

---

# Progetto di pendii ripidi rinforzati con geogriglie TENAX

**Manuale di Calcolo**

**Piergiorgio Recalcati**, TENAX SPA, Geosynthetics Technical Office (GTO)

---

**TENAX SpA • Divisione Geosintetici**

Via dell'Industria, 3 • I-23897 Viganò (LC) – Italia

Tel. +39.039.9219307 • Fax +39.039.9219200

Email: [geo.div@tenax.net](mailto:geo.div@tenax.net) • <http://www.tenax.net>

Documento Tecnico: **TDR001 – 07/02**

---

**TENAX**  
Uomo, Tecnologia, Ambiente.

## Sommario

1.	Terra rinforzata .....	4
2.	Accenni di teoria .....	4
3.	Geogriglie TENAX TT .....	7
4.	Pendii ripidi rinforzati: definizione ed impostazione del problema.....	7
5.	Forze richieste e disponibili .....	7
6.	Distribuzione delle forze massime richieste .....	8
7.	Forze disponibili ed ammissibili .....	10
8.	Criteri di progetto .....	15
9.	Forze necessarie .....	17
10.	Diagrammi di Jewell .....	18
11.	Determinazione della spaziatura tra i rinforzi.....	23
12.	Risolto.....	23
13.	Procedura di calcolo.....	24
14.	Esempio applicativo .....	27
15.	Bibliografia.....	32

## Elenco delle figure

Fig. 1:	esempi di terre rinforzate con geogriglie .....	4
Fig. 2:	distribuzione degli sforzi normali. ....	5
Fig. 3:	distribuzione degli sforzi di taglio in un elemento di terreno. ....	5
Fig. 4:	distribuzione degli sforzi di taglio dopo l'inserimento di una geogriglia di rinforzo.....	6
Fig. 5:	distribuzione orizzontale delle forze necessarie per l'equilibrio. ....	8
Fig. 6:	variazione delle forze richieste. ....	9
Fig. 7:	scivolamento al di sopra di uno strato di rinforzo. ....	10
Fig. 8:	sfilamento del rinforzo. ....	11
Fig. 9:	andamento della percentuale del carico di picco per la determinazione di $T_{CR}$ .....	12
Fig. 10:	curve isotemporali per la determinazione di $T_{CS}$ in funzione dell'allungamento e del tempo .....	13
Fig. 11:	equilibrio locale di ciascuno strato di rinforzo.....	15
Fig. 12:	lunghezza insufficiente in cresta. ....	15
Fig. 13:	scivolamento all'interfaccia geogriglia-terreno .....	16
Fig. 14:	equilibrio del blocco rinforzato, considerato come rigido. ....	16
Fig. 15:	superficie bi-lineare (a doppio cuneo). ....	16
Fig. 16:	calcolo della forza massima richiesta con un meccanismo di rottura "a doppio cuneo"......	17

Fig. 17: diagrammi di Jewell con $r_u = 0.00$ per differenti inclinazioni $\beta$ del pendio e angolo d'attrito interno del materiale $\phi'$ .....	20
Fig. 18: diagrammi di Jewell con $r_u = 0.25$ per differenti inclinazioni $\beta$ del pendio e angolo d'attrito interno del materiale $\phi'$ .....	21
Fig. 19: diagrammi di Jewell con $r_u = 0.50$ per differenti inclinazioni $\beta$ del pendio e angolo d'attrito interno del materiale $\phi'$ .....	22
Fig. 20: calcolo del risvolto .....	24
Fig. 21: pendii ripidi: definizione delle variabili. ....	25
Fig. 22: dati di progetto .....	27

## Elenco delle tabelle

Tab. 1: coefficienti di scivolamento ( $f_{ds}$ ).....	10
Tab. 2: coefficienti di sfilamento ( $f_{po}$ ) .....	11
Tab. 3: resistenza a lungo termine delle geogriglie TENAX a 20° .....	13
Tab. 4: $T_{CR}$ in kN/m a diverse temperature per i diversi tipi di geogriglie.....	13
Tab. 5: fattore di sicurezza relativo alle caratteristiche chimiche del terreno $f_{s_{chimico}}$ .....	14
Tab. 6: resistenza delle giunzioni delle geogriglie TENAX TT SAMP .....	14
Tab. 7: fattore di sicurezza contro i danni ambientali $f_{s_{danni\ ambientali}}$ .....	14
Tab. 8: spaziature dei rinforzi .....	25
Tab. 9: calcolo degli strati necessari .....	26

## PROGETTO DI PENDII RIPIDI RINFORZATI CON GEOGRIGLIE TENAX

Piergiorgio Recalcati, TENAX SPA, Geosynthetics Technical Office (GTO)

### 1. Terra rinforzata

Per terra rinforzata si intende il materiale composito che combina la tipica resistenza di due differenti materiali in grado di migliorare le caratteristiche globali dell'insieme. In particolare le proprietà geotecniche del terreno, materiale resistente a compressione, sono migliorate dalla combinazione con le geogriglie, materiale ad alta resistenza a trazione. I cosiddetti "geosintetici" hanno guadagnato un'importante posizione come materiali per il rinforzo del terreno, grazie alla loro convenienza. I geosintetici sono prodotti in plastica progettati per lavori in terra e negli ultimi anni hanno trovato sempre più vaste applicazioni nell'ingegneria civile.

Tra i vari geosintetici, le geogriglie Tenax hanno mostrato le loro superiori proprietà tecniche nel campo dei manufatti in terra rinforzata.

Le principali applicazioni delle geogriglie sono:

- stabilizzazione di rilevati su terreni comprimibili;
- rinforzo di manufatti in terra, quali pendii ripidi o anche muri verticali (figura 1).

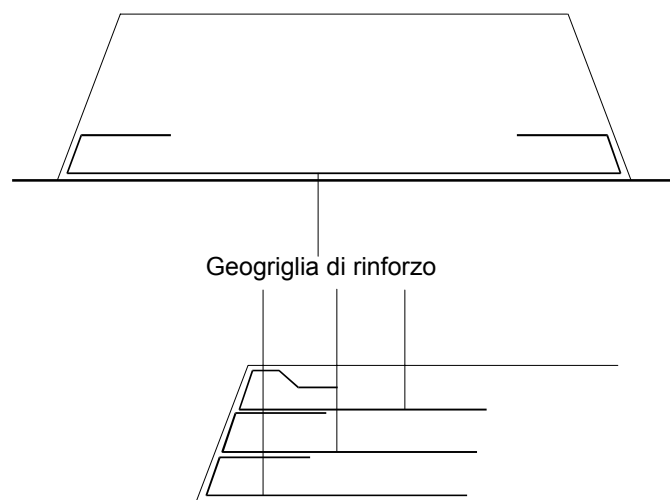


Fig. 1: esempi di terre rinforzate con geogriglie

Un rilevante numero di progetti è già stato realizzato in tutto il mondo, seguendo lo sviluppo delle tecniche di progetto e di costruzione dei manufatti in terra rinforzata.

### 2. Accenni di teoria

Un semplice modello aiuta a spiegare il principio cui si ispirano le tecniche per la terra rinforzata.

Consideriamo l'elemento di terreno in figura 2a, che è parte di una massa indefinita di terreno: l'applicazione di uno sforzo verticale  $\sigma_y$  causa una deformazione nell'elemento e il conseguente sforzo orizzontale  $\sigma_h$  causato dalla compressione laterale del terreno adiacente che si oppone alla deformazione. Orizzontalmente il terreno subisce una deformazione,  $\epsilon_h$  che è causa principale di rottura locale. Quando, come in figura 2b, un elemento di rinforzo è messo nel terreno, l'applicazione di uno sforzo verticale è seguita dalla deformazione dell'elemento di terreno e dall'allungamento dell'elemento di rinforzo. Questo allungamento genera poi una resistenza a trazione  $T$  nel rinforzo, che subito dopo produce uno sforzo orizzontale  $\sigma_h^*$ . Questo sforzo, che da anche l'azione di confinamento sui granuli di terreno, contribuisce a resistere alle forze orizzontali e a ridurre le deformazioni orizzontali.

Perciò l'inclusione di una geogriglia nella massa di terreno riduce le deformazioni e gli sforzi applicati al terreno.

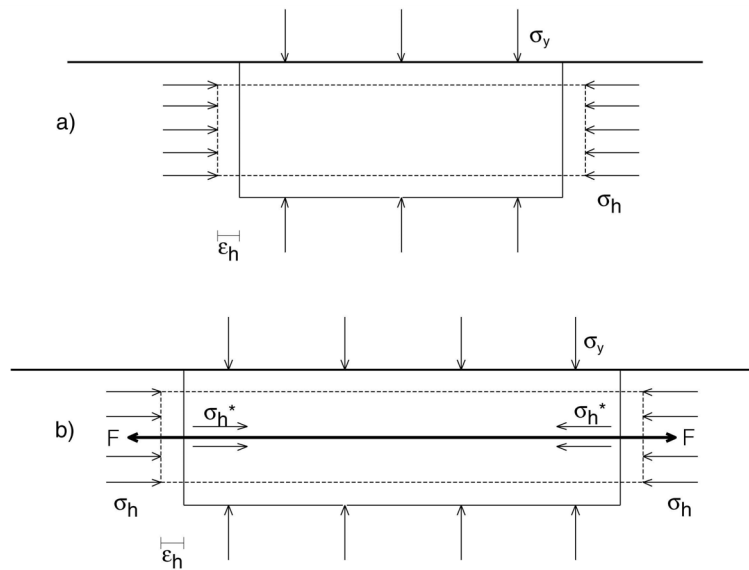


Fig. 2: distribuzione degli sforzi normali.

Gli sforzi verticali  $\sigma_y$  applicati al terreno possono perciò essere incrementati. Riguardo alla resistenza agli sforzi di taglio, in accordo con la figura 3 in un elemento di terreno incoerente si ha:

$$(\tau_{yx})_{\max} = \sigma_y \cdot \tan \phi_{\max} \quad (1)$$

dove:

$\phi_{\max}$  = massimo angolo di resistenza a taglio del terreno;

$(\tau_{yx})_{\max}$  = massimo sforzo di resistenza a taglio fornito dal terreno.

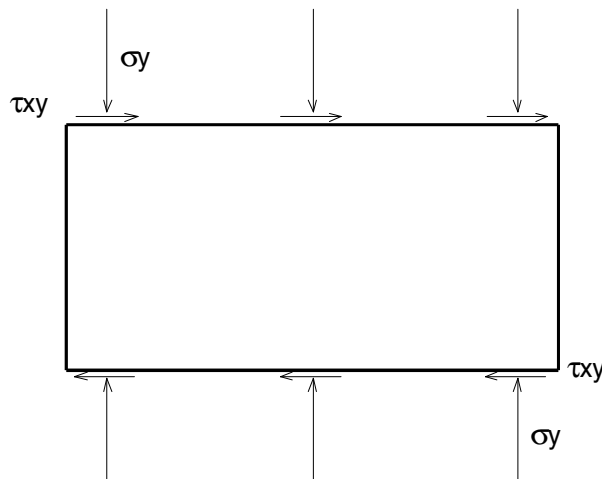


Fig. 3: distribuzione degli sforzi di taglio in un elemento di terreno.

Quando l'elemento di terreno è attraversato da un elemento di rinforzo inclinato di un angolo  $\theta$  rispetto alla verticale (figura 4), lo stato tensionale è modificato perché lo sforzo  $T$  genera uno sforzo di taglio prodotto dalla componente tangenziale  $T \cdot \sin \theta$ , la componente normale  $T \cdot \cos \theta$  genera un'altra  $\tau_{xy}$  dovuta all'angolo d'attrito  $\phi_{\max}$  del terreno.

$$(\tau_{yxr})_{\max} = \sigma_{yr} \cdot \tan \phi_{\max} + (T/A_s) \cdot \cos \theta \cdot \tan \phi_{\max} + (T/A_s) \cdot \sin \theta \quad (2)$$

Resistenza a taglio totale = Resistenza a taglio del solo terreno + Sforzo di taglio generato dalla componente normale di T + Sforzo di taglio generato dalla componente tangenziale di T

dove:

$A_s$  = area dell'elemento di rinforzo.

$(\tau_{yxr})_{\max}$  = massimo valore di resistenza a taglio del terreno rinforzato.

