

# Il progetto dei pendii ripidi rinforzati con geogriglie in plastica

P. RIMOLDI\*

**SOMMARIO:** L'articolo riguarda un metodo relativamente nuovo per ottenere la stabilità dei pendii ripidi, cioè di quei pendii aventi un angolo d'inclinazione maggiore dell'angolo di attrito del terreno: il metodo di rinforzo consiste nel provvedere strati orizzontali di geogriglie all'interno del pendio.

Le geogriglie sono strutture in plastica ad alta resistenza, aventi forma di lastra piana, con fori ellittici o rettangolari che effettuano un'efficacissima azione cerchiante sui granuli del terreno.

Nella prima parte l'articolo espone brevemente la teoria che sta alla base del rinforzo dei pendii; nella seconda parte viene presentato un metodo di progetto del rinforzo mediante geogriglie, basato su diagrammi messi a punto dall'Università di Oxford.

L'articolo si conclude spiegando dettagliatamente l'intera procedura di progetto di un pendio ripido rinforzato con geogriglie in plastica; la procedura, espressa mediante una serie di formule, è facilmente implementabile su elaboratore elettronico.

## 1. Il terreno rinforzato

Il terreno rinforzato è un materiale composito, che combina la resistenza tipica di due materiali in modo da minimizzare la debolezza di ognuno. In particolare, una quantità relativamente grande del materiale meno costoso e più resistente a compressione, il terreno, viene migliorato nelle sue caratteristiche ingegneristiche dalla combinazione con una quantità relativamente piccola di materiale più costoso e molto più resistente a sforzi di trazione. Si realizza così una sinergia tra la resistenza a compressione e a trazione dei due materiali che migliora le caratteristiche globali del materiale composito, così come avviene con calcestruzzo e acciaio.

Come materiali di rinforzo del terreno, si sono ormai affermate per la loro praticità e convenienza le cosiddette «geogriglie», cioè prodotti speciali in plastica, in forma di lastra piana, con una griglia regolare di fori di forma ellittica o rettangolare (vedi fig. 1) che operano un'efficacissima azione cerchiante sui granuli di terreno.

Le geogriglie sono solitamente realizzate con po-

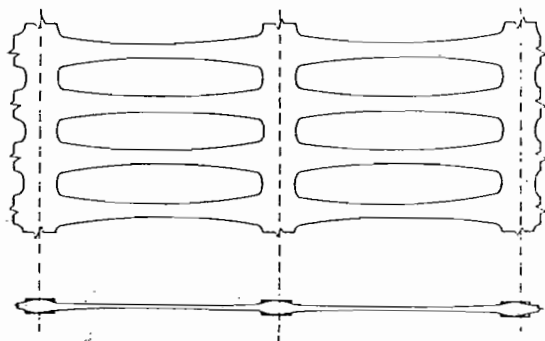


Fig. 1 - Geogriglie in plastica ad alta resistenza.

\* Dott. Ing. Pietro Rimoldi, Direttore tecnico RDB-Plastotecnica, settore Ingegneria civile - Collaboratore esterno del Politecnico di Milano.

lietilene di alta densità (HDPE) o con altri polimeri, e subiscono particolari processi tecnologici che consentono di ottenere resistenze a trazione particolarmente elevate. Le geogriglie sono state appositamente progettate per le opere in terra e, dopo che negli anni settanta sono state verificate le loro reali potenzialità, negli ultimi anni hanno trovato sempre più vaste applicazioni nell'ambito dell'ingegneria civile.

In particolare, i principali campi di uso delle geogriglie sono:

- stabilizzazione di rilevati posti su suolo soffice (fig. 2a);
- rinforzo di costruzioni in terra aventi pendii molto ripidi (fig. 2b).

Quest'ultima applicazione, come illustrata schematicamente in fig. 2b, forma l'oggetto del presente articolo.

Un rilevante numero di lavori è già stato realizzato in tutto il mondo, permettendo lo sviluppo delle tecniche di progetto e di realizzazione del terreno rinforzato.

## 2. Generalità

Un semplice modello serve a spiegare il principio su cui si basa la tecnica del rinforzo del terreno.

Prendiamo in considerazione la resistenza agli sforzi di taglio; con riferimento alla fig. 3a, in un elemento di terreno non coesivo si ha:

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

Dove:

$(\tau_{yx})_{\max}$  = massima tensione tangenziale sopportabile dal terreno.

$\Phi_{\max}$  = massimo angolo di attrito del terreno.

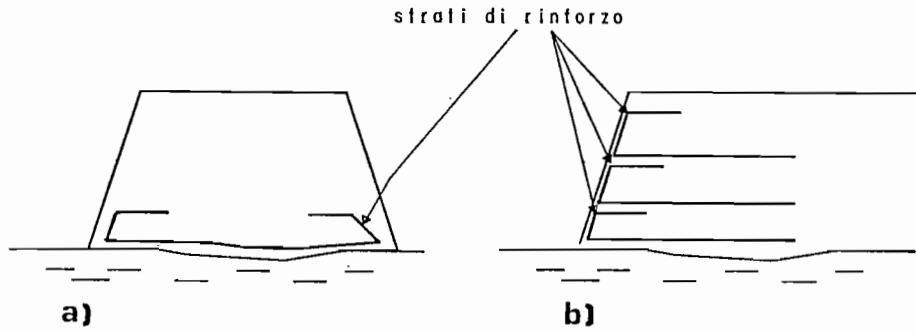


Fig. 2 - Le geogriglie come rinforzo per la stabilizzazione di rilevati su suolo soffice e per pendii ripidi.

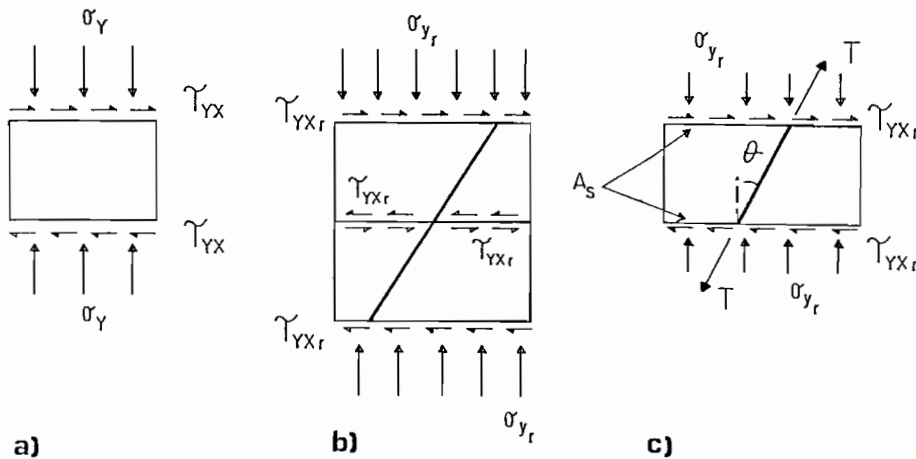


Fig. 3 - Sforzi di taglio in un elemento di terreno, senza rinforzo (a) e con rinforzo (b e c).

Quando l'elemento di terreno è attraversato da un elemento di rinforzo, che forma con la verticale un angolo  $\Theta$  (fig. 3b e c), lo stato tensionale viene modificato, in quanto lo sforzo genera una sollecitazione di taglio costituita dalla componente tangenziale  $T \sin \Theta$  mentre la componente normale  $T \cos \Theta$  genera un'ulteriore  $(\tau_{yxr})^*$ , dovuta all'angolo d'attrito  $\Phi_{\max}$  del terreno. Risulta perciò:

$$(\tau_{yxr})_{\max} = \sigma_y \cdot \tan \Phi_{\max} + (T/A_s) \cdot \cos \Theta \cdot \tan \Phi_{\max} + (T/A_s) \cdot \sin \Theta \quad (2)$$

Dove:

- $A_s$  = area dell'elemento di terreno su cui si sviluppa  $\tau_{yxr}$
- $(\tau_{yxr})_{\max}$  = massimo sforzo di taglio sopportabile dal terreno rinforzato
- $\sigma_y \cdot \tan \Phi_{\max}$  = resistenza al taglio del solo terreno
- $(T/A_s) \cdot \sin \Theta$  = sforzo di taglio resistente dovuto alla componente tangenziale di T
- $(T/A_s) \cdot \cos \Theta \cdot \tan \Phi_{\max}$  = sforzo di taglio resistente dovuto alla componente normale di T.

Pertanto lo sforzo normale sull'elemento di terreno risulta incrementato di

$$\sigma_y = (T/A_s) \cdot \cos \Theta \quad (3)$$

mentre il massimo sforzo di taglio sopportabile dal terreno aumenta.

