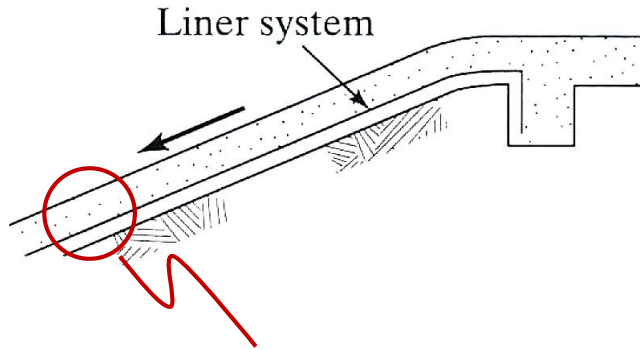


LE PROBLEMATICHE DI STABILITÀ DELLE DISCARICHE: ANALISI ED INTERVENTI

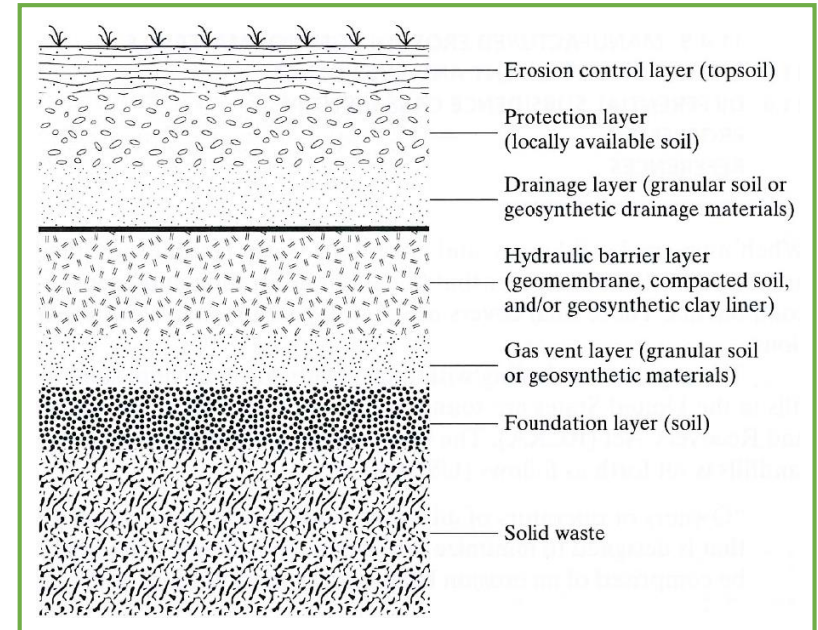
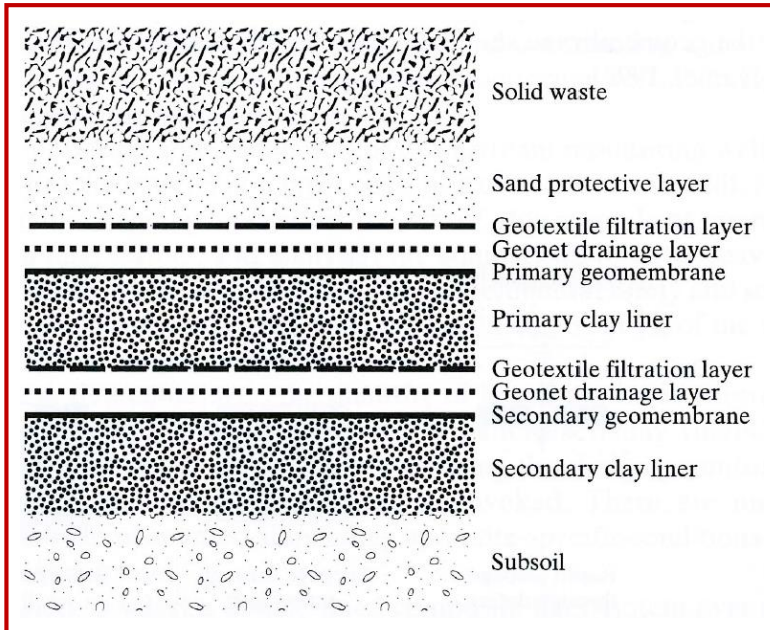
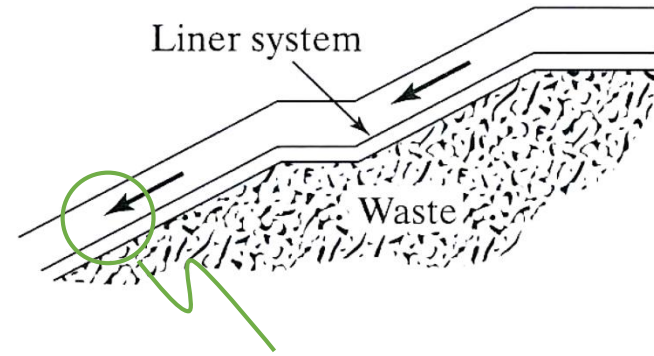
Importanza del livello di percolato sulla stabilità delle discariche

TIPOLOGIE DI INSTABILITÀ DELLE DISCARICHE

Scivolamento del pacchetto di impermeabilizzazione di base

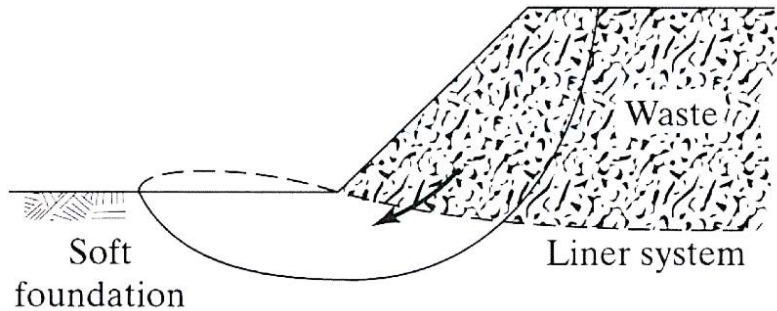


Scivolamento del sistema di copertura finale

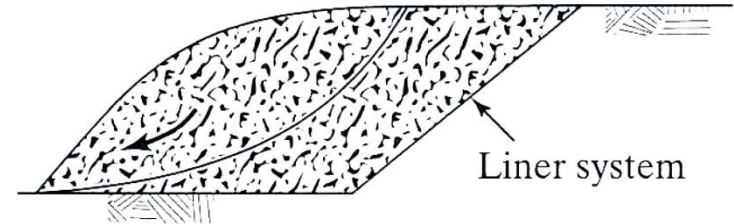


TIPOLOGIE DI INSTABILITÀ DELLE DISCARICHE

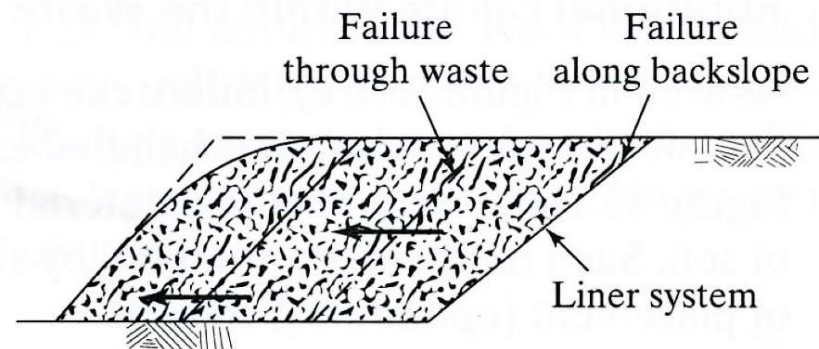
Rottura rotazionale attraverso il terreno di fondazione e il corpo rifiuti



Rottura rotazionale attraverso il corpo rifiuti

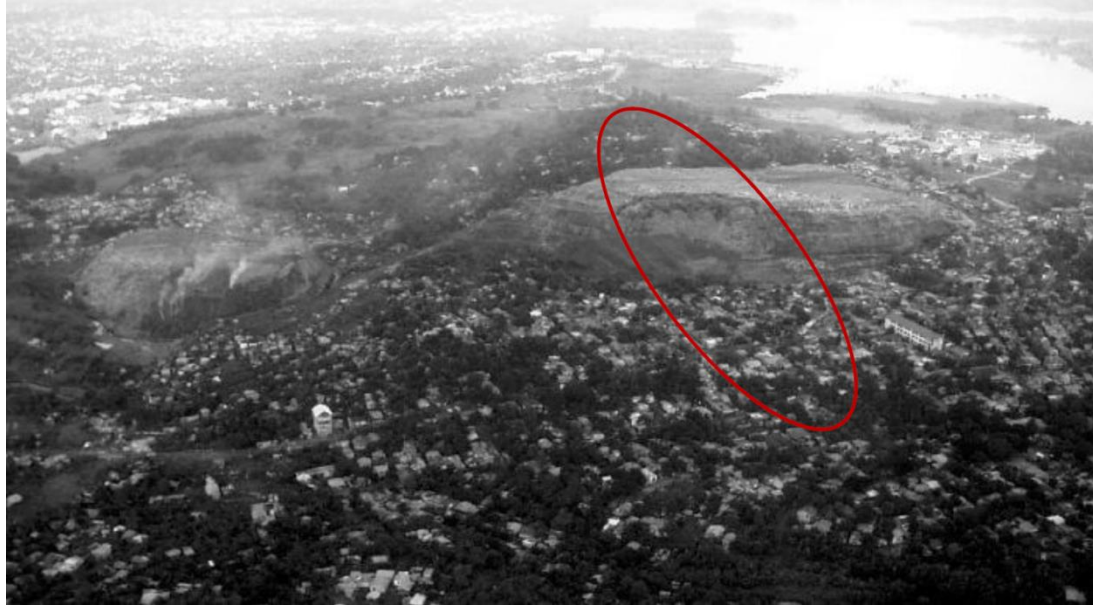


Rottura traslazionale lungo il pacchetto di impermeabilizzazione di base



CASE HISTORY #1

DISCARICA DI PAYATAS, QUEZON CITY, FILIPPINE



Background

- collasso avvenuto il 10 Luglio 2000 in una discarica di RSU sita nell'area metropolitana di Manila;
- ingenti perdite di vite umane (278 morti e da 80 a 350 dispersi);
- inizio attività della discarica nel 1973, con significativo aumento delle quantità di rifiuti conferiti giornalmente a partire dal 1988 (da 1.500 a 1.800 ton/giorno).

