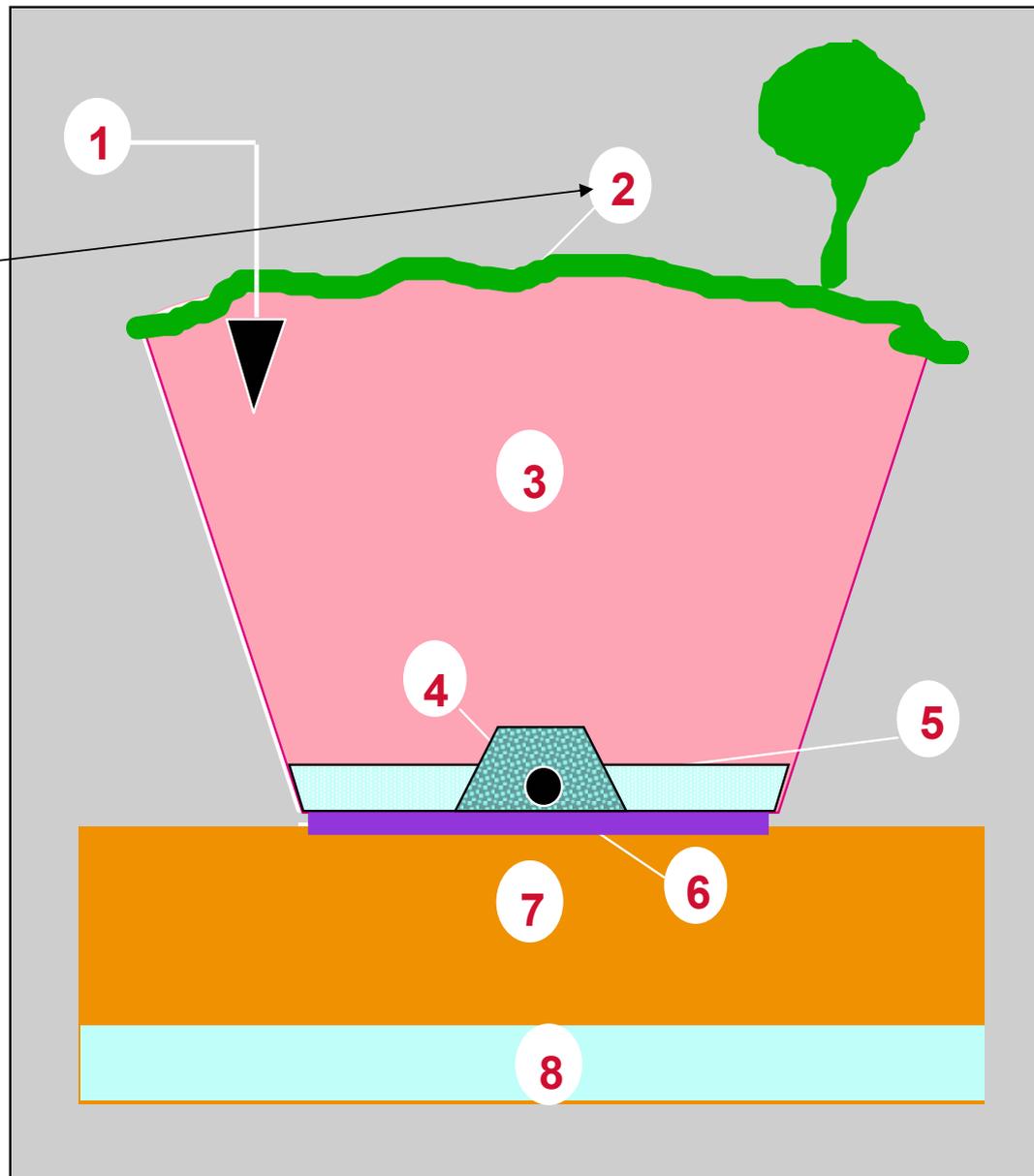


COPERTURA DELLE DISCARICHE

COPERTURA =
barriera
della discarica

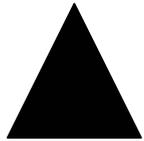
i = barriera



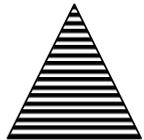
FUNZIONI

- regolarizzare la produzione di percolato impedendo o limitando l'infiltrazione di acqua
- controllare ed opportunamente indirizzare il flusso del biogas formatosi in seguito ai processi di degradazione anaerobica
- isolare i rifiuti dall'ambiente esterno
- evitare che il vento possa disperdere le frazioni leggere quali plastica, carta e polveri
- rendere indisponibili i rifiuti per uccelli, insetti e ratti
- consentire la crescita della vegetazione

