



Ordine degli Ingegneri
della Provincia di Udine

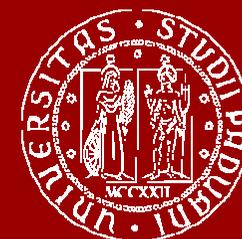


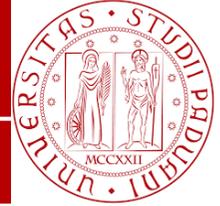
Aspetti teorici del rinforzo del terreno e funzionamento delle terre rinforzate

Prof. ing. Simonetta Cola

Dipartimento ICEA - Università di Padova

Udine – 21 ottobre 2016

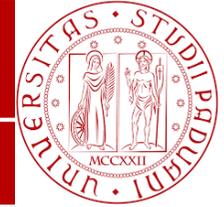




1. Perché il rinforzo del terreno?
2. Resistenza di un terreno rinforzato
3. Fibre nel rinforzo diffuso
4. Rinforzo sotto fondazione superficiale
5. Rinforzo sotto rilevato su terreno molle
6. Terre rinforzate

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

Perchè il rinforzo del terreno?



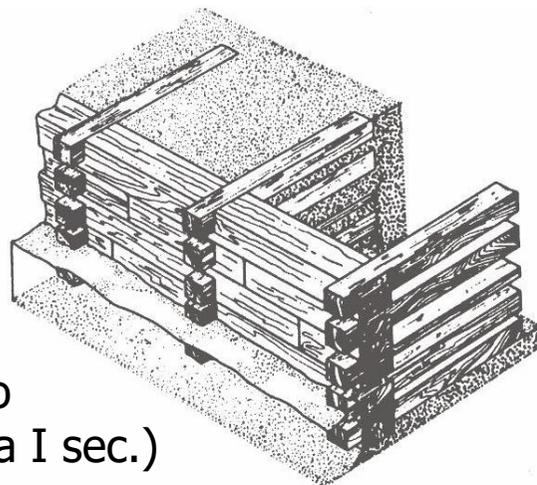
Il rinforzo del terreno è una tecnica usata fin dall'antichità e non solo dal genere umano.



Grande Muraglia (Cina 215 a.c.)



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



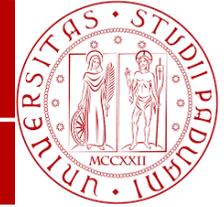
Muro di sponda romano (Tamigi, Londra I sec.)



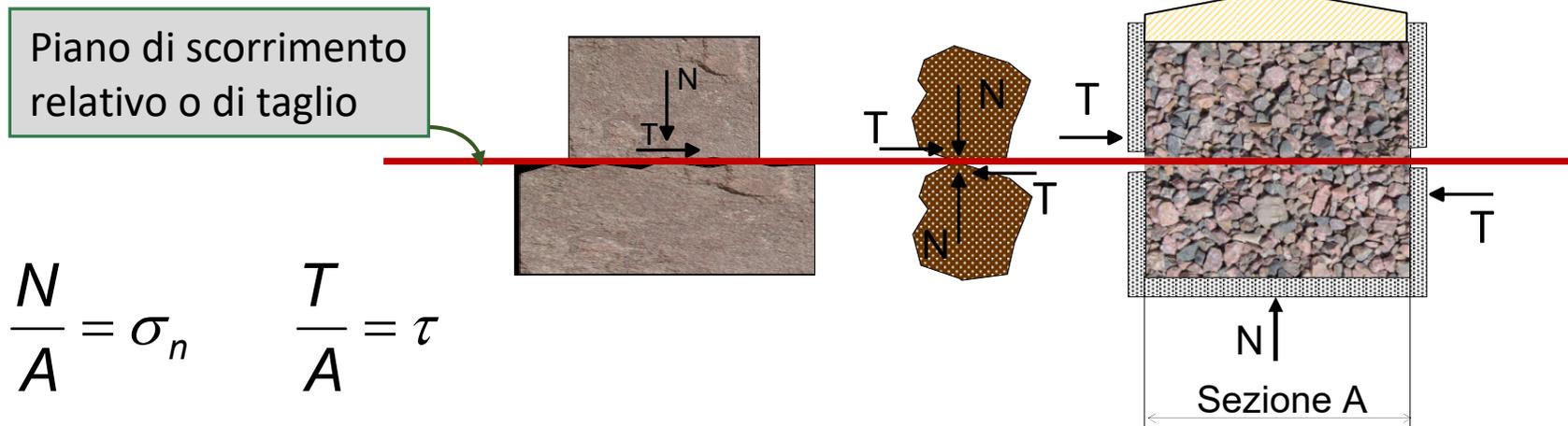
Nido di rondine (anno?)

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.

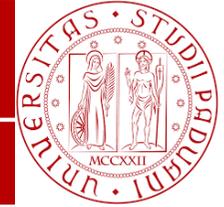


Lo scorrimento relativo ha luogo quando il rapporto tra la forza di taglio T e la forza normale N applicate su una superficie raggiunge il valore limite pari a: $\mu = \tan \phi =$ **coefficiente di attrito**

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



ϕ = 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.

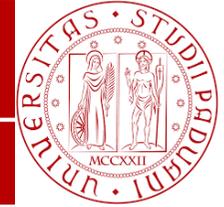


*NB: Il cono ha lo stesso angolo anche se formato per **deposizione in acqua ferma***



Perché il rinforzo del terreno?

Angolo di attrito e coesione



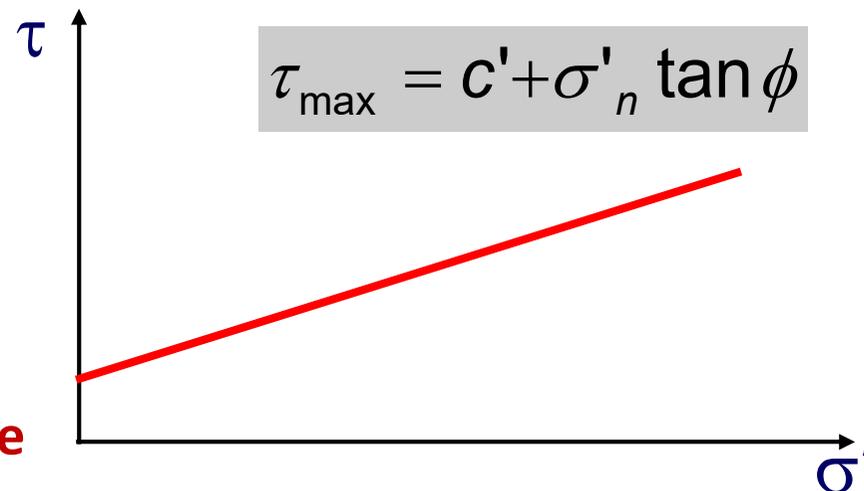
Poiché spesso il terreno contiene acqua la resistenza deve essere espressa in termini di **tensioni efficaci**.

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.

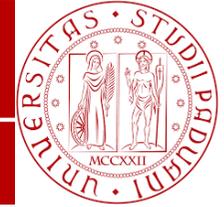
In tal caso il terreno ha una resistenza al taglio non nulla a tensione normale nulla.

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.**

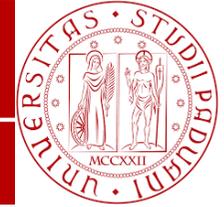
TERRENO RINFORZATO CON FIBRE DIFFUSE



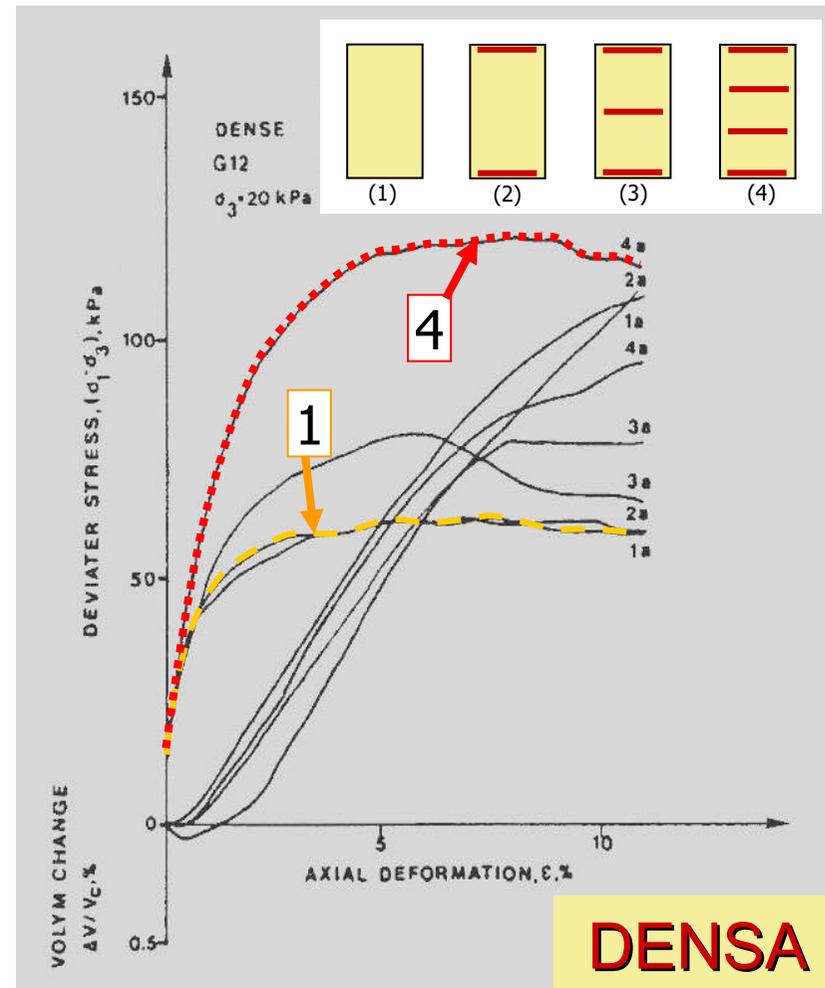
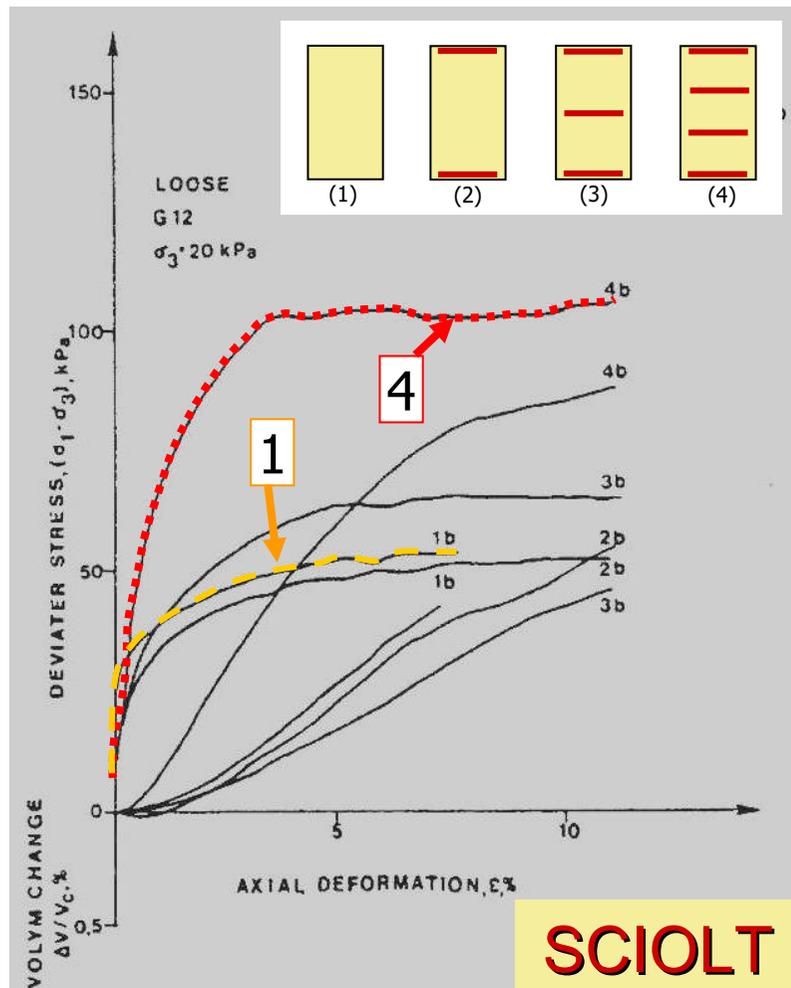
Fibre di polipropilene in sabbia
(Lirer et al., 2011)

Resistenza di un terreno rinforzato

Rinforzi in un elemento di volume

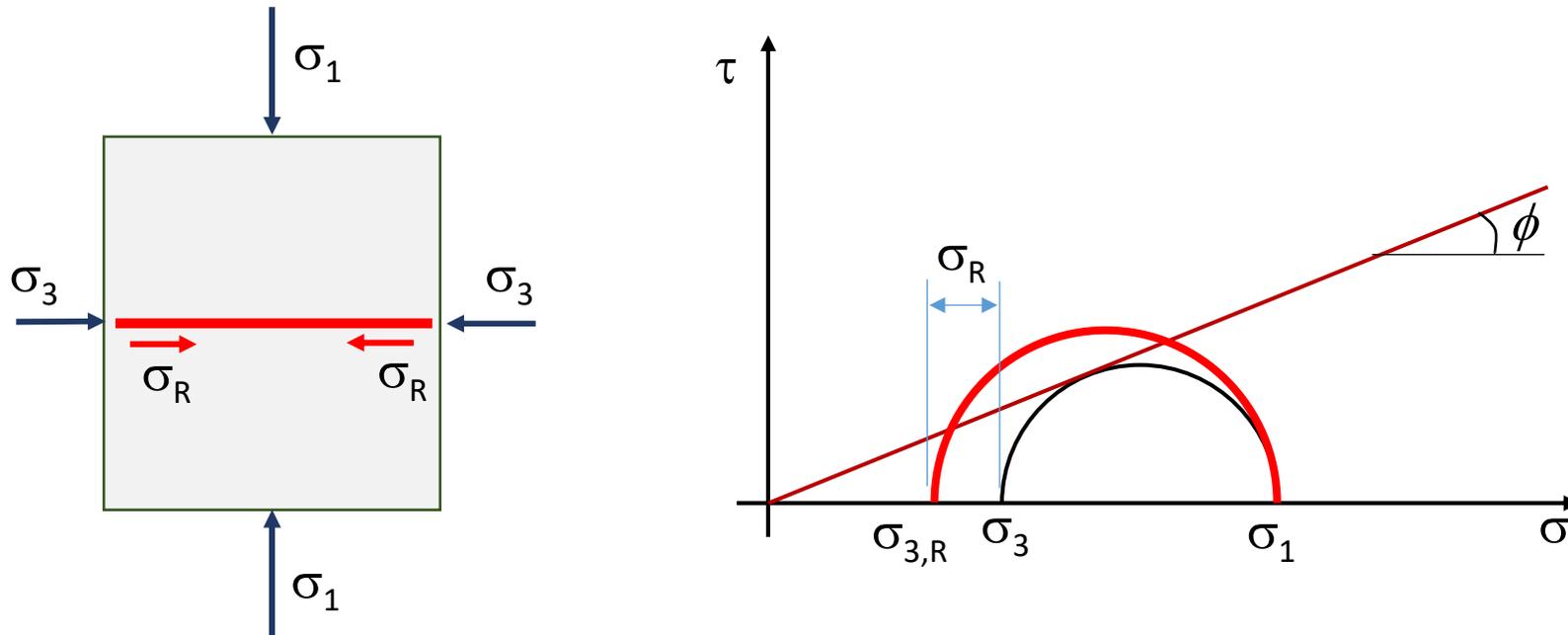
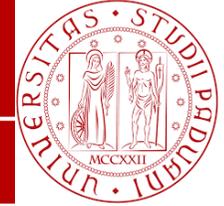


Prove triassiali drenate su una sabbia con rinforzi orizzontali



Resistenza di un terreno rinforzato

Rinforzo orizzontale in un elemento di volume



Nel terreno non rinforzato la minima tensione orizzontale é:

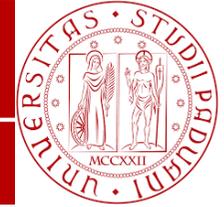
$$\sigma_3 = K_a \sigma_1 \quad \text{con} \quad K_a = \tan^2(45 - \phi/2) < 1$$

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

ove σ_R è il contributo di confinamento dato dalla fibra

Resistenza di un terreno rinforzato

Rinforzo orizzontale in un elemento di volume



Detto:

σ_s = **resistenza a trazione**
della fibra

τ_s = **attrito all'interfaccia**
terreno fibra

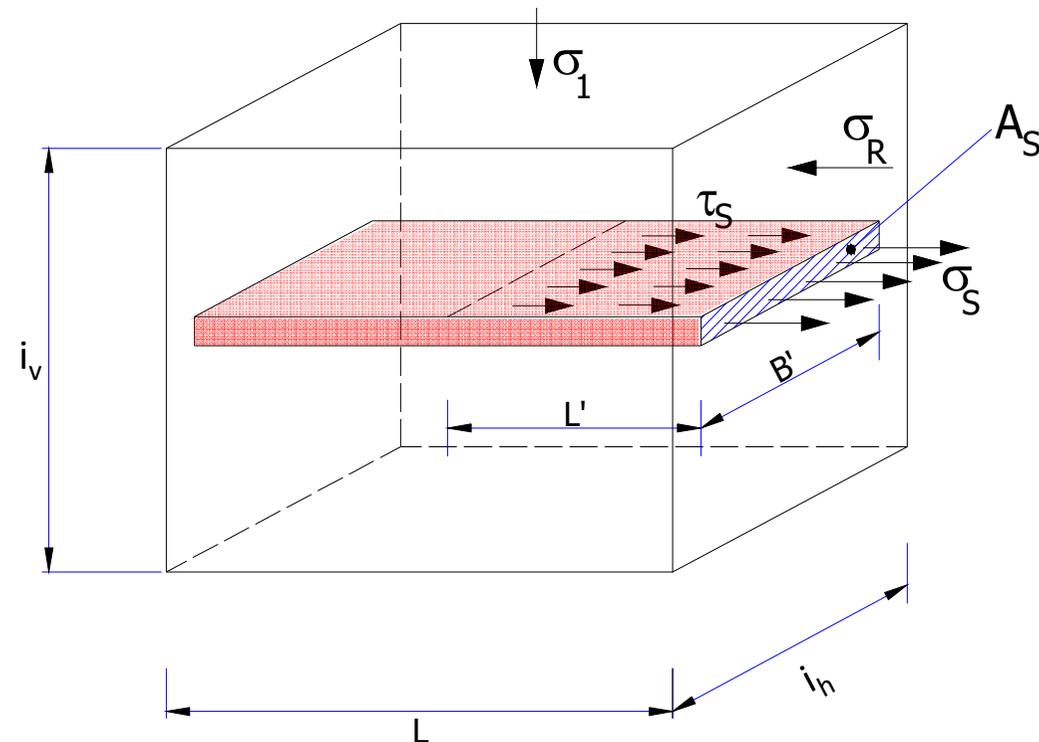
si possono avere due tipi di
rotture:

1) Troncamento della fibra se:

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

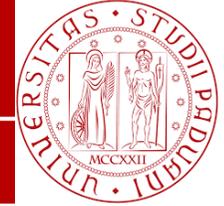
2) Sfilamento della fibra se l'attrito all'interfaccia è troppo piccolo per evitare lo scorrimento del terreno sulla fibra, pur essendo:

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



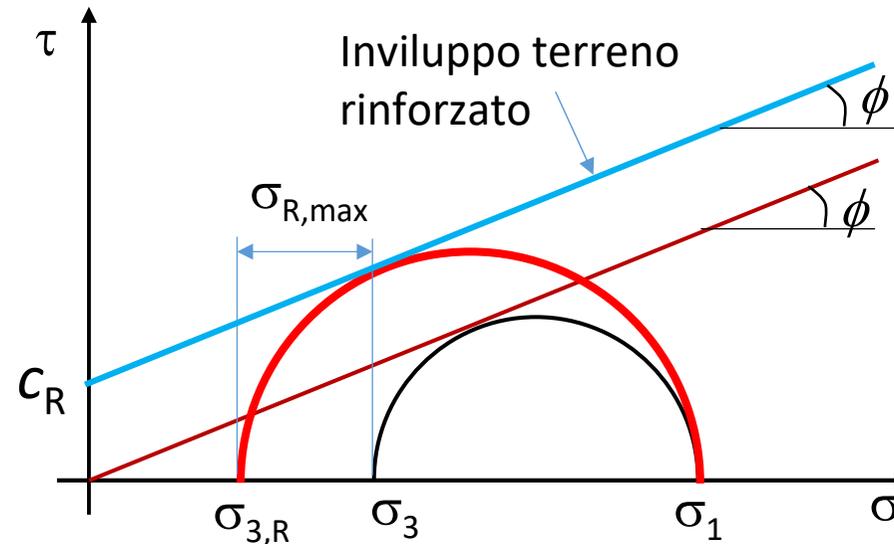
Resistenza di un terreno rinforzato

Rinforzo orizzontale: rottura per troncamento fibra



Nel caso di rottura per **troncamento**, essendo σ_s indipendente dalla tensione normale, il contributo σ_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:

$$\phi_R = \phi$$

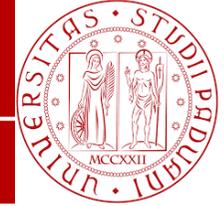
$$\sigma_{3,R} = K_a \sigma_1 - \sigma_{R,\max} = K_a \sigma_1 - 2c_R \sqrt{K_a}$$

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 σ_s .

Il contributo di confinamento σ_R cresce con la tensione verticale:

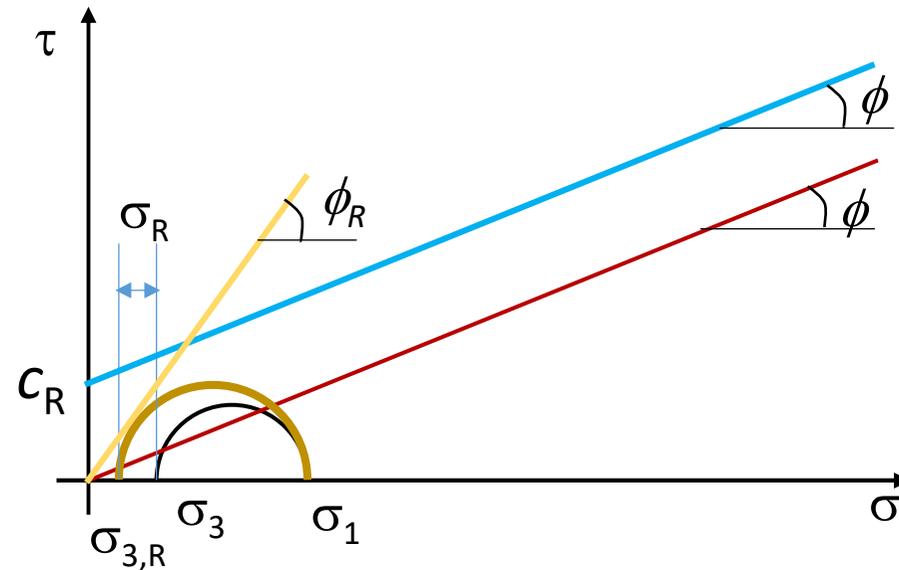
$$\sigma_{3,R} = \sigma_3 - F\sigma_1$$

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:



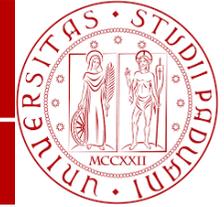
$$\sin \phi_R = \frac{\sigma_1 - \sigma_{3,R}}{\sigma_1 + \sigma_{3,R}}$$



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

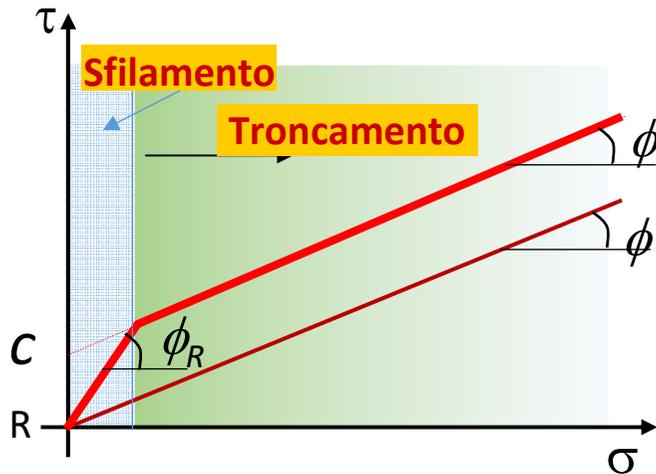
$$\phi_R > \phi$$

Resistenza di un terreno rinforzato

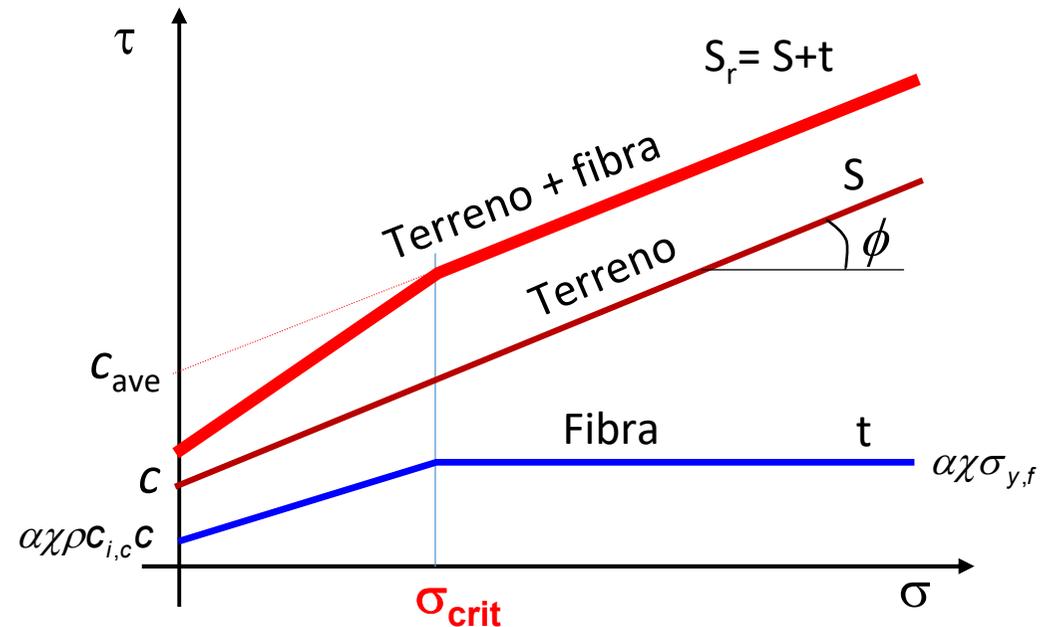


Fibre con distribuzione casuale: criterio di rottura secondo Zornberg (2002)

Per fibra orizzontale



Per fibre random (Zornberg, 2002)

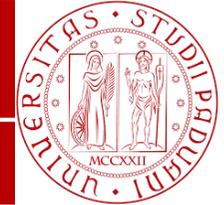


$$\sigma_{crit} = \frac{\sigma_{y,f} - \rho C_{i,c} C}{\rho C_{i,\phi} \tan \phi}$$

$\sigma_{y,f}$ = tensione di snervamento della fibra
 ρ = 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 σ_{ave} la tensione media attorno alle fibre (assunta pari alla tensione nel piano), χ il contenuto volumetrico in fibre e α 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

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

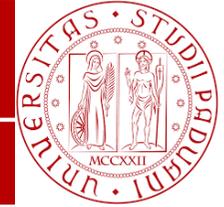
Per $\sigma_{ave} \geq \sigma_{crit} \rightarrow$ **troncamento**

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

Con

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

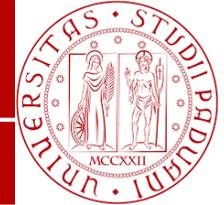
Esistono altri modelli: Michalowski (2008), Lirer (2011), Gao e Zhao (2013).



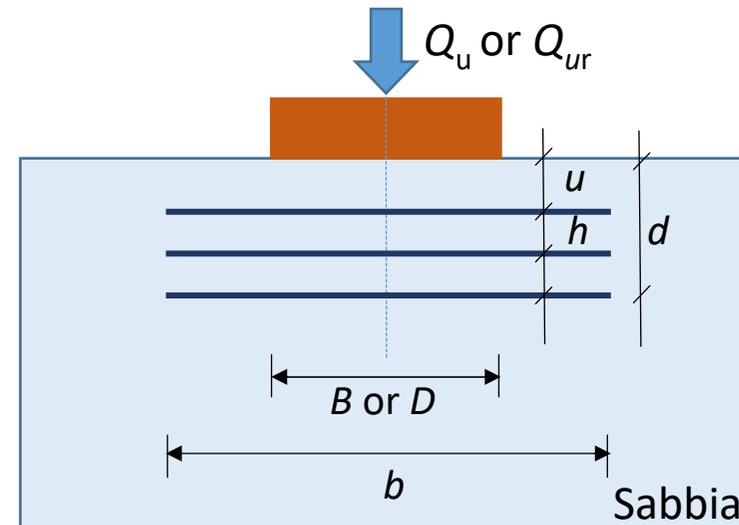
RINFORZI SOTTO FONDAZIONI SUPERFICIALI

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)

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

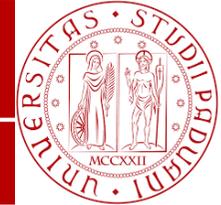
5. Spessore rinforzato ($d = u + (N-1)h$)

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

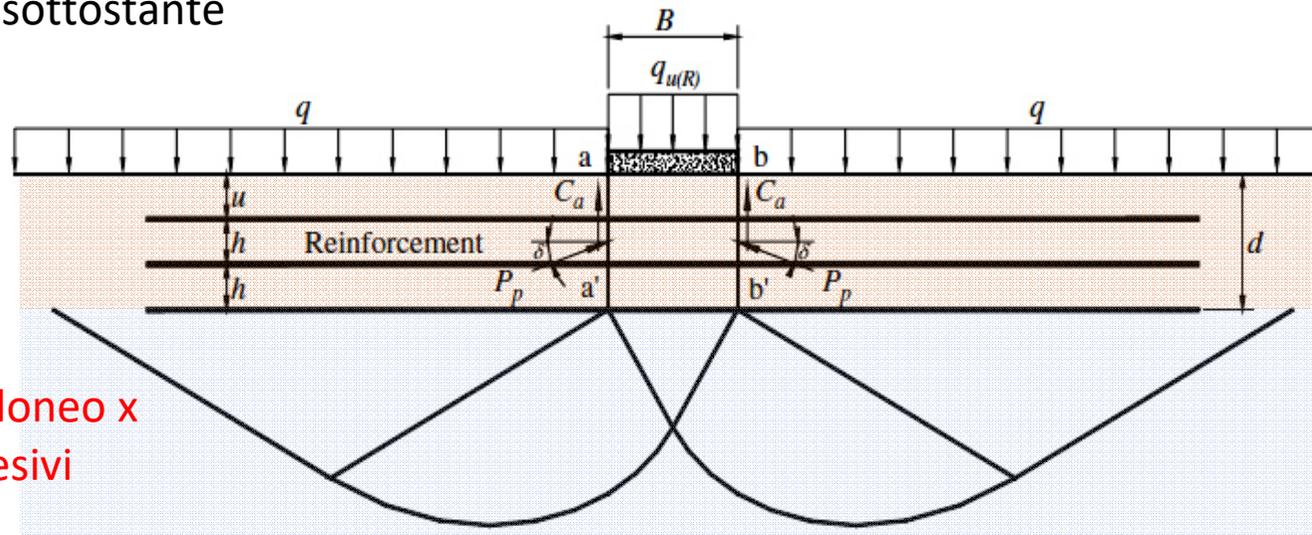
6. Resistenza e rigidità del rinforzo

Aumento della capacità portante

Meccanismi di rottura

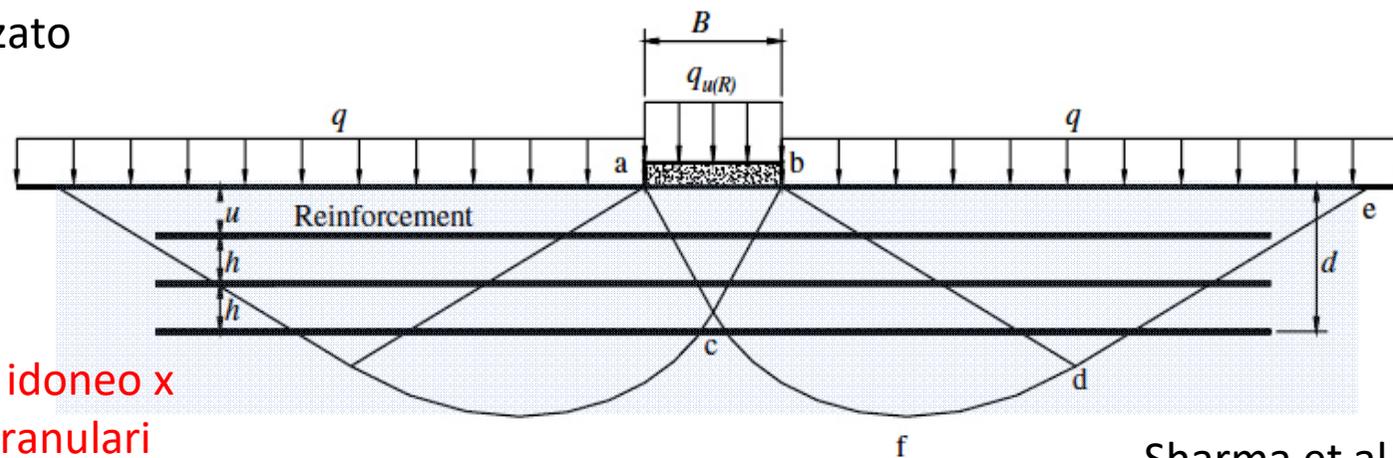


- a) Modello a 2 strati con resistenza molto diversa → Punzonamento e rottura del terreno sottostante



Modello idoneo x
terreni coesivi

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

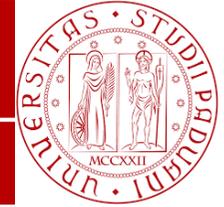


Modello idoneo x
terreni granulari

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.

