

Dip.to DISTART - Università di Bologna



Tecniche di Alleggerimento del Solido Stradale

Prof. Ing. Giulio Dondi

**LA PROGETTAZIONE DI RILEVATI SU TERRENI
COMPRESSIBILI E DI SCARSE CAPACITÀ PORTANTI È
GENERALMENTE PROBLEMÁTICA:**

- ➔ ELEVATI CEDIMENTI ASSOLUTI
E DIFFERENZIALI**
- ➔ PROBLEMI DI STABILITÀ GLOBALE**

**LE TECNICHE TRADIZIONALI, PER RISOLVERE QUESTI
PROBLEMI, PREVEDONO DI MIGLIORARE LA PORTANZA
DEL TERRENO DI SOTTOFONDO:**

- Consolidamento con precarico e dreni verticali
- Bonifica

**TALI TECNICHE RISULTANO SPESSO MOLTO
ONEROSE, IN TERMINI SIA DI TEMPO SIA DI DENARO.**

LE TECNICHE INNOVATIVE AGISCONO DIRETTAMENTE SULLA CAUSA DEI CEDIMENTI, E PREVEDONO

L'ALLEGGERIMENTO DEL CORPO DEL RILEVATO

UTILIZZANDO, AL POSTO DEI TRADIZIONALI *EARTH-MATERIALS*, SIA MATERIALI PRODOTTI AD HOC, SIA MATERIALI DI RICICLO.

IN QUESTO MODO SI PUÒ PROGETTARE UTILIZZANDO LA

TECNICA DI COMPENSAZIONE DEL CARICO

CHE PERMETTE DI COSTRUIRE IL RILEVATO SENZA AUMENTARE (O AUMENTANDO IN MODO NON SIGNIFICATIVO) I CARICHI SUL TERRENO, MANTENENDO INVARIATO LO STATO TENSIONALE ORIGINALE.

VANTAGGI

- Notevole riduzione dei cedimenti assoluti e differenziali, sia a breve termine sia a lungo termine.
- Incremento del coefficiente di sicurezza con riferimento allo stato limite ultimo del rilevato.
- Riduzione dei tempi di realizzazione del rilevato.
- Riduzione dello sfruttamento degli alvei fluviali.
- Riciclaggio di materiali il cui smaltimento risulta oneroso e/o difficoltoso.

Nei Paesi del Nord Europa, caratterizzati da terreni di modestissime capacità portanti e molto cedevoli, la tecnica dei materiali leggeri viene utilizzata ormai da alcuni decenni, in campo stradale e ferroviario.

TECNICHE IMPIEGATE

- EPS (*Expanded Poly Stirene*)
- Argilla Espansa (*Expanded Clay*)
- Fibre di Legno (*Wood Fibre*)
- Cenere Volante (*Fly Ash*)
- Frammenti di Pneumatici (*Shredded Tires*)
- Materiali di Scarto Industriale
- Condotte in Acciaio Ondulato e Zincato

EPS (POLISTIRENE ESPANSO SINTERIZZATO)

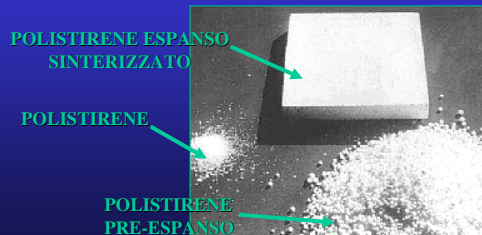
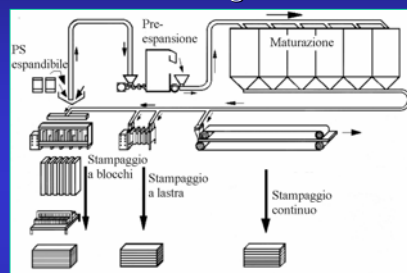
Il polistirene è una resina termoplastica ottenuta per polimerizzazione dello stirene monomero, ricavato a sua volta dalla sintesi di etilene e benzene.