CASE HISTORY #1

DISCARICA DI PAYATAS, QUEZON CITY, FILIPPINE

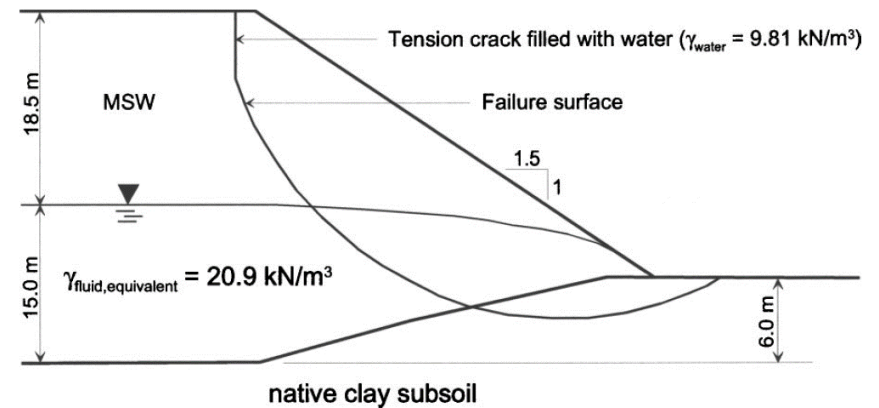


Caratteristiche della discarica

- rifiuti abbancati direttamente sul terreno in posto, costituito da argille limose intervallate da strati di materiale granulare;
- scarsa compattazione e alto contenuto di frazione organica dei rifiuti conferiti nella discarica;
- massima elevazione della discarica pari a 33,5 m, con un'inclinazione del fronte rispetto all'orizzontale uguale a circa 35°;
- formazione di un'area depressa nella zona sommitale della discarica, che ha agito come bacino di raccolta delle acque piovane.

CASE HISTORY #1

DISCARICA DI PAYATAS, QUEZON CITY, FILIPPINE



Descrizione del fenomeno di instabilità

- 746 mm di pioggia caduta nelle due settimane antecedenti la rottura (circa il 42% della pioggia complessivamente caduta nel periodo estivo), con conseguente innalzamento del battente di percolato sul fondo di circa 15 m;
- da 13.000 a 16.000 m³ di rifiuti mobilitati a rottura, secondo un cinematismo di tipo rotazionale.

CASE HISTORY #1

DISCARICA DI PAYATAS, QUEZON CITY, FILIPPINE



Cause predisponenti la rottura

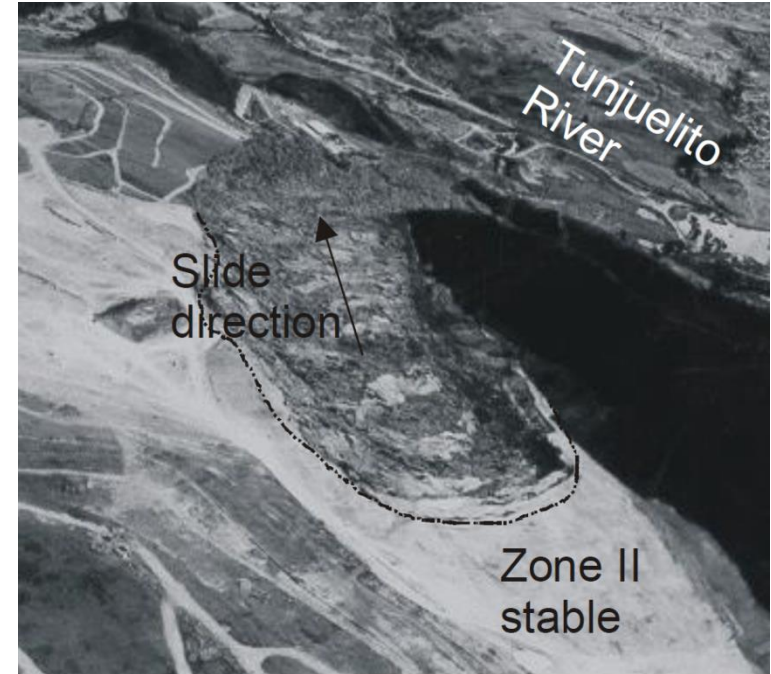
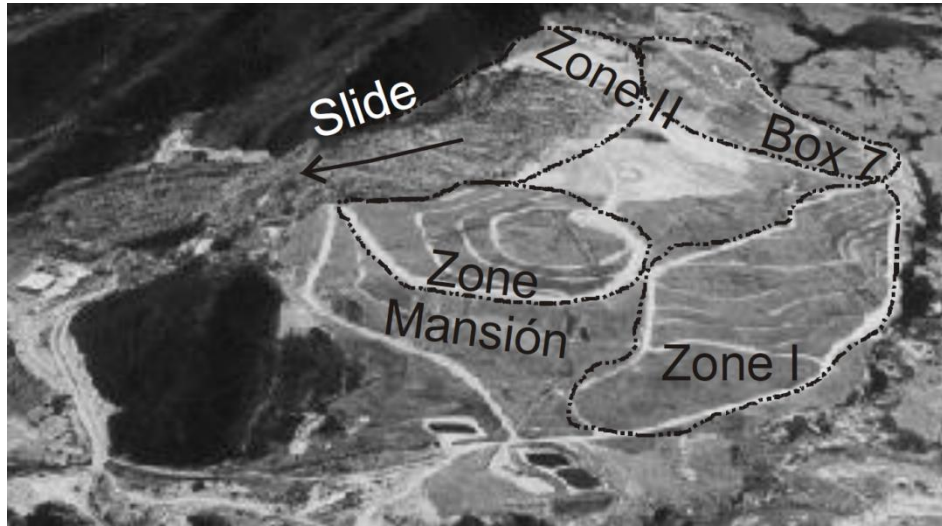
- ✓ inadeguata compattazione dei rifiuti conferiti in discarica;
- ✓ eccessiva pendenza del fronte della discarica.

Cause scatenanti la rottura

- ✓ incremento del battente di percolato agente sul fondo della discarica a seguito di precipitazioni di eccezionale intensità;
- ✓ presenza di biogas in pressione nella zona satura del corpo rifiuti.

CASE HISTORY #2

DISCARICA DI DOÑA JUANA, BOGOTÁ, COLOMBIA

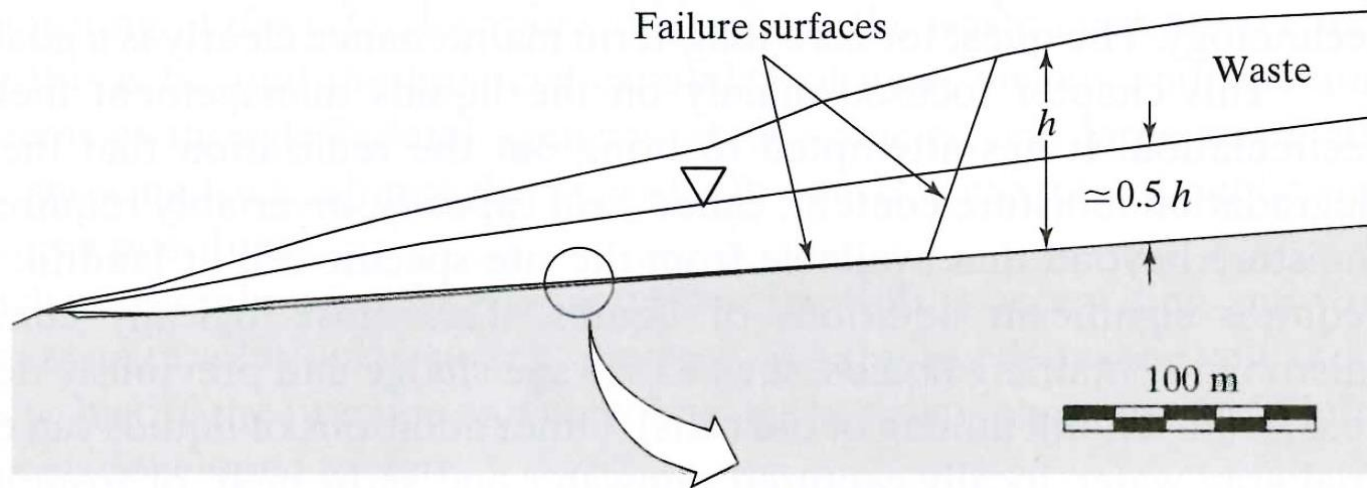


Background

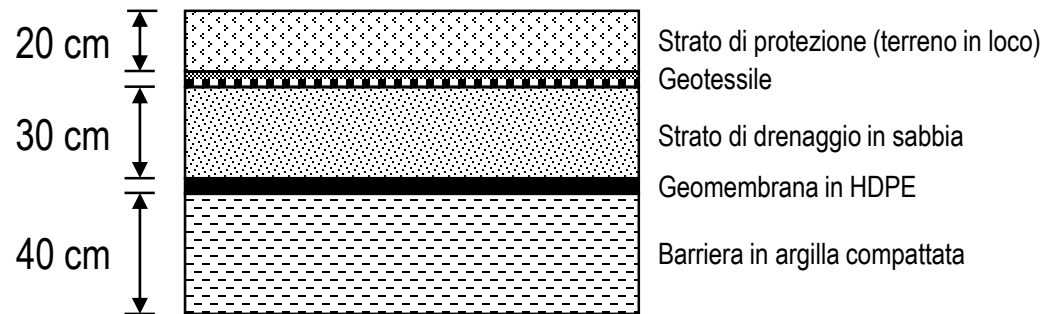
- collasso avvenuto il 27 Settembre 1997 nella principale discarica di RSU della città di Bogotá, aperta nel 1989 e attualmente in attività con circa 5.000 ton di rifiuti conferiti giornalmente;
- instabilità localizzata nella Zona II della discarica, nella quale i conferimenti erano iniziati nel 1995;
- la massa di rifiuti coinvolta dalla rottura ha invaso il fiume adiacente all'impianto, causando un'ingente contaminazione delle acque.