Le considerazioni fatte valgono sia nel caso di terreno asciutto, sia in presenza di acqua, nel qual caso basta sostituire gli sforzi efficaci agli sforzi totali.

I fattori che influenzano la resistenza del terreno rinforzato possono essere così riassunti:

- resistenza e rigidità del rinforzo in relazione a quella del terreno circostante;
- inclinazione del rinforzo;
- forma degli elementi rinforzati, che deve essere adeguata a sviluppare notevoli angoli di attrito al contatto terreno-rinforzo;
- caratteristiche di creep, cioè di allungamento a tensione costante, del rinforzo durante il periodo di vita di progetto;
- resistenza alla corrosione del rinforzo.

In particolare la forma degli elementi rinforzanti deve garantire lo sviluppo di un notevole attrito con il terreno, in modo che il rinforzo stesso non venga sfilato dalla forza di trazione T cui è sottoposto. È necessario peraltro che l'inclinazione dell'armatura sia tale da seguire il più possibile la direzione delle deformazioni «di trazione» del terreno. È da notare che un rinforzo troppo rigido può rompersi per piccole deformazioni, senza che il suolo raggiunga notevoli stati di sforzo mobilitato; un

materiale troppo estensibile non riuscirebbe invece a fornire un significativo effetto rinforzante prima che si siano sviluppate grandi deformazioni, che potrebbero però causare la rottura del terreno. Sotto questo aspetto, le caratteristiche delle geogriglie in plastica presentano un ottimo compromesso, che consente loro un'azione rinforzante particolarmente efficace.

La stabilità globale dei pendii rinforzati è quindi affidata all'interazione tra il terreno e l'armatura, tuttavia occorre in genere proteggere la facciata dell'opera in modo da prevenire l'erosione del pendio e da tenere in posto lo strato frontale.

Questa protezione può essere realizzata con elementi di facciata costruiti con calcestruzzo, con gabbioni o con le stesse geogriglie, attraverso le cui aperture viene seminata erba.

I principali vantaggi di una struttura di terreno rinforzato sono i seguenti:

- minor costo globale: la possibilità di costruire con pendii più ripidi riduce, per esempio, la quantità di materiale necessario per costruire un rilevato; inoltre è possibile usare materiali meno pregiati e quindi più economici;
- aumento di stabilità: il rinforzo si traduce in un miglioramento del coefficiente di sicurezza;
- possibilità di costruire direttamente su terreni a debole capacità portante: un rinforzo adeguato consente di costruire su terreni soffici, che normalmente richiederebbero una consolidazione preliminare, senza che si verificano danni alla struttura in terra a causa degli assestamenti della base.

### 3. Pendii ripidi rinforzati

Con un materiale omogeneo, esiste per il pendio un angolo limite  $\beta_{lim}$  secondo il quale un'opera in terra non rinforzata può essere costruita con un determinato grado di sicurezza. Nel caso di materiale non coesivo e asciutto, l'angolo limite del pendio coincide con l'angolo di resistenza al taglio del terreno:

$$\beta_{lim} = \Phi$$

Un pendio avente un'inclinazione maggiore di  $\beta_{lim}$  costituisce un «pendio ripido».

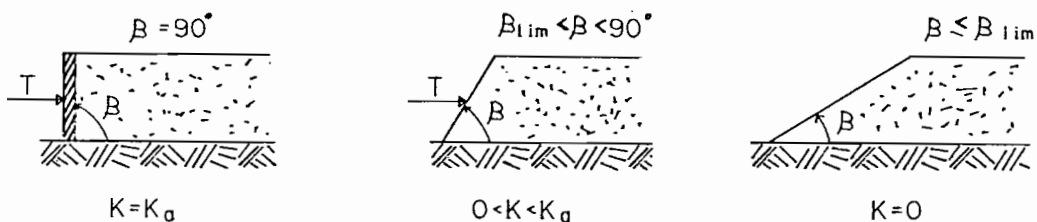


Fig. 4 - Coefficiente di spinta attiva per diverse inclinazioni del pendio.

Per poter costruire un'opera avente un pendio ripido occorre aggiungere delle forze addizionali per consentire l'equilibrio.

Il metodo più semplice è provvedere strati d'armatura stesi orizzontalmente all'interno del pendio, in modo che il rinforzo possa resistere a forze di trazione che incrementino gli sforzi di taglio sopportabili dal terreno. Le forze che devono essere applicate al terreno per mantenerlo in equilibrio possono essere sommate in una forza globale che agisce in direzione orizzontale, coincidente con quella degli strati di rinforzo. La forza globale richiesta  $T$ , come dimostrato più avanti, può essere poi espressa mediante la formula:

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

dove:

$H$  = altezza del pendio [m]

$\gamma$  = peso specifico del terreno di costruzione [kN/m<sup>3</sup>]

$K$  = coefficiente di spinta del terreno, funzione dell'angolo del pendio  $\beta$  e dei parametri  $\Phi'$ ,  $c'$  del terreno, calcolabile tenendo conto del coefficiente di pressione interstiziale  $R_u$

$R_u = u / (\gamma \cdot z)$  = coefficiente di pressione interstiziale.

Nel caso di paramento verticale, il coefficiente  $K$  coincide con il coefficiente di spinta attiva  $K_a$ ; la fig. 4 illustra i tre casi tipici. Il rinforzo va dimensionato in modo da poter fornire la forza globale  $T$  richiesta senza che in alcun punto venga superata la resistenza ammissibile per le geogriglie.

La resistenza di progetto  $P$  viene determinata come frazione della resistenza massima  $R_{max}$  della griglia, mediante un coefficiente di sicurezza  $FS_{grid}$  funzione del tipo di costruzione e della durata prevista per l'opera:

$$P = R_{max} / FS_{grid} \quad (5)$$

Per le geogriglie, le resistenze  $R_{max}$  e  $P$  vengono di solito espresse come forza per unità di larghezza, normalmente in kN/m. Il fattore di sicurezza per la geogriglia può essere espresso come:

$$FS_{grid} = FS_{globale} \cdot FS_{tempo} \cdot FS_{costruzione} \quad (6)$$

La tab. 1 contiene i fattori di sicurezza parziali consigliati.

È bene comunque che sia:  $FS_{grid} \geq 2.0$ .

Il «fattore di sicurezza globale» ( $FS_{globale}$ ) tiene conto della «distanza» che si vuol tenere dalle condizioni di equilibrio limite, e va applicato a tutti i parametri di progetto (si sceglieranno valori più elevati al crescere delle dimensioni e delle difficoltà dell'opera). Il «fattore di sicurezza temporale» ( $FS_{tempo}$ ) tiene conto dei fenomeni di creep nella geogriglia, che aumentano di importanza in funzione del periodo di vita di progetto dell'opera; per opere di breve durata (pochi mesi) o destinate a diventare più sicure, per i fenomeni occorsi e per le operazioni fatte dopo la costruzione, si potrà assumere il valore  $FS_{tempo} = 1.0$ ; per le opere con durata prevista di 50-100 anni è opportuno assumere un valore di  $FS_{tempo}$  in base a prove di carico di lunga durata (1000-10000 ore) che il costruttore deve eseguire sulle geogriglie; in tali casi è bene assumere comunque ( $FS_{tempo}$ )  $\geq 1.50$ .

Il «fattore di sicurezza costruttiva» ( $FS_{costruzione}$ ) tiene conto delle imperfezioni di posa in opera e degli eventuali danneggiamenti subiti dalla geogriglia in fase di trasporto, stoccaggio, esecuzione, nonché del tipo di terreno usato per la costruzione; la tabella 2 fornisce i valori consigliati (valori minori per costruzione e posa accurate).