È fornito sotto forma di perle dall'aspetto vetroso e di varia granulometria.

Tecnologia di produzione dell'EPS:

1. Pre-espansione delle perle con vapore a $T > 90\text{ }^{\circ}\text{C}$, in modo da aumentarne il volume fino a 20-50 volte.
2. Maturazione in silii arieggiati
3. Stampaggio in blocchi, lastre o strutture continue.

In questa fase le perle, portate ad una $T > 110\text{ }^{\circ}\text{C}$ in ambiente saturo, si espandono ulteriormente e, per effetto della pressione, si saldano fra di loro (Processo di Sinterizzazione)



EPS (POLISTIRENE ESPANSO SINTERIZZATO)

Caratteristiche Fisiche

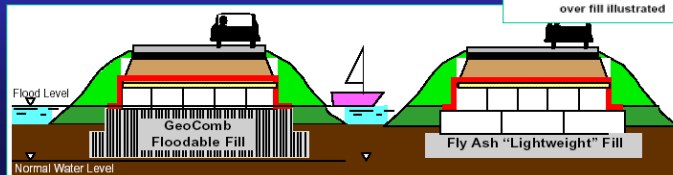
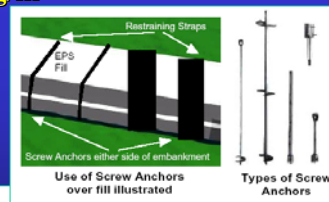
- Fornitura in Blocchi Standard di Dimensioni 2×1×0.5 m e 3×1×0.5 m
- Peso Specifico: $\gamma = 10 \div 120 \text{ kg/m}^3$

È IL PARAMETRO CHE MAGGIORMENTE INFLUENZA LE CARATTERISTICHE MECCANICHE E FUNZIONALI.

Per la formazione di rilevati stradali di notevole altezza si utilizzano blocchi con $\gamma = 20 \div 25 \text{ kg/m}^3$

Problema del GALLEGGIAMENTO:

- Ancoraggi di fondazione elicoidali
- Sostituzione parziale dell'EPS con materiali più pesanti (cenere volante, GeoComb)

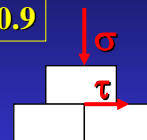


EPS (POLISTIRENE ESPANSO SINTERIZZATO)

Caratteristiche Fisiche

- Coefficiente d'Attrito d'Interfaccia: $\mu = \text{tg}\phi = 0.6 \div 0.9$

$$\text{tg}\phi = \frac{\text{tensione di attrito resistente } \tau}{\text{tensione normale applicata } \sigma}$$

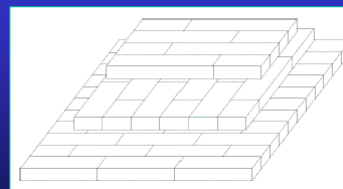


A fini progettuali si considera:

- $\mu = 0.7$ fra i blocchi di EPS
- $\mu = 1.0$ fra blocchi di EPS e calcestruzzo

Per migliorare la resistenza d'interfaccia in opera:

- Disposizione a giunti sfalsati
- Applicazione di piatti d'unione dentati (*grippers*)



EPS (POLISTIRENE ESPANSO SINTERIZZATO)

Caratteristiche Fisiche

• **Infiammabilità: OI = 18%**

Indice di Ossigeno (Oxygen Index, OI) ➡ percentuale minima di ossigeno necessaria per mantenere una combustione continua.

L'aria ha OI \cong 21% ➡ tutti i materiali con OI < 21% , fra cui l'EPS, sono intimamente infiammabili.

È necessaria quindi un'accensione iniziale affinché l'EPS bruci liberamente in aria fino a totale estinzione.

Per aumentare i valori di OI ➡ In fase di produzione si incorpora una sostanza inorganica contenente bromo, ritardante di fiamma. I costi aumentano del 10%.