CASE HISTORY #2

DISCARICA DI DOÑA JUANA, BOGOTÁ, COLOMBIA

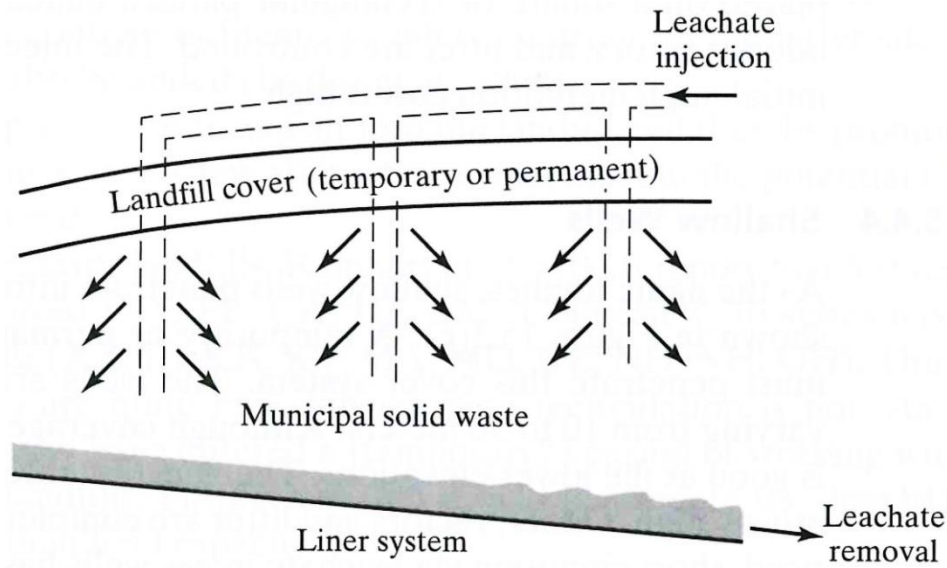


Caratteristiche del pacchetto di impermeabilizzazione di fondo nella Zona II dell'impianto



CASE HISTORY #2

DISCARICA DI DOÑA JUANA, BOGOTÁ, COLOMBIA



Modalità di gestione del percolato

- sperimentazione su scala pilota della tecnica del ricircolo del percolato;
- pompaggio in pressione del percolato all'interno del corpo rifiuti mediante un sistema di pozzi profondi, realizzati nella Zona II dell'impianto;
- inizio delle attività di pompaggio tre mesi prima del collasso, per un volume totale di percolato iniettato pari a circa 40.000 m³.

CASE HISTORY #2

DISCARICA DI DOÑA JUANA, BOGOTÁ, COLOMBIA

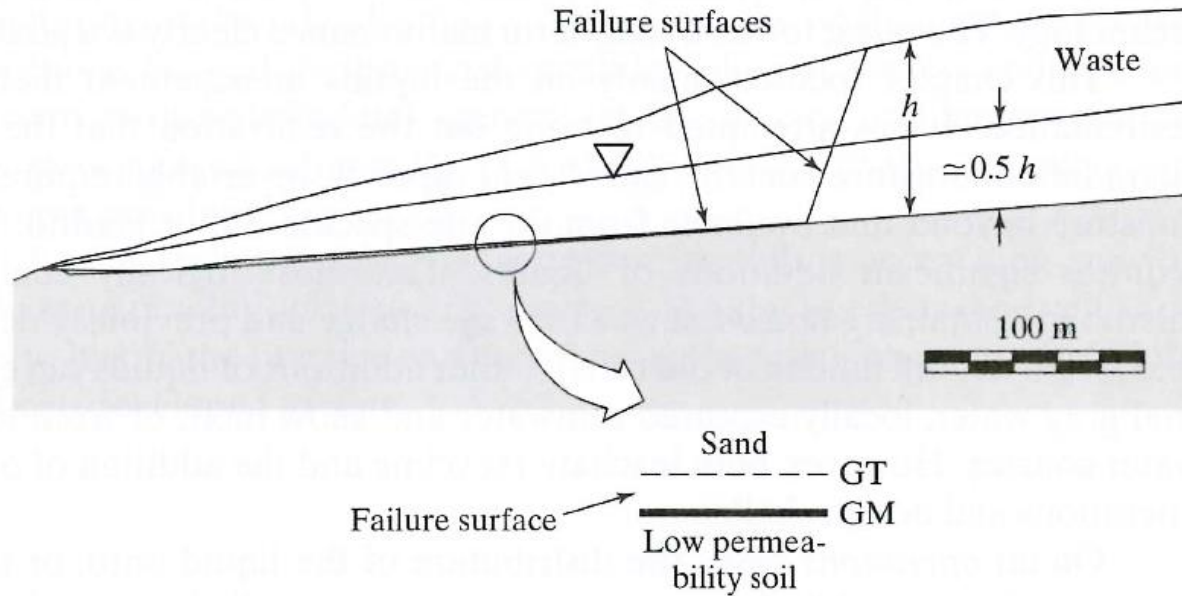


Descrizione del fenomeno di instabilità

- formazione di *tension crack* della zona sommitale del corpo rifiuti;
- mobilitazione a rottura di circa 1.200.000 m³ di rifiuti, secondo un cinematismo di tipo traslazionale;
- elevata rapidità di evoluzione del fenomeno di instabilità (20 minuti), per una distanza percorsa dalla colata pari a 1,5 km;

CASE HISTORY #2

DISCARICA DI DOÑA JUANA, BOGOTÁ, COLOMBIA

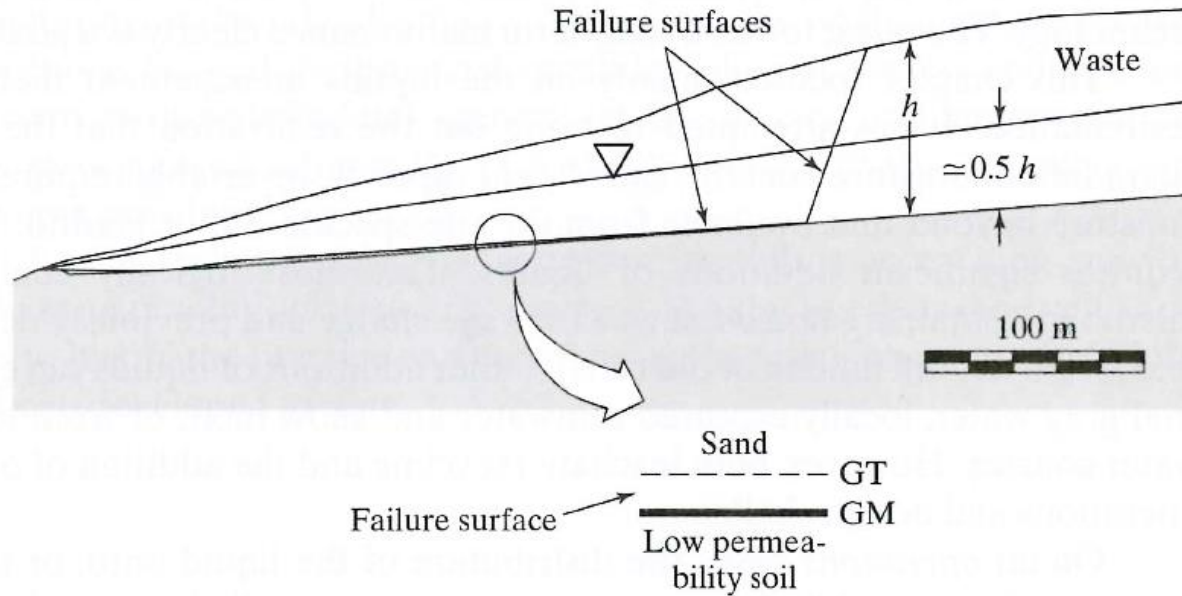


Descrizione del fenomeno di instabilità

- la superficie di rottura si è propagata, a partire dal piede del pendio, lungo il pacchetto di impermeabilizzazione di fondo (interfaccia tra lo strato di drenaggio in sabbia e la geomembrana in HDPE), attraversando in ultimo il corpo rifiuti secondo un piano quasi verticale.

CASE HISTORY #2

DISCARICA DI DOÑA JUANA, BOGOTÁ, COLOMBIA



Cause predisponenti la rottura

- ✓ presenza di interfacce nella barriera di fondo contraddistinte da basse resistenze al taglio;
- ✓ assenza di un argine di contenimento al piede del pendio.

Cause scatenanti la rottura

- ✓ incremento del battente idraulico agente sul fondo della discarica a seguito delle operazioni di ricircolo del percolato, condotte in modo particolarmente aggressivo.

QUADRO NORMATIVO IN ITALIA E ALL'ESTERO

Code of Federal Regulations

Title 40 – Protection of Environment

Part 258 – Criteria for Municipal Solid Waste Landfills

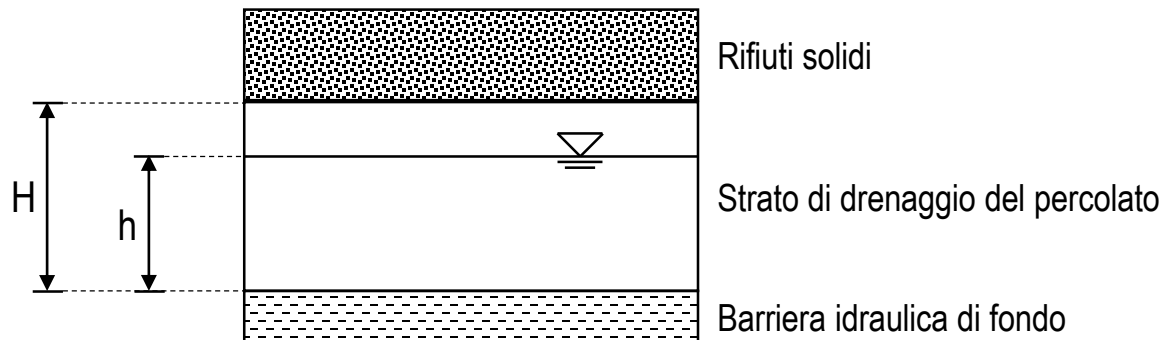
Subpart D – Design Criteria, § 258.40

(a) New MSWLF units and lateral expansions shall be constructed:

...

(2) With a composite liner, as defined in paragraph (b) of this section and a leachate collection system that is designed and constructed to maintain less than a 30-cm depth of leachate over the liner.

USA → $h \leq 30 \text{ cm}$



QUADRO NORMATIVO IN ITALIA E ALL'ESTERO

Code of Federal Regulations

Title 40 – Protection of Environment

Part 258 – Criteria for Municipal Solid Waste Landfills

Subpart D – Design Criteria, § 258.40

(a) New MSWLF units and lateral expansions shall be constructed:

...

(2) With a composite liner, as defined in paragraph (b) of this section and a leachate collection system that is designed and constructed to maintain less than a 30-cm depth of leachate over the liner.

