



Ordine degli Ingegneri  
della Provincia di Udine

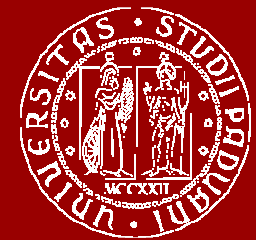


# Aspetti teorici del rinforzo del terreno e funzionamento delle terre rinforzate

Prof. ing. Simonetta Cola

*Dipartimento ICEA - Università di Padova*

*Udine – 21 ottobre 2016*





1. Perché il rinforzo del terreno?
2. Resistenza di un terreno rinforzato
3. Fibre nel rinforzo diffuso
4. Rinforzo sotto fondazione superficiale
5. Rinforzo sotto rilevato su terreno molle
6. Terre rinforzate

Non sono le uniche forme di rinforzo. Altre sono: chiodature o soil nailing, pali trattamenti colonnari sotto rilevati, ecc.

# Perchè il rinforzo del terreno?



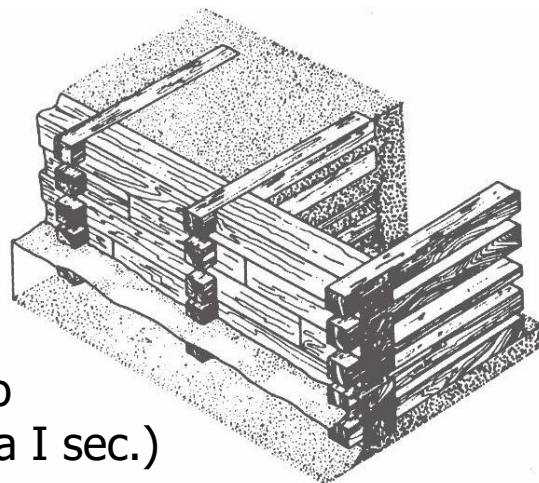
Il rinforzo del terreno è una tecnica usata fin dall'antichità e non solo dal genere umano.



Grande Muraglia (Cina 215 a.c.)



Grande Moschea (Djenné, Mali, 1250 d.c.)



Muro di sponda romano (Tamigi, Londra I sec.)



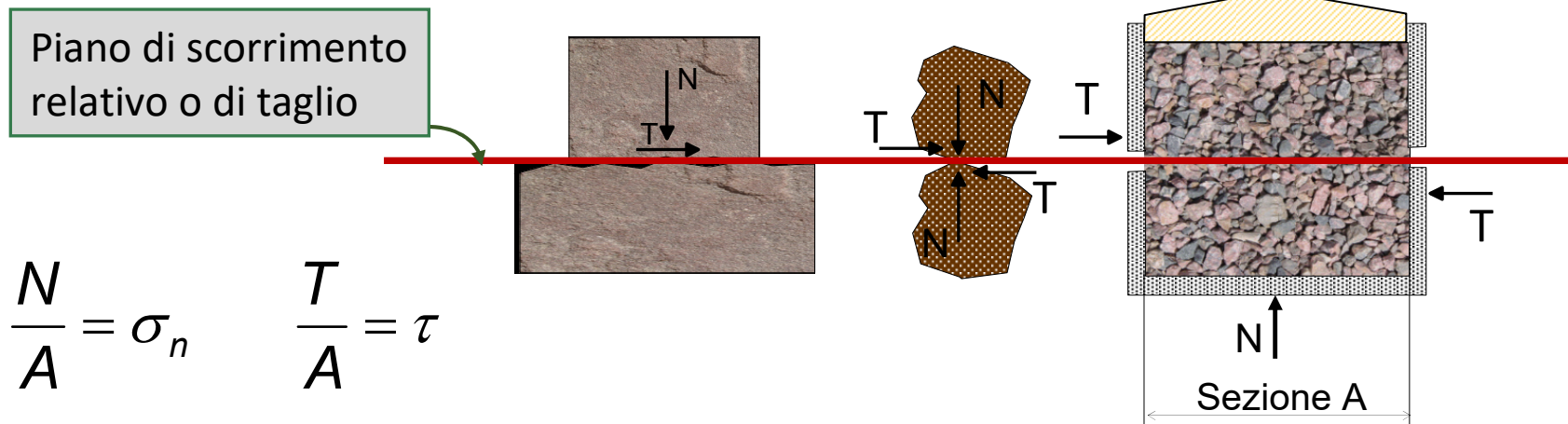
Nido di rondine (anno?)

# Perchè il rinforzo del terreno?

## La resistenza al taglio del terreno



Il terreno è aggregato di particelle solide (frammenti di roccia, ghiaia,... argilla), dotato di **resistenza al taglio** per effetto dell'**attrito interno** tra le particelle stesse.



Lo scorrimento relativo ha luogo quando il rapporto tra la forza di taglio  $T$  e la forza normale  $N$  applicate su una superficie raggiunge il valore limite pari a:  $\mu = \tan \phi =$  **coefficiente di attrito**

In tale caso è:  $T_{\max} = \mu N = N \tan \phi$   $\Rightarrow$   $\tau_{\max} = \sigma_n \tan \phi$



# Perchè il rinforzo del terreno?

Angolo di attrito



$\phi$  = angolo di attrito interno del terreno

detto anche **ANGOLO DI NATURAL DECLIVIO** o **DI RIPOSO** perché è l'angolo del cono che si forma se verso un terreno asciutto su un piano.



*NB: Il cono ha lo stesso angolo anche se formato per **deposizione in acqua ferma***



# Perché il rinforzo del terreno?

## Angolo di attrito e coesione



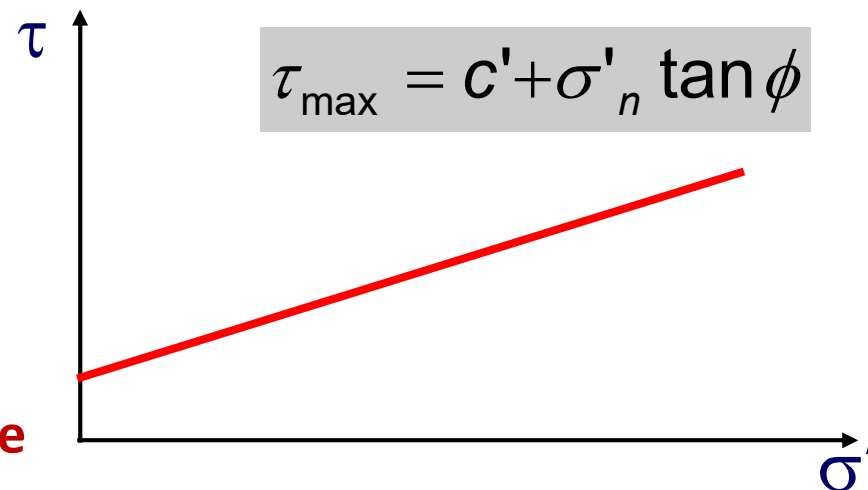
Poiché spesso il terreno contiene acqua la resistenza deve essere espressa in termini di **tensioni efficaci**.

Inoltre, a volte il terreno può formare pareti con inclinazione superiore all'angolo di riposo perché dotato di **coesione reale o apparente** per effetto di:

- **Cementazione** tra i grani;
- **Suzione** a stato di parziale saturazione (castelli di sabbia)
- Maggior angolo di attrito per **incastramento dei grani** con forma angolare.

In tal caso il terreno ha una resistenza al taglio non nulla a tensione normale nulla.

**La resistenza a trazione è comunque nulla.**



# Perchè il rinforzo del terreno?

## Tipologie di rinforzo



I **rinforzi** sono inseriti nel terreno per conferire una resistenza a trazione che il terreno non avrebbe. Ciò permette di ottenere:

- ❑ **maggiore resistenza del terreno**
- ❑ **aumento della capacità portante** di fondazioni superficiali
- ❑ **pareti a maggior pendenza e più alte** con poca spesa (terre rinforzate, terre armate, soil nailing, pareti tirantate, ecc.)
- ❑ **diminuzione dei cedimenti** di fondazioni superficiali o di rilevati costruiti su pali
- ❑ **aumento dell'efficienza** di colonne in ghiaia
- ❑ **etc.**

## TERRENO RINFORZATO CON FIBRE DIFFUSE



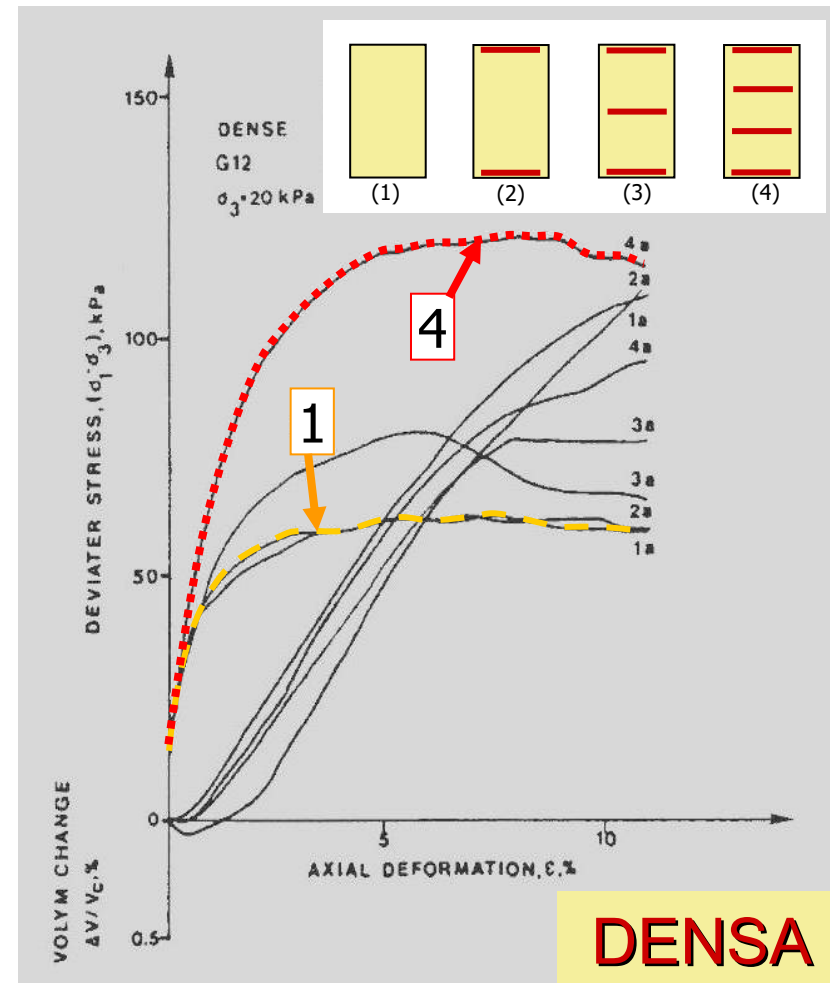
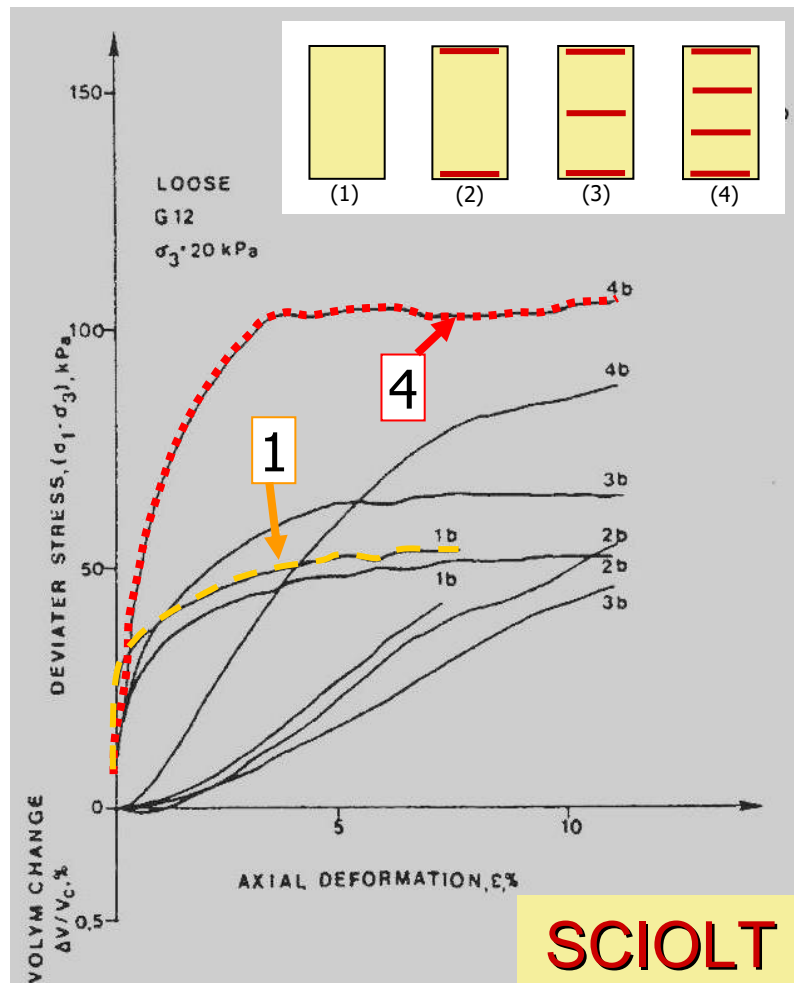
Fibre di polipropilene in sabbia  
(Lirer et al., 2011)

# Resistenza di un terreno rinforzato

Rinforzi in un elemento di volume



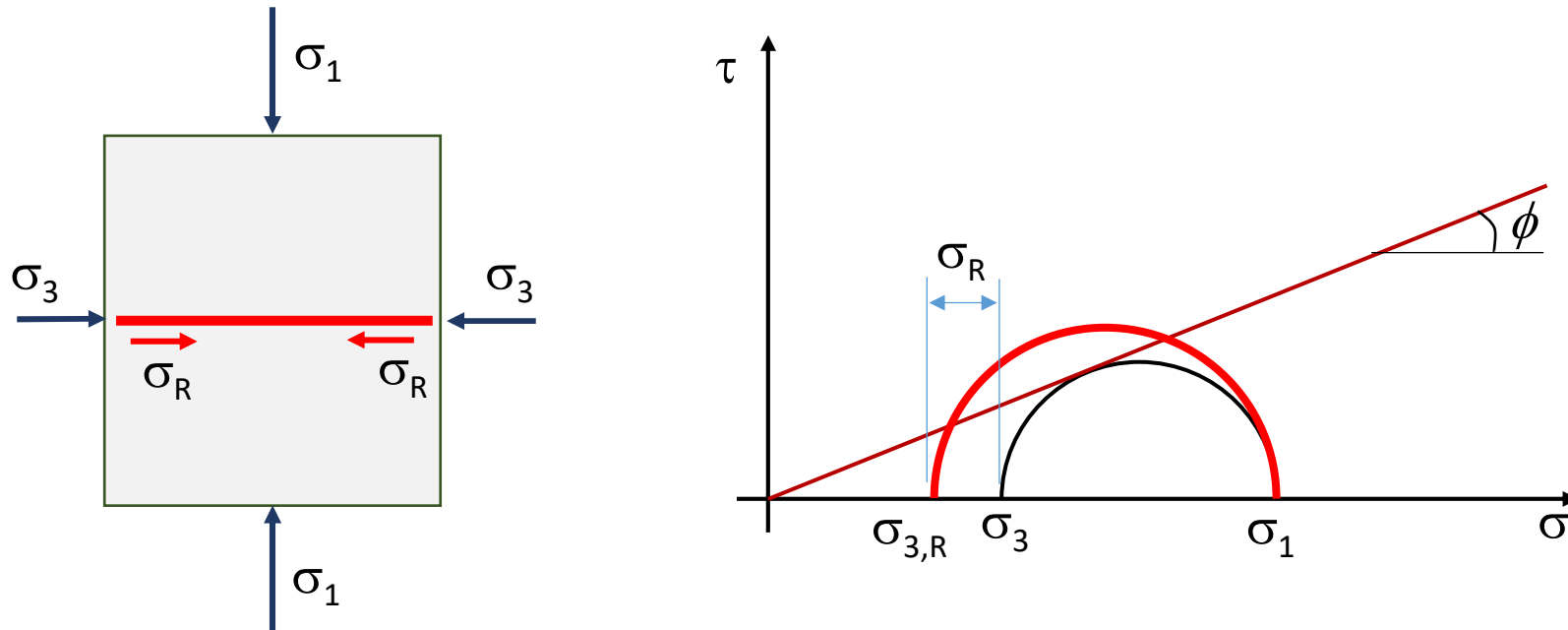
## Prove triassiali drenate su una sabbia con rinforzi orizzontali





# Resistenza di un terreno rinforzato

Rinforzo orizzontale in un elemento di volume



Nel terreno non rinforzato la minima tensione orizzontale é:

$$\sigma_3 = K_a \sigma_1 \quad \text{con} \quad K_a = \tan^2(45 - \phi/2) < 1$$

Nel terreno rinforzato è:  $\sigma_{3,R} = K_a \sigma_1 - \sigma_R$

ove  $\sigma_R$  è il contributo di confinamento dato dalla fibra

# Resistenza di un terreno rinforzato

## Rinforzo orizzontale in un elemento di volume



Detto:

$\sigma_s =$  **resistenza a trazione**  
della fibra

$\tau_s =$  **attrito all'interfaccia**  
terreno fibra

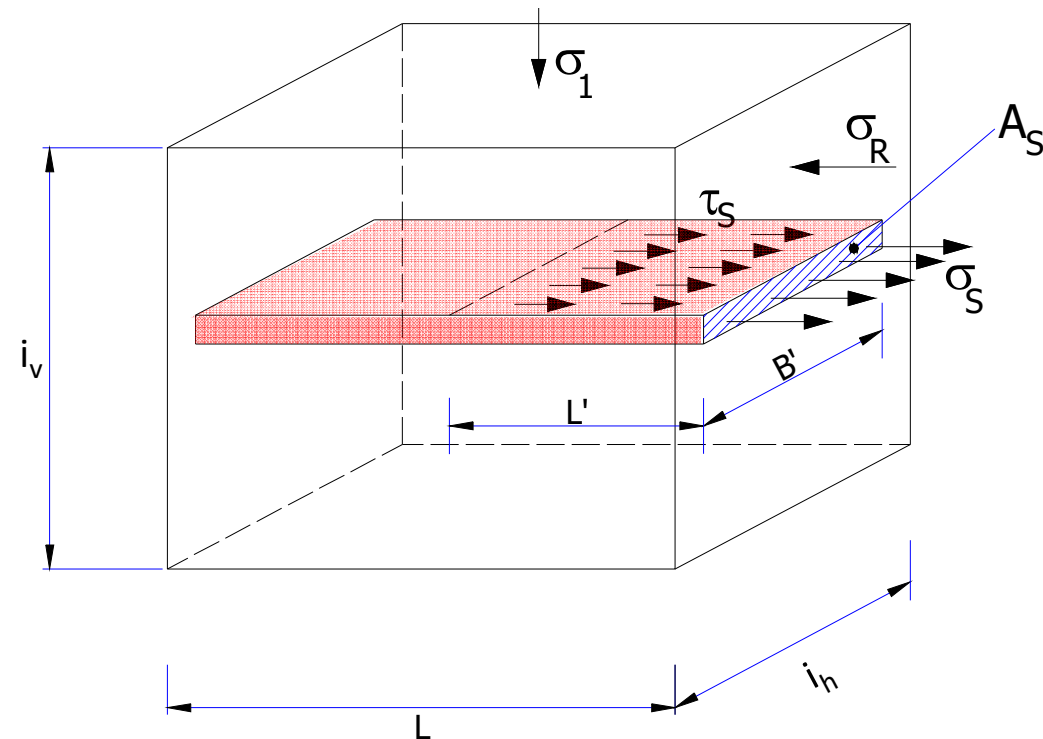
si possono avere due tipi di  
rotture:

**1) Troncamento** della fibra se:

$$2\tau_s \cdot L'B' = \sigma_s A_s$$

**2) Sfilamento** della fibra se l'attrito all'interfaccia è troppo piccolo per evitare lo scorrimento del terreno sulla fibra, pur essendo:

$$2\tau_s \cdot L'B' < \sigma_s A_s$$



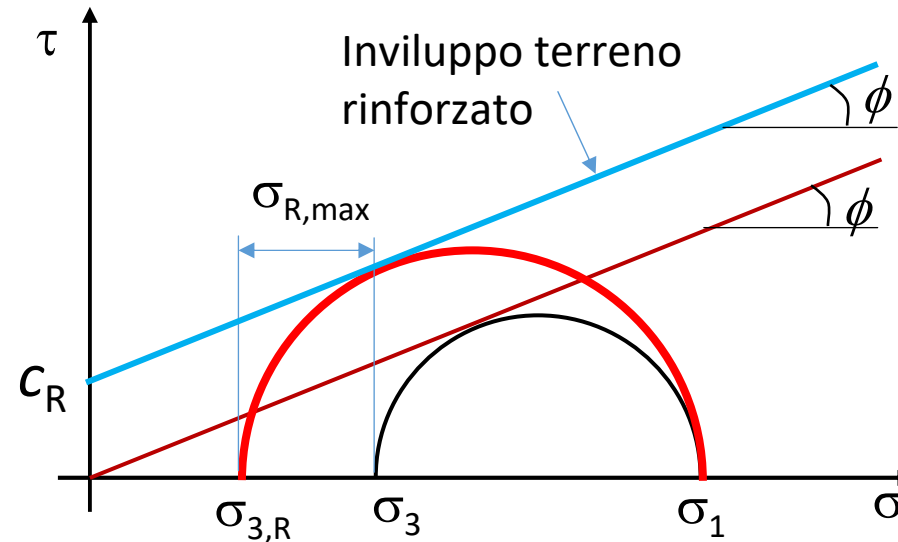
# Resistenza di un terreno rinforzato

## Rinforzo orizzontale: rottura per troncamento fibra



Nel caso di rottura per **troncamento**, essendo  $\sigma_s$  indipendente dalla tensione normale, il contributo  $\sigma_R$  è costante e pari a:

$$\sigma_R = \sigma_{R,\max} = \frac{\sigma_s A_s}{i_v \cdot i_h}$$



La retta inviluppo trasla verso l'alto e i parametri di resistenza del terreno rinforzato si ricavano da:

$$\phi_R = \phi$$

$$\sigma_{3,R} = K_a \sigma_1 - \sigma_{R,\max} = K_a \sigma_1 - 2c_R \sqrt{K_a}$$

da cui:

$$c_R = \frac{\sigma_{R,\max}}{2\sqrt{K_a}}$$

# Resistenza di un terreno rinforzato

Rinforzo orizzontale: rottura per sfilamento fibra



Per piccole tensioni verticali la fibra può sfilarsi senza

raggiungere  $\sigma_s$ .

Il contributo di confinamento  $\sigma_R$  cresce con la tensione verticale:

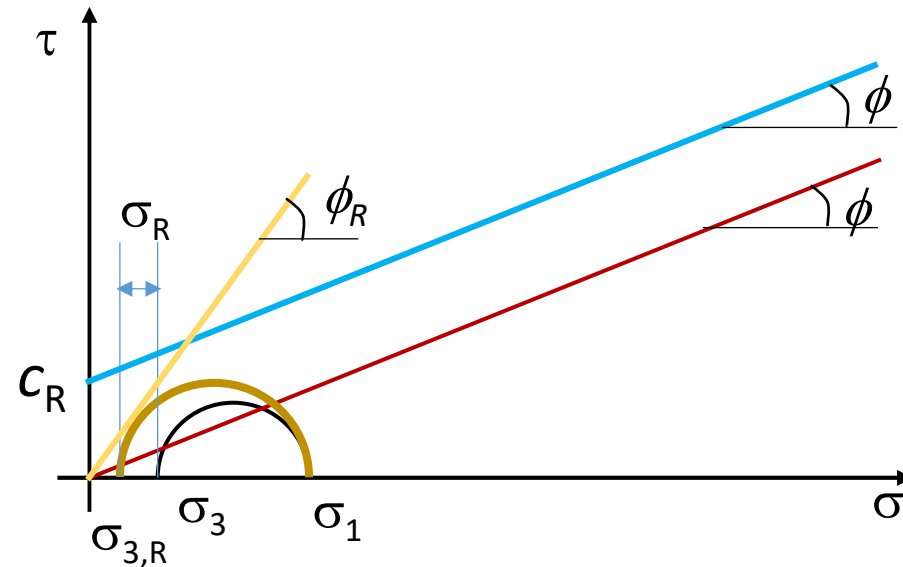
$$\sigma_{3,R} = \sigma_3 - F\sigma_1$$

Con  $F$  = funzione del coefficiente

di attrito all'interfaccia e della geometria (interasse fibre, lunghezza,

ecc.)

Imponendo la tangenza ad una retta involuppo passante per l'origine:



$$\sin \phi_R = \frac{\sigma_1 - \sigma_{3,R}}{\sigma_1 + \sigma_{3,R}}$$



$$\sin \phi_R = \frac{1 - K_a + F}{1 + K_a - F}$$

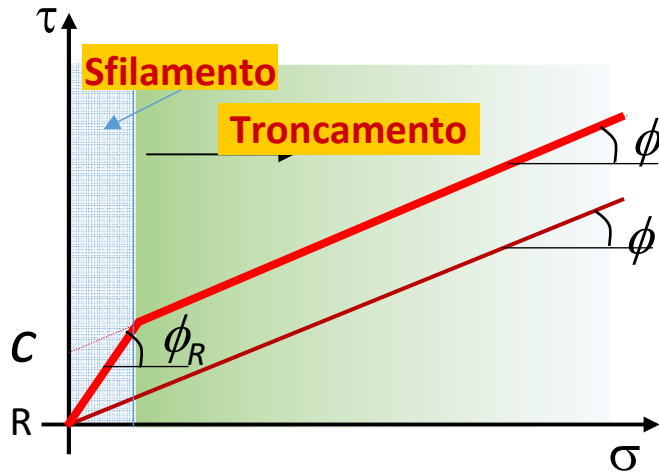
$$\phi_R > \phi$$

# Resistenza di un terreno rinforzato

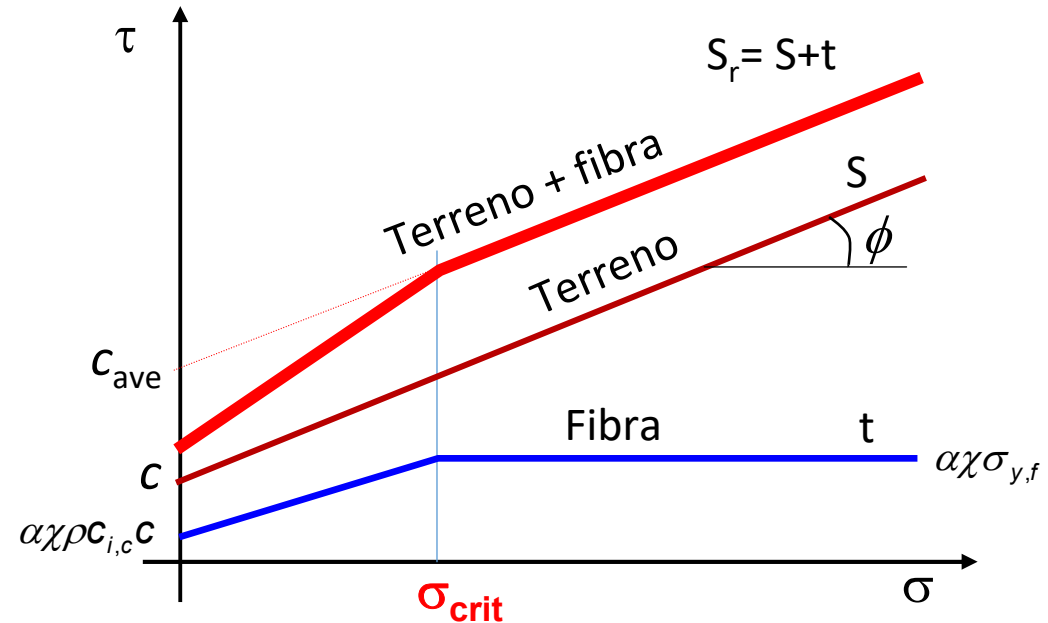


Fibre con distribuzione casuale: criterio di rottura secondo Zornberg (2002)

Per fibra orizzontale



Per fibre random (Zornberg, 2002)



$$\sigma_{crit} = \frac{\sigma_{y,f} - \rho c_{i,c} c}{\rho c_{i,\phi} \tan \phi}$$

$\sigma_{y,f}$  = tensione di snervamento della fibra

$\rho$  = snellezza della fibra (lunghezza/diametro)

$c_{i,c}$  e  $c_{i,\phi}$  = termini coesivo e attritivo della resistenza al taglio dell'interfaccia fibra/terreno



# Resistenza di un terreno rinforzato



Fibre con distribuzione casuale: criterio di rottura secondo Zornberg (2002)

Detti  $\sigma_{ave}$  la tensione media attorno alle fibre (assunta pari alla tensione nel piano),  $\chi$  il contenuto volumetrico in fibre e  $\alpha$  un coefficiente funzione dell'orientazione e della distribuzione delle fibre nel terreno (=1 per distribuzione casuale e omogenea, diversamente <1) si ha:

Per  $\sigma_{ave} < \sigma_{crit} \rightarrow$  **sfilamento**

$$\tau = c + \sigma \tan \phi + \alpha \chi \rho \cdot (c_{i,c} c + c_{i,\phi} \sigma_{ave} \tan \phi)$$

Con

$$c_{eq} = (1 + \alpha \chi \rho \cdot c_{i,c}) c$$
$$(\tan \phi)_{eq} = (1 + \alpha \chi \rho \cdot c_{i,\phi}) \tan \phi$$

Per  $\sigma_{ave} \geq \sigma_{crit} \rightarrow$  **troncamento**

$$\tau = c + \sigma \tan \phi + \alpha \chi \sigma_{y,f}$$

Con

$$c_{eq} = c + \alpha \chi \sigma_{y,f}$$
$$(\tan \phi)_{eq} = \tan \phi$$

Esistono altri modelli: Michalowski (2008), Lirer (2011), Gao e Zhao (2013).



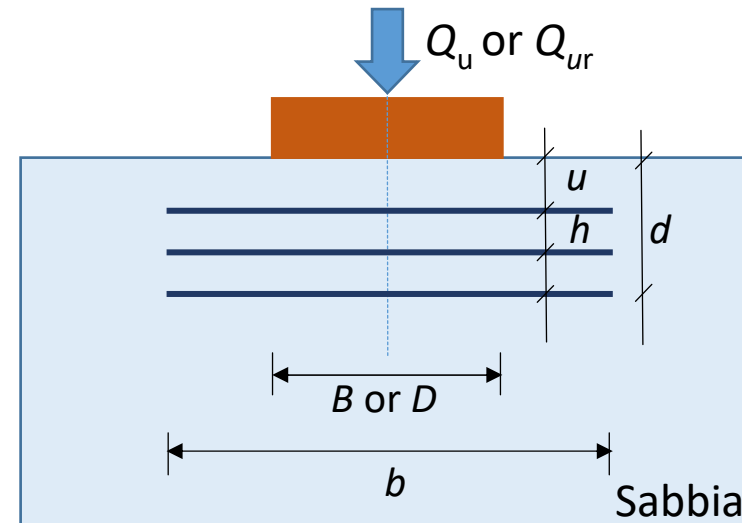
# **RINFORZI SOTTO FONDAZIONI SUPERFICIALI**

# Aumento della capacità portante

## Fondazioni superficiali rinforzate



Numerosi modelli fisici o numerici (Yetimoglu et al., 1994; Mitchell & Collins, 1997; Sharma et al. 2009; El Sawwaf & Nazir, 2011; ecc.) hanno mostrato che l'efficienza  $BCR=Q_u/Q_{uR}$  di una fondazione superficiale rinforzata (RSF) dipende da:



1. Profondità del primo rinforzo ( $u$ )

$$(u/B)_{opt} = 0.2 \div 1 \quad (\text{medio } 0.45)$$

2. Spaziatura verticale ( $h$ )

$$(h/B)_{opt} = 0.15 \div 1.5 \quad (\text{medio } 0.50)$$

3. Larghezza del rinforzo ( $b$ )

$$(b/B)_{opt} = 1.5 \div 5 \quad (\text{medio } 3.7)$$

4. Numero dei rinforzi ( $N$ )

$$(N)_{opt} = 2 \div 4 \quad (\text{medio } 3)$$

5. Spessore rinforzato ( $d = u + (N-1)h$ )

$$(d/B)_{opt} = 1.25 \div 1.5 \quad (\text{medio } 1.25)$$

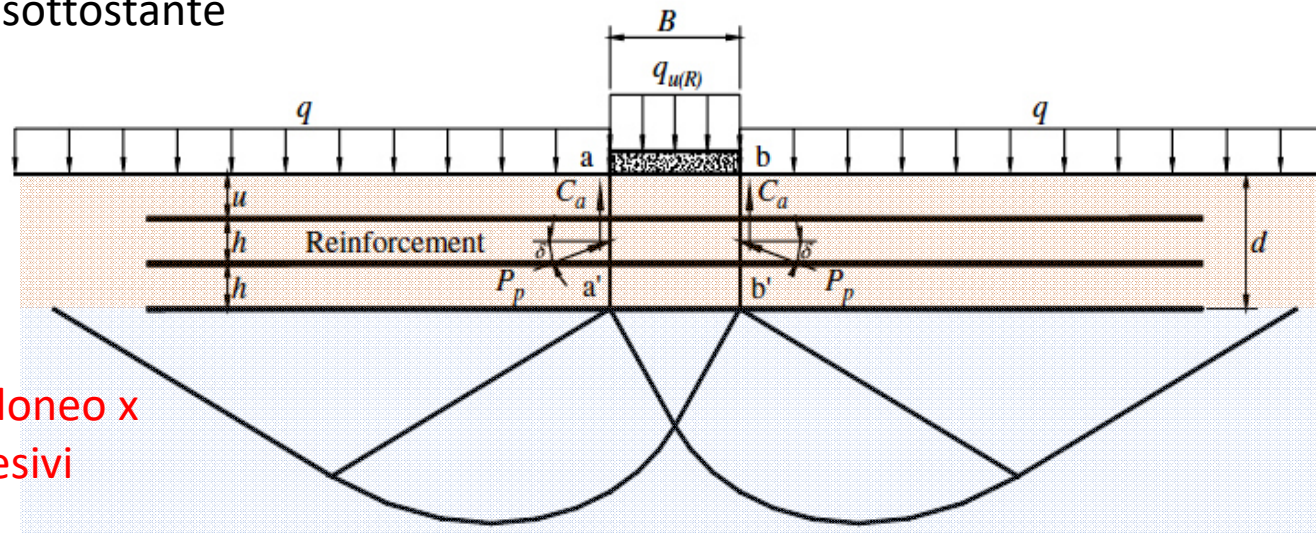
6. Resistenza e rigidità del rinforzo

# Aumento della capacità portante

## Meccanismi di rottura

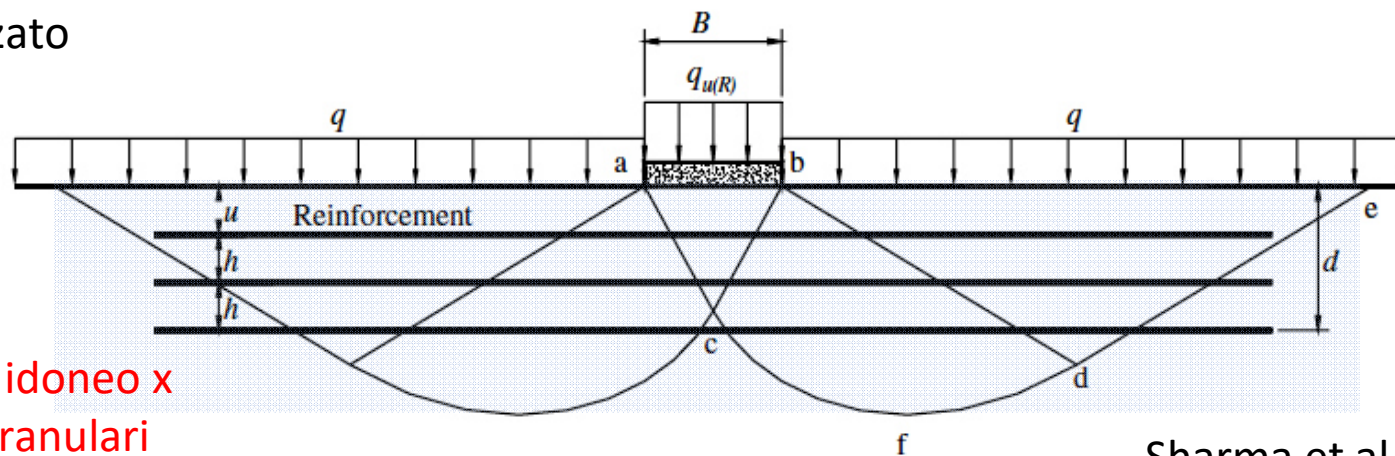


- a) Modello a 2 strati con resistenza molto diversa → Punzonamento e rottura del terreno sottostante