γ_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

ϕ_t = angolo di attrito del terreno rinforzato

c_a = componente coesiva della resistenza lungo il lato della fondazione

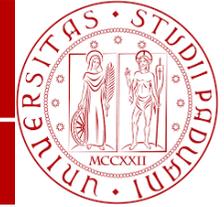
T_i = resistenza a trazione di ciascun rinforzo

δ = 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

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

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

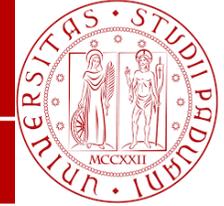
$$r_T = \frac{1}{2} - \frac{u + (i-1)h}{2H_f} \quad \text{se} \quad u + (i-1)h \geq \frac{B}{2} \tan\left(\frac{\pi}{4} + \frac{\phi}{2}\right)$$

H_f = profondità del piano di rottura

ϕ = angolo di attrito del terreno non rinforzato

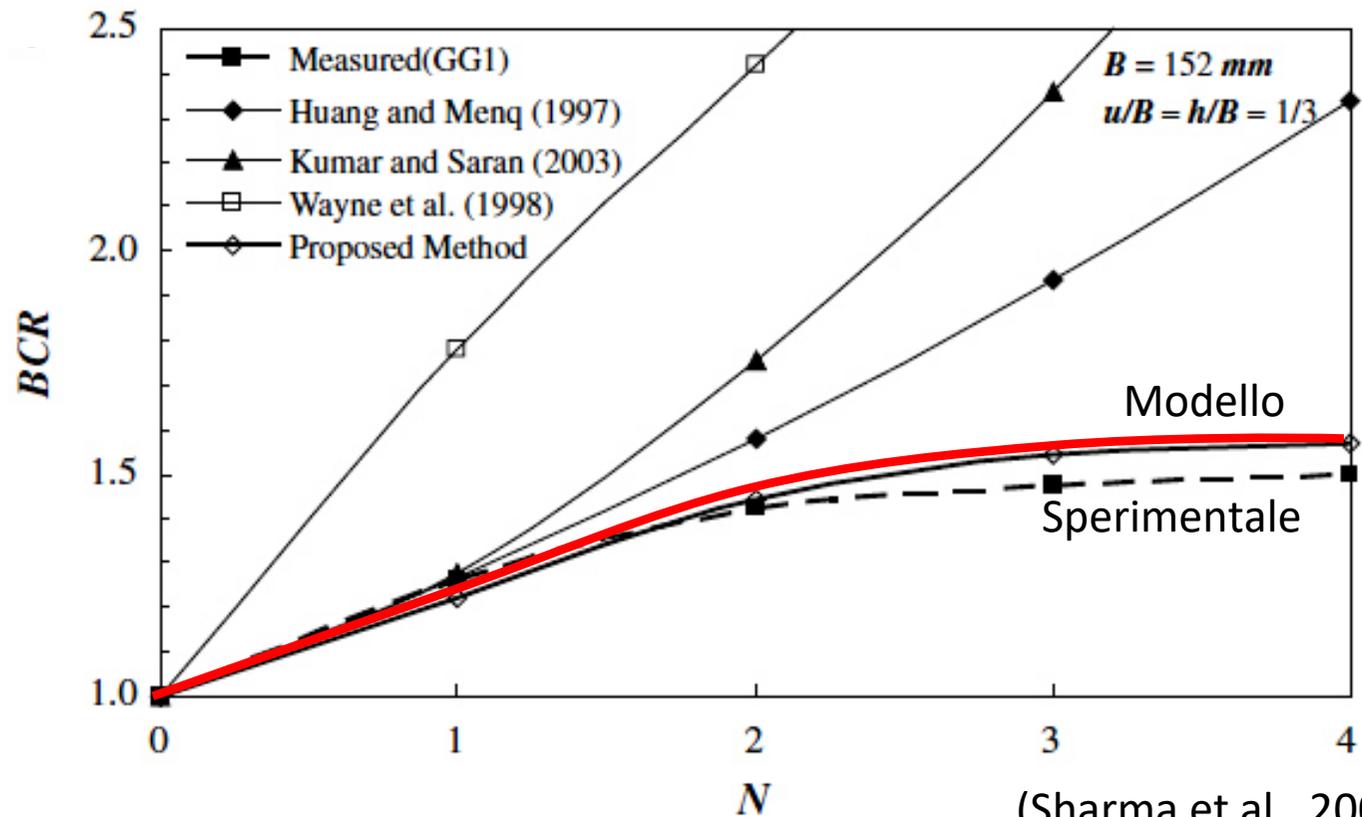
Aumento della capacità portante

Rottura strato rinforzato (Sharma et al., 2009)



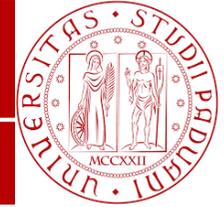
Confronto con altri modelli teorici e misure sperimentali

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



(Sharma et al., 2009)

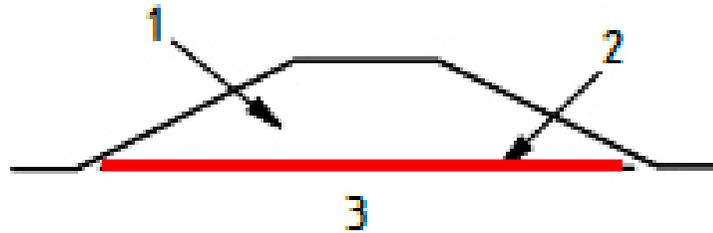
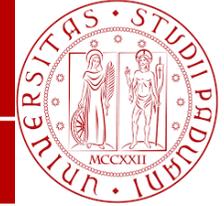
BCR può raggiungere anche valori di 2.5-3 a seconda dei geosintetici utilizzati



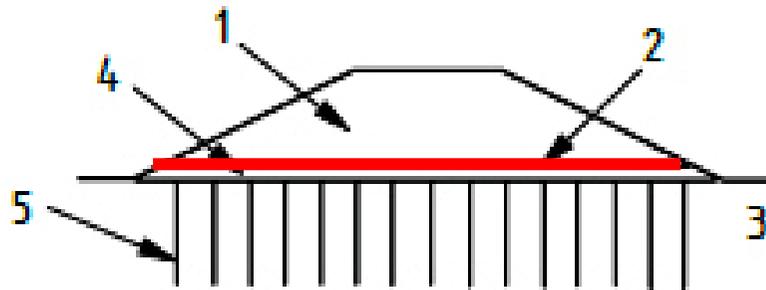
RINFORZI ALLA BASE DI RILEVATI SU TERRENI MOLLI

RILEVATO RINFORZATO ALLA BASE

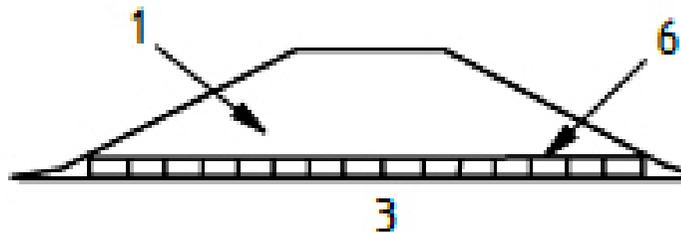
Possibili schemi



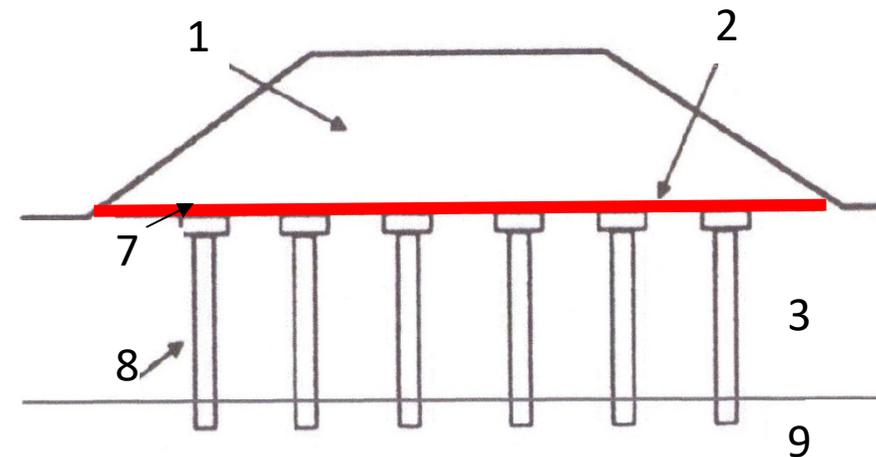
a) Rinforzo alla base



b) Rinforzo alla base + dreni



c) Materasso in pietre



d) Rinforzo + pali

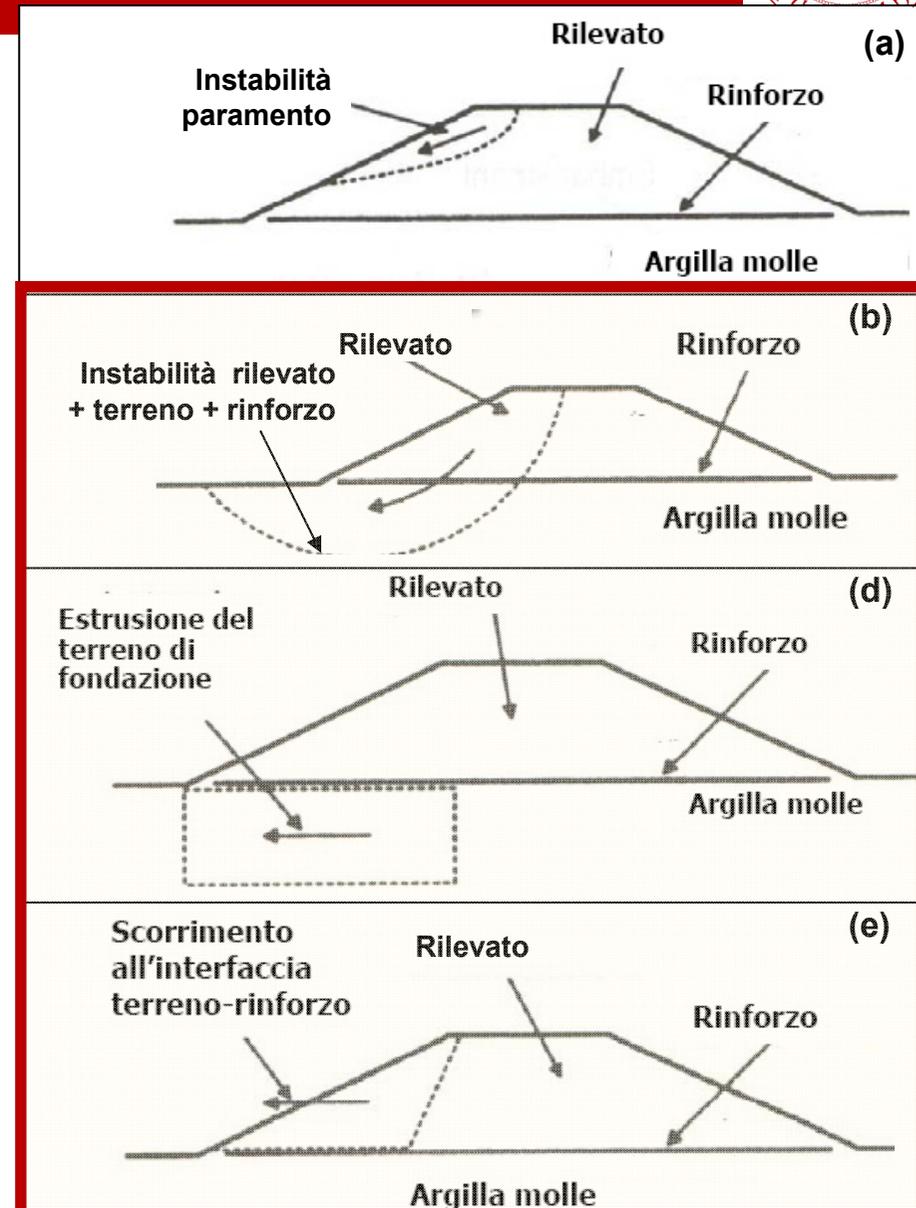
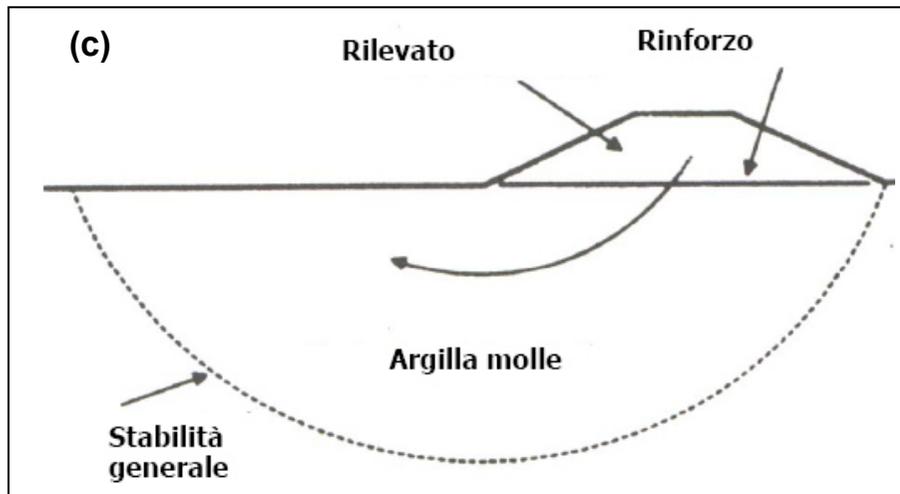
- 1 – Rilevato
- 2 – Rinforzo (geosintetico)
- 3 – Terreno molle
- 4 – Materasso di drenaggio
- 5 – Dreni verticali
- 6 – Materasso in pietre
- 7 – Pulvino
- 8 – Pali
- 9 – Substrato rigido

RILEVATO RINFORZATO ALLA BASE

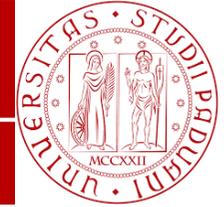


Possibili SLU

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



RILEVATO RINFORZATO ALLA BASE

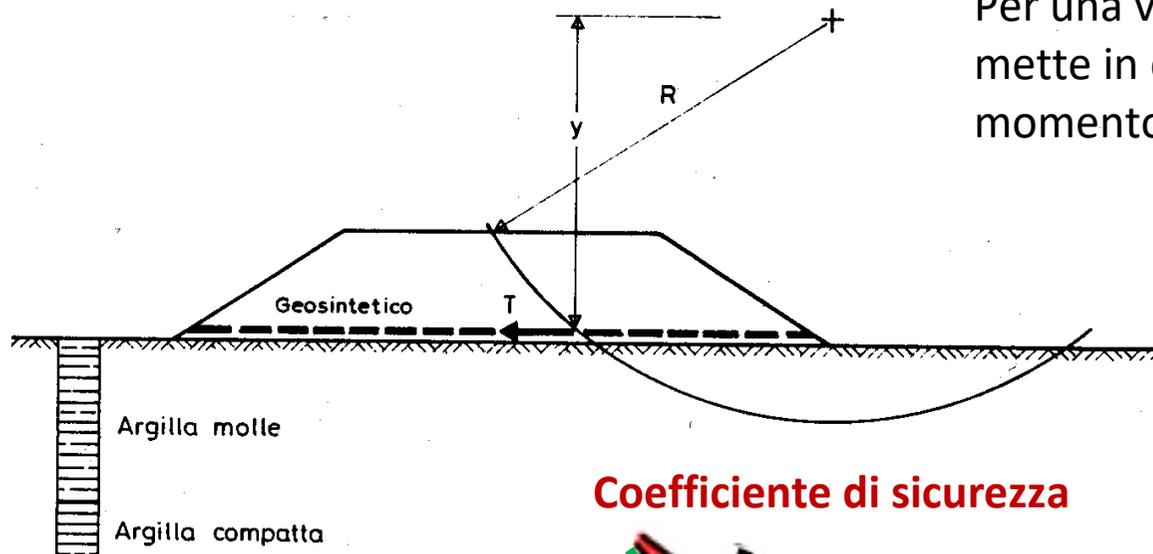


Intabilità globale rilevato + terreno + rinforzo

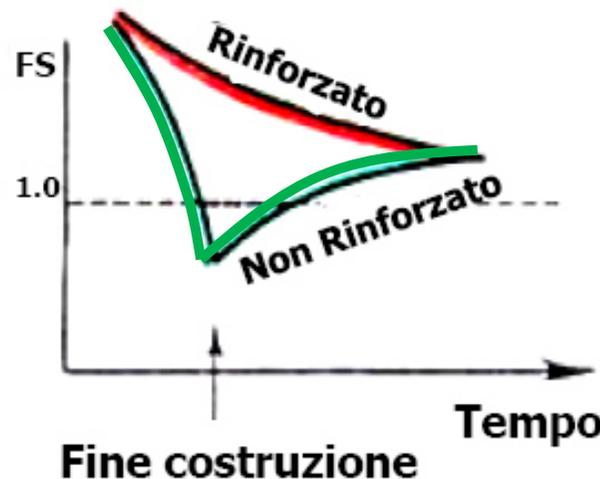
L'analisi si esegue con il Metodo dell'Eq. Limite o agli Elementi finiti.

