

**Bozza sezione su terre armate in SSAP- bozza manuale versione 5.0 (2020)**  
**– last edit 03/01/2020**  
**(.....OMISSIS.....)**

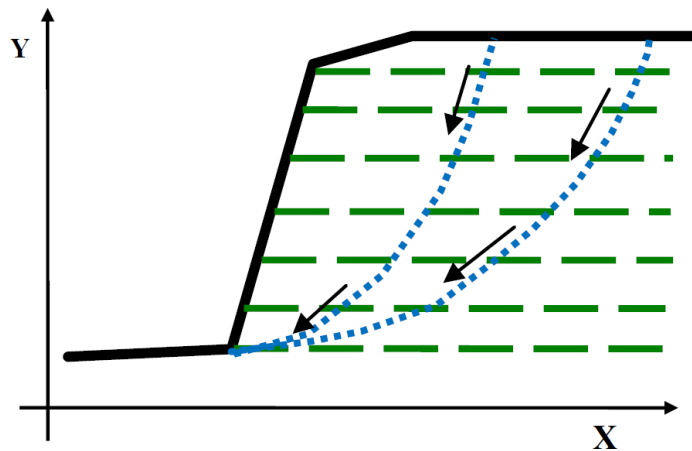
**2.4.4 Terre armate, Geogriglie, Geosintetici e muri in terra meccanicamente rinforzati (MSEW)**

Le strutture in terra rinforzata sono correntemente utilizzate per la stabilizzazione di scarpate artificiali e rilevati. L'azione delle geogriglie, solitamente in gruppo, è in pratica una azione di tipo stabilizzante che ha influenza sul coefficiente di sicurezza complessivo del pendio ove esse sono posizionate.

La stabilità complessiva di un pendio dove è presente un sistema di geogriglie deve essere effettuata tenendo conto della tensione o resistenza massima di progetto, della posizione, della lunghezza di ciascuna delle geogriglie presenti e della interazione con le varie superfici di scivolamento possibili (fig. 2.4.13).

La resistenza massima unitaria di progetto e la lunghezza di ogni geogriglia deve essere determinata mediante i correnti metodi di progettazione che tengono conto della stabilità interna dell'opera (collasso, superamento di resistenza delle armature, sfilamento ecc.). Vedasi a questo proposito: Jewell (1990,1991), Greenwood(1990), Berg et al.(2009). A tale scopo esistono codici di calcolo e programmi specifici che aiutano in questa fase della progettazione (Leshchinsky et al. 2016).<sup>1</sup>

Una volta determinati i parametri ottimali per la stabilità interna è necessario condurre una verifica per controllare la compatibilità di questi con possibili movimenti di scivolamento globale, che interessano, cioè, anche porzioni dove le geogriglie non sono presenti. E` questo il caso in cui si applica il programma SSAP.



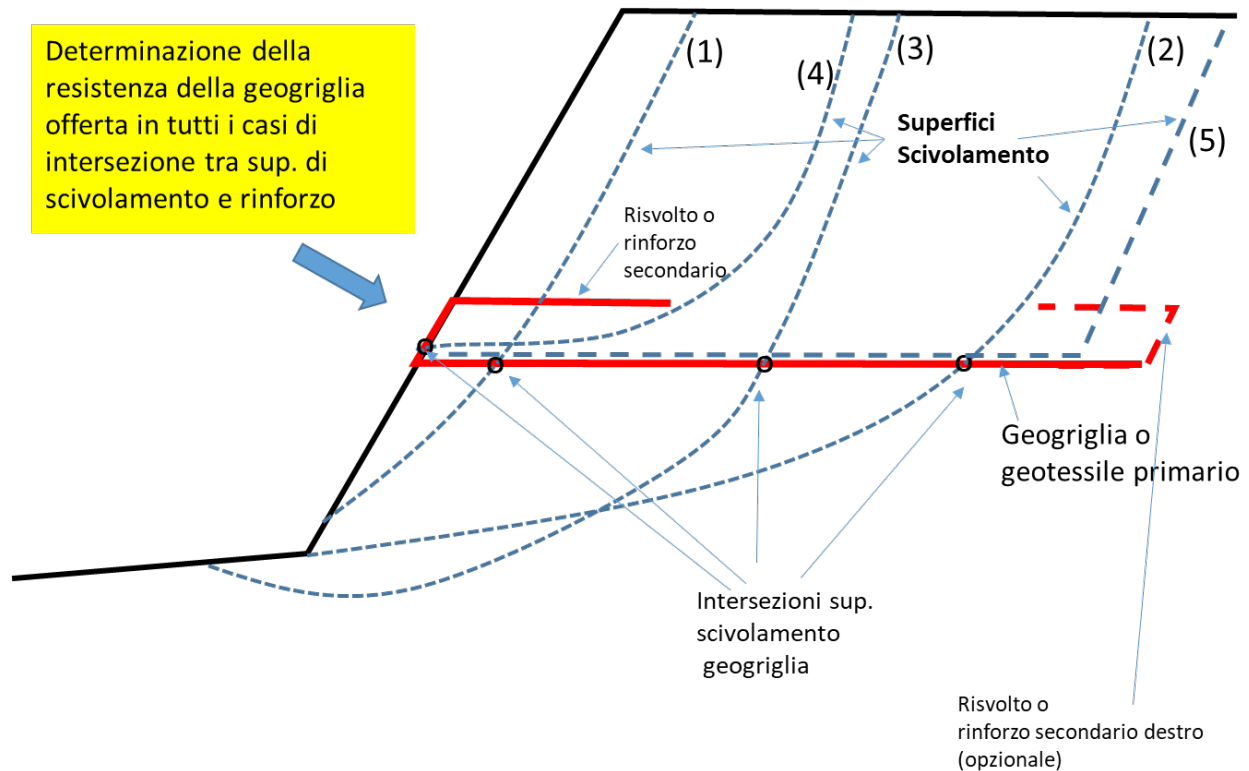
**Fig. 2.4.13**

<sup>1</sup> Vedasi il seguente manuali: .