In tal modo lo sforzo normale sull'elemento di terreno è incrementato di:

$$\sigma_y^{\wedge} = (T/A) \cos \theta \quad (3)$$

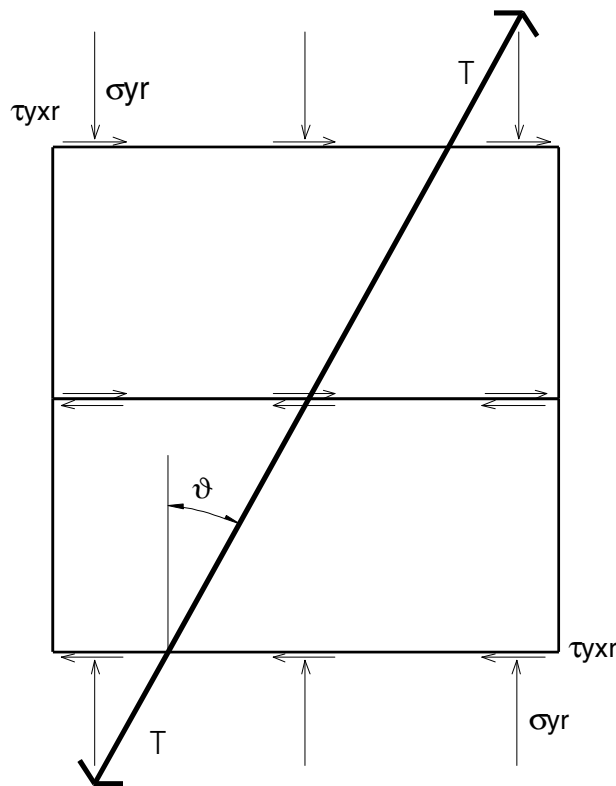


Fig. 4: distribuzione degli sforzi di taglio dopo l'inserimento di una geogriglia di rinforzo.

I fattori influenzanti la resistenza a taglio del terreno rinforzato sono:

- resistenza e rigidezza del rinforzo relativamente al terreno circostante;
- posizione del rinforzo;
- forma del rinforzo, che deve essere adeguato a produrre un elevato angolo d'attrito apparente all'interfaccia con il terreno;
- caratteristiche di creep (allungamento sotto carico di trazione costante) del rinforzo durante la vita di progetto;
- durabilità del rinforzo.

In particolare la forma del rinforzo deve garantire un attrito elevato tale che il rinforzo non sia tirato fuori dalla forza di trazione T. E' anche necessario che l'inclinazione del rinforzo sia adeguata a seguire la direzione di deformazione del terreno. Bisogna rilevare che un rinforzo troppo rigido può rompersi per piccole deformazioni senza mobilitare valori di resistenza elevati; un materiale troppo estensibile non riuscirebbe a

fornire un rinforzo sufficiente se prima non si verificano grosse deformazioni, deformazioni che però causerebbero la rottura del terreno.

La stabilità globale del terreno rinforzato è basata sull'interazione tra terreno e rinforzo. E' comunque necessario proteggere la facciata del manufatto dall'erosione.

I principali vantaggi delle opere in terra rinforzata sono i seguenti:

- costo complessivo più basso: la possibilità di costruire pendii più ripidi riduce la quantità di materiale necessaria per un rilevato; è inoltre possibile riutilizzare il materiale di scavo;
- miglioramento della stabilità: il rinforzo garantisce un miglioramento nel fattore di sicurezza;
- possibilità di costruire direttamente su terreni a debole capacità portante; un rinforzo posto sulla base permette di costruire direttamente su terreni scendenti, che normalmente richiederebbero una consolidazione preliminare e grande cautela durante la costruzione.

### 3. Geogriglie TENAX TT

Le geogriglie TENAX TT SAMP sono strutture bidimensionali realizzate con polietilene ad alta densità (HDPE) mediante processo di estrusione e stiratura mono-direzionale. Questa tecnologia permette di ottenere prodotti con notevoli qualità tecniche, che consentono il loro impiego in soluzioni innovative. Le geogriglie TENAX TT SAMP, chimicamente inerti e con elevata resistenza a trazione, vengono specificatamente realizzate per il rinforzo dei terreni.

Le particelle di terreno si incastrano nelle aperture della griglia, che svolge così un'efficace azione cerchiante, limitando i movimenti relativi e migliorando la resistenza al taglio dell'insieme terreno-geogriglia. L'elevata resistenza a trazione e la capacità della griglia a ridistribuire gli sforzi nel piano, permettono l'uso delle geogriglie Tenax TT nella realizzazione di pendii ripidi e muri in terra rinforzata.

### 4. Pendii ripidi rinforzati: definizione ed impostazione del problema

Per un terreno di riempimento c'è un angolo di inclinazione limite del pendio  $\beta_{lim}$  cui un pendio non rinforzato può essere costruito con sicurezza. Per il caso di materiale incoerente e secco, l'angolo di inclinazione limite è uguale all'angolo di attrito interno del terreno:

$$\beta_{lim} = \phi$$

Un pendio con inclinazione maggiore di quella limite si definisce pendio ripido; per realizzare un rilevato con pendio ripido è necessario aggiungere alcune forze addizionali per mantenere l'equilibrio.

Il metodo più facile consiste nella posa, orizzontalmente, di alcuni strati di rinforzo nel pendio così che gli elementi di rinforzo possono resistere alle forze orizzontali, incrementando la resistenza a taglio. Le forze che devono essere applicate al terreno per mantenere l'equilibrio possono essere sommate in una forza globale che agisce nella direzione orizzontale che è poi la direzione dei rinforzi.

La forza globale può essere espressa con la seguente formula:

$$T = (1/2) K \gamma H^2 \quad (4)$$

dove:

H = altezza del pendio [ m ];

$\gamma$  = peso dell'unità di volume del terreno [ kN/m<sup>3</sup> ];

K = coefficiente di spinta funzione dell'angolo del pendio, di  $\phi$  e del coefficiente di pressione neutra

$$r_u = u(z)/(\gamma_w z)$$

Per il caso di facciata verticale, il coefficiente K eguaglia il coefficiente di spinta attiva  $K_a$ ; per valori dell'angolo compresi tra 0° e 90°, K assume valori compresi tra 0 e  $K_a$ .

### 5. Forze richieste e disponibili

Le forze addizionali richieste per l'equilibrio di un pendio ripido, con un adeguato margine di sicurezza rispetto ad ogni potenziale meccanismo di rottura, possono essere determinate con un'analisi di equilibrio limite. Essa consiste nel considerare le possibili superfici di rottura e nel confrontare, per ognuna di esse, le forze attive con le forze di attrito. Il fattore di sicurezza è calcolato come rapporto tra la massima forza di

taglio fornita dal terreno prima della rottura e la forza di taglio sviluppata sulla superficie considerata. Un'approfondita ricerca permette di determinare la superficie che fornisce il minimo fattore di sicurezza, che deve essere confrontato con quello richiesto dalle esigenze di progetto.

Studi sperimentali hanno consentito di verificare che il metodo di analisi dell'equilibrio limite, usualmente chiamato "metodo delle strisce", da i migliori risultati in termini di precisione anche rispetto al tempo richiesto. Questo metodo permette di determinare le forze richieste per l'equilibrio, considerando la geometria del pendio, la pressione neutra  $u$ , e il sovraccarico. Gli strati di rinforzo sono calcolati in modo tale da fornire le forze richieste; è poi possibile definire lo sviluppo della massima forza disponibile in ogni strato, che dipende all'aderenza tra il rinforzo e il terreno, dalle caratteristiche del rinforzo, dalla compatibilità delle deformazioni con la funzionalità del manufatto. Il diagramma delle forze disponibili deve ricoprire quello delle forze richieste, come mostrato in figura 5.

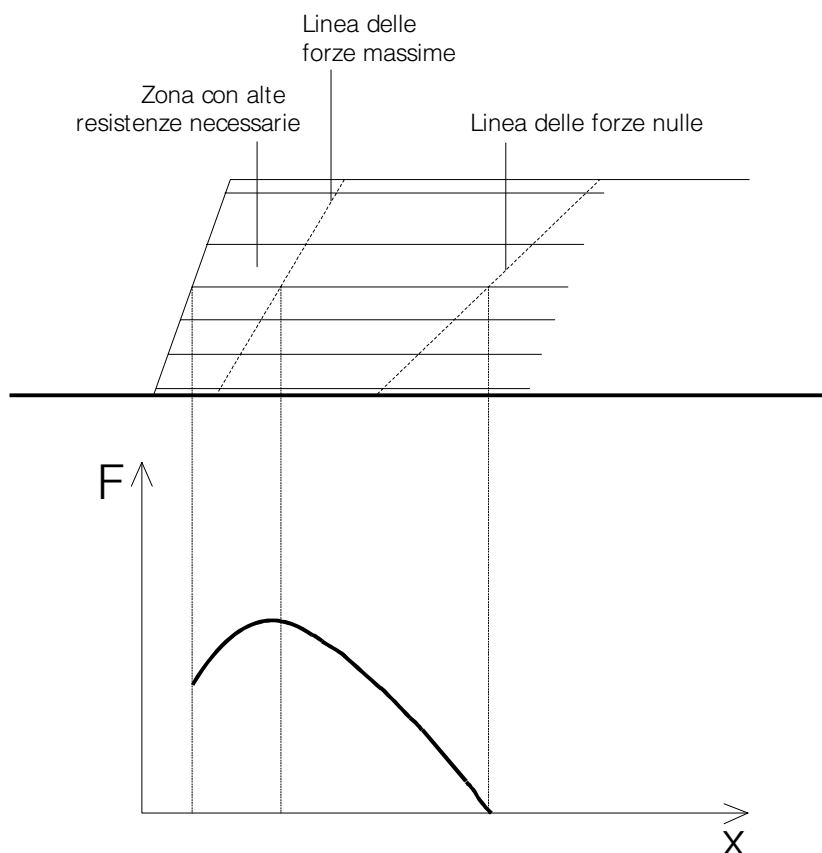


Fig. 5: distribuzione orizzontale delle forze necessarie per l'equilibrio.

Definito il tipo di rinforzo, nel nostro caso le geogriglie TENAX TT, l'obiettivo del progetto è poi fornire sufficienti strati di rinforzo, distribuiti in modo tale che in ogni punto di ogni strato la forza disponibile è maggiore di quella richiesta, con un predefinito fattore di sicurezza.

## 6. Distribuzione delle forze massime richieste

La forza orizzontale complessiva richiesta per mantenere l'equilibrio in ogni particolare caso di potenziale meccanismo di scorrimento può essere calcolata applicando le stesse forze esterne al pendio ed imponendo che il pendio sia in condizioni di equilibrio, assumendo un valore fissato della resistenza a taglio mobilizzata dal terreno.

L'analisi dell'intera gamma di meccanismi di potenziali scorrimenti permette di individuare due particolari superfici dentro il pendio che sono definite come la "linea di forza richiesta nulla" e la "linea di forza richiesta massima". La prima linea definisce la zona di terreno in cui sono richiesti gli strati di rinforzo per mantenere l'equilibrio.

La linea di massima forza richiesta è la linea che connette i punti in cui la forza richiesta è più alta; solitamente essa passa attraverso il piede del pendio. Queste due linee individuano una zona in cui sono richiesti uniformemente alti valori delle forze esterne e una zona di forze richieste decrescenti, come mostrato in figura 5.

E' da notare che la massima forza richiesta e la posizione delle due linee dipendono dalla resistenza a taglio che noi vogliamo sia mobilitata nel terreno. Per ogni particolare superficie di scorrimento, la forza globale richiesta per l'equilibrio è funzione del quadrato della profondità a cui si sviluppa la superficie di rottura; abbiamo, infatti:

$$T = (1/2) K \gamma z_i^2 \quad (5)$$

Se consideriamo due superfici molto vicine, ad una profondità  $dz$  l'una dall'altra, e assumiamo come costante la tensione orizzontale agente su  $dz$ , abbiamo:

$$\sigma_r = \frac{dT}{dz} \quad (6)$$

Ma  $\sigma_r$  deve equilibrare la spinta orizzontale del terreno  $\sigma_h$ , perciò deve essere:

$$\sigma_r = \sigma_h = K \gamma z \quad (7)$$

Gli strati di rinforzo sono usualmente progettati per resistere ciascuno alla stessa forza  $P$ : perciò abbiamo che

$$dT = \text{costante} = P \quad (8)$$

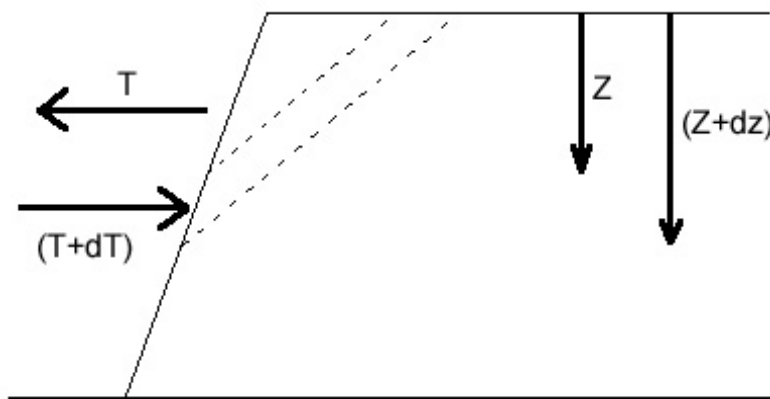


Fig. 6: variazione delle forze richieste.