Modello idoneo x  
terreni coesivi

- b) Modello a 1 strato (se la resistenza non è molto diversa) → Rottura del terreno rinforzato



Modello idoneo x  
terreni granulari

Sharma et al. (2009)

# Aumento della capacità portante

Rottura strato inferiore (Meherhof & Hanna, 1978)



## Per fondazione quadrata

$$q_{uR} = q_u + \frac{4c_a d}{B} + 2\gamma_t d^2 \left(1 + \frac{2D_f}{d}\right) \frac{K_s \tan \phi_t}{B} + \frac{4 \sum_{i=1, \dots, N} T_i \tan \delta}{B} - \gamma_t d$$

$q_{uR}$  = capacità della fondazione rinforzata

$q_u$  = capacità della fondazione non rinf.

$\gamma_t$  = peso di volume del terreno rinforzato

$D_f$  = piano di posa della fondazione

$K_s$  = coefficiente di punching che dipende dall'angolo di attrito del terreno e dalla capacità portate per il terreno rinforzato e non rinforzato

$\phi_t$  = angolo di attrito del terreno rinforzato

$c_a$  = componente coesiva della resistenza lungo il lato della fondazione

$T_i$  = resistenza a trazione di ciascun rinforzo

$\delta$  = angolo di inclinazione della spinta passiva sul lato della fondazione

(Meherhof & Hanna, 1978)



# Aumento della capacità portante

Rottura strato rinforzato (Sharma et al., 2009)



## Per fondazione quadrata

$$q_{uR} = q_u + 12 \sum_{i=1}^N \frac{T_i [u + (i-1)h] r_T}{B^2} \quad (\text{Sharma et al., 2009})$$

$$r_T = 1 - 2 \frac{u + (i-1)h}{B} \tan\left(\frac{\pi}{4} - \frac{\phi}{2}\right) \quad \text{se} \quad u + (i-1)h < \frac{B}{2} \tan\left(\frac{\pi}{4} + \frac{\phi}{2}\right)$$

$$r_T = \frac{1}{2} - \frac{u + (i-1)h}{2H_f} \quad \text{se} \quad u + (i-1)h \geq \frac{B}{2} \tan\left(\frac{\pi}{4} + \frac{\phi}{2}\right)$$

$H_f$  = profondità del piano di rottura

$\phi$  = angolo di attrito del terreno non rinforzato

# Aumento della capacità portante

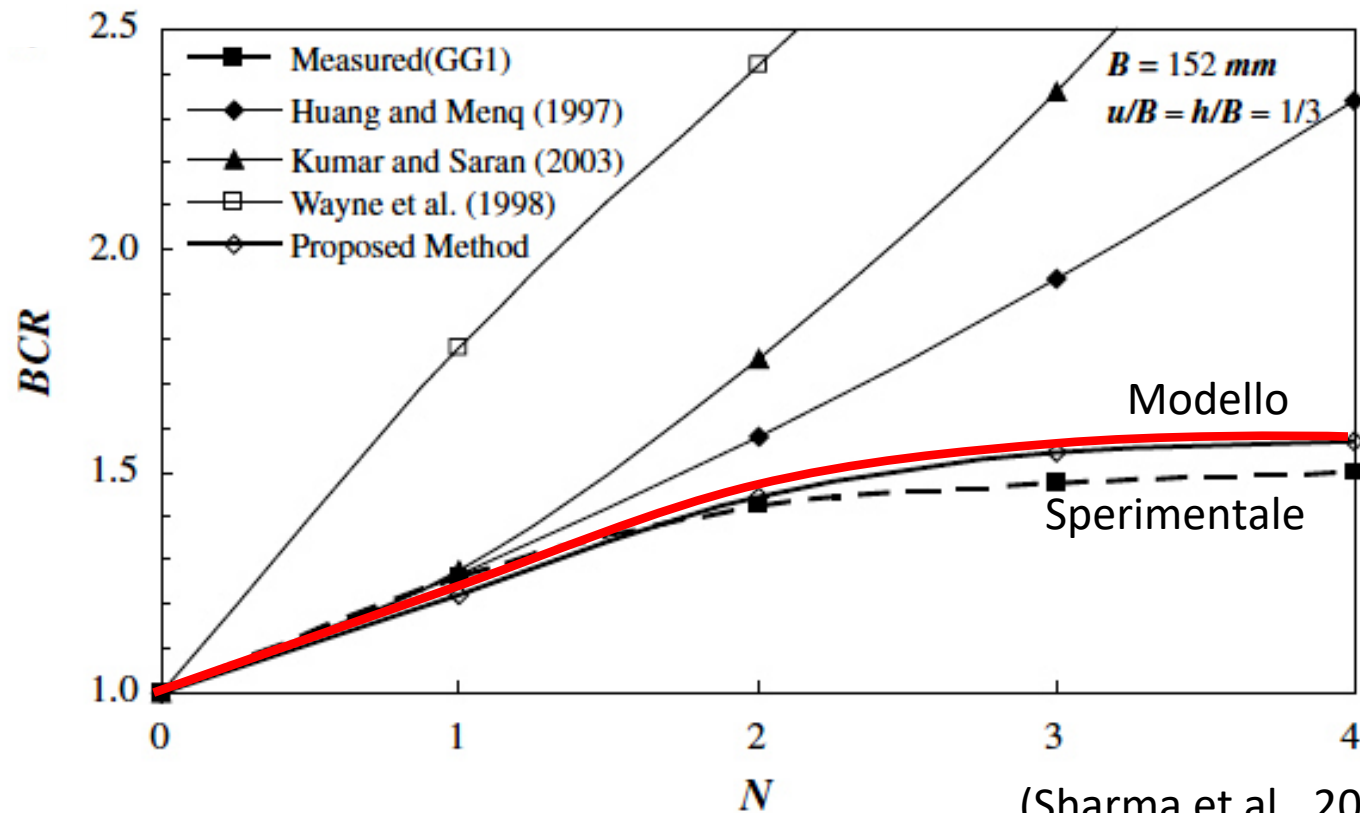
Rottura strato rinforzato (Sharma et al., 2009)



## Confronto con altri modelli teorici e misure

sperimentali

$$BCR = \frac{q_{uR}}{q_u}$$



(Sharma et al., 2009)

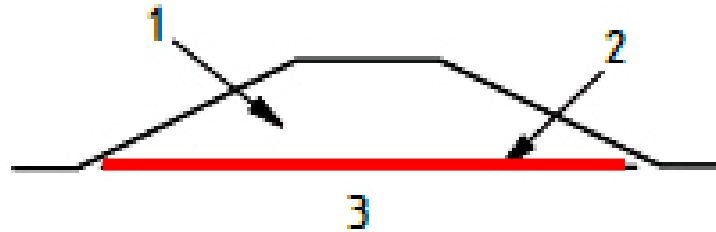
BCR può raggiungere anche valori di 2.5-3 a seconda dei geosintetici utilizzati



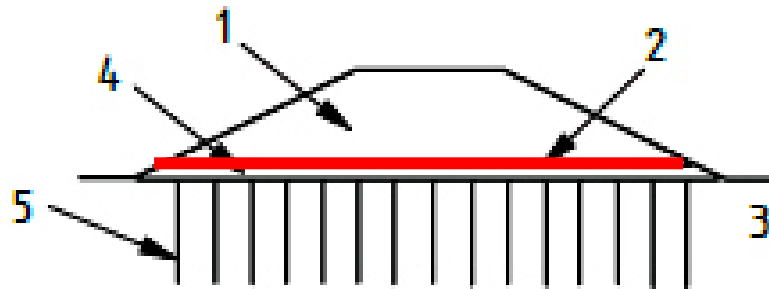
# **RINFORZI ALLA BASE DI RILEVATI SU TERRENI MOLLI**

# RILEVATO RINFORZATO ALLA BASE

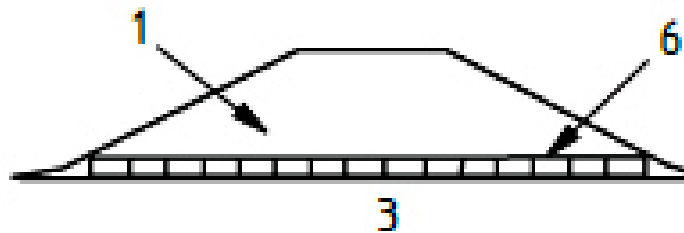
Possibili schemi



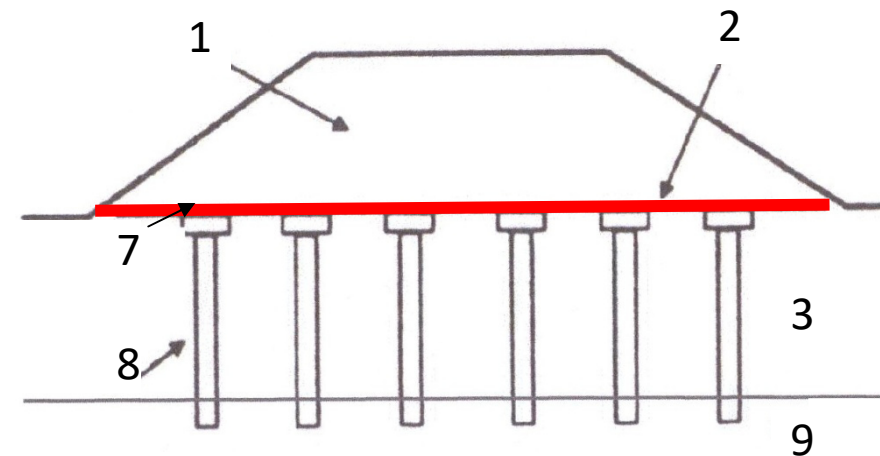
a) Rinforzo alla base



b) Rinforzo alla base + dreni



c) Materasso in pietre



d) Rinforzo + pali

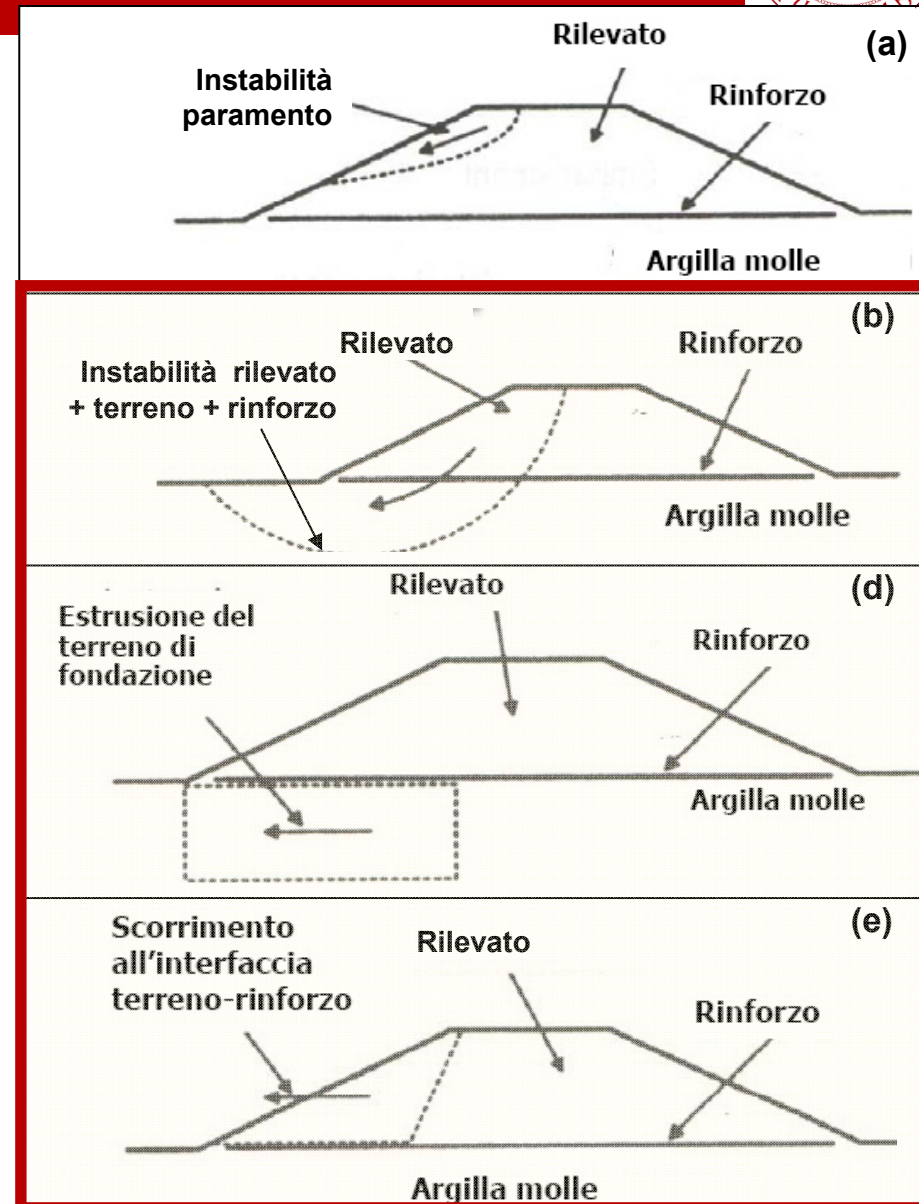
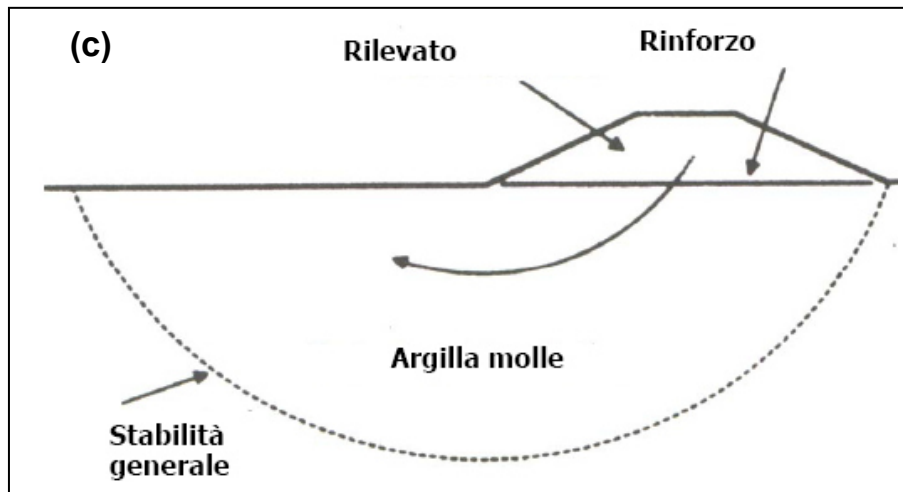
- 1 – Rilevato
- 2 – Rinforzo (geosintetico)
- 3 – Terreno molle
- 4 – Materasso di drenaggio
- 5 – Dreni verticali
- 6 – Materasso in pietre
- 7 – Pulvino
- 8 – Pali
- 9 – Substrato rigido