TABELLA 1  
FATTORI DI SICUREZZA PARZIALI:  
VALORI CONSIGLIATI

$FS_{globale}$	=	1.1 - 1.6
$FS_{tempo}$	=	1.0 - 2.0
$FS_{costruzione}$	=	1.1 - 1.6

#### 4. Il progetto e l'analisi dell'equilibrio

Il problema di progetto può essere posto nel modo seguente: definita la geometria del pendio, fissati i sovraccarichi, note le caratteristiche geotecniche del terreno di costruzione, e prefissata la resistenza di progetto  $P$  delle griglie, occorre determinare il numero, la posizione verticale e la lunghezza degli strati di rinforzo necessari a provvedere l'equilibrio per ogni possibile meccanismo di rottura. La determinazione della forza globale che è necessario aggiungere per l'equilibrio è essenzialmente un problema di spinta del terreno e può essere convenientemente risolto per mezzo dell'Analisi di Equilibrio Limite. I possibili meccanismi di rottura possono essere costituiti dallo scivolamento lungo un piano o lungo una superficie circolare o logaritmica, o dallo scivolamento a blocchi. Estese ricerche su tutti i possibili meccanismi di rottura hanno permesso di definire il meccanismo a due blocchi, illustrato in fig. 5a, come quello che fornisce il miglior compromesso tra precisione dei risultati e velocità di calcolo; occorre allora ricercare il meccanismo critico che fornisce la massima forza destabilizzante ( $Fr$ ) $_{max}$ , e dimensionare il rinforzo sulla base di ( $Fr$ ) $_{max}$  e della resistenza di progetto  $P$ . Con riferimento alla fig. 5b, la procedura è la seguente:

- si fissa il «nodo» dei due blocchi, «i», cosicché resta fissato l'angolo  $\Theta_1$ ;
- si fa variare sistematicamente l'angolo  $\Theta_2$  e si impone l'equilibrio delle forze, fino a trovare la massima forza destabilizzante ( $Fr$ ) $_{max}$ , che è uguale alla minima forza  $T$  richiesta per l'equilibrio dei meccanismi con centro nel nodo  $i$ ;
- si ripete il calcolo per un'intera griglia di nodi, fino a trovare la massima forza richiesta  $T$ .

Sempre con riferimento alla fig. 5b, la forza globale  $T$  che è necessario aggiungere per garantire la stabilità del pendio è ottenibile come somma di

TABELLA 2  
FATTORE DI SICUREZZA COSTRUTTIVA PER I VARI TIPI DI TERRENO

TIPO DI TERRENO	DIMENSIONE GRANULI	$FS_{costruzione}$
limo e argilla	< 0.06 mm	1.10 - 1.35
ceneri di combustione	variabile	1.10 - 1.25
sabbie fini e medie	0.06 - 0.6 mm	1.10 - 1.30
sabbie grosse e ghiaietto	0.60 - 6.0 mm	1.15 - 1.45
ghiaia	6 - 60 mm	1.25 - 1.60

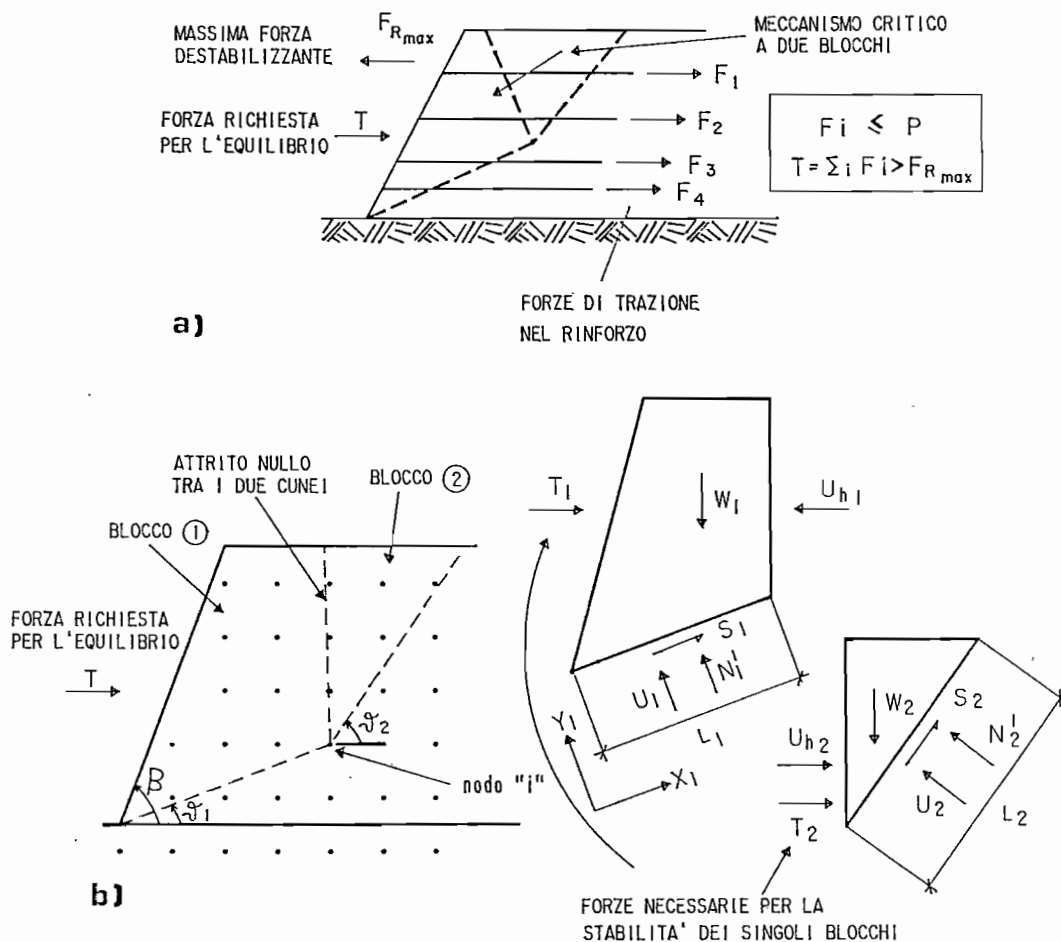


Fig. 5 - Calcolo della forza richiesta in base a un meccanismo di rottura a due blocchi.

quelle  $T_1$  e  $T_2$ , necessarie per la stabilità dei singoli blocchi:

$$T = T_1 + T_2 \quad (7)$$

Inoltre, per congruenza delle pressioni interstiziali, deve essere:

$$U_{h1} = -U_{h2} \quad (8)$$

Considerando il primo blocco e imponendo l'equilibrio delle forze nelle direzioni  $X_1$  e  $Y_1$  (vedi fig. 5b), nonché applicando la legge di Coulomb, si ottiene il sistema:

$$S_1 + T_1 \cdot \cos\theta_1 - W_1 \cdot \sin\theta_1 - U_{h1} \cdot \cos\theta_1 = 0$$

$$N_1' + U_1 - T_1 \cdot \sin\theta_1 - W_1 \cdot \cos\theta_1 - U_{h1} \cdot \sin\theta_1 = 0$$

$$S_1 = N_1' \cdot \tan\Phi' + c' \cdot l_1$$

con:

$c'$ ,  $\Phi'$  = coesione e angolo d'attrito del terreno.

Ricavando  $N_1$  dalla seconda equazione, sostit-

tuendo nella terza per ottenere  $S_1$ , sostituendo nella prima e dividendo per  $\cos\theta_1$ , si ottiene:

$$T_1 = \frac{W_1(\tan\theta_1 - \tan\Phi') - (c' \cdot l_1 / \cos\theta_1) + U_1 \cdot (\tan\Phi_1 / \cos\theta_1)}{(1 + \tan\theta_1 - \tan\Phi')} + U_{h1} \quad (10)$$

e analogamente per  $T_2$ , cambiando gli indici 1 con 2.

È però molto più comodo esprimere  $T$  con un'espressione simile a quella della spinta attiva di Rankine:

$$T = 1/2 \cdot K \cdot \gamma \cdot H^2 \quad (4 \text{ bis})$$

dove:

$K$  = coefficiente di spinta del terreno, funzione di  $\Phi'$ ,  $c'$ ,  $\beta$ , e che tien conto di  $R_u$ ;

$R_u$  = coefficiente di pressione interstiziale =  $u/(\gamma H)$

$\gamma$  = peso specifico del terreno;

$H$  = altezza del pendio.

Ponendo  $H=1$  e ricavando  $T$  per mezzo delle (7), (8), (9), (10), si ha semplicemente:

$$K = 2 \cdot (T/\gamma) \quad (11)$$

È allora possibile, conducendo un calcolo sistematico a mezzo di un opportuno programma per computer, ricavare il grafico di  $K$  al variare dell'angolo del pendio  $\beta$  e dell'angolo d'attrito del terreno  $\Phi'$ . In genere si assume che sia  $c'=0$  e si ricava un grafico per ogni valore del coefficiente  $R_u$ , come mostrato in fig. 6. Eventualmente è possibile ricavare i grafici suddetti tenendo conto di una coesione del terreno  $c'=0$ ; questo lavoro a tutt'oggi non è ancora stato condotto a termine, e comunque risulta a favore della sicurezza assumere  $c'=0$ .