Per ottenere questa forza uniforme negli elementi di rinforzo è necessario poi calcolare la spaziatura  $S_v$  degli strati di rinforzo in modo tale da soddisfare l'equazione (6); perciò l'eq. (6) diviene:

$$\sigma_r = \frac{P}{S_v} \quad (9)$$

Prendendo in considerazione l'eq. (7), abbiamo:

$$S_v = \frac{P}{K \cdot \gamma \cdot z} \quad (10)$$

Perciò la spaziatura verticale deve essere ridotta al crescere della profondità.

### 7. Forze disponibili ed ammissibili

Il valore della forza disponibile in un punto lungo un elemento di rinforzo dipende dalle proprietà del rinforzo stesso e dall'aderenza mobilizzata. L'aderenza è importante per evitare due possibili meccanismi di rottura: lo scivolamento lungo il rinforzo e lo sfilamento del rinforzo stesso, entrambi causati dalla spinta del terreno dietro il blocco rinforzato, come mostrato nelle Figure 7 e 8.

Nel caso di figura 7, la resistenza allo scivolamento lungo un elemento di rinforzo è una combinazione delle resistenze a taglio all'interfaccia tra il terreno e la parte piena della geogriglia e della resistenza a taglio all'interfaccia terreno-terreno attraverso le aperture della griglia. La resistenza a taglio è data da:

$$\tau_{ds} = \sigma'_n f_{ds} \tan \phi' \quad (11)$$

con:

$$f_{ds} = 1 - \alpha_s - (1 - \tan \delta' / \tan \phi') \quad (11 \text{ bis})$$

dove:

- $\tau_{ds}$  = sforzo di taglio resistente allo scivolamento
- $\sigma'_n$  = tensione normale effettiva sul rinforzo
- $f_{ds}$  = coefficiente di resistenza allo scivolamento
- $\phi'$  = angolo di attrito terreno-terreno (dalla prova di taglio diretto)
- $\delta'$  = angolo di attrito terreno-geogriglia (dalla prova di taglio diretto)
- $\alpha_s$  = frazione solida della superficie della geogriglia.

La forza resistente del rinforzo sarà:

$$T_{ds} = L B \tau_{ds} \quad (12)$$

Valori tipici del coefficiente di scivolamento per le geogriglie TENAX e per differenti terreni sono indicati in tabella 1.

Tipo di terreno	$f_{ds}$
Ghiaia	0.90÷1.00
Sabbia	0.85÷0.95
Limo	0.75÷0.85
Argilla	0.70÷0.80

Tab. 1: coefficienti di scivolamento ( $f_{ds}$ )

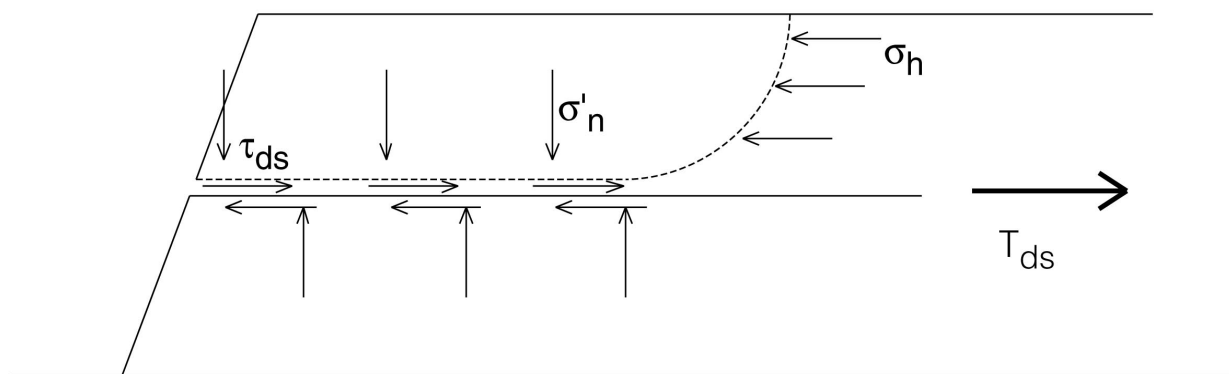


Fig. 7: scivolamento al di sopra di uno strato di rinforzo.

Nel caso di figura 8 lo sforzo di taglio resistente allo sfilamento è:

$$\tau_b = \sigma'_n f_{po} \tan \phi' \quad (13)$$

dove:

$f_{po}$  coefficiente di resistenza allo sfilamento.

La massima forza resistente applicata al rinforzo sarà:

$$T_b = 2 L B \tau_b \quad (14)$$

dove:

L = lunghezza del rinforzo:

B = larghezza del rinforzo.

Valori tipici del coefficiente di sfilamento per le geogriglie TENAX e per differenti terreni sono indicati in tabella 2.

Tipo di terreno	$f_{po}$
Ghiaia	0.90÷1.05
Sabbia	0.75÷0.95
Limo	0.70÷0.90
Argilla	0.60÷0.85

Tab. 2: coefficienti di sfilamento ( $f_{po}$ )

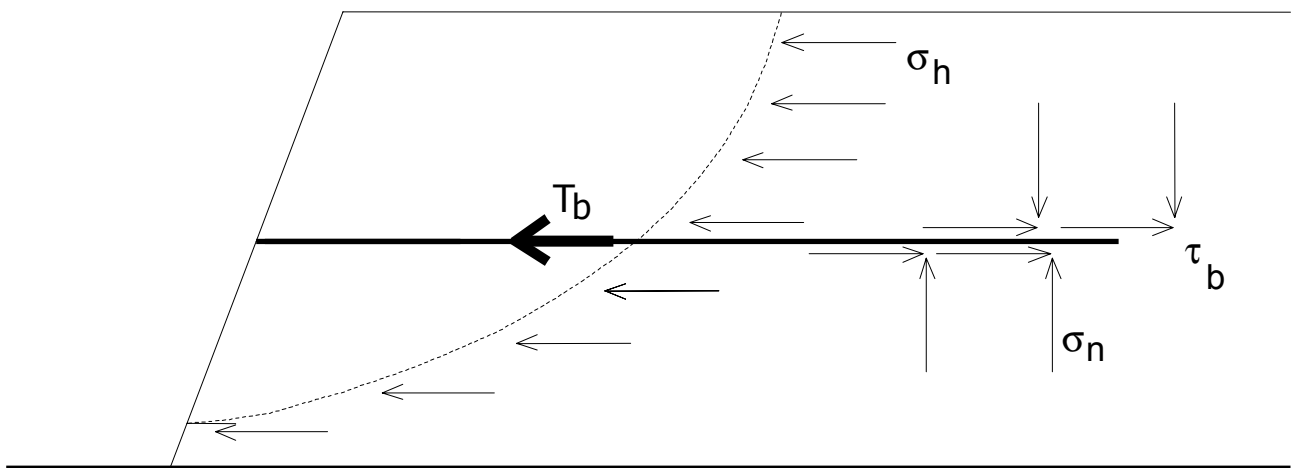


Fig. 8: sfilamento del rinforzo.

Se ogni geogriglia deve resistere alla stessa forza P di progetto, la lunghezza di ancoraggio è, per i due casi:

$$L_{ds} = \frac{P}{B \cdot \tau_{ds}} \quad (15)$$

$$L_b = \frac{P}{2 \cdot B \cdot \tau_b} \quad (16)$$

Queste lunghezze sono solitamente piccole, meno di 1 metro.

La resistenza ammissibile impiegata per il dimensionamento può essere ricavata, in base alla normativa GRI-GG4, a partire dal valore di Resistenza di Progetto a Lungo Termine (LTDS) mediante impiego di un opportuno Fattore di Sicurezza ( $f_{s_{totale}}$ ):

$$T_{all} = \frac{LTDS}{fs_{totale}} \quad (17)$$

dove:

LTDS =  $T_{CR}$ , per la verifica di progetto a rottura (stato limite ultimo) secondo Creep Rupture Analysis (Fig. 9);

oppure:

LTDS =  $T_{CS}$ , per la verifica di progetto allo stato deformativo secondo Creep Strain Analysis (Fig. 10);

$$fs_{totale} = (fs_{chimico} \cdot fs_{biologico} \cdot fs_{giunzioni} \cdot fs_{danni\ ambientali}) \quad (18)$$

Per ottemperare a quanto richiesto dal D.L. 11.03.88, la resistenza di progetto P si determina applicando un ulteriore Fattore di Sicurezza Globale  $FS_g$  alla resistenza ammissibile: in base all'importanza ed alla durata prevista per il progetto tale valore varia solitamente tra 1.30 e 1.50.

$$P = \frac{T_{all}}{FS_g} \quad (19)$$

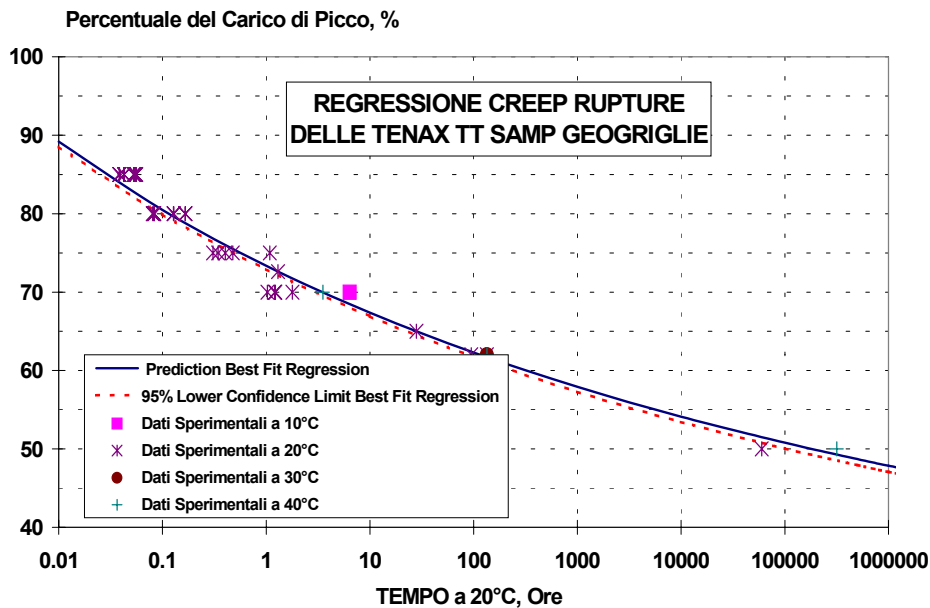


Fig. 9: andamento della percentuale del carico di picco per la determinazione di  $T_{CR}$

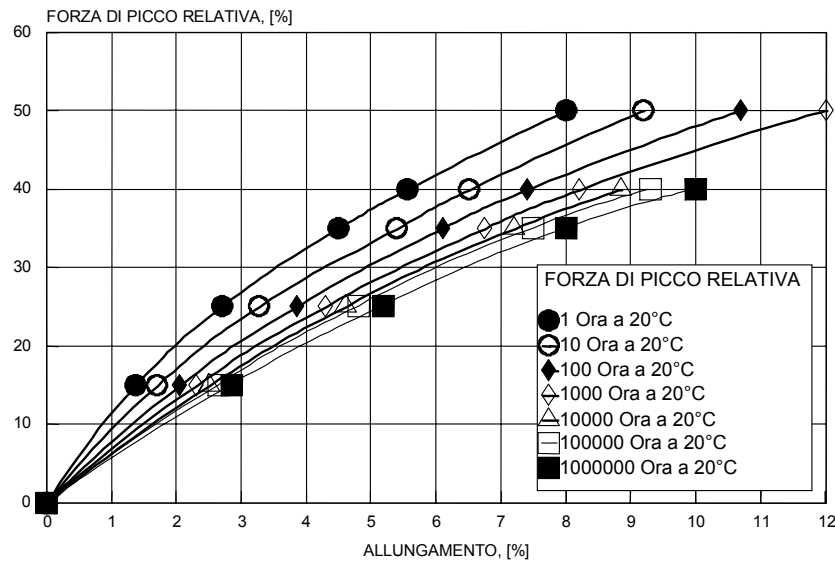


Fig. 10: curve isotemporal per la determinazione di  $T_{CS}$  in funzione dell'allungamento e del tempo

I valori delle resistenze a lungo termine riportate nell'Agrèment Tecnico rilasciato da I.T.C. (2002) sono indicati in tabella 3, alla temperatura di 20°.

