

Il rinforzo dei terreni con geosintetici

Principi di progettazione e casi applicativi relativi a terre rinforzate e rilevati su terreni scadenti

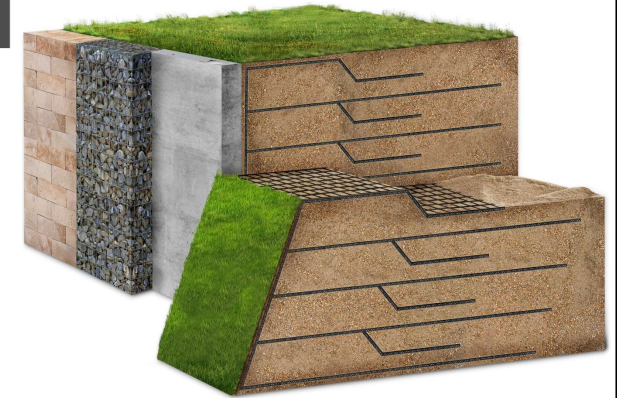


HUESKER
Idee, Ingegneria, Innovazione.

Ing. Filippo Tortul
HUESKER S.r.l.
f.tortul@huesker.it
+39 337 154 7076

1

Terre rinforzate



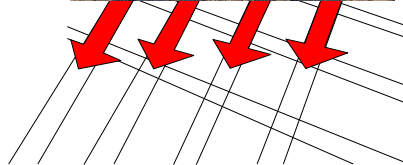
2

Terre rinforzate



Principi di funzionamento e di verifica

Esempi realizzati



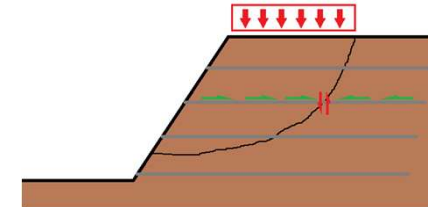
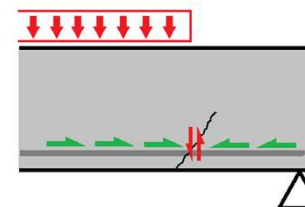
Ing. Filippo Tortul – Il rinforzo dei terreni con geosintetici – Ordine degli Ingegneri della provincia di Roma

3

Principi di funzionamento



- I geosintetici di rinforzo sono vere e proprie **armature che svolgono funzione strutturale**, in maniera analoga a quello che fa l'acciaio nel calcestruzzo, di conseguenza la sicurezza delle opere è direttamente legata alle prestazioni degli stessi.



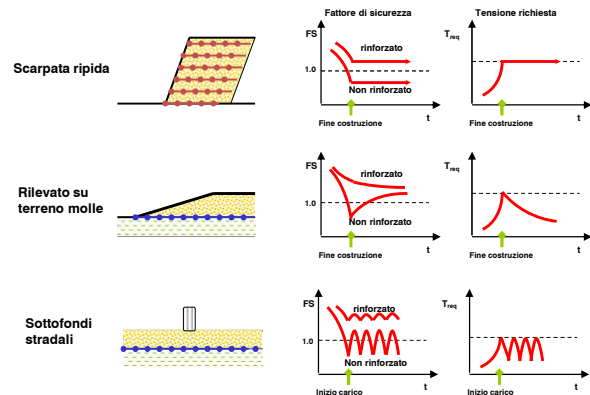
Ing. Filippo Tortul – Il rinforzo dei terreni con geosintetici – Ordine degli Ingegneri della provincia di Roma

4

3

4

Principi di funzionamento



Ing. Filippo Tortul – Il rinforzo dei terreni con geosintetici – Ordine degli Ingegneri della provincia di Roma

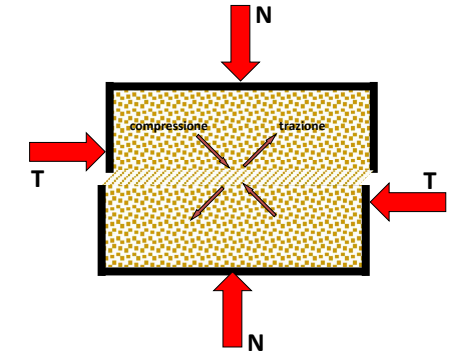
5

Principi di funzionamento

Scatola di Casagrande

$$T = N \cdot \tan \phi'$$

- T : Resistenza al taglio del terreno
- N : Sforzo normale al piano di scivolamento
- ϕ' : Angolo di attrito efficace del terreno