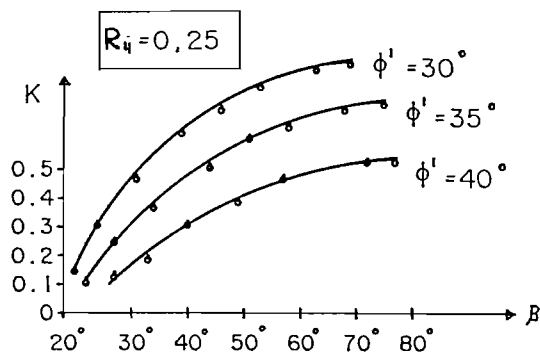


Fig. 6 - Esempio di grafico del coefficiente  $K$  in funzione di  $\beta$ ,  $R_u$ .

### 5. Lunghezza del rinforzo

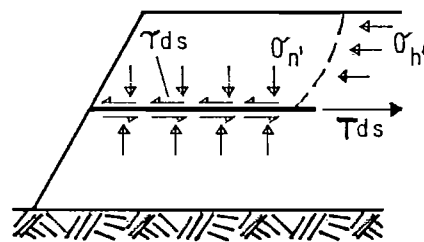
La determinazione della lunghezza di ogni strato di rinforzo va fatta considerando i seguenti criteri:

1) vicino alla cresta del pendio, il rinforzo deve avere una lunghezza tale da sviluppare interamente la resistenza di progetto  $P$ ; una lunghezza insufficiente degli strati superiori causerebbe infatti lo spostamento verso il basso del carico da sopportare, costringendo gli strati inferiori a resistere a forze maggiori, che possono diventare eccessive e pericolose;

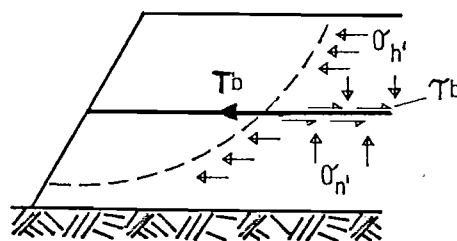
2) la lunghezza del rinforzo deve essere tale da evitare lo scivolamento del blocco di terreno rinforzato lungo l'interfaccia terreno-geogriglia e da evitare lo sfilamento delle geogriglie a causa delle spinte a tergo;

3) la zona rinforzata, considerata come un blocco rigido, deve avere una base sufficientemente larga da resistere alla forza risultante dal peso e dalle spinte del terreno a tergo, senza che si verifichino sforzi verticali di trazione lungo la base.

Per quanto riguarda il criterio 2) e con riferimento alla fig. 7, per poter determinare la massima forza resistente nei confronti dello scivolamento e dello sfilamento, è necessario conoscere la relazione tra sforzi normali e di taglio al contatto terreno-geogriglia.



a)



b)

Fig. 7 - Scivolamento lungo un rinforzo (a) e sfilamento del rinforzo (b).

Per i problemi di scivolamento vale la relazione:

$$\tau_{ds} = \sigma'_n \cdot f_{ds} \cdot \tan\Phi' \quad (12)$$

mentre per i problemi di sfilamento il legame  $\tau - \sigma$  diventa:

$$\tau_b = \sigma'_n \cdot f_b \cdot \tan\Phi' \quad (13)$$

con:

$\tau_{ds}$  = sforzo di taglio resistente allo scivolamento diretto;

$\sigma'_n$  = sforzo normale efficace sul rinforzo;

$f_{ds}$  = coefficiente di resistenza allo scivolamento diretto;

$\Phi'$  = angolo d'attrito terreno-terreno;

$\tau_b$  = sforzo di taglio resistente allo sfilamento;

$f_b$  = coefficiente di resistenza allo sfilamento.

I vari parametri vengono ottenuti sperimentalmente mediante prove effettuate con una scatola di taglio di grandi dimensioni (sezione  $30\text{ cm} \times 30\text{ cm}$  o più); i valori di  $f_{ds}$  e  $\Phi'$  si ottengono con la prova di taglio diretto (fig. 8a), mentre il valore di  $f_b$  si ottiene con la prova di sfilamento o «pull-out test» (fig. 8b).

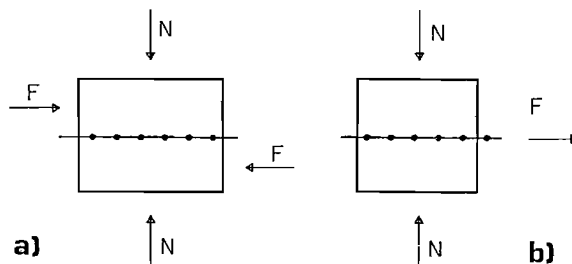


Fig. 8 - Schema della prova di taglio diretto (a) e della prova di sfilamento (b).

Per le geogriglie attualmente in uso si ha  $f_{ds} \approx f_b \approx 1.0$  ma è bene assumere i seguenti valori cautelativi:

$$f_{ds} = 0.8 \quad ; \quad f_b = 0.7 \quad (14)$$

Tenendo conto dei criteri di progetto esposti, è comunque possibile scegliere in modi diversi il « disegno » degli strati.

Con riferimento alla fig. 9, è per esempio possibile scegliere di troncare tutti gli strati secondo una linea verticale, o una linea parallela al pendio, o secondo un andamento piramidale.

Sono state svolte estese comparazioni tra i diversi metodi, svolgendo sia i calcoli tecnici che quelli economici per un gran numero di possibili pendii. Si è trovato che il troncamento secondo una linea parallela al pendio garantisce un uso più efficiente del rinforzo e richiede una quantità minore di geogriglie per ottenere il voluto coefficiente di sicurezza.

Pertanto l'uso di strati di rinforzo tutti della stessa lunghezza si è rivelato il metodo di progetto più economico.

## 6. I diagrammi di progetto

I risultati dei calcoli svolti secondo i metodi descritti possono essere condensati in una serie di diagrammi di progetto, mediante i quali è possibile ricavare il coefficiente di spinta della terra,  $K$ , e la lunghezza del rinforzo,  $L$ , in funzione dell'angolo del pendio  $\beta$ , dell'angolo d'attrito del terreno  $\phi'$ , per diversi valori del coefficiente di pressione interstiziale  $R_u$ .

L'Università di Oxford ha recentemente presentato i diagrammi di progetto, aggiornati in base a nuovi calcoli e a un apposito programma per computer, che sono riassunti nelle fig. 10, 11, 12.

Questi diagrammi possono essere usati per il progetto se sono rispettate le seguenti condizioni.

- il pendio è rinforzato con geogriglie polimeriche aventi coefficiente di resistenza allo sfilamento  $f_b \geq 0.7$  e coefficiente di resistenza allo scorrimento diretto  $f_{ds} \geq 0.8$ ;
- il pendio è uniforme, con sommità orizzontale

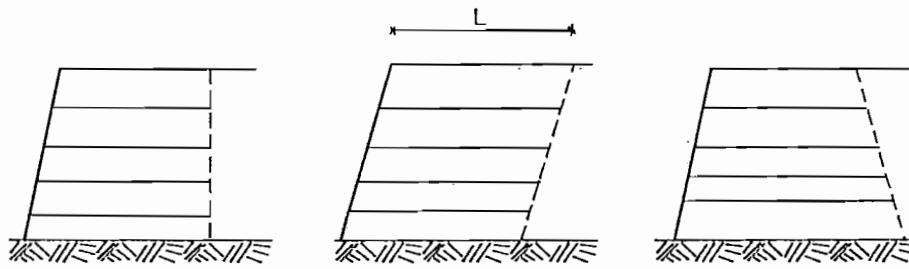


Fig. 9 - Diversi modi di troncatura gli strati di rinforzo: al centro il sistema più economico.