Tipo Geogriglia	Resistenza di progetto			
	Deformativa $T_{CS}$ (kN/m)		A rottura $T_{CR}$ (kN/m)	
	A 60 anni	A 120 anni	A 60 anni	A 120 anni
TT 045 SAMP	19.8	18.5	21.6	21.2
TT 060 SAMP	26.4	24.6	28.7	28.3
TT 090 SAMP	39.6	36.9	43.1	42.4
TT 120 SAMP	52.8	49.2	57.5	56.5
TT 160 SAMP	70.4	65.6	76.6	75.4

Tab. 3: resistenza a lungo termine delle geogriglie TENAX a 20°

La Resistenza di Progetto a Lungo Termine ( $T_{CR}$  a 10°, 20°, 30°) è ricavata in base a prove accelerate di creep rupture di trazione eseguite mediante estrapolazione dei risultati a 120 anni (tabella 4).

Tipo geogriglia	Temperatura		
	10°	20°	30°
TT 045 SAMP	22.4	21.2	20.8
TT 060 SAMP	29.9	28.3	27.7
TT 090 SAMP	44.8	42.4	41.6
TT 120 SAMP	59.8	56.5	55.4
TT 160 SAMP	79.7	75.4	73.9

Tab. 4:  $T_{CR}$  in kN/m a diverse temperature per i diversi tipi di geogriglie

Attraverso l'equazione (18), si ottiene  $fs_{totale}$  moltiplicando diversi fattori di sicurezza parziali, di seguito analizzati (Koerner, 1994).

I Fattori di Sicurezza chimico e biologico per le geogriglie TENAX TT SAMP sono pari a 1.00, in quanto la tecnologia produttiva ed i polimeri utilizzati sono tali da garantire nessun danneggiamento a seguito di aggressione chimica o biologica (le geogriglie in HDPE sono chimicamente e biologicamente inerti). I risultati di prove eseguite dal Laboratorio Geosyntec (1991) in U.S.A., su geogriglie Tenax TT, in accordo agli

Standard di prova E.P.A. 9090 dall'Environmental Protection Agency con esposizione delle geogriglie estruse Tenax a un percolato sintetico aggressivo mostrano chiaramente come esse non siano soggette ad attacco chimico. Inoltre le geogriglie TENAX sono risultate essere resistenti all'attacco di microrganismi (batteri aerobi ed anaerobi, funghi ed alghe) e macrorganismi (roditori e termiti).

Tipo di Terreno	$f_{s_{\text{chimico}}}$
pH < 2.0	1.05
2.0 < pH < 10.0	1.00
pH > 10.0	1.05

Tab. 5: fattore di sicurezza relativo alle caratteristiche chimiche del terreno  $f_{s_{\text{chimico}}}$

Le geogriglie TENAX TT SAMP, progettate sulla base della LTDS, non saranno mai soggette a forze di trazione maggiori della LTDS stessa. Le prove di trazione vengono eseguite "attraverso le giunzioni", ossia sottoponendo a prova un campione che contiene almeno una giunzione, oltre alle due giunzioni inserite nei morsetti di prova. La resistenza delle giunzioni  $R_j$ , come mostrato in tabella 6, risulta essere sempre superiore alla resistenza di progetto; in particolare risulta maggiore di 1.5 volte la LTDS.

$$\frac{R_j}{LTDS} \geq 1.50 \quad (20)$$

Poiché l'equazione (20) è sempre verificata, si assume per il Fattore di Sicurezza delle Giunzioni  $f_{s_{\text{giunzioni}}}$  un valore corrispondente ad 1.00.

Tipo Geogriglia	Resistenza massima a trazione (kN/m)	Allungamento al picco (%)	Resistenza Giunzioni (kN/m)
TT 045	45	11.5	36
TT 060	60	13.0	50
TT 090	90	13.0	80
TT 120	120	13.0	110
TT 160	160	13.0	130

Tab. 6: resistenza delle giunzioni delle geogriglie TENAX TT SAMP

Quando il materiale di riempimento, specialmente se caratterizzato da elementi a spigolo vivo, viene sparso sulle geogriglie e compattato, le geogriglie possono subire danneggiamenti dovuti al punzonamento e all'abrasione da parte dell'aggregato. Ogni tipo di geogriglia subisce un diverso livello di danneggiamento, che può essere valutato per mezzo di prove di trazione eseguite su campioni danneggiati e non danneggiati. Un esteso programma di prove su questo argomento è stato coordinato in UK per valutare la resistenza residua di differenti geosintetici dopo essere stati sottoposti a una procedura di danneggiamento a scala reale. La procedura di danneggiamento è stata eseguita dal TRRL (Transport Road Research Laboratory), seguendo le direttive fissate da Watts & Brady (1990); i test di trazione sono poi stati eseguiti al laboratorio BTTG (British Textile Technology Group). In base ai risultati di tale campagna di prove, che dimostrano come le geogriglie in polietilene tipo Tenax TT SAMP, sottoposte a prove di danneggiamento con diversi tipi di terreno, mantengano pressoché completamente la resistenza iniziale, il Fattore di Sicurezza contro i danni ambientali può essere assunto come indicato in tabella 7.

Tipo di terreno	Dimensioni granuli	$f_{s_{\text{danni ambientali}}}$
limo ed argilla	< 0.06 mm	1.00
ceneri di combustione	variabile	1.00
sabbie fini e medie	0.06 - 0.6 mm	1.00
sabbie grosse e ghiaietto	0.6 - 6 mm	1.00
ghiaia	6 - 40 mm	1.00
ballast, pietre taglienti	< 75 mm	1.03
	< 125 mm	1.07

Tab. 7: fattore di sicurezza contro i danni ambientali  $f_{s_{\text{danni ambientali}}}$

## 8. Criteri di progetto

Il progetto di un pendio ripido rinforzato con geogriglie consiste nel definire la resistenza del rinforzo, la spaziatura e la lunghezza di ancoraggio necessari per assicurare all'opera un prefissato fattore di sicurezza nei confronti della stabilità interna.

I criteri di progetto che devono essere rispettati dalle geogriglie si possono riassumere nei seguenti punti:

1. Ciascuno strato di rinforzo deve garantire una resistenza sufficiente per resistere agli sforzi orizzontali, nella zona di sua competenza, causati dalla spinta del terreno non rinforzato alle spalle. Con riferimento a figura 11, la spaziatura verticale  $S_v$  deve soddisfare la condizione:

$$P > S_v \cdot \sigma_h \quad (21)$$

con

$$\sigma_h = K \cdot \sigma_v$$

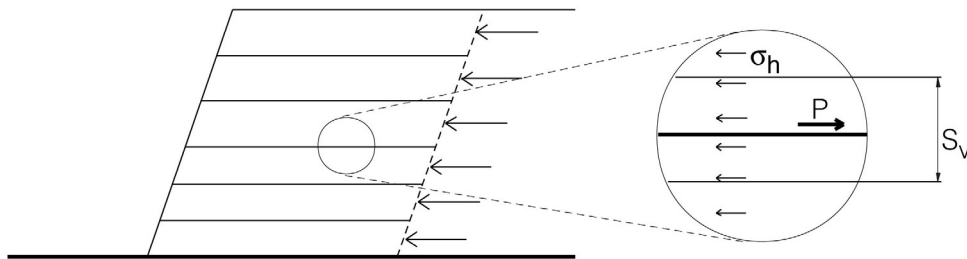


Fig. 11: equilibrio locale di ciascuno strato di rinforzo.

2. La lunghezza delle geogriglie in sommità deve essere tale da prevenire lo sfilamento delle stesse quando sono sottoposte ad una forza di trazione P. Se le geogriglie superiori non hanno lunghezza sufficiente, le griglie alla base devono "soportare" una tensione maggiore, che può provocarne la rottura (figura 12).

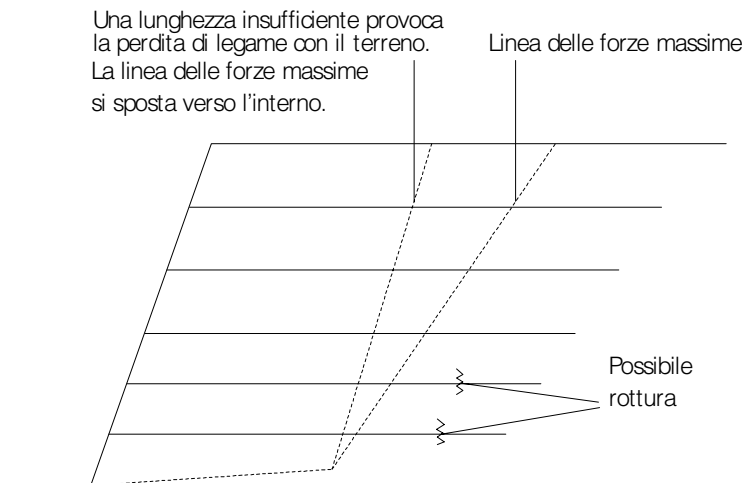


Fig. 12: lunghezza insufficiente in cresta.

3. La lunghezza di ciascuna geogriglia deve essere tale da prevenire lo scivolamento del terreno sopra di essa (figura 13). In particolare, una lunghezza insufficiente alla base (dove le spinte orizzontali sono massime) può provocare lo scivolamento dell'intero blocco rinforzato.

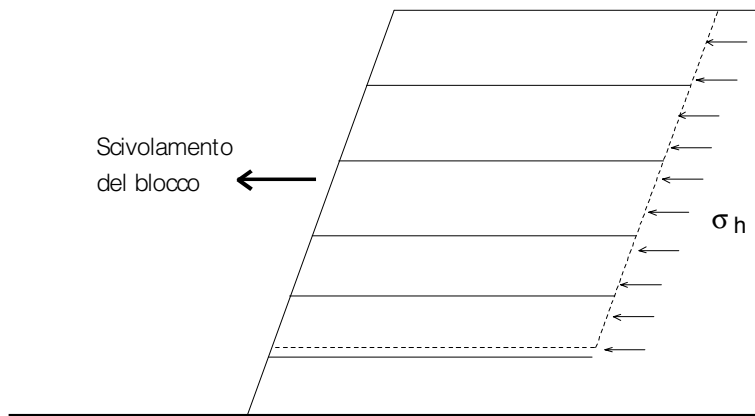


Fig. 13: scivolamento all'interfaccia geogriglia-terreno

4. Il blocco rinforzato, considerato come un blocco rigido, deve avere dimensioni tali da sopportare la spinta verso l'esterno del terreno a tergo, senza che si manifestino sforzi di trazione alla base (figura 14).

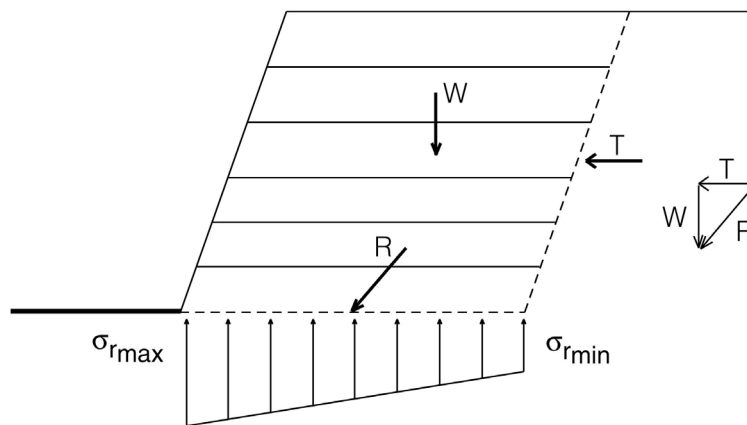


Fig. 14: equilibrio del blocco rinforzato, considerato come rigido.

5. La distribuzione delle tensioni delle geogriglie deve soddisfare l'equilibrio per ogni possibile meccanismo di rottura (figura 15). Superfici con forme complesse comportano analisi molto prossime alla realtà, ma sicuramente oneri di calcolo superiori. Tra le possibili superfici analizzabili (circolare, spirale logaritmica, lineare, bi-lineare) la spezzata bi-lineare risulta essere quella più realistica, pur essendo relativamente semplice da analizzare.

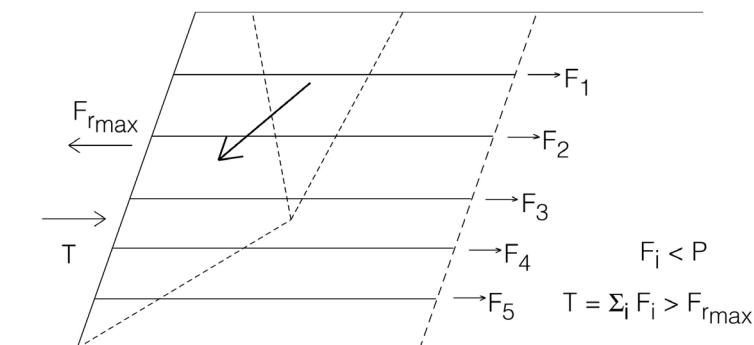


Fig. 15: superficie bi-lineare (a doppio cuneo).