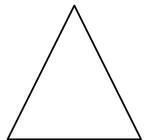
TIPO DI COPERTURA



**A valvola chiusa =
*IMPERMEABILIZZAZIONE***



**A valvola semiaperta =
*BARRIERE CAPILLARI***

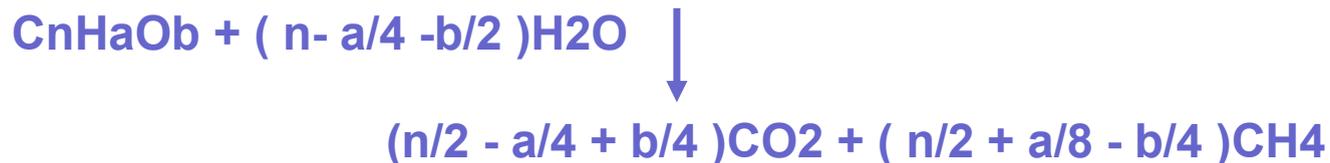


**A valvola aperta =
*FLUSHING BIOREACTOR***

SCELTA DEL TIPO DI COPERTURA

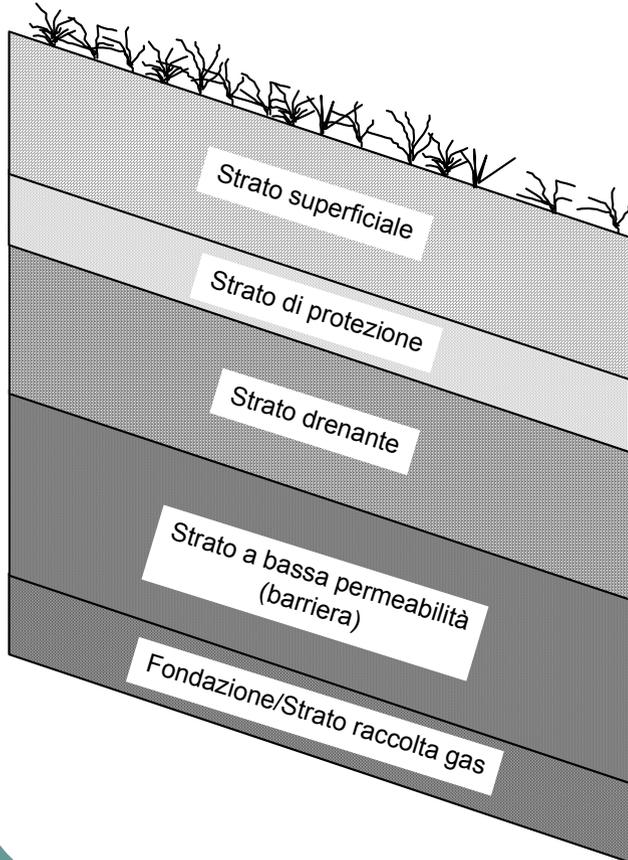
Non univoco, ma dipendente da:

- *esigenze d'acqua per degradazione*, legate a qualità dei rifiuti e al contenuto di carbonio biodegradabile;



- *Caratteristiche meccaniche dell'ammasso* (assestamenti e stabilità), legate a forma fisica e qualità dei rifiuti (tal quali, triturati, pretrattati biologicamente o termicamente).

1. BARRIERE TRADIZIONALI



Strato superficiale di copertura vegetale

Strato di protezione

Strato drenante

Strato a bassa permeabilità (barriera)

Strato di supporto/captazione del biogas

MATERIALI UTILIZZABILI

TIPO DI STRATO	MATERIALI
Strato superficiale	Terreno naturale Strato geosintetico di controllo per l'erosione Ciottoli (ghiaia naturale) Materiale di pavimentazione
Strato protettivo	Tout-venant Residui da trattamenti dei rifiuti Ciottoli
Strato drenante	Sabbia o ghiaia Georete o geocomposito
Strato a bassa permeabilità	Argilla compattata Geomembrana Geocomposito bentonitico (GCL)
Strato di captazione del biogas	Sabbia o ghiaia Georete o geotessile Residui da trattamento rifiuti (compost, scorie)

STRATO SUPERFICIALE

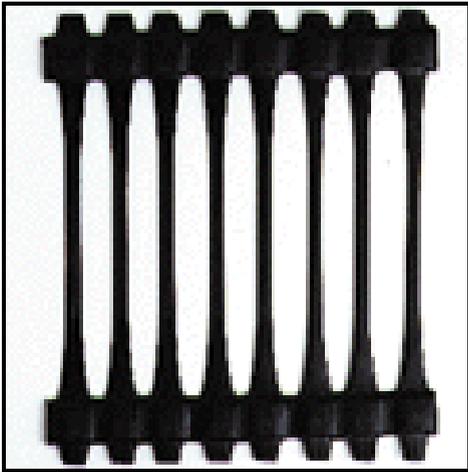
- Spessore da 0,15 a 0,60 m
- Consente la crescita vegetale che: conferisce al sito un aspetto gradevole, minimizza l'erosione eolica, massimizza l'evapotraspirazione, protegge gli strati sottostanti dall'escursione termica, contribuisce alla stabilità delle scarpate
- Materiale maggiormente utilizzato: terreno naturale. Altri materiali: geosintetici o stuoie, ciottoli, materiali di pavimentazione.
- Ciottoli non consentono crescita della vegetazione e permettono l'ingresso di notevoli quantitativi di acqua; materiali di pavimentazione presentano problemi connessi ai fenomeni di assestamento dei rifiuti che potrebbero provocare rotture dello strato.

STRATO PROTETTIVO

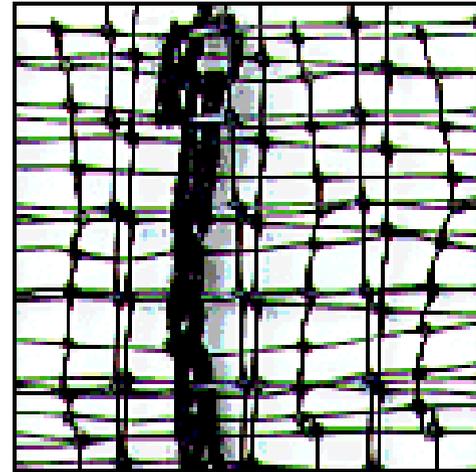
- Realizza una separazione fisica tra i rifiuti e le radici delle piante o gli animali scavatori
- Protegge gli strati sottostanti dai fenomeni di umidificazione-asciugamento o dal gelo



- Tout-Venant: buona capacità di ritenzione idrica
- Residui da trattamento dei rifiuti (scorie da incenerimento e compost): problemi di rilascio per lisciviazione dei contaminanti residui. Compost influenza positivamente il bilancio idrologico e consente l'ossidazione del metano e l'attenuazione delle componenti odorigene.
- Ciottoli accoppiati con geotessili



Geogriglia (rinforzo terreni)



Geostuoie (favorire crescita vegetazione)



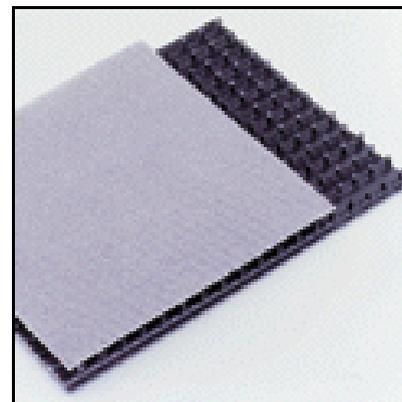
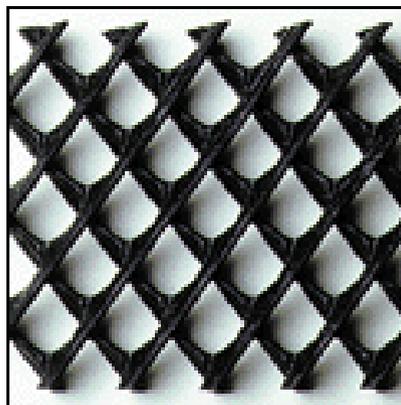
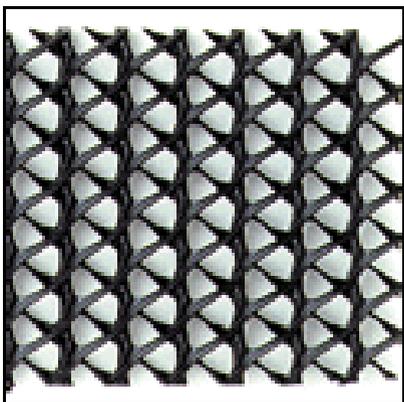
Georeti (funzione drenante)