Decreto Legislativo 13 Gennaio 2003, n. 36

Allegato 1 – Criteri costruttivi e gestionali degli impianti di discarica

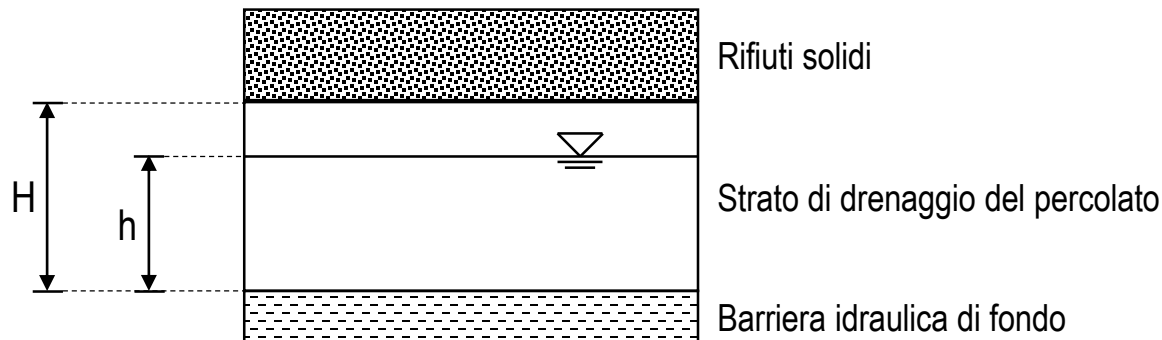
Parte 2 – Impianti per rifiuti non pericolosi e per rifiuti pericolosi

Paragrafo 2.4.2 – Barriera geologica

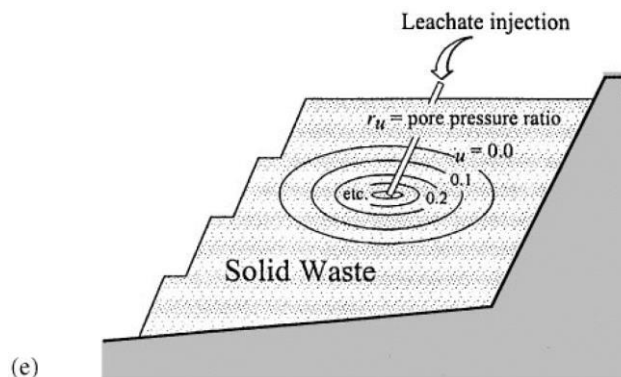
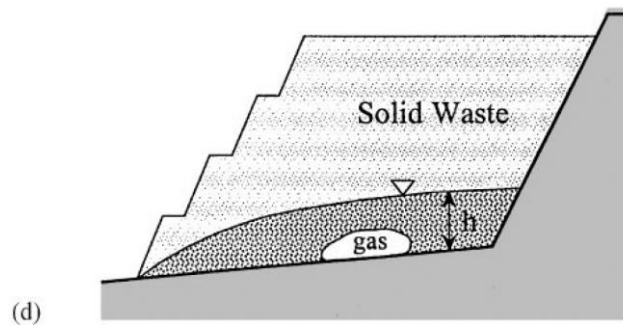
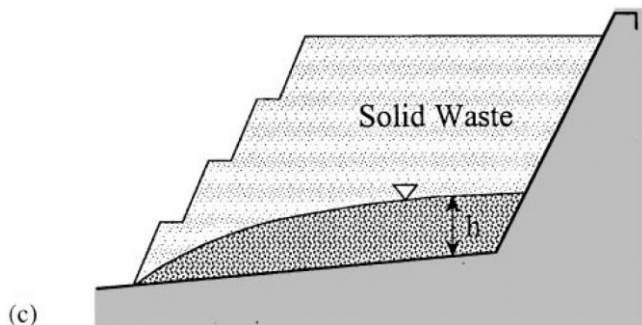
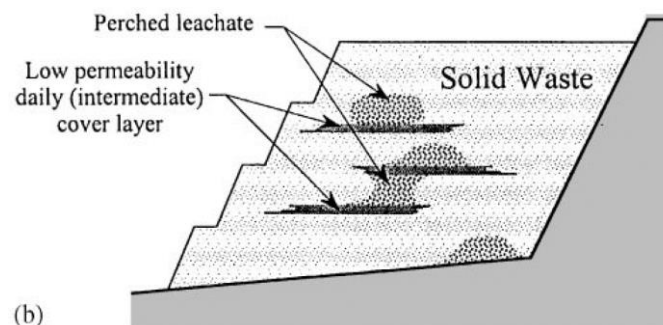
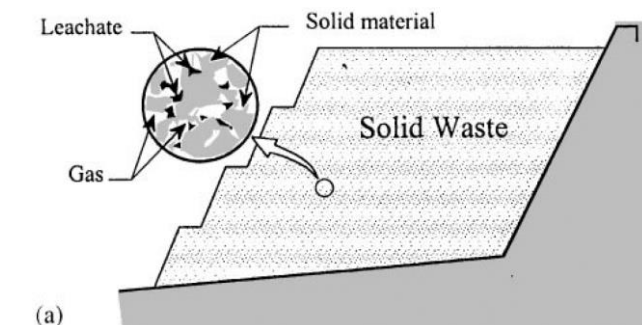
Sul fondo della discarica, al di sopra del rivestimento impermeabile, deve essere previsto uno strato di materiale drenante con spessore $\geq 0,5$ m.

USA \Rightarrow $h \leq 30$ cm

Italia \Rightarrow $H \geq 50$ cm



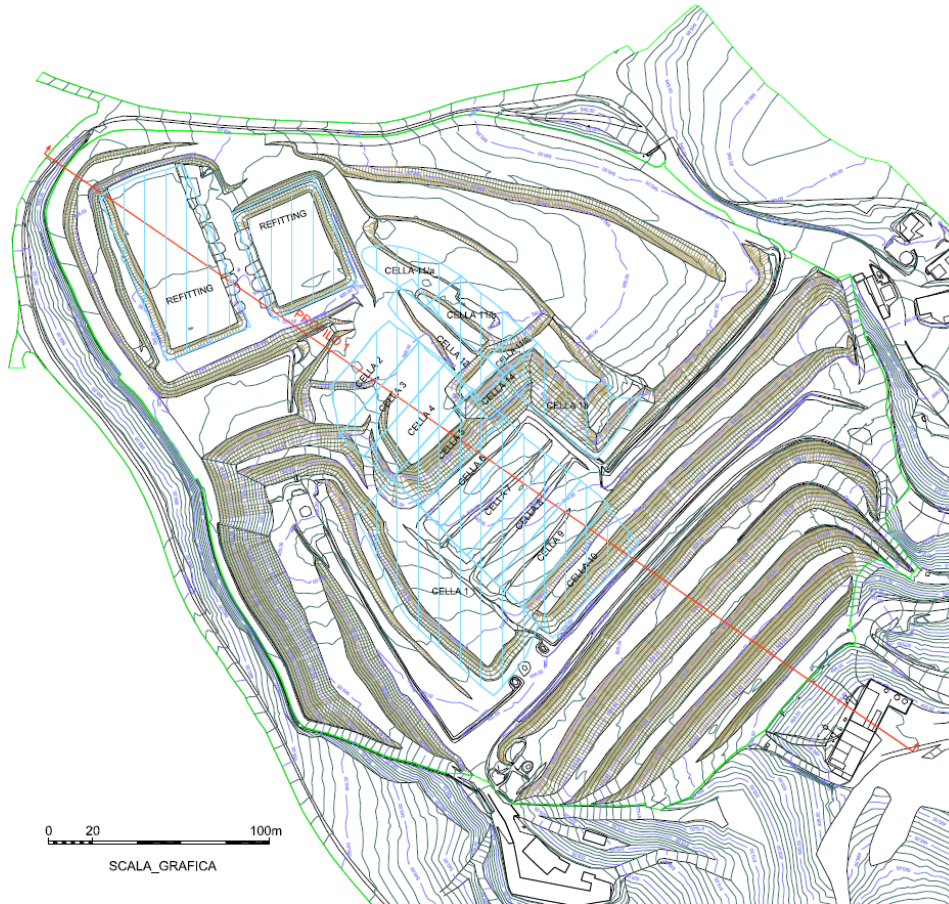
SCENARI DI DISTRIBUZIONE DEL PERCOLATO



ESEMPIO DI ANALISI NUMERICA

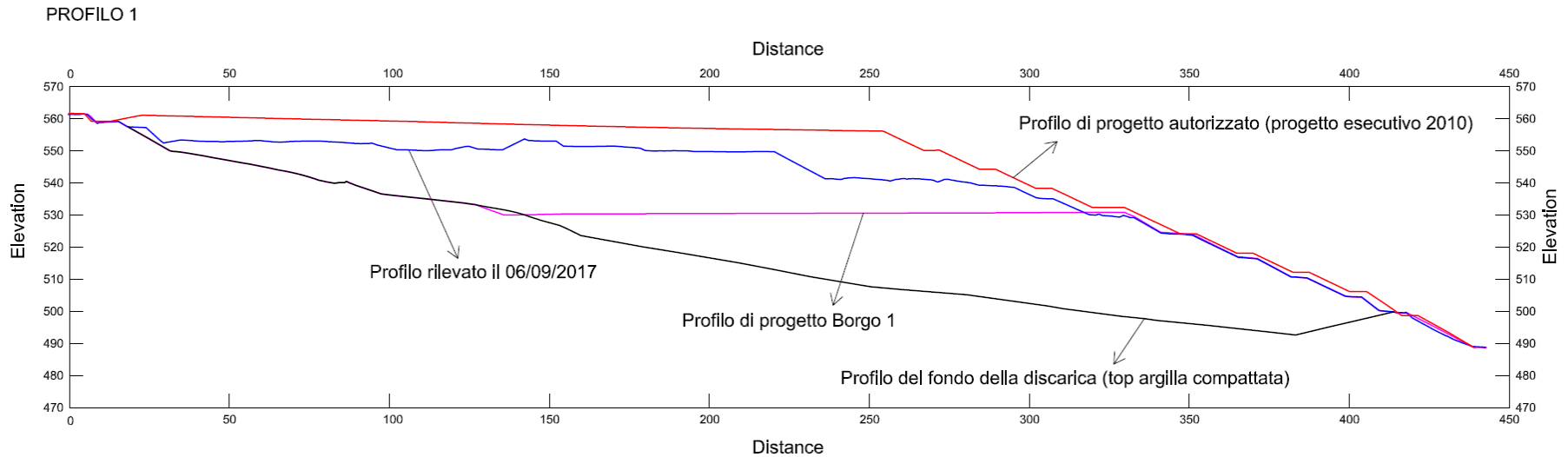
DISCARICA DI RIFIUTI NON PERICOLOSI IN LOCALITÀ BORGOGIGLIONE (PG)

Estratto planimetrico della configurazione di abbancamento al 06/09/2017



ESEMPIO DI ANALISI NUMERICA

DISCARICA DI RIFIUTI NON PERICOLOSI IN LOCALITÀ BORGOGIGLIONE (PG)



- L'impianto è stato autorizzato per una **volumetria complessiva pari a 1.530.000 m³**, ottenuti da una **prima fase di abbancamento di 600.000 m³**, avviata nel 1995 e attualmente completata (profilo di progetto Borgo 1), e da una **successiva fase di ampliamento per 930.000 m³**, avviata nel 2010 e ad oggi non completata (profilo di progetto autorizzato);
- A valle del corpo rifiuti è presente un argine di contenimento, costituito da ghiaie e limi sabbiosi;
- Il substrato naturale è costituito da marne e arenarie diffusamente fratturate e da una copertura superficiale di terreni a granulometria medio-fine.