### 9. Forze necessarie

Le forze addizionali richieste per l'equilibrio di un pendio ripido, con un adeguato margine di sicurezza rispetto ad ogni potenziale meccanismo di rottura, possono essere determinate con un'analisi di equilibrio limite basata sul metodo dei cunei.

Essa consiste nel considerare le possibili superfici di rottura piane e nel confrontare, per ognuna di esse, le forze attive con le forze di attrito. Il fattore di sicurezza è calcolato come rapporto tra la massima forza di taglio fornita dal terreno prima della rottura e la forza di taglio sviluppata sulla superficie considerata.

Come detto, la superficie bi-lineare soddisfa le esigenze di accuratezza e di velocità del calcolo.

Con riferimento a figura 16, le procedure da seguire sono le seguenti:

1. si fissa il nodo i tra i due blocchi (così che l'angolo  $\theta_1$  è fissato);
2. variando sistematicamente l'angolo  $\theta_2$  ed imponendo l'equilibrio delle forze, si determina la forza T;
3. si sceglie un secondo nodo, e si ripete la procedura. Al termine di tale procedura si determina la forza massima, e la superficie bi-lineare che causa tale forza massima.

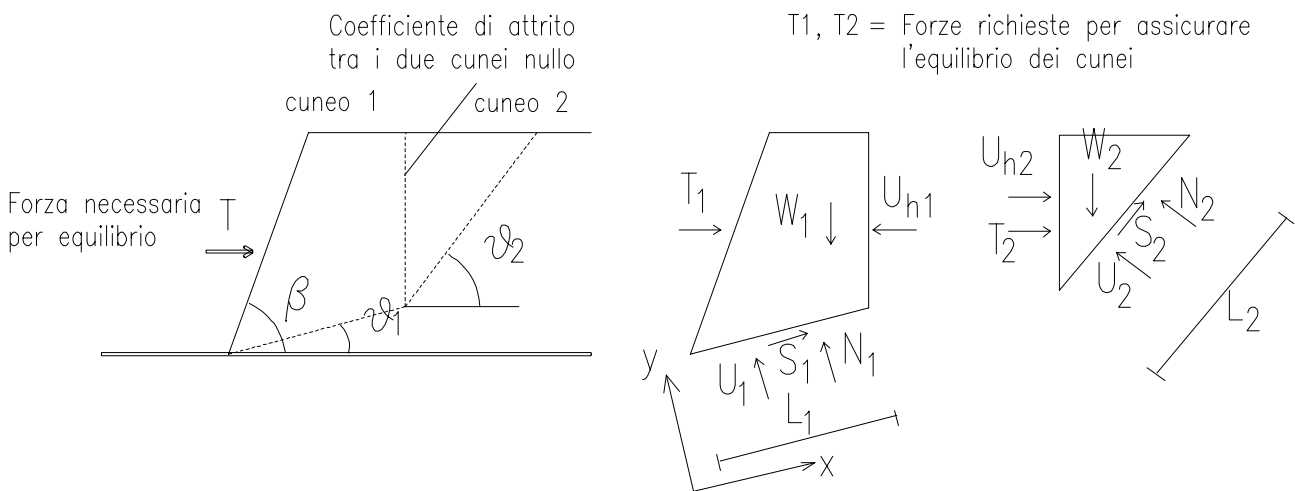


Fig. 16: calcolo della forza massima richiesta con un meccanismo di rottura "a doppio cuneo".

Con riferimento a figura 16, si ha:

$$U_{h1} = - U_{h2} \quad (22)$$

Le forze richieste per assicurare l'equilibrio dei cunei si ottengono risolvendo le seguenti equazioni:

$$T_1 = \frac{W_1 \cdot (\tan \theta_1 - \tan \phi') - (c' - \frac{l_1}{\cos \theta_1}) + U_1 \cdot \frac{\tan \phi'}{\cos \theta_1}}{1 + \tan \theta_1 \cdot \tan \phi'} + U_{h1} \quad (23)$$

$$T_2 = \frac{W_2 \cdot (\tan \theta_2 - \tan \phi') - (c' - \frac{l_2}{\cos \theta_2}) + U_2 \cdot \frac{\tan \phi'}{\cos \theta_2}}{1 + \tan \theta_2 \cdot \tan \phi'} + U_{h2} \quad (24)$$

$$T = T_1 + T_2 \quad (25)$$

con;  $c'$ ,  $\phi'$  = coesione ed attrito efficaci del terreno di riempimento.

Le equazioni (23), (24) e (25) possono essere espresse tramite la relazione:

$$T = W f_1(\phi', \theta_1, \theta_2) - c' f_2(\phi', \theta_1, \theta_2) + u f_3(\phi', \theta_1, \theta_2) \quad (26)$$

con  $f_1$ ,  $f_2$ ,  $f_3$  = funzioni dei parametri  $\phi'$ ,  $\theta_1$ ,  $\theta_2$ .

La forza globale T può essere espressa in funzione di un coefficiente di spinta K con una espressione “alla Rankine”:

$$T = 1/2 K \gamma H^2 \quad (27)$$

dove:

H = altezza del pendio;

$\gamma$  = peso dell'unità di volume del terreno;

K = coefficiente di spinta funzione dell'angolo del pendio  $\beta$  e dell'angolo di attrito  $\phi$ .

Possiamo anche scrivere:

$$\frac{T}{\gamma} = \frac{W}{\gamma} \cdot f_1(\phi', \theta_1, \theta_2) - \frac{c'}{\gamma} \cdot f_2(\phi', \theta_1, \theta_2, l_1, l_2) + \frac{u}{\gamma} \cdot f_3(\phi', \theta_1, \theta_2) \quad (28)$$

Ma:

$$W/\gamma = A \cdot 1.00 \text{ m}$$

essendo:

V = volume del doppio cuneo;

A = area della sezione verticale del doppio cuneo.

Se imponiamo:

$$r_u = \frac{u}{\gamma \cdot H} = \text{coefficiente della pressione dei pori}$$

$$c' = 0$$

L'equazione (28) diviene:

$$\frac{T}{\gamma} = A \cdot f_1(\phi', \theta_1, \theta_2) + r_u \cdot f_3(\phi', \theta_1, \theta_2) \quad (29)$$

con  $f_3$  funzione dei parametri tra parentesi. In base alle equazioni (27) e (29), risulta:

$$K = \frac{2 \cdot T}{\gamma \cdot H^2} \quad (30)$$

Se imponiamo H = 1, otteniamo finalmente:

$$K = \frac{2 \cdot T}{\gamma} \quad (31)$$

E' dunque possibile ottenere un valore del coefficiente di spinta, K, applicando il metodo dei due cunei ad un pendio di altezza unitaria e calcolando il rapporto T/ $\gamma$  con l'equazione (29) e K con l'equazione (31).

Esistono appositi programmi di calcolo che permettono di ottenere un diagramma del coefficiente K in funzione dell'inclinazione del pendio  $\beta$  e dell'angolo di attrito efficace  $\phi'$ ; è possibile realizzare un diagramma per ciascun valore di  $r_u$ . Sarebbe teoricamente possibile ottenere diagrammi per ciascun valore di  $c'$ ; tale lavoro non è mai stato realizzato, ed è pertanto conservativo assumere  $c' = 0$ .

## 10. Diagrammi di Jewell

Esistono in bibliografia (Jewell, 1991) (Figure 17, 18 e 19) diagrammi a-dimensionalizzati tramite i quali è possibile determinare, oltre al valore di K, anche la lunghezza del rinforzo necessaria, in funzione dell'inclinazione del paramento di facciata  $\beta$  e dell'angolo di attrito interno del materiale  $\phi'$ . Utilizzando questi diagrammi è possibile calcolare, tramite il coefficiente K, la spinta T che deve essere assorbita dalle

geogriglie, la lunghezza minima (tramite il rapporto  $L/H_{ds}$ ) che le geogriglie devono avere alla base per prevenire lo scivolamento del blocco in terra rinforzata e la lunghezza minima (tramite il rapporto  $L/H_{ovrl}$ ) che le geogriglie devono avere in sommità per prevenire lo sfilamento delle geogriglie stesse. I diagrammi sono utilizzabili nelle seguenti ipotesi:

1. pendio uniforme con cresta orizzontale ed angolo compreso tra  $30^\circ$  e  $90^\circ$ ;
2. fondazione in piano e di adeguata capacità portante;
3. terreno omogeneo, puramente frizionale e con parametri geomeccanici espressi in termini efficaci;
4. pressione dei pori (se presente) espressa per mezzo del coefficiente  $r_u = u/(\gamma_w z)$ ;
5. sovraccarico (se presente) uniformemente distribuito;
6. geosintetici di rinforzo di tipo continuo (geogriglie o geotessili) e posti orizzontalmente.

I diagrammi non considerano:

1. pendii immersi;
2. carichi puntuali, strisce di carico, o carichi sulla facciata, carichi dinamici;
3. parametri geomeccanici espressi in termini totali;
4. rinforzi puntuali (strisce o barre metalliche).

## NOMOGRAMMI PER LA PROGETTAZIONE DI PENDII RINFORZATI con $R_u = 0.00$ (Jewell, 1991)

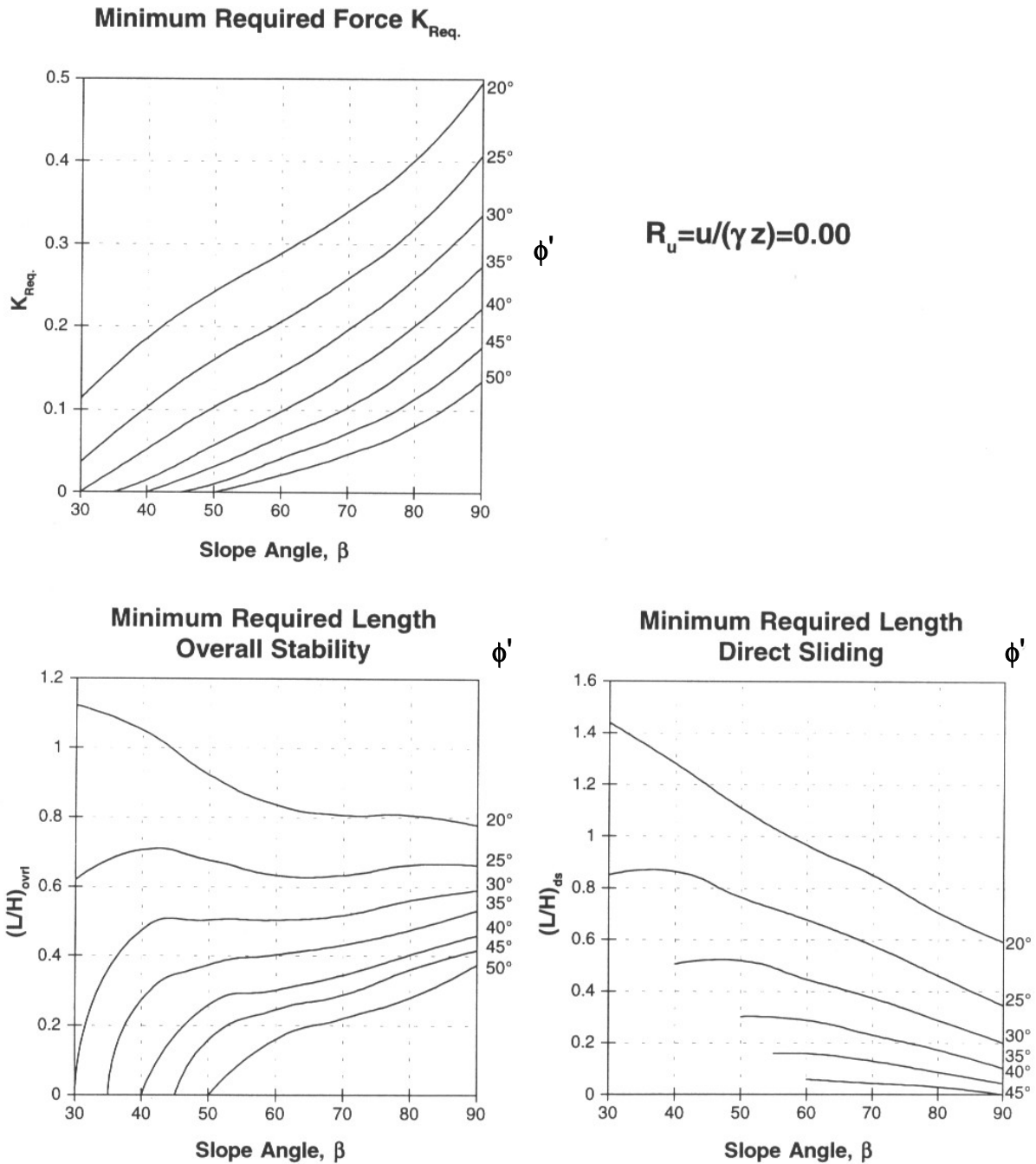


Fig. 17: diagrammi di Jewell con  $r_u = 0.00$  per differenti inclinazioni  $\beta$  del pendio e angolo d'attrito interno del materiale  $\phi'$ .