Geostuoie (favorire crescita vegetazione)

STRATO DRENANTE

- Scopo: allontanare le acque di precipitazione, captate attraverso apposite tubazioni di raccolta
- Necessaria la presenza di un filtro tra strato di dreno e strato protettivo per evitare fenomeni di occlusione
- Materiali utilizzati: sabbia, ghiaia o georete combinate con geotessile filtrante o geocompositi drenanti.
- Permeabilità non inferiore a 10^{-2} cm/s ed una pendenza minima del 2 %
- Le pendenze devono garantire un agevole allontanamento delle acque meteoriche anche dopo il completo assestamento del corpo rifiuti



STRATO A BASSA PERMEABILITÀ

- Scopo: minimizzare l'infiltrazione dell'acqua nella massa dei rifiuti e controllare il movimento ascensionale del biogas
- Materiali: argille compattate, geomembrane e barriere composite (geocompositi bentonitici)
- Uso dell'argilla compattata: spessore di 0,3-0,6 m, con una permeabilità inferiore a 10^{-6} cm/s. Molto utilizzato, ma svantaggi:
 - Compattazione difficoltosa
 - Pericolo di essiccazione e/o gelo con conseguente fessurazione
 - Rotture a causa di cedimenti differenziali
 - Difficilmente riparabile una volta danneggiato
- Geomembrane: fogli di larghezza variabile tra 1.5 m e 10 m di spessore tra i 2 e i 12 mm. Buona resistenza a variazioni di temperatura ed umidità, assecondano in parte i cedimenti dei rifiuti e sono facilmente riparabili. Problemi:
 - Problema di forature
 - Invecchiamento della membrana
 - Potenziale slittamento geomembrana-materiale di copertura

STRATO DI CAPTAZIONE DEL BIOGAS

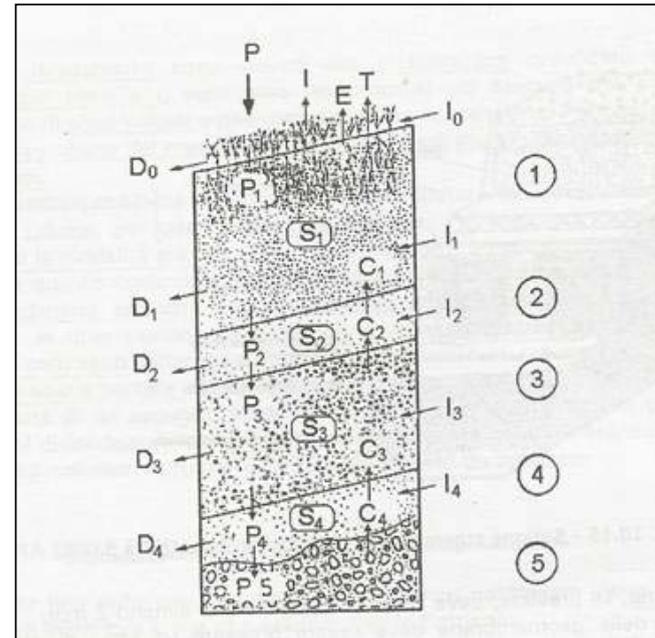
- Scopo: intercettare il gas e indirizzarlo presso apposite tubazioni che lo convogliano all'esterno
- Possibilità di inserire tubazioni forate
- La granulometria normalmente utilizzata è compresa nell'intervallo 16-32 mm con una percentuale di fine (passante al vaglio 200 ASTM) <5%

BILANCIO IDROLOGICO

Flusso percolante
nei rifiuti P_5 :

$$P_5 = P_1 - \sum S_n - \sum D_n + \sum I_n + C_4$$

P_n = percolazione nello strato n-esimo;
 C_n = risalita capillare nello strato n-esimo;
 S_n = acqua trattenuta nello strato n-esimo;
 I_n = infiltrazione laterale nello strato n-esimo;
 D_n = drenaggio laterale nello strato n-esimo;
 P = precipitazione;
 I = intercettazione;
 E = evaporazione;
 T = traspirazione.



EROSIONE: FORMULA DI WISCHMEIER

$$A = R \times K \times LS \times C \times P$$

- A quantità media di suolo in tonnellate erosa annualmente per unità di superficie in ettari
- R potere erosivo della pioggia = $E \cdot I_{30} / 100$, $E = 916 + 313 \log I_{30}$ = energia posseduta dalla pioggia, I_{30} = max intensità di pioggia in 30 minuti (pollici/ora)
- K fattore di erodibilità del suolo, calcolo con diagrammi
- LS funzione della lunghezza e della pendenza della superficie interessata, calcolo con diagrammi
- C dipendente dal tipo di copertura vegetale e dalle tecniche colturali, tabellato
- P dipendente dall'utilizzo di accorgimenti per evitare il ruscellamento ($P = 1$, senza accorgimenti; $P < 1$ con l'utilizzo di accorgimenti antierosione)

SLITTAMENTO

Problema di slittamento tra i materiali costituenti la copertura: legato all'angolo di attrito, equilibrio solo per angoli di scarpata minori dell'angolo di attrito => conseguente necessità di ancorare i teli

MATERIALE	ANGOLO D'ATTRITO
geomembrana liscia in HDPE- terreno non coerente	17-18°
geomembrana liscia in HDPE- terreno coerente	15-26°
geomembrana liscia in HDPE- geotessile	6-11°
geomembrana ruvida in HDPE- geotessile	24-35°