Berg, R. R., Christopher, B. R., Samtani, N. C., & Berg, R. R. (2009). *Design of mechanically stabilized earth walls and reinforced soil slopes–Volume I (No. FHWA-NHI-10-024)*. United States. Federal Highway Administration.

Leshchinsky et al. 2016. "Limit Equilibrium Design Framework for MSE Structures with Extensible Reinforcement". <http://www.fhwa.dot.gov/engineering/geotech/pubs/hif17004.pdf>

Nella effettuazione della verifica di stabilità globale per ogni geogriglia che risulta intersecata da una potenziale superficie di scivolamento deve essere calcolata la resistenza efficace  $T_i$ , calcolata nelle sue componenti orizzontale, rispetto alla superficie di scivolamento (fig. 2.4.14). Nella stessa figura appaiono molteplicità di forme per le potenziali superfici di scivolamento. La natura composita delle potenziali superfici di scivolamento in un sistema di terre armate e' fondamentale per comprendere la necessita' di utilizzare uno strumento come SSAP che non predilige a priori nessuna forma (es. solo forme circolari) nelle potenziali superfici di scivolamento.



**Fig. 2.4.14**

Ciascuna delle geogriglie ha una resistenza a trazione complessiva di progetto  $T$  e una lunghezza totale  $L$ . Si noti bene che:

$T$  = resistenza unitaria (nel senso della larghezza) a trazione della geogriglia (in kN/m);

$L$  = Lunghezza della geogriglia nel senso orizzontale (in m).

Tuttavia il valore di resistenza  $T_i$  da utilizzare nel calcolo per ogni geogriglia attraversata da una superficie di potenziale scivolamento deve considerare anche la resistenza allo sfilamento della geogriglia stessa.

In pratica ogni geogriglia è come un ancoraggio orizzontale che resiste allo sfilamento per azione delle sue caratteristiche geometriche (presenza di maglie, apertura ..), per le caratteristiche del

terreno in cui è inglobata e per la pressione litostatica efficace sovrastante e per la lunghezza dell'ancoraggio a destra ed a sinistra della superficie di scivolamento (fig. 2.4.15b).

La resistenza  $P_r$  (kN/m) offerta allo sfilamento viene calcolata con la seguente formula Jewell (1990,1991), Greenwood(1990), Berg et al.(2009):

$$P_r = 2 f_b \tan \varphi' \sigma'_v L_a \quad (2.19)$$

dove:

$f_b$  = coefficiente di interazione suolo/geogriglia-geosintetico (*bond coefficient*); variabile, a seconda del tipo di geosintetico/geogriglia, tra 0.6 e 1.0. Tale parametro è indicato nelle caratteristiche tecniche della geogriglia /geosintetico. In assenza di informazioni usare un valore di 0.6;

$\sigma'_v$  = la pressione litostatica efficace (kPa);

$L_a$  = la lunghezza minima dell'ancoraggio (a sinistra o destra) rispetto alla superficie di scivolamento(m).

I parametri  $\sigma'_v$  e  $L_a$  vengono calcolati dinamicamente per ogni geogriglia e per ogni intersezione tra la superficie di scivolamento e la geogriglia. Nella determinazione di  $L_a$  viene adottato il seguente criterio:

$$L_a = \min(L_s, L_d) \quad (2.20)$$

dove:

$L_s$  = lunghezza della geogriglia a sinistra della intersezione con la superficie di scivolamento(m).

$L_d$  = lunghezza della geogriglia a destra della intersezione con la superficie di scivolamento (m)

In entrambi i casi le lunghezze a sinistra e a destra includono gli eventuali risvolti nel caso la lunghezza degli stessi sia >0 per la geogriglia presa in esame.

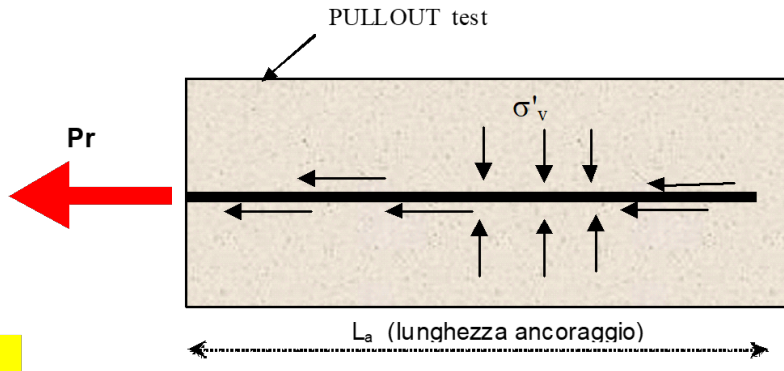
Per ogni geogriglia/geosintetico viene quindi assunto come parametro di resistenza del singolo rinforzo il valore MINIMO tra  $T$  e  $P_r$

$$T_i = \min(T, P_r) \quad (2.21)$$

In generale il singolo valore di  $P_r$  può risultare in certi casi maggiore di  $T$ ; tuttavia la resistenza meccanica a trazione di progetto assunta per la geogriglia (indicata dal progettista o fornita dalla casa costruttrice) costituisce sempre il limite superiore nella resistenza del singolo rinforzo.