## NOMOGRAMMI PER LA PROGETTAZIONE DI PENDII RINFORZATI con $R_u = 0.25$ (Jewell, 1991)

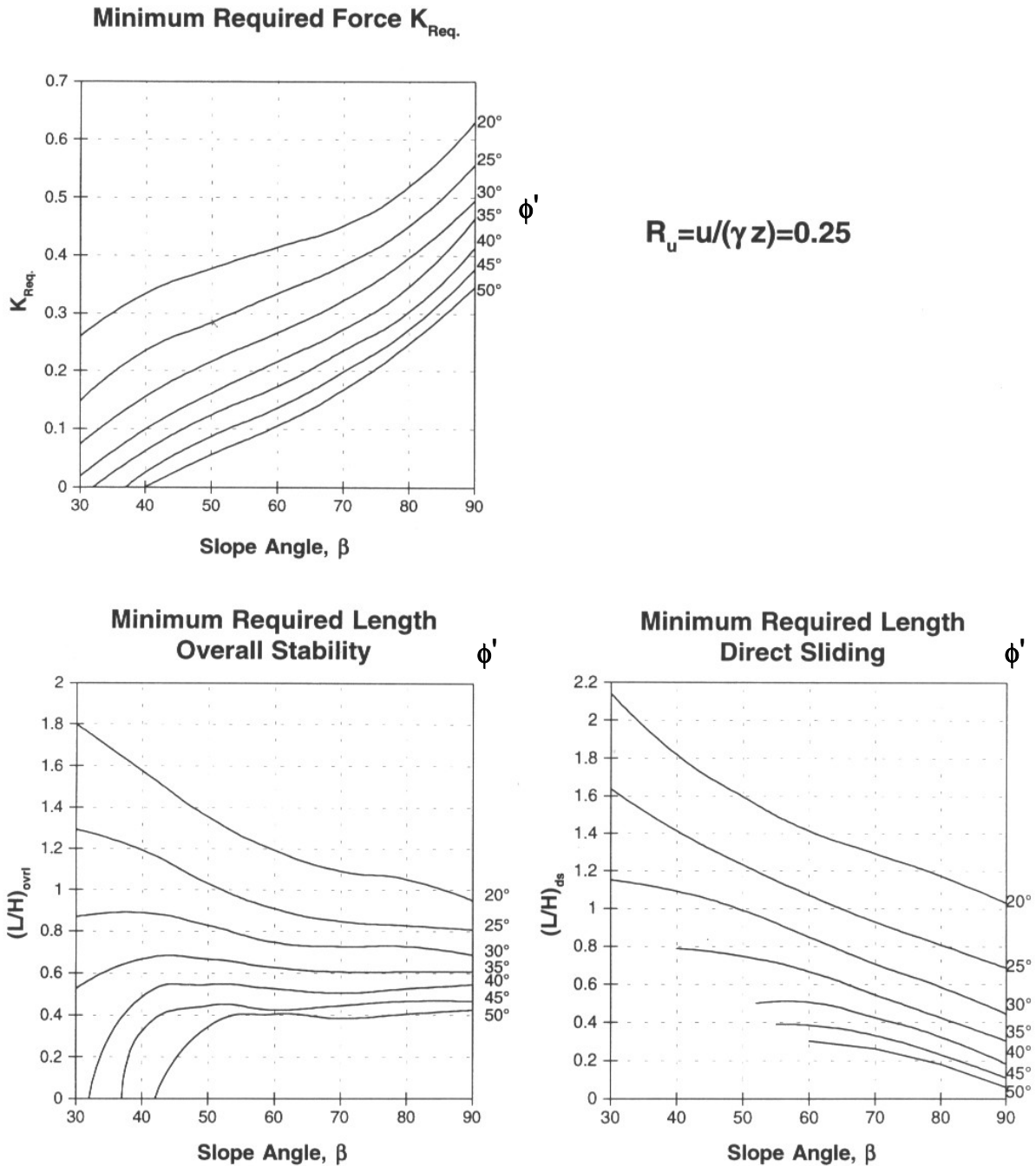


Fig. 18: diagrammi di Jewell con  $r_u = 0.25$  per differenti inclinazioni  $\beta$  del pendio e angolo d'attrito interno del materiale  $\phi'$ .

## NOMOGRAMMI PER LA PROGETTAZIONE DI PENDII RINFORZATI con $R_u = 0.50$ (Jewell, 1991)

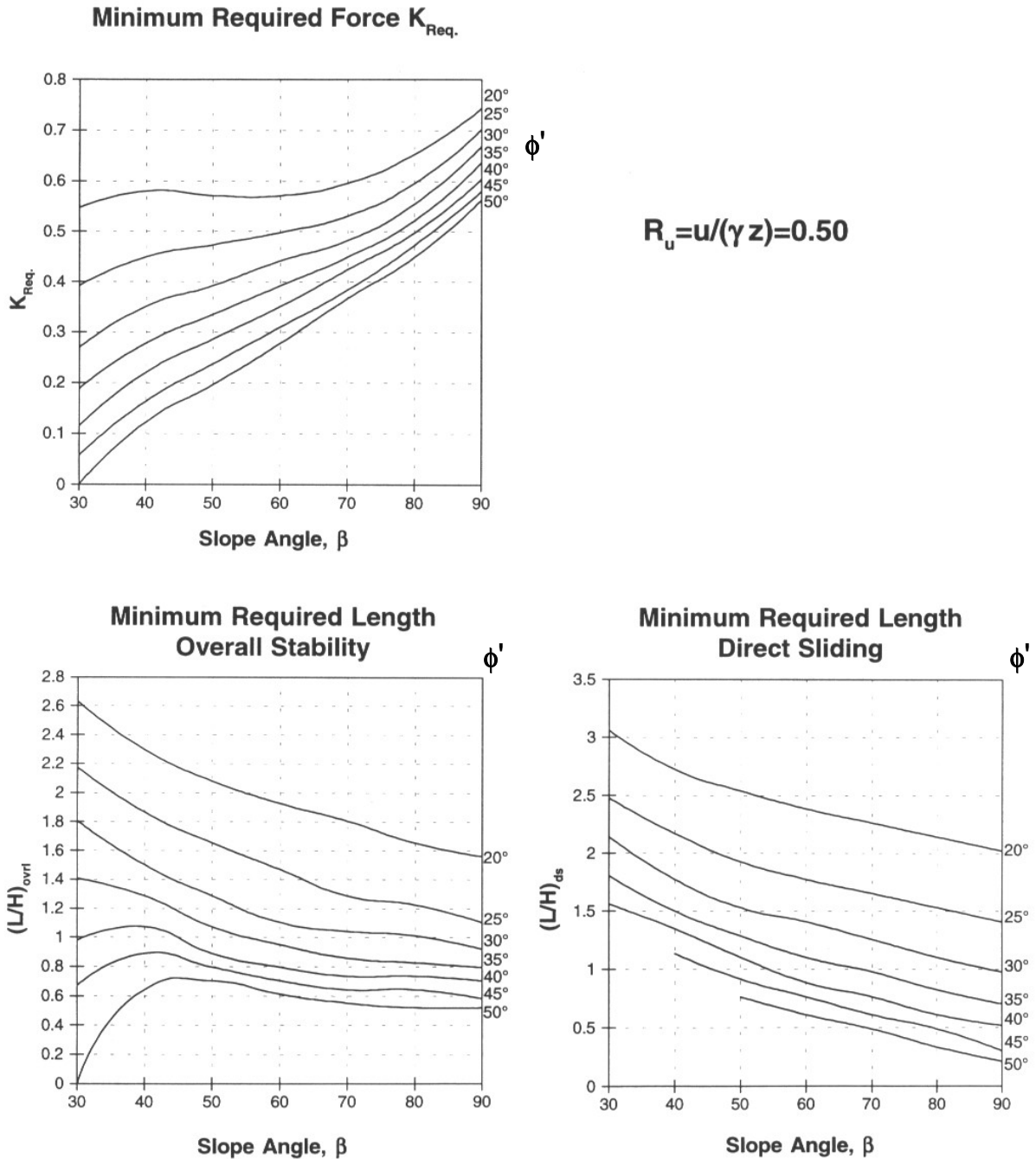


Fig. 19: diagrammi di Jewell con  $r_u = 0.50$  per differenti inclinazioni  $\beta$  del pendio e angolo d'attrito interno del materiale  $\phi'$ .

## 11. Determinazione della spaziatura tra i rinforzi

Come detto in precedenza, la spaziatura ottimale prevederebbe che ciascun rinforzo debba sopportare il medesimo sforzo. Il massimo valore dello stato di sforzo che ci si può aspettare vale:

$$F_r S_v K \gamma z = n v K \gamma Z \quad (32)$$

con:

- $n$  = numero degli strati di terreno compattati per ciascuno strato di rinforzo;
- $S_v$  = spaziatura verticale tra i rinforzi;
- $v$  = spessore minimo di compattazione del terreno.

Il calcolo della distribuzione delle spaziature è semplificato dalla definizione di un parametro indicato come "costante di spaziatura", definito in funzione dello spessore di compattazione  $v$  (spaziatura minima):

$$Q = \frac{P}{K \cdot \gamma \cdot v} \quad (33)$$

e quindi:

$$P = v \cdot K \cdot \gamma \cdot Q \quad (34)$$

dalla (32) e (34):

$$F_r = P \cdot \frac{S_v}{v} \cdot \frac{z}{Q} \quad (35)$$

$Q$  è uguale alla profondità alla quale la spaziatura necessaria è esattamente pari allo spessore di compattazione  $v$ . La resistenza disponibile deve essere maggiore della forza richiesta  $F_r$ :

$$P \geq F_r \quad (36)$$

cioè:

$$\frac{v}{S_v} \geq \frac{z}{Q} \quad (37)$$

Tramite l'equazione (37) è possibile ricavare la spaziatura che ottimizza la resistenza delle geogriglie.

Per esempio, se

$$Z/Q = 0.5 \text{ allora } v/S_v = 0.5;$$

cioè: se  $Z = Q/2$  allora  $S_v = 2v$

$$\text{se } Z = Q/3 \text{ allora } S_v = 3v$$

E' pertanto possibile determinare delle aree dove i rinforzi sono equispaziati; queste aree devono ovviamente rispettare le condizioni espresse dalla equazione (36) e (37).

E' comodo scegliere la spaziatura come un sottomultiplo della costante  $Q$ :

$$z_0 = Q; Z_1 = Q/2; Z_2 = Q/3 \quad (38)$$

## 12. Risolto

Per prevenire spancamenti della facciata e fenomeni di erosione in facciata, è possibile realizzare la struttura con facciata in pannelli di calcestruzzo, blocchetti prefabbricati in calcestruzzo o risvoltando la geogriglia lungo la facciata stessa.

In questo caso (tecnica del wrap-around) è necessario calcolare la lunghezza del risvolto  $L_r$ .

Il problema viene risolto imponendo che la spinta del terreno sul singolo strato non possa sfilare la geogriglia risvoltata.

Con riferimento alla figura 20, si impone l'equilibrio delle forze applicando un fattore di sicurezza ( $FS_{wrap}$ ) alla lunghezza del risvolto:

$$FS_{wrap} K \gamma (z_i + S_{vi} / 2) S_{vi} = \gamma z_i f_{ds} \tan \phi' L_{ri} \quad (39)$$

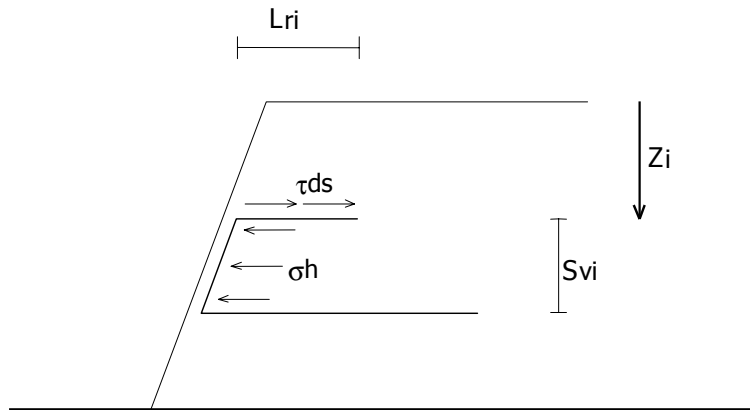


Fig. 20: calcolo del risvolto

In figura 20,  $\sigma_h$  e  $\tau_{ds}$  sono espressi come:

$$\sigma_h = K \gamma (z_i + S_{vi} / 2)$$

$$\tau_{ds} = \gamma z_i f_{ds} \tan \phi'$$

dunque:

$$L_{ri} = \frac{FS_{wrap} \cdot K \cdot (z_i + S_{vi} / 2) \cdot S_{vi}}{z_i \cdot f_{ds} \cdot \tan \phi'} \quad (40)$$

Il Fattore di sicurezza  $FS_{wrap}$  è di solito compreso tra 1.20 e 1.40. Nella pratica costruttiva, tuttavia, si è soliti confrontare il valore ricavato dai calcoli con un valore minimo, dettato dall'esperienza, pari ad almeno 1.00 m. Tale valore deriva da problemi logistici di cantiere, che rendono difficoltoso operare il risvolto delle geogriglie (abbastanza rigide) con spezzoni corti.