Ing. Filippo Tortul – Il rinforzo dei terreni con geosintetici – Ordine degli Ingegneri della provincia di Roma

6

Principi di funzionamento

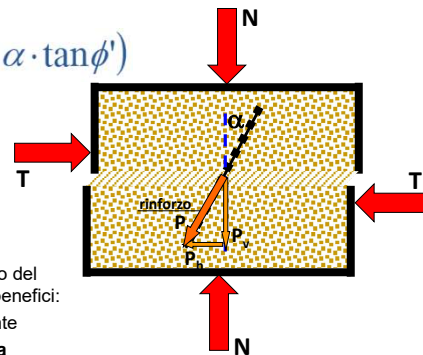
Scatola di Casagrande

$$T + \Delta T = N \cdot \tan \phi' + P \cdot (\sin \alpha + \cos \alpha \cdot \tan \phi')$$

- ΔT : Incremento della resistenza al taglio del terreno per effetto del rinforzo
- P : Resistenza a trazione del rinforzo
- α : Angolo di inclinazione del rinforzo rispetto al piano di scivolamento

Un geosintetico di rinforzo aumenta la resistenza al taglio del terreno lungo la superficie di rottura grazie a due effetti benefici:

- **Oppone resistenza** alla sollecitazione di taglio agente
- Aumenta la resistenza al taglio poiché **incrementa la tensione normale** sulla superficie di scorrimento

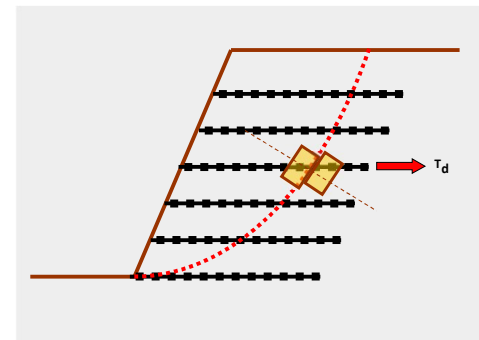


Ing. Filippo Tortul – Il rinforzo dei terreni con geosintetici – Ordine degli Ingegneri della provincia di Roma

7

Calcolo delle tensioni a lungo termine

- Il parametro cruciale riguardante il geosintetico risulta quindi la sua **effettiva resistenza a trazione**.



T_d è la **minima resistenza** che il geosintetico dovrà garantire **per tutta la vita utile di progetto** prevista per l'opera

Ing. Filippo Tortul – Il rinforzo dei terreni con geosintetici – Ordine degli Ingegneri della provincia di Roma

8

Calcolo delle tensioni a lungo termine



- I rinforzi polimerici subiscono **diminuzioni di resistenza nel tempo** a causa di fattori come **creep**, **attacchi ambientali**, **chimici** e termici, **danneggiamento durante la posa** in opera.
- Sarà quindi determinante la **resistenza a lungo termine** del rinforzo e **non** quella a breve termine (normalmente riportata sulle schede tecniche).
- Questa viene calcolata tramite appositi **fattori di riduzione**, che vanno applicati nel calcolo della tensione ammissibile a lungo termine. In tal modo si può passare dalla resistenza ultima alla resistenza di progetto:

$$T_{des} = \frac{F_{creep} \cdot T_{k ult.}}{f_m \cdot f_d \cdot f_e}$$

Coeff. di **riduzione per creep**
 Coeff. di **estrapolazione dei dati**
 Coeff. di **danneggiamento meccanico**
 Coeff. di **riduzione per attacco chimico**

Calcolo delle tensioni a lungo termine



- I valori dei coefficienti di riduzione da utilizzare devono essere **ricavati tramite prove normalizzate** e **validati da certificati rilasciati da istituti accreditati**
- In assenza di certificazioni, dei coefficienti standardizzati cautelativi possono essere ricavati dalle normative tecniche che trattano di geosintetici:

EUROCODICE 7

Annessi nazionali

Norme nazionali

**BS 8006 [UK]
EBGEO [DE]**

- Le NTC sono attualmente sprovviste di una sezione dedicata ai geosintetici, richiedendo unicamente l'applicazione del metodo dei coefficienti parziali $R_d \geq E_d$ in relazione alle opere in terra [§6.7]