ESEMPIO DI ANALISI NUMERICA

DISCARICA DI RIFIUTI NON PERICOLOSI IN LOCALITÀ BORGOGIGLIONE (PG)

➤ REGIONI 1A, 1B, 1C, 2A

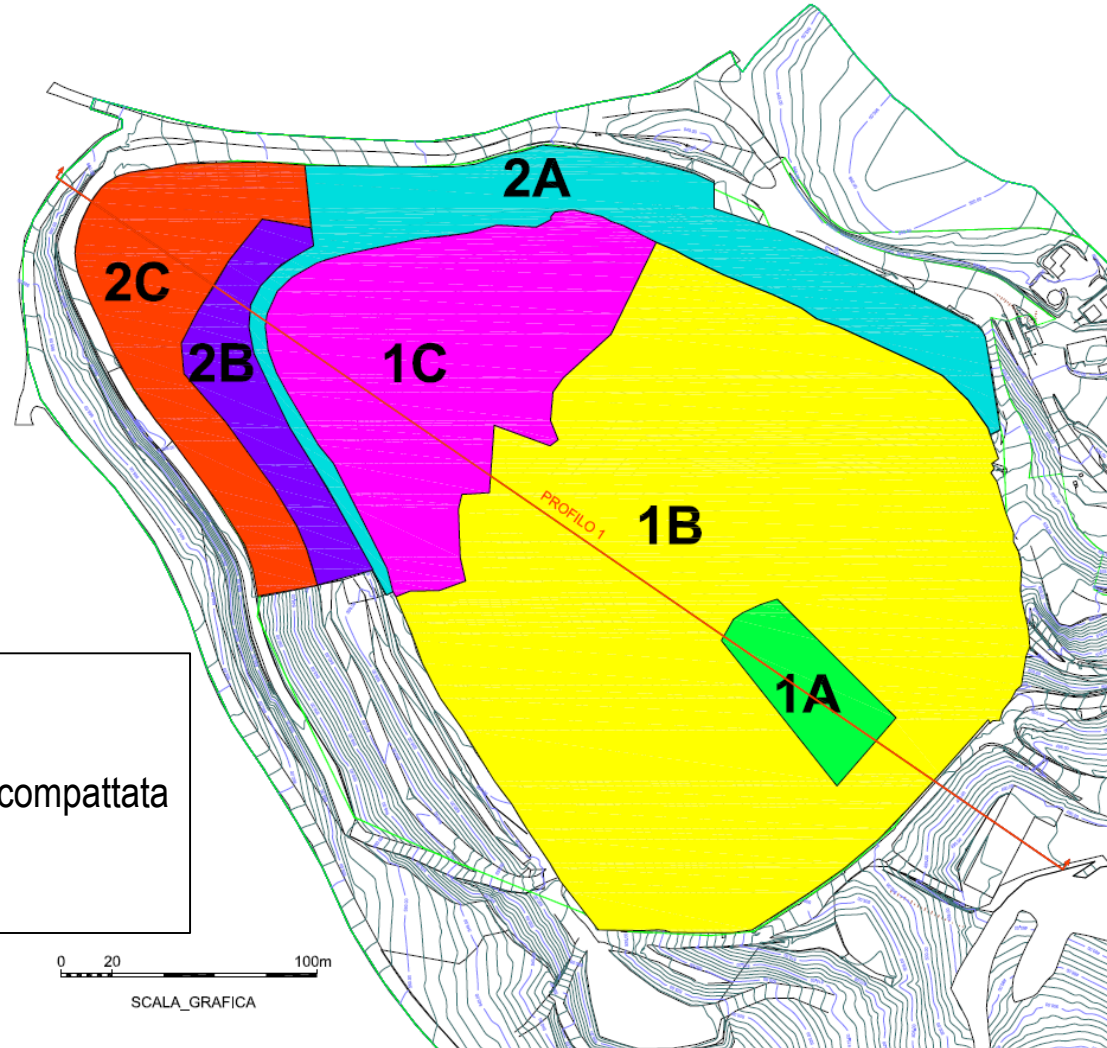
Interfaccia GM liscia / argilla compattata
Interfaccia GM liscia / pneumatici + rifiuti

$$c' = 0 \text{ kPa} \quad \varphi' = 11^\circ$$

➤ REGIONI 2B, 2C

Interfaccia GM aderenza migliorata / argilla compattata

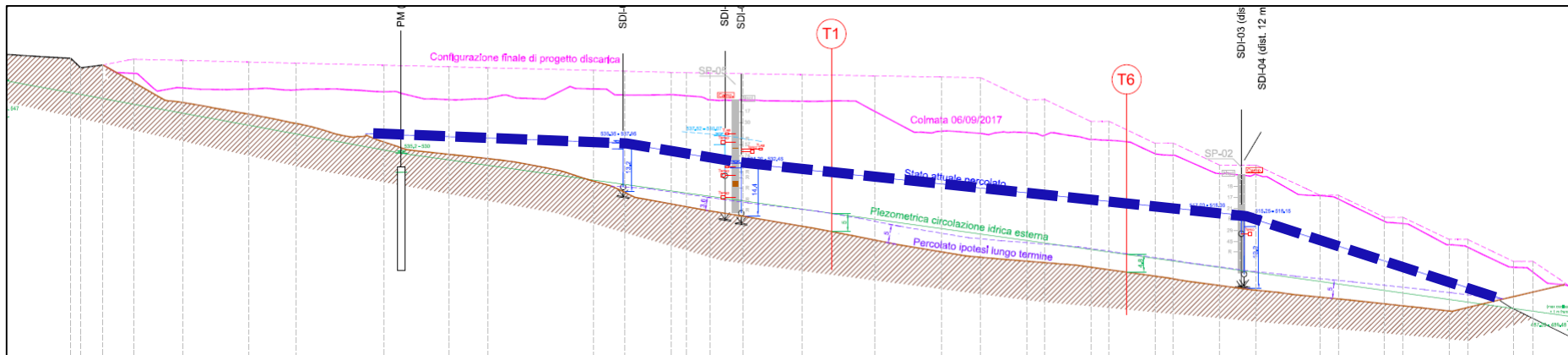
$$c' = 24 \text{ kPa} \quad \varphi' = 12,5^\circ$$



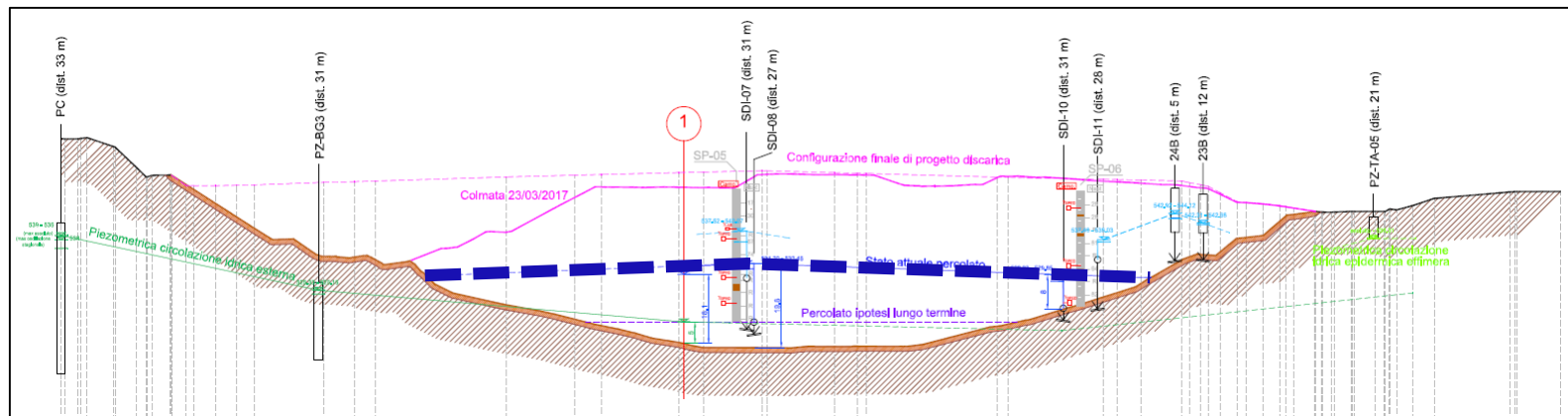
ESEMPIO DI ANALISI NUMERICA

DISCARICA DI RIFIUTI NON PERICOLOSI IN LOCALITÀ BORGOGIGLIONE (PG)

Ricostruzione della piezometria lungo una sezione longitudinale dell'impianto



Ricostruzione della piezometria lungo una sezione trasversale dell'impianto



ESEMPIO DI ANALISI NUMERICA

DISCARICA DI RIFIUTI NON PERICOLOSI IN LOCALITÀ BORGOGIGLIONE (PG)

Verifiche di sicurezza condotte secondo la Combinazione 2 (A2+M2+R2) dell'Approccio 1
NTC 2018, Opere di materiali sciolti (§6.8; §7.11.4)

Verifiche	Coeff. parziali sulle azioni	Coeff. parziali sui parametri geotecnici	Coeff. parziali sulle resistenze
Statiche (SLU)	1,0 (carichi permanenti)	1,25 ($\tan \varphi'_k$ e c'_k)	1,1
Sismiche (SLV)	1,0	1,0	1,2