### 13. Procedura di calcolo

Con riferimento ai diagrammi rappresentati nelle figure 17, 18 e 19, le fasi di calcolo sono le seguenti:

- 1) Definire la geometria ed il sovraccarico  $W_s$ , eventualmente agente sulla cresta del pendio, come rappresentato in figura 21. Calcolare l'altezza incrementata  $H^{\wedge}$ :

$$H^{\wedge} = H + (W_s / \gamma) \quad (41)$$

- 2) Prefissati i fattori di sicurezza (vedere le tabelle 5,7) calcolare la tensione ammissibile  $P$  del rinforzo per mezzo dell'equazione (17).

- 3) Definire i parametri di resistenza a taglio del terreno  $\phi'$  e  $\gamma$  ed il massimo valore del coefficiente della pressione dei pori  $r_u$ :

$$r_u = \max [u(z) / (\gamma_w z)] \quad (42)$$

con:

$u(z)$  = pressione dei pori alla profondità  $z$  dalla cresta del pendio.

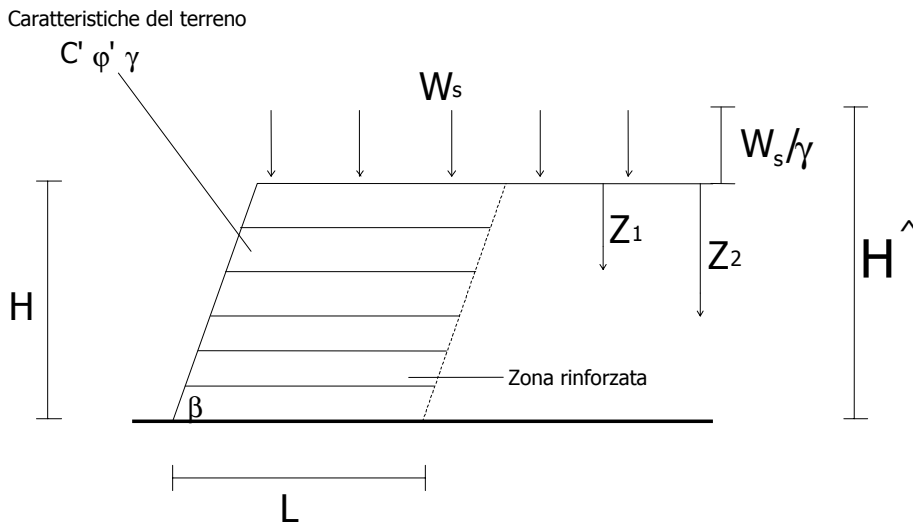


Fig. 21: pendii ripidi: definizione delle variabili.

- 4) Utilizzando i diagrammi, ricavare, in funzione dell'angolo del pendio  $\beta$  e dell'angolo di attrito  $\phi'$  del terreno, il coefficiente di spinta  $K$  ed il rapporto tra la lunghezza del rinforzo e l'altezza del rilevato  $L/H_{ovrl}$  e  $L/H_{ds}$ . Il diagramma deve essere scelto in base al coefficiente della pressione dei pori  $r_u$ .

La lunghezza del rinforzo viene scelta come segue:

- a) se  $L/H_{ovrl} > L/H_{ds}$ :

la lunghezza del rinforzo viene mantenuta costante e pari a:

$$L = H^ (L/H_{ovrl}) \quad (43)$$

- b) se  $L/H_{ovrl} < L/H_{ds}$ :

la lunghezza del rinforzo può essere:

- b1) costante e pari a:

$$L = H^ (L/H_{ds}) \quad (44)$$

- b2) variabile linearmente da:

$$L = H^ (L/H_{ds}) \quad \text{alla base} \quad (45)$$

a:

$$L = H^ (L/H_{ovrl}) \quad \text{in sommità.} \quad (46)$$

- 5) Definire la spaziatura minima  $v$  (corrispondente allo spessore minimo di compattazione) e calcolare la costante di spaziatura  $Q$  per mezzo dell'equazione (33).
- 6) Individuare le zone in cui la spaziatura tra i rinforzi è un multiplo della spaziatura minima  $v$  ( $v, 2v, 3v, \dots$ ), come mostrato nella tabella 8.

Spaziatura $S_{vi}$ [m]	Profondità $z_i$ [m]	Spessore strato $s_i$ [m]
$S_{vi} = v$	$Q \div Q/2$	$s_1 = H^ - Q/2$
$S_{vi} = 2 v$	$Q/2 \div Q/3$	$s_2 = Q/2 - Q/3$
...	...	...
...	...	...
$S_{vn} = n v$	$Q/n \div W_s/\gamma$	$s_n = Q/n - W_s/\gamma$

Tab. 8: spaziature dei rinforzi

Se  $H^ > Q$  la spaziatura minima deve essere ridotta, ovvero deve essere scelta una geogriglia con resistenza a trazione maggiore.

7) Calcolare il numero di strati necessari: la prima geogriglia viene sempre posizionata al piede dell'opera; gli altri strati vengono calcolati partendo dalla base. Con riferimento alla tabella 9, le procedure da seguire sono le seguenti:

- dividere lo spessore di ciascuna zona (identificata in tabella 8) per la spaziatura dei rinforzi, in modo da ottenere il numero di geogriglie necessarie. Il risultato viene arrotondato per difetto all'intero.

$$N_i = (s_i / S_{vi})_{\text{arrotondato per difetto}} \quad (47)$$

- calcolare lo spessore residuo nella zona:

$$R_i = s_i - S_{vi} \cdot N_i \quad (48)$$

- sommare lo spessore residuo allo spessore della zona sovrastante:

$$s_{i+1} = s_{i+1} + R_i \quad (49)$$

ove:

$$R_0 = 0$$

- ripetere il calcolo per ciascuna zona.

$s_i/S_{vi}$	$N_i$	$R_i$ [m]	$s_{i+1}$ [m]
$s_1/S_{v1}$	$N_1 = \text{INT}(s_1/S_{v1})$	$R_1 = s_1 - S_{v1} N_1$	$s_2 = s_2 + R_1$
$s_2/S_{v2}$	$N_2 = \text{INT}(s_2/S_{v2})$	$R_2 = s_2 - S_{v2} N_2$	$s_3 = s_3 + R_2$
$s_3/S_{v3}$	$N_3 = \text{INT}(s_3/S_{v3})$	$R_3 = s_3 - S_{v3} N_3$	$s_4 = s_4 + R_3$
...	...	...	...
...	...	...	...
$s_n/S_{vn}$	$N_n = \text{INT}(s_n/S_{vn})$	$R_n = s_n - S_{vn} N_n$	-
$N_{\text{tot}} = 1 + N_1 + N_2 + N_3 + \dots + N_n$			

Tab. 9: calcolo degli strati necessari

- Se lo strato superiore viene posizionato ad una distanza maggiore di 0.8 m al di sotto della cresta, è prudente aggiungere un ulteriore strato.

8) Calcolare la forza globale necessaria per l'equilibrio:

$$T = (1/2) K \gamma H^2 \quad (50)$$

9) Verificare che la forza media richiesta per ciascuna geogriglia sia minore della resistenza a trazione di progetto:

$$(T/N_{\text{tot}}) \leq P \quad (51)$$

dove:  $N_{\text{tot}}$  = numero complessivo delle geogriglie.

Se questa condizione non è verificata, deve essere aumentato il numero degli strati o deve essere modificata la resistenza a trazione della geogriglia.

10) Se viene utilizzato il risvolto, calcolare la lunghezza  $L_{ri}$  per ciascuno strato:

$$z_i = z_i + (W_s / \gamma) \quad (52)$$

$$L_{ri} = \frac{K \cdot (z_i + S_{vi} / 2) \cdot S_i}{f_{ds} \cdot \tan \phi' \cdot z_i} \cdot FS_{\text{wrap}} \quad (53)$$

eventualmente:

$$L_r = \max [L_{ri}] \quad (54)$$

### 14. Esempio applicativo

Si deve rinforzare un pendio di altezza 6.00 m, con inclinazione del paramento di facciata pari a 70°. Il sovraccarico in sommità è di 10 kPa. La fondazione è piana e con adeguata capacità portante. La vita utile dell'opera è di 50 anni. Il terreno disponibile è una ghiaia sabbiosa debolmente limosa, avente le seguenti proprietà meccaniche:

$$c' = 10 \text{ kPa} , \phi' = 34^\circ , \gamma = 20 \text{ kN/m}^3.$$

Il rilevato può essere parzialmente saturo in caso di pioggia.

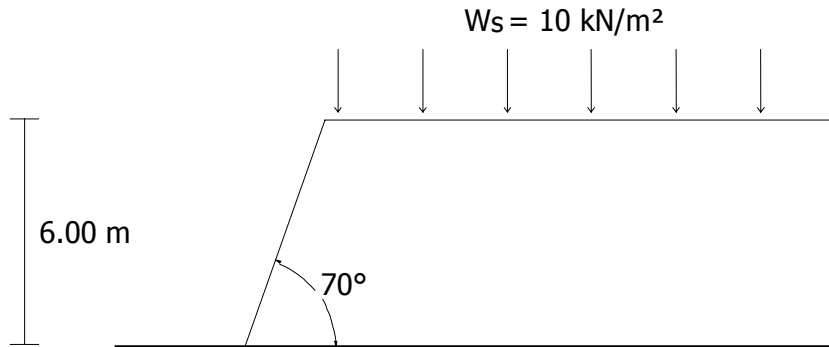
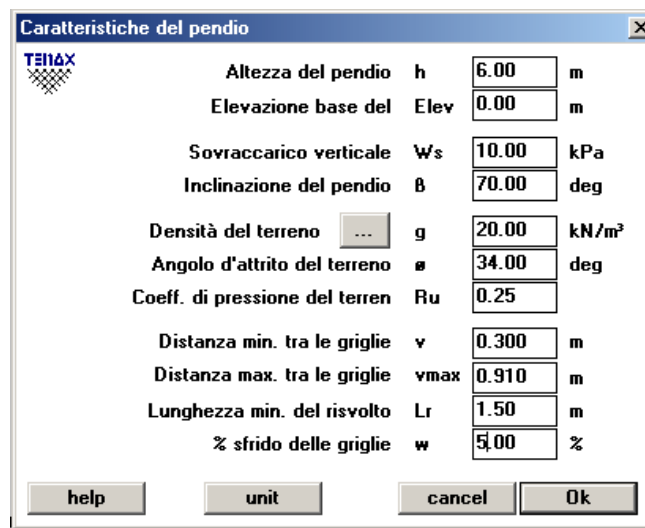


Fig. 22: dati di progetto

Viene di seguito sviluppata, secondo quanto illustrato in precedenza (paragrafo 13), il dimensionamento del pendio rinforzato; vengono anche progressivamente mostrate le schermate estratte dal software di calcolo TNXSlope, utilizzato per il dimensionamento.

1) Dati di progetto:

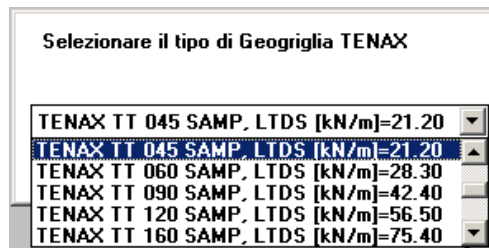
- H = 6.00 m
- $\beta = 70^\circ$
- $W_s = 10 \text{ kPa}$
- $\gamma = 20 \text{ kN/m}^3$
- $\phi' = 34^\circ$



A causa della presenza del sovraccarico, bisogna calcolare un'altezza di progetto, detta "altezza incrementata", che tenga conto di tale carico:

$$H^{\wedge} = H + W_s/\gamma = 6.50 \text{ m}$$

2) Si sceglie di rinforzare il pendio con la geogriglia TENAX TT 060 SAMP.