Calcolo delle tensioni a lungo termine



- I valori dei coefficienti normativi sono estremamente più cautelativi rispetto a quelli certificati in relazione ai geosintetici specifici:
- Esempio:** Geogriglia Fortrac 110T, a 120 anni, con pH 9 e ghiaia frantumata (d90≤35mm)

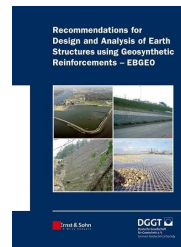
Secondo certificato (BBA HAPAS 13/197)



F_{creep} : 1,52
 f_e (dann.chim./amb.): 1,03
 f_d (dann.mecc.): 1,10
 f_m (estrapolazione): 1,02

Riduzione resistenza: - 43%

Secondo Norma EBGEO (DE)



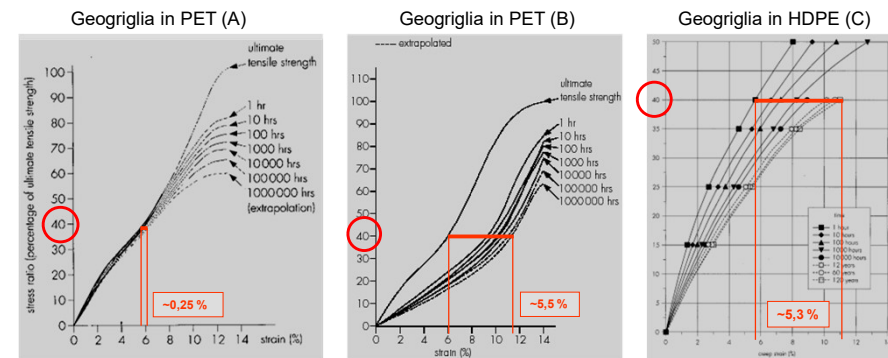
F_{creep} : 3,50
 f_e (dann.chim./amb.): 2,00
 f_d (dann.mecc.): (≥)2,00
 f_m (estrapolazione): -

Riduzione resistenza: - 93%

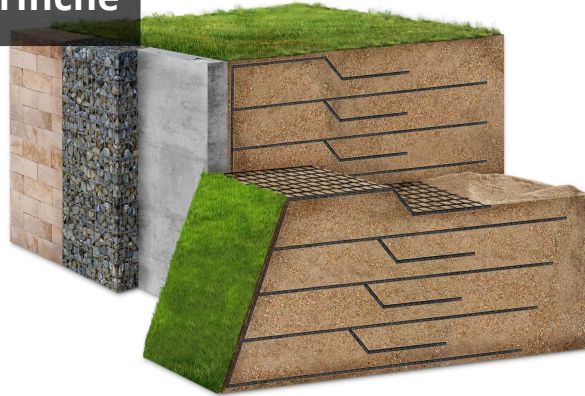
Calcolo delle tensioni a lungo termine



- Le curve isocrone correlano le **tensioni dei geosintetici alle loro deformazioni nel tempo**



Progettazione e verifiche



Progettazione e verifica

Verifiche di stabilità

- **Interne** (superfici di rottura interne al volume rinforzato)
- **Composte** (superfici di rottura passanti dentro e fuori il volume rinforzato)
- **Esterne** (scivolamento, ribaltamento, capacità portante)
- **Globale** (superfici di rottura passanti esternamente al volume rinforzato)
- **Locale** (connessione/resistenza dei rinforzi)

Stabilità idraulica (drenaggio)

- Erosione interna

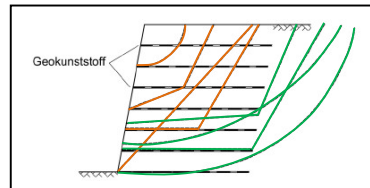
Opere a verde

- Erosione superficiale

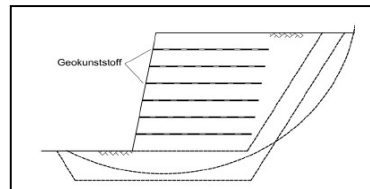
14

Progettazione e verifica

Verifiche di stabilità interne e composte



Verifiche di stabilità esterne/globali

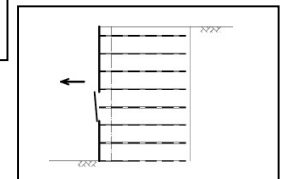
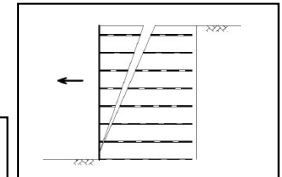
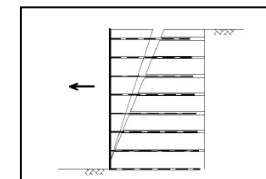