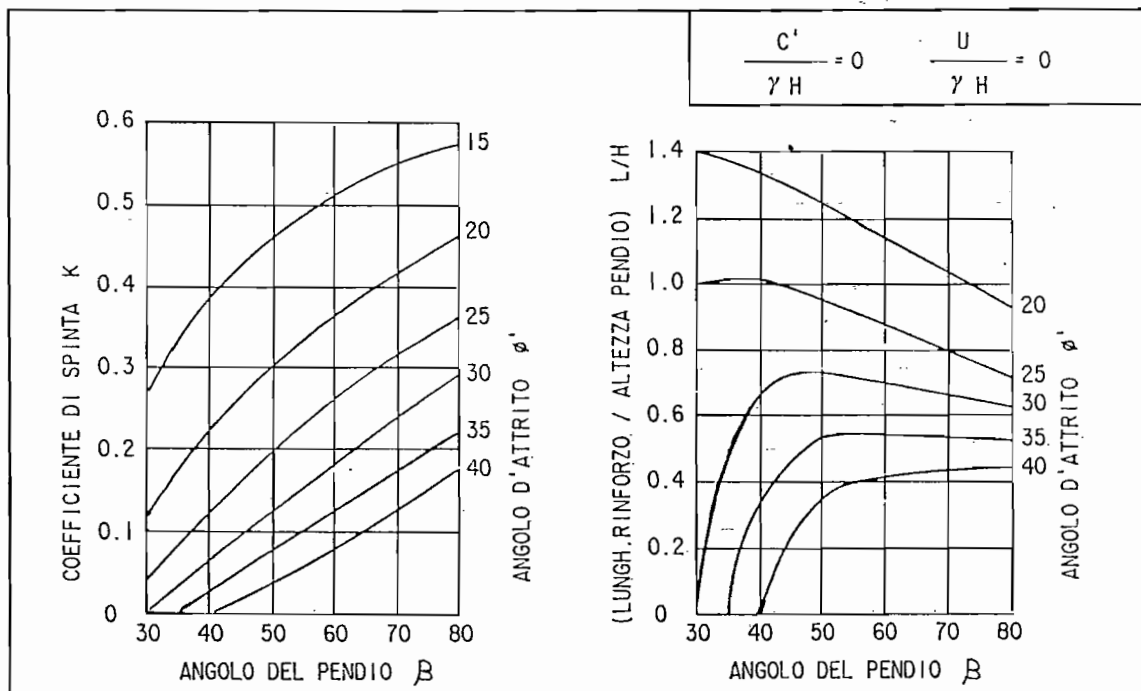


Fig. 10 - Diagrammi di progetto per  $R_u = 0$ .

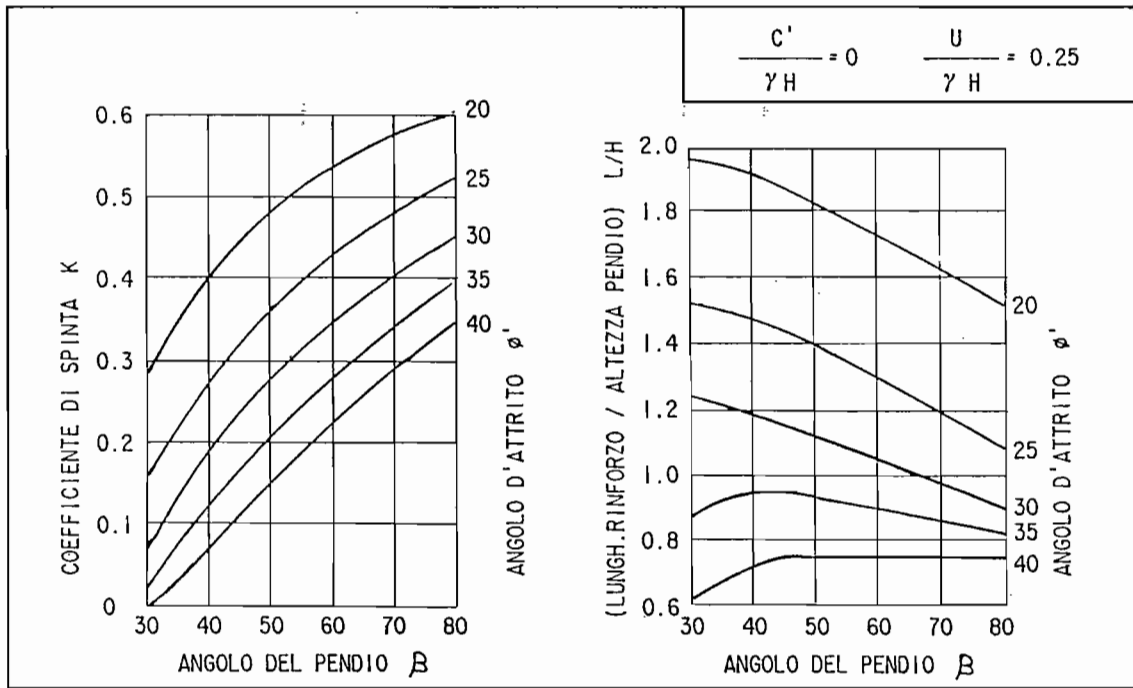


Fig. 11 - Diagrammi di progetto per  $R_u = 0.25$

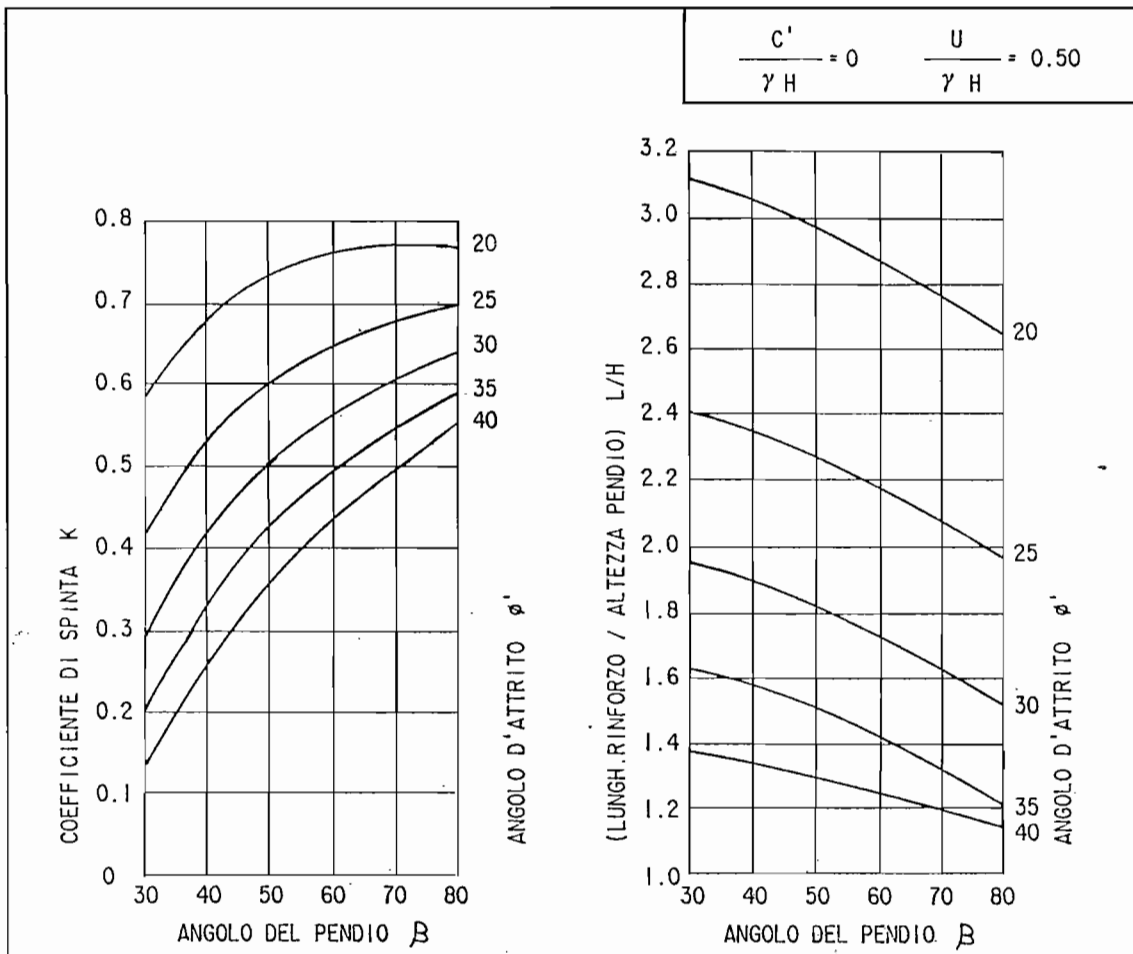


Fig. 12 - Diagrammi di progetto per  $R_u = 0.50$



e con angolo di pendio compreso nell'intervallo 30°-80° sull'orizzontale;

- la fondazione è livellata e con capacità portante adeguata, per resistenza naturale e/o resa tale con opportune opere;

- il pendio è realizzato con un singolo tipo di terreno omogeneo;

- gli sforzi nel terreno di costruzione sono espressi in termini di sforzi efficaci, con  $\Phi' \geq 15^\circ$  e  $c' = 0$ ;

- le pressioni interstiziali  $u$ , se presenti, sono espresse in termini del coefficiente di pressione interstiziale  $Ru = (u/\gamma Z)$ ;

- i sovraccarichi in sommità, se presenti, sono uniformemente distribuiti;

- il rinforzo è di larghezza costante ed è posato orizzontalmente all'interno del terreno di costruzione.