Definizione dell'input sismico (azioni equivalenti pseudostatiche)

Accelerazione orizzontale massima attesa al sito a_{\max} [g]	0,344
Coefficiente di riduzione dell'accelerazione massima attesa sul sito β_s	0,18
Coefficiente sismico orizzontale k_h	0,062
Coefficiente sismico verticale k_v	$\pm 0,031$

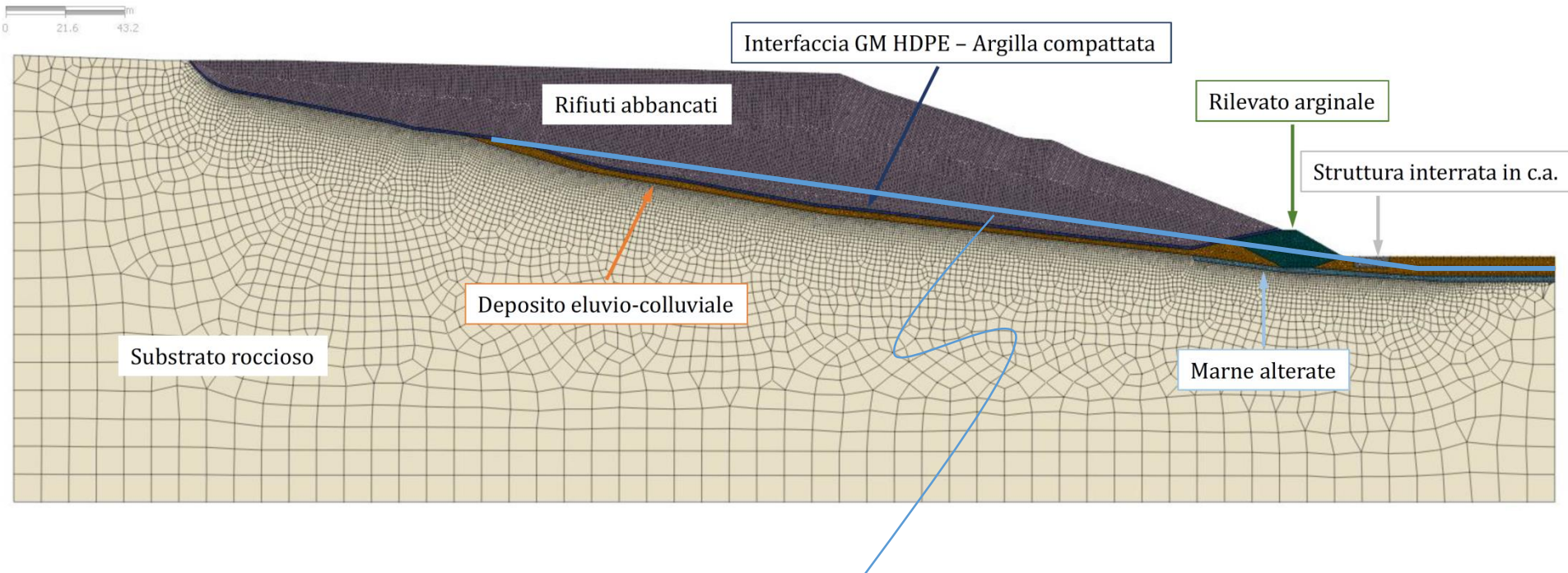
N.B.: il paragrafo §6.11.1 delle NTC 2018, dedicato alle discariche controllate di rifiuti, non specifica quali siano le combinazioni dei coefficienti di sicurezza da adottare nelle verifiche di sicurezza per tali tipologie di manufatto.



ESEMPIO DI ANALISI NUMERICA

DISCARICA DI RIFIUTI NON PERICOLOSI IN LOCALITÀ BORGOGIGLIONE (PG)

Modello numerico bidimensionale (MIDAS GTS NX)



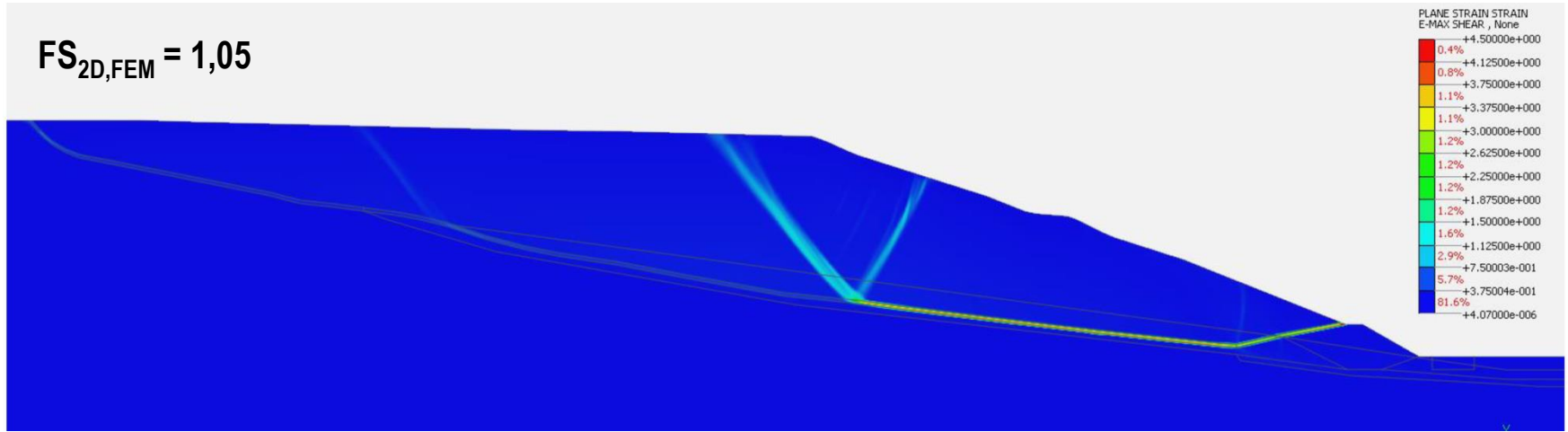
Profilo piezometrico di *target*, rappresentativo delle massime pressioni neutre che possono svilupparsi nel corpo rifiuti e nel pacchetto di impermeabilizzazione di fondo nelle condizioni di lungo termine (configurazione finale di progetto).

ESEMPIO DI ANALISI NUMERICA

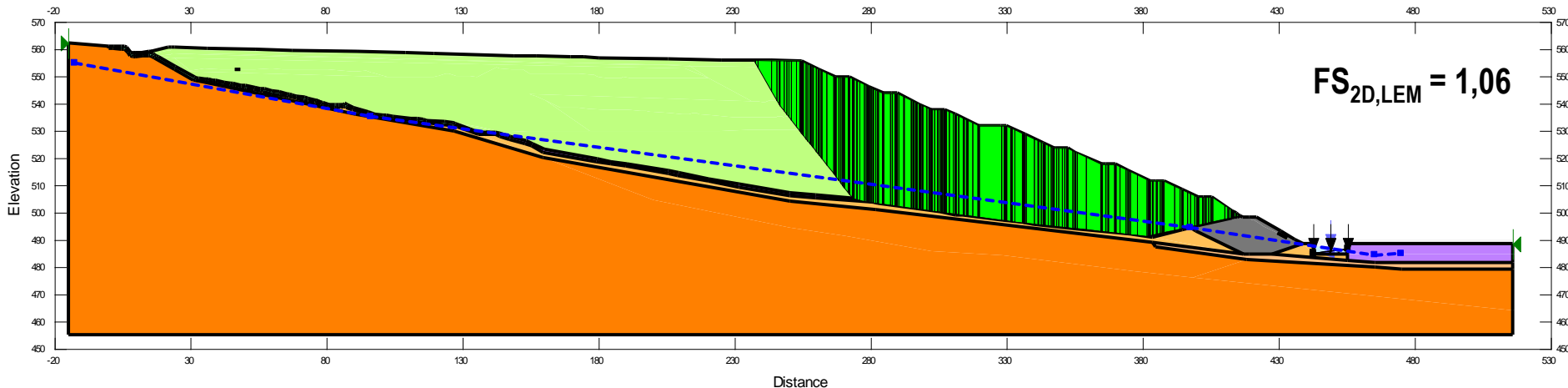
DISCARICA DI RIFIUTI NON PERICOLOSI IN LOCALITÀ BORGOGIGLIONE (PG)

Risultati delle analisi di stabilità in campo statico, adottando i parametri caratteristici dei materiali