• **Resistenza alle Alte e alle Basse Temperature:**

Temperature massime sopportabili dipendono da ➡ • Durata della sollecitazione
• Intensità
Per breve tempo e senza sollecitazioni 95 ÷ 100 °C
Sotto carico 70 ÷ 80 °C

Temperature minime

Il polistirene non subisce transizioni di fase ➡ caratteristiche meccaniche invariate fino a -70 ÷ -100 °C

EPS (POLISTIRENE ESPANSO SINTERIZZATO)

Caratteristiche Fisiche

• **Assorbimento di Acqua:**

Il comportamento a fronte dell'acqua non dà adito limitazioni per gli impieghi edilizi e per l'isolamento termico.

L'acqua non scioglie l'EPS, né attraversa le pareti delle celle chiuse e può quindi venire assorbita solo negli interstizi residui fra le perle espanse.

Assorbimento per Immersione ➡ Indice di buona saldatura fra le perle espanse

Si effettua su cubetti di 50 mm di lato.

Valori massimi dopo un anno di immersione ➡ 3% in volume per EPS 30
5% in volume per EPS 10

Questi valori vengono raggiunti in poche settimane e poi restano costanti.

Assorbimento per Capillarità ➡ Praticamente nullo

Assorbimento dell'Aria Umida ➡ 0.7% in peso per EPS 20, a contatto per 90 giorni con aria ad U.R. 95%

EPS (POLISTIRENE ESPANSO SINTERIZZATO)

Caratteristiche Fisiche

• **Resistenza agli Agenti Chimici e Biologici:**

L'EPS durante la messa in opera e in esercizio non presenta alcun pericolo per la salute. Non costituisce nutrimento per alcun essere vivente e non è attaccabile dai batteri del suolo, quindi non marcisce né ammuffisce.

Per la sua stabilità chimica e biologica non intacca le falde acquifere, può essere depositato nelle discariche e non rilascia sostanze nocive durante la combustione nei forni di incenerimento.

Sostanze inerti per l'EPS:

- Sali, soluzioni saline e antifego
- Materiali da costruzione (calce, gesso, cemento, etc.)
- Soluzioni alcaline (ammoniaca, candeggianti, acqua ossigenata e concimi liquidi)
- Alcol, acidi concentrati (cloridrico 35%, nitrico 50%, solforico 95%), detersivi per la pulizia del piano viabile
- Bitumi e masse bituminose a base acquosa, oli siliconici

Sostanze che attaccano l'EPS:

- Benzina e vapori di benzina
- Bitume e masse bituminose con solventi
- Catrame e derivati
- Gasolio, oli combustibili, paraffina, vaselina
- Esteri, eteri, chetoni, idrocarburi aromatici e composti organici alogenati
- Ragia minerale, ammidi, nitrili, trementina

EPS (POLISTIRENE ESPANSO SINTERIZZATO)

Caratteristiche Fisiche

• **Durabilità:**

Resistenza all'**INVECCHIAMENTO**, ovvero il peggioramento delle caratteristiche del materiale nel corso del tempo.

CAUSE → INTERNE (tensioni, transizioni strutturali etc.)

→ ESTERNE (sollecitazioni, condizioni di impiego)

- **Agenti atmosferici e sollecitazioni meccaniche non alterano le prestazioni dell'EPS nel tempo.**

Ciò è dimostrato da 30 anni di esperienza applicativa.

La migliore assicurazione del permanere nel tempo delle prestazioni è l'impiego di materiale a norma.

