



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA  
FACOLTÀ DI AGRARIA

**Dipartimento Territorio e sistemi agro-forestali**

TESI DI LAUREA IN TECNOLOGIE FORESTALI ED AMBIENTALI

***IL CONTRIBUTO RADICALE ALLA STABILITÀ DEI  
PENDII:  
STATO DELLE RICERCHE***

Relatore:  
Prof. Vincenzo D'Agostino

Laureando:  
Andrea Leoni  
Matricola n. 533912

**ANNO ACCADEMICO 2008- 2009**



## INDICE

1. Premessa sulla funzione idrogeologica della vegetazione.....	pag. 5
2. Gli apparati radicali ed il suolo.....	pag. 8
3. Fondamenti di geotecnica e stabilità di un pendio illimitato.....	pag. 15
4. La resistenza degli apparati radicali.....	pag. 21
4.1. Resistenza alla rottura.....	pag. 21
4.2. Densità di area radicale.....	pag. 30
4.3. Il metodo dell'approccio energetico.....	pag. 36
5. Conclusione.....	pag. 45
6. Bibliografia.....	pag. 47



# 1. PREMESSA SULLA FUNZIONE IDROGEOLOGICA DELLA VEGETAZIONE

La montagna, intesa nel suo concetto più generale, è un ambiente distinto principalmente in versanti, coperti da boschi e pascoli, ed in bacini idrografici.

L'enorme flusso idrico che scaturisce da quest'ultimi, associato alla pendenza che caratterizza l'ambiente montano, determina fenomeni particolarmente dannosi alla vita dell'uomo, che portano ad avere una visione della montagna diversa da quella romantica, conosciuta ai più. Eventi come valanghe e frane, sia superficiali sia profonde, rappresentano il prodotto di un ambiente di per sé instabile.

Questa condizione di instabilità, per quanto concerne le frane superficiali, deriva essenzialmente da due effetti: l'erosione e la sollecitazione al taglio del suolo.

L'erosione rappresenta un processo in cui si ha la perdita e l'allontanamento di particelle di terreno ed elementi nutritivi, dovuto allo scorrere d'acqua su una superficie in genere acclive. Lo stesso fenomeno può essere causato anche dal vento. Con l'andare del tempo, al perpetuarsi del fenomeno, il flusso idrico crea delle incisioni nel suolo sempre più profonde, che destabilizzano il terreno.

Il taglio del pendio è invece un fenomeno in cui strati di terreno poco compatti, scorrono su altri più stabili determinando delle frane per scivolamento. Nella zona tra i due diversi strati, si ha difatti un taglio longitudinale del terreno.

Questi due tipi di dissesto hanno essenzialmente un fattore comune: l'acqua. La presenza di un flusso idrico continuo e libero, su una superficie acclive, infatti, favorisce questi due fenomeni d'instabilità del territorio.

Attraverso le sistemazioni idraulico-forestali (briglie, reti di drenaggio, ecc...), l'essere umano ha quindi iniziato la sua opera di regimazione dei bacini idrografici, atta alla messa in sicurezza del territorio montano. Una sicurezza diventata sempre più impellente negli ultimi anni, a causa di un aumento di popolazione nelle vallate, che ha spinto l'uomo ad interessarsi maggiormente ai fenomeni di dissesto, ricercandone i fattori innescanti e proponendo soluzioni via via più efficienti ed efficaci.

La continua ricerca ed il crescente interesse dell'opinione pubblica verso le tematiche ambientali ed i metodi "naturali", ha favorito, in anni recenti, la riscoperta dell'ingegneria naturalistica o bioingegneria: essa è definita come una branca dell'ingegneria, finalizzata alla stabilizzazione di sponde fluviali ed al consolidamento di pendii, attraverso l'uso di materiali vegetali, sia vivi sia inermi, molto spesso presenti in loco all'area interessata.

Essa veniva già impiegata al tempo dei Romani, ma fu poi sostituita con tecniche che prevedevano l'uso di materiali "edili" come cemento armato ed acciaio.

L'aspetto più importante, in cui punta la bioingegneria, è la creazione, nell'area interessata dagli interventi, di un ambiente in grado di autoripararsi nel tempo: le interazioni tra specie erbacee, arbustive e arboree messe a dimora dall'uomo, creano difatti un ecosistema naturale in grado di reagire ai magnitudini provenienti da eventi esterni (es: una frana). Questo concetto prende spunto da esempi esistenti a livello naturale: basti pensare all'autorigenerazione del bosco a seguito di un taglio.

Il crescente interesse verso l'ingegneria naturalistica, è un chiaro segnale di come l'opinione pubblica comprenda sempre di più l'importanza che riveste la vegetazione nella protezione del territorio, soprattutto in ambito montano.

Vediamo ora in dettaglio quali effetti produce la vegetazione sulla stabilità dei pendii.

Da un punto di vista idrologico, le chiome di alberi ed arbusti e la lettiera ivi presente, creano un'azione d'intercettazione della precipitazione, che porta ad un rallentamento della velocità di caduta di questa e quindi un graduale assorbimento delle acque in eccesso da parte del terreno; inoltre l'azione evita il compattamento del suolo e l'erosione dovuta all'impatto.

A livello erbaceo, si ha invece un parziale arresto del flusso idrico superficiale, evitando fenomeni erosivi.

Un ulteriore effetto, ma non meno importante, è il processo di traspirazione delle piante, che porta ad una diminuzione del regime idrico del suolo, attraverso l'immissione di vapore acqueo nell'atmosfera.

L'eccessivo contenuto idrico nel suolo, porta a condizioni di saturazione. L'aumento delle pressioni neutre, innescate dalla presenza idrica, crea fenomeni di dissesto del pendio come frane e smottamenti.

Da un punto di vista prettamente fisico, invece, l'azione di puntello d'ogni singolo tronco, determina una maggiore stabilità del suolo, a monte di questo. La presenza di tronchi allineati, inoltre, determina un ulteriore incremento di stabilità grazie ad un effetto a "barriera".

A sfavore di quanto si è appena annunciato, il peso della massa arborea può essere visto come un effetto destabilizzante sul pendio. Vi sono, però, opinioni contrastanti su quest'effetto. Paiero et al. (1996) dichiarano che "...sia prove sperimentali, che l'applicazione di modelli matematici hanno messo in evidenza come in pendii non troppo ripidi caratterizzati da suoli scarsamente coesivi l'aumento di peso dovuto alla vegetazione legnosa ha un effetto positivo [sulla stabilità] che diviene nel peggiore dei casi trascurabile in condizioni di saturazione idrica del suolo".

Un altro effetto destabilizzante, riguarda la resistenza al vento: immaginando un albero, come una vela, il peso che esso carica sull'apparato radicale, e quindi sul suolo, cresce all'aumentare della forza del vento che esso contrasta. Questo carico crescente, può favorire i fenomeni di taglio del pendio.

La componente sotterranea determina innanzitutto due distinti effetti in base al tipo di apparato radicale: la radice fittonante, grazie alla profondità che riesce a raggiungere, trattiene lo strato instabile agli orizzonti più profondi e saldi; le radici laterali creano un reticolo fitto che lega le particelle di suolo tra loro.

Anche questa componente può creare degli effetti destabilizzanti sul pendio: la presenza di un fitto apparato radicale rende il terreno meno compatto e quindi più permeabile; in questo modo, si favoriscono i fenomeni d'infiltrazione di acqua nel suolo e di conseguenza l'aumento delle pressioni neutre. Inoltre, la tendenza delle radici ad occupare crepe e fessure nel terreno, può portare ad un'azione di cuneo di queste e quindi il distacco di masse di suolo.

Da un punto di vista più generale, possiamo comunque dire che l'effetto della vegetazione sulla stabilità è positivo. A conferma di ciò, diversi studi (O'Loughlin, 1974; Wu, McKinnell e Swanston, 1979; Rienstenberg, 1987) hanno dimostrato come una minor presenza di radici, a seguito, ad esempio, di un esbosco massiccio, porti comunque ad una maggiore probabilità di fenomeni di taglio nei pendii.

Come si può notare, la presenza delle radici e la distribuzione di queste all'interno del terreno, risulta di notevole importanza per la trattenuta del suolo e di conseguenza per la sua stabilità. Inoltre, senza un dovuto ancoraggio, anche gli effetti stabilizzanti a livello di soprassuolo possono divenire inefficaci.

## 2. GLI APPARATI RADICALI ED IL SUOLO

Le radici sono tra le componenti più importanti della pianta. Da esse, la pianta acquisisce nutrienti ed acqua, necessari al compimento del proprio sviluppo.

L'apparato radicale è formato essenzialmente da un'asse principale, da cui si dipartono le radici laterali.

Il segmento principale è costituito generalmente da tre parti:

1. Zona meristemica
2. Zona di struttura primaria
3. Zona di struttura secondaria

### 1. Zona meristemica

Rappresenta la parte apicale della radice e la zona di crescita di questa, grazie alla presenza di tessuti meristemici che producono cellule in entrambi le direzioni (verso il basso e verso l'alto) .

I tessuti sono protetti da una membrana, detta "cuffia", che li protegge dallo sfregamento contro le particelle di terreno, durante l'avanzamento della parte apicale. Le cellule della cuffia degenerano dopo pochi giorni, ma vengono prontamente sostituite; in questo modo, le dimensioni della cuffia rimangono all'incirca costanti.

Oltre ad essere un organo di protezione, la cuffia è anche un organo che percepisce lo stimolo della gravità: grazie a questo, la radice cresce sempre verso il basso.

### 2. Zona di struttura primaria

In questa zona avviene l'effettivo assorbimento di acqua e nutrienti.