15

Progettazione e verifica

Verifiche di stabilità locali:

- Rottura rinforzi
- Sfilamento rinforzi
- Collasso del paramento (sfilamento frontale)



16

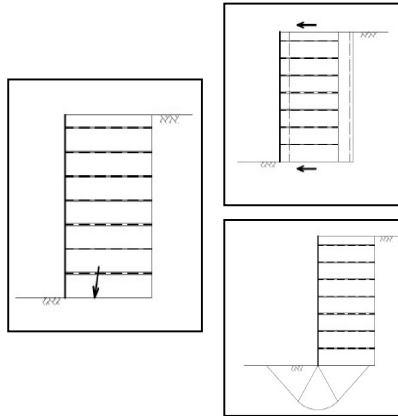
Progettazione e verifica

Verifiche di stabilità esterna:

Scivolamento

Ribaltamento

Capacità portante



Progettazione e verifica – NTC18

Le NTC18 sono sprovviste di un capitolo dedicato alle terre armate e alla progettazione con geosintetici. Vengono utilizzati, salvo casi specifici che richiedono di ricorrere a normative estere (es. pali in sabbia incapsulati), i dettami dei paragrafi **6.5 OPERE DI SOSTEGNO** e **6.8 OPERE DI MATERIALI SCIOLTI E FRONTI DI SCAVO**.

Per ogni stato limite ultimo che preveda il raggiungimento della resistenza di un elemento strutturale (STR) o del terreno (GEO), come definiti al § 2.6.1, deve essere rispettata la condizione:

$$E_d \leq R_d \quad [6.2.1]$$

essendo E_d il valore di progetto dell'azione o dell'effetto dell'azione, definito dalle relazioni [6.2.2a] o [6.2.2b]

$$E_d = \left[\gamma_F R_k - \frac{\gamma_{Fk}}{\gamma_M} a_d \right] \quad [6.2.2a]$$

$$E_d = \gamma_{Fk} \left[R_k - \frac{\gamma_{Fk}}{\gamma_M} a_d \right] \quad [6.2.2b]$$

e R_d è il valore di progetto della resistenza del sistema geotecnico definito dalla relazione [6.2.3].

$$R_d = \frac{1}{\gamma_R} \left[R_k - \frac{\gamma_{Rk}}{\gamma_M} a_d \right] \quad [6.2.3]$$

Progettazione e verifica – NTC18

In accordo a quanto stabilito al §2.6.1, la verifica della condizione [6.2.1] deve essere effettuata impiegando diverse combinazioni di gruppi di coefficienti parziali, rispettivamente definiti per le azioni (A1 e A2), per i parametri geotecnici (M1 e M2) e per le resistenze (R1, R2 e R3).

I diversi gruppi di coefficienti di sicurezza parziali sono scelti nell'ambito di due approcci progettuali distinti e alternativi.

Nel primo approccio progettuale (Approccio 1) le verifiche si eseguono con due diverse combinazioni di gruppi di coefficienti ognuna delle quali può essere critica per differenti aspetti dello stesso progetto.

Nel secondo approccio progettuale (Approccio 2) le verifiche si eseguono con un'unica combinazione di gruppi di coefficienti.

Per le verifiche nei confronti di stati limite ultimi non espressamente trattati nei successivi paragrafi, da 6.3 a 6.11, si utilizza l'Approccio 1 con le due combinazioni (A1+M1+R1) e (A2+M2+R2). I fattori parziali per il gruppo R1 sono sempre unitari; quelli del gruppo R2 possono essere maggiori o uguali all'unità e, in assenza di indicazioni specifiche per lo stato limite ultimo considerato, devono essere scelti dal progettista in relazione alle incertezze connesse con i procedimenti adottati.