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

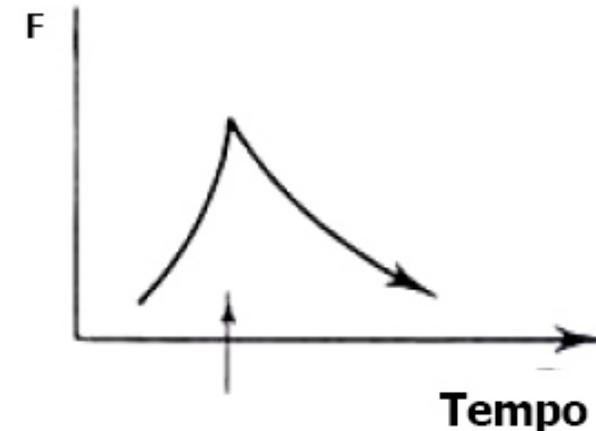
$$M_{gys} = Ty$$



Coefficiente di sicurezza

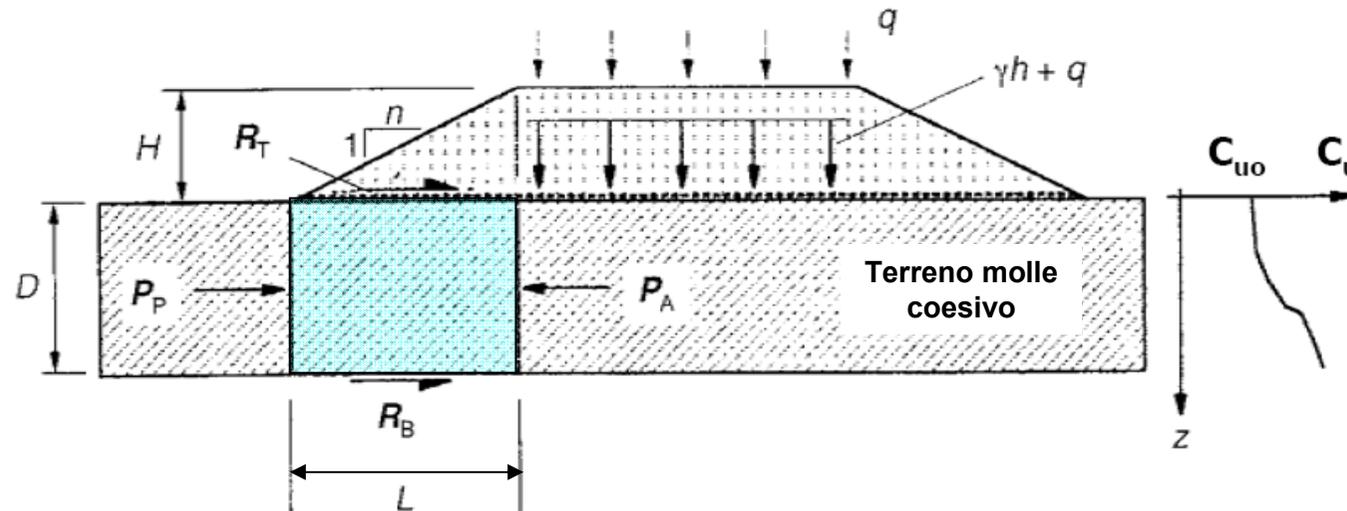
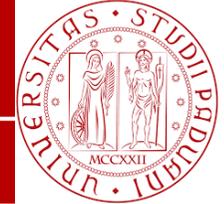


Forza nel rinforzo



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

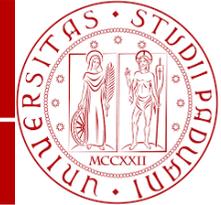
γ_f = peso di volume del terreno molle

α = coefficiente di attrito
all'interfaccia terreno rinforzo

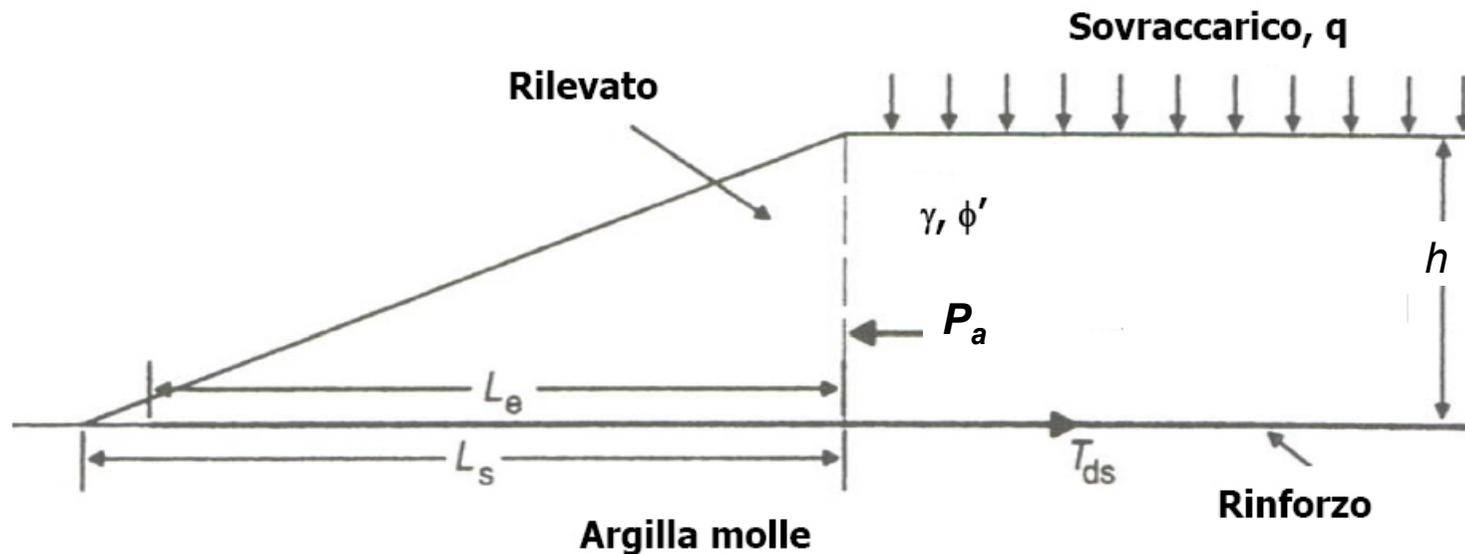
c_{uo} , c_{ub} e c_{um} = resistenza al taglio
non drenata alla base del rinforzo,
alla base dello strato molle e
media

RILEVATO RINFORZATO ALLA BASE

Sollecitazioni nel scivolamento di parte del rilevato



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



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

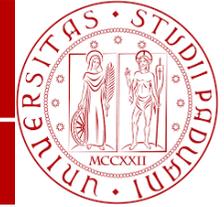
Dato che squeezing e scivolamento si possono verificare insieme, la trazione nel rinforzo deve essere:

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

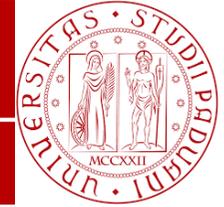
Inoltre, tenendo conto di un carico crescente sulla lunghezza L_E , questa lunghezza deve essere:

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

No scivolamento



TERRE RINFORZATE



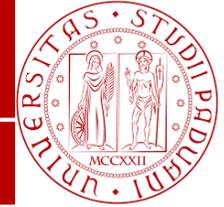
I rinforzi possono essere:

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

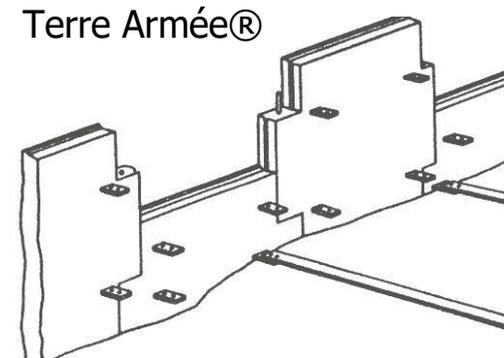
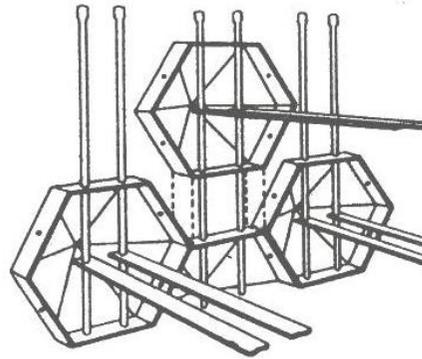
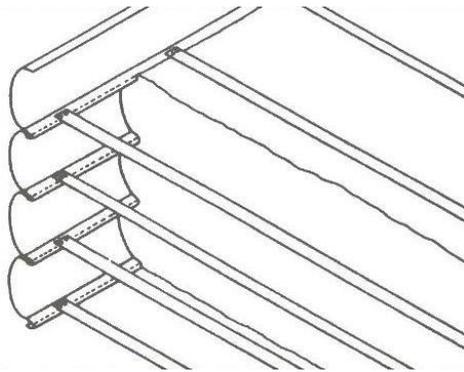
Nelle opere di sostegno sono sempre abbinati ad **elementi di contenimento** (pannello in c.a. prefabbricati o metallico, rete, gabbioni, ecc.) che costituiscono la parete a vista.

Terre rinforzate

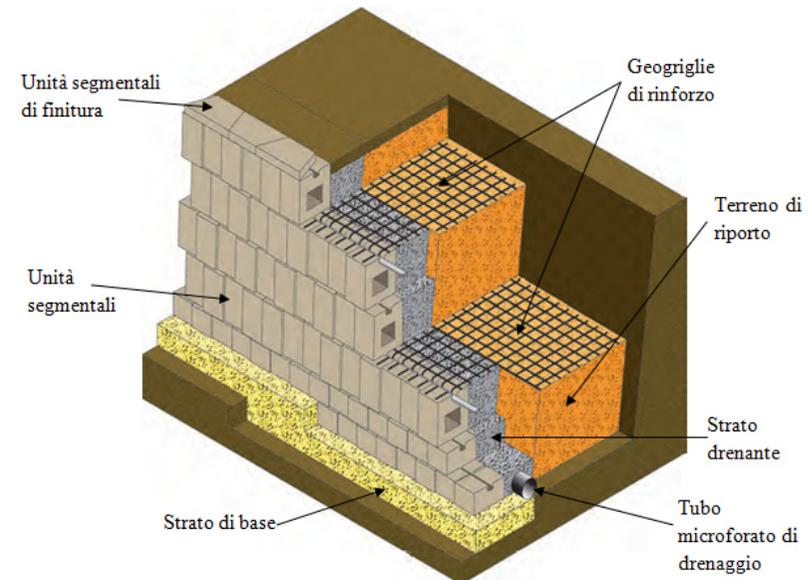
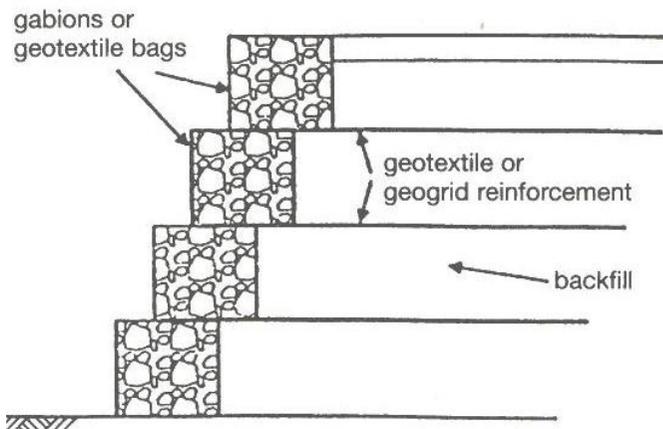
Tipologie di rinforzo



Inclusioni flessibili inestensibili (strisce metalliche)

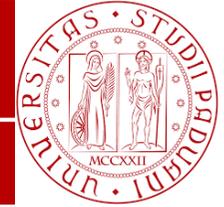


Inclusioni flessibili estensibili (geotessuti, geogriglie e georeti)



Terre rinforzate

Elementi di parete



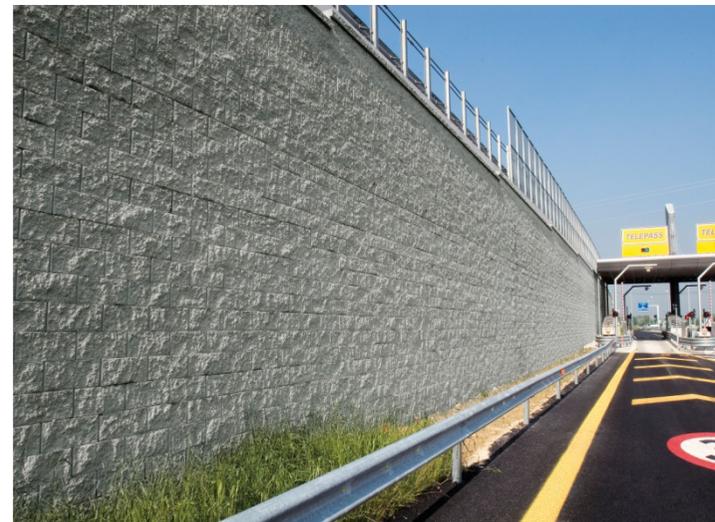
Terra armata (Terre Armée®)



Terra rinforzata



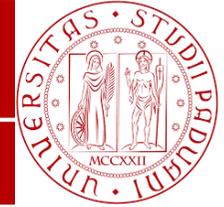
Terra rinforzata



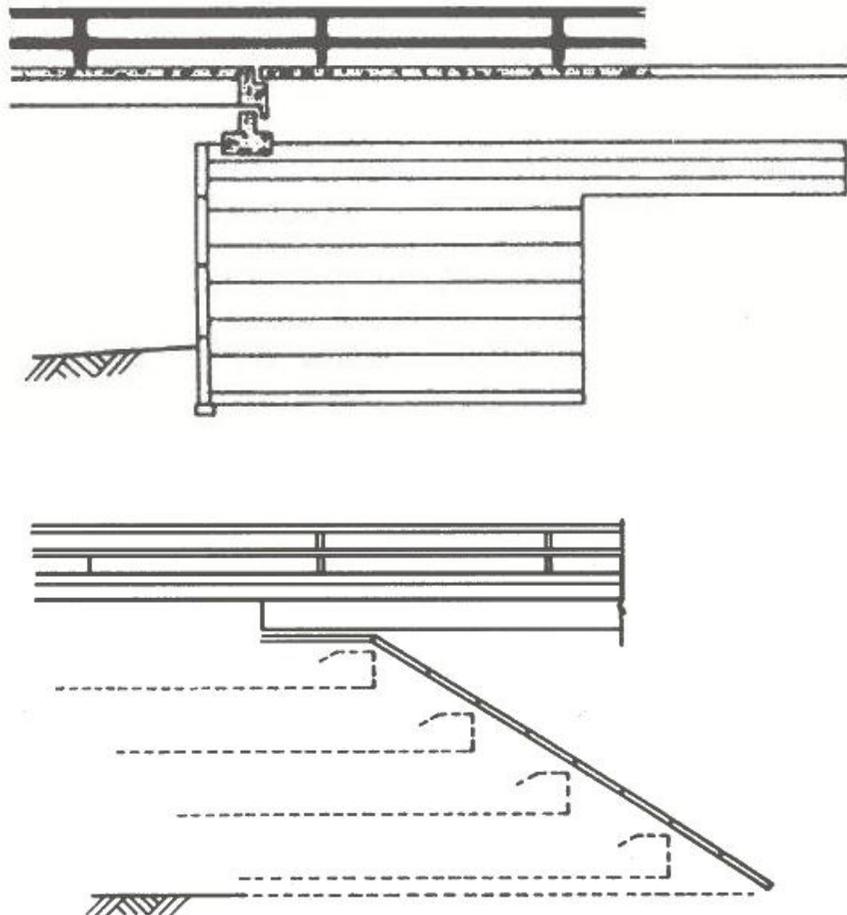
Rock wall (Segmental wall)