# RILEVATO RINFORZATO ALLA BASE



## Possibili SLU

- a) Instabilità del paramento
- b) Instabilità globale coinvolgente una porzione rilevato + terreno + rinforzo
- c) Stabilità generale coinvolgente tutto il rilevato
- d) Estrusione di terreno di fondazione o Squeezing
- e) Scorrimento lungo interfaccia rilevato-rinforzo





# RILEVATO RINFORZATO ALLA BASE

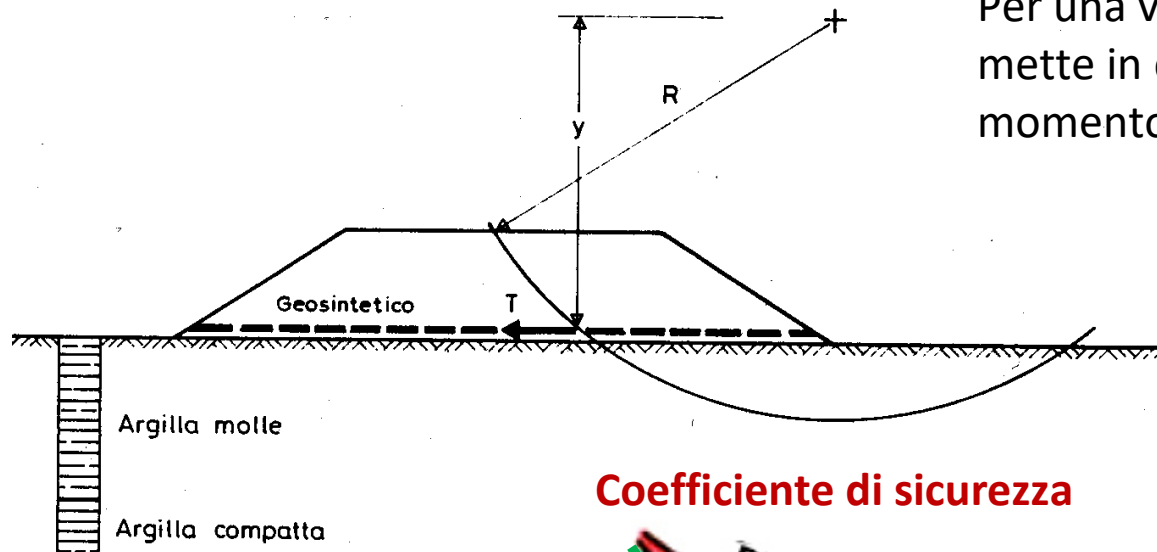
Intabilità globale rilevato + terreno + rinforzo



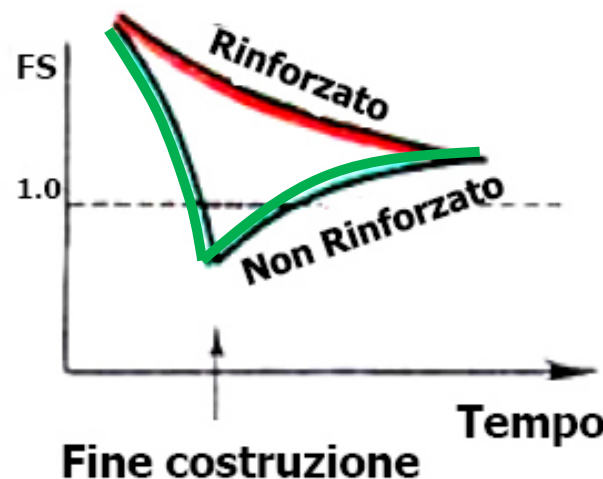
L'analisi si esegue con il Metodo dell'Eq. Limite o agli Elementi finiti.

Per una valutazione a favore di sicurezza, si mette in conto un contributo del rinforzo al momento resistente pari a:

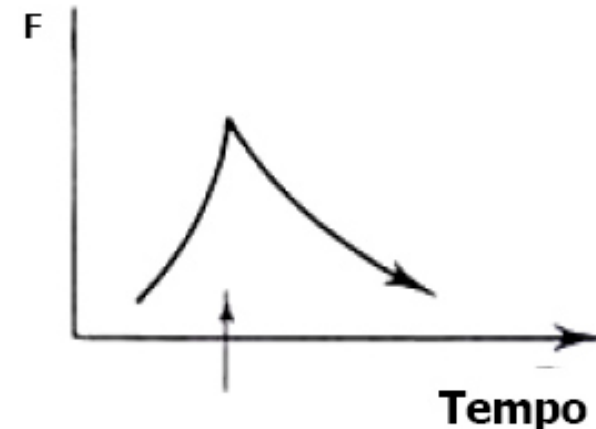
$$M_{gys} = Ty$$



**Coefficiente di sicurezza**

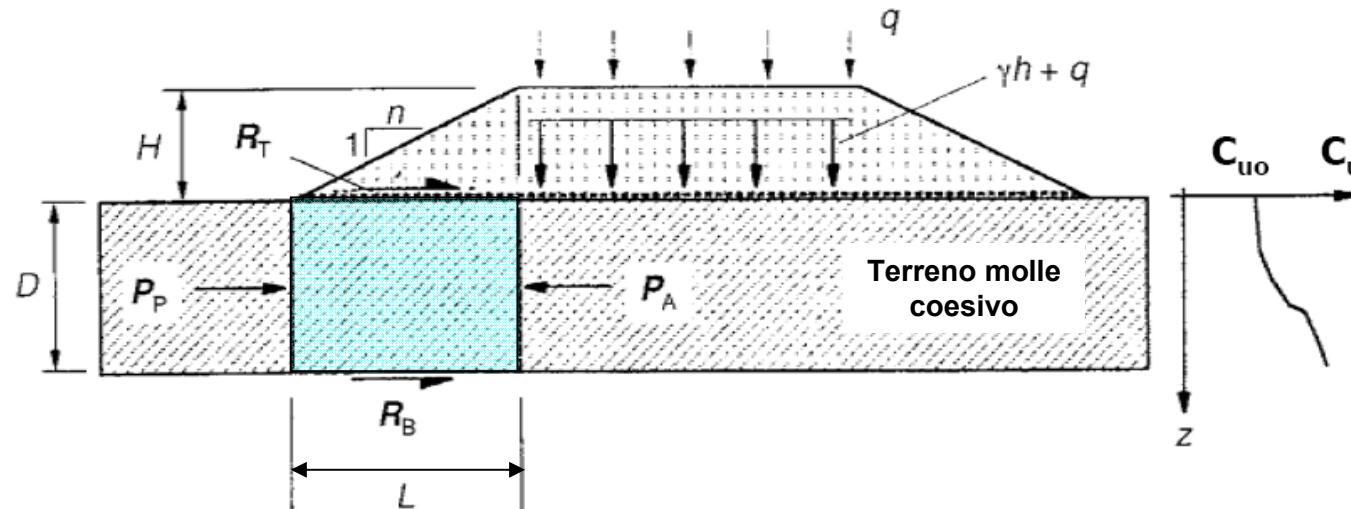


**Forza nel rinforzo**



# RILEVATO RINFORZATO ALLA BASE

## Sollecitazioni nel rinforzo per Squeezing



$$P_p + R_T + R_B \geq P_a \quad \text{con} \quad R_T = \alpha c_{uo} L \quad \text{e} \quad R_b = c_{ub} L$$

$$\left( \frac{1}{2} \gamma_f D + 2c_{um} \right) D + (\alpha c_{uo} + c_{ub}) L \geq \left( \gamma H + q + \frac{1}{2} \gamma_f D - 2c_{um} \right) D$$

$D$  = spessore strato molle

$\gamma_f$  = peso di volume del terreno molle

$\alpha$  = coefficiente di attrito  
all'interfaccia terreno rinforzo

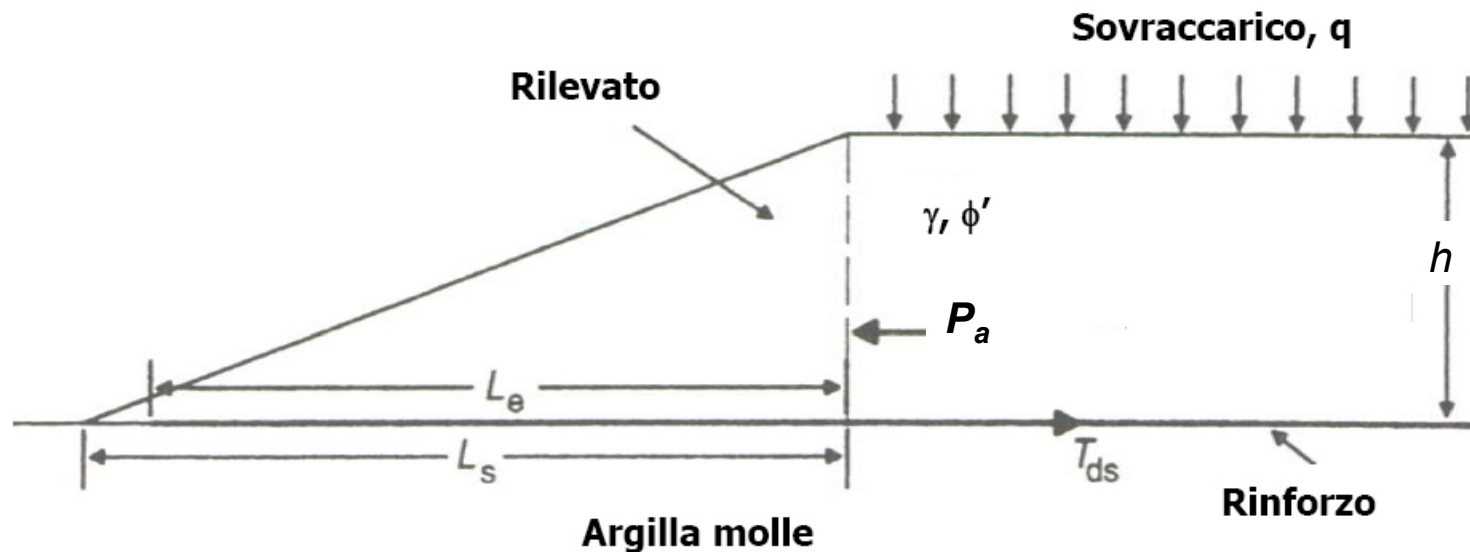
$c_{uo}$ ,  $c_{ub}$  e  $c_{um}$  = resistenza al taglio  
non drenata alla base del rinforzo,  
alla base dello strato molle e  
media

# RILEVATO RINFORZATO ALLA BASE

## Sollecitazioni nel scivolamento di parte del rilevato



Il rinforzo deve anche contrastare la spinta attiva della parte sopra il rinforzo



$$T_{ds} = P_a = \frac{1}{2} \gamma h^2 K_a + qhK_a$$

Dato che squeezing e scivolamento si possono verificare insieme, la trazione nel rinforzo deve essere:

$$R_T + T_{ds} \leq T_d \quad \text{No rottura}$$

Inoltre, tenendo conto di un carico crescente sulla lunghezza  $L_E$ , questa lunghezza deve essere:

$$L_E \geq \frac{(\gamma h + 2q)K_a}{\gamma \alpha \tan \phi'}$$

**No scivolamento**



# TERRE RINFORZATE



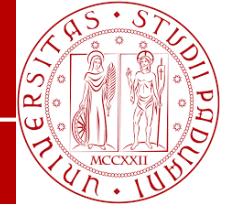
I rinforzi possono essere:

- ❑ **Discontinui nel piano del rinforzo:** Barre o nastri metallici, strisce plastiche;
- ❑ **Continui nel piano del rinforzo:** Geosintetici (geotessuto, georeti, ecc).

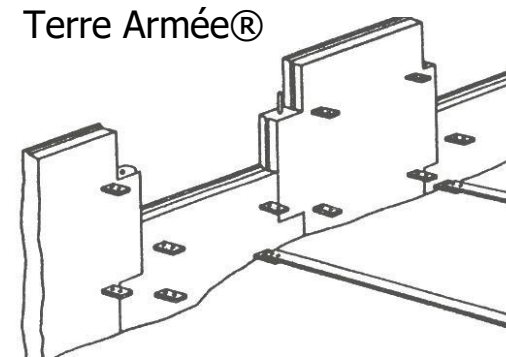
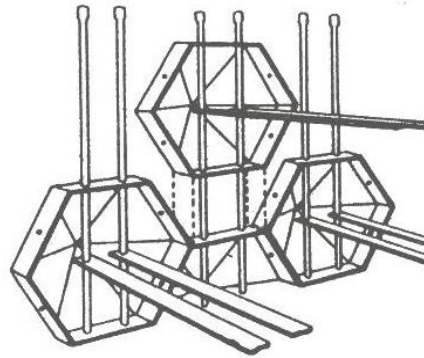
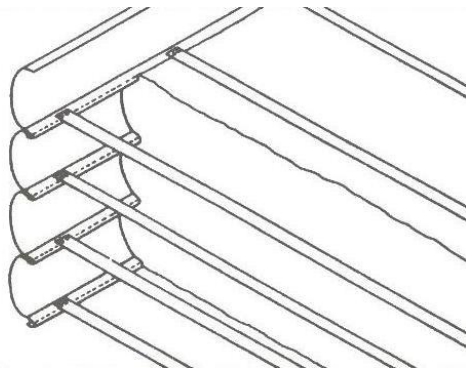
Nelle opere di sostegno sono sempre abbinati ad **elementi di contenimento** (pannello in c.a. prefabbricati o metallico, rete, gabbioni, ecc.) che costituiscono la parete a vista.

# Terre rinforzate

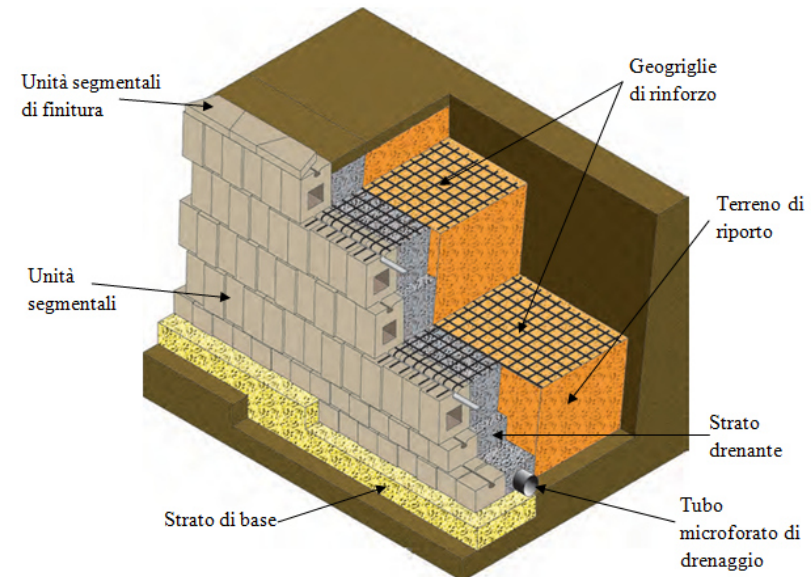
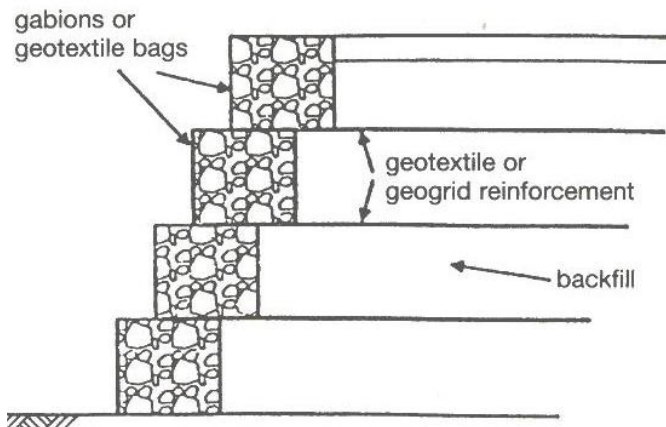
## Tipologie di rinforzo



### Inclusioni flessibili inestensibili (strisce metalliche)



### Inclusioni flessibili estensibili (geotessuti, geogriglie e georeti)





# Terre rinforzate

## Elementi di parete



Terra armata (Terre Armée®)



Terra rinforzata



Terra rinforzata



Rock wall (Segmental wall)