FORZA ESERCITATA SU UN GEOTESSILE DAL TERRENO DI COPERTURA SATURO

$$\begin{cases} F = W \cdot \sin \beta - \operatorname{tg} \varphi \cdot W \cdot \cos \beta \\ W = L \cdot H \cdot \gamma \\ F = L \cdot H \cdot \gamma \cdot (\sin \beta - \operatorname{tg} \varphi \cdot \cos \beta) \end{cases}$$

DOVE

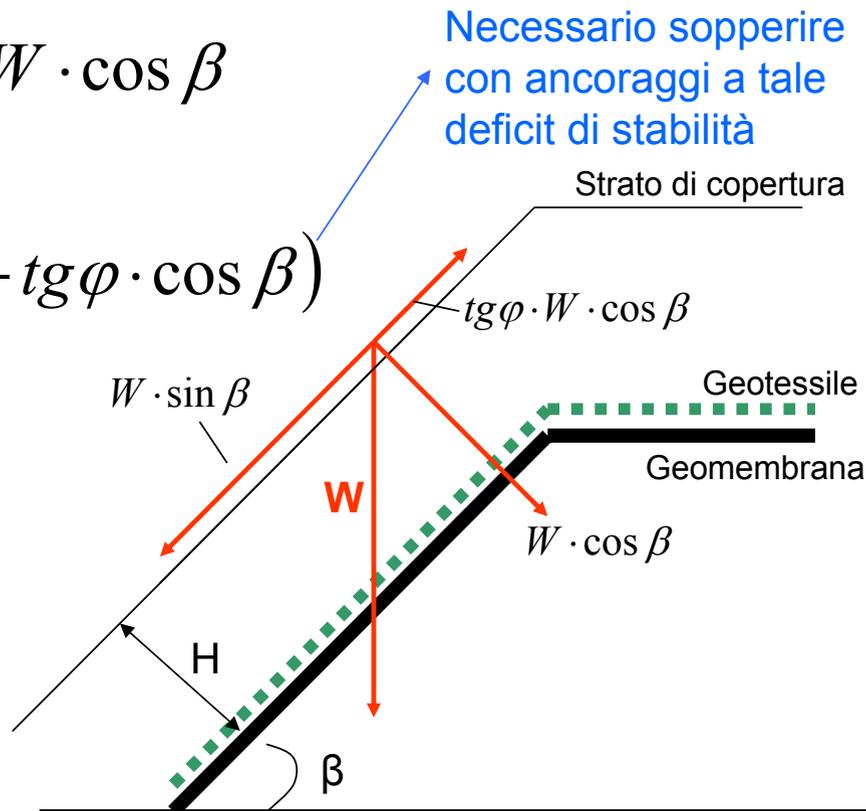
W = peso per unità di larghezza
del suolo sul geotessile

H = spessore del terreno

L = lunghezza della scarpata

φ = angolo di attrito terreno-
geotessile

γ = peso specifico terreno



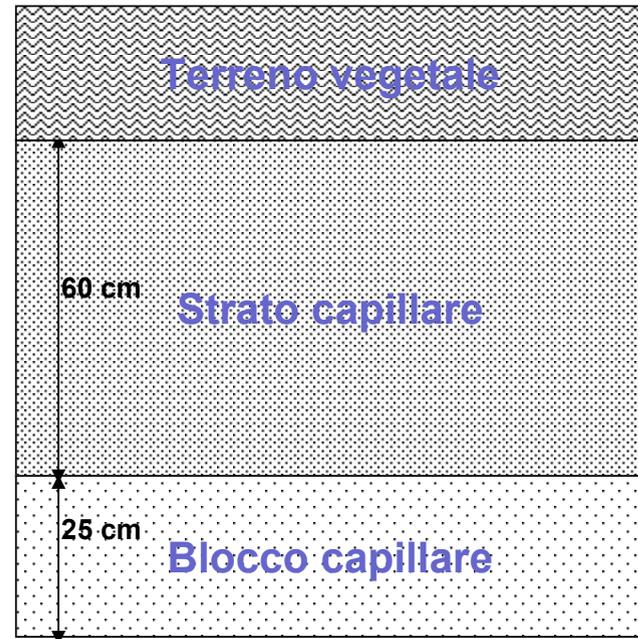
2. BARRIERE CAPILLARI

Principale tipologia di sistema alternativo per la copertura delle discariche, tipico esempio di copertura semistagna

BARRIERA CAPILLARE = strato di sabbia di granulometria media (strato capillare) sovrapposta ad uno strato di ghiaia fine (blocco capillare)

FUNZIONAMENTO

In condizioni di non saturazione, la differenza di granulometria tra strato capillare e blocco capillare fa sì che all'interfaccia sorgano delle forze in grado di trattenere l'acqua nello strato capillare che si satura, mentre la ghiaia sottostante rimane asciutta. La trasmissività orizzontale della sabbia risulta così molto maggiore di quella verticale così che l'acqua scorre all'interno dello strato capillare parallelamente all'interfaccia. Qualora il battente idrico risulti consistente, le forze capillari non sono più in grado di trattenere l'acqua che penetra quindi nella massa dei rifiuti.