Nel caso di una intersezione della superficie nella faccia esterna del risvolto sinistro è necessario considerare la reazione orizzontale della geogriglia al punzonamento della stessa vedasi fig. 2.4.16

Resistenza allo sfilamento (pullout)



$$Pr = 2 f_b \tan \phi' \sigma'_v L_a$$

$f_b$  coefficiente di interazione suolo/geogriglia-geosintetico; variabile, a seconda di tipo di geosintetico/geogriglia, tra 0.6 e 1.0. Tale parametro è indicato nelle caratteristiche tecniche della geogriglia /geosintetico

(a)

$$L_a = \min(L_s, L_d)$$

$$P_r = 2 f_b \tan \phi' \sigma'_v L_a$$

Resistenza allo sfilamento nel punto di intersezione  
La lunghezza di ancoraggio da usare nella formula della res allo sfilamento e' sempre la minore delle due lunghezza di ancoraggio possibili

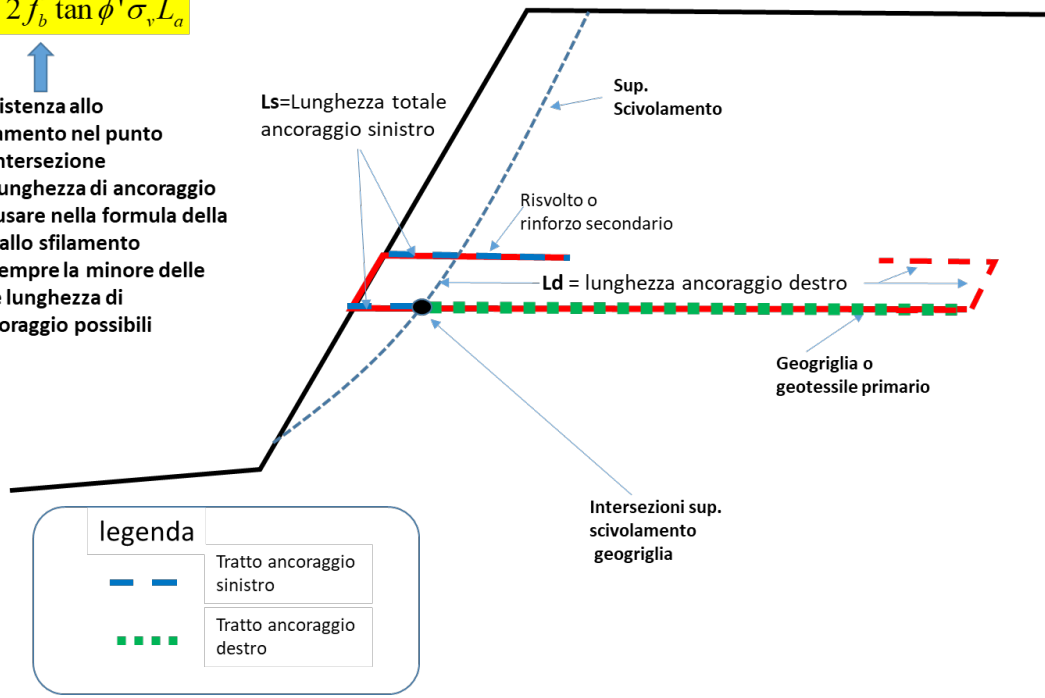


Fig. 2.4.15

(b)

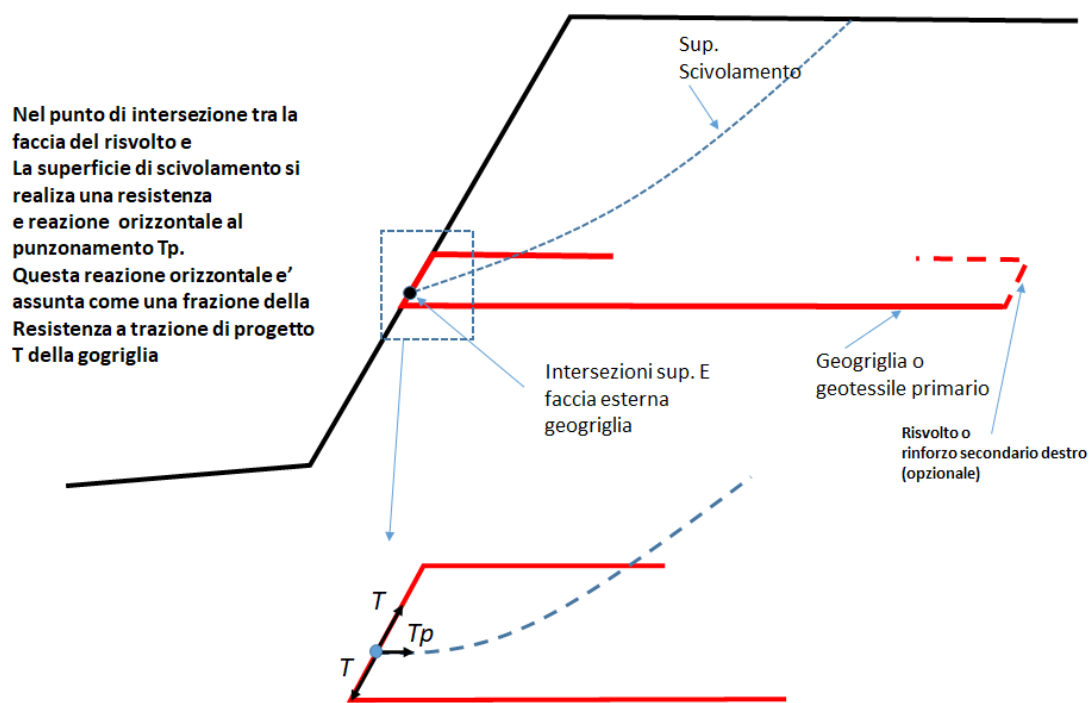


Fig. 2.4.16

In questo caso il valore della reazione orizzontale è diverso da  $T$  e generalmente inferiore. SSAP utilizza la seguente formula per calcolare la resistenza orizzontale al punzonamento nel caso di questo tipo particolare di intersezione.

$$T_p = \eta T \sin(90 - \beta) \quad (2.22)$$

Dove:

$T_p$  = reazione orizzontale al funzionamento (kN/m)

$T$  = resistenza a trazione di progetto della geogriglia (kN/m)

$\eta$  = coefficiente riduttivo della resistenza a trazione (adimensionale). Generalmente compreso tra 0 e 0.25, però per ragioni di sicurezza si può considerare un valore cautelativo compreso tra 0.05 e 0.1. questo valore è uguale a 0 nel caso di assenza di risvolto sinistro.

$\beta$  = angolo di pendenza della superficie esterna locale della faccia con risvolto, (in gradi)

Il valore di  $\eta$  può essere indicato opzionalmente nel file che contiene le caratteristiche delle geogriglie il cui contenuto e formato è presentato nel capitolo 3 di questo manuale.

Una volta stabilito il valore di resistenza da impiegare per ciascun singolo rinforzo del sistema  $F_s$  può essere calcolato con la seguente espressione derivata da Greenwood (1990), adattata per seguire la notazione di Zhou(2005):

$$F_s = \frac{\text{Forze resistenti} + \sum_i T_i}{\text{Forze agenti} - \sum_i T_i} \quad (2.23)$$

L'impostazione della eq. 2.23 è equivalente a considerare ogni geogriglia come un rinforzo passivo orizzontale (LESHCHINSKY *et al.* 2016) che nel contesto dei metodi di calcolo dell'equilibrio limite deve essere formulato come elemento che contemporaneamente riduce sia le forze agenti sia incrementa le forze resistenti (LESHCHINSKY *et al.* 2016).

Inoltre, secondo AASHTO (1998), Elias *et al.* (2001), QA SPECIFICATION R57, (2002), Leshchinsky (2004), **va distinto, nel caso delle terre armate, il concetto di progettazione da quello di verifica.**

Per **progettazione** si intende il processo attraverso il quale si ottimizzano una serie di elementi strutturali di una struttura in terra rinforzata al fine di ottenere certe condizioni di stabilità minime richieste dalla normativa o stabilite a priori dal progettista (stabilità interna, esterna globale e capacità portante fondazione). La progettazione di una struttura in terra rinforzata passa in pratica attraverso una serie di procedure codificate per valutare la domanda di incremento di resistenza, locale e complessiva, e la valutazione di capacità effettiva di incremento di resistenza fornita dalle strutture (terre rinforzate con geogriglie e muri blocchi).

Le procedure di **verifica** invece rappresentano qualcosa di diverso. Si ipotizza infatti un modello strutturale completo (rivestimento esterno, elementi di rinforzo, riempimento a tergo, suolo di fondazione ecc). Successivamente mediante una procedura basata su metodi all'equilibrio limite o agli elementi finiti si verifica la stabilità locale e complessiva dell'opera (Zornberg 1998, Leshchinsky 2002, 2004).

Il programma SSAP permette di operare una verifica di questo tipo, ovvero una verifica complessiva (secondo LESHCHINSKY *et al.* 2016).

**Nel caso particolare dei Muri in terra meccanicamente stabilizzati (MSEW)** ovvero muri con elementi di rivestimento con blocchi prefabbricati o elementi di gabbionate a tergo rinforzati con ancoraggi costituiti da geogriglie e geosintetici, da un esame della letteratura tecnica sull'argomento si riscontra una certa varietà dei metodi di progettazione e verifica (AASHTO 1998, Elias *et al.* 2001, QA SPECIFICATION R57, 2002, Leshchinsky 2004) .

Rispetto alle verifiche dei muri in terra rinforzata con sole geogriglie e geotessuti, per le strutture MSEW è necessario operare come segue:

- Il paramento esterno (blocchi o gabbionate) deve essere modellizzato come un elemento resistente per coesione e attrito analogo a una lente di suolo (Leshchinsky 2004).
- Il risvolto delle geogriglie deve essere assunto di lunghezza pari a 0, se la geogriglia è inserita, e bloccata, dalla struttura di rivestimento (a blocchi) esterna.
- Nella determinazione della tensione ammissibile **T** per ogni geogriglia deve essere considerato un fattore di riduzione della T ultima aggiuntivo rispetto a quelli tradizionali: *creep*, danneggiamento, azioni chimiche, incertezze generiche; ciò per tenere conto anche della connessione geogriglia/struttura esterna di rivestimento.

In questo caso gli standard australiani (QA SPECIFICATION R57, 2002) indicano una riduzione massima del 75% del valore **T** precedentemente calcolato con i fattori di riduzione classici.

Il valore **T** che viene usato da SSAP deve essere indicato dall'utente per ogni geogriglia di rinforzo e nel file .GRD (vedi capitolo 3).

Si ricorda che il valore della tensione **T** che viene considerato da SSAP durante il calcolo varia con continuità, ed è sempre il valore minimo tra quello ammissibile **T**, assegnato per ogni geogriglia, e quello di tensione di *pullout* (sfilamento), valutata localmente (valore **Pf**) secondo la procedura indicata precedentemente.

Lo **scivolamento diretto** o "*direct sliding*" è il processo di formazione di una superficie di scivolamento che risulta fondamentalmente posizionata lungo la interfaccia tra geosintetico e terreno di riempimento, minimizzando la intersezione tra il sistema di geosintetici e la superficie di scivolamento stessa (Fig. 2.4.17). Normalmente questo tipo di superfici hanno una estensione sub-orizzontale parallela ai sistemi di rinforzo e si sviluppano, a tergo dei rinforzi, con un tratto con alta pendenza. Questo tipo di superficie è praticamente sempre molto lontana da una forma sub-circolare e pertanto risulta necessario valutare correttamente anche questo tipo di superfici composite. SSAP permette di effettuare automaticamente questo tipo di verifiche durante il processo di verifica di stabilità di un pendio che contenga questo tipo di rinforzi.

Nella fig. 2.4.17 viene mostrata una banda di disturbo e di taglio dello spessore, secondo vari autori, di alcuni cm. In questa zona di interfaccia si può estendere una superficie di scivolamento che però è caratterizzata da valori di resistenza al taglio inferiore a quella del terreno di riempimento. La resistenza al taglio in questa zona di interfaccia è considerata, ai fini della sicurezza, come semplice attrito e quindi associata a un parametro ridotto di angolo di attrito rispetto a quella di progetto del terreno di riempimento. Il valore ridotto di angolo di attrito, in corrispondenza della zona di taglio nella interfaccia è data dalla seguente equazione:

$$\delta = \arctan(f_{ds} \tan \phi')$$

(2.24)

dove:

$\phi'$  = angolo di attrito interno del terreno di riempimento (in gradi)

$f_{ds}$  = coefficiente di riduzione per *direct sliding*. Solitamente compreso tra 0.6 e 1.0.

$\delta$  = angolo di attrito interno della zona di taglio alla interfaccia geosintetico/terreno (in gradi).

Scivolamento diretto, "*direct sliding*"  
in corrispondenza  
di interfaccia geogriglie-suolo.  
Sono in SSAP considerate 2 possibili  
linee preferenziali di scivolamento: la  
superiore e la inferiore. Lo  
scivolamento diretto e' cosiderato in  
una zona di taglio, di spessore  
limitato ad alcuni cm, intorno al  
livello della geogriglia.

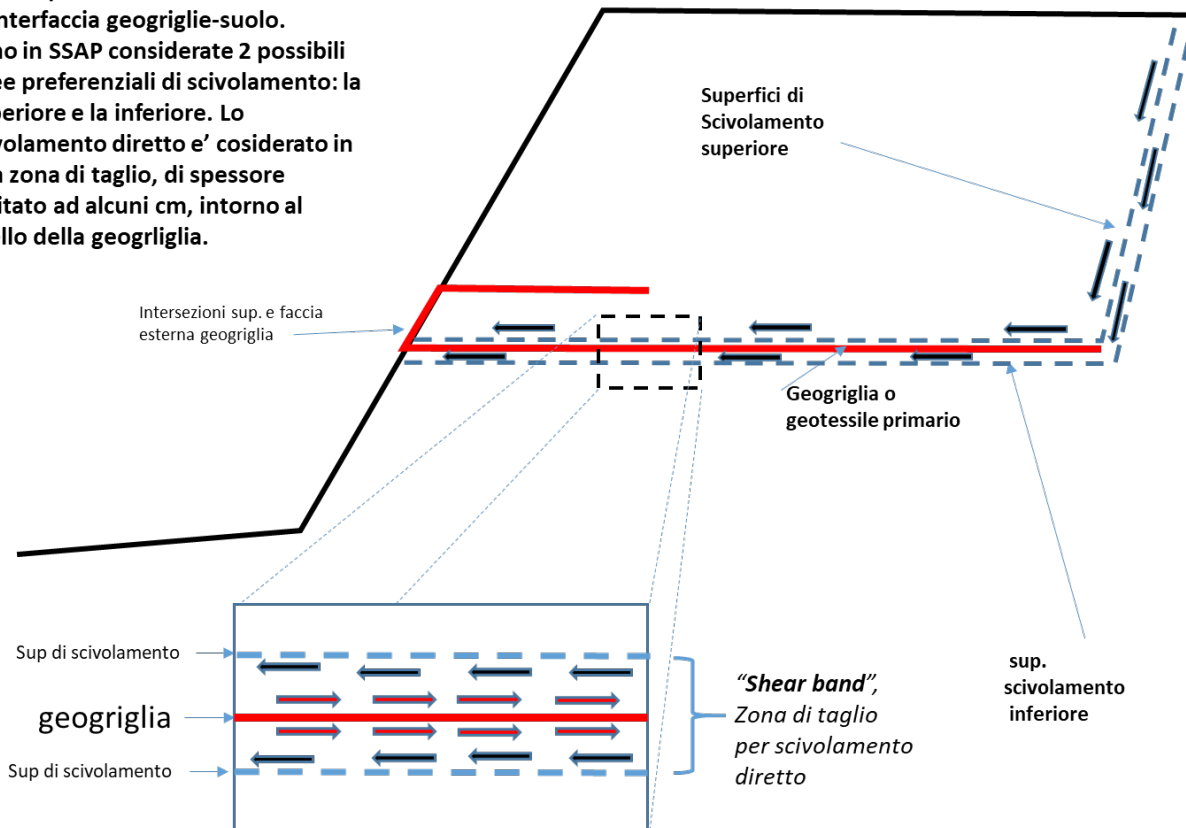


Fig. 2.4.17

Il coefficiente  $f_{ds}$  di riduzione per *direct sliding*, solitamente compreso tra 0.6 e 1.0, nella letteratura geotecnica specializzata e nei manuali dei produttori di geosintetici e' generalmente ottenuto da speciali test di taglio diretto in scatole di taglio di grandi dimensioni. Nei fatti e' ottenuto mediante la comparazione della resistenza al taglio in un campione con solo terreno e la resistenza al taglio dove in corrispondenza della zona di *shear* della scatola e' posto un geosintetico.

Il risultato di queste prove permette di ottenere una misura affidabile di questo coefficiente molto importante nella valutazione della riduzione di resistenza la taglio nel processo di *direct sliding*. Generalmente, secondo i vari autori che hanno eseguito questi tipi di test, per le geogriglie i valori variano tra 0.8 e 0.95, mentre per i geotessili si ottengono valori inferiori, variabili tra 0.6 e 0.75 (Liu et al. 2009; Moraci et al. 2014). In mancanza di dati affidabili si consiglia di utilizzare un valore di  $f_{ds}$  non superiore a 0.7.

Sono altresì disponibili delle equazioni per la **stima dei parametri  $f_b$  e  $f_{ds}$** , tuttavia si consiglia di preferire i valori che sia possibile ottenere dai certificati con i dati tecnici dei produttori di geosintetici. Va detto che spesso i produttori di geosintetici omettono di fornire i valori di questi coefficienti, anche se determinati sperimentalmente in prove di sfilamento (*pullout*) e di taglio/scivolamento diretto (*direct sliding*). In alcuni casi questi valori non sono forniti direttamente ma solo in maniera indiretta per mezzo di parametri calcolati dalla geometria del geosintetico. Nella figura 2.4.18 viene mostrato



un esempio di tabella di riferimento per di questi parametri, fornita da un noto produttore di geosintetico a livello internazionale, relativi a differenti tipi di prodotti. (**N.B.: si omette volontariamente il nome del produttore**).

Grade	$\alpha_s^{(1)}$	Ratio of bearing <sup>(2)</sup> surface to plan area $\alpha_b \times B/2S$
R 200/30-25 MPT	0.38	0.023
R 400/50-30 MPT	0.43	0.024
R 600/50-30 MPT	0.52	0.017
R 800/100-30 MPT	0.56	0.020
R 1100/100-30 MPT	0.77	0.011
R 1200/100-30 MPT	0.82	0.010
R 1400/100-30 MPT	0.88	0.007
R 1500/100-30 MPT	0.89	0.007

(1)  $\alpha_s$  is the proportion of the plane sliding area that is solid and is required for the calculation of the bond coefficient ( $f_b$ ) and the direct sliding coefficient ( $f_{ds}$ ) (see sections 6.10 and 6.14).  
(2) The ratio is required to calculate the bond coefficient in accordance with CIRIA SP123 : 1996 (see section 6.14):

- $\alpha_b$  is the proportion of the grid width available for bearing
- $B$  is the thickness of a transverse member of a grid taking bearing
- $S$  is the spacing between transverse members taking bearing.

**fig. 2.4.18**

La stima dei parametri  $f_b$  e  $f_{ds}$ , secondo Jewell(1990,1996), puo essere fatta con le seguenti equazioni:

$$f_{ds} = \alpha_s f_{sf} + (1 - \alpha_s) \quad (2.19)$$

dove:

$\alpha_s$  = Porzione della superficie di scivolamento che e' sulla geogriglia. Usualmente fornita dai produttori di geosintetici. (vedi figura 2.4.18)

$f_{sf}$ = coefficiente di frizione tra geogriglia e suolo (*skin friction coefficient*), usualmente assunto con un valore tra 0.6 e 0.7, ai fini della sicurezza.

La stima di  $f_{ds}$  puo' essere quindi effettuata con il nomogramma mostrato nella figura 2.4.19.

La stima di  $f_b$  (*bond coefficient*) viene invece usualmente fatta con la seguente equazione di Jewell(1990):

$$f_b = \alpha_s f_{sf} + \frac{\sigma'_b}{\sigma'_n} \alpha_b \frac{B}{2S} \frac{1}{\tan \phi'} \quad (2.20)$$

dove :

$\alpha_b \frac{B}{2S}$  = frazione della superficie della griglia dove agisce la resistenza passiva allo sfilamento. Valore e' usualmente fornito dei produttori del Geotessile (vedi fig. 2.4.18)

$\frac{\sigma_b}{\sigma_n}$  = bearing stress ratio.

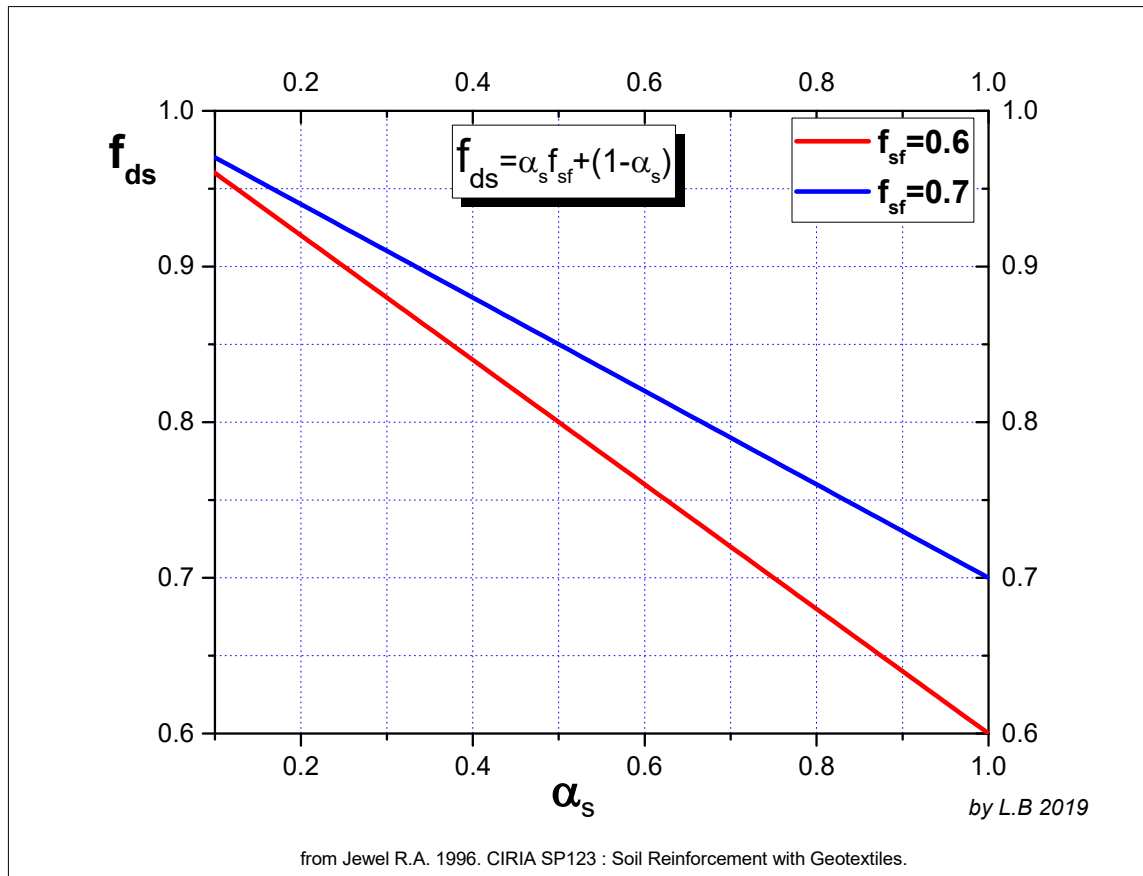


Fig. 2.4.19

La eq. 2.20 che puo essere semplificata in due termini che esprimono la componente di frizione (*pullout friction*) e la componente di resistenza passiva in prossimita' della parte di geogriglia trasversale alla direzione di sfilamento (*pullout bearing*)

$$f_b = \alpha_s f_{sf} + k_b \quad (2.21)$$

dove il termine  $k_b$  (*pullout bearing*) e' quindi definito dalla seguente equazione

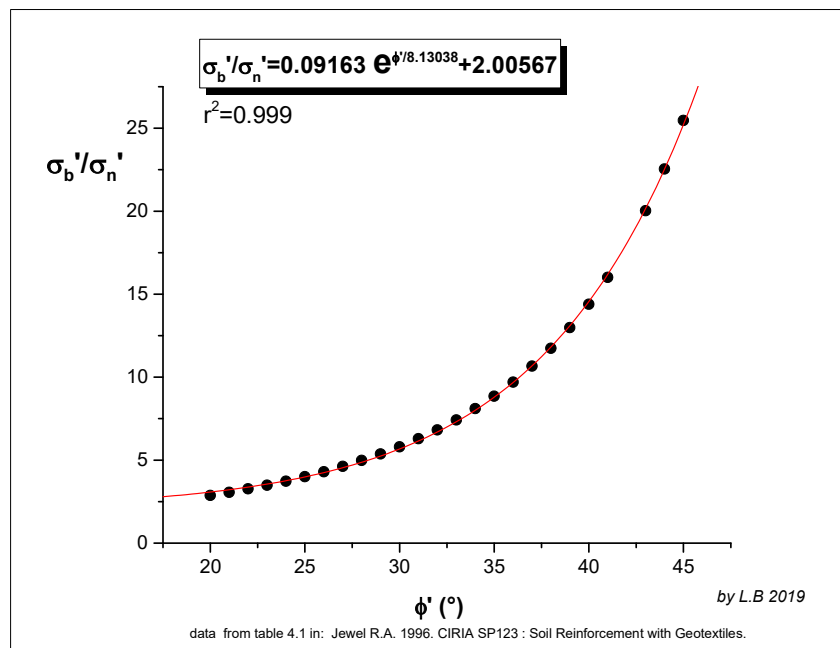
$$k_b = \frac{\sigma'_b}{\sigma'_n} \alpha_b \frac{B}{2S} \frac{1}{\tan \phi'} \quad (2.22)$$

dove il fattore *bearing stress ratio*  $\frac{\sigma'_b}{\sigma'_n}$  e' ottenibile da la seguente equazione ottenuta dai dati tabulati forniti da Jewell(1996):

$$\frac{\sigma'_b}{\sigma'_n} = 0.09163 e^{\frac{\phi'}{8.13038}} + 2.00567 \quad (2.23)$$

La eq.2.23 ha il suo grafico nella figura 2.4.20.

Essendo il fattore  $\frac{\sigma'_b}{\sigma'_n}$  una funzione del solo  $\phi'$ , la stima speditiva del termine  $K_b$  può essere effettuata usando direttamente il nomogramma della figura 2.4.21 una volta noti  $\phi'$  e il fattore  $\alpha_b \frac{B}{2S}$  fornito dal produttore dal geosintetico (vedi fig. 2.4.18).

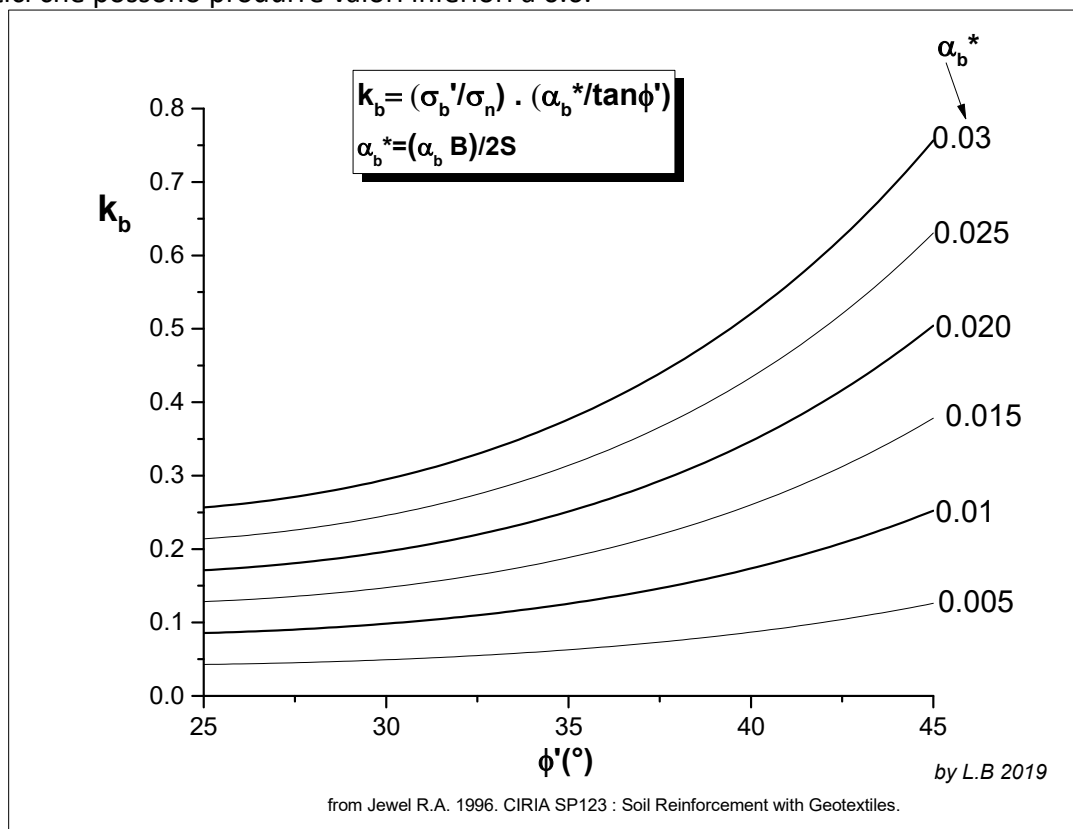


**Fig. 2.4.20**

Noti i coefficienti  $\alpha_s$  e  $K_b$  abbiamo la possibilità di determinare rapidamente il valore di  $f_b$  (*bond coefficient*) usando il nomogramma nella figura 2.4.22 .

Bisogna ricordare che in caso di geotessili tipo *tessuto non tessuto* abbiamo generalmente che  $f_{ds}=f_b$  con valori generalmente intorno a 0.6-0.7. Questi valori sono legati alle equazioni 2.19 e 2.20 dato che non esistono in questo tipo di geosintetico porzioni trasversali dove si può generare una resistenza passiva (Jewell , 1990), e questi valori sono confermati sperimentalmente da vari autori (Liu et al. 2009; Moraci et al. 2014) con test di taglio diretto o di sfilamento.

Dalla figura 2.4.22 si evince che per ottenere un valore di  $f_b > 0.6$  e' necessario scegliere geosintetici con combinazioni e caratteristiche geometriche particolari. E quindi dovrebbero essere evitati quei geosintetici che possono produrre valori inferiori a 0.6.



**Fig. 2.4.21**

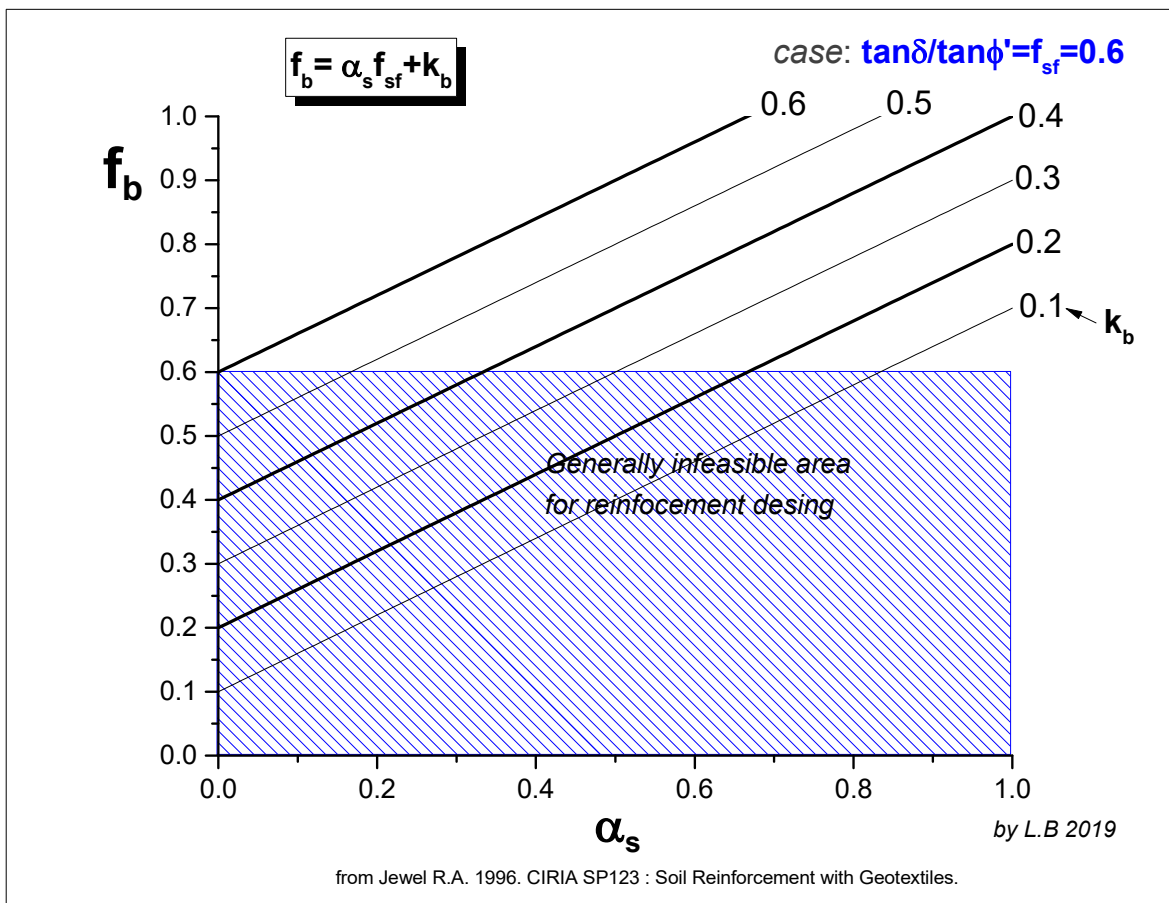


Fig. 2.4.22

E' necessario puntualizzare che per trarre il maggior beneficio dalle rinnovate capacita' di analisi e verifica di SSAP in presenza di strutture in terre armate e geosintetici di rinforzo al pendio si consigliano gli utenti di fare uso della molteplicita' di strumenti disponibili nel software.

In particolare si suggerisce di fare in ogni caso ricorso alla modalita' Sniff random Search come motore di ricerca dato che questo (nella sua versione 3.0) e' stato potenziato per rilevare la riduzione locale della resistenza alla interfaccia Suolo/geosintetico e tracciare le porzioni dove e' possibile il verificarsi di Fenomeni di **Direct Sliding**. Si suggerisce comunque di effettuare sempre verifiche con smussatore delle superfici sia attivato che disattivato