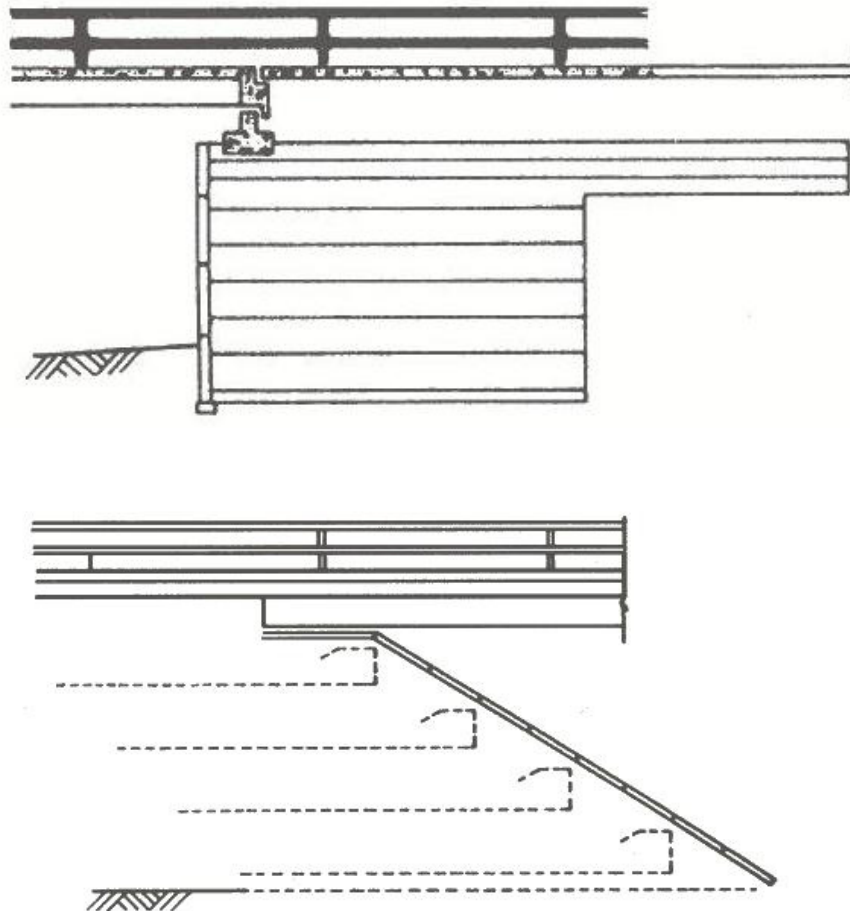


# Terre rinforzate

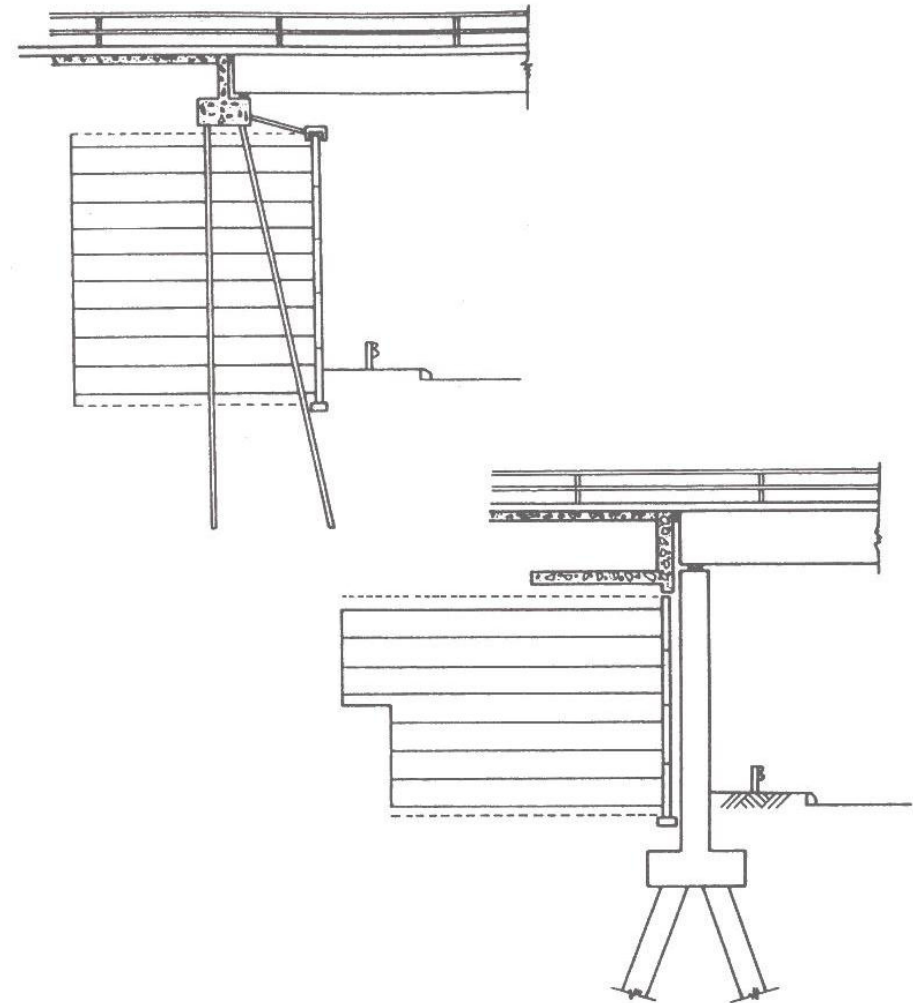
Esempi di applicazioni: manufatti di spalla



Parete verticale o inclinata portante

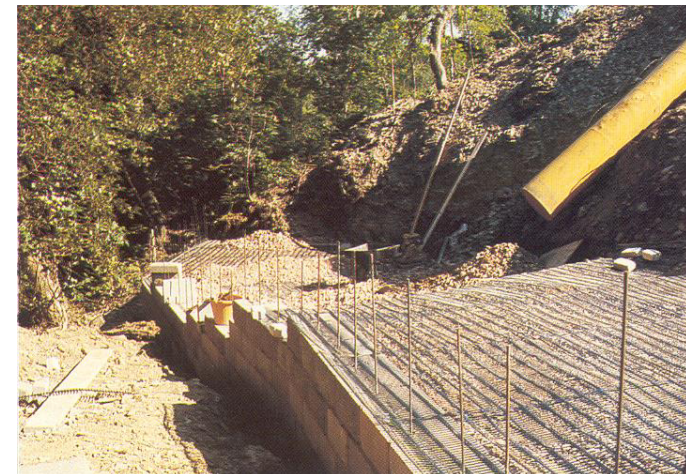
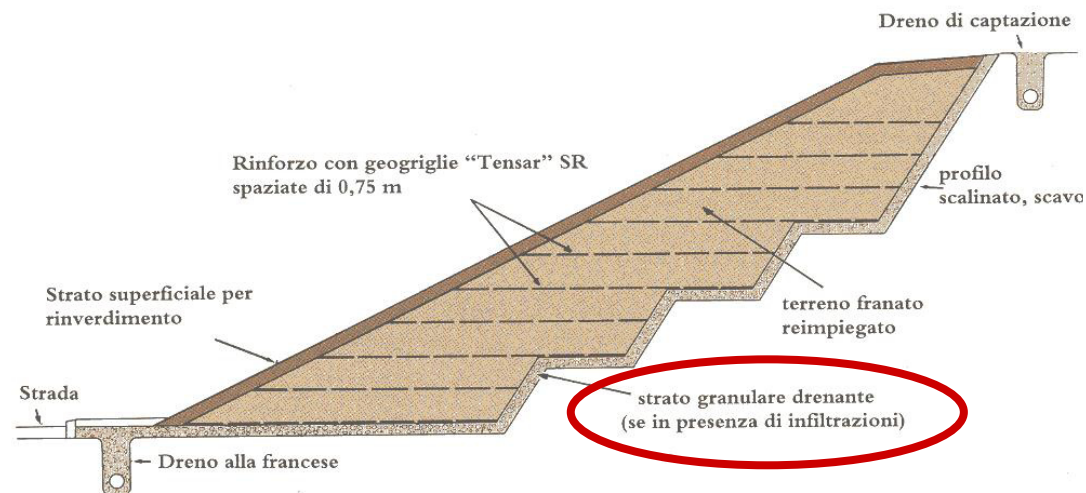
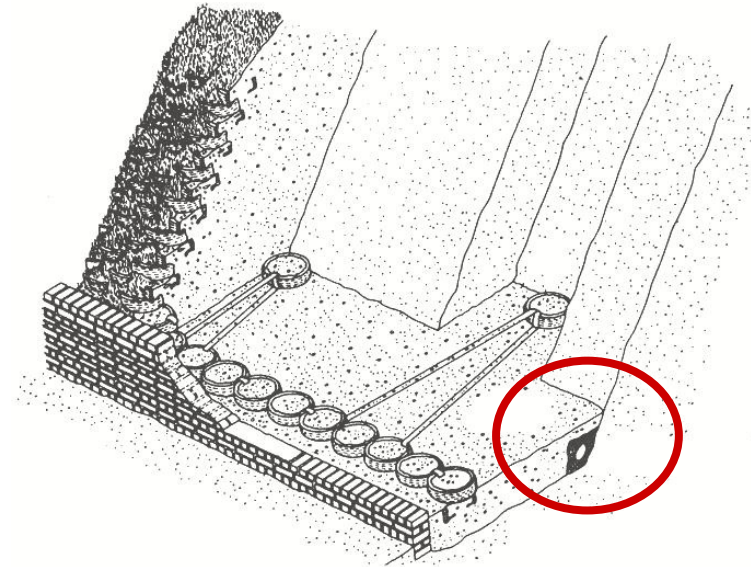


Pareti verticali non portante



# Terre rinforzate

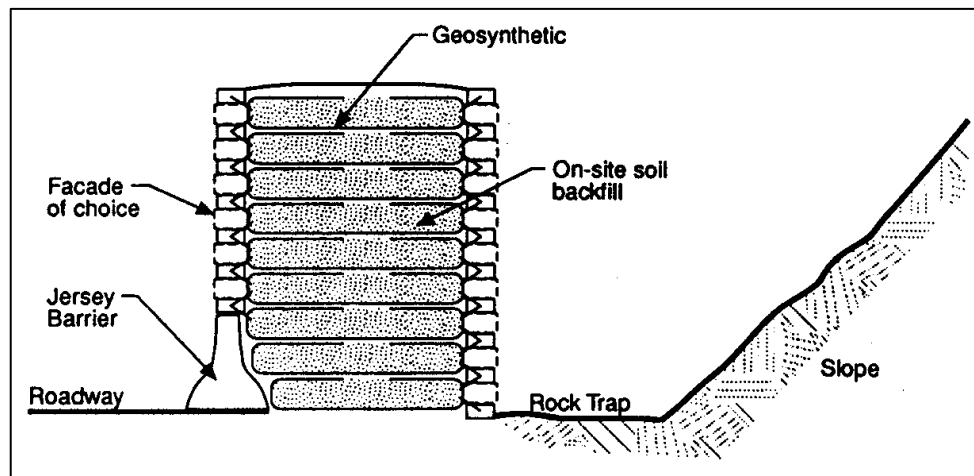
Esempi di applicazioni: protezione di pendii





# Terre rinforzate

Esempi di applicazioni: barriere antirumore e paramassi





# Terre rinforzate

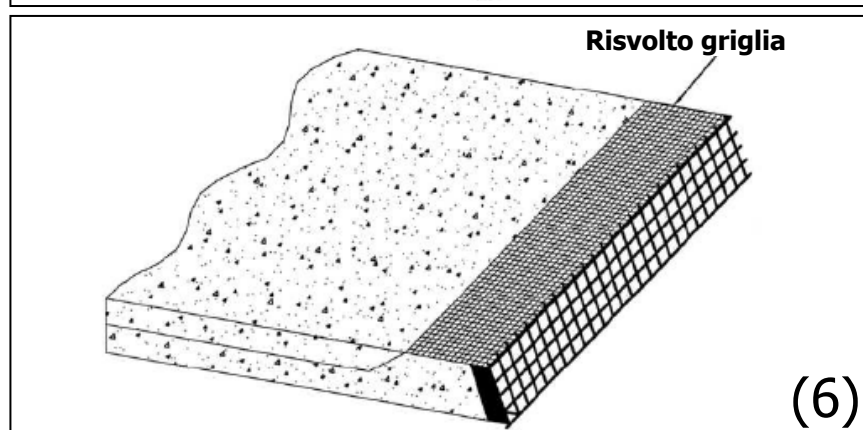
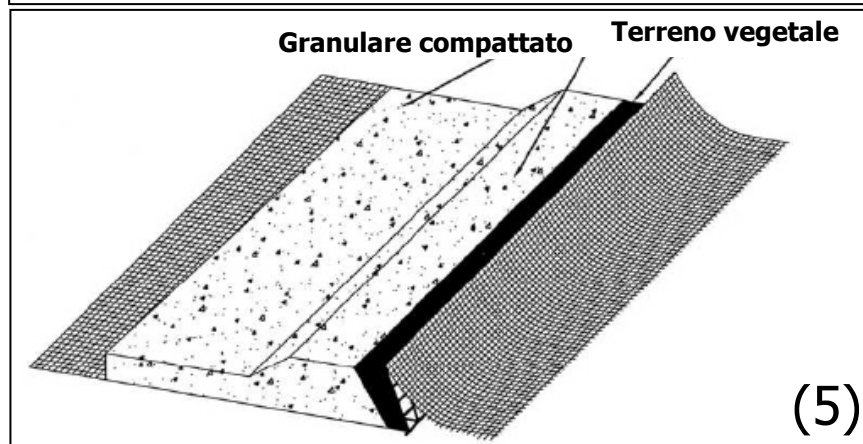
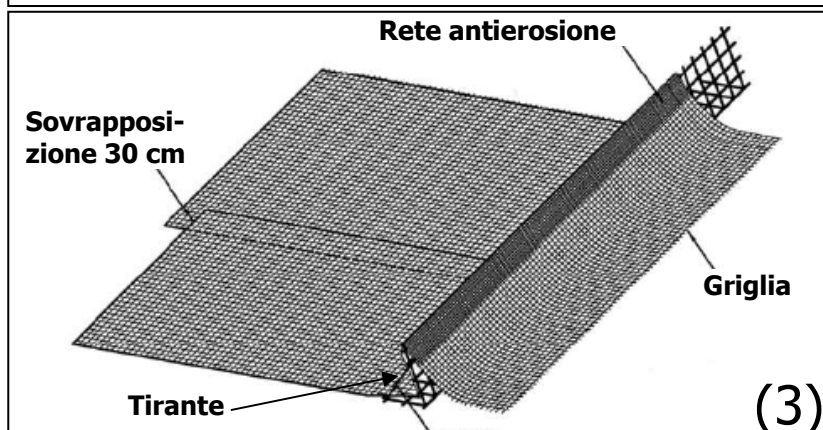
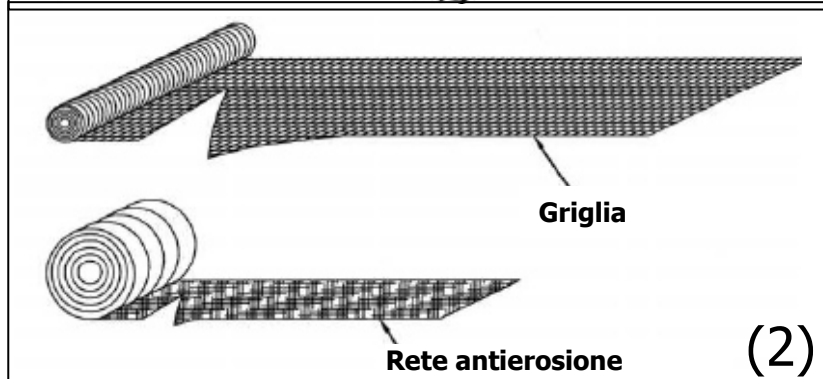
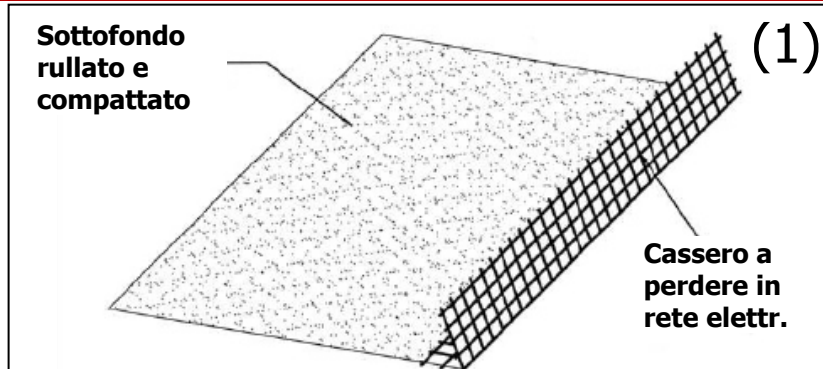
Esempi di applicazioni: elementi di arredo urbano



(Huesker,  
2008)

