 2008, Cancun, Mexico.

**Sharma H. D., Lewis S.P.** Waste Containment Systems, Waste Stabilization and Landfills.

**Sieira Ana Cristina C.F., Gerscovich Denise M.S., Sayão Alberto S.F.J. (2009)** Displacement and load transfer mechanisms of geogrids under pullout condition, Geotextiles and Geomembranes 27, 241–253.

**Stránský J., Jirásek M. (2012).** Open Source Fem-Dem Coupling, 18th International Conference Engineering Mechanics Svratka, Czech Republic, May 14 – 17, 2012, 1237–1251.

**TeMa.** Brochures, schede tecniche e materiale informativo.

**Tran V.D.H., Meguid M.A., Chouinard L.E. (2013).** A Finite-Discrete Element Framework for the 3D Modeling of Geogrid-Soil Interaction under Pullout Loading Conditions, Geotextiles and Geomembranes 37.

**Vanapalli S.K., Fredlund D.G., Pufahl D.E.** Comparison of Saturated-Unsaturated shear strength and hydraulic conductivity behavior of a sandy-clay till.

**Vanapalli S.K., Fredlund D.G., Pufahl D.E., Clifton A.W. (1996).** Model for the prediction of shear strength with respect to soil suction, Canadian Geotechnical Journal Vol. 33, 379-392.

**Vanapalli S.K., Fredlund D.G.** Comparison of Different Procedures to Predict Unsaturated Soil Shear Strength.

**Villard P., Chevalier B., Le Hello B., Combe G. (2009).** Coupling between finite and discrete element methods for the modelling of earth structures reinforced by geosynthetic, Computers and Geotechnics.

**Yu Yan, Damians Ivan P., Bathurst Richard J. (2015).** Influence of choice of FLAC and PLAXIS interface models on reinforced soil–structure interactions, Computers and Geotechnics 65, 164–174.

**Zhang L.L., Fredlund Delwyn G., Fredlund Murray D., Wilson (2014).** Modeling the unsaturated soil zone in slope stability analysis, Canadian Geotechnical Journal Vol. 51, 1384-1398.

**Zhan Tony L.T., Li He, Jia G.W., Chen Y.M., Fredlund D.G. (2014).** Physical and numerical study of lateral diversion by three-layer inclined capillary barrier covers under humid climatic conditions, Canadian Geotechnical Journal Vol. 51, 1438–1448.