- **Esposizione ai raggi UV** → Deterioramento della superficie (ingiallimento ed infragilimento)



Diminuzione dell'attrito d'interfaccia

È quindi necessario ricoprire i blocchi in fase di stoccaggio

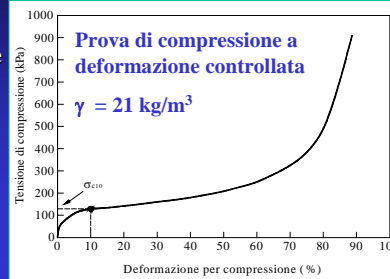
EPS (POLISTIRENE ESPANSO SINTERIZZATO)

Caratteristiche Meccaniche

• Resistenza alla Compressione:

- Il rapporto fra la sollecitazione di compressione e la deformazione ha andamento lineare fino al 3% di deformazione.

Oltre tale limite il materiale presenta una deformazione permanente progressiva fino a tornare allo stato di polistirene solido, con progressivo **indurimento** al crescere della tensione, senza però arrivare ad una vera e propria rottura.



- Una convenzione europea indica una **deformazione del 10%** come **limite** oltre il quale è bene non andare con sollecitazioni di **breve durata**.

$$\sigma_{c10} = 100 \div 300 \text{ kN/m}^2$$

- L'EPS, essendo un materiale plastico, presenta il **fenomeno di creep**, modificazione delle prestazioni in caso di sollecitazione permanente.

- È consigliabile non superare un livello di **deformazione del 2 ÷ 3%** con sollecitazioni di **lunga durata**.

$$\sigma_c = 28 \div 50 \text{ kN/m}^2$$

EPS (POLISTIRENE ESPANSO SINTERIZZATO)

Caratteristiche Meccaniche

- Modulo elastico a Compressione:** $E_{Tci} = 4 \div 11 \text{ MPa}$

Convenzionalmente si indica il valore del modulo tangente iniziale nella curva σ - ε

- Resistenza al Taglio:** $\tau = 90 \div 250 \text{ kN/m}^2$

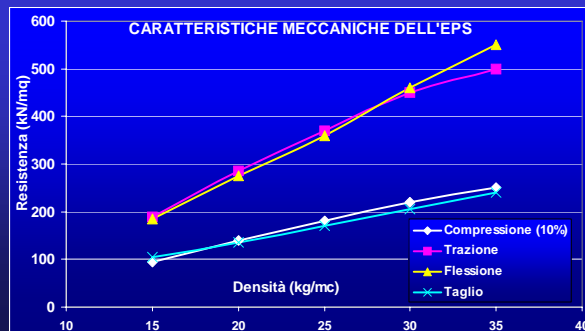
- Resistenza a Trazione:** $\sigma_n = 150 \div 600 \text{ kN/m}^2$

I test di trazione si eseguono raramente: esistono **test a flessione** più semplici da realizzare che danno gli stessi risultati.

IL MODULO ELASTICO E LE RESISTENZE AUMENTANO CON LA DENSITÀ

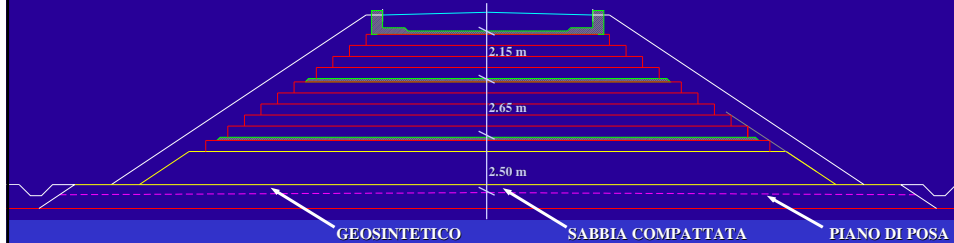
EPS 25:

- $\sigma_{c1} = 70 \text{ kN/m}^2$
- $\sigma_{c5} = 140 \text{ kN/m}^2$
- $\sigma_{c10} = 160 \div 200 \text{ kN/m}^2$
- $E_{Tci} = 5.90 \div 7.20 \text{ MPa}$
- $\sigma_n = 320 \div 410 \text{ kN/m}^2$
- $\sigma_{flex} = 320 \div 400 \text{ kN/m}^2$
- $\tau = 150 \div 190 \text{ kN/m}^2$