Si scelgono i seguenti fattori di sicurezza:

$$\begin{aligned}
 FS_g &= 1.30 \text{ (progetto di media difficoltà e con durata limitata)} \\
 fs_{\text{danni ambientali}} &= 1.00 \text{ (sabbia ghiaiosa debolmente limosa)} \\
 fs_{\text{biologico}} &= 1.00 \\
 fs_{\text{chimico}} &= 1.00 \\
 fs_{\text{giunzioni}} &= 1.00
 \end{aligned}$$

Dunque si ha:

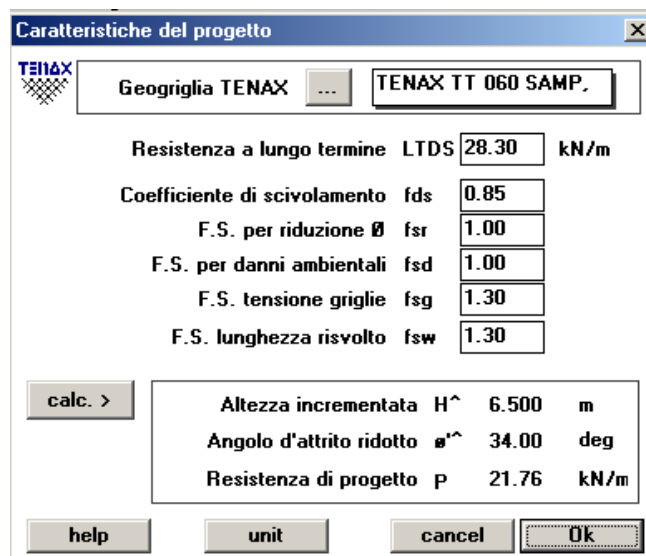
$$fs_{\text{totale}} = (fs_{\text{danni ambientali}} \cdot fs_{\text{chimico}} \cdot fs_{\text{biologico}} \cdot fs_{\text{giunzioni}}) = 1.00$$

La resistenza ammissibile della geogriglia TT 060 SAMP risulta essere pari a:

$$T_{\text{all}} = \frac{LTDS}{fs_{\text{totale}}} = 28.30 \text{ kN/m}$$

La resistenza di progetto  $P$  si ottiene dal seguente rapporto:

$$P = \frac{T_{\text{all}}}{FS_g} = \frac{28.30}{1.30} = 21.76 \text{ kN/m}$$



3) Si assume:  $c'=0$  kPa;  $\phi'=34^\circ$ ;

Non conoscendo l'andamento della pressione dei pori con la profondità  $u(z)$ , ma considerando la possibilità che il rilevato sia parzialmente saturato, si assume:  $r_u = 0.25$

4) Dalla figura 18 (Diagramma di Jewell), relativa a  $r_u = 0.25$ , si ottiene:

$$K = 0.28$$

$$L/H_{ovrl} = 0.63$$

$$L/H_{ds} = 0.58$$

quindi:

$$L = H \cdot (L/H_{ovrl}) = 4.10 \text{ m}$$

5) Scegliendo uno spessore di compattazione di 0.30 m, la spaziatura minima diviene:

$$v = 0.30 \text{ m}$$

e quindi:

$$Q = \frac{P}{K \cdot \gamma \cdot v} = \frac{21.76}{0.282 \cdot 20 \cdot 0.30} = 12.87 \text{ m}$$

6) Calcolo delle zone a spaziatura costante

Spaziatura $S_{vi}$ [m]	Profondità $z_i$ [m]	Spessore strato $s_i$ [m]
$S_{v1} = v=0.30$	$12.866 \div 6.433$	$6.500 - 6.433 = 0.067$
$S_{v2} = 2 v=0.60$	$6.433 \div 4.289$	$6.433 - 4.289 = 2.144$
$S_{v3} = 3 v=0.90$	$4.289 \div 0.500$	$4.289 - 0.500 = 3.789$

7) Calcolo di numero e posizione delle geogriglie

$s_i/S_{vi}$	$N_i$	$R_i$ [m]	$s_{i+1}^{\wedge}$ [m]
$0.067/0.30 = 0.223$	$N_1=0$	$R_1= 0.067$	$s_2^{\wedge}=2.144+0.067 = 2.211$
$2.211/0.60 = 3.685$	$N_2=3$	$R_2=0.411$	$s_3^{\wedge}=3.789+0.411 = 4.200$
$4.200/0.90 = 4.667$	$N_3=4$	$R_3=0.600$	
$N_{tot} = 3+4+1 = 8$			

Disposizione delle griglie

Geogriglia TENAX: TENAX TT 060 SAMP.

Strati di geogriglie richiesti: 8

griglia numerc	spazio vert.	altezza base	elevaz. base	lung. stab.	lung. risolto	lung. totale	F.S.
8	0.900	5.400	5.40	4.10	1.50	6.23	3.90
7	0.900	4.500	4.50	4.10	1.50	6.55	2.14
6	0.900	3.600	3.60	4.10	1.50	6.55	1.48
5	0.900	2.700	2.70	4.10	1.50	6.55	1.33
4	0.600	1.800	1.80	4.10	1.50	6.55	1.37
3	0.600	1.200	1.20	4.10	1.50	6.23	1.21
2	0.600	0.600	0.60	4.10	1.50	6.23	1.09

help unit cancel Ok

8) Calcolo della forza globale necessaria

$$T = (1/2) K \gamma H^2 = 119.15 \text{ kN/m}$$

9) Verifica delle tensioni nelle geogriglie:

La forza media richiesta per ciascuna geogriglia risulta pari al rapporto tra la forza di spinta orizzontale T e il numero complessivo di geogriglie:

$$T/N_{\text{tot}} = 119.15 / 8 = 14.89 \text{ kN/m}$$

La resistenza a trazione di progetto corrisponde a:

$$P = 21.76 \text{ kN/m}$$

E' pertanto verificata la condizione:

$$T/N_{\text{tot}} \leq P$$

Da questa relazione si definisce un fattore di utilizzo  $F_{\text{up}}$ , espresso in percentuale, ottenuto dal rapporto tra la forza media richiesta per ciascuna geogriglia e la resistenza a trazione di progetto:

$$F_{\text{up}} = \frac{(T/N_{\text{tot}})}{P} \cdot 100 = \frac{14.89}{21.76} \cdot 100 = 68.41\%$$

Analisi delle forze

Forza di spinta orizzontale	T	119.15	kN/m
Forza media Geogriglie	T/Nt	14.89	kN/m
Resistenza di progetto	P	21.77	kN/m
Fattore di utilizzo	Fup	68.41	%

help unit cancel Ok

10) Calcolo del risolto.

Per lo strato di base:

$$Z_1^{\wedge} = Z_1 + (W_s/\gamma) = 5.4 + 0.50 = 5.90 \text{ m}$$

$$L_{r1} = \frac{K \cdot (z_1^{\wedge} + S_{v1}/2) \cdot s_1}{f_{ds} \cdot \tan \phi' \cdot z_1^{\wedge}} \cdot FS_{\text{wrap}} = \frac{0.282 \cdot (5.90 + 0.60/2) \cdot 0.60}{0.85 \cdot \tan 34^{\circ} \cdot 5.90} \cdot 1.30 = 0.40 \text{ m}$$

Per lo strato superiore:

$$Z_8^{\wedge} = Z_8 + (W_s/\gamma) = 0.50 + 0.50 = 1.00 \text{ m}$$

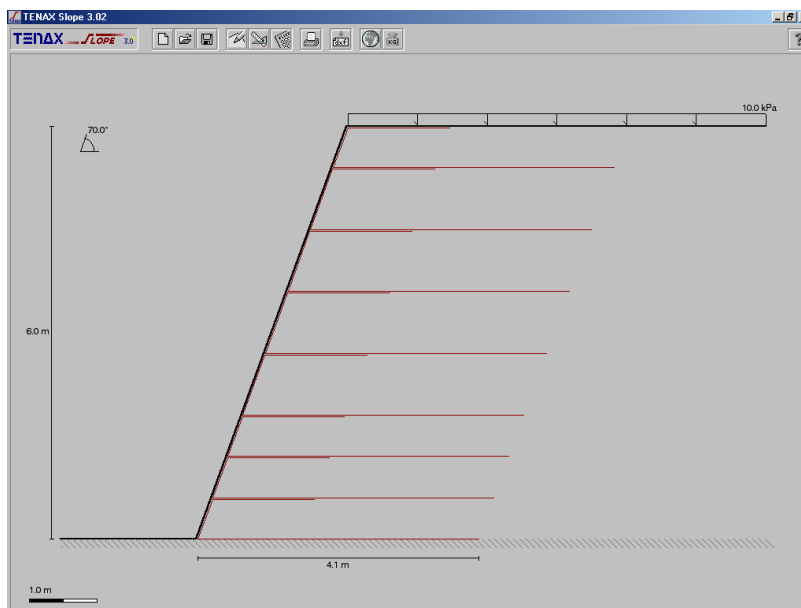
$$L_{r8} = \frac{K \cdot (z_8^{\wedge} + S_{v8} / 2) \cdot s_8}{f_{ds} \cdot \tan \phi' \cdot z_8^{\wedge}} \cdot FS_{wrap} = \frac{0.282 \cdot (1.00 + 0.90 / 2) \cdot 0.50}{0.85 \cdot \tan 34^{\circ} \cdot 1.00} \cdot 1.30 = 0.46 \text{ m}$$

Poichè non risulta essere operativamente possibile risvoltare una geogriglia per un tratto minore di 1.00 m, solitamente si impone una lunghezza minima, pari a 1.00 m o 1.50 m, che viene confrontato con il valore calcolato. Se questo è minore del risvolto minimo, si assume tale valore.

Il programma TNXSlope fornisce, oltre alle lunghezze relative alla singola geogriglia, anche la quantità totale di materiale necessaria.

Geogriglia Richiesta		
Geogriglia TENAX <b>TENAX TT 060 SAMP,</b>		
N° strati di geogriglie richiesti	8	
Qtà. Geogriglia per stab. interna rlq	32.77	m <sup>2</sup> /m
Qtà. Geogriglia per risvolto rlqw	12.00	m <sup>2</sup> /m
Qtà. Geogriglia per facciata pendio rlqf	6.39	m <sup>2</sup> /m
Qtà. tot. Geogriglia per stabilità	51.16	m <sup>2</sup> /m
Sfrido stimato	2.56	m <sup>2</sup> /m
Qtà. totale Geogriglia	53.71	m <sup>2</sup> /m
Qtà. per area su facciata (verticale)	8.95	m <sup>2</sup> /m <sup>2</sup>
Qtà. per area su facciata (inclinata)	8.41	m <sup>2</sup> /m <sup>2</sup>

11) Il risultato finale del dimensionamento effettuato con TNXSlope è di seguito rappresentato:



## 15. Bibliografia

Binnie & Partners (1982), WAGGLE "A computer program for the stability analysis of reinforced soil slopes and embankments", Program Manual.

Department of Transport (UK) (1978), "Reinforced earth retaining walls and bridge abutments", Technical memorandum (bridges) BE 3/78, London.

Jewell, R.A., (1980), "Some effects of reinforcement on the mechanical behaviour of soils", PhD Thesis, University of Cambridge.

Jewell, R. A., Milligan, G. W. E., Sarby, R. W. and Dubois, D. (1984), "Interaction between soil and geogrids", Proc. Symp. Polymer Grid Reinf. in Civil. Engineering, Thomas Telford, London.

Jewell, R. A. (1991), "Application of revised design charts for steep reinforced slopes", Geotextiles and Geomembranes, Vol. 10, No. 3, 1991, pag. 203 - 234.

Jewell, R. A. Paine, N., & Woods, R. I., (1984), "Design methods for steep reinforced embankments", Paper no. 3.1, Symposium on Polymer Grid Reinforcement in Civil Engineering, Thomas Telford, London.

McGown, A., Paine, N. and Dubois, D. (1984), "The use of geogrid properties in design", Proc. Symp. Polymer Grid Reinf. in Civil. Engineering. London, Thomas Telford, London.

Ministere des Transports (1979), "Les ouvrages en Terre Armee", Recommendations et regles de l'art. LCPC, Services d'etudes techniques des routes et autoroutes.

Schlosser, F., Jacobsen, H. M., and Juran, I. (1983), "Soil reinforcement", General report, Proc. 8th Eur. Conf. Soil Mech. Fndn. Engng., Vol 3, Helsinki.

Schlosser, F., Jacobsen, H. M., and Juran, I. (1979), "Design parameters for artificially improved soils", General report. Proc. 7th Eur. Conf. Soil Mech. Fndn. Engng., Vol 5, Brighton.

Whitman, R. V., and Bailey, W. A. (1967), "The use of computers for slope stability analysis", ASCE J. Soil Mech. Fndns. Div, Vol 93, SM4, July, 475-498.

Istituto per le Tecnologie della Costruzione, I.T.C. (2002), "Sistema di rinforzo e stabilizzazione di terreni mediante geogriglie", Certificato di idoneità tecnica N. 580/02, Maggio 2002.