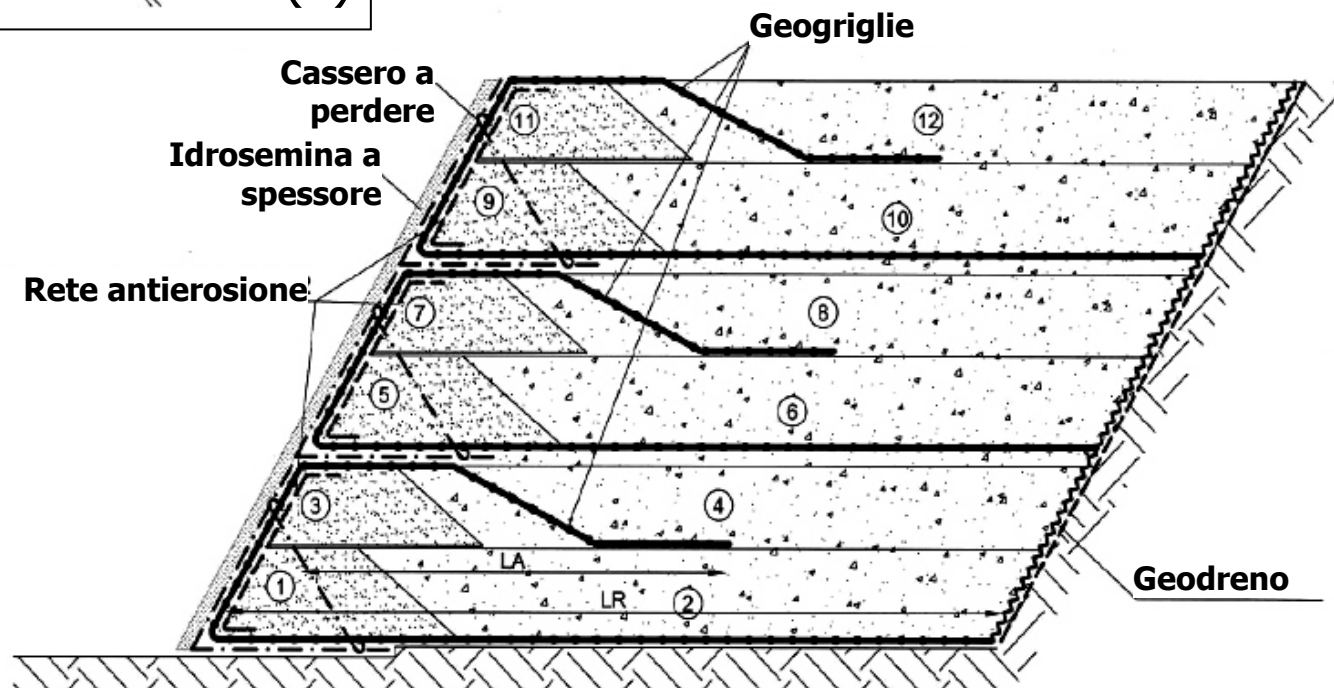
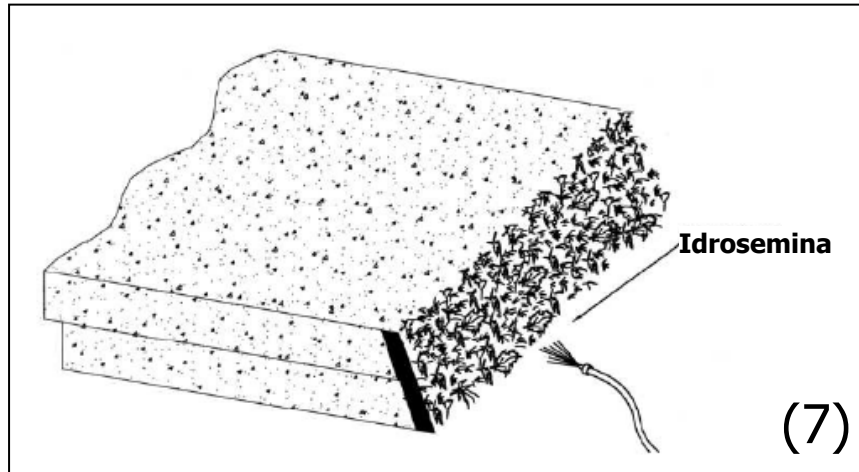


# Procedura costruttiva down-top





# Procedura costruttiva down-top





## VANTAGGI

- Economicità
- Velocità di installazione
- Eseguibile anche su pendenze elevate e luoghi poco accessibili
- Facile da abbinare ad altre strutture
- Limitato impatto ambientale

## SVANTAGGI

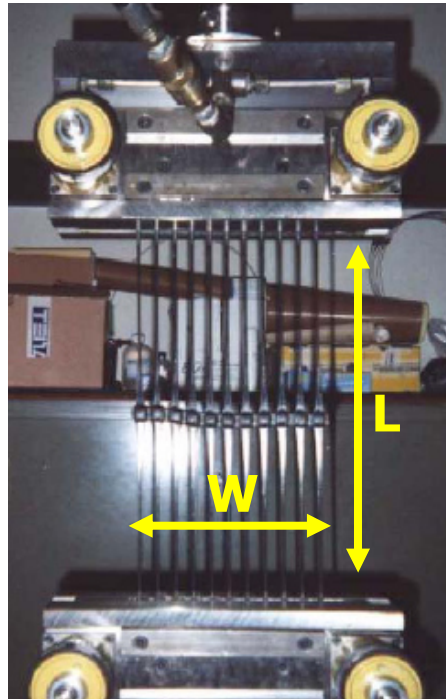
- Richiede uno sbancamento fino alla fondazione (garantendo un'opportuno approfondimento del piano di posa)
- Richiede esperienza ed attenzione ai dettagli
- Richiede utilizzo di terreni di riempimento di buona qualità

# Comportamento dei diversi componenti

## Resistenza a trazione dei geosintetici



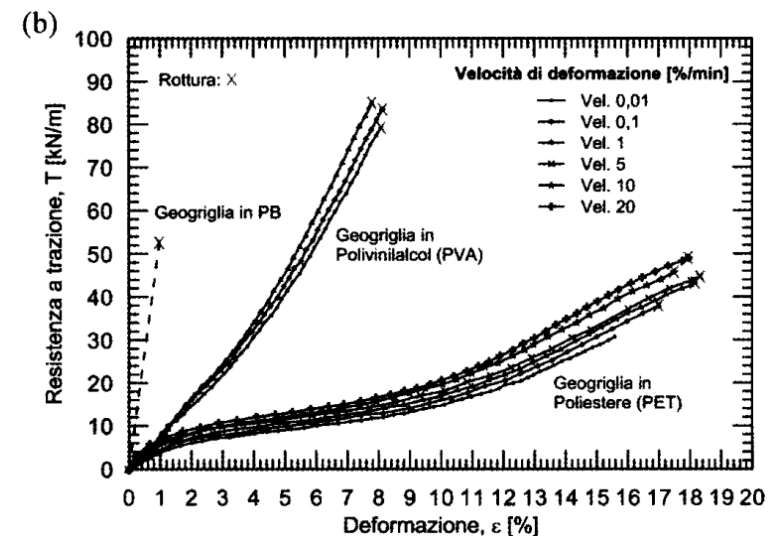
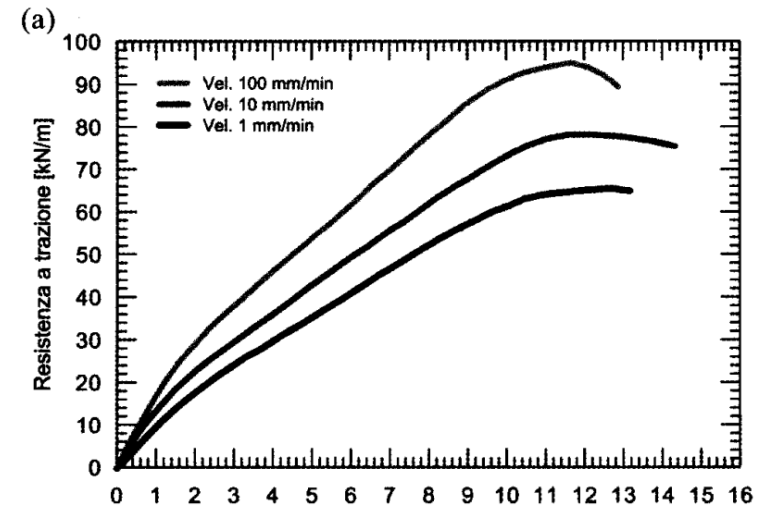
Prova di trazione a breve termine su banda larga (ISO 10319):  $T_{R0}$  (kN/m)



$W = 200 \text{ mm}$

$L \geq 100 \text{ mm}$

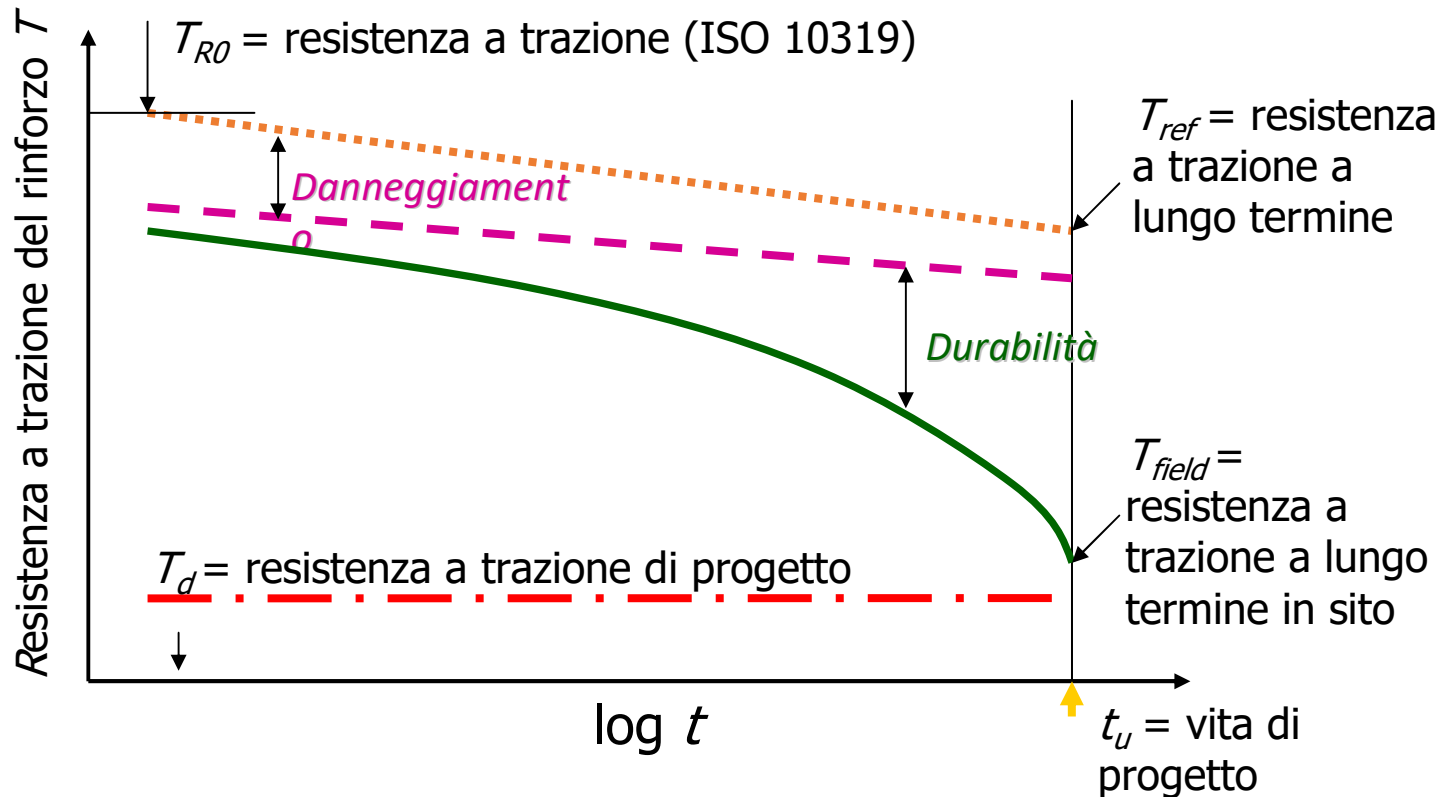
Materiali plastici sensibili agli effetti del tempo: viscosità, invecchiamento, attacco chimico, biologico e da raggi UV.





# Comportamento dei diversi componenti

## Resistenza a trazione dei geosintetici



La trazione di progetto per il rinforzo è:  $T_d = T_{RO} / \gamma_{gsy}$

Con:  $\gamma_{gsy} = \gamma_{creep} \gamma_{dan} \gamma_{ch} \gamma_{biol} \gamma_{junction} \gamma_M$

# Comportamento dei diversi componenti

## Resistenza a trazione dei geosintetici



Normative:

Germania EBGEO (2009):

$$\gamma_{gsy} = \gamma_{creep} \gamma_{dan} \gamma_{Junction} \gamma_{ch} \gamma_{biol} \gamma_M = 12.6 \div 55$$

UK- BS8006-1 (2010, 2011):

con richiamo alla ISO/TR 20432 (2007)

norma che racchiude le indicazioni per testare i materiali

$$\gamma_{gsy} = RF_{CR} RF_{ID} RF_W RF_{ch} f_s$$

Francia NF P94-270 (2007):

$$\gamma_{gsy} = \gamma_M / \rho_{end} \rho_{flu} \rho_{deg} = 4.5 \div 24$$

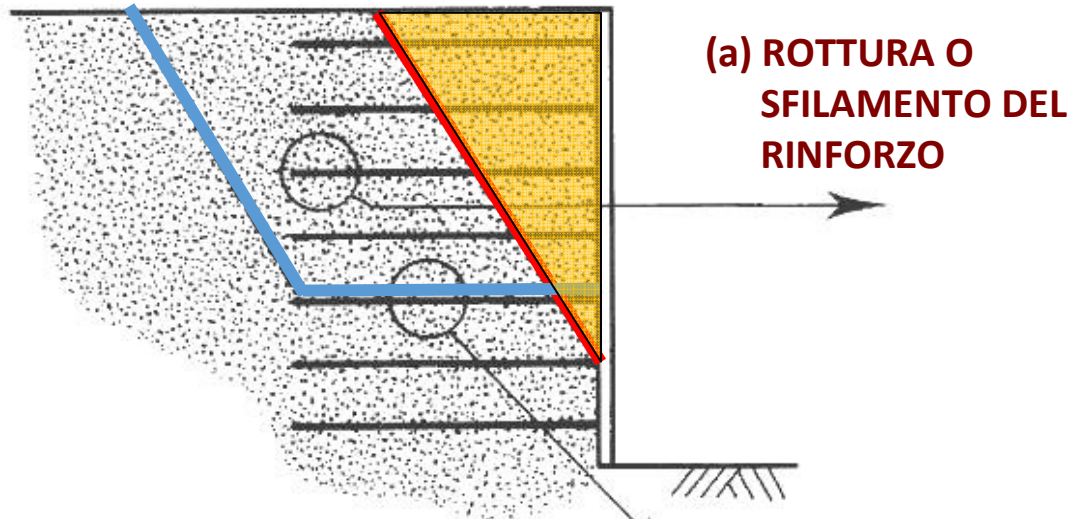
USA: GRI Standard Practice GT7 (2012):

$$\gamma_{gsy} = FS \cdot RF_{design}$$

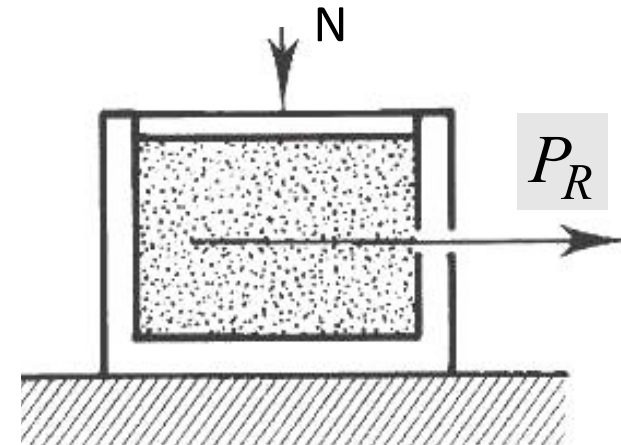
$$RF_{design} = RF_{ID} RF_{CR} RF_{CD} RF_{BD} RF_{JNT} = 12.9 \div 15.8$$

# Comportamento dei diversi componenti

## Attrito di interfaccia

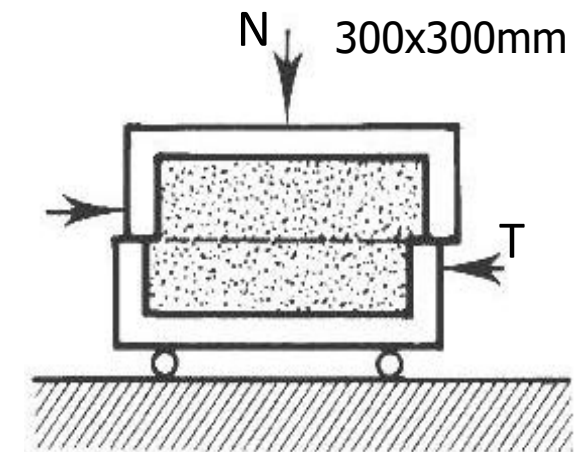
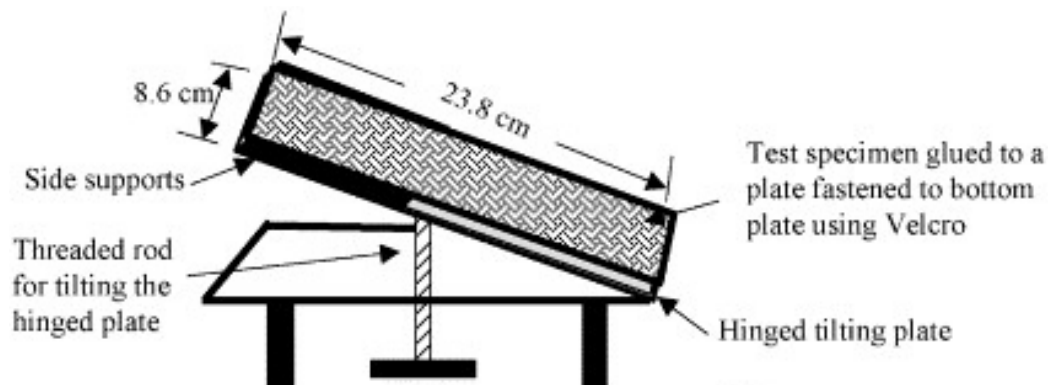