Terre rinforzate

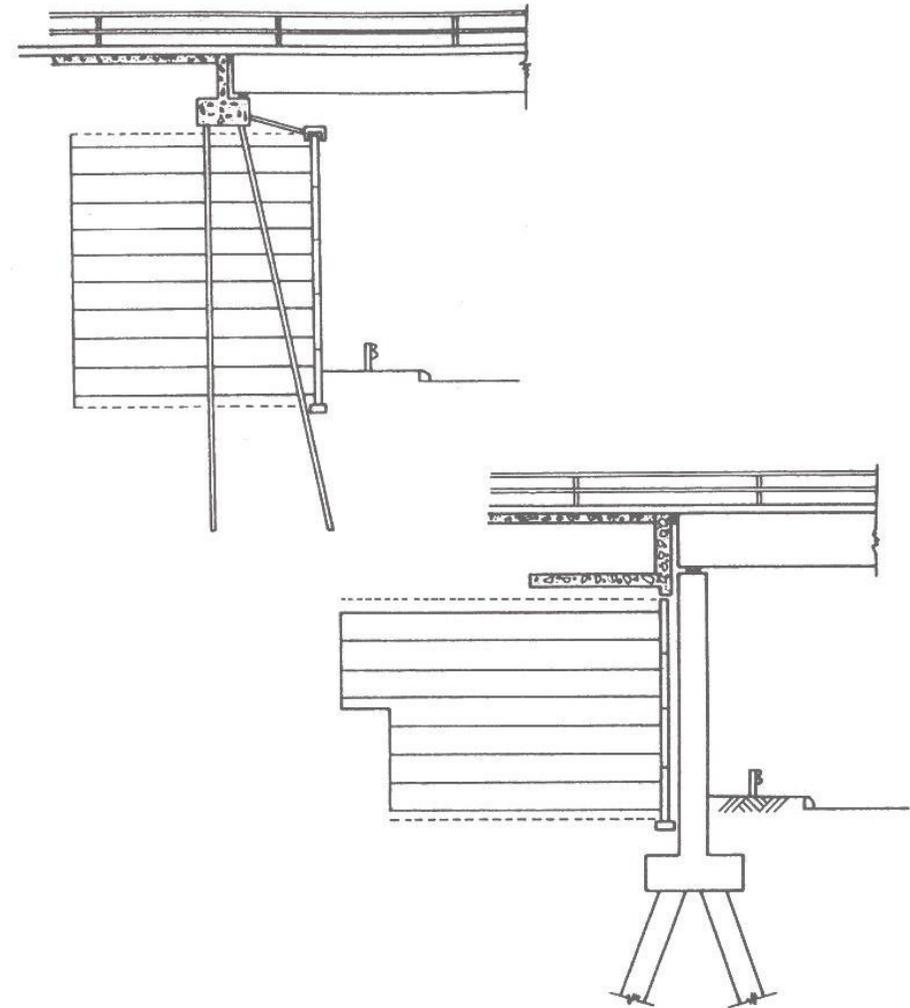
Esempi di applicazioni: manufatti di spalla



Parete verticale o inclinata portante

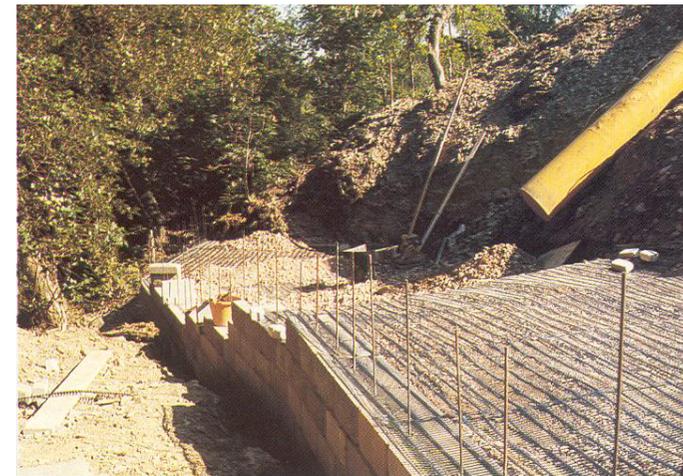
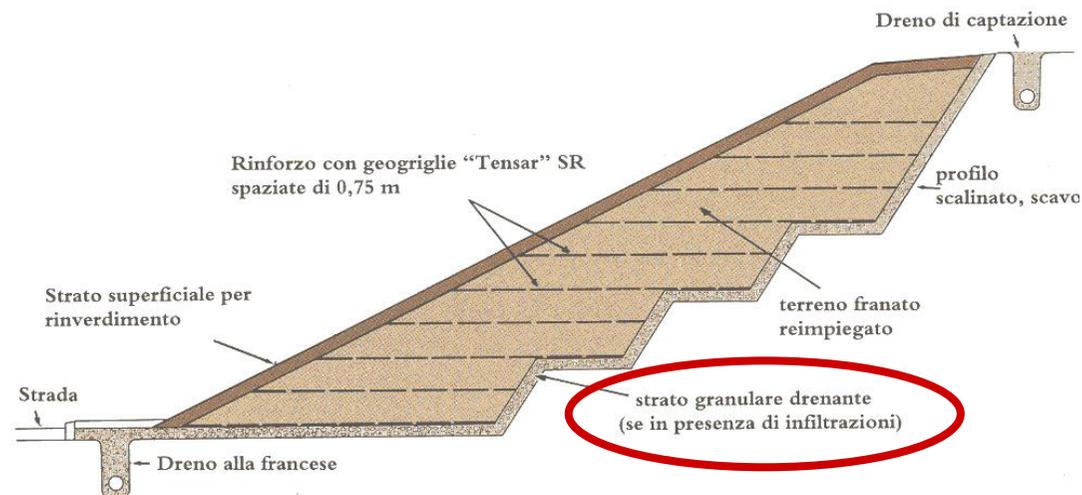
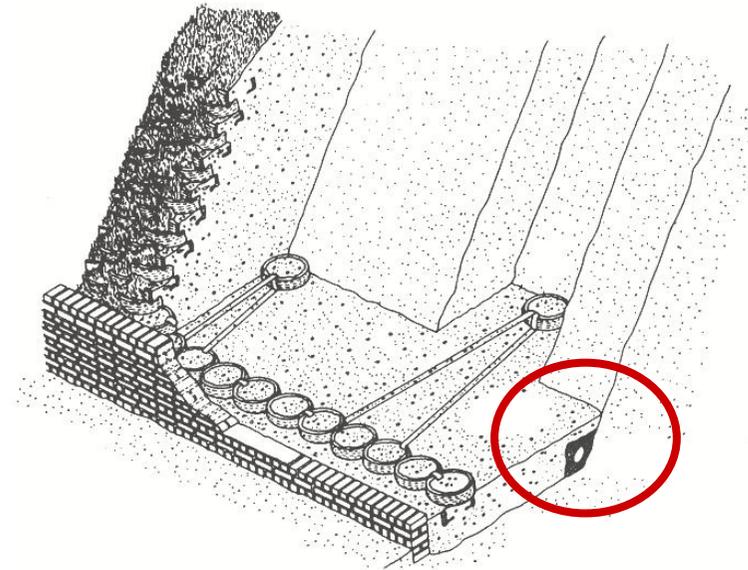
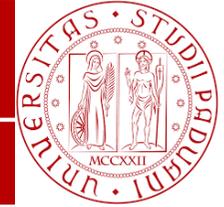


Pareti verticali non portante



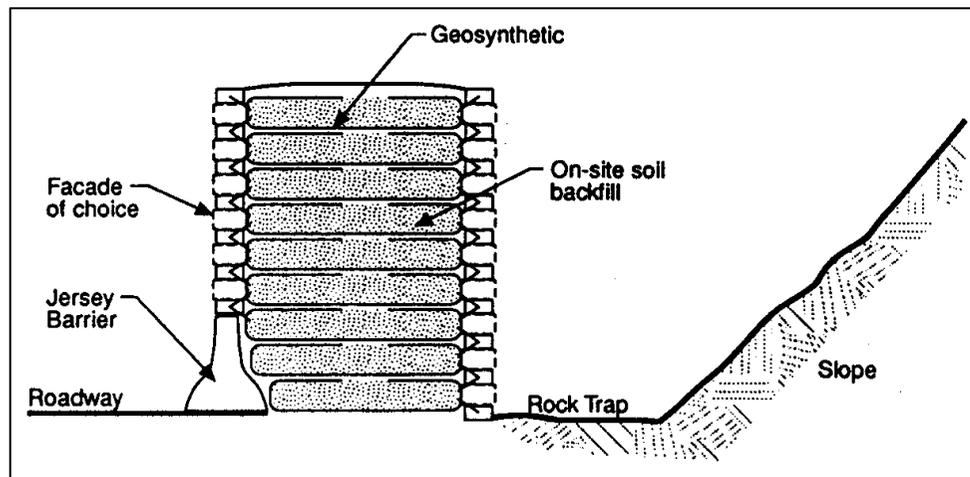
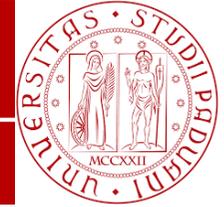
Terre rinforzate

Esempi di applicazioni: protezione di pendii



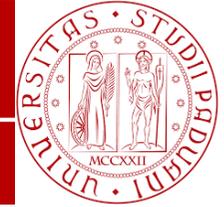
Terre rinforzate

Esempi di applicazioni: barriere antirumore e paramassi



Terre rinforzate

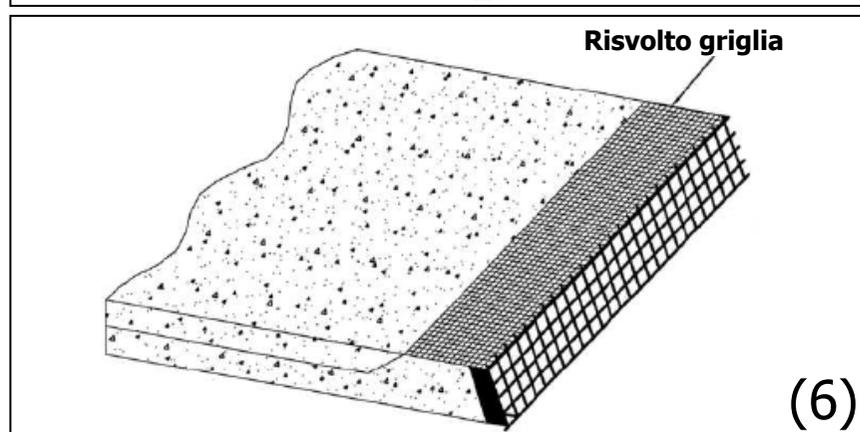
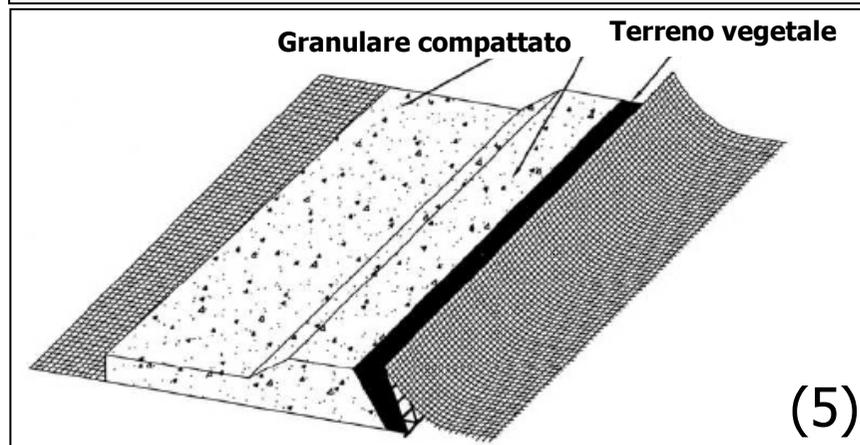
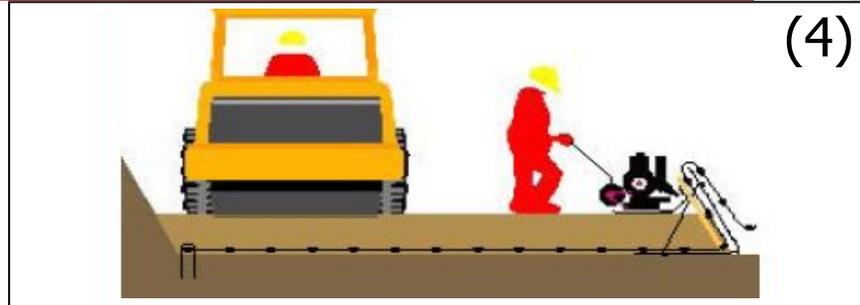
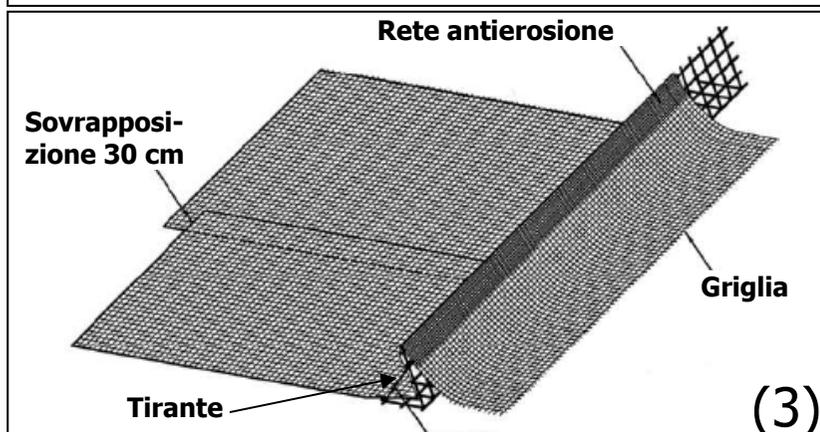
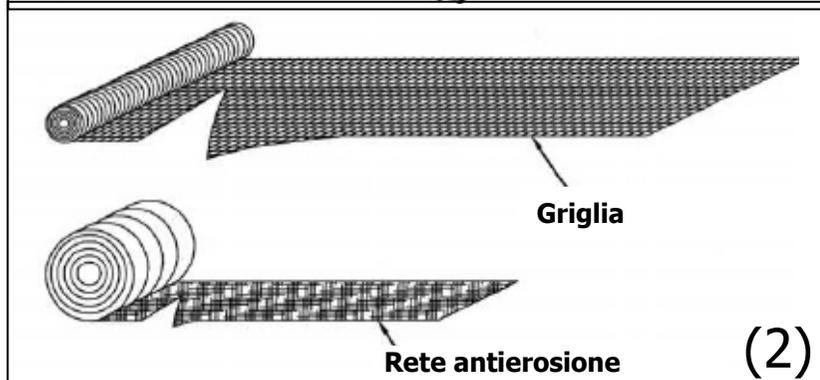
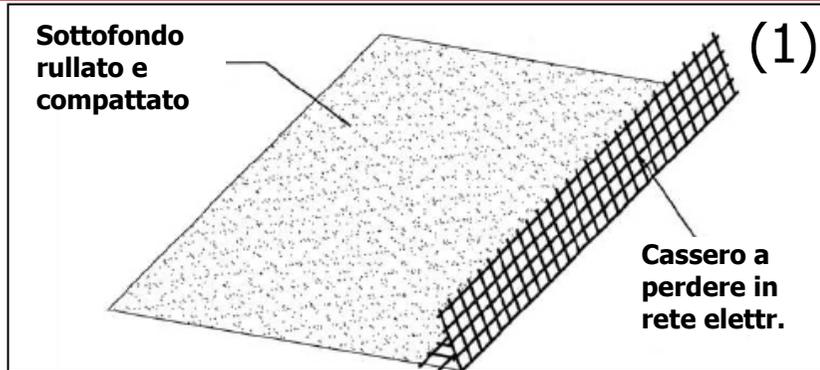
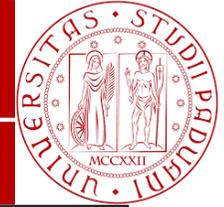
Esempi di applicazioni: elementi di arredo urbano