EPS (POLISTIRENE ESPANSO SINTERIZZATO)

Considerazioni Costruttive

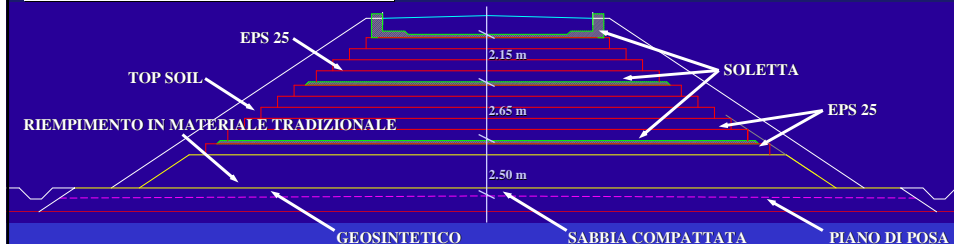


1. Preparazione del terreno

- Scotico
- Livellamento e compattazione del piano di posa
Nel caso di scavo particolarmente profondo predisporre sistemi di drenaggio per l'acqua piovana.
- Stesa di uno strato di sabbia compattata con funzione anticapillare (35 ÷ 45 cm)
- Stesa di un geosintetico non tessuto con funzione anticontaminante

EPS (POLISTIRENE ESPANSO SINTERIZZATO)

Considerazioni Costruttive



2. Realizzazione del corpo del rilevato

- Costruzione della prima parte del rilevato per un'altezza di 1.50 m.
- Posa dei blocchi EPS a giunti sfalsati e in modo da lasciare fessure < 10 mm.
- Rivestimento degli strati di EPS con un geosintetico.
- Getto di una soletta in cls di ripartizione e irrigidimento (15 cm).
- Posa di altre due serie di strati di EPS intercalati da un'altra soletta e rivestiti con un geosintetico.
I blocchi sono ancorati fra loro con *grippers*. Il primo strato e l'ultimo sono collegati da ancoraggi verticali realizzati con barre in acciaio.
- Getto dell'ultima soletta che risvolta lateralmente in due cordoli (h = 85 cm) dimensionati per sopportare le azioni sulle barriere di sicurezza
- Ricoprimento laterale con *top-soil*.

EPS (POLISTIRENE ESPANSO SINTERIZZATO)

Particolari Costruttivi



Messa in opera dei blocchi



Ancoraggio con grippers



Ricoprimento con geosintetico



Soletta e ancoraggi verticali



Ricoprimento con top soil

Costo comprensivo di fornitura e messa in opera: 70 Euro/m³

ARGILLA ESPANSA

È un inerte ottenuto da argille naturali sottoposta ad un trattamento termico in forni rotanti a 1200 °C (*Processo di Clinkerizzazione*).

Il singolo grano è costituito da una struttura porosa interna racchiusa da una scorza dura, resistente e chimicamente inerte.

Costa 25 ÷ 30 Euro/m³



Caratteristiche Fisiche

- Peso Specifico:**

Circa ¼ di quello della sabbia

- Problema del GALLEGGIAMENTO**

MATERIALE	ARGILLA ESPANSA (kN/m ³)	SABBIA (kN/m ³)
Peso specifico assoluto	<25	~26
Peso specifico apparente	<8.5	~26
Peso specifico in mucchio	<4.5	~16

Il peso specifico aumenta compattando il materiale e nel caso di assorbimento d'acqua



Peso Specifico di Progetto
 $\gamma = 6 \div 7.5 \text{ kN/m}^3$

- Durabilità:**

Agenti atmosferici e sollecitazioni meccaniche non alterano le prestazioni nel tempo. Evitare il contatto diretto con calcestruzzo e metalli.