(b) SCORRIMENTO TERRENO-RINFORZO



Prove di filamento o pull-out

### Tilt test



Prove di scorrimento diretto

# Comportamento dei diversi componenti

## Attrito di interfaccia



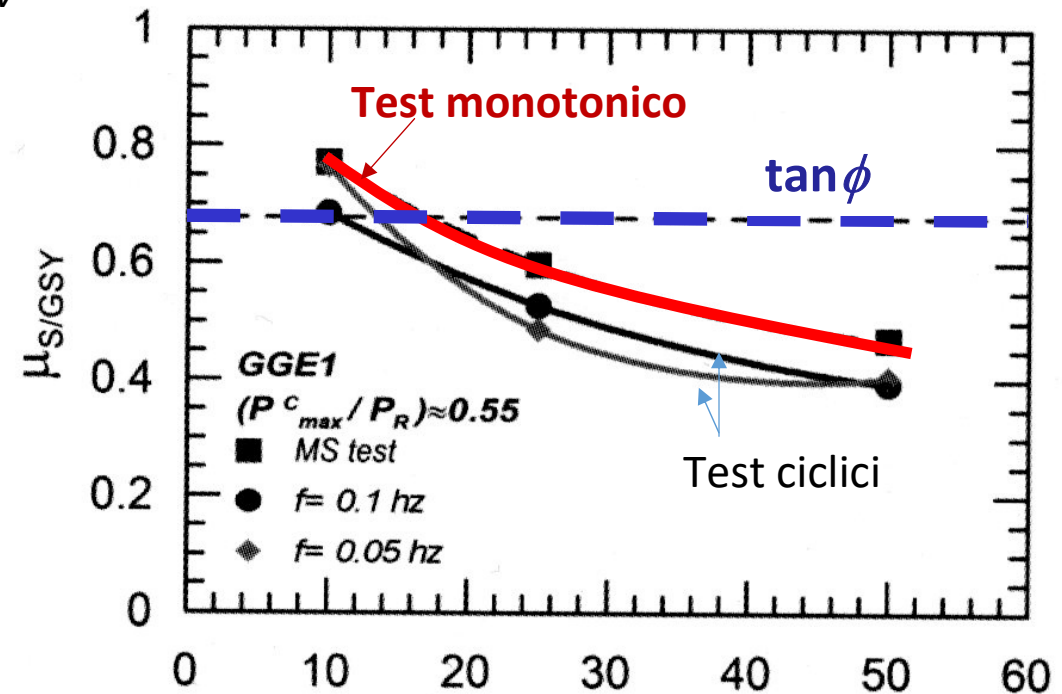
Sia  $P_R$  = la forza di pull-out per unità di sviluppo, il coefficiente di attrito terreno-rinforzo (**attrito apparente**) è:

$$\mu_{S/GSY} = \alpha \tan \phi = \frac{P_R}{2L_e \sigma_v}$$

$\alpha = 0,6 \div 1$  a seconda del geosintetico

=  $0,6 \div 0,8$  per geotessuti

=  $0,8 \div 1$  per geogriglie

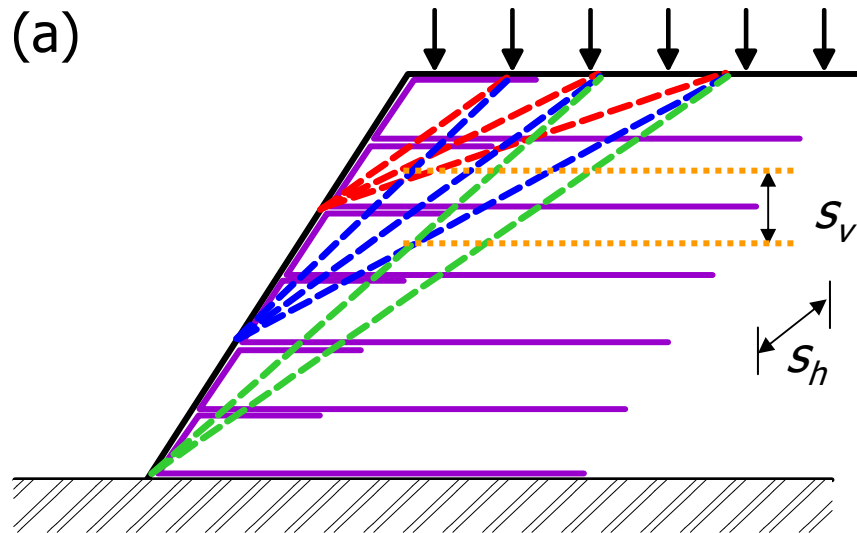


Prove di pull-out su geogriglia (Moraci)  $\sigma'_v$  [kPa]

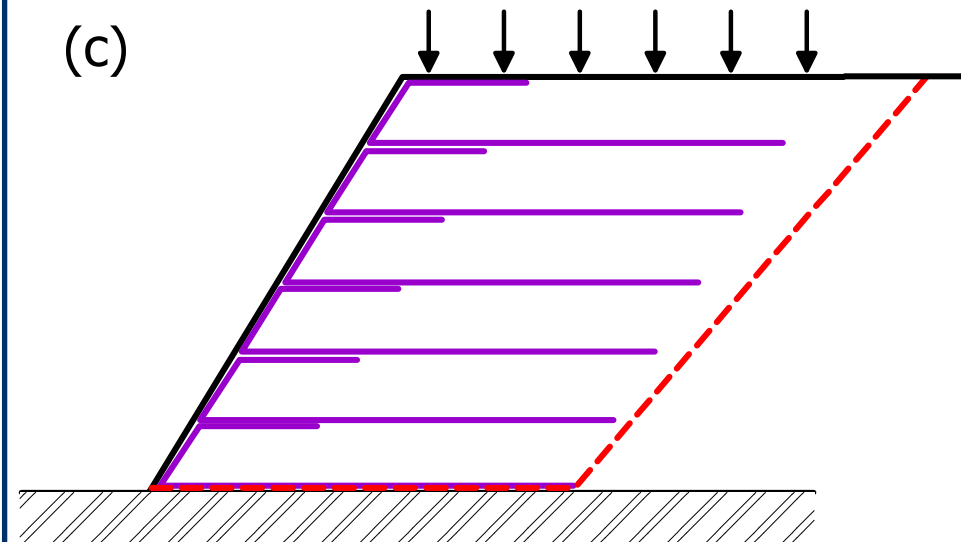
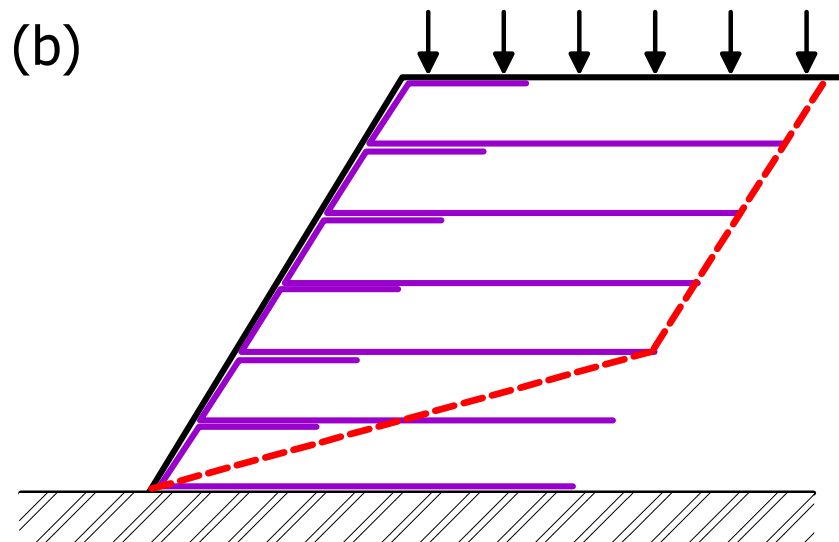
# Dimensionamento e verifica di una terra rinforzata



## Meccanismi di possibile rottura



- **Rottura interna** → Superfici di rottura che tagliano:
  - (a) tutti i rinforzi
  - (b) parte dei rinforzi
- **Scivolamento di base** → superficie di scivolamento sotto/sopra il primo rinforzo (c)



# Dimensionamento e verifica di una terra rinforzata

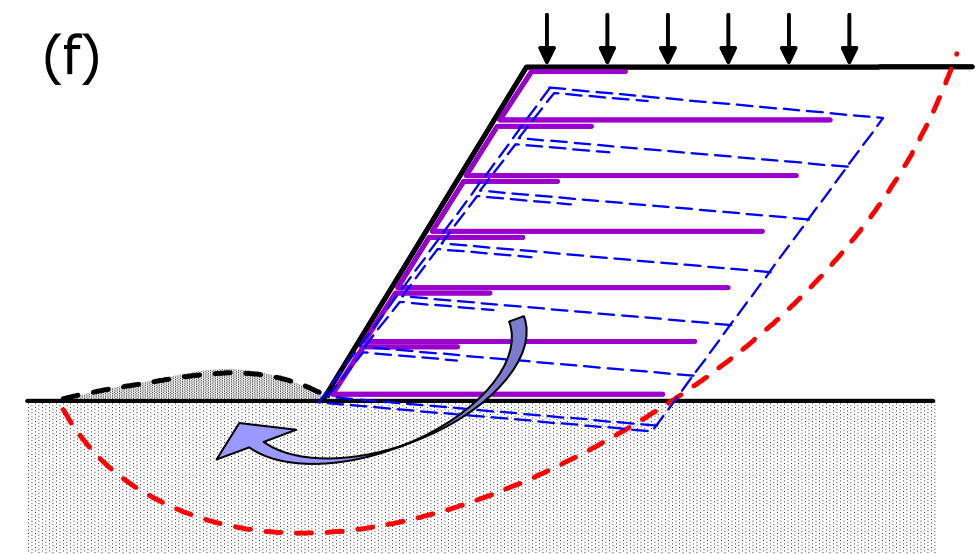
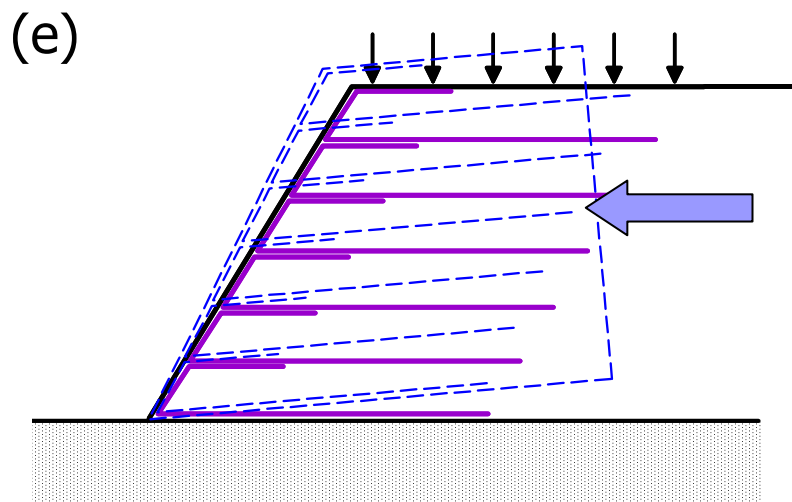
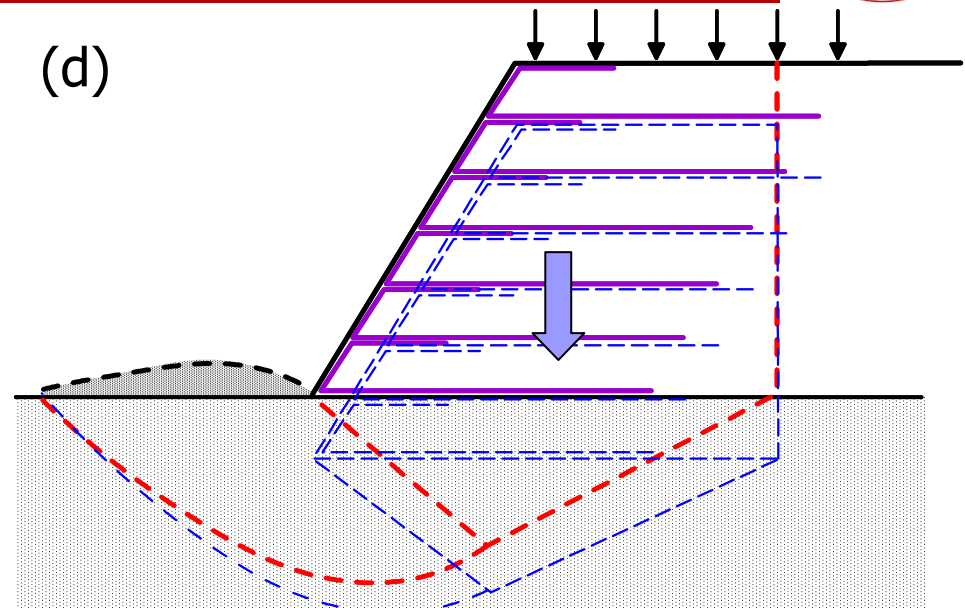


Meccanismi di possibile rottura

Capacità portate del terreno di fondazione (d)

Ribaltamento (e)

Stabilità globale (f)

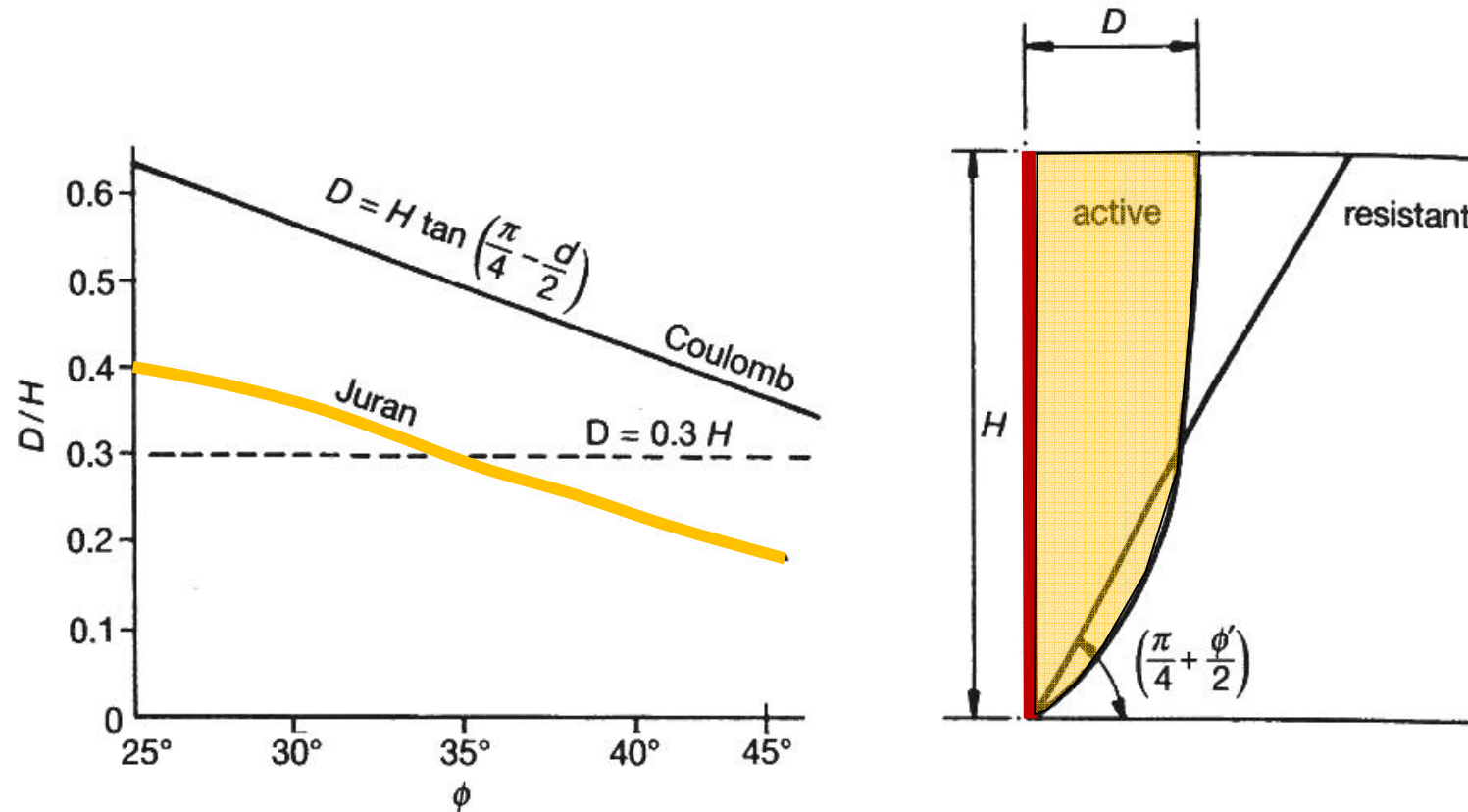


# Dimensionamento di una terra rinforzata

## Evidenze sperimentali



Si dimensiona per evitare **rottura interna** e **scivolamento alla base**.