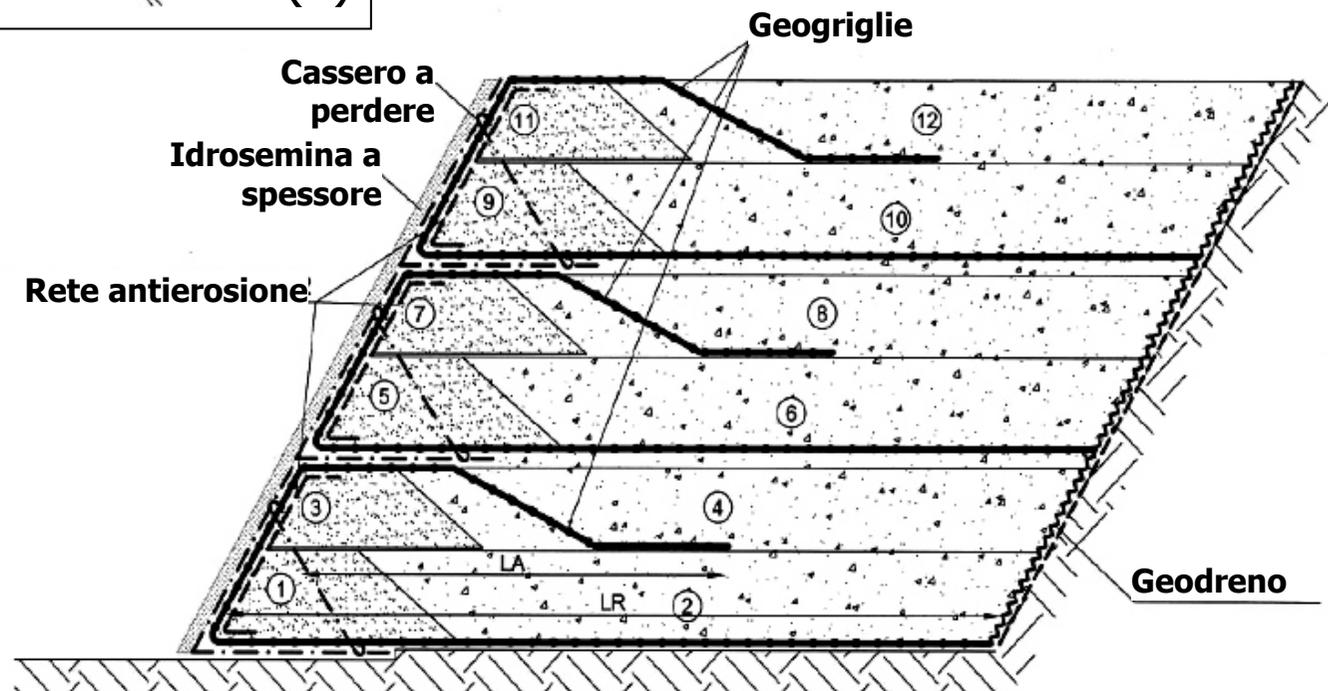
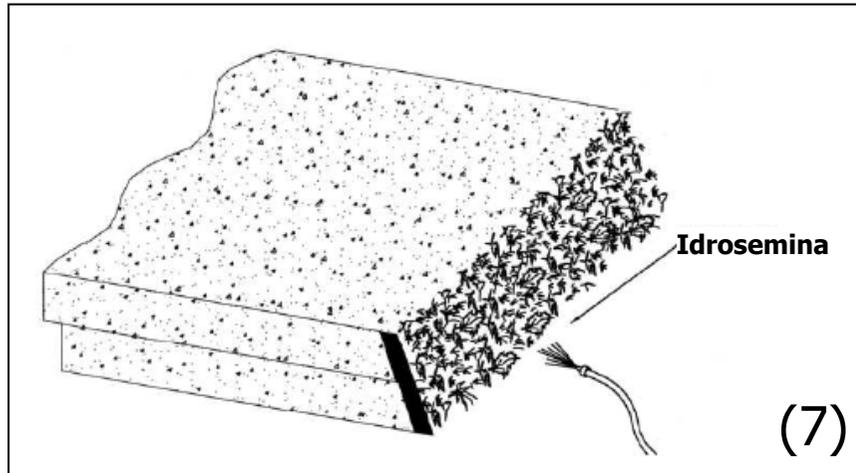
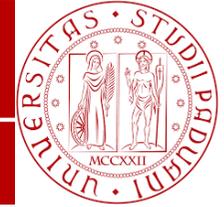
(Huesker,
2008)

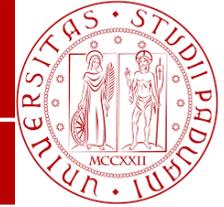


Procedura costruttiva down-top



Procedura costruttiva down-top





VANTAGGI

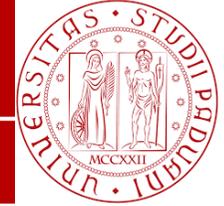
- Economicità
- Velocità di installazione
- Eseguibile anche su pendenze elevate e luoghi poco accessibili
- Facile da abbinare ad altre strutture
- Limitato impatto ambientale

SVANTAGGI

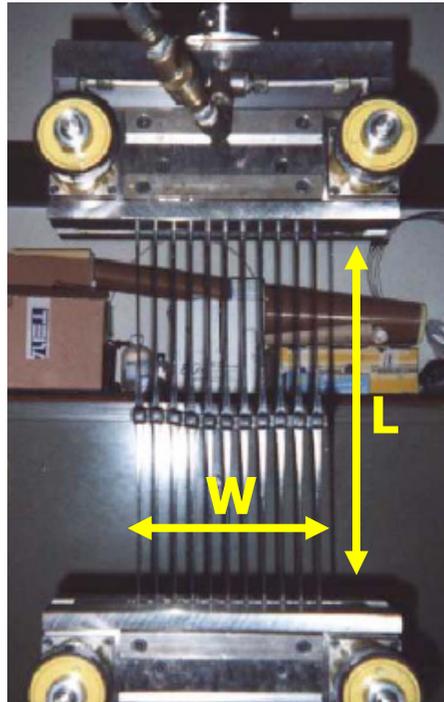
- Richiede uno sbancamento fino alla fondazione (garantendo un'opportuno approfondimento del piano di posa)
- Richiede esperienza ed attenzione ai dettagli
- Richiede utilizzo di terreni di riempimento di buona qualità

Comportamento dei diversi componenti

Resistenza a trazione dei geosintetici



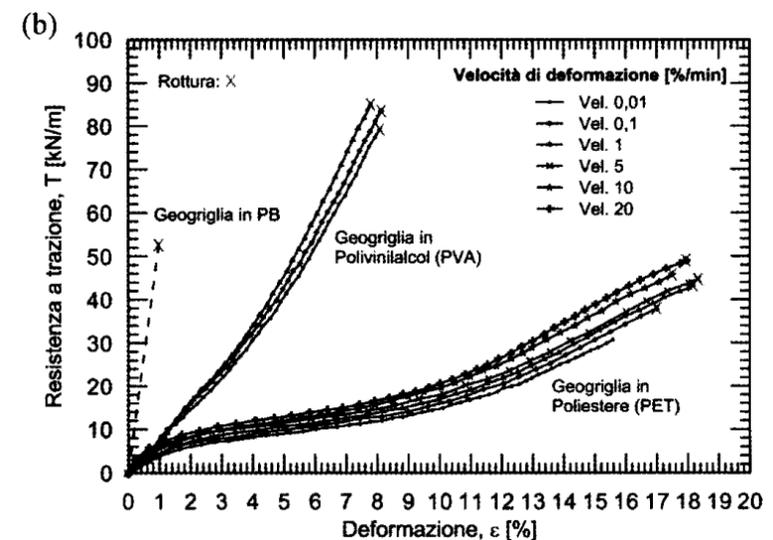
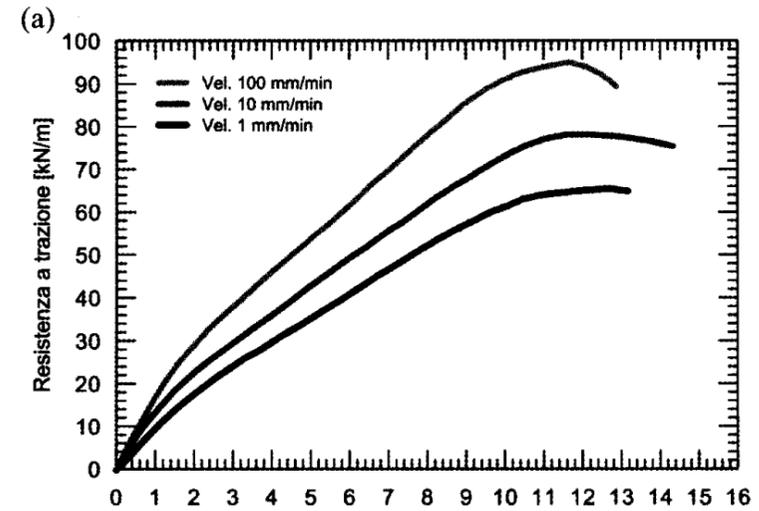
Prova di trazione a breve termine su banda larga (ISO 10319): T_{R0} (kN/m)



$W = 200 \text{ mm}$

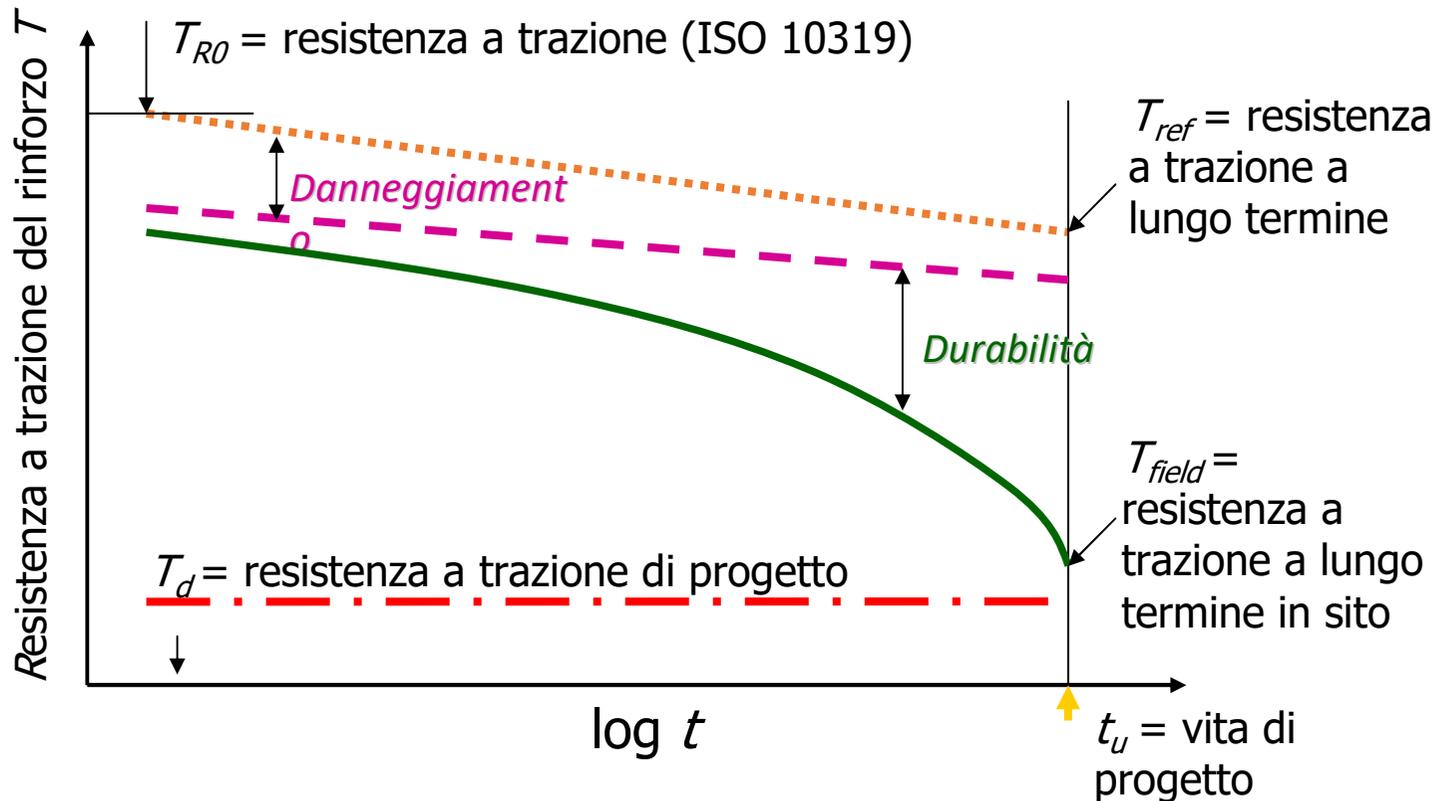
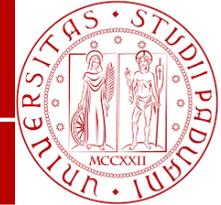
$L \geq 100 \text{ mm}$

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):

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

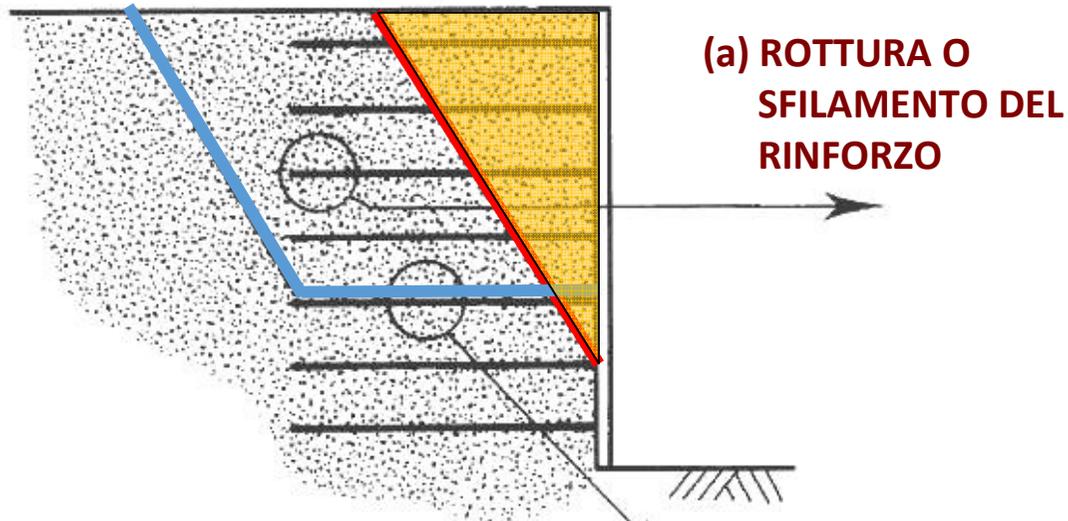
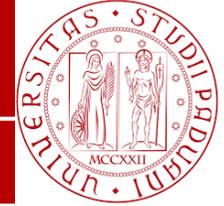
USA: GRI Standard Practice GT7 (2012):

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

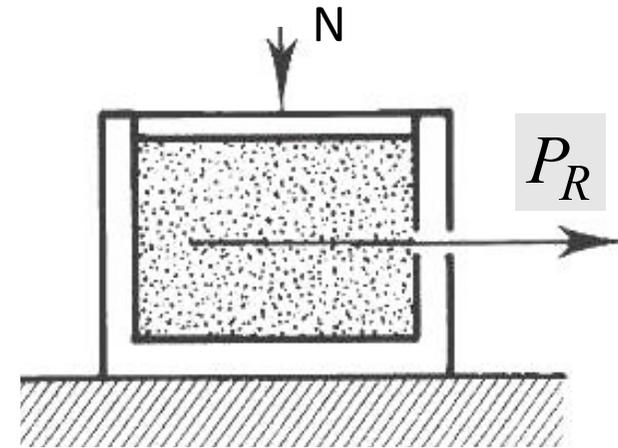
$$RF_{design} = RF_{ID} RF_{CR} RF_{CD} RF_{BD} RF_{JNT} = 12.9 \div 15.8$$