I diagrammi non possono essere usati per:

- pendii con angolo maggiore di 80° sull'orizzontale;

- pendii sommersi;

- carichi in sommità concentrati in un punto o su una linea, e carichi lungo il pendio;

- carichi dinamici;

- resistenza al taglio del terreno di costruzione espressa in termini di sforzi totali, con  $c_u \geq 0$  e  $\Phi_u = 0$ ;

- rinforzo realizzato con inclusioni discrete, come strisce o barre.

In tutti questi casi i calcoli qui esposti andranno opportunamente modificati.

## 7. Determinazione della spaziatura verticale

Ogni strato di rinforzo deve fornire una forza sufficiente a sopportare gli sforzi orizzontali nella zona di terreno di competenza, provocati dalle spinte del terreno non rinforzato a tergo. Nel caso in cui ogni strato di rinforzo venga designato a sopportare la stessa forza  $P$ , occorrerà variare la spaziatura verticale  $S_v$  degli strati rinforzanti, in modo da mantenere costante lo sforzo orizzontale richiesto  $\sigma_r$ , cioè in modo che sia:

$$\sigma_r = P / S_v = \text{costante} \quad (15)$$

Tenendo conto che deve essere:

$$\sigma_r = \sigma_h = K \cdot \gamma \cdot Z,$$

si ottiene:

$$S_v = \frac{P}{K \cdot \gamma \cdot Z} \quad (16)$$

Pertanto la spaziatura verticale deve essere ridotta all'aumentare della profondità  $Z$  sotto la cresta del pendio. Con riferimento alla fig. 13, la massima forza locale richiesta sarà:

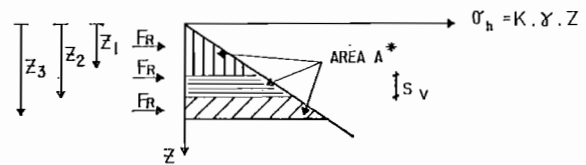


Fig. 13 - Zone di ugual forza richiesta.

$$F_r = S_v \cdot \sigma_h(Z) = S_v \cdot K \cdot \gamma \cdot Z = n \cdot v \cdot K \cdot \gamma \cdot Z \quad (17)$$

con:

$S_v$  = spaziatura verticale;

$v$  = spessore degli strati di compattazione del terreno;

$n$  = numero di strati compattati in ogni spaziatura.

Il calcolo della spaziatura è reso più semplice introducendo una «costante di spaziatura»  $Q$ , definita come:

$$Q = \frac{P}{K \cdot \gamma \cdot v} \quad (18)$$

da cui:

$$P = v \cdot K \cdot \gamma \cdot Q \quad (18 \text{ bis})$$

$Q$  risulta perciò uguale alla profondità alla quale la spaziatura verticale richiesta è pari proprio a  $v$ .

Dalle equazioni (17) e (18 bis) si ottiene:

$$F_r = v \cdot K \cdot \gamma \cdot Q \cdot \frac{S_v}{v} \cdot \frac{Z}{Q} = P \cdot \frac{S_v}{v} \cdot \frac{Z}{Q} \quad (19)$$

Possono essere perciò definite delle zone di equispaziatura degli strati di rinforzo, in modo che sia:

$$P \geq F_r \quad \text{cioè} \quad \frac{v}{S_v} \geq \frac{Z}{Q} \quad (20)$$

È allora comodo scegliere le profondità che delimitano ogni zona di equispaziatura come frazioni della costante  $Q$ :

$$Z_1 = Q; \quad Z_2 = Q/2; \quad Z_3 = Q/3; \quad \dots \quad (21)$$

La spaziatura resta definita come mostrato in fig. 14.

L'involuppo della forza resistente ricopre la linea della forza richiesta, come mostrato nel grafico adimensionale della stessa fig. 14.

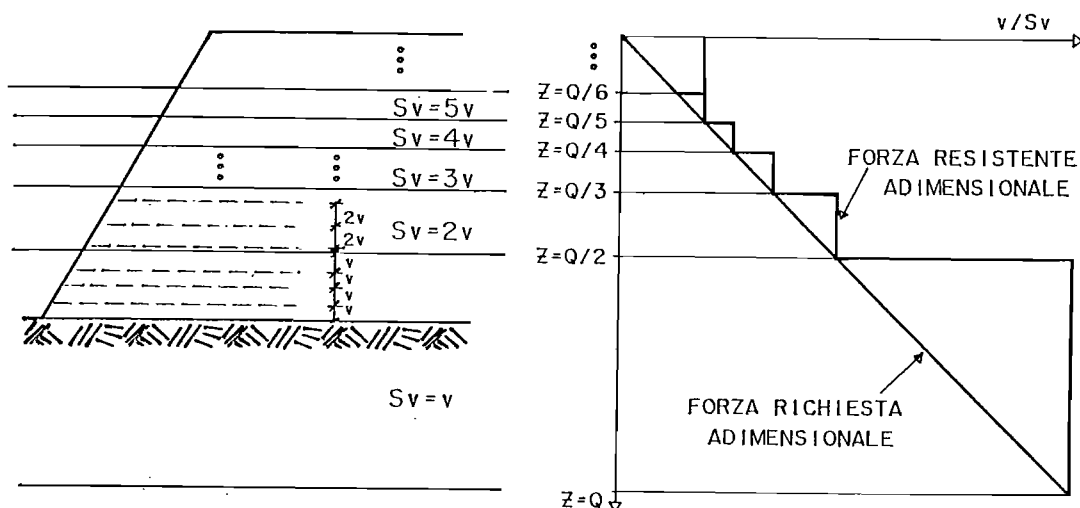


Fig. 14 - Definizione delle zone di equipaziatura del rinforzo.

## 8. La ripiegatura

La facciata dell'opera può essere realizzata con elementi frontali in calcestruzzo, con gabbioni oppure risvoltando e ripiegando la geogriglia all'interno del pendio (con tecnica cosiddetta «wrap-around»), come mostrato in fig. 15. Nel caso si intenda adottare la terza soluzione è necessario calcolare la lunghezza di ripiegatura  $L_r$  della geogriglia. Si risolve il problema imponendo che la spinta locale esercitata dal terreno su ogni tratto frontale di geogriglia non sia in grado di provocare lo scivolamento verso l'esterno del tratto orizzontale ripiegato.

Con riferimento alla fig. 16, imponendo l'equilibrio e maggiorando la forza destabilizzante mediante un coefficiente di sicurezza  $FS_{wrap}$ , deve essere:

$$FS_{wrap} \cdot K \cdot \gamma \cdot (Z_i + S_{v_j}/2) \cdot S_{v_j} = \gamma \cdot Z_i \cdot f_{ds} \cdot \tan \Phi' \cdot L_{r_i} \quad (22)$$

e quindi:

$$L_{r_i} = \frac{K \cdot (Z_i + S_{v_j}/2) \cdot S_{v_j}}{f_{ds} \cdot \tan \Phi' \cdot Z_i} FS_{wrap} \quad (23)$$

Si consiglia di usare per il calcolo i seguenti valori:

$$f_{ds} = 0.80; \quad FS_{wrap} = 1.30 - 1.50 \quad (24)$$

Inoltre, per ragioni costruttive, deve essere:

$$(L_r)_{min} = 1.20 \text{ m} \quad (25)$$

## 9. Procedura di progetto

Il progetto di un pendio rinforzato, sulla base dei diagrammi riportati nelle fig. 10, 11, 12, si articola nelle fasi seguenti:

1) Determinare la configurazione geometrica del pendio e il sovraccarico richiesto. Con riferimento alla fig. 17 occorre fissare l'altezza  $H$  [m] e l'angolo  $\beta$  del pendio, e assumere un eventuale sovraccarico uniforme  $W_s$  [kg/m<sup>2</sup> o kN/m<sup>2</sup>].

2) Prefissare i fattori di sicurezza  $FS$  globale,  $FS$  tempo,  $FS$  costruzione (vedi tab. 1 e 2) e calcolare  $FS_{grid}$  con la (6). Determinare la resistenza ammissibile  $P$  per il rinforzo secondo l'eq. (5), in base alla resistenza massima  $R_{max}$  e al coefficiente di sicurezza  $FS_{tempo}$  consigliati dal produttore della geogriglia.

3) Dalle misure di laboratorio, selezionare i parametri  $\Phi'$ ,  $\gamma$  del terreno (assumere  $c' = 0$ ), e le pressioni interstiziali  $u$  alle varie profondità.

Porre:

$$\hat{H} = H + (W_s / \gamma) \quad (26)$$

con:

$\gamma$  = peso specifico del terreno di costruzione asciutto;

$\hat{H}$  = altezza fittizia del pendio.