Tab. 6.2.I – Coefficienti parziali per le azioni o per l'effetto delle azioni

	Effetto	Coefficiente parziale γ_F (o γ_Q)	EQU	(A1)	(A2)
Carichi permanenti G_1	Favorevole	γ_G	0,9	1,0	1,0
	Sfavorevole		1,1	1,3	1,0
Carichi permanenti $G_2^{(1)}$	Favorevole	γ_G	0,8	0,8	0,8
	Sfavorevole		1,5	1,5	1,3
Azioni variabili Q	Favorevole	γ_Q	0,0	0,0	0,0
	Sfavorevole		1,5	1,5	1,3

⁽¹⁾ Per i carichi permanenti G_2 si applica quanto indicato alla Tabella 2.6.1. Per la spinta delle terre si fa riferimento ai coefficienti γ_{G1} .

Progettazione e verifica – NTC18

Per le verifiche sismiche viene utilizzato il capitolo **7.11 OPERE E SISTEMI GEOTECNICI**. Salvo necessità di modellazioni specifiche approfondite, le opere vengono verificate tramite la teoria pseudo-statica.

Le verifiche degli stati limite ultimi in presenza di azioni sismiche devono essere eseguite ponendo pari a 1 i coefficienti parziali sulle azioni e sui parametri geotecnici e impiegando le resistenze di progetto, con i coefficienti parziali γ_R indicati nel presente Capitolo 7, oppure con i γ_R indicati nel Capitolo 6 laddove non espressamente specificato.

Tab. 6.2.II – Coefficienti parziali per i parametri geotecnici del terreno

Parametro	Grandezza alla quale applicare il coefficiente parziale	Coefficiente parziale γ_{M1}	(M1)	(M2)
Tangente dell'angolo di resistenza al taglio	$\tan \varphi'_k$	$\gamma_{\varphi'}$	1,0	1,25
Coesione efficace	c'_k	$\gamma_{c'}$	1,0	1,25
Resistenza non drenata	c_{uk}	γ_{cu}	1,0	1,4
Peso dell'unità di volume	γ_k	γ_γ	1,0	1,0

Progettazione e verifica – NTC18

- Le azioni sismiche vengono modellate con equivalenti azioni statiche:

Metodi dell'equilibrio limite

❖ sisma → forze statiche "equivalenti" F_h ed F_v , coeff. k_h e k_v

$$F_h = k_h W \quad k_h = \beta_m (a_{max}/g) \quad e \quad k_v = 0.5 k_h$$

D.M. 96: coeff. C EC8, NTC: $f(a_{max})$

resistenza. Nelle verifiche allo stato limite ultimo, in mancanza di studi specifici, le componenti orizzontale e verticale di tale forza possono esprimersi come $F_h = k_h W$ ed $F_v = k_v W$, con k_h e k_v rispettivamente pari ai coefficienti sismici orizzontale e verticale:

$$k_h = \beta_s \frac{a_{max}}{g} \quad [7.11.3]$$

$$k_v = \pm 0.5 \cdot k_h \quad [7.11.4]$$

dove

β_s = coefficiente di riduzione dell'accelerazione massima attesa al sito;

a_{max} = accelerazione orizzontale massima attesa al sito;

g = accelerazione di gravità.

Progettazione e verifica

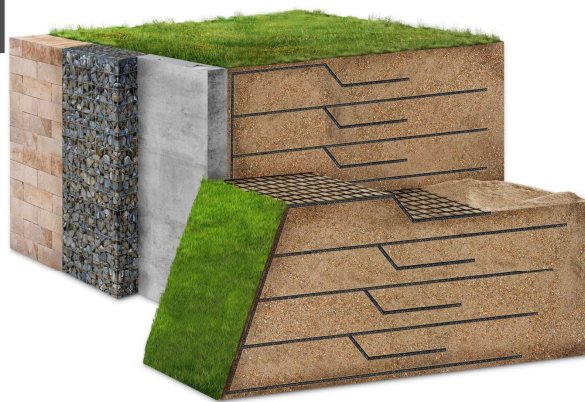
- Le possibili problematiche idrauliche che possono nascere in una terra rinforzata (erosione interna, erosione localizzata, creazione di canali di flusso...) non sono correlate a verifiche demandate da normativa, sta ai progettisti provvedere ad adeguati sistemi di drenaggio o antierosivi qualora venga reputata la necessità. Le soluzioni più usate sono:

- Drenaggio alla base

- Drenaggio a tergo

- Reti/stuoie antierosive al fronte

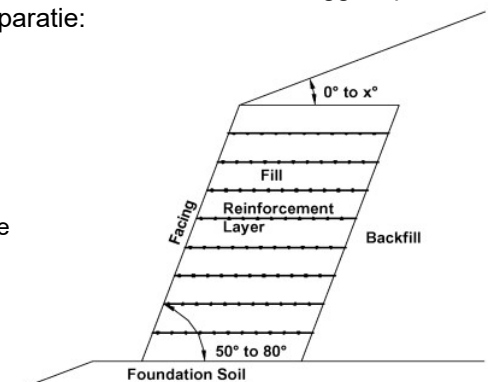
Esempi realizzati



Terre rinforzate - Esempi

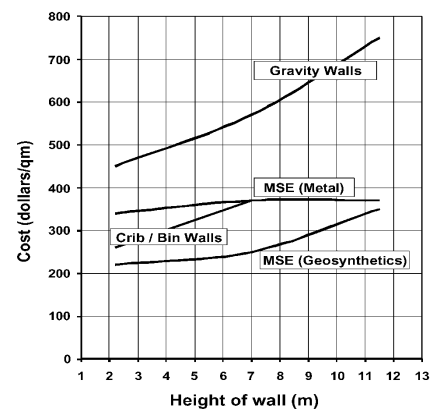
- Le strutture in terra rinforzata presentano considerevoli vantaggi rispetto alle opere classiche, quali muri o paratie:

- Velocità di esecuzione
- Facilità realizzativa
- Risparmio economico
- Ottimo inserimento ambientale
- Versatilità strutturale
- Comportamento strutturale duttile
- Agibilità durante la costruzione
- Basso impatto ambientale



Terre rinforzate - Esempi

- Analisi comparativa dei costi di diverse opere di sostegno «naturalistiche»:



Referenza: Geosynthetic Research Institute, GRI Report #20, Drexel University, Giugno 1998

Ing. Filippo Tortul – Il rinforzo dei terreni con geosintetici – Ordine degli Ingegneri della provincia di Roma

25

Terre rinforzate – Casate (BL)

Sistemazione strada in frana con terre rinforzate

Dati rilevanti:

- Altezza massima: 7,5m
- Inserimento sistema di drenaggio
- Utilizzo di geogriglie tessute in poliestere da 35, 55, 80, 100kN/m



Ing. Filippo Tortul – Il rinforzo dei terreni con geosintetici – Ordine degli Ingegneri della provincia di Roma

26

Terre rinforzate – Casate (BL)



Ing. Filippo Tortul – Il rinforzo dei terreni con geosintetici – Ordine degli Ingegneri della provincia di Roma

27

Terre rinforzate – Casate (BL)



Ing. Filippo Tortul – Il rinforzo dei terreni con geosintetici – Ordine degli Ingegneri della provincia di Roma

28

Terre rinforzate – Casate (BL)



Ing. Filippo Tortul – Il rinforzo dei terreni con geosintetici – Ordine degli Ingegneri della provincia di Roma

29

Terre rinforzate – Casate (BL)



Ing. Filippo Tortul – Il rinforzo dei terreni con geosintetici – Ordine degli Ingegneri della provincia di Roma

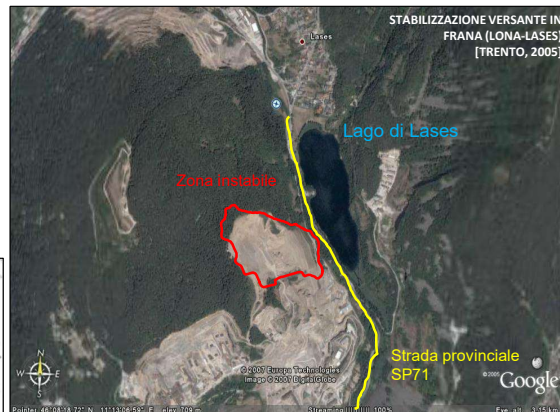
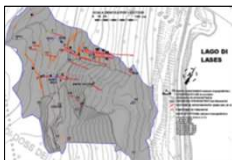
30

Terre rinforzate – Lona-Lases (TN)

Messa in sicurezza e ripristino pendio in frana in cava di porfido

Dati rilevanti:

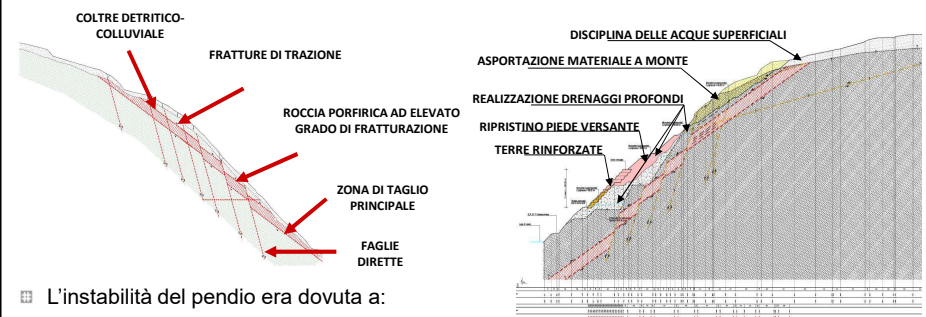
- Altezza massima: 60m
- Velocità di realizzazione con materiale disponibile in sito
- Utilizzo di geogriglie tessute in poliestere da 45 e 110kN/m



Ing. Filippo Tortul – Il rinforzo dei terreni con geosintetici – Ordine degli Ingegneri della provincia di Roma

31

Terre rinforzate – Lona-Lases (TN)



L'instabilità del pendio era dovuta a:

- Elevata pendenza del versante (80%)
- Grande presenza di acqua di infiltrazione a causa di precipitazioni abbondanti
- Attività estrattiva al piede
- Presenza di piano di scivolamento di faglia in profondità

Ing. Filippo Tortul – Il rinforzo dei terreni con geosintetici – Ordine degli Ingegneri della provincia di Roma

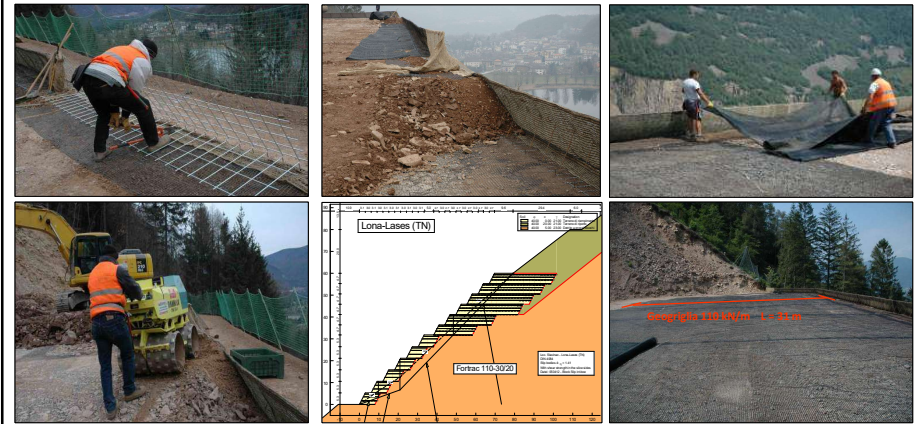
32

Terre rinforzate – Lona-Lases (TN)



Ing. Filippo Tortul – Il rinforzo dei terreni con geosintetici – Ordine degli Ingegneri della provincia di Roma

Terre rinforzate – Lona-Lases (TN)



Ing. Filippo Tortul – Il rinforzo dei terreni con geosintetici – Ordine degli Ingegneri della provincia di Roma

33

34

Terre rinforzate – Lona-Lases (TN)



Ing. Filippo Tortul – Il rinforzo dei terreni con geosintetici – Ordine degli Ingegneri della provincia di Roma

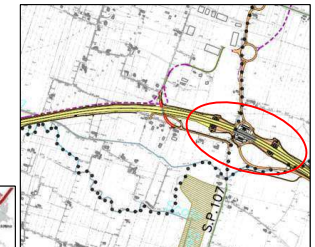
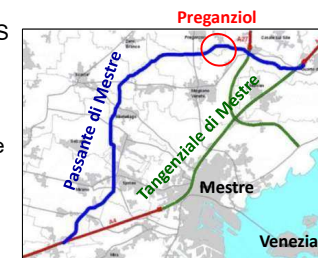
Terre rinforzate – Preganziol (TV)



Rampa autostradale del passante di Mestre in terra rinforzata

Dati rilevanti:

- Altezza massima: 10,2m
- Paramento in blocchi di CLS
- Necessità di recupero dei terreni in sito, stabilizzati a calce
- Utilizzo di geogriglie tessute in polivinilalcol (PVA)