$FS_{2D,FEM} = 1,05$



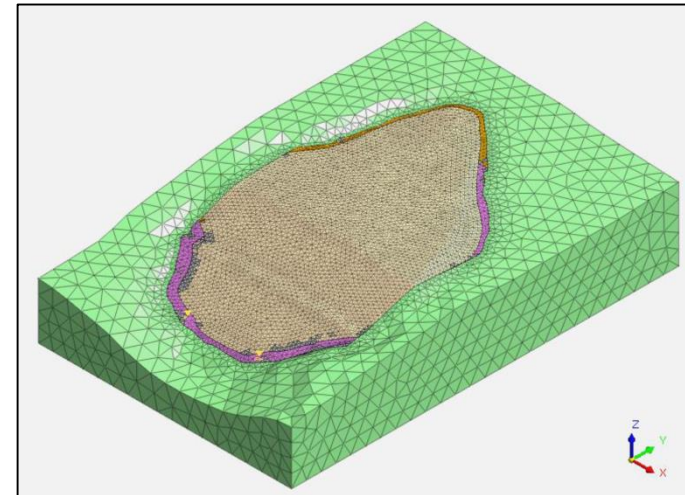
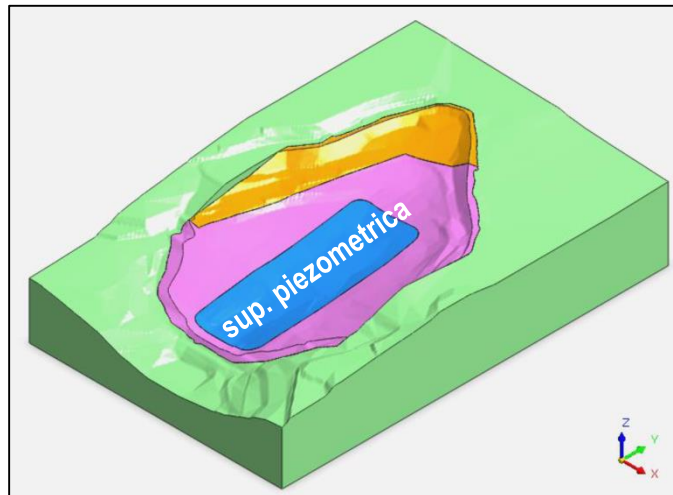
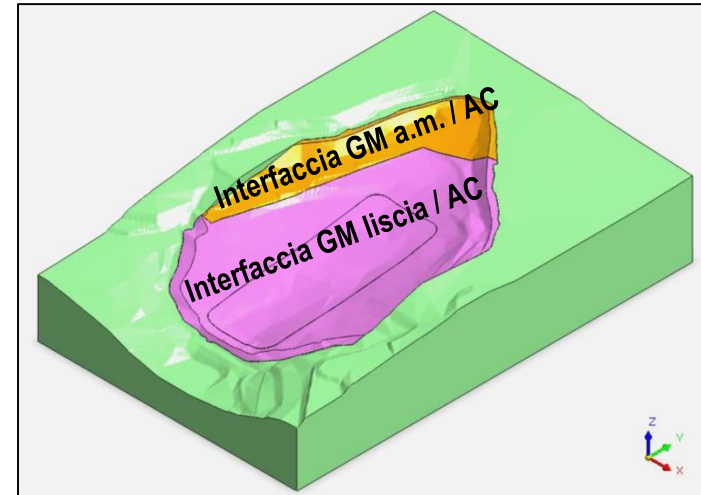
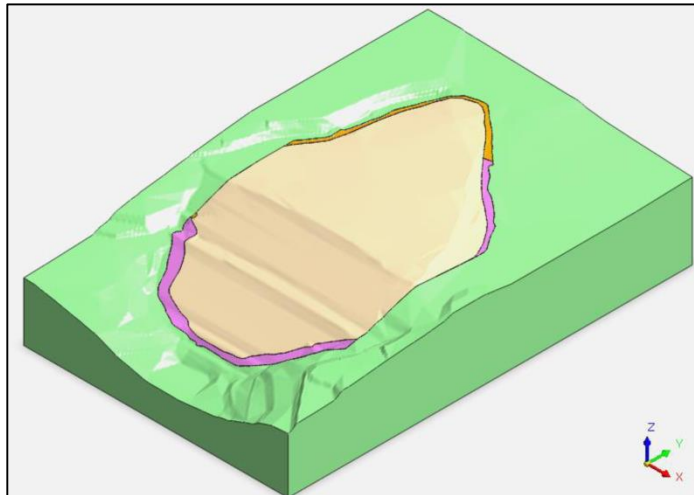
Distance ● 1.06



ESEMPIO DI ANALISI NUMERICA

DISCARICA DI RIFIUTI NON PERICOLOSI IN LOCALITÀ BORGOGIGLIONE (PG)

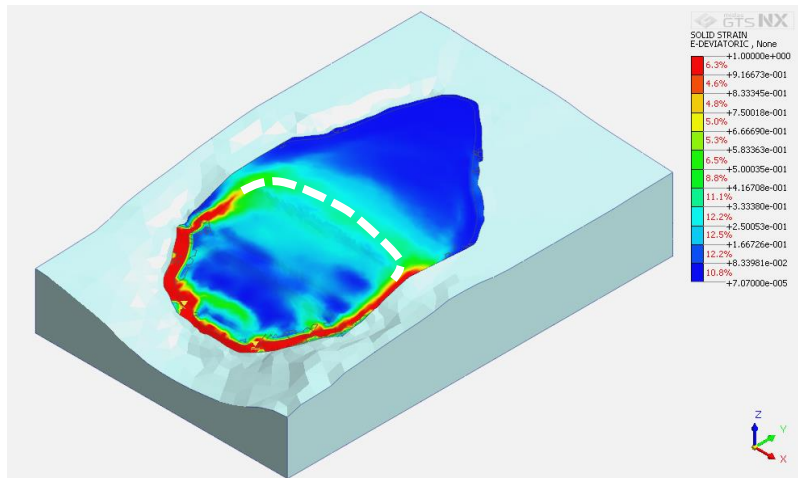
Modello numerico tridimensionale (MIDAS GTS NX)



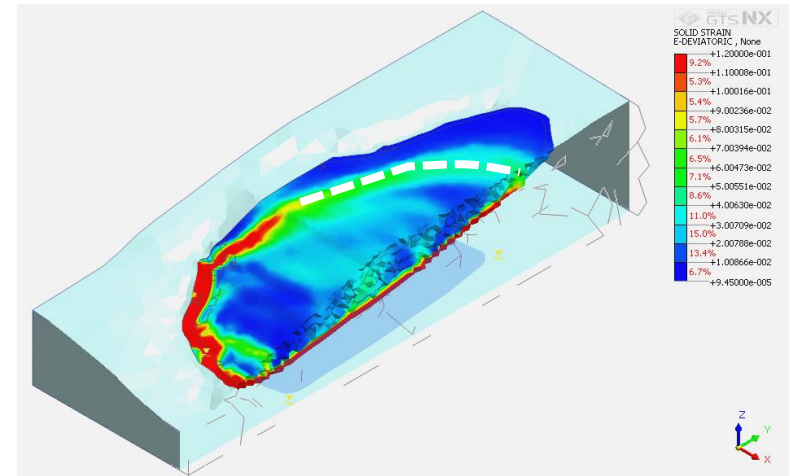
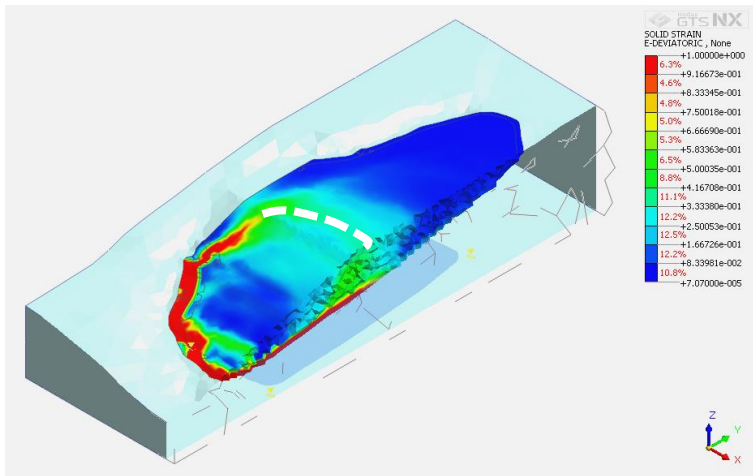
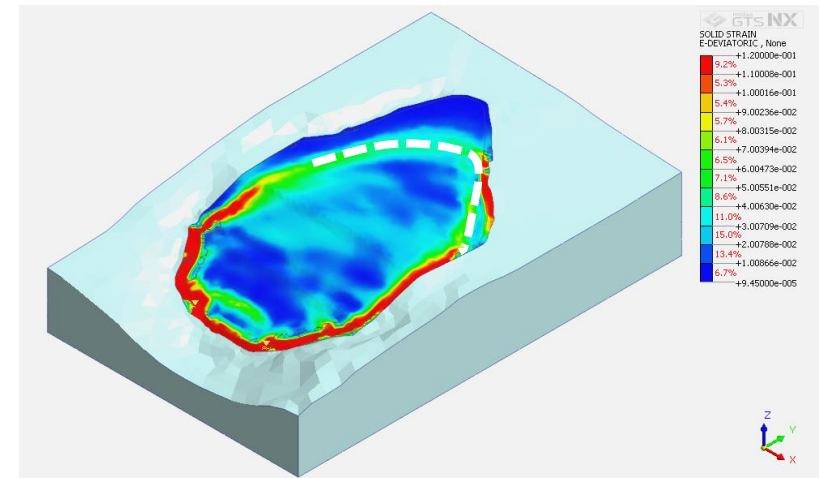
ESEMPIO DI ANALISI NUMERICA

DISCARICA DI RIFIUTI NON PERICOLOSI IN LOCALITÀ BORGOGIGLIONE (PG)

Campo statico, $FS_{3D,FEM} = 1,2$



Campo sismico, $FS_{3D,FEM} = 1,2$



CONCLUSIONI

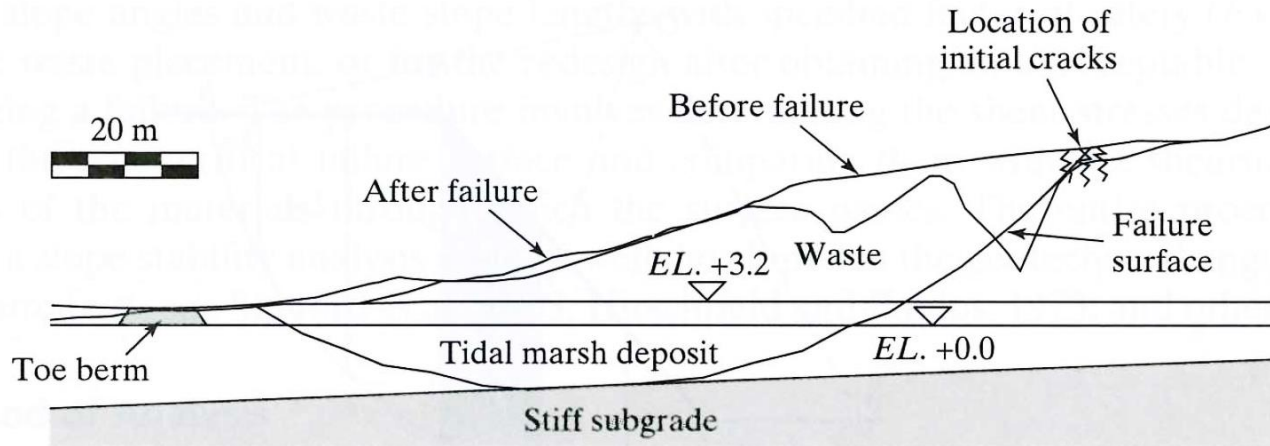
- ✓ Un innalzamento del battente di percolato insistente sul fondo della discarica produce non solo un incremento del trasporto di tipo convettivo dei contaminanti attraverso la barriera idraulica, ma anche una significativa riduzione del margine di sicurezza rispetto alla stabilità geotecnica dell'impianto.
- ✓ La messa in opera di un sistema di raccolta e allontanamento del percolato, nonché l'impiego di idonei sistemi di copertura superficiale, sono di fondamentale importanza per il controllo del battente idraulico agente sul fondo, sia in fase di riempimento sia in fase di post-chiusura dell'impianto. Inoltre, l'eventuale esecuzione del ricircolo del percolato deve essere condotta con estrema cautela.
- ✓ Gli scenari di distribuzione del percolato nel corpo rifiuti possono essere estremamente complessi, e pertanto la ricostruzione del battente idraulico insistente sul fondo non dovrebbe prescindere dai risultati di un adeguato monitoraggio piezometrico, finalizzato a determinare il regime delle pressioni neutre all'interno del corpo rifiuti, nonché le caratteristiche della circolazione idrica sotterranea esterna alla discarica.
- ✓ Tra i diversi cinematismi di rottura profondi innescati da un aumento delle pressioni neutre all'interno del corpo rifiuti, merita particolare attenzione lo scivolamento traslazionale lungo le interfacce del pacchetto di impermeabilizzazione di fondo che, tipicamente, sono caratterizzate da basse resistenze al taglio e da una risposta fragile a rottura.
- ✓ Le caratteristiche geometriche dell'impianto influenzano in modo importante le condizioni di stabilità, e pertanto è opportuno che le analisi finalizzate a stimare il margine di sicurezza rispetto allo stato limite ultimo tengano conto degli effetti della tridimensionalità del problema.