Procedendo dall'esterno verso l'interno, è composto da:

- peli radicali, cellule epidermiche lunghe alcuni millimetri, che agevolano l'assorbimento di acqua e ioni grazie alla loro lunghezza e flessibilità;
- parenchima corticale, con funzione sia protettiva sia di assorbimento sia come organo di riserva, grazie alle abbondanti quantità di amido nelle sue cellule;
- endoderma, strato di cellule che delimitano il cilindro centrale e che hanno pareti cellulari impregnate di suberina, una sostanza impermeabile, la quale forma una fascia detta *banda del Caspary*;
- cilindro centrale, è composto da un parenchima, denominato *periciclo*, in cui sono presenti le *arche*, ovvero i tessuti conduttori della radice, sia libro che legno, disposti in modo alternato tra loro.



Dal periciclo può svilupparsi una radice laterale: inizialmente si ha una proliferazione delle cellule poste di fronte ad un'arca legnosa, che darà origine all'apice della nuova radice laterale. Con l'allungarsi di questa, si avrà una progressiva rottura del parenchima corticale, mentre l'endoderma seguirà, in un primo momento, l'accrescimento, fino alla lacerazione dello stesso.

### 3. Zona di struttura secondaria

Con il graduale passaggio da primaria a secondaria, la radice principale perde i propri peli radicali ed inizia la suberificazione dell'epidermide, impermealizzandolo; si ha così la lignificazione della radice che assume una funzione di conduzione. A livello di cilindro centrale, inizia anche a formarsi il cambio: prende origine in parte dal periciclo, nella zona vicino alle arche legnose, ed in parte dalle cellule parenchimatiche che separano le arche legnose da quelle liberiane, assumendo in questo modo un andamento a stella. Con il procedere dello sviluppo, il cambio inizia a produrre legno (detto *legno secondario*) soprattutto nelle zone concave, spostando in questo modo il libro verso l'esterno ed acquisendo una forma circolare. Da qui si ha poi il normale accrescimento diametrale: il cambio produrrà sia verso l'esterno, dando origine al libro secondario, che verso l'interno (legno secondario).

Lo schema appena visto non riguarda tutte le piante, ma solo le dicotiledoni.

Le monocotiledoni, posseggono sì una radice primaria, ma che viene velocemente sostituita da un elevato numero di radici avventizie che nascono dalla base del fusto. La struttura primaria, però, è simile a quella delle dicotiledoni.

Le funzioni assoggettate all'apparato radicale, sono molteplici:

1. ancoraggio di tutta la pianta ai profili del terreno;
2. organo di riserva soprattutto nelle specie biennali e perenni;
3. esplorazione del terreno alla ricerca di acqua e principi nutritivi in zone con elevata soluzione circolante;
4. assorbimento di acqua e principi nutritivi da parte dei peli radicali e filtraggio da parte delle cellule dell'endoderma;
5. trasporto di linfa grezza ed elaborata;
6. sintesi di composti organici, come ad esempio le sostanze ormonali;
7. respirazione;
8. secrezione di essudati vari;
9. formazione di associazioni simbiotiche con microrganismi appartenenti alla pedofauna (micorrizie, batteri azotofissatori, ecc...).

Il sistema radicale è quindi composto da radici lignificate, larghe, con un ciclo vitale lungo e che svolgono principalmente le funzioni di trasporto di nutrienti e di acqua nella parte restante della pianta, ma anche da molte radici fini, a consistenza erbacea, a vita breve e deputate all'assorbimento delle sostanze.

Entrambi i tipi, però, svolgono un'azione di ancoraggio al suolo. Questa capacità, molto importante nel contrasto dei fenomeni di taglio, dipende molto dalla profondità ed estensione dell'apparato radicale.

La disposizione delle radici, però, non è quasi mai un parametro fisso, come potrebbe essere la forma della chioma nel riconoscimento delle specie arboree.

Non escludendo il patrimonio genetico, la geometria delle radici dipende fortemente dalle caratteristiche pedologiche della stazione, dalla temperatura del terreno, dalla disponibilità di nutrienti ed umidità, dalle associazioni con altri vegetali, dal metodo di propagazione della pianta, dalla presenza di ostacoli meccanici ed infine dalla gestione antropica dell'area.

Possiamo comunque definire una classificazione in base alla modalità di accrescimento:

- a. radice fittonante (abete bianco, pino, olmo): è caratterizzata da un asse principale che si sviluppa in profondità e che domina sulle radici secondarie, che si dipartono da questo; grazie all'accrescimento verticale, riesce ad assorbire l'acqua nei profili più profondi;
- b. radice fascicolata (larice, betulla, carpino): rappresenta un'insieme di radici ad ugual dominanza, che tendono a svilupparsi in profondità;
- c. radice orizzontale (abete rosso, pioppo): è costituito da un'asse principale che viene successivamente sostituito dalle radici secondarie; l'apparato radicale assume un portamento plagiotropo;
- d. radice a candelabro (frassino, pioppo tremulo): è composto da radici orizzontali superficiali da cui si dipartono radici laterali che si sviluppano in profondità.

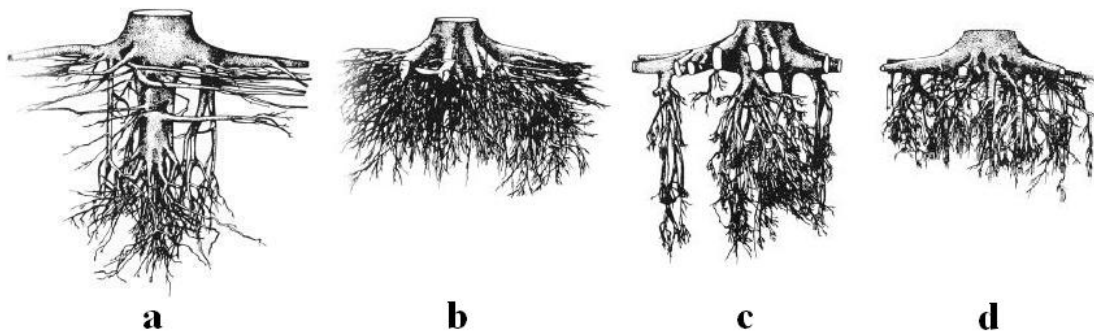


Figura 1: Tipologie di apparato radicale (Köestler et al. 1968)

Ai fini della stabilità di un pendio, il modello ideale di apparato radicale dovrebbe avere sia una radice di tipo fittonante sia radici laterali orizzontali: nel primo caso, grazie allo sviluppo in profondità, la radice principale riuscirebbe a saldare lo strato superficiale instabile con gli orizzonti più profondi e compatti; nel secondo caso, grazie al fitto reticolo di radici secondarie che si creerebbe, si avrebbe la trattenuta degli aggregati del suolo.

Come già accennato, la crescita degli apparati radicali è molto variabile, proprio per il fatto che essi vivono in un ambiente, il suolo, che presenta condizioni facilmente mutabili nel tempo e di conseguenza, la loro geometria e disposizione dipende fortemente dal sito in cui si trovano.

Le piante adattano la propria struttura alle condizioni della stazione: in ambienti caratterizzati da siccità estiva, la profondità delle radici può raggiungere anche i 20 metri; in suoli con falda acquifera emergente, le radici sono per lo più superficiali e dotate, a volte, di particolari strutture come le radici aeree; in stazioni invece caratterizzate da suoli profondi impermeabili o con scarsa disponibilità di ossigeno, l'apparato radicale tenderà ad occupare gli orizzonti più superficiali.

In figura 2, si possono vedere alcuni esempi: **a** e **b**, corrispondono ad una radice fittonante ed una fascicolata in terreni sabbiosi (problemi di trattenimento dell'acqua); in **c**, la capillarità dell'acqua, induce un allungamento delle radici; in **d** si hanno terreni con buona fertilità chimica e fisica; **e** corrisponde a terreni argillosi pesanti (limitata quantità di ossigeno); **f** si ha in terreni con una falda non troppo elevata, mentre in **g**, la falda è quasi emergente; **h** rappresenta un suolo, con un orizzonte superficiale molto ricco in materia organica; **i**, caratterizza suoli con bassa profondità; in **j**, vi sono due radici piane, parallele tra loro e collegate da giunture verticali, in suoli compatti; in **k**, la pianta vive in un sito soggetto ad alta marea (mangrovie).

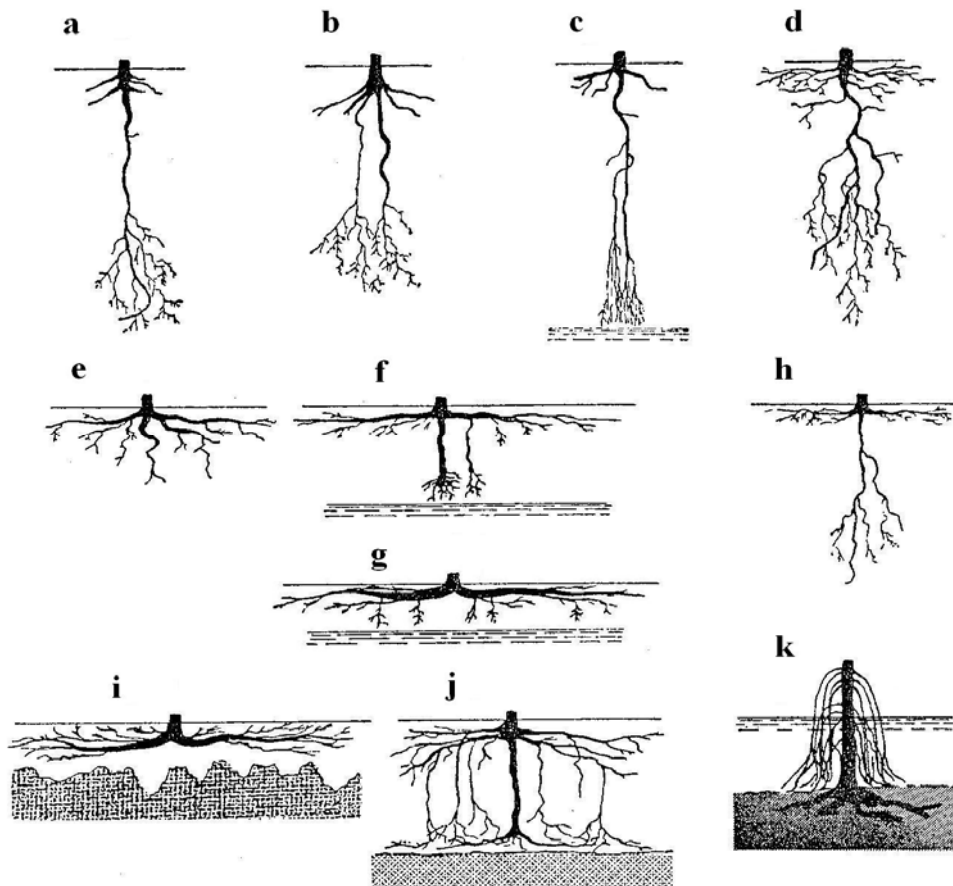


Figura 2: Disposizione degli apparati radicali in base alle condizioni della stazione (Wilde, 1958)

Questa variabilità di forme, fa intendere quanto la geometria di un apparato radicale dipenda dalle caratteristiche della stazione.