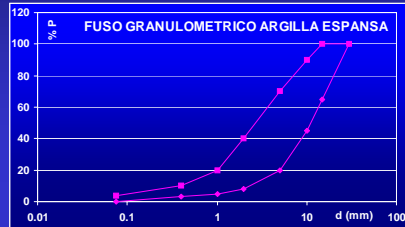
ARGILLA ESPANSA

Caratteristiche Fisiche

Granulometria:

La miscela utilizzata in campo geotecnico è la 0 ÷ 30 mm

Il peso specifico aumenta con la percentuale di fine che eventualmente può essere ridotta mediante setacciatura.



CRIVELLI (mm)	% P
30	100
15	65-100
10	45-90
5	20-70
2	8-40
1	5-20
0.4	3-10
0.075	0-4

Requisiti di accettazione della miscela 0 ÷ 30 mm

ANGOLO D'ATTRITO (valore indicativo)	40°
MASSA VOLUMICA SECCA IN MUCCHIO – UNI 7549/4	< 4.5 kN/m ³
MASSA VOLUMICA MASSIMA – ASTM D 4253	< 5.5 kN/m ³
MASSA VOLUMICA MEDIA DEI GRANULI – UNI 75495	< 8.5 kN/m ³
MASSA VOLUMICA ASSOLUTA	< 25 kN/m ³
COEFFICIENTE DI IMBIBIZIONE – UNI 75496	< 75%
RESISTENZA ALLO SCHIACCIAMENTO DEI GRANULI – UNI 75497	> 1300 kN/m ²

Pesi specifici di progetto consigliati per miscela 0 ÷ 30 mm addensata

SECCA	5.7 kN/m ³
SOPRAFALDA	7 kN/m ³
IN ZONA ALLAGABILE	8.5 kN/m ³
COSTANTEMENTE IMMERSA	11.5 kN/m ³

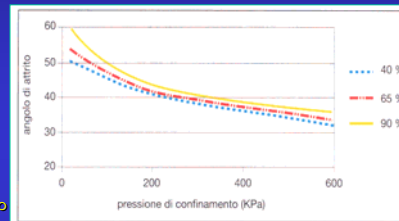
ARGILLA ESPANSA

Caratteristiche Meccaniche

Resistenza a Compressione: $\sigma_c > 1200 \text{ kN/m}^2$

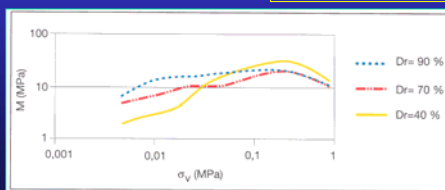
Angolo di Attrito Interno: $\phi = 30 \div 40^\circ$

È ricavato in laboratorio da prove triassiali con pressione di confinamento di 200 kN/m² e diversi valori di densità relativa.



Per i calcoli progettuali si utilizza $\phi = 35^\circ$

Modulo Edometrico: $M \approx 10 \text{ MPa}$



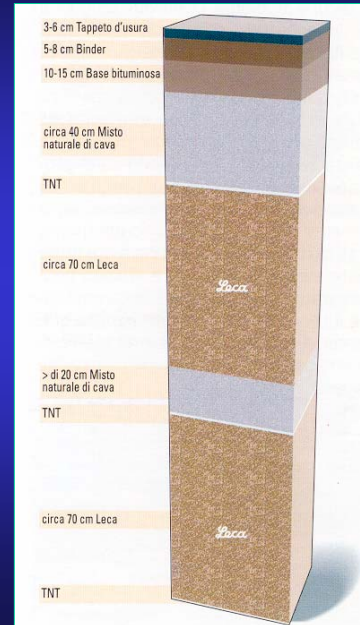
È ricavato in laboratorio da prove edometriche con compressione verticale di 0.1 MPa e diversi valori di densità relativa.