Comportamento dei diversi componenti

Attrito di interfaccia

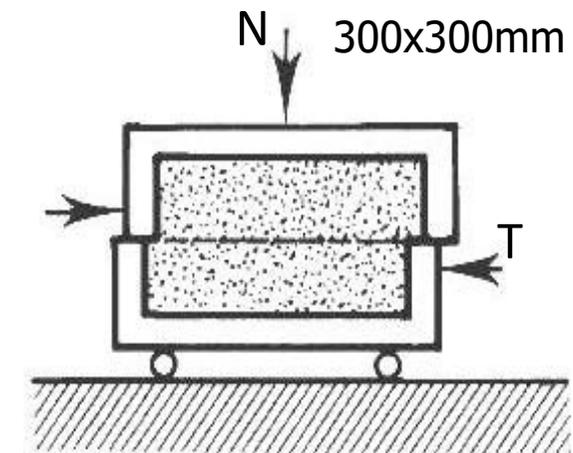
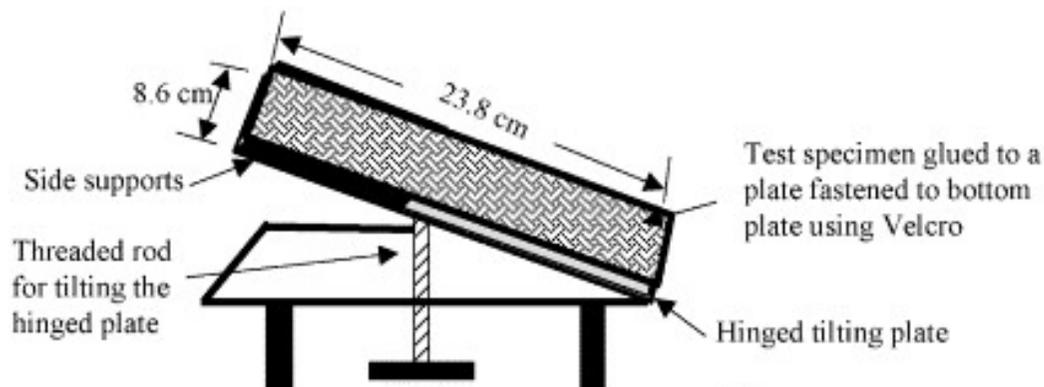


(b) SCORRIMENTO TERRENO-RINFORZO



Prove di filamento o pull-out

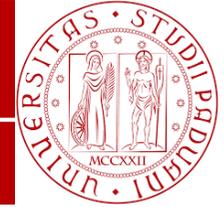
Tilt test



Prove di scorrimento diretto

Comportamento dei diversi componenti

Attrito di interfaccia



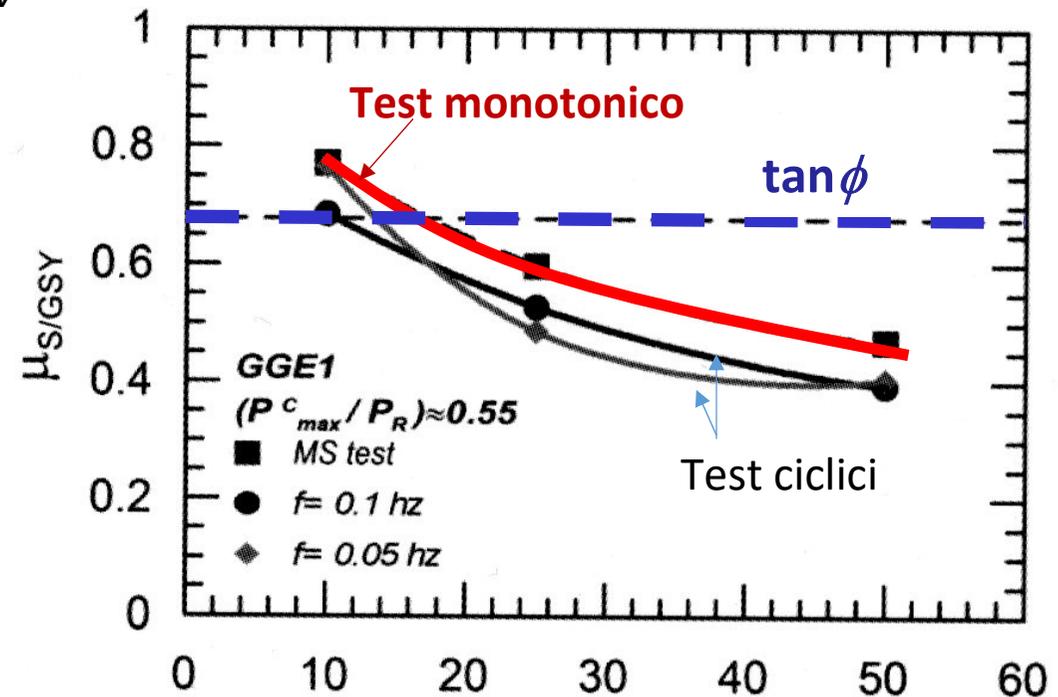
Sia P_R = la forza di pull-out per unità di sviluppo, il coefficiente di attrito terreno-rinforzo (**attrito apparente**) è:

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

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

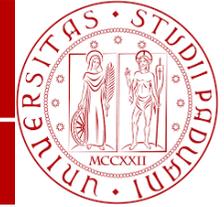
= $0,6 \div 0,8$ per geotessuti

= $0,8 \div 1$ per geogriglie

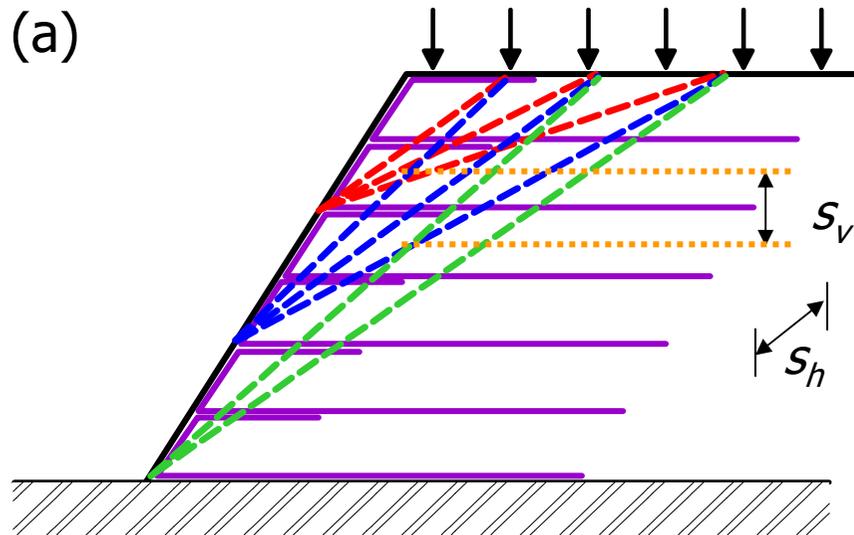


Prove di pull-out su geogriglia (Moraci) σ'_v [kPa]

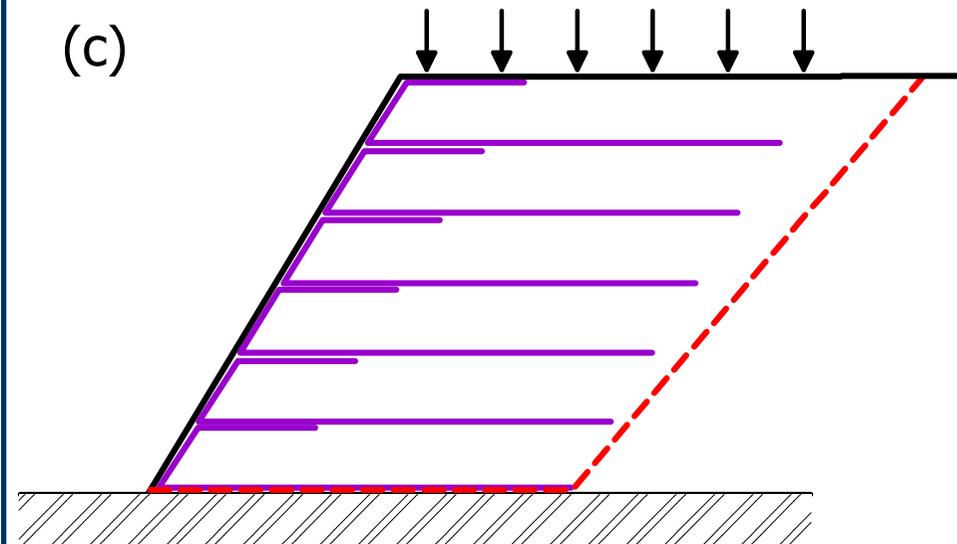
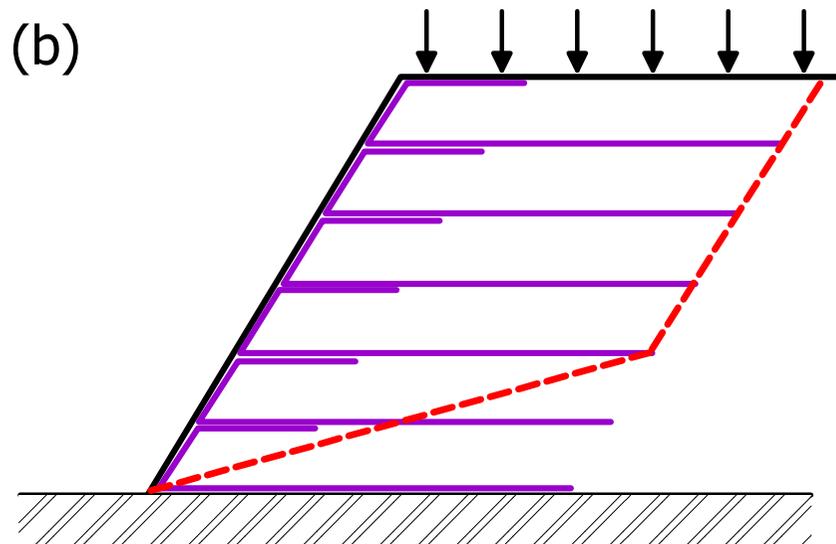
Dimensionamento e verifica di una terra rinforzata



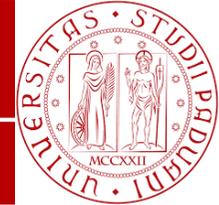
Meccanismi di possibile rottura



- **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

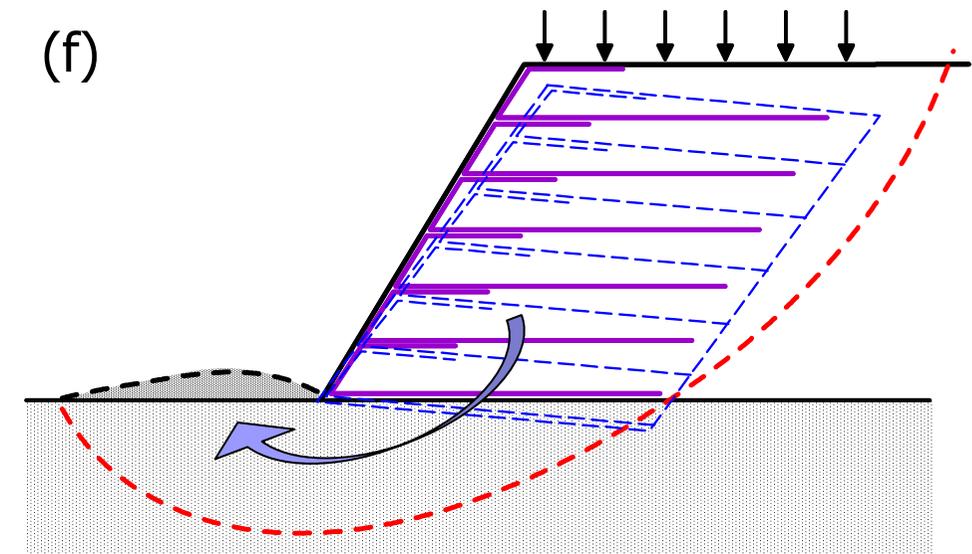
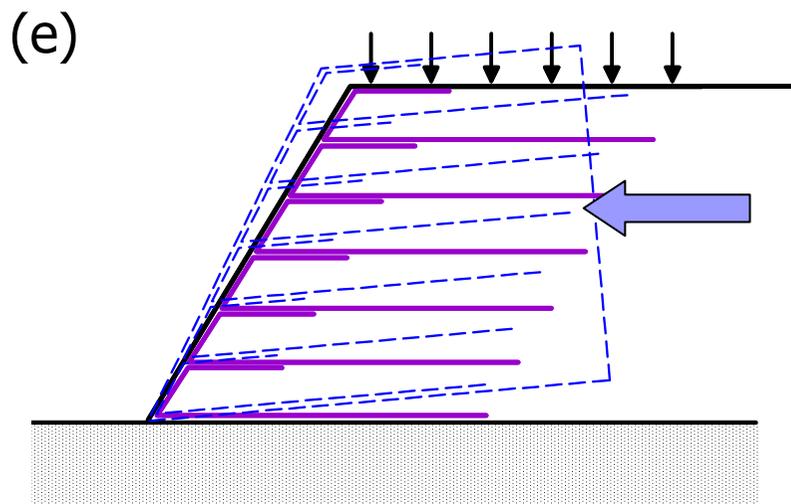
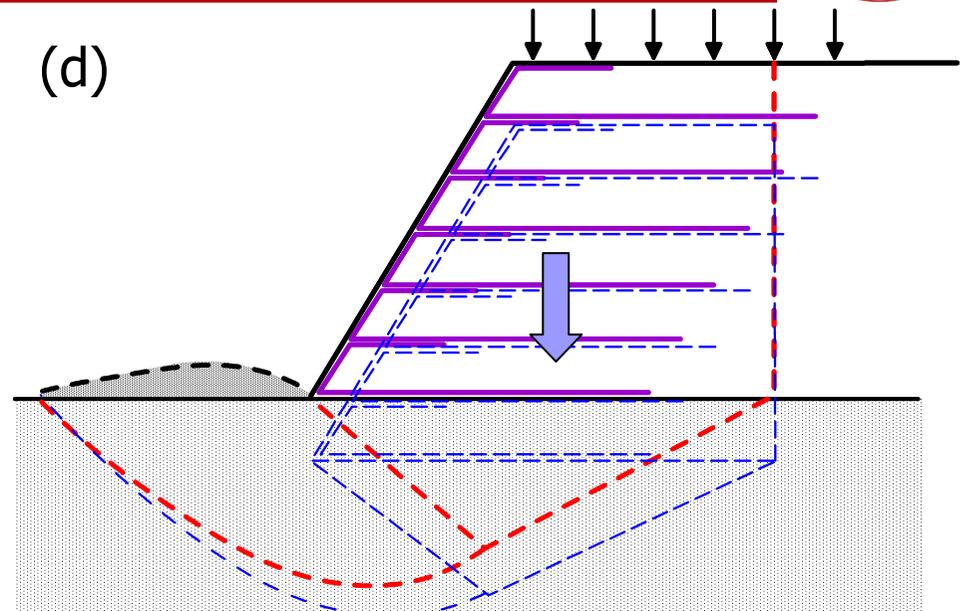


Meccanismi di possibile rottura

Capacità portate del terreno di fondazione (d)

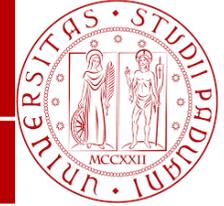
Ribaltamento (e)

Stabilità globale (f)