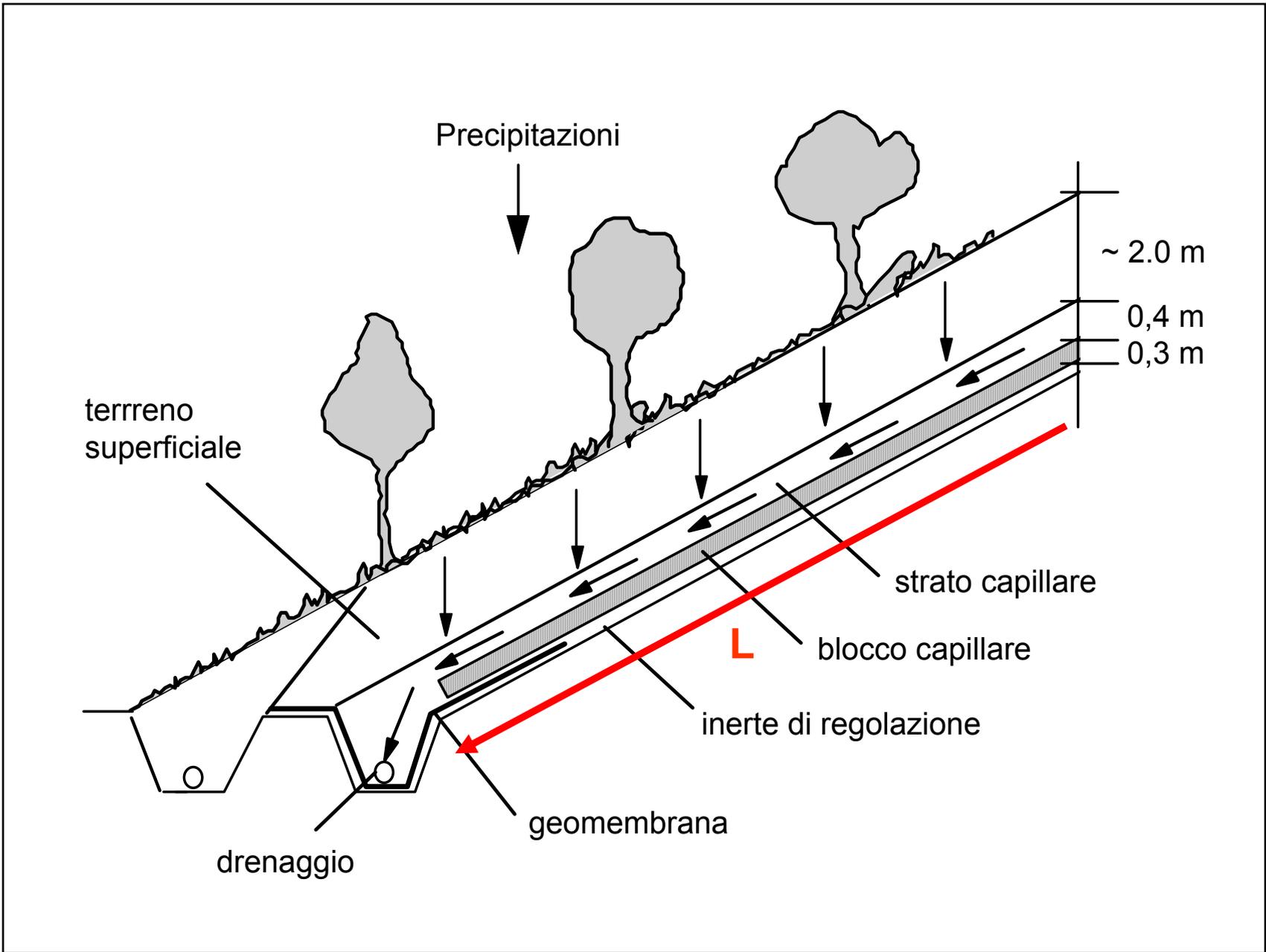
VANTAGGI

- Costo inferiore rispetto ai sistemi tradizionali;
- Maggiore adattamento agli assestamenti della massa dei rifiuti;
- Possibilità di essere utilizzate su superfici a pendenza elevata;
- Facilità ed economicità di manutenzione;
- Capacità di mantenere l'efficienza nel lungo termine;
- Minore sensibilità alle condizioni atmosferiche;
- Funzionamento selettivo, cioè non sono barriere totali: favorita degradazione biologica.

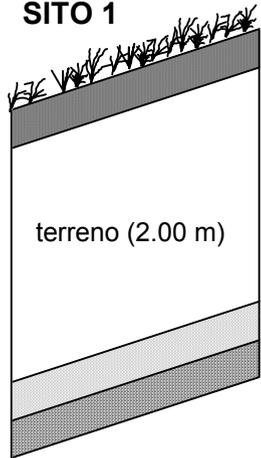
MODALITA' REALIZZATIVE

Deve essere garantita la differenza granulometrica che permette l'instaurarsi dell'effetto barriera, ma non deve essere tale da consentire la compenetrazione tra i due strati

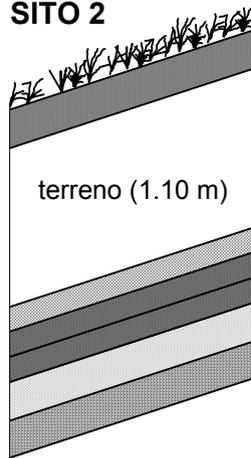
- Strato capillare: sabbie fini (0-1 mm) – spessore 0,6-0,3 m
- Blocco capillare: ghiaie fini o sabbie grossolane (0,7-2 mm, al max 3,2 mm) – spessore 0,3-0,15 m
- Pendenza: 5-15 °, preferibile pendenze maggiori in vista degli assestamenti della massa dei rifiuti



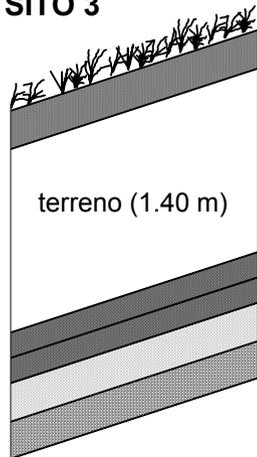
SITO 1



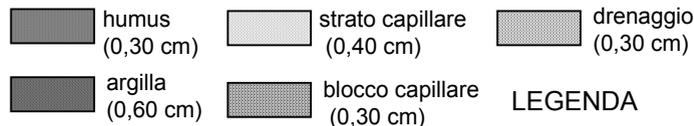
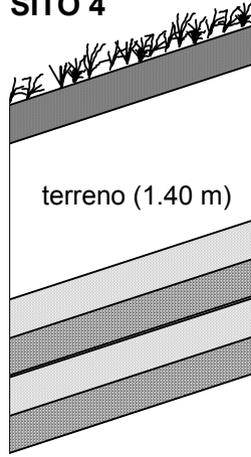
SITO 2



SITO 3



SITO 4



EFFICIENZA

- Sperimentazione con campi prova in Germania
- Migliore prestazione della barriera capillare nelle soluzioni b) e c)
- Doppia barriera capillare: risultati meno soddisfacenti
- In considerazione della sua economicità il miglior sistema è la barriera capillare semplice

PROBLEMI

Perdita di efficienza nel periodo estivo:
giustificabile sulla base di due fenomeni
attualmente allo studio.

1. Diminuzione di viscosità dell'acqua che favorisce la permeazione;
2. D'estate si ha un flusso di vapore acqueo dall'esterno della discarica, più caldo, verso l'interno, più freddo; viceversa durante l'inverno.