ARGILLA ESPANSA

Fasi Costruttive

- Scotico e sbancamento
- Livellamento e compattazione del piano di posa
- Stesa di un geosintetico non tessuto con funzione anticontaminante
- Posa di un primo strato di argilla espansa (circa 70 cm)
- Stesa di un geosintetico tessuto non tessuto
- Stesa di uno strato di misto granulare di cava, con funzione di irrigidimento, stabilità e portanza (circa 40 cm).
- Compattazione con mezzi cingolati, con minimo tre passaggi e pressione massima ai cingoli di 30 kPa.

Queste operazioni si ripetono fino al raggiungimento dell'altezza di progetto.



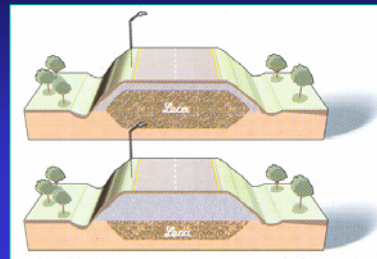
ARGILLA ESPANSA

Tipologie Costruttive

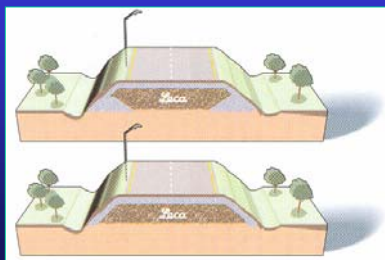
• Rilevati Compensati:

Nel caso di terreni particolarmente cedevoli.

Si sostituisce parte del terreno di fondazione in modo da migliorare la capacità portante e compensare in parte o completamente il sovraccarico dovuto al rilevato.



• Rilevati Senza Compensazione:



Si sfrutta unicamente l'effetto di alleggerimento dovuto al minore peso specifico del materiale.

FIBRE DI LEGNO

- Comprendono segatura, frammenti di legno e scarti di lavorazioni.
- Peso specifico variabile da 720 a 860 kg/m³
- Si utilizzano prevalentemente per il ripristino di zone paludose o franate.
- È importante stendere sul piano di posa un telo di polietilene per la protezione della falda acquifera dal percolato.



CENERE VOLANTE

- È il residuo più fine derivante dalla combustione del carbone granulare.
- Essendo un materiale siliceo, a contatto con l'acqua si combina producendo una sostanza cementizia.
- Peso specifico di 1200 ÷ 1700 kg/m³
- Resistenza a compressione circa 1200 kPa.

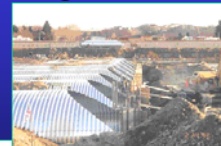
FRAMMENTI DI PNEUMATICI

- Ottenuti dalla fresatura di pneumatici provenienti dalle discariche.
- Peso specifico: da 320 a 530 kg/m³ sciolto e da 720 a 900 kg/m³ compattato.
- Evitare la posa nelle vicinanze della falda freatica a causa del potenziale inquinamento da parte delle sostanze metalliche rilasciate dalle gomme.
- Realizzazione di rilevati alternando sabbia e frammenti di pneumatici.



RILEVATI CON TUBI IN ACCIAIO

- Costituiti da condotte in acciaio ondulato e zincato ricoperte con terreno compattato.
- Caratteristiche meccaniche del manufatto dipendenti sia dal materiale costituente le condotte sia dal grado di compattazione degli strati (spessore max 20 ÷ 30 cm);
- Peso specifico di 1200 ÷ 1700 kg/m³
- Costruzione particolarmente veloce.



MATERIALI DI SCARTO

- **Comprendono detriti di demolizione, scorie d'altoforno e di fornace, cemento frammentato.**

- **Vantaggi dal punto di vista ambientale: elevata quantità di materiale riciclabile.**

- **Comportamento meccanico assimilabile a quello di un materiale terroso tradizionale.**

- **Potenziale inquinamento della falda freatica da parte dei percolati: per ogni categoria di materiali dovranno essere assunte specifiche cautele.**