Grazie per l'attenzione

CASE HISTORY #1

DISCARICA DI RSU SITA IN NORD-AMERICA

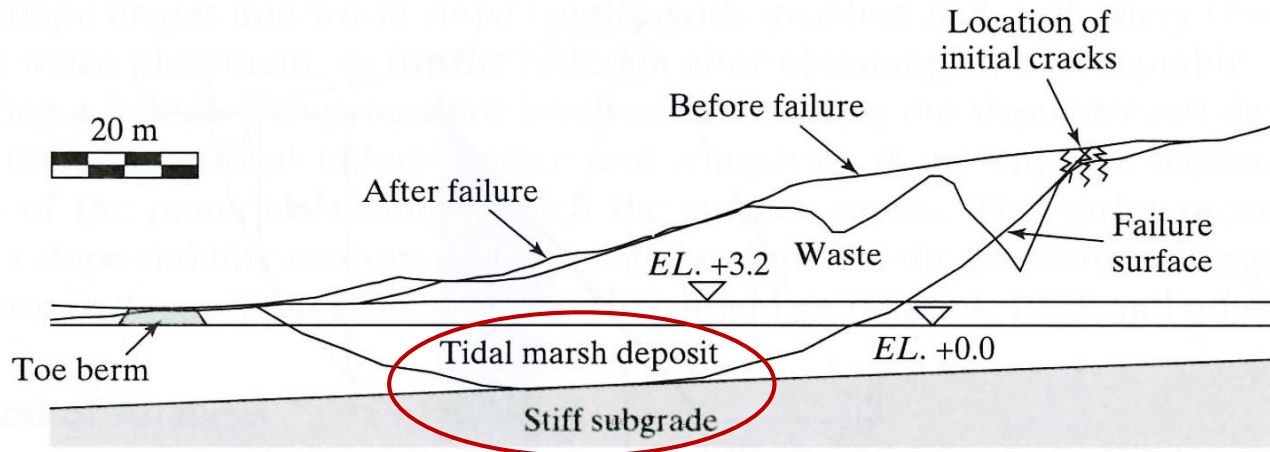


Background

- collasso avvenuto nel 1984 dopo circa 15 anni di attività della discarica;
- massima elevazione della discarica pari a 44 m, con un'inclinazione del fronte rispetto all'orizzontale uguale a circa 15° ;
- presenza di un argine di contenimento a valle del corpo della discarica;
- assenza di un'impermeabilizzazione di fondo e di un sistema di raccolta e allontanamento del percolato;
- scarsa compattazione dei rifiuti conferiti nella discarica ($\gamma \approx 10,2 \text{ kN/m}^3$).

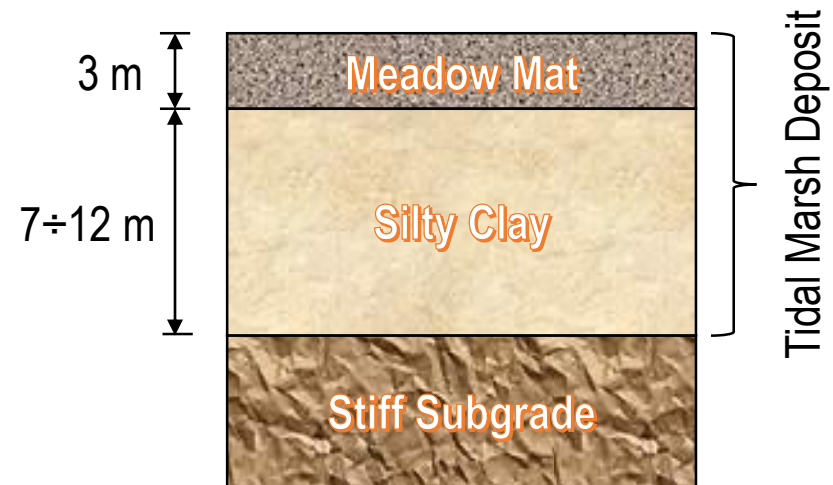
CASE HISTORY #1

DISCARICA DI RSU SITA IN NORD-AMERICA



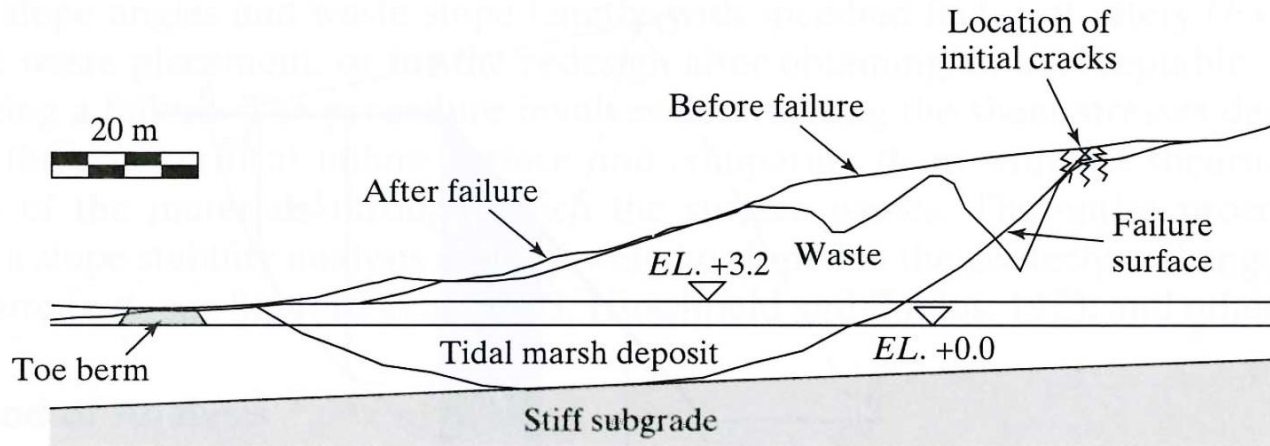
Condizioni del terreno di fondazione

- Meadow Mat: sabbia fine, limo, radici e rifiuti decomposti;
- Silty Clay: argilla limosa con contenuto d'acqua compreso tra 88 e 117% e resistenza al taglio non drenata compresa tra 4,3 e 12,5 kPa;
- Stiff Subgrade: sabbia fine limosa ad elevato grado di addensamento.



CASE HISTORY #1

DISCARICA DI RSU SITA IN NORD-AMERICA

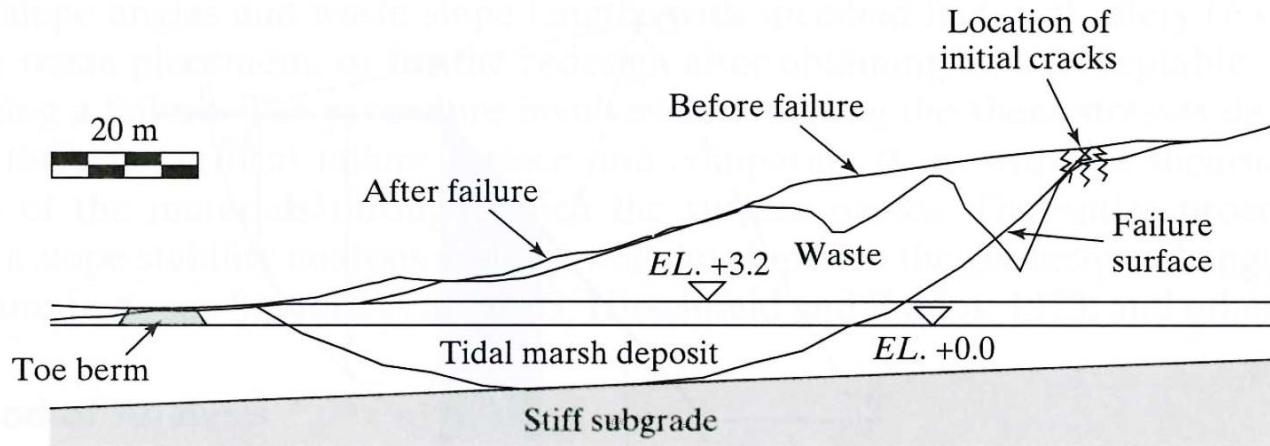


Descrizione del fenomeno di instabilità

- 70 mm di pioggia caduta nei tre giorni antecedenti la rottura, con conseguente innalzamento del battente di percolato sul fondo di 3,2 m;
- formazione di *tension crack* nella zona sommitale del corpo rifiuti (indicativo di una condizione di incipiente rottura);
- movimentazione di circa 110.000 m³ di rifiuti a rottura, secondo un cinematismo di tipo rotazionale;
- sollevamento e trasporto dell'argine di contenimento verso valle per una distanza di circa 60 m.

CASE HISTORY #1

DISCARICA DI RSU SITA IN NORD-AMERICA



Cause predisponenti la rottura

- ✓ terreno di fondazione contraddistinto da caratteristiche meccaniche particolarmente scadenti, non adeguatamente indagate e quantificate in fase progettuale;
- ✓ inadeguata compattazione dei rifiuti conferiti in discarica.

Cause scatenanti la rottura

- ✓ incremento del battente di percolato agente sul fondo della discarica a seguito di precipitazioni prolungate.