Osservazioni sperimentali su terre rinforzate a parete verticale indicano una superficie di rottura interna assimilabile con una spirale logaritmica che intercetta il piano orizzontale a  $D = 0.3 H$



# Dimensionamento di una terra rinforzata

## Calcolo della tensione orizzontale sulla parete



Il profilo verticale della tensione orizzontale in presenza di carico al p.c. e paramento con inclinazione  $\theta > 63^\circ$  (Laba e Kennedy, 1986):

$$\sigma_{req} = \gamma z K_a + M \frac{2q}{\pi} (\beta - \sin \beta \cos 2\alpha)$$

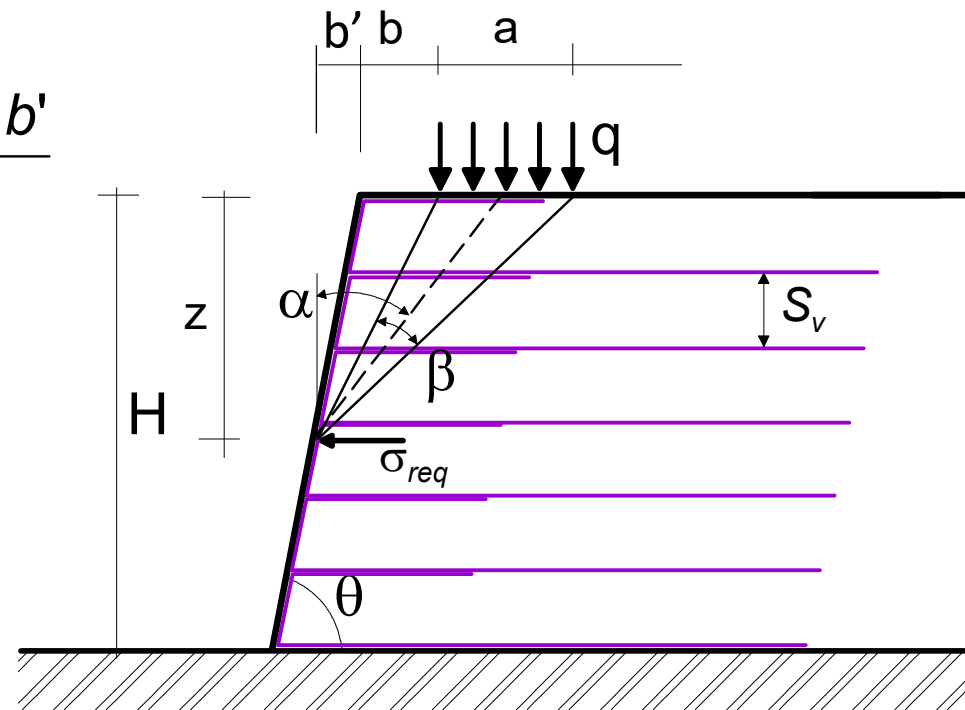
con:

$$\beta = \arctan \frac{a + b + b'}{z} - \arctan \frac{b + b'}{z}$$

$$\alpha = \arctan \frac{b + b'}{z} + \beta / 2$$

$$M = 1.4 - \frac{0.4b}{0.14H} \geq 1$$

$$b' = z / \tan \theta$$





# Dimensionamento di una terra rinforzata



## Tensione verticale

La tensione verticale alla profondità  $z$  in presenza di carico al p.c. e paramento con inclinazione  $\theta > 63^\circ$ :

$$\sigma_{v,ave} = \frac{\gamma z L + q'(L - x)}{L} \quad \text{per } L - x \leq a'$$

$$\sigma_{v,ave} = \frac{\gamma z L + q' a'}{L} \quad \text{per } L - x > a'$$

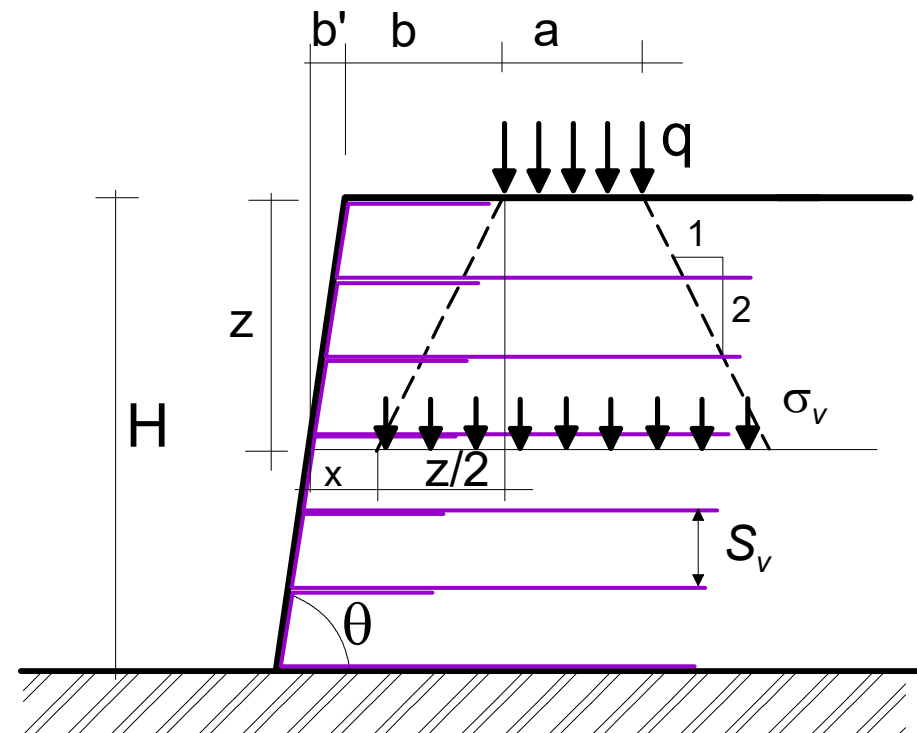
$L$  = lunghezza dei rinforzi

$$b' = z / \tan \theta$$

$$a' = a + z$$

$$q' = qa / a'$$

$$x = b + b' - z/2 \geq 0$$



**NB: in presenza di acqua, si deve valutare la tensione efficace**

# Dimensionamento di una terra rinforzata

## Trazione nel singolo rinforzo e lunghezza di ancoraggio



Detti  $s_v$  e  $s_h$  gli interassi verticale e orizzontale dei rinforzi ( $s_h = 1\text{m}$  per geosintetico), la trazione nel generico rinforzo  $i$ -esimo sarà:

$$T_i = \sigma_{req} s_v s_h \leq T_d$$

Nelle terre rinforzate in genere è  $s_v = 50\text{-}60 \text{ cm}$ .

La **lunghezza di ancoraggio**  $L_{bi}$  deve essere:

$$L_{bi} = T_i / (2W_r \sigma_v \alpha_b \tan \phi')$$

essendo:

$W_r$  = larghezza longitudinale del rinforzo (=1m per elementi continui)

$\sigma_v$  = tensione verticale media (normale al piano del rinforzo)

# Dimensionamento di una terra rinforzata



## Lunghezza totale e di risvolto

La lunghezza di ancoraggio è quella nella zona resistente. Si deve aggiungere la porzione interna al cuneo di spinta (zona attiva)  $L_{ci}$ .

$$L_{ci} = \frac{H - z}{\tan(45 + \phi'/2)}$$

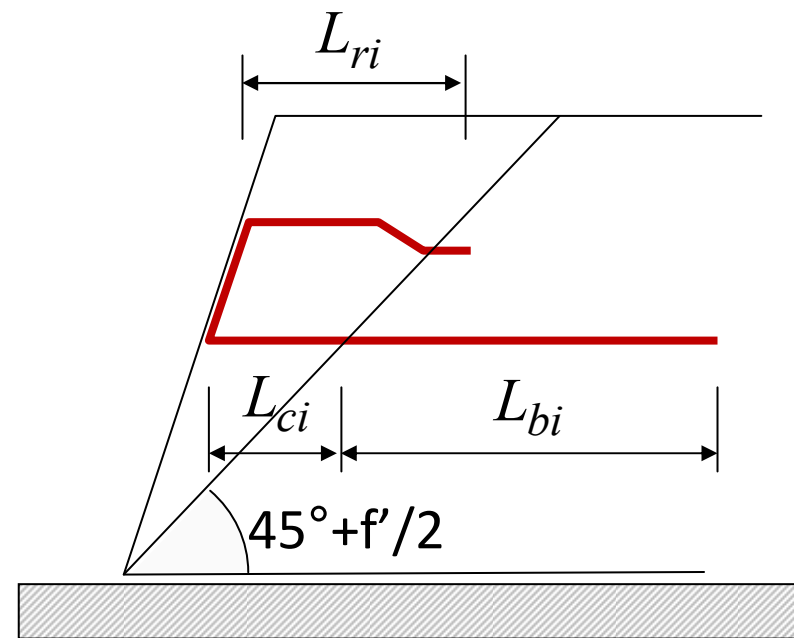
La lunghezza totale è:

$$L_i = L_{bi} + L_{ci}$$

Nelle terre rinforzate con geosintetici, la **lunghezza del risvolto** è:

$$L_{ri} = T_i / (4W_r \sigma_v \alpha_b \tan \phi')$$

Con un valore minimo suggerito di 1 m.



# Dimensionamento di una terra rinforzata



## Scivolamento alla base

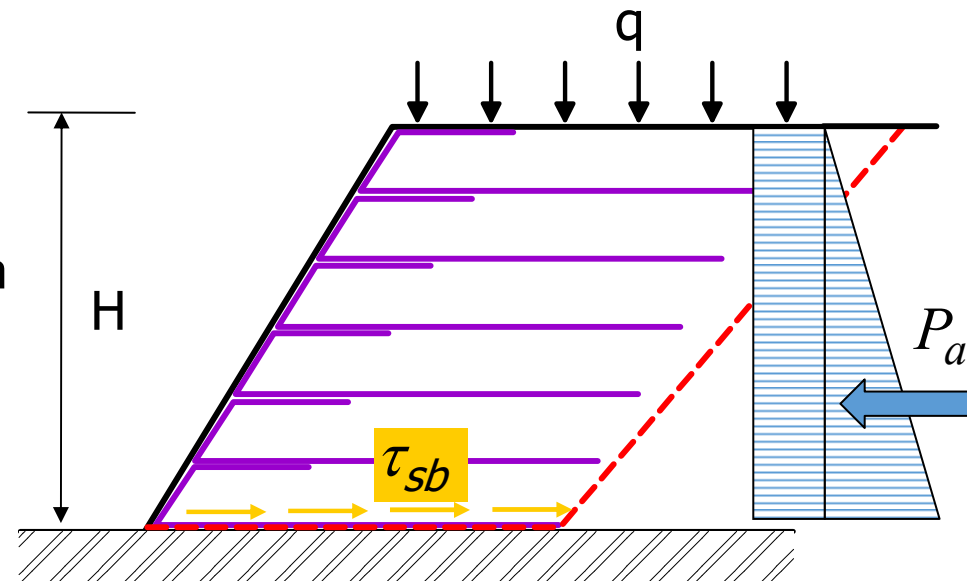
La lunghezza del rinforzo di base  $L_{Ri}$  deve essere verificata per l'instabilità per **scivolamento di base**, considerando l'equilibrio alla traslazione orizzontale.

$$P_a \leq L_{Rsb} \tau_{sb} \quad \longrightarrow \quad L_{Rsb} \geq \frac{P_a}{\sigma_{vb} \alpha_{sb} \tan \phi'}$$

$\tau_{sb}$  = sforzo di taglio sulla superficie del rinforzo

$\sigma_{vb}$  = tensione verticale alla base della terra rinforzata

$\alpha_{sb}$  = coefficiente per scorrimento diretto del terreno sul rinforzo



# Dimensionamento di una terra rinforzata

## Carico in superficie



Nella zona superiore le spinte diminuiscono (in assenza di carico al piano campagna si annullano).

Si preferisce tener conto di una spinta orizzontale  $\sigma_{\min}$  pari alla  $\sigma_{\text{comp}}$  indotta dalla compattazione del terreno durante la posa:

$$0.45\sqrt{\gamma Q} \leq \sigma_{\text{comp}} \leq 0.9\sqrt{\gamma Q}$$

Con  $Q$  = carico dinamico del compattatore (kN/m).

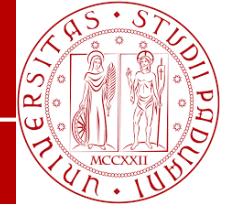
Si suggerisce  $\sigma_{\text{comp}} = 10\text{-}30$  kPa.

## Verifiche

Le verifiche di capacità portante, ribaltamento e stabilità globale sono quelle caratteristiche delle opere di sostegno. In questo caso tutto l'insieme terreno+rinforzi è un grosso muro.

# Verifica della stabilità interna e/o globale

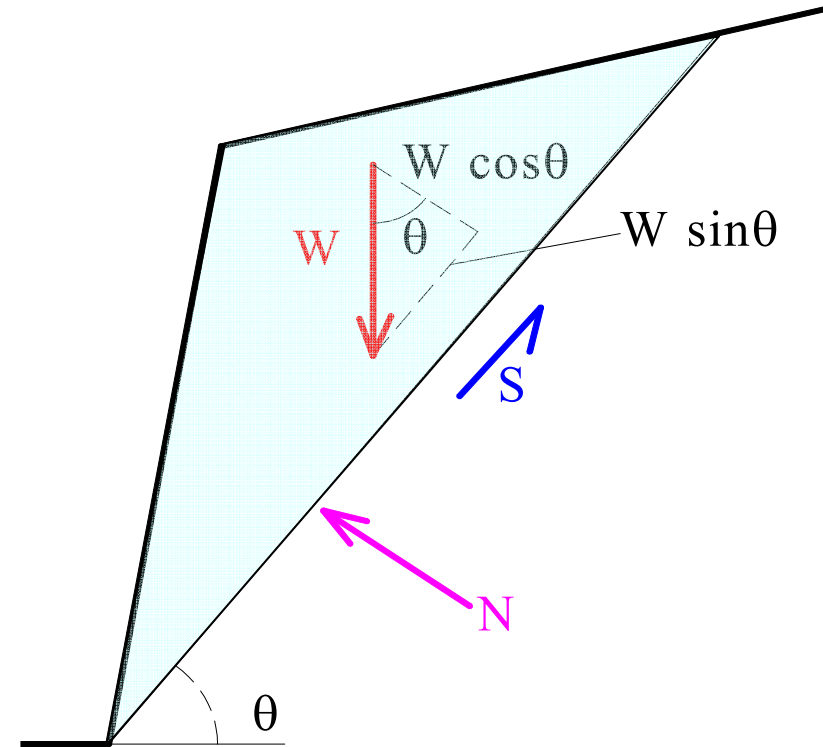
## Metodo dell'equilibrio limite



L'equilibrio limite di un cuneo nel **DM88** si esprimeva come:

$$FS = \frac{S}{W \sin \theta} = \frac{c' L + N \tan \phi'}{W \sin \theta}$$

$$FS = \frac{c' L + W \cos \theta \tan \phi'}{W \sin \theta}$$



Passando alle **NTC (2008)**:

$$E_d \leq R_d \quad \rightarrow \quad U_f = \frac{R_d}{E_d} \geq 1 \quad \rightarrow \quad U_f = \frac{\frac{c' L}{\gamma_{c'}} + W \cos \theta \frac{\tan \phi'}{\gamma_{\tan \phi'}}}{\gamma_R \cdot W \sin \theta} \geq 1$$

# Verifica della stabilità interna e/o globale

Metodo dell'equilibrio limite



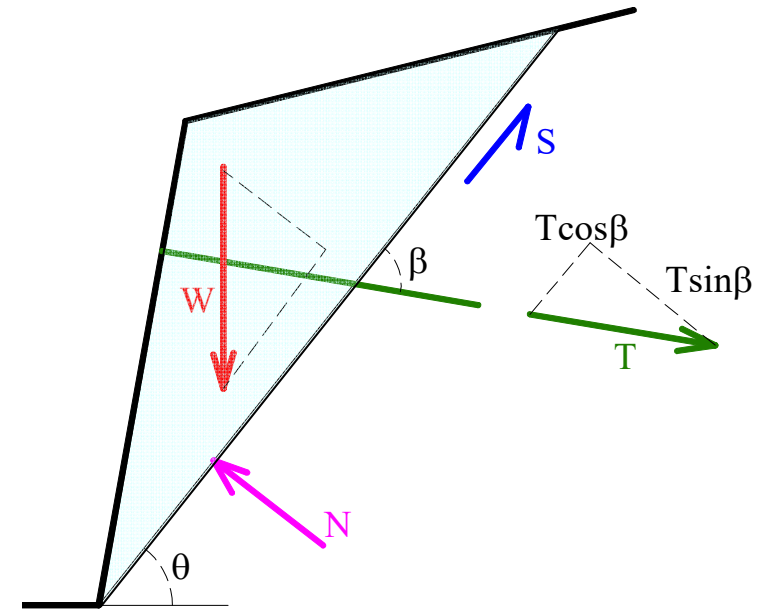
Cuneo con rinforzo che esplica una trazione T fissa

Nel DM88

$$FS = \frac{c'L + (W \cos \theta + T \sin \beta) \tan \phi'}{W \sin \theta - T \cos \beta}$$

Nel NTC2008

$$U_f = \frac{\frac{c'L}{\gamma_{c'}} + \left( W \cos \theta + \frac{T}{\gamma_T} \sin \beta \right) \frac{\tan \phi'}{\gamma_{\tan \phi'}}}{\gamma_R \cdot \left( W \sin \theta - \frac{T}{\gamma_T} \cos \beta \right)} \geq 1$$



Questa idea è implementata nei codici di analisi con il metodo dei conci, tenendo conto di T variabile con la porzione in zona passiva e delle altre eventuali forze agenti sul cuneo (Sovraccarico, forze pseudostatiche, ecc.).



**GRAZIE PER  
L'ATTENZIONE**



<http://divisare.com/projects/135270-Mario-Carminati-dottore-agronomo-Manolo-Caglioni-terre-armate-muri-verdi/images/3200940>