

Ordine dei Geologi della Regione Piemonte
L'erosione dei suoli: un problema anche
geotecnico

Gian Paolo Giani

Dipartimento di Scienze della terra «Ardito Desio»
Università di Milano

Erosione e movimenti di massa dei pendii (*frane*) sono fenomeni distinti

- **Erosione** è la progressiva rimozione dalla superficie del suolo di strati di terreno, attraverso il distacco ed il trasporto di *singole particelle*, ad opera di vari agenti fisici: acqua, vento, ghiaccio.
- Le **frane** consistono nel movimento verso valle di *porzioni di terreno* di varia forma e con diversi cinematismi, ad opera della gravità.
- I due fenomeni hanno origine da fattori che in gran parte coincidono, ma sono governati da leggi diverse.
- In generale: i caratteri ambientali, geomorfologici, topografici e climatici dei siti e le caratteristiche dei terreni determinano natura e progressione dei fenomeni evolutivi della superficie del suolo.
- In entrambi i casi, nel nostro clima, il ruolo dell'**acqua** è fondamentale.

Ruolo dell'acqua

Le acque piovane costituiscono uno dei più importanti agenti morfogenetici, producono rilevanti effetti geomorfologici legati sia all'azione diretta d'impatto della pioggia sul terreno (*raindrop erosion*), sia all'azione dello scorrimento dell'acqua in superficie, ossia al ruscellamento (*runoff*) (Panizza, 1988). I processi che ne derivano sono detti di *dilavamento* o di *erosione pluviale* (APAT, 2006, Fenomeni di dissesto geologico – idraulico sui versanti).

Le acque piovane, raggiunta la superficie terrestre, in parte possono infiltrarsi in profondità, nel suolo e nel sottosuolo, in parte possono scorrere sulla superficie se questa è appena inclinata, originando un flusso superficiale diretto secondo la massima pendenza. Questo fenomeno provoca sulla superficie del terreno l'asportazione e il trasporto di particelle solide, di suolo e di roccia, verso la parte bassa del versante, dove il materiale eroso può accumularsi formando depositi denominati colluviali (*colluvium*). In tali processi l'acqua interviene come agente diretto di erosione, trasporto e deposito.

Ruolo dell'acqua

Le acque piovane dapprima si dispongono a velo e scorrono disordinatamente, per questo sono dette “*selvagge*” o “*ruscellanti*” o “*dilavanti*”.

Successivamente queste acque tendono ad organizzarsi e incanalarsi in un alveo stabile e, scorrendo in un reticolo idrografico, sono denominate “incanalate”.

Le acque incanalate producono erosione lineare o fluviale che consiste nell'asportazione di materiale dal letto e dalle sponde del corso d'acqua. Questo fenomeno è definito erosione verticale o di fondo.

A questo tipo di azione si può associare l'erosione laterale od orizzontale o di sponda, che agisce lateralmente sulle sponde producendo lo scalzamento; in questo caso il corso d'acqua tende ad allargare il suo letto.

Le acque di dilavamento danno luogo all'erosione areale o superficiale, che si esplica sulle zone comprese tra due alvei, ossia sui versanti.

Dilavamento superficiale



Vista di un versante interessato dalla presenza di diffusi solchi erosivi di tipo *rill* e di alcuni solchi più profondi di tipo *gully* (nella parte centrale). L'innescò di tali fenomeni è stato favorito dall'affioramento sul versante di litotipi limoso-sabbiosi, poco coerenti e facilmente erodibili e dalla presenza di coltivazioni agricole essenzialmente di tipo erbaceo. Comune di Certaldo (FI). Riferimenti bibliografici: Castiglioni, 1992; Dramis et al., 2005; Giordano, 2002; Gisotti & BENEDINI, 2000; PANIZZA, 1988; VALLARIO, 1992.

Dilavamento superficiale

L'azione erosiva del dilavamento superficiale si può esplicitare, con modalità diverse, come effetto dell'azione areale del ruscellamento. Le modalità di maggior rilievo per quanto riguarda il dissesto geologico-idraulico sono: “*Erosione areale per ruscellamento diffuso*” e “*Erosione a rivoli e solchi per ruscellamento concentrato*”.



Immagine di un versante privo della copertura vegetale arborea e arbustiva, interessato da coltivazioni erbacee, sul quale affiorano litotipi marnoso argillosi, quindi con elevata predisposizione ai fenomeni erosivi. Il versante è interessato da una miriade di solchi di erosione concentrata, che danno luogo a un'erosione a rivoli (*rill erosion*). Tali rivoli sono orientati secondo la massima pendenza e confluiscono negli impluvi principali. Località Lago di Occhitto, nel comune di Celenza Val Fortore (FG).

Dilavamento superficiale



Vista di una scarpata stradale priva di copertura vegetale e interessata da fenomeni di tipo *rill erosion*. Comune di Trivento (CB).

Dilavamento superficiale



Nella foto si può osservare il progressivo approfondirsi dei solchi di erosione sul versante, si osservano infatti fenomeni di *rill erosion* nella parte alta, *gully erosion* nella parte bassa e alla base del versante stesso l'accumulo del terreno eroso (*colluvium*). Le acque di ruscellamento hanno un notevole effetto erosivo sui terreni coltivati, privi della protezione vegetale nelle stagioni a maggiore piovosità. Comune di Civitacampomariano (CB).

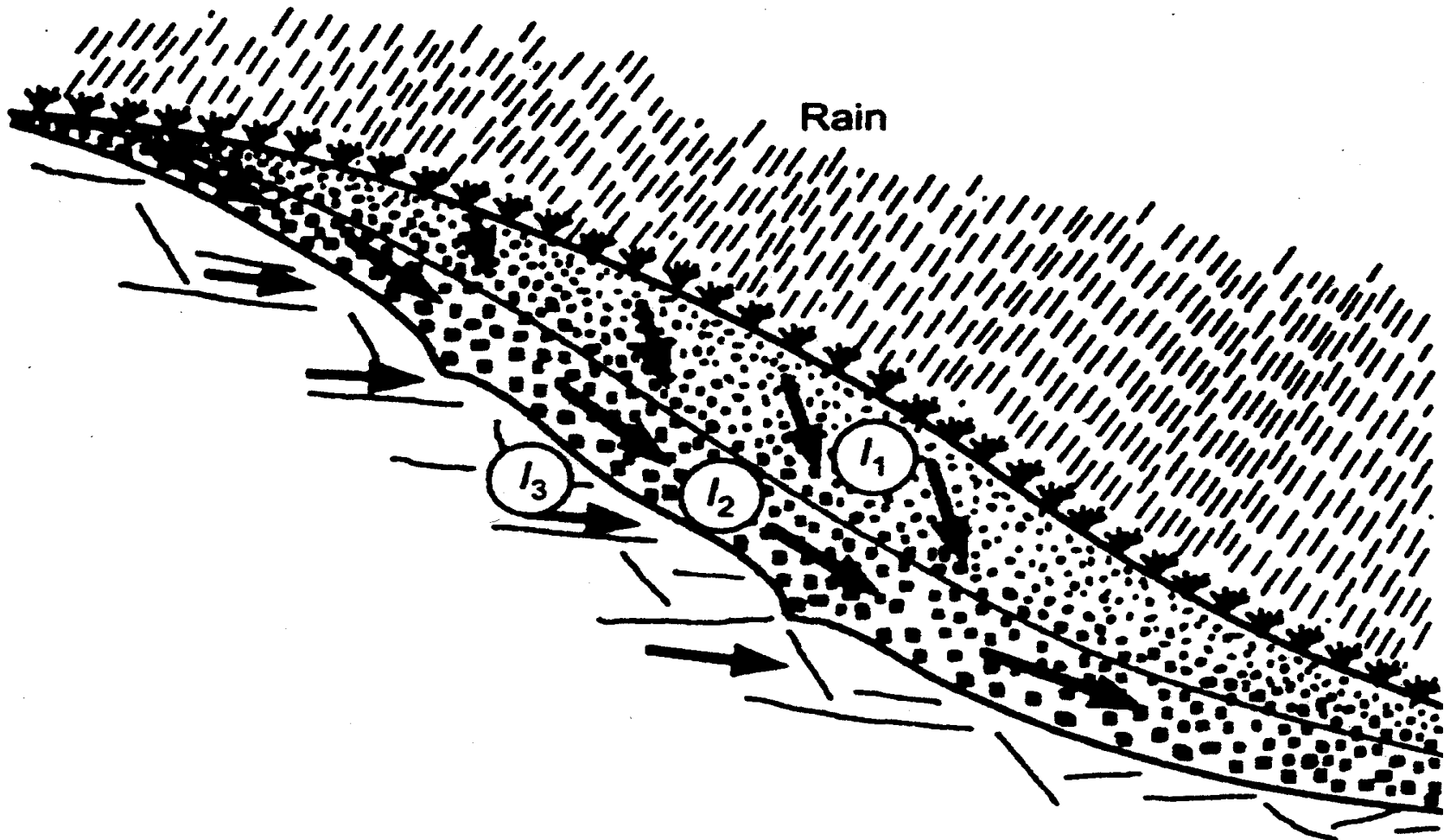
Dilavamento superficiale



Vista di una profonda incisione riferibile ad un solco di ruscellamento concentrato (*gully*) in depositi argilloso-marnosi. Comune di Civitacampomariano (CB).

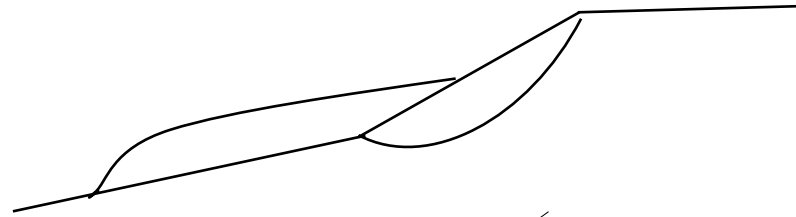
Debris Flow

I cambiamenti climatici che determinano un aumento degli eventi estremi di pioggia possono determinare un'accelerazione dei meccanismi di generazione di debris flow. In questa sede si esaminano brevemente i meccanismi di erosione e liquefazione

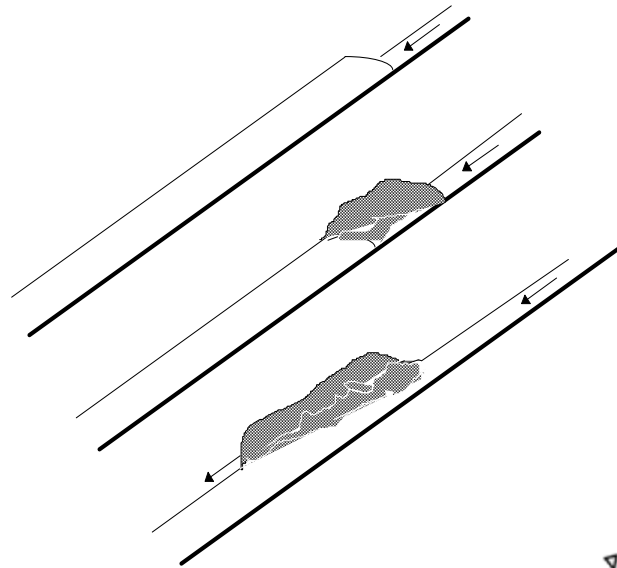


Meccanismi di generazione dei debris flow

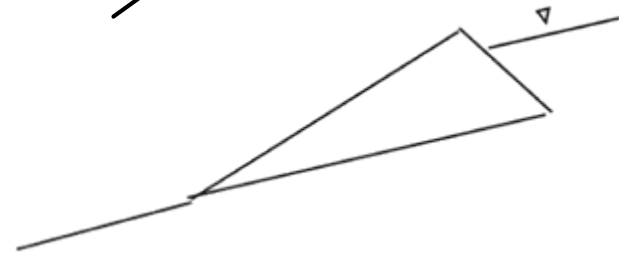
Liquefazione



*Erosione



Rottura di una diga



Erosione

(Deangeli, 2010)

$$F_D = \frac{1}{2} C_D \rho_w d^2 u^2$$

$$F_L = \frac{1}{2} C_L \rho_w d^2 u^2$$

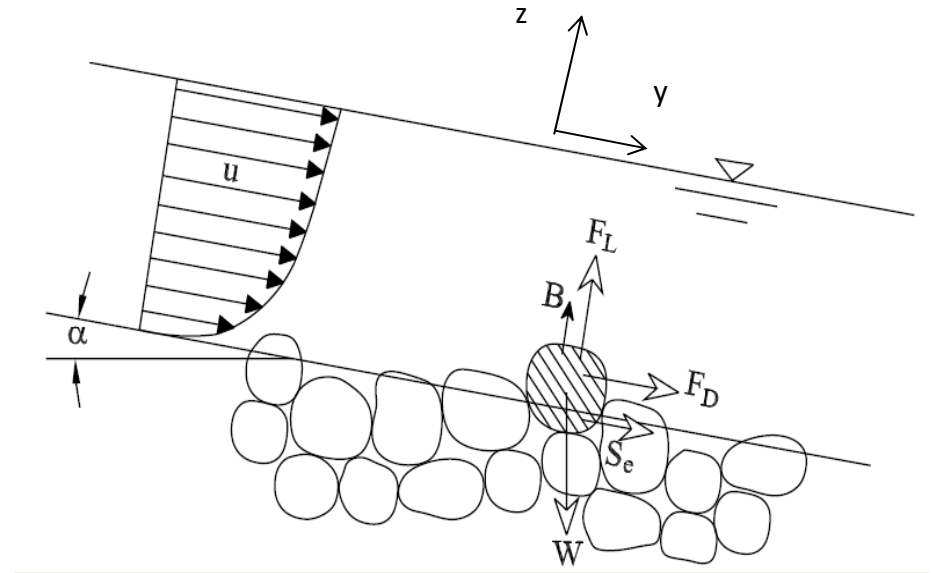
$$S_e = \frac{\pi}{4} \rho_w g d^3 i$$

$$W - B = \frac{\pi}{6} (\rho_s - \rho_w) g d^3$$

$$\tau^* = \frac{\tau_b - \rho_w g d (\partial h / \partial y)}{(\rho_s - \rho_w) g d \cos \alpha + \rho_w g d (\partial h / \partial z)}$$

$$\tau_b = \rho_w g H \sin \alpha$$

$$\mathbf{i} = -\nabla h$$



Il modello di calcolo (Armanini & Gregoretti, 2005) si riferisce alla condizione in cui una lama d'acqua di altezza variabile, in accordo anche all'intensità delle precipitazioni, scorre su un terreno completamente saturo.

Dove:

F_D è la forza di trascinamento;

F_L è la forza di sollevamento idrodinamico;

B è la forza di galleggiamento;

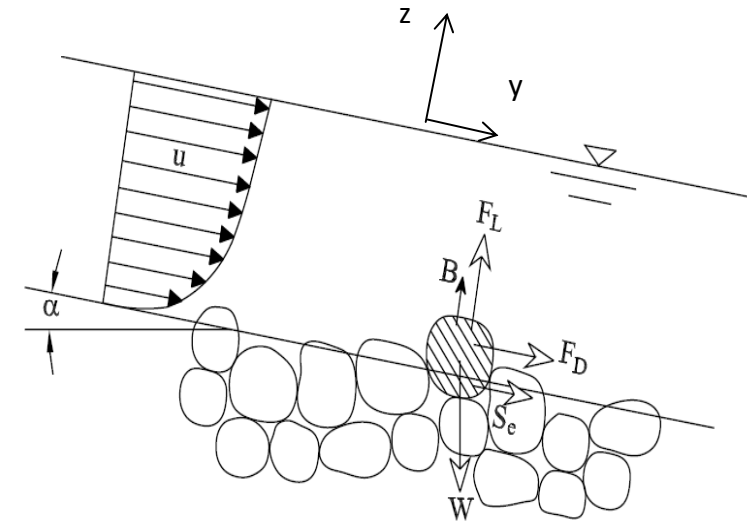
S_e è la forza di filtrazione e

W è il peso dell'elemento, suddivisibile nelle sue componenti normali (W_n) e tangenziali (W_t) al flusso.

L'equazione di equilibrio può essere così scritta:

$$F_D + W_t + S_e = (W_n - B - F_l) \tan \Phi \quad (1)$$

Quando il membro di destra (forze attive) supera il membro di sinistra (forze resistenti per attrito) si ha erosione con il trascinamento dell'elemento.

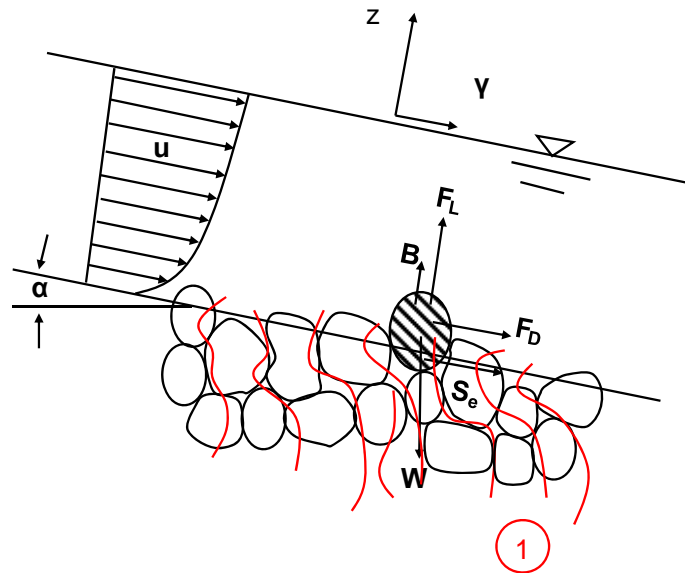


Mitigazione dell'erosione

Per potere evitare l'erosione è necessario aumentare le forze stabilizzanti poste al secondo membro dell'equazione della diapositiva precedente.

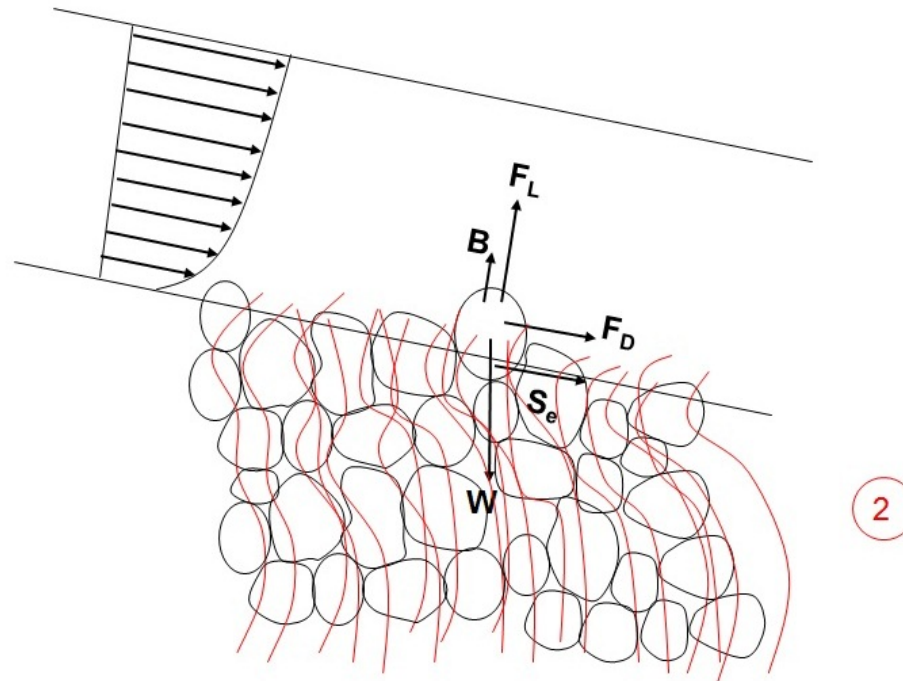
Si tratta di dare alla struttura granulare un contributo di tipo coesivo.

Nel caso in esame si tratta di introdurre «radici» o comunque vegetazione» capace di infiltrarsi tra i vari grani del terreno e impedire lo scorrimento reciproco di questi grani.



Mitigazione dell'erosione

Le fibre delle radici o comunque della vegetazione lavorano, opponendosi al movimento di scavalcamento reciproco dei grani, per trazione. Diventa essenziale anche che, per non farsi sfilare, queste fibre siano sufficientemente lunghe. E' chiaro che il contributo delle fibre è limitato a opporsi all'erosione e quindi alla stabilizzazione di fenomeni di tipo superficiale.



Incremento di resistenza a taglio dato da radici

(a sinistra) Modello di radici flessibili ed elastiche che si estendono verticalmente fino al di sotto di un piano di potenziale rottura per taglio (Gray, 1978).

(a destra) Confronto tra gli incrementi di resistenza a taglio dovuti al rinforzo delle fibre (Greenway, 1987)

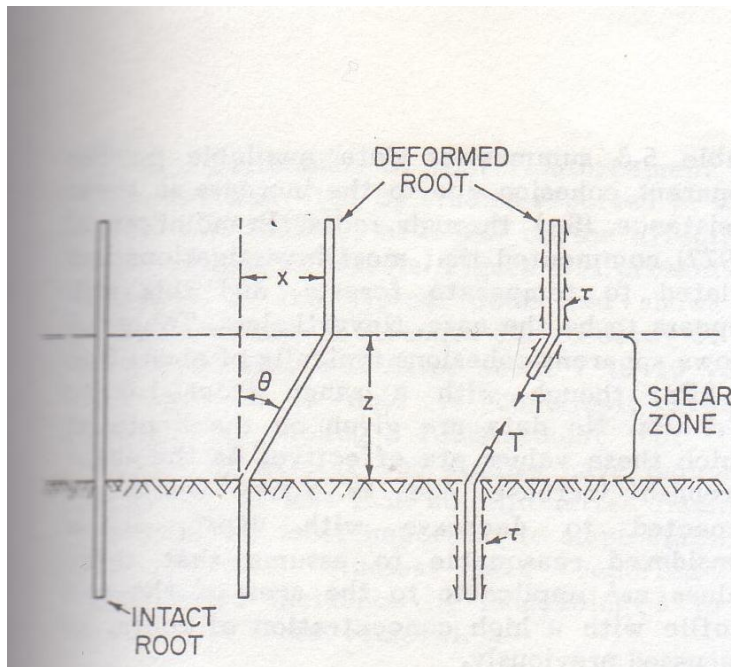


Fig. 5.48 Model of flexible, elastic root extending vertically across a horizontal shear plane (Gray, 1978)

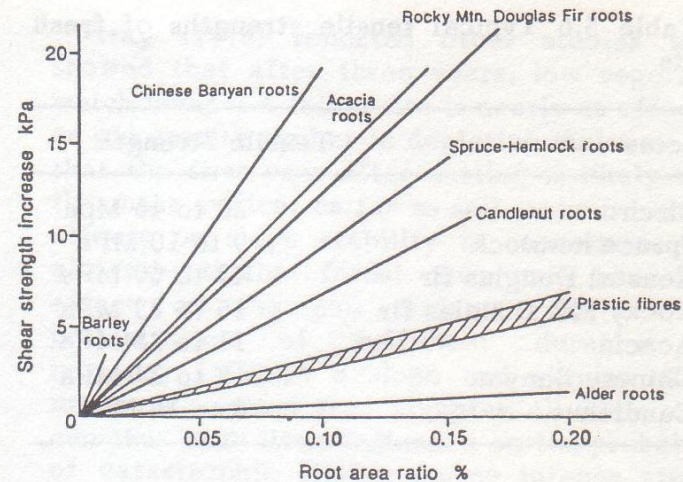


Fig. 5.49 Comparison of shear strength increases due to fibre reinforcement (Greenway, 1987)

L'incremento di resistenza a taglio, S_r avviene soltanto per coesione (apparente).

t_r , resistenza a trazione media delle fibre per unità di area del terreno vale:

$$S_r = t_r (\cos \Theta \tan \varphi + \sin \Theta) \quad (1)$$

Modello per il calcolo dell'incremento di resistenza a taglio indotto da radici che penetrano nel sottosuolo (Gray, 1978)

Utilizzando sia i risultati di prove di laboratorio, sia di misure in sito su varie specie di radici ci si è resi conto che il termine tra parentesi dell'equazione 1 è relativamente insensibile all'attrito e all'angolo di distorsione, così che:

$$S_r = 1.15 \, t_r = 1.15 \, T_r (A_r/A) \quad (1)$$

Dove T_r è la resistenza a trazione media delle fibre delle radici;

A_r è l'area totale delle fibre delle radici che attraversano il piano di taglio;

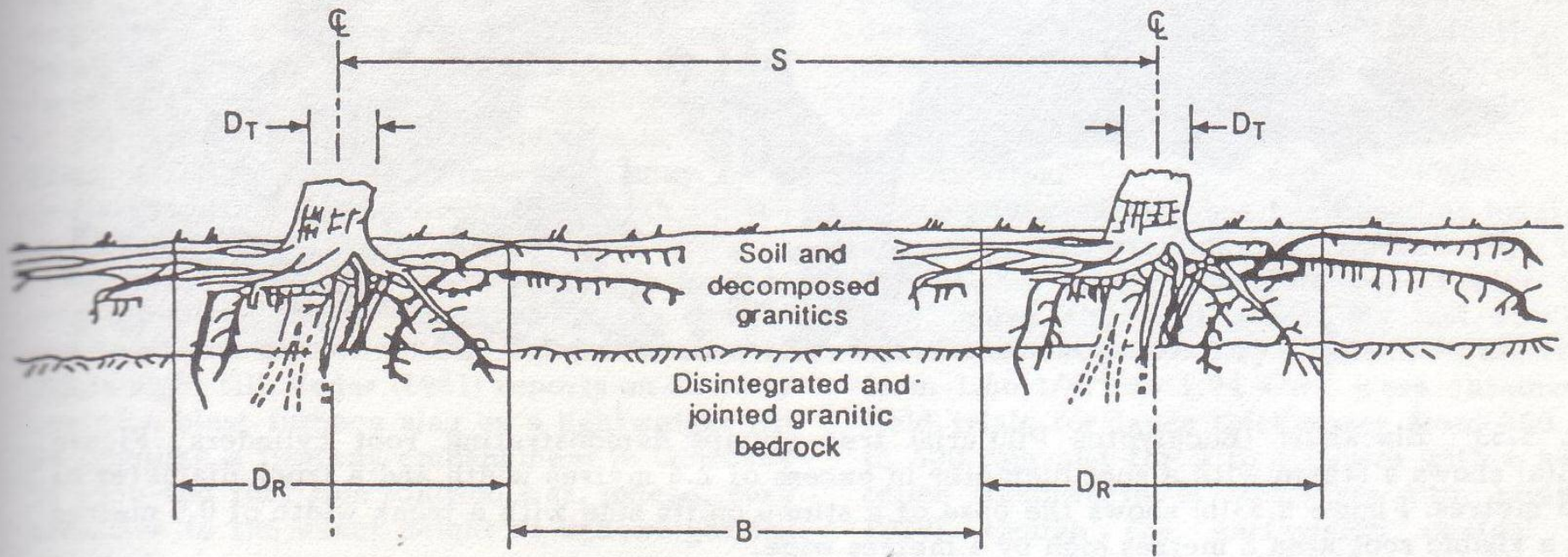
A è l'area totale del piano di taglio;

A_r/A è il rapporto tra l'area delle radici e l'area totale.

Secondo queste ipotesi le fibre sono disposte verticalmente, non si sfilano e hanno un discreto valore (superiore a quello del terreno) del modulo elastico.

Esempio del modo in cui possono essere schematizzati i sistemi di radici.

La Figura riporta uno schema di radici di Eucalipti di Sidney disposte nel sottosuolo. D_R (diametro della zona radicata pari a circa 2.5 m) è circa 5 volte D_T (diametro del tronco pari a circa 0.75 m). Le radici sono schematizzate come cilindri verticali.



Key : S - Centre to centre spacing of trees D_T - Trunk diameter (at breast height)
 D_R - Diameter of vertical root cylinder B - Spacing between root cylinders

Fig. 5.52 Vertical root cylinders of trees on granitic slopes (after Gray, 1978)

Incremento della resistenza a taglio del terreno rinforzato in relazione alla spaziatura delle radici e della rapporto tra aree di fibre e area totale

- La figura mostra come diverse specie di radici possono estendersi nel sottosuolo

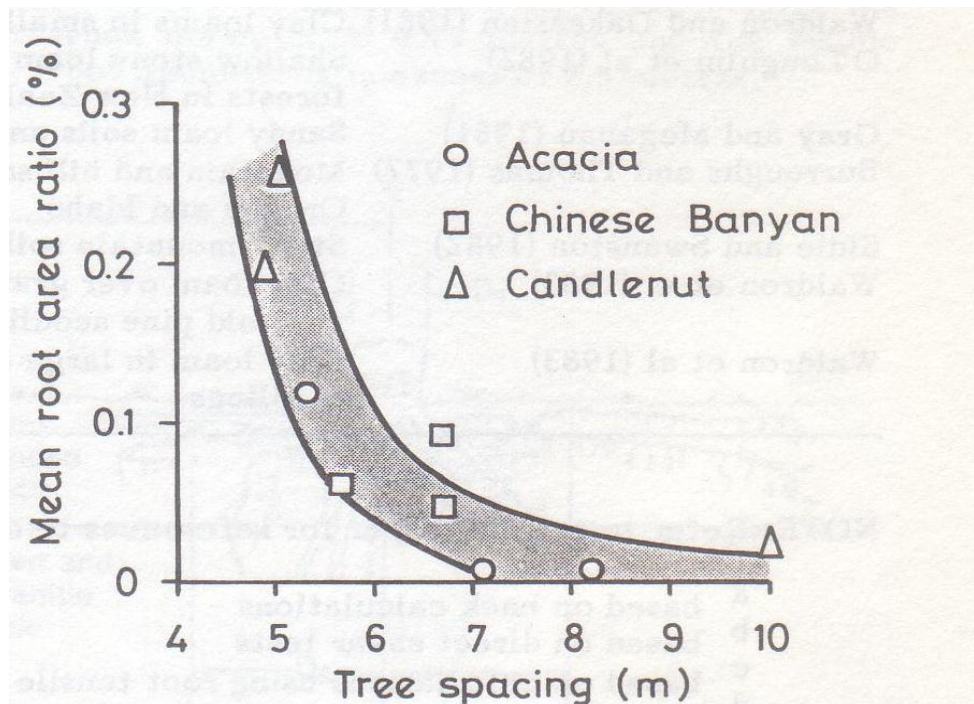


Fig. 5.50 Observed relationship between root area ratio and tree spacing (after Greenway et al, 1984)

Le due tabelle mostrano per diverse specie di radici fresche: **la loro resistenza a trazione** (in alto a sinistra), **la loro possibile estensione nell'immediato sottosuolo** (in basso a sinistra) e **la loro resistenza a taglio**.

Table 5.6 Typical tensile strengths of fresh roots

Species	Tensile Strength
Birch	22 to 46 Mpa
Spruce hemlock	9 to 10 MPa
Coastal Douglas fir	43 to 60 MPa
Rocky Mt. Douglas fir	15 to 23 MPa
Acacia	11 to 28 MPa
Chinese Banyan	18 to 24 MPa
Candlenut	6 to 16 MPa

Table 5.7 Typical root area ratios

Species	A_R/A
Trees (70 to 110 roots/m ² of 5 to 10 mm size)	0.14 to 0.93%
Rocky Mt. Douglas fir	0.05 to 0.17%
Barley	0.1 to 0.8%

Table 5.8 Summary of data on shear resistance increase (S_R) due to roots (Sidle et al, 1985)

Investigator	Soil-vegetation situation	S_R (kPa)
Swanston (1970)	Mountain till soils under conifers in Alaska	3.4 - 4.4 ^a
O'Loughlin (1974a)	Mountain till soils under conifers in British Columbia	1.0 - 3.0 ^a
Endo and Tsuruta (1969)	Cultivated loam soils (nursery) under Alder	2.0 - 12.0 ^b
Wu et al (1979)	Mountain hill soils under conifers in Alaska	5.9 ^c
Waldron and Dakessian (1981)	Clay loams in small containers growing pine seedlings	5.0 ^b
O'Loughlin et al (1982)	Shallow stony loam hill soils under mixed evergreen forests in New Zealand	3.3 ^b
Gray and Megahan (1981)	Sandy loam soils under conifers in Idaho	10.3 ^c
Burroughs and Thomas (1977)	Mountain and hill soils under conifers in west Oregon and Idaho	3.1 - 17.5 ^d
Sidle and Swanston (1982)	Stony mountain soil under conifers and brush	2.2 ^a
Waldron et al (1983)	Clay loam over gravel in large columns growing 5 year old pine seedlings	8.9 - 10.8 ^b
Waldron et al (1983)	Clay loam in large columns growing 5 year old pine seedlings	9.9 - 11.8 ^b

NOTE: Refer to original paper for references to each investigator

- a based on back calculations
- b based on direct shear tests
- c based on calculations using root tensile strengths
- d based on root density information

Riforestazione tardiva.

La Figura illustra un esempio del progressivo decremento della resistenza a taglio di radici morte, che sono sostituite con un certo ritardo con un intervento di riforestazione. Soltanto dopo 10 - 12 anni l'effetto della riforestazione comincia a dare significativi effetti di rinforzo. Gli studi (Slide et al. 1985) hanno messo in evidenza che le radici aventi diametro inferiore a 20 mm sono probabilmente le più importanti per la stabilizzazione del pendio.

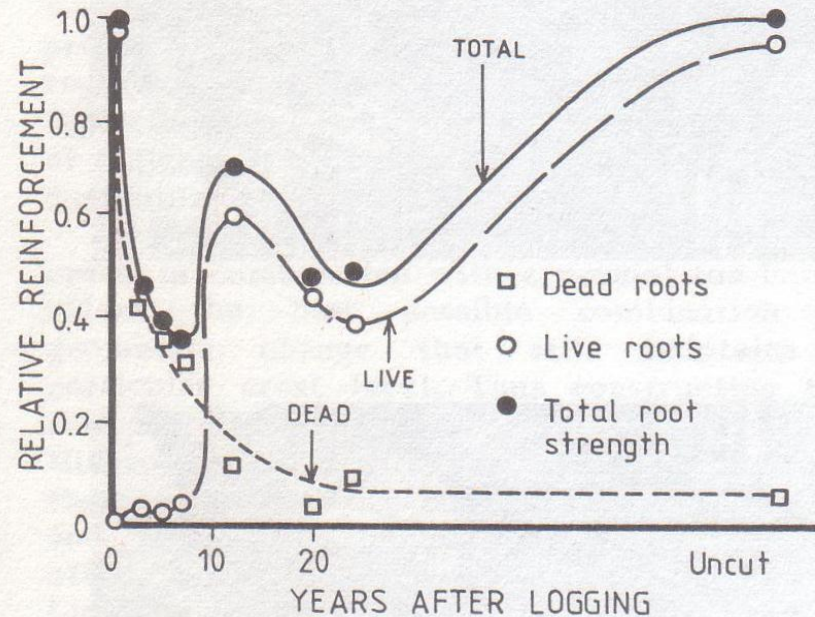


Fig. 5.51 Relative reinforcement of soils due to dead roots following clear cutting and live roots during regeneration of vegetation (Sidle et al, 1985)

Determinazione del contributo anti erosivo dato dalle fibre

Il contributo anti erosivo dato dalle fibre può essere valutato se si conoscono la resistenza a trazione della singola fibra e il rapporto tra l'area totale interessata da una potenziale erosione (A) e l'area occupata dalle fibre (A_f).

Si deve dividere quindi la resistenza a trazione delle fibre per un opportuno fattore di sicurezza e moltiplicare il risultato di questa divisione per il rapporto A_f/A per ottenere il valore della coesione data dall'intervento.

Aggiungendo nell'equazione (1) della diapositiva 13 alle forze resistenti questo contributo coesivo (trasformato in forza perché sia dimensionalmente corretto) si può valutare se si è in condizioni di idonea stabilità nei riguardi dei fenomeni di erosione.