Ridurre  $\Phi'$  secondo il coefficiente di sicurezza globale:

$$\hat{\Phi}' = \arctan (\tan \Phi' / FS_{globale}) \quad (27)$$

Fissare un solo valore per il parametro di pressione interstiziale:

$$R_u = \max [u(Z) / (\gamma \cdot Z)] \quad (28)$$

4) In base a  $\hat{\Phi}'$  e  $\beta$ , ricavare il coefficiente di spinta del terreno  $K$  e il rapporto  $(L/H)$  dai diagrammi di progetto relativi al valore di  $R_u$  prefissato. La lunghezza di rinforzo richiesta è data da:

$$L = \hat{H} \cdot (L/H) \quad (29)$$

5) Fissare la minima spaziatura verticale  $v$ , in



re di compattazione occorre studiare soluzioni ad hoc per la posa in opera.

7) Calcolare il numero di strati di rinforzo necessari: occorre sempre prevedere uno strato posato sulla fondazione, alla base del pendio; gli altri strati

necessari si calcolano procedendo dal basso verso l'alto. Come illustrato in fig. 19 e in tab. 4, il procedimento è il seguente:

- si divide lo spessore di una zona (da tab. 3) per la spaziatura relativa alla stessa zona (sempre da

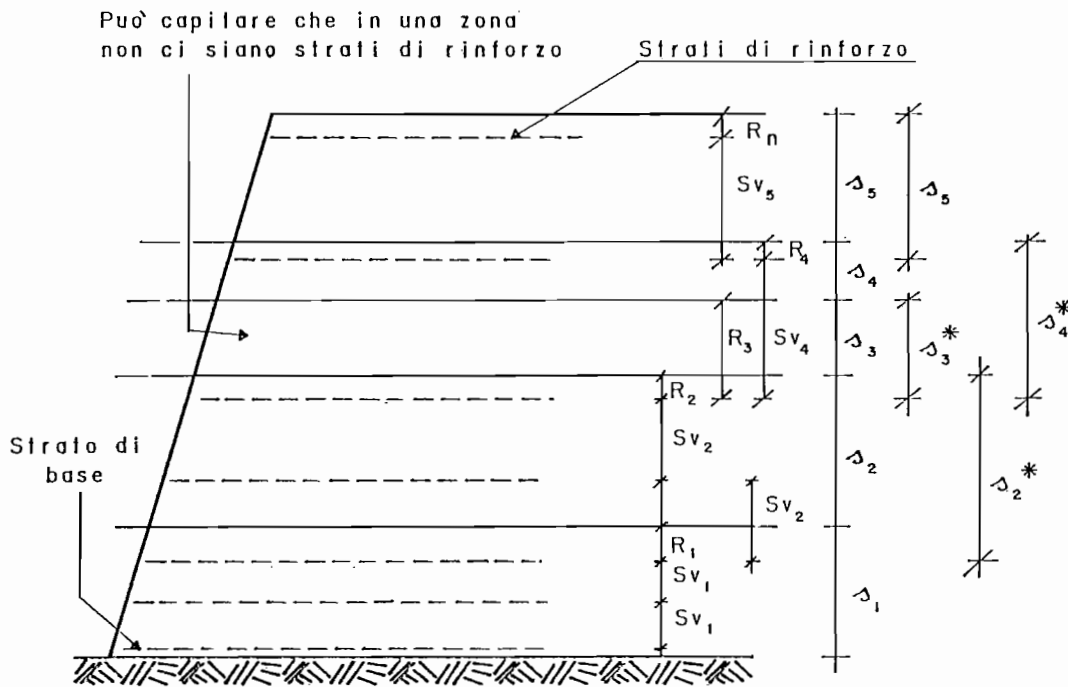


Fig. 19 - Numero e posizione degli strati di rinforzo necessari.

TABELLA 4  
CALCOLO DEGLI STRATI DI RINFORZO NECESSARI

$s^{\wedge} / Sv$ $i \quad i$	$N$ $i$	$R$ $i$	$s^{\wedge}$ $i+1$
	$N = 1$ 0	$R = 0$ 0	$s^{\wedge} = s$ 1 1
$s^{\wedge} / Sv$ 1 1	$N = (s^{\wedge} / Sv)$ Parte 1 1 1 Intera	$R = s^{\wedge} - Sv - N$ 1 1 1 1	$s^{\wedge} = s + R$ 2 2 1
$s^{\wedge} / Sv$ 2 2	$N = (s^{\wedge} / Sv)$ Parte 2 2 2 Intera	$R = s^{\wedge} - Sv - N$ 2 2 2 2	$s^{\wedge} = s + R$ 3 3 2
$s^{\wedge} / Sv$ 3 3	$N = (s^{\wedge} / Sv)$ Parte 3 3 3 Intera	$R = s^{\wedge} - Sv - N$ 3 3 3 3	$s^{\wedge} = s + R$ 4 4 3
.	.	.	.
.	.	.	.
$s^{\wedge} / Sv$ n n	$N = (s^{\wedge} / Sv)$ Parte n n n Intera	$R = s^{\wedge} - Sv - N$ n n n n	-
$N_{tot} = N_0 + N_1 + N_2 + N_3 + \dots + N_n$			

tab. 3) e si ottiene il numero di strati nella zona considerata; tale numero va approssimato al numero intero immediatamente inferiore:

$$N_i = (s_i / S_{v_i}) \text{ parte intera } (i \geq 1) \quad (30)$$

dove  $s_i$  è lo spessore modificato, che si ottiene con le formule successive;

- si calcola lo spessore rimanente per la zona considerata:

$$R_i = s_i - S_{v_i} \cdot N_i \quad (i \geq 1) \quad (31)$$

- si aggiunge il «resto»  $R_i$  allo spessore della zona successiva:

$$s_{i+1} = s_{i-1} + R_i \quad (i \geq 1) \quad (32)$$

- si ripetono le operazioni fino a giungere alla cima del pendio, ponendo lo spessore modificato  $s_i$  nella (30):

$$s_i = s_{i+1} \quad (i \geq 1) \quad (33)$$

Per tener conto dello strato di rinforzo posto direttamente alla base del pendio, per il corretto uso delle (30), (31), (32), (33), come evidenziato in tab. 4 si deve porre:

$$\begin{aligned} N_0 &= 1 \\ R_0 &= 1 \\ s_1 &= s_1 \end{aligned} \quad (34)$$

Per ragioni costruttive, è importante fare in modo che lo strato superiore non stia più di 80 cm sotto la cresta.

8) Calcolare la forza orizzontale globale richiesta per l'equilibrio:

$$T = 1/2 \cdot k \cdot \gamma \cdot H^2 \quad (35)$$

9) Verificare che la forza media richiesta in ogni strato sia inferiore alla resistenza ammissibile  $P$ ; deve essere:

$$T / N_{tot} \leq P \quad (36)$$

con:

$N_{tot}$  = numero totale di strati di rinforzo.

Se la condizione (36) non fosse verificata, occorre, aumentare il numero degli strati, inserendo ulteriori geogriglie con spaziatura uniforme, oppure si deve ripetere il procedimento cambiando la spaziatura minima  $v$ .

10) Se la facciata dell'opera viene realizzata ripiegando la geogriglia all'interno del pendio, calcolare la lunghezza di ripiegatura  $L_r$ .

Per ogni strato calcolare  $L_{r_i}$  (vedi fig. 16) con le formule che seguono e con uno schema come alla tab. 5:

$$Z_i = Z_i + (W_s / \gamma) \quad (37)$$

$$L_{r_i} = \frac{H \cdot (Z_i + S_{v_j} / 2) \cdot S_{v_j}}{f_{ds} \cdot \tan \Phi \cdot Z_i} \cdot F_{Swrap} \quad (38)$$

$$L_r \geq 1.20 \text{ m} \quad (39)$$

TABELLA 5  
SCHEMA PER IL CALCOLO DELLA LUNGHEZZA DI RIPIEGATURA

Strato nr.	$S_{v_j}$	$Z_i$	$Z_i^{\wedge}$	$L_{r_i}$
1	$S_{v_1}$	$H - S_{v_1}$	$Z_1 + W_s/\gamma$	$L_{r_1} = \dots$ from eq. (38)
-	-	-	-	-
-	-	-	-	-
i	$S_{v_i}$	$H - \sum_{j=1}^i S_{v_j}$	$Z_i + W_s/\gamma$	$L_{r_i} = \dots$ from eq. (38)
-	-	-	-	-
-	-	-	-	-
n	$S_{v_n}$	$H - \sum_{j=1}^n S_{v_j}$	$Z_n + W_s/\gamma$	$L_{r_n} = \dots$ from eq. (38)