UTILIZZO DEL COMPOST COME MATERIALE DI COPERTURA

- L'utilizzo del compost influenza la quantità e qualità della emissione superficiale di biogas ed il bilancio idrologico;
- Riduzione del 90% delle emissioni di metano e del 45% delle emissioni di biogas
- Buona capacità di ritenzione idrica che limita significativamente l'infiltrazione di acque meteoriche nel corpo discarica

CONCENTRAZIONE DI METANO OSSIDABILE

Calcolo del coefficiente di ossidazione:

$$K_0 = k_0 \cdot d_a \cdot \rho_b$$

dove

K_0 = coefficiente di ossidazione integrato sulla profondità [g CH₄/m² giorno]

k_0 = tasso di degradazione di ordine zero [μg CH₄/(g terreno) giorno]

d_a = zona attiva (o zona di penetrazione dell'ossigeno) [m]

ρ_b = densità del suolo [t/m³].

Per poter applicare questa teoria si assume il terreno intergranulare, il flusso di biogas omogeneo e presenza di ossigeno nello strato attivo. In queste condizioni la concentrazione massima di metano ossidabile è data dal rapporto tra il coefficiente di ossidazione integrato sulla profondità, K_0 , e il flusso di biogas in uscita,

J_{LFG} :

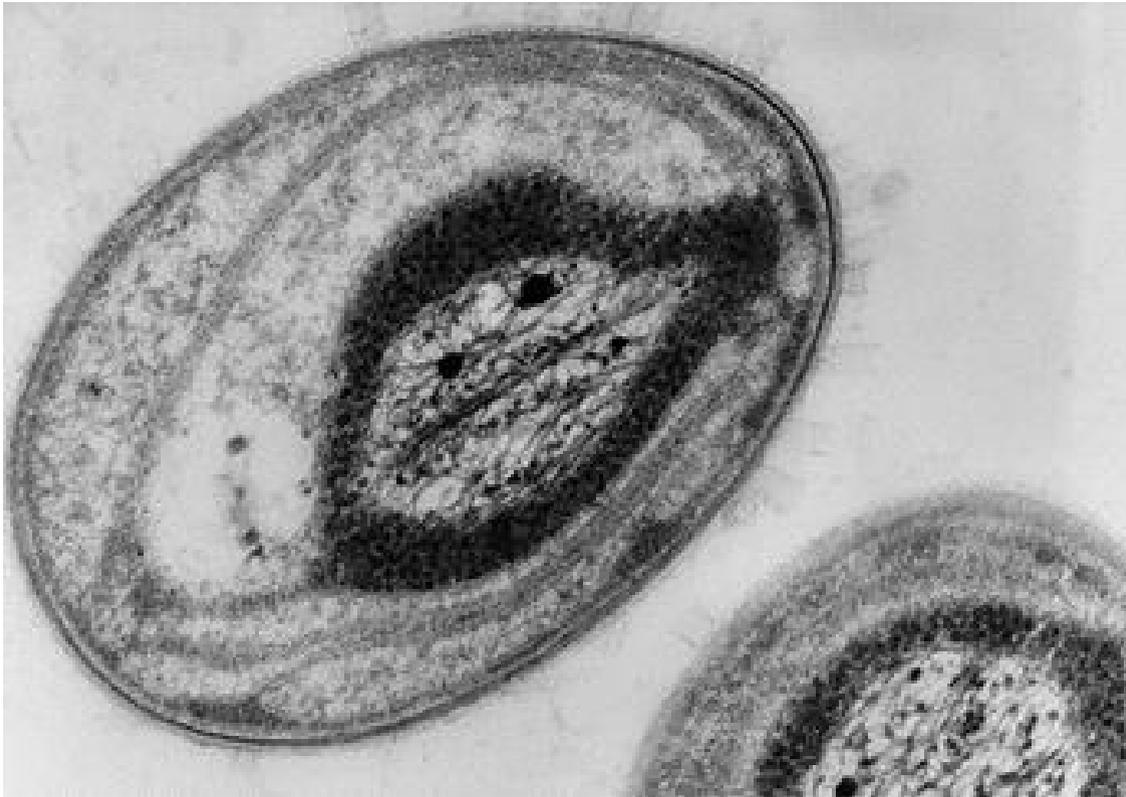
$$C_{\max} = \frac{K_0}{J_{LFG}}$$

dove C_{\max} massima concentrazione di metano ossidabile [g CH₄/m³]

K_0 coefficiente di ossidazione integrato sulla profondità [g CH₄/m² giorno]

J_{LFG} flusso di biogas [m³/m² giorno]

BATTERI METANOTROFICI



Batteri metanotrofici isolati dai sedimenti di Green Bay (Wisconsin, USA).

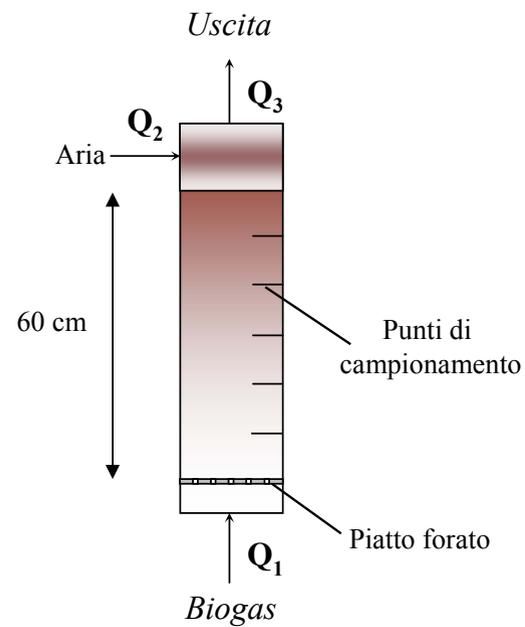
K_0 per terreni di copertura naturali

Fonte	K_0 (mg $CH_4/m^2 h$)	Terreno	Commenti
Keller et al. (1990)	0,8	Tropicale	
Yavitt et al. (1990)	0,04 - 0,08	Foresta	
Whalem et al. (1992)	<0,083	Foresta	
Ambus e Christensen (1995)	2,25 $\cdot 10^{-3}$ 9 $\cdot 10^{-3}$	Coltivato Non coltivato	
Boeckx et al. (1997)	0,016 0,012 0,008	Foresta Arabile Prato	Volume camp. 454 cm ³ , temperatura 25 °C, valori medi
Hutsch et al. (1997)	0,12 0,93 $\cdot 10^{-3}$ 4,68 $\cdot 10^{-3}$ - 0,0105	Foresta Arato Non arato	Volume camp. 372 cm ³ , temperatura 25 °C, valori massimi
Willison et al. (1997)	0,03 0,2	Arabile Prato, bosco	Volume camp. 386 cm ³ , temperatura 13 °C, valori medi
Boeckx et al. (1997)	0,016 0,012 0,008	Foresta Arabile Prato	Volume camp. 454 cm ³ , temperatura 25 °C, valori medi
Boeckx et al. (1998)	0,031 0,008 - 0,013 0,01 - 0,019	Foresta Arabile Prato	Volume camp. 454 cm ³ , temperatura variabile, valori massimi