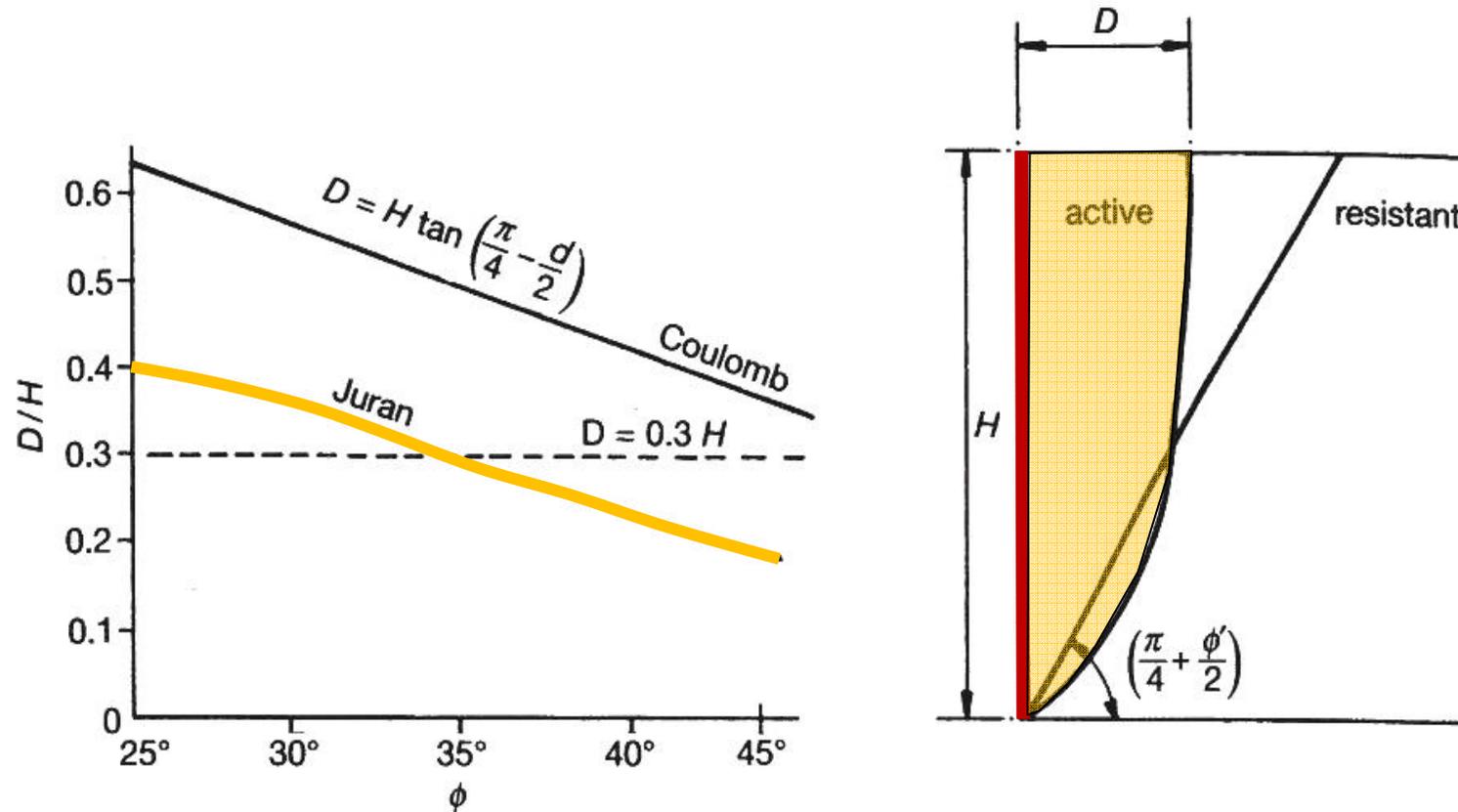


Dimensionamento di una terra rinforzata

Evidenze sperimentali



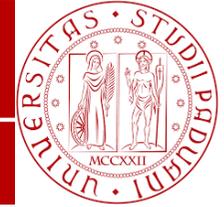
Si dimensiona per evitare **rottura interna** e **scivolamento alla base**.



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):

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

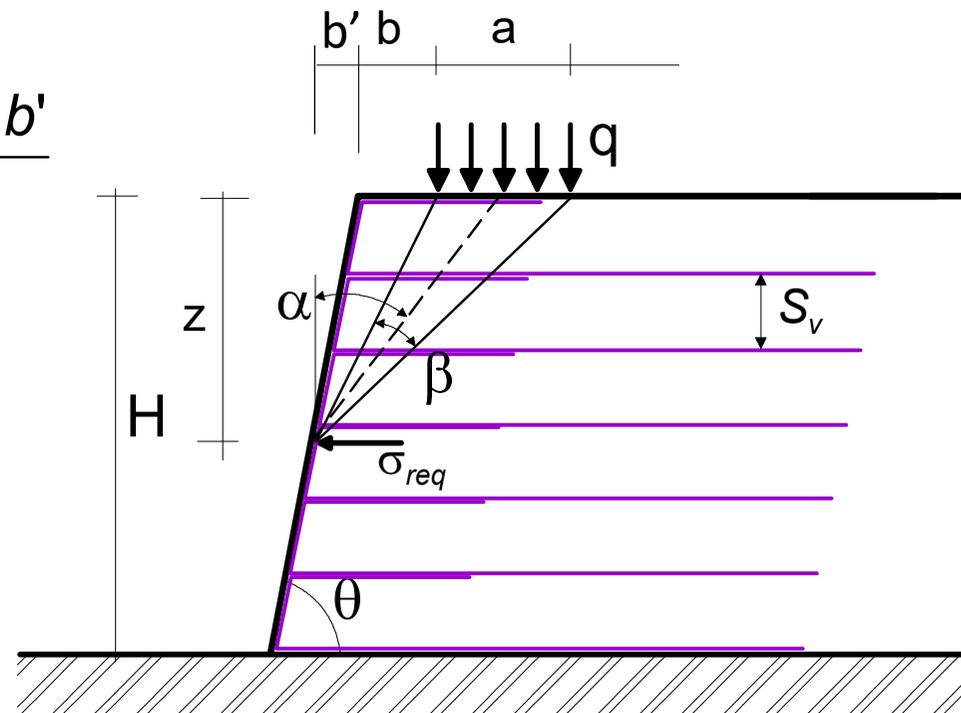
con:

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

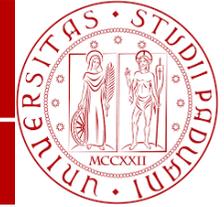
$$\alpha = \arctan \frac{b + b'}{z} + \beta / 2$$

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

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



Dimensionamento di una terra rinforzata



Tensione verticale

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

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

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

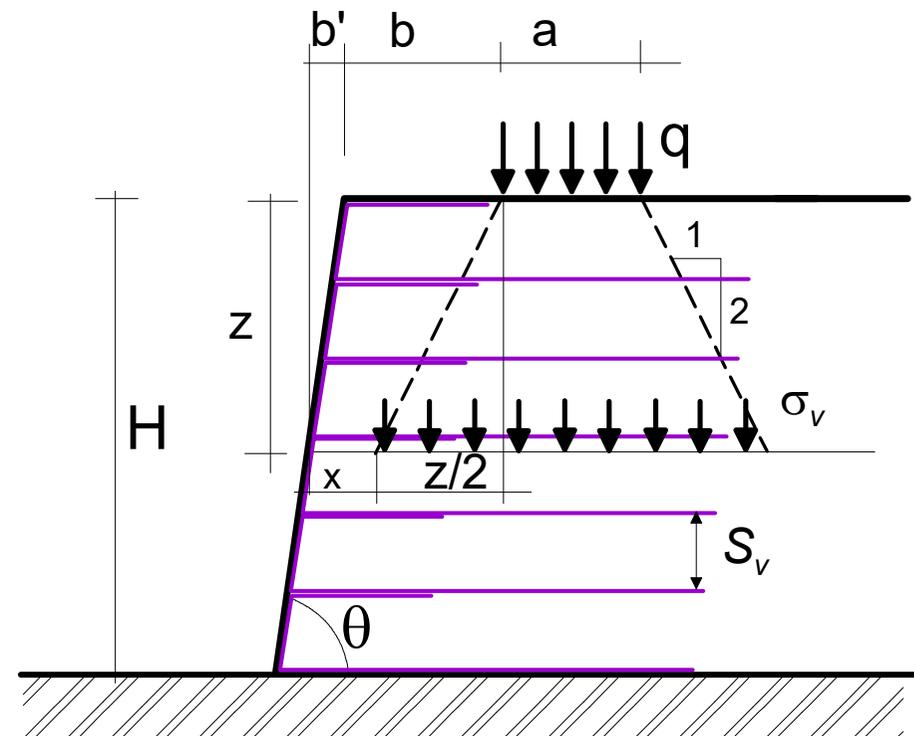
L = lunghezza dei rinforzi

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

$$a' = a + z$$

$$q' = qa / a'$$

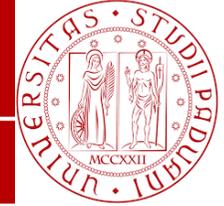
$$x = b + b' - z/2 \geq 0$$



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:

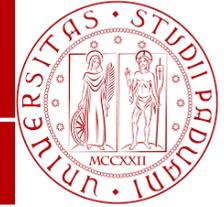
$$L_{bi} = T_i / (2W_r \sigma_v \alpha_b \tan \phi')$$

essendo:

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

σ_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} .

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

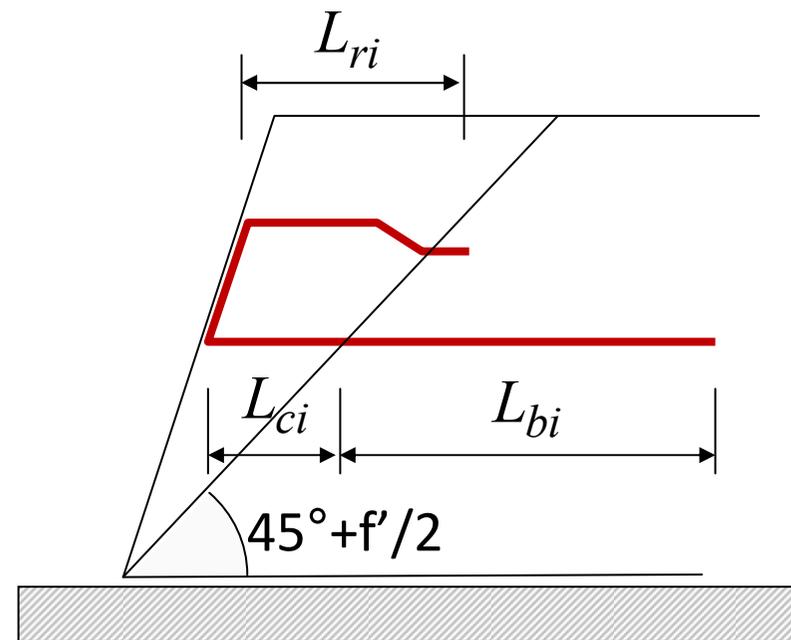
La lunghezza totale è:

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

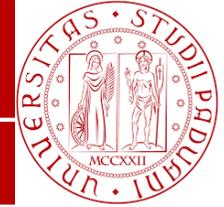
Nelle terre rinforzate con geosintetici, la **lunghezza del risvolto** è:

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

Con un valore minimo suggerito di 1 m.



Dimensionamento di una terra rinforzata



Scivolamento alla base

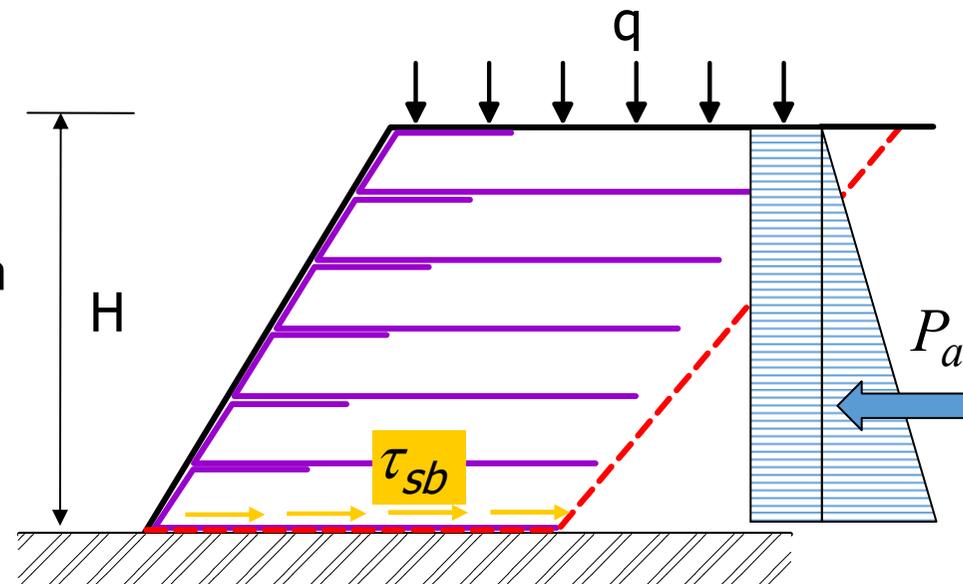
La lunghezza del rinforzo di base L_{Ri} deve essere verificata per l'instabilità per **scivolamento di base**, considerando l'equilibrio alla traslazione orizzontale.

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

τ_{sb} = sforzo di taglio sulla superficie del rinforzo

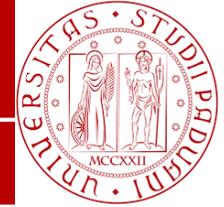
σ_{vb} = tensione verticale alla base della terra rinforzata

α_{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 σ_{\min} pari alla σ_{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).

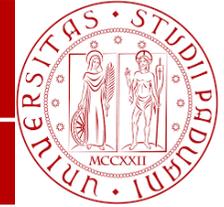
Si suggerisce $\sigma_{\text{comp}} = 10\text{-}30$ kPa.

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

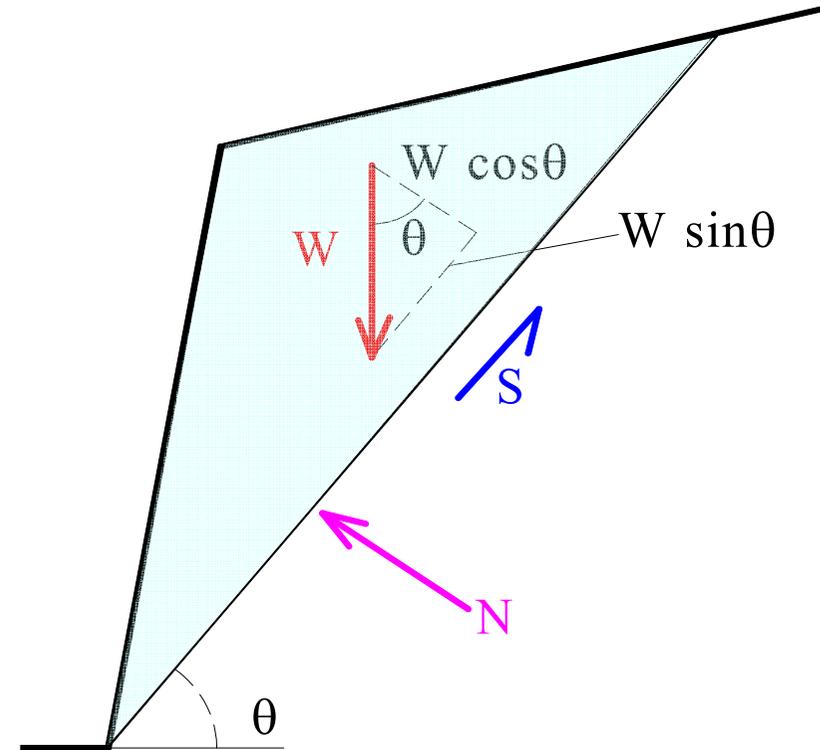
Metodo dell'equilibrio limite



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

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

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

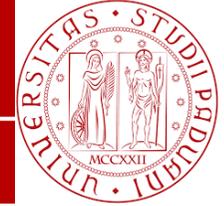


Passando alle **NTC (2008)**:

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

Verifica della stabilità interna e/o globale

Metodo dell'equilibrio limite



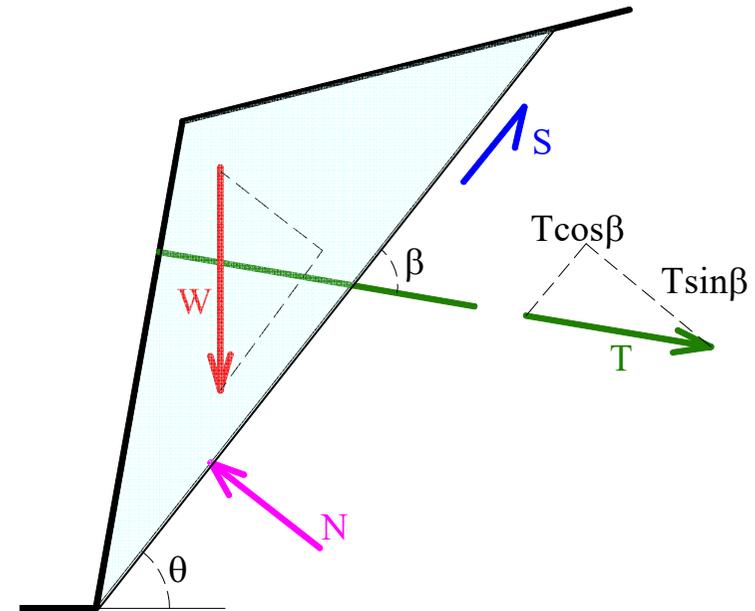
Cuneo con rinforzo che esplica una trazione T fissa

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>