Ing. Filippo Tortul – Il rinforzo dei terreni con geosintetici – Ordine degli Ingegneri della provincia di Roma

36

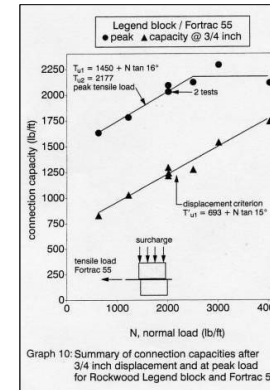
35

36

Terre rinforzate – Preganziol (TV)



Terre rinforzate – Preganziol (TV)



Terre rinforzate – Preganziol (TV)

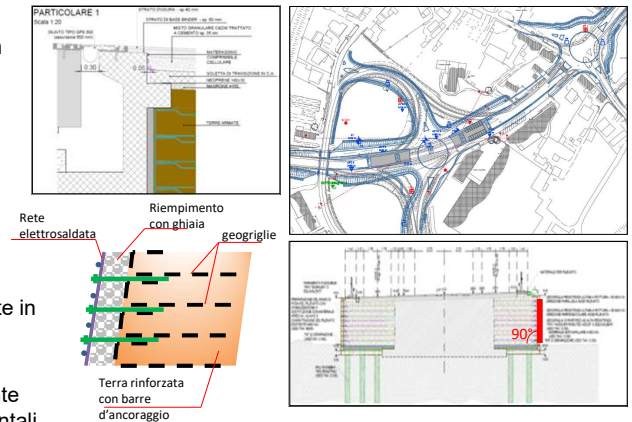


Terre rinforzate – Pasiano di Pordenone (PN)

Muri di sostegno in terra rinforzata con paramento in pietra

Dati rilevanti:

- Altezza massima: 7m
- Fronte verticale
- Necessità di recupero dei terreni in sito, stabilizzati a calce
- Utilizzo di geogriglie tessute in PVA da 80kN/m
- Paramento in pietra
- TR dietro alle spalle di ponte per eliminare spinte orizzontali



Terre rinforzate – Pasiano di Pordenone (PN)

Ordine degli Ingegneri della Provincia di Roma
ORDINE degli INGEGNERI GEOLOGI LAZIO



Ing. Filippo Tortul – Il rinforzo dei terreni con geosintetici – Ordine degli Ingegneri della provincia di Roma

41

Terre rinforzate – Pasiano di Pordenone (PN)

Ordine degli Ingegneri della Provincia di Roma
ORDINE degli INGEGNERI GEOLOGI LAZIO



Ing. Filippo Tortul – Il rinforzo dei terreni con geosintetici – Ordine degli Ingegneri della provincia di Roma

42

Terre rinforzate – Pasiano di Pordenone (PN)

Ordine degli Ingegneri della Provincia di Roma
ORDINE degli INGEGNERI GEOLOGI LAZIO



Ing. Filippo Tortul – Il rinforzo dei terreni con geosintetici – Ordine degli Ingegneri della provincia di Roma

43

Terre rinforzate – Parco arte Vivente (TO)

Ordine degli Ingegneri della Provincia di Roma
ORDINE degli INGEGNERI GEOLOGI LAZIO

Trèfle – Opera d'arte di Dominique Foerster

Dati rilevanti:

- Altezza massima: 3,0m
- Paramento rinverdibile inclinato a 80°
- Geogriglie tessute in poliestere da 35 kN/m



Ing. Filippo Tortul – Il rinforzo dei terreni con geosintetici – Ordine degli Ingegneri della provincia di Roma

44

Terre rinforzate – Parco arte Vivente (TO)



Ing. Filippo Tortul – Il rinforzo dei terreni con geosintetici – Ordine degli Ingegneri della provincia di Roma

45

45

Terre rinforzate – Parco arte Vivente (TO)



Ing. Filippo Tortul – Il rinforzo dei terreni con geosintetici – Ordine degli Ingegneri della provincia di Roma

46

46

Terre rinforzate – Parco arte Vivente (TO)



Ing. Filippo Tortul – Il rinforzo dei terreni con geosintetici – Ordine degli Ingegneri della provincia di Roma

47

47

Grazie per la vostra attenzione



Ing. Filippo Tortul – Il rinforzo dei terreni con geosintetici – Ordine degli Ingegneri della provincia di Roma

48

48