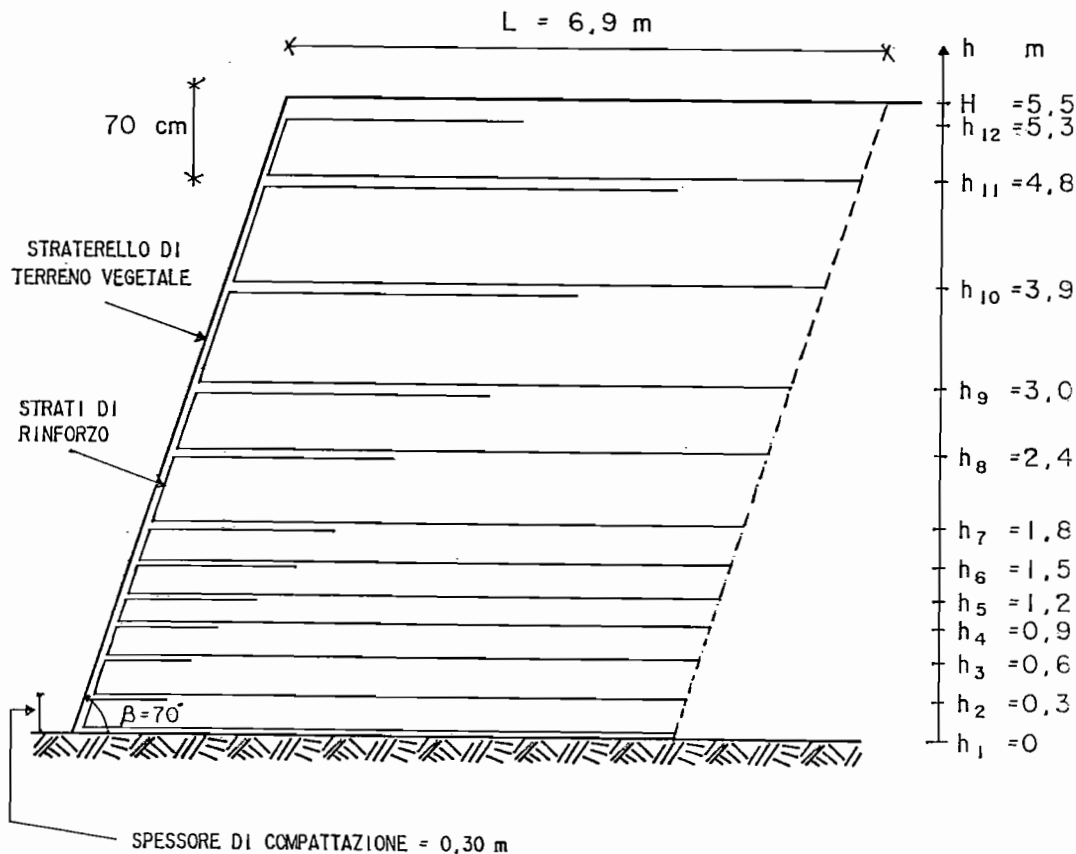


Fig. 20 - Configurazione di un pendio rinforzato.

11) Disegnare lo schema definitivo del pendio rinforzato, come nella fig. 20, relativa ai risultati dei calcoli svolti, con il metodo indicato, per un pendio alto 5.50 m, con sponda inclinata di  $70^\circ$  e con un sovraccarico di  $10 \text{ kN/m}^2$ .

## 10. Conclusione

Sono stati esposti brevemente i principi che stanno alla base del rinforzo di pendii ripidi mediante geogriglie in plastica ad alta resistenza.

È stato presentato un metodo generale per il progetto del rinforzo di un pendio, una volta assegnata la configurazione geometrica e fissati i parametri geotecnici del terreno di costruzione. Il metodo si riferisce in particolare alla tecnica costruttiva «wrap-around», mediante la quale le geogriglie servono sia per assicurare la stabilità interna che per sostenere la facciata del pendio.

Nella progettazione pratica occorre applicare il metodo generale tenendo conto delle condizioni particolari che si deve fronteggiare, non facilmente generalizzabili a loro volta.

Il metodo esposto risulta sufficientemente flessibile da poter essere adattato a situazioni leggermente differenti: la pratica progettuale suggerirà di volta in volta le variazioni necessarie, sia in termini costruttivi che di calcolo, e il loro grado di affidabilità.

## BIBLIOGRAFIA

- JEWELL R.A. (1980) - *Some effects of reinforcement on the mechanical behaviour of soils*. Ph.D Thesis, University of Cambridge.
- JEWELL R.A., MILLIGAN G.W.E., SARBY R.W. and DUBOIS D. (1984) - *Interaction between soil and geogrids*. Symp. on Polymer Grid Reinforcement, in Civil Engineering. London.
- JEWELL R.A., PAINE N., WOODS R.I. (1984) - *Design method for steep reinforced embankments*. Proc. Symp. Polymer Grid Reinf., in Civil Engng. London.
- JONES C.J.F.P. (1985) - *Earth reinforcement and soil structures*. Butterworths advanced series in geotechnical engineering, Butterworths, London.
- MCGOWN A., PAINE N. and DUBOIS D (1984) - *The use of geogrid properties in design*. Proc. Symp. Polymer Grid Reinf., in Civ. Engng. London.
- MINISTERE DES TRANSPORTS (1979) - *Les ouvrages en-Terre Armée*. Recommendations et regles de l'art. LCPC, Services d'études techniques des routes et autoroutes. Paris.
- RIMOLDI P. (1986) - *Il progetto dei pendii ripidi rinforzati*. RDB Plastotecnica, Collana Tecnica RDB - 1. Milano.

## SUMMARY

### The design of steep slopes reinforced with geogrids

The paper deal with a relatively new method to obtain the stability of steep slopes, defining a slope as «steep» if the slope angle is greater than the angle of internal friction of the soil.

The reinforcement is obtained by providing horizontal layers of plastic high resistance geogrids (fig. 1) into the slope. So a new material is created, the «reinforced soil», which combines the typical resistance of two different materials in such a way that the weakness of each one is minimized. In particular, a relatively small

quantity of the more expensive and high tensile resistant material, the geogrid, is coupled with a cheap and compression resistant material, the soil: the synergy between soil and geogrid improve the characteristics of the composite material, as with concrete and steel.

A simple model may to explain the principle on which the reinforced soil technique is based: comparing a not reinforced soil with a reinforced one (fig. 3), it can be seen that the shear resistance change from eq. (1) to eq. (2), with a double improving action due to reinforcement. For a steep slope, the global external force needed for equilibrium can be expressed with the Rankine-like formula (4), in which the soil pressure parameter  $K$  can be calculated with the «two wedge limit equilibrium method», as explained in fig. 5. From formulas (7) - (10), and with an especially developed computer program, it can be obtained a graph of  $K$  versus the slope angle  $\beta$ , the internal friction angle  $\Phi$  and the pore pressure coefficient  $R_u$ .

The length of the reinforcement layers, together with the parameter  $K$ , can be obtained with an extensive computer calculation, and the results can be plotted as the reinforcement length  $L$  (constant) and the parameter  $K$ , versus  $\beta$ ,  $\Phi$ ,  $R_u$ .

Using the above procedure, the University of Oxford has prepared the design charts showed in fig. 10, 11, 12.

The vertical spacing of the reinforcement layers can be calculated on the basis of a «spacing constant»  $Q$  (from eq. 18), as explained in fig. 14, with eq. (30) - (34). If the slope facing is to be obtained by folding back the geogrids (fig. 16), then the wrapping length  $L_r$  for each layer can be calculated with eq. (37) - (39). The general procedure for the design of the reinforced steep slope is as follow:

- 1) define  $H$ ,  $\beta$ ,  $W_s$ , as in fig. 17;
- 2) define the reinforcement maximum strength  $R_{max}$  and the allowable tensile strenght  $P$  with (5), (6) and tab. 1, tab. 2;
- 3) define  $\hat{\Phi}$  with (27),  $\hat{H}$  with (26) and  $R_u$  with (28);
- 4) with the appropriate design chart (fig. 10, 11, 12) obtain  $K$  and  $(L/H)$ ; calculate  $L$  with (29);
- 5) define the compaction thickness  $v$  and calculate  $Q$  with (18);
- 6) calculate the vertical spacing as in tab. 3 and fig. 18;
- 7) calculate the number and position of the needed geogrid layers with eq. (30) - (34), as shown in tab. 4 and fig. 19;
- 8) calculate the gross required force  $T$  with eq. (35);
- 9) compare  $T$  with the allowable strength  $P$  with eq. (36);
- 10) if needed, calculate the wrapping length  $L_r$  of each layer with eq. (37), (38), (39);
- 11) make a plot of the final design, as shown in fig. 20.