K_0 per terreni di copertura delle discariche

Fonte	K_0 (g $CH_4/m^2 h$)	Commenti
Mennerich (1986)	8,7 - 30,6	Biofiltro alto 85 cm
Whalem et al. (1990)	1,9	Terreno di copertura discarica chiusa, camp. alto 12 cm, vol. camp. 423 cm ³
Bogner et al. (1997)	8,3 $\cdot 10^{-6}$ - 6,91	
Borjesson e Svensson (1997)	1,9 - 6,3 (sabbia) 0,14 - 8,7 (sabbia - marna) 1,6 - 16,8 (fanghi)	Vari tipi di copertura
Kjeldsen et al. (1997)	1,33 - 5,33	Terreno di densità 1,6 t/m ³ passato al setaccio (2 mm), volume camp. 117 ml, miscela: CH ₄ 20%; O ₂ 40%; N ₂ 40%.
Humer and Leckner (2001)	5,7-18 0.1 – 7.2 2,9- 3,6	Compost RSU Compost fanghi Terreno copertura
Cossu (2001)	5,3 – 7,5	Terreno copertura

L'IMPIANTO PILOTA



T = 30 °C

Velocità di ossidazione ($\text{gCH}_4 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$)

<i>Materiale</i>	<i>Velocità minima</i>	<i>Velocità massima</i>	<i>Velocità media</i>
Compost biostabilizzato da discarica	6,9	17,4	10,3
Ammendante compostato verde	5,7	13,7	9,5
Ammendante compostato misto fine	1,2	8,1	3,6
Ammendante compostato grossolano	2,7	14,3	8,8
Terreno copertura discariche	4,1	8,9	6,7

Membrana di carbone attivo

**Membrana di
carbone attivo**

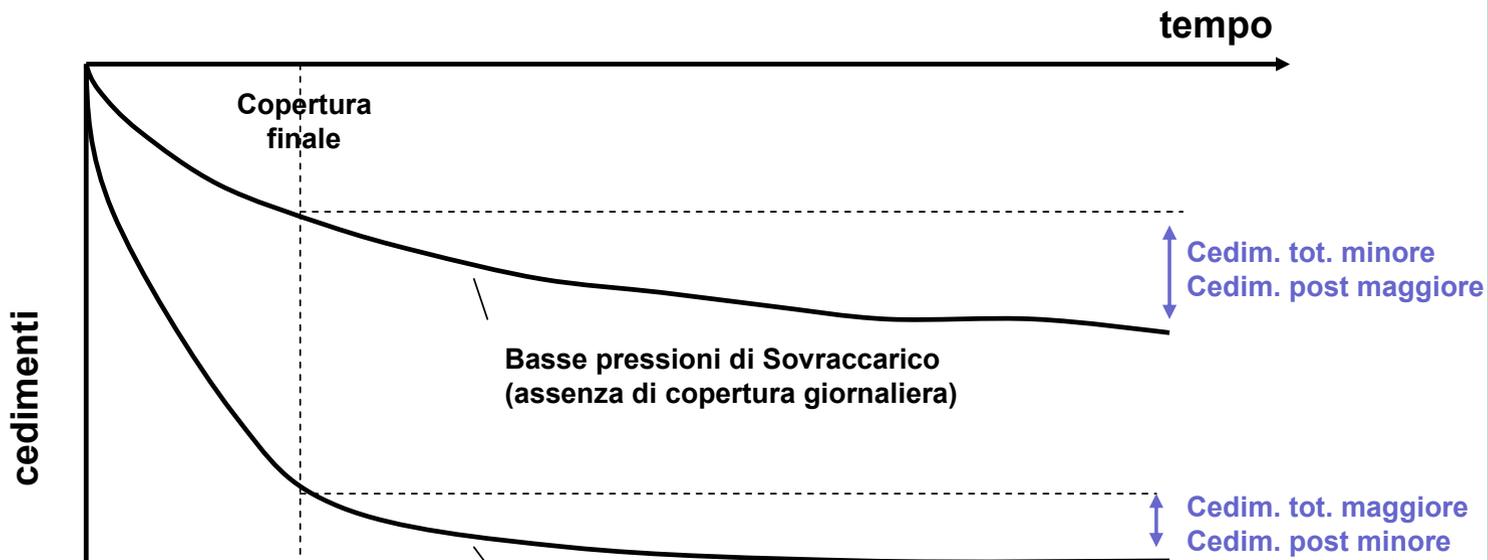


Un sistema di copertura costituito da uno strato di compost di 60 cm accoppiato con una membrana in carbone attivo può consentire la completa ossidazione del metano e l'adsorbimento dei principali composti odoriferi presenti in tracce nel biogas considerando un carico di metano di $5 \text{ l}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$. Questo valore può essere considerato caratteristico di vecchie discariche o di nuove discariche per RSU pretrattati

COPERTURA GIORNALIERA

- Utilizzata per evitare lo svolazzamento di rifiuti leggeri e l'intromissione di animali randagi;
- Utilizzo di materiali a media permeabilità (sabbia) allo scopo di evitare la formazione di sacche isolate idraulicamente nelle quali si accumulano percolato e biogas => utilizzo compost

CEDIMENTI



Alte pressioni di sovraccarico

Il fenomeno di migrazione delle particelle granulari del terreno di copertura verso i vuoti dei rifiuti riduce la percentuale del volume occupato in discarica dal terreno di copertura da un valore medio iniziale di circa 20% al 5%.

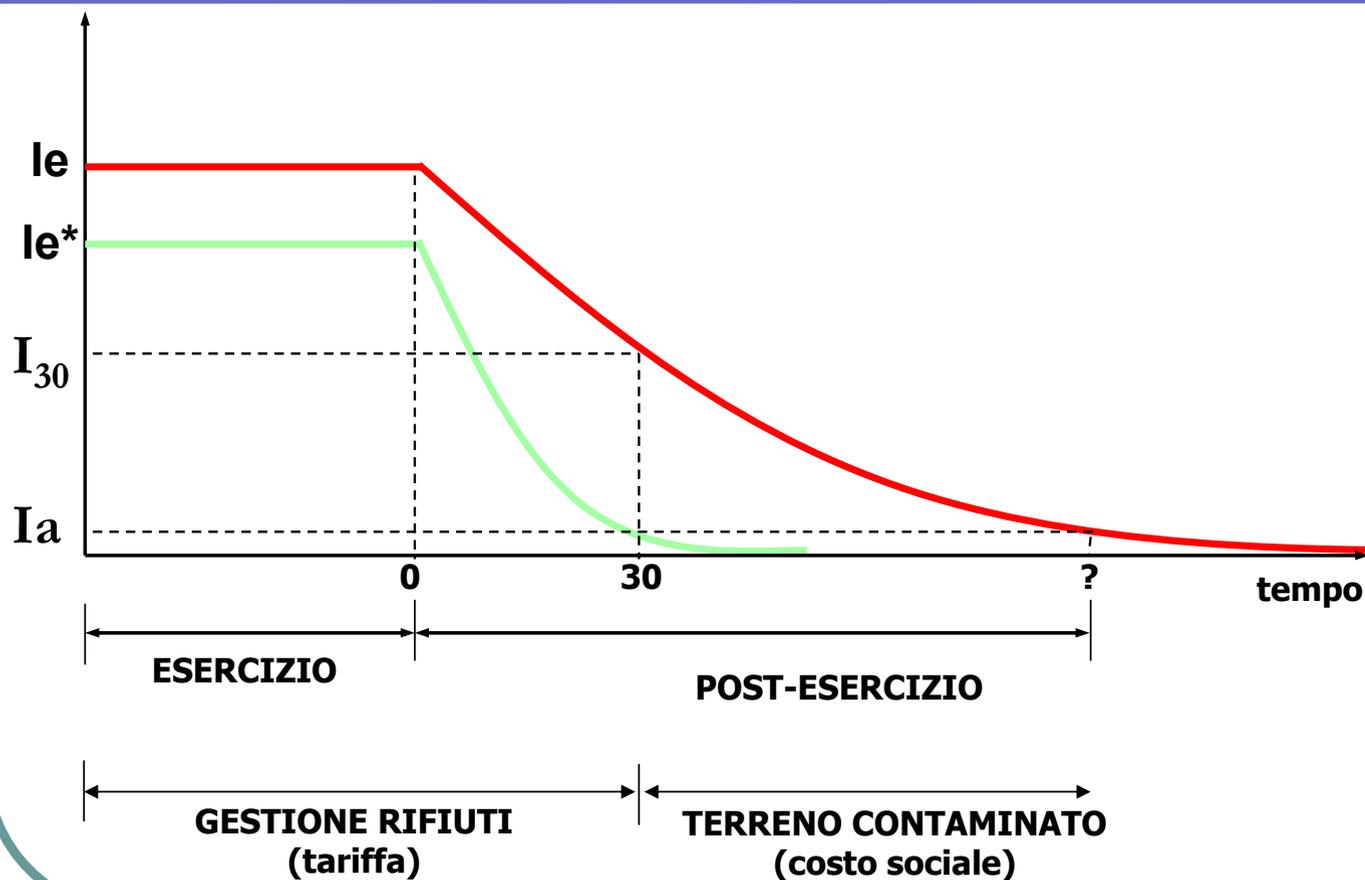
NORMATIVA

- *D.C.I. 27/7/1984 ai sensi dell' art.4 del D.P.R. 915/82:*
nessuna indicazione su materiali e spessori, per tutte le discariche ad eccezione delle 2A prevista una impermeabilizzazione di spessore opportuno e solo per le 2C richiesto uno spessore ≥ 1.0 m;
- *D.Lgs. 36/2003:*

DISCARICHE*	Rifiuti inerti	Rifiuti non pericolosi	Rifiuti pericolosi
STRATO REGOLARIZZAZIONE	previsto	previsto	previsto
DRENAGGIO GAS	-	spessore $\geq 0,5$ m	spessore $\geq 0,5$ m
RIVESTIMENTO IMPERMEABILE ARTIFICIALE	-	-	previsto
STRATO MINERALE IMPERMEABILE	spessore $\geq 0,5$ m bassa permeabilità	spessore $\geq 0,5$ m $K \leq 10^{-8}$ m/s	spessore $\geq 0,5$ m $K \leq 10^{-8}$ m/s
STRATO DI DRENAGGIO	spessore $\geq 0,5$ m	spessore $\geq 0,5$ m	spessore $\geq 0,5$ m
COPERTURA SUPERFICIALE	spessore ≥ 1 m	spessore ≥ 1 m	spessore ≥ 1 m

*Non è contemplato l'uso di coperture alternative in sostituzione dei materiali naturali

L'IMPATTO DI LUNGO PERIODO



NUOVI CONCETTI DI DISCARICA

- *Flushing* della discarica: allo scopo di aumentare il grado di umidità dei rifiuti e quindi di accelerare i processi di degradazione. Il D.Lgs. 36/2003 permette solo il ricircolo del concentrato. In nessun punto compare il divieto al ricircolo del percolato, ma si impone chiaramente che il battente sia mantenuto il più basso possibile.
(BARRIERA A VALVOLA APERTA)
- *Discarica semiaerobica\ aerobica*: si assicurano condizioni aerobiche all'interno della massa dei rifiuti mediante aerazione naturale o forzata allo scopo di accelerare i processi di degradazione e impedire che si instaurino condizioni aerobiche, evitando così che si produca metano

RISCHIO

	Rischio da flusso incontrollato di percolato		Rischio da flusso incontrollato di biogas	
	Breve periodo 0-30 anni	Lungo periodo > 30 anni	Breve periodo 0-30 anni	Lungo periodo > 30 anni
Copertura tradizionale	medio	elevato	medio	basso
Barriera capillare	medio	elevato	medio	basso
Barriera aperta	elevato	basso	basso	basso