Nei fenomeni di taglio dei pendii, la morfologia di un suolo determina effetti diversi, da parte delle radici, sulla stabilità di questo.

Nell'esempio si ha un terreno superficiale sottile ed instabile ed un orizzonte sottostante compatto ed impenetrabile, sia da parte delle radici che dall'acqua (Fig. 3a).

A causa delle difficoltà di penetrazione nell'orizzonte più profondo, la distribuzione degli apparati radicali interesserà solo lo strato più superficiale e sciolto.

In questo modo, la funzione di ancoraggio delle radici viene vanificata e, sulla superficie esterna dello strato compatto, si verificherà il piano di taglio stimolato dalle pressioni neutre generate dall'acqua che scorre sulla superficie compatta.

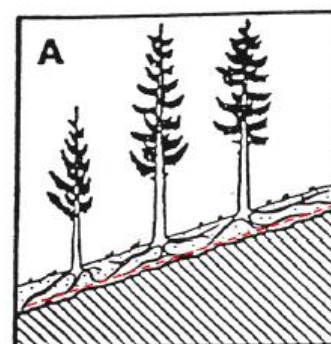


Figura 3a

Con l'invecchiare del bosco, la resistenza radicale non varia, mentre cresce il peso degli alberi che favorisce il taglio del pendio.

Tale situazione è facile trovarla in aree provenienti da rocce terziarie.

Nell'eventualità che lo stesso tipo di terreno, presenti delle discontinuità nell'orizzonte più profondo (Fig. 3b), queste possono aumentare l'azione di ancoraggio radicale: le radici penetrano nelle irregolarità, sviluppandosi verso il basso ed ancorando gli orizzonti instabili agli strati più compatti; si ha così un incremento della stabilità del pendio.

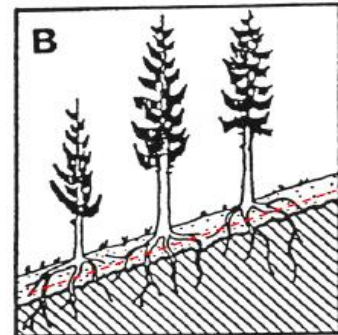


Figura 3b

Le pressioni neutre, in questo caso, non si generano a causa della maggiore permeabilità dello strato compatto.

L'invecchiamento del bosco, a 20 anni di età ad esempio, porta ad un approfondimento delle radici che impedisce possibili fenomeni di taglio; vi è da dire comunque che lo stesso bosco a 10 anni di età, non possiede un tale sviluppo radicale che permetta il contrasto delle forze di taglio.

Questo tipo di suolo è caratteristico di suoli provenienti da rocce mesozoiche e paleozoiche.

La figura 3c rappresenta, invece, un suolo composto da uno strato di transizione frangibile, posto tra un orizzonte superficiale sottile ed instabile, ed uno strato più compatto e profondo. Gli apparati radicali tenderanno ad espandersi nello strato di transizione, incrementando l'azione di ancoraggio con l'aumentare della profondità.

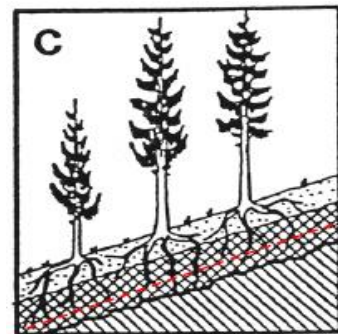


Figura 3c

La loro crescita, però, viene influenzata dalla maggiore densità e durezza dello strato transitorio.

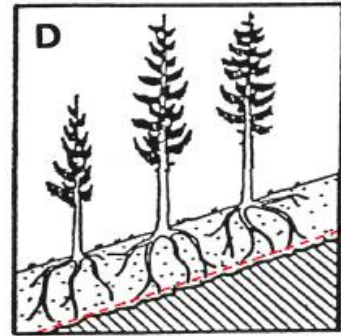
Inoltre la maggior densità contrasta il flusso di acqua permeante e facilita la creazione di pressioni neutre.

Se paragonato alle altre situazioni, nel caso c si ha la massima stabilità derivante dall'azione delle radici, in quanto la facilità di penetrazione nello strato di transizione, permette alle piante di svilupparsi notevolmente in profondità, ancorandosi comunque ad uno strato stabile come quello di transizione. Nella figura 3b, la quantità di discontinuità non è così elevata, come nel caso c, proprio per il fatto che l'orizzonte più profondo è comunque compatto.

All'aumentare dell'età del bosco, il rinforzo aumenta, come nel caso b.

Il caso *c* è tipico di aree di montagna con substrato roccioso granitico.

In presenza di un pendio con caratteristiche simili al caso *a*, ma con un orizzonte instabile più profondo, (Fig. 3d) la maggiore profondità non determina un aumento della stabilità, in quanto le radici non riescono a saldarsi ad orizzonti più compatti. Inoltre, la minor densità radicale dovuta alla maggior profondità, determina un rinforzo radicale minore che nel caso *a*.



**Figura 3d: La stabilità delle radici in 4 casi diversi (Tsukamoto e Kusakabe, 1984)**

Secondo alcuni autori (Abe e Ziemer, 1991) nei casi *b* e *c*, il fattore di sicurezza ( $F_s$ ) aumenta con l'aumentare dell'età del bosco, fino a raggiungere un valore costante di 2,0 dopo i 20-25 anni di età: l'invecchiamento del bosco porta ad una decrescita del numero di piante vive, ma anche ad un aumento della capacità di rinforzo di ogni singola radice. In questo modo, il rapporto numero piante / resistenza radicale rimane quasi invariato. Boschi vecchi di 10 anni, hanno invece un  $F_s$  inferiore a 1,0 e quindi un'alta probabilità di fenomeni di taglio.

Per quanto riguarda il caso *a*, il fattore di sicurezza non aumenta con l'età, a causa dell'impossibilità delle radici ad espandersi in profondità, mentre nell'ultimo caso (Fig. 3d), il pendio rimane stabile, indipendentemente dall'età del bosco.

### 3. FONDAMENTI DI GEOTECNICA E STABILITÀ DI UN PENDIO ILLIMITATO

Conoscere il possibile comportamento di un terreno al verificarsi di specifiche condizioni, è importante per determinare un giudizio sulla stabilità di questo.

L'analisi viene fatta seguendo i principi della *geotecnica*: rappresenta la scienza che studia il movimento fisico delle terre ed in particolar modo, quello innescato dalla forza gravitazionale. Attraverso la geotecnica, si può quindi conoscere i modi con cui il pendio si destabilizza ed elaborare metodi che contrastino fenomeni come quello del taglio dei pendii.

Da questa disciplina dipendono tutte le metodiche d'assestamento:

- analisi di deformabilità dei terreni;
- analisi di resistenza dei terreni;
- analisi di stabilità dei pendii;
- analisi di interazione tra terreno e strutture;
- calcoli della spinta delle terre;
- calcoli sulla capacità portante dei terreni;
- modellazione costitutiva dei terreni

Nel giudizio di un'analisi di stabilità, ovvero la sua definizione in un coefficiente di sicurezza, è importante l'uso di formule appropriate, come anche l'acquisizione corretta dei dati, valutati molto spesso in modo empirico, a causa della complessità ed eterogeneità che caratterizza il suolo.

Il fattore di sicurezza ( $F_s$ ) rappresenta un parametro che quantifica il livello di sicurezza o di stabilità, di un particolare suolo.

Durante la definizione di questo coefficiente, si deve tener conto di alcune condizioni:

- il materiale analizzato, il suolo, ha un comportamento plastico e quindi in presenza di sollecitazioni si hanno continue deformazioni fino a raggiungere un valore costante;
- il materiale è in condizioni di isotropia (proprietà meccaniche costanti in tutte le direzioni)
- l'area analizzata è un pendio indefinito, definito come un pendio a superficie infinita, pendenza costante e con caratteristiche pedologiche omogenee su tutta l'area;
- il terreno è caratterizzato dalla presenza di una falda acquifera.

Il coefficiente di sicurezza viene calcolato eseguendo un rapporto tra le forze stabilizzanti, rappresentate dalla resistenza del terreno, e le forze destabilizzanti, come gli sforzi di taglio:

$$F_s = \frac{R}{L} \quad (1.1)$$

In un pendio soggetto a fenomeni di taglio, l'aumento degli sforzi (L) crea delle deformazioni negli strati del terreno che portano allo scorrimento di tutto il pendio.

In opposizione a queste forze destabilizzanti, vi è la *resistenza al taglio* esplicata dal suolo grazie ad una serie di forze come la coesione e l'attrito tra le particelle di terreno. Questa resistenza assume andamenti diversi a seconda che si è in presenza di terreni compatti o meno.

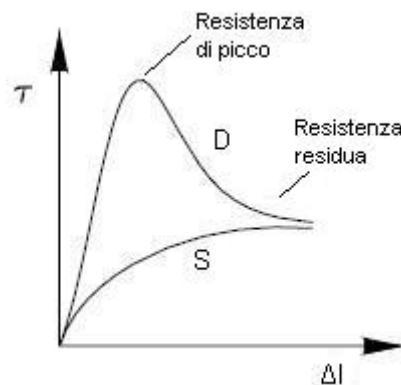
La figura 4 mostra le due tipologie di terreno (D per quello denso, S per quello sciolto), in relazione alla resistenza ( $\tau$ ) e alla variazione di spostamento del suolo ( $\Delta l$ ).

In corrispondenza di un terreno sciolto, la resistenza aumenterà all'aumentare degli sforzi ( $\Delta l$ ) fino a raggiungere un punto di saturazione, oltre il quale rimarrà invariata.

In un terreno denso, invece, la resistenza,

al continuo scorrere di questo, giungerà ad un punto massimo (resistenza di picco), ove il superamento porterà ad una decrescita di resistenza che rimarrà poi costante (resistenza residua).

Quest'ultimo caso, porta alla creazione di zone a diversa capacità portante, nello stesso terreno: zone a resistenza di picco (deformazioni modeste) e zone a resistenza residua (deformazioni notevoli).



**Figura 4: La resistenza del suolo al variare dello spostamento**

La resistenza al taglio, secondo l'equazione di Mohr-Coulomb (1776), è data da:

$$s_s = c + \sigma \tan\varphi \quad (1.2)$$

dove  $c$  rappresenta la coesione,  $\tan\varphi$ , il coefficiente di attrito e  $\varphi$ , l'angolo di attrito tra le particelle di terreno, mentre  $\sigma$  sono le tensioni normali.



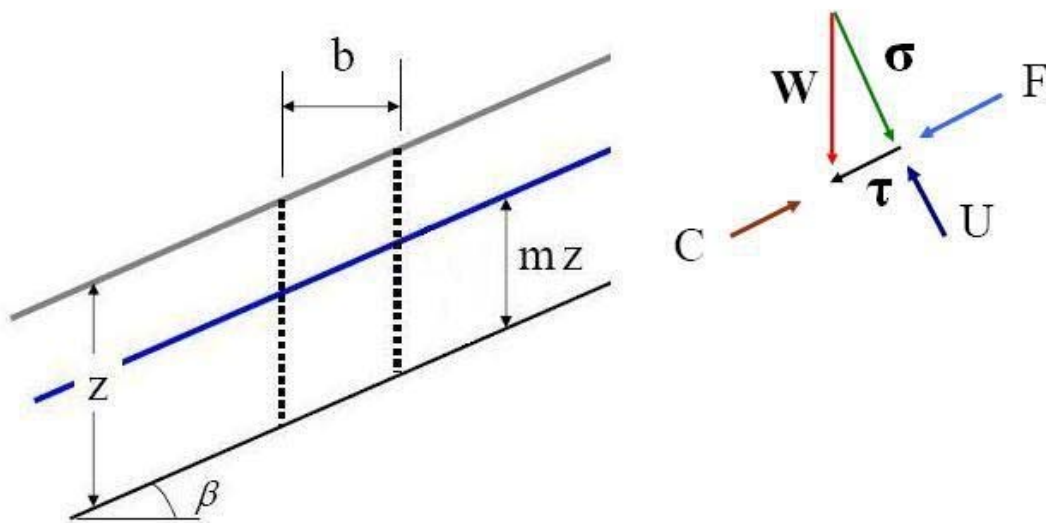
Avendo ipotizzato un terreno con falda acquifera, agli sforzi normali totali si contrappone la pressione neutrale  $u$ , derivante dalla presenza di acqua, per la formula di Terzaghi (1923):

$$s_s = c + (\sigma - u) \tan\varphi \quad (1.3)$$

$$s_s = c' + \sigma' \tan\varphi \quad (1.4)$$

dove  $c'$  e  $\varphi'$  vengono espressi in termini di pressioni effettive, mentre  $\sigma'$  rappresenta la pressione reale effettiva.

La figura 5, mostra un esempio di terreno con una superficie di rottura e una falda acquifera parallela all'andamento del pendio, dove  $\beta$  rappresenta l'angolo di inclinazione di questo,  $mz$  l'altezza di falda data da  $m$ , il coefficiente di falda (con valori da 0 a 1), e  $z$ , lo spessore di suolo coinvolto nel fenomeno di taglio e quindi in scorrimento, mentre  $b$  determina il volume di suolo per la formula  $V = b * z$ .



**Figura 5: Schema di un pendio indefinito con falda acquifera**

Le forze destabilizzanti, in questo caso sono rappresentate da  $F$ , ovvero la spinta operata dalla falda, e dalla componente tagliante del peso ( $W$ ):

$$W = \gamma b z \quad (1.5)$$

$$\tau = \gamma b z \sin\beta \quad (1.6)$$

$$F = \gamma_w m z b \sin\beta \quad (1.7)$$

ove  $\gamma$  è il peso specifico del suolo e  $\gamma_w$ , il peso specifico dell'acqua.

Si ha così che, ad un angolo  $\beta$  conosciuto, le forze stabilizzanti sono date da:

$$C = c' \frac{b}{\cos \beta} \quad (1.8)$$

$$\sigma = \gamma b z \cos \beta \quad (1.9)$$

con

$$U = \gamma_w m z \cos^2 \beta \frac{b}{\cos \beta} \quad (2.0)$$

Impiegando la formula 1.1, il fattore di sicurezza sarà:

$$F_s = \frac{C + (\sigma - U) \tan \varphi}{\tau + F} \quad (2.1)$$

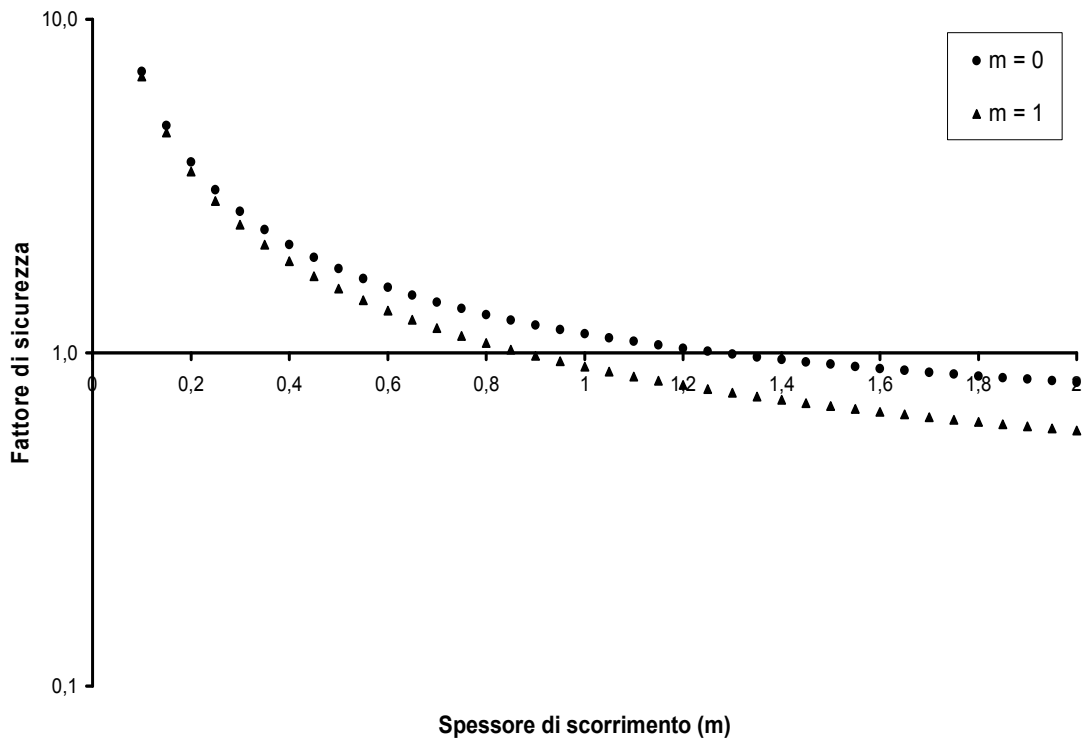
e quindi:

$$F_s = \frac{c' \frac{b}{\cos \beta} + \left[ (\gamma b z \cos \beta) - \left( \gamma_w m z \cos^2 \beta \frac{b}{\cos \beta} \right) \right] \tan \varphi}{(\gamma b z \sin \beta) + (\gamma_w b m z \sin \beta)} \quad (2.2)$$

Approssimando la formula 2.2, si ha:

$$F_s = \frac{c' + (\gamma - m \gamma_w) z \cos^2 \beta \tan \varphi}{\gamma z \sin \beta \cos \beta} \quad (2.3)$$

Qui di seguito, si cita un esempio (Fig. 6), dove si mostra l'andamento del fattore di sicurezza al variare dello spessore di scivolamento, attraverso l'uso della formula 2.3.



**Figura 6: Andamento del fattore di sicurezza al variare dello spessore di scorrimento**

Dal grafico si può notare come il fattore di stabilità decresca all'aumentare dello spessore di suolo interessato dal fenomeno di taglio, assumendo valori anche inferiori ad 1.

La falda acquifera, pone un ruolo determinante in questo.

Il grafico, infatti, mostra due pendii con diverso coefficiente di falda ( $m$ ): uno pari a 0 e l'altro pari ad 1. La diversa altezza di falda ( $m$ ) porta ad una differenziazione del valore del fattore di sicurezza, con una decrescita notevole di questo nel pendio dove la falda è alla stessa quota del versante ( $m = 1$ ).

Come già accennato, durante l'analisi geotecnica di un suolo, la raccolta di dati anticipa l'elaborazione dei calcoli appena visti.

A causa della complessità e della variabilità di condizioni che caratterizza il suolo, la maggior parte dei dati proviene da indagini in campo e di laboratorio.

Tra queste vi sono certamente le prove di taglio: sono indagini eseguite con particolari apparecchi, in cui viene valutata la resistenza, da parte dei suoli, agli sforzi di tagli in condizioni drenate o meno.

I tipi di prove attualmente impiegate sono: prova di taglio diretto e prova triassale.

### **Prova di taglio diretto**

Si ha la rottura del suolo secondo un piano prestabilito. Tra le strumentazioni maggiormente impiegate, vi è l'apparecchio di Casagrande: è costituito da due telai sovrapposti di cui uno scorrevole. Il provino può essere a forma parallelepipedica, con dimensioni di 60 x 60 x 25 mm, o cilindrica, con diametro di 60 mm ed altezza di 20.

Il campione viene messo tra i due telai e sottoposto a due sforzi: uno di compressione (N), creato da una serie di pesi morti posti sopra i telai, e uno orizzontale (T) che determina il taglio del suolo. Conoscendo quindi N, T e A, area della sezione, si determina gli sforzi normali  $\sigma$  ( $N / A$ ) e lo sforzo di taglio  $\tau$  ( $T / A$ ), all'aumentare dello spostamento.

La prova di taglio diretto, anche se semplice, ha lo svantaggio di avere una distribuzione disuniforme delle tensioni e di non poter controllare il drenaggio e la diminuzione della superficie di taglio durante la prova.

### **Prova di compressione triassale**

Anche in questo apparecchio si valuta la resistenza del suolo. A differenza della precedente prova, questa strumentazione permette sia la misura della pressione neutra dell'acqua all'interno del campione, sia la variazione di volume di questo.

Il provino è di forma cilindrica e con una altezza pari al doppio del diametro: in genere si ha un diametro di 38 mm e un'altezza dai 75 agli 85 mm.

Il campione è delimitato da sottile membrane di gomma, ai lati, e da piastre porose all'apice ed alla base; l'intero involucro, a sua volta, è circondato da acqua. Alle estremità del provino, inoltre, vi sono condutture che permettono il drenaggio dell'acqua e dell'aria e la misura della pressione neutra, oltre a permettere la saturazione completa del campione.

Fino ad ora si è parlato di resistenza e sforzi di taglio su un suolo privo di vegetazione. Vediamo ora il contributo radicale delle piante.

## 4. LA RESISTENZA DEGLI APPARATI RADICALI

### 4.1. Resistenza alla rottura.

Essa non rappresenta un valore derivante da un singolo fattore, ma la somma della resistenza di ogni singola radice che compone l'apparato radicale della pianta.

In un sistema radicale, come quello mostrato nella figura 8, le branche vengono denominate  $R_i$  ed i punti di innesto tra queste,  $J_i$ .

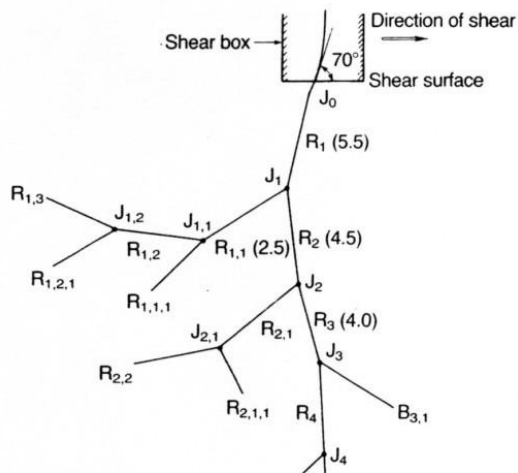


Figura 7: Schema di un sistema radicale (Wu et al., 1988a)

Applicando una forza  $T$  di sfilamento al punto  $J_0$ , questa inizialmente si propagerà nei punti di innesto, partendo da  $J_1$ , e poi nelle branche (prima in  $R_1$ , poi  $R_{1,1}$ ,  $R_2$ , ecc...).

La tensione  $T$ , agente sull'apparato radicale, determinerà dapprima lo sfilamento, o la rottura, delle branche più piccole e successivamente a radici con diametri sempre più grossi all'aumentare della forza di taglio.

I continui "collassi" radicali porteranno allo sfilamento di tutte le radici e quindi al cedimento di tutto l'apparato radicale.

Vediamo ora cosa accade a livello di singola radice.

In un pendio in cui la superficie di taglio è parallela al piano superficiale del suolo, l'asse principale della radice, perpendicolare al piano di taglio, subisce una deformazione causata dal continuo scorrere del piano di taglio (Fig. 9).

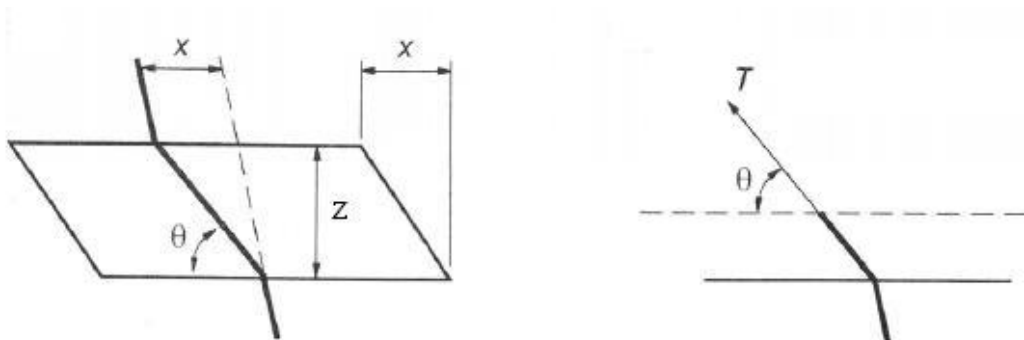


Figura 8 : Deformazione a livello di singola radice (Wu, 1995)

L'entità di questa deformazione ( $\theta$ ), espressa in gradi, dipende dalla rigidità dell'asse radicale che a sua volta dipende dalla lunghezza dell'asta e dalla posizione iniziale di questa, prima dello spostamento. La valutazione della forza di tensione ( $T$ ) viene quindi valutata ipotizzando che la radice si deformi attraverso un certo angolo, rappresentato appunto da  $\theta$ . La radice, viene quindi considerata come una barra perfettamente flessibile. All'aumentare dello scorrimento ( $x$ ), si avrà un aumento della forza di tensione ( $T$ ) che porterà allo sfilamento dell'asse radicale.

Lo studio del contributo radicale viene eseguito attraverso le precedenti variabili e con *modelli di interazione* tra suolo e apparato radicale. Tra questi, quello maggiormente utilizzato, è il modello di Wu (1976) e Waldron (1977). In questo modello, la resistenza radicale ( $s_r$ ) viene vista come una coesione aggiuntiva a quella già esplicitata dal suolo e data da:

$$s_r = (K * T_f) * k' \quad (2.4)$$

dove  $K$  è un coefficiente che tiene conto dell'orientamento casuale delle radici rispetto al piano di taglio (il suo valore varia da 0,80 a 1,30); mentre  $k'$  è un coefficiente che prevede che "...non tutte le terminazioni radicali mobilitano contemporaneamente la loro massima resistenza..." (Bischetti et al. 2004). Vari autori (Hammond et al. 1992) consigliano un valore di  $k'$  pari a 0,56, per la vegetazione forestale.  $T_f$  rappresenta invece la resistenza allo sfilamento della radice.

La resistenza che si contrappone allo scorrimento, e quindi alla tensione di sfilamento ( $T_f$ ) deriva dal calcolo congiunto tra la densità di area radicale ( $a_r = A_r / A$ ) e la resistenza alla trazione mobilizzata per unità di area radicale ( $\sigma_t$ ) per la formula (Broms, 1964):

$$T_f = \sigma_t * a_r \quad (2.5)$$

La resistenza allo sfilamento per unità di area è un dato dipendente sia dalla specie che dal diametro della singola radice (Gray e Sotir, 1996; Wu, 1995):

$$\sigma_t = \alpha * d^{-\beta} \quad (2.6)$$

$\alpha$  e  $\beta$  sono costanti specie-dipendenti, mentre  $d$  rappresenta il diametro della radice considerata.

In radici con diametri inferiori a 1 cm, a causa della loro sottigliezza, lo sforzo di sfilamento è tale da determinarne la rottura.

Quindi per le terminazioni radicali si può ammettere che  $\sigma_t = \sigma_r$ , con  $\sigma_r$  sforzo di rottura.

La formula 2.5 sarà:

$$T_r = \sigma_r * a_r \quad (2.7)$$

Essendo l'apparato radicale costituito da più radici, la formula 2.4 rappresenterà una somma di tutte le resistenze radicali:

$$s_r = \left( K \sum_{i=1}^N T_{f_i} \right) * k' \quad (2.8)$$

ovvero

$$s_r = \left( 1,20 \sum_{i=1}^N \sigma_{r_i} \frac{A_{r_i}}{A} \right) * 0,56 \quad (2.9)$$

dove  $N$  definisce il numero di classi di diametro presenti, e  $T_{f_i}$  la resistenza di ogni singola radice.

La resistenza degli apparati radicali ai fenomeni di taglio, come abbiamo potuto vedere nelle formule precedenti, dipende esclusivamente dal: diametro delle radici, tipologia di apparato radicale e densità radicale.

La relazione tra **diametro** e resistenza radicale è stata dimostrata sperimentalmente da vari autori (Abe e Iwamoto, 1986; Bischetti et al., 2005; Burroughs e Thomas, 1977; Gray e Sotir, 1996; Nilaweera e Nutalaya, 1999) ed è applicabile a tutte le specie.

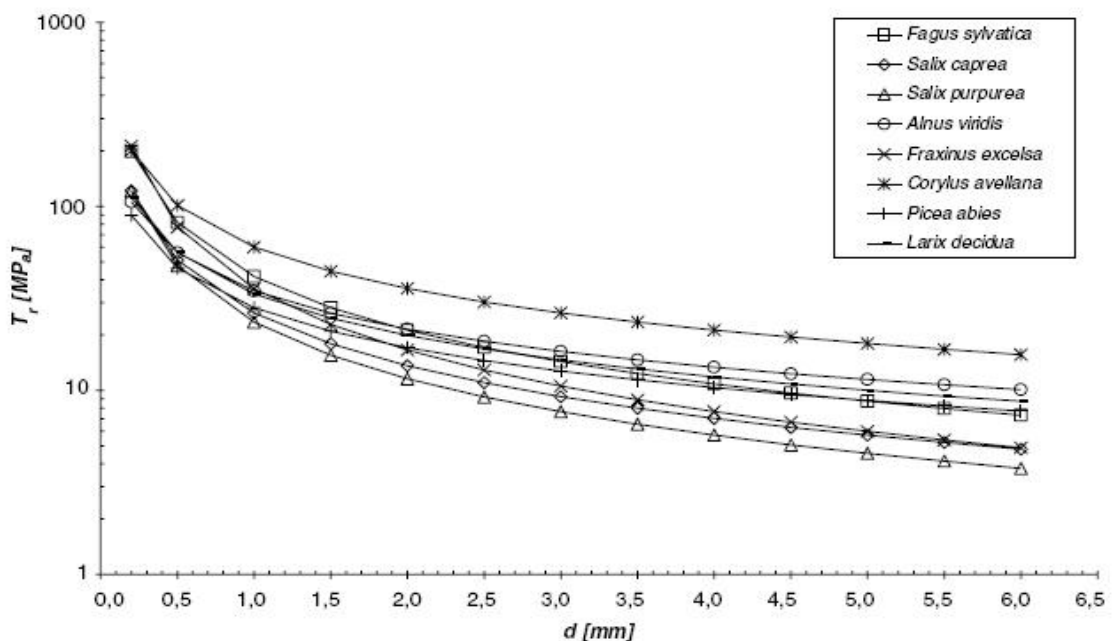


Figura 9: Relazione tra diametro e resistenza radicale di varie specie, su scala semi-logaritmica (Bischetti et al., 2005)

Tra diametro e resistenza esiste difatti una relazione inversamente proporzionale: all'aumentare dei diametri, la resistenza radicale diminuisce (Fig. 10).

Osservando i dati derivanti da uno studio effettuato da Bischetti et al. (2005), nella tabella 1, possiamo notare come il tasso di decrescita, espresso da  $\beta$ , della resistenza al variare del diametro assuma due valori che possono essere distinti in due gruppi di specie: 0,70 per le conifere, il nocciolo e l'ontano verde; 1,00 per le altre latifoglie.

<b>Specie</b>	<b>Resistenza media (Mpa)</b>	<b>Diametro medio (mm)</b>	<b><math>\alpha</math></b>	<b><math>\beta</math></b>
<b>Corylus avellana</b>	67,87	1,65	60,15	0,75
<b>Larix decidua</b>	66,14	1,68	33,45	0,75
<b>Fagus sylvatica</b>	57,47	1,33	41,65	0,97
<b>Salix purpurea</b>	51,47	1,28	26,33	0,95
<b>Salix caprea</b>	47,80	1,42	34,5	1,02
<b>Picea abies</b>	38,94	1,78	28,10	0,72
<b>Fraxinus excelsa</b>	36,86	1,95	35,73	1,11
<b>Alnus viridis</b>	20,42	2,03	34,76	0,69

**Tabella 1: Valori di resistenza al taglio, diametro delle radici,  $\beta$  e  $\alpha$  in base al tipo di specie (Bischetti et al., 2005)**

Non si ha, però, lo stesso comportamento con il fattore di scala  $\alpha$  dove vi sono valori molto variabili tra di loro.

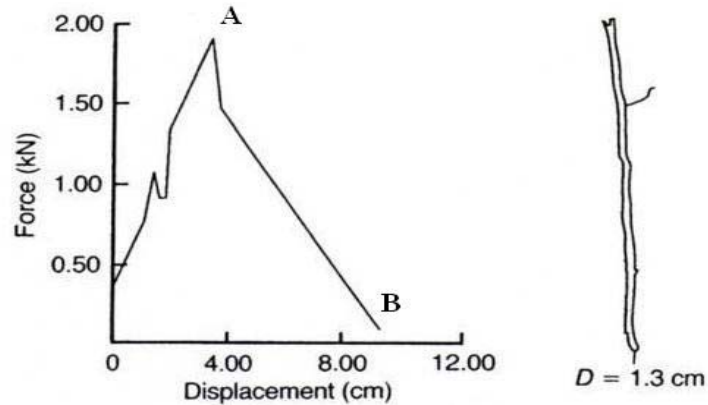
Sempre da tabella, si può affermare che il nocciolo (*Corylus avellana*) rappresenta la specie più resistente, tra quelle esaminate, avendo il più alto fattore di scala  $\alpha$  ed un basso tasso  $\beta$ , mentre il salice rosso (*Salix purpurea*) quella più debole, con una velocità di decrescita della resistenza rapida ed un basso fattore di scala.

Una diversa **tipologia di distribuzione delle radici**, porta a effetti diversi di resistenza.

Nel caso di un apparato radicale, composto solamente dalla radice madre e da una o due branche, il continuo crescere dello sforzo di taglio ed il conseguente spostamento

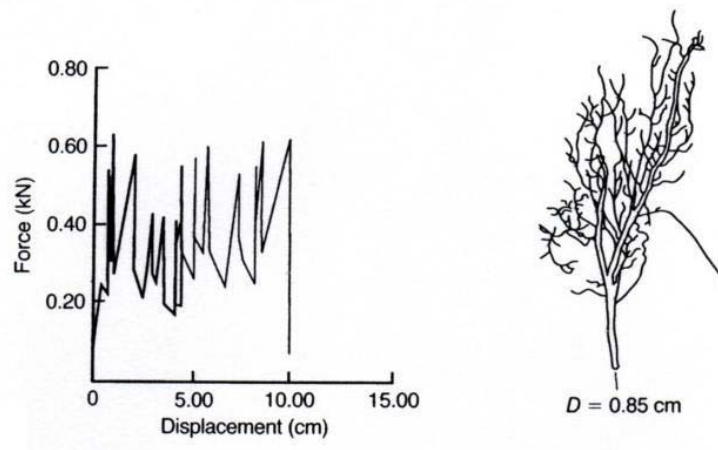


del pendio, porta ad un aumento progressivo della resistenza fino a raggiungere un valore di picco, oltre il quale si ha una decrescita di quest'ultima ed il collasso del sistema radicale (Fig. 10).



**Figura 10: Variazione della resistenza all'aumentare dello scorrimento in un frassino, dove A rappresenta la resistenza di picco e B la resistenza finale (Riestenberg, 1987)**

In presenza, invece, di un apparato radicale molto ramificato, l'intero sistema è caratterizzato da un comportamento più discontinuo: i picchi mostrati in figura 11, rappresentano verosimilmente la resistenza massima di ogni singola radice, prima della rottura di queste, dove però l'individuazione di una resistenza di picco di riferimento risulta molto più complessa. All'aumentare dello spostamento del pendio, altre radici si romperanno fino ad arrivare, con il persistere delle condizioni tensionali, al picco di resistenza finale, che determina il collasso dell'apparato radicale.



**Figura 11: Variazione della resistenza all'aumentare dello scorrimento in un acero (Riestenberg, 1987)**

La diversa distribuzione radicale, ma anche la quantità di radici, determina quindi diversi effetti sulla resistenza ai fenomeni di taglio.

La raccolta dei dati, soprattutto quelli relativi alla resistenza delle radici, avviene impiegando campioni, rappresentati da segmenti di radice.

Il processo di campionamento inizia con l'abbattimento, della pianta interessata dallo studio, a cui fa seguito lo scavo, molto accurato, dell'apparato radicale.

Viene eseguito, poi, il taglio di tutte le radici lungo piani paralleli alla superficie del pendio ed interdistanti tra loro di 10 cm.

In questi piani avviene la misura del diametro e la lunghezza di tutte le radici superiori a 0,5 cm. Alla fine del processo, si calcola il numero, il volume e la lunghezza totale dell'apparato radicale esaminato.

I singoli campioni vengono sottoposti ad esami che ne verificano la resistenza.

Vi sono 4 tipologie di test: di sradicamento, di taglio in campo, di taglio in laboratorio, di tensione.

Nel test dello sradicamento, attraverso l'uso di tirfor e di cavi, viene determinata la massima resistenza dell'apparato radicale ad opporsi ad una forza di sradicamento. In questo test, vari autori (Abe e Iwamoto, 1986; Tsukamoto, 1987) hanno visto come la resistenza allo sradicamento dipenda più dal diametro e dalle forze di attrito tra suolo e radici che non dalle condizioni del pendio o dal tipo di apparato radicale, sia esso fascicolato che fittonante.

Il test di taglio in campo viene eseguito con apparecchi di taglio diretto (vedere capitoli precedenti), in loco all'area di analisi e con campioni di suolo contenente radici "fresche" (Endo e Tsursuta, 1969; Ziemer, 1981; O'Loughlin et al., 1982; Abe e Iwamoto, 1987). In presenza di siti molto ripidi, il test non viene sempre eseguito.

Il test di taglio in laboratorio avviene in modalità simili al precedente, ma con una precisione maggiore e la possibilità di applicare vincoli al campione, come il controllo delle condizioni di saturazione (Waldron, 1977; Wu, 1976; Waldron e Dakessian, 1981; Gray e Ohashi, 1983; Shewbridge, 1985). Durante la prova di taglio, generalmente, la radice viene esaminata in un substrato sabbioso.

Nel test di tensione, il campione di radice viene sottoposto ad una forza crescente fino al raggiungimento del massimo valore di tensione, a cui farà seguito il cedimento del campione (O'Loughlin, 1974; Burroughs e Thomas, 1977; Ziemer e Swanston, 1977; Nakane et al., 1983; Abe et al., 1986).

Nelle ultime due analisi, molto spesso il tempo che intercorre tra la raccolta dei campioni e l'esecuzione del test è piuttosto lungo e vi è quindi la necessità di conservare i segmenti di radice.

Vi possono essere tre differenti tecniche:

- 1) il campione viene essiccato ad una temperatura di 60° per 24 ore e reidratato con acqua per alcune ore (Shuurman e Goedewaagen, 1971);

- 2) il campione viene congelato in un sacchetto di plastica, riempito d'acqua (Shuurman e Goedewaagen, 1971);
- 3) il campione viene immerso in una soluzione alcolica al 15% (Meyer e Göttsche, 1971).

Alcuni autori (Bischetti et al., 2004) hanno notato come l'uso di uno dei tre metodi di conservazione piuttosto dell'altro, non porti a significative differenze nei risultati delle analisi.

Con il seguente esempio, vediamo ora l'applicazione delle formule enunciate nei capitoli precedenti.

Ipotizzando un pendio illimitato con:

- peso unitario dell'acqua  $10 \text{ kN m}^{-3}$
- coefficiente di falda  $0,6$
- peso unitario del suolo  $21,23 \text{ kN m}^{-3}$
- angolo d'attrito  $27^\circ$
- pendenza  $46^\circ$
- coesione del suolo  $6,87 \text{ kN m}^{-2}$
- Picea abies,  $\alpha$   $28,10$   
 $\beta$   $0,72$   
diametro medio  $1,78 \text{ mm};$
- Larix decidua,  $\alpha$   $33,45$   
 $\beta$   $0,75$   
diametro medio  $1,68 \text{ mm}$
- Fagus sylvatica,  $\alpha$   $41,65$   
 $\beta:$   $0,97$   
diametro medio  $1,33 \text{ mm}.$

I valori di densità radicale ( $a_r$ ) considerati, si sono tratti dalle misure di Bischetti et al. (2005). La lettura effettiva dei valori sperimentali, alle varie profondità, è riportata nella seguente tabella (Tab. 2):

	Profondità (z)				
	0,2 m	0,4 m	0,6 m	0,8 m	1,0 m
<b>Picea abies</b>	0,00490	0,00270	0,00115	0,00010	0,00000
<b>Larix decidua</b>	0,00290	0,00220	0,00070	0,00030	0,00010
<b>Fagus sylvatica</b>	0,00465	0,00525	0,00040	0,00030	0,00000

**Tabella 2: Valori di densità radicale al variare della profondità per peccio, larice e faggio.**

Innanzitutto, si valuta la forza di tensione per unità di area, delle singole specie, attraverso la formula 2.6:

$$\sigma_t = \alpha * d^{-\beta}$$

Attraverso la densità radicale, il contributo sarà dato quindi dalla formula 2.9:

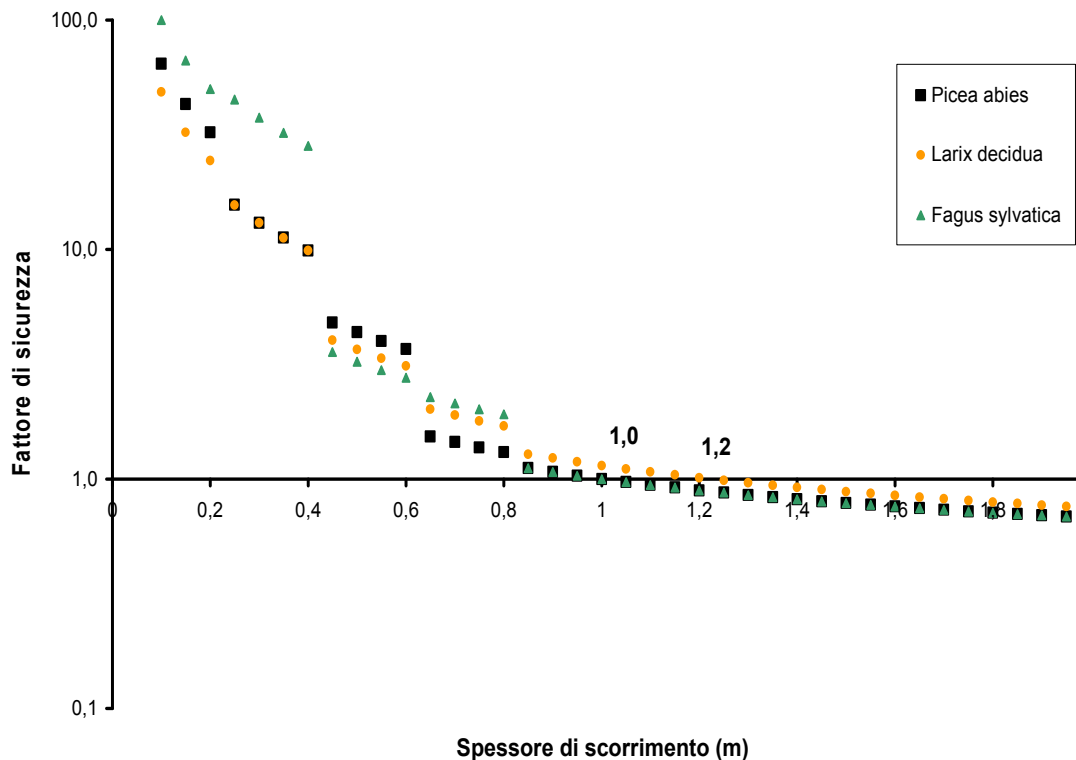
$$s_r = \left( 1,20 \sum_{i=1}^N \sigma_{r_i} \frac{A_{r_i}}{A} \right) * 0,56$$

La resistenza radicale, come già detto nei capitoli precedenti, è rappresentata come una coesione aggiuntiva alle forze stabilizzanti della formula 2.3:

$$F_s = \frac{c' + \left( \gamma - m \gamma_w \right) z \cos^2 \beta \tan \varphi + s_r}{\gamma z \sin \beta \cos \beta}$$

Si determina, quindi, il fattore di sicurezza per ogni spessore di scorrimento (z) fino al raggiungimento della profondità massima, data, nel nostro esempio, da 2 m.

La figura 13 mostra il risultato dell'esempio.



**Figura 12: Andamento del fattore di sicurezza con abete rosso, larice, faggio.**

Il grafico mostra innanzitutto una decrescita generale del fattore di sicurezza all'aumentare dello spessore, coinvolto nello scorrimento. Questo andamento decrescente è dato dall'aumento delle forze destabilizzanti, all'aumentare dello spessore, che porta ad un contrasto sempre più spinto, con le forze stabilizzanti.

Tutte e tre le specie, raggiungono il valore unitario del fattore di stabilità intorno ad 1 m. La spiegazione risiede nel fatto che gli apparati radicali non si sviluppano oltre il metro di profondità, a causa soprattutto della scarsità di ossigeno negli strati più profondi. Di conseguenza, il contributo alla stabilità, da parte delle radici, viene a mancare e si ha solo la resistenza operata dal terreno.

Se analizziamo le singole specie, possiamo notare come queste si differenzino in base allo spessore di scorrimento raggiunto: a 0,2 metri, il faggio rappresenta la specie con il più alto fattore di sicurezza (50,12), a cui fa seguito l'abete rosso (32,39) e infine il larice (24,41). A 0,5 metri, la situazione si inverte: il peccio assume il valore più alto, divenendo la specie più "stabile" (4,35), mentre il faggio quello più basso (3,25), con il larice a 3,66. Anche il valore unitario del fattore di sicurezza, viene raggiunto a diverse profondità, ovvero ad 1,0 m per il faggio ed il peccio ed a 1,2 m per il larice.

La varietà di valori, ivi descritti, può essere spiegata tenendo conto della diversa disposizione delle radici al variare della specie: il faggio ha infatti una distribuzione molto superficiale, che lo porta ad avere un basso fattore di sicurezza già a 0,50 m di

profondità; al contrario, il larice tende ad accrescersi in profondità, limitando però lo sviluppo agli strati più superficiali; una via intermedia è data dall'apparato radicale orizzontale dell'abete rosso, che si assesta su orizzonti non particolarmente profondi. Questi diversi andamenti, durante il calcolo del contributo radicale, confluiscono in un unico importante parametro: la densità radicale.

## 4.2. La densità radicale

La densità radicale è un parametro importante per la determinazione della resistenza radicale al taglio, quanto difficile da calcolare.

Essa rappresenta la quantità, in termini di superficie, di radici presenti in un'unità di area:

$$a_r = \frac{A_r}{A} \quad (3.0)$$

dove  $A_r$  rappresenta l'area occupata dall'apparato radicale.

La sua designazione in un valore standard è di difficile attuazione, a causa del fatto che la crescita e la distribuzione radicale dipendono fortemente dalle caratteristiche della stazione, come già visto nei capitoli precedenti. Ogni stazione, perciò, ha un proprio valore di densità.

Un ulteriore aspetto che crea difficoltà è la raccolta dei dati relativi all'area radicale di una precisa specie.

La misura di  $A_r$  avviene tramite l'impiego di tecniche di analisi d'immagine e con l'ausilio di griglie poste in profondità nel suolo; all'interno di queste, le radici vengono tagliate e pulite per renderle maggiormente visibili alle macchine fotografiche. Difatti il profilo del suolo e la griglia vengono fotografati, andando a creare una mappatura mediante le foto assemblate. Questa mappa viene elaborata da programmi di tipo GIS (Geographical Information System) che eliminano la distorsione geometrica, dovuta a fotografie non perfettamente perpendicolari, e digitalizzano le immagini del profilo, determinando il diametro delle radici e la posizione di queste all'interno della griglia.

In questo modo si va a determinare la distribuzione spaziale delle radici e quindi l'area radicale nel profilo pedologico esaminato.

Il numero di radici e la distribuzione di queste all'interno dello spazio pedologico sono fattori che condizionano la densità radicale negli orizzonti.

A livello generale, si può affermare che la densità radicale decresce all'aumentare della profondità: esso, in genere, è dovuto alla scarsa disponibilità di nutrienti ed ossigeno

negli orizzonti più profondi, oltre ad una maggiore presenza di profili pedologici compatti.

Questo rapporto inversamente proporzionale è stato dimostrato da vari studi (Büsgen, 1901; Keyes e Grier, 1981; Van den Burg et al., 1989; Davis et al., 1990; Olsthoorn, 1991; Parker e van Lear, 1996; Bischetti et al., 2002; Bischetti et al., 2004) eseguiti in boschi sia puri che misti.

Pur rimanendo fedele a questa relazione, la densità radicale assume comportamenti molto diversi a seconda che ci si trovi in un bosco a composizione pura o mista (McKay e Malcolm, 1988; Rysavy e Roloff, 1994; Brandtberg et al., 2000).

Per meglio capire questo fenomeno, si cita uno studio effettuato da Iris Schmid e Marian Kazda dell'Università di Ulm (Germania) nel 2002.

Lo studio era volto a determinare la differente distribuzione radicale di un bosco puro ad abete rosso (*Picea abies*) ed uno misto ad abete rosso e faggio (*Fagus sylvatica*), entrambi dislocati su due diversi tipi di suolo: *stagnic cambisol*, ricco di nutrienti e con problemi di asfissia, e *podsol cambisol*, povero di nutrienti, ma ben areato.

Lo studio riguardava l'analisi di radici di diametro maggiore di 2 mm (radici grossolane), ma anche inferiore a 2 mm (radici esili).

### **Lo stagnic cambisol**

Le analisi relative a questa tipologia hanno messo in evidenza il diverso comportamento tra pecceta pura e mista a faggio.

Nella formazione pura, la massima densità radicale delle radici grossolane si è principalmente distribuita negli orizzonti più superficiali, tra i 0 e 10 cm di profondità, decrescendo con l'aumentare di questa fino ad 1 metro di profondità. Un discorso simile lo si ha anche per quanto riguarda la densità radicale delle radici esili, diffusasi soprattutto nei primi 25 cm del suolo, ma scomparsa oltre i 40 cm di profondità.

Nella formazione mista, l'abete rosso è stato fortemente condizionato dalla presenza del faggio. La densità radicale nella parte superficiale è diminuita, rappresentando comunque il valore massimo sia per le radici grossolane che quelli esili come anche la profondità che viene ridotta sia per le prime (a 60 cm), che per le seconde (la loro profondità massima viene raggiunta a 25 cm anziché a 40 cm). Questo diverso comportamento radicale del peccio deriva dalla presenza del faggio sullo stesso terreno: la maggiore competitività che caratterizza il faggio, permette, a quest'ultimo, di prevalere sull'abete rosso, espandendosi negli orizzonti più superficiali e ricchi di ossigeno e relegando il peccio ad orizzonti meno interessanti e soprattutto poveri di ossigeno, che ne limitano lo sviluppo.

Per quanto riguarda il faggio, si ha avuto una diffusione delle radici grossolane tra i 10 ed i 50 cm di profondità, con un  $a_r$  massimo nello strato dei 40 – 50 cm; le radici esili hanno invece avuto una densità massima a 25 cm di profondità.

Confrontando le densità radicali tra bosco puro e misto è stato notato come le radici grossolane abbiano avuto un  $a_r$  molto simile, ma con un rapporto abete rosso:faggio pari a 30:70.

Un diverso discorso ha riguardato le radici esili: la densità radicale del bosco puro era metà di quello misto, con un contributo del 90% da parte del faggio.

### **Il podsol cambisol**

In questo suolo povero di elementi nutritivi, ma ricco in ossigeno, si ha avuto una crescita in profondità maggiore che nello *stagnic cambisol*.

In composizione pura, le radici grossolane dell'abete hanno avuto un andamento simile a quella dello *stagnic cambisol*, anche se con valori di  $a_r$  molto più alti, mentre le radici esili hanno avuto un'alta concentrazione nei primi 10 cm di suolo (biomassa radicale pari a  $3651 \text{ g m}^{-2}$ ), riducendosi pesantemente fino a  $50 \text{ g m}^{-2}$  ad 85 cm di profondità.

Nel *podsol cambisol* con campione misto, l'abete rosso ha diminuito la sua densità, concentrandosi negli strati più superficiali, ma scomparendo a 30 cm di profondità, dove invece hanno preso il sopravvento le radici di faggio. Anche le radici esili dell'abete hanno avuto un'elevata densità radicale negli orizzonti più superficiali, decrescendo dopo 25 cm di profondità.

A livello di contributi radicali alla densità, l'abete rosso è divenuto la specie maggiore con il 65% di radici esili.

Non vi sono significative differenze tra bosco puro o misto su suolo a *podsol cambisol*, ma piuttosto tra le densità radicali raggiunte in quest'ultimo suolo e lo *stagnic cambisol*, ove la maggior presenza di ossigeno ha portato a risultati molto significativi.

A conclusione di questo studio, gli autori hanno notato come le radici grossolane ( $d > 2 \text{ mm}$ ) della formazione mista (Fig. 13), siano sempre minori rispetto al campione puro, mentre nelle radici esili (Fig. 14), il risultato è apparso contrario ed a volte, come nel suolo a *stagnic cambisol*, anche doppio.

Il faggio, in buona parte degli studi, ha assunto un ruolo dominante nello sviluppo radicale, influenzando sempre negativamente quello dell'abete rosso, se comparato con le formazioni pure.



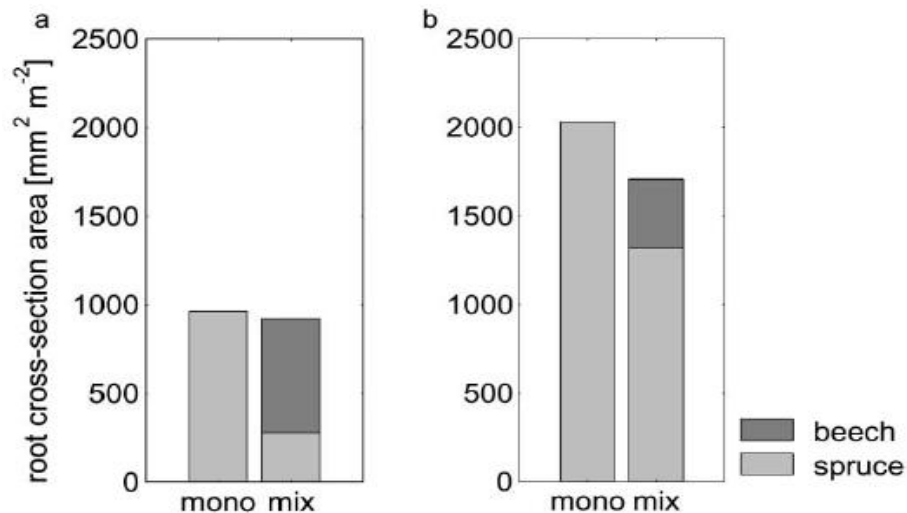


Figura 13: Densità radicale delle radici grossolane, nella formazione pura e mista su stagnic cambisol (a) e podsol cambisol (b) (Schmid e Kazda, 2002)

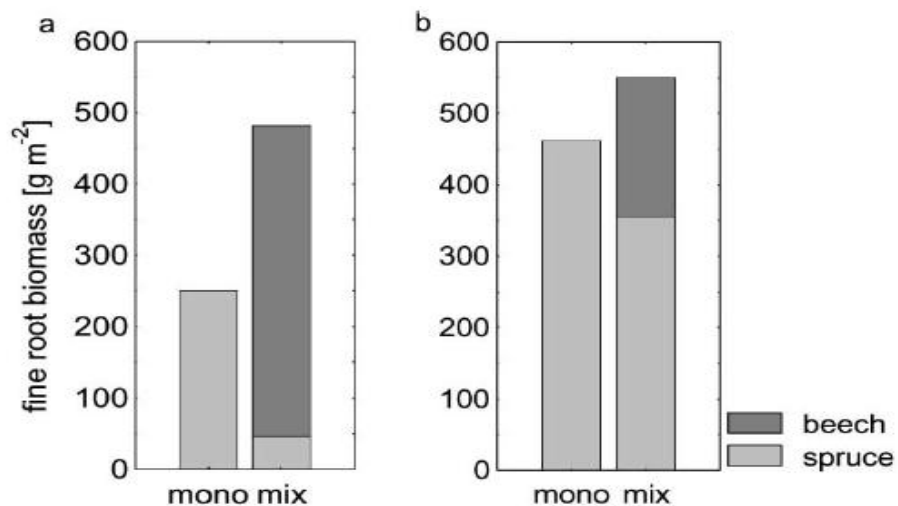


Figura 14: Biomassa delle radici esili, nella formazione pura e mista su stagnic cambisol (a) e podsol cambisol (b) (Schmid e Kazda, 2002)

La consociazione tra abete e faggio ha portato ad una diversa distribuzione delle radici grossolane ed esili negli orizzonti: allo sviluppo profondo e spazioso della formazione pura a peccio, si è sostituito uno prettamente superficiale con una concentrazione di radici di faggio negli orizzonti più profondi (Fig. 15 e 16).

Anche la diversa fertilità del suolo ha portato ad una diversa crescita e distribuzione radicale: nella formazione pura, il suolo a *podsol cambisol*, povero di nutrienti ma ben areato, ha determinato uno sviluppo maggiore che nello *stagnic cambisol*, mentre nella formazione mista, il primo ha portato il faggio ad accrescersi negli orizzonti più superficiali e nel secondo, lo *stagnic cambisol*, ad assestarsi intorno ai 25 cm di profondità. Nel campione misto, il peccio è rimasto precluso agli orizzonti più superficiali a causa dell'influenza del faggio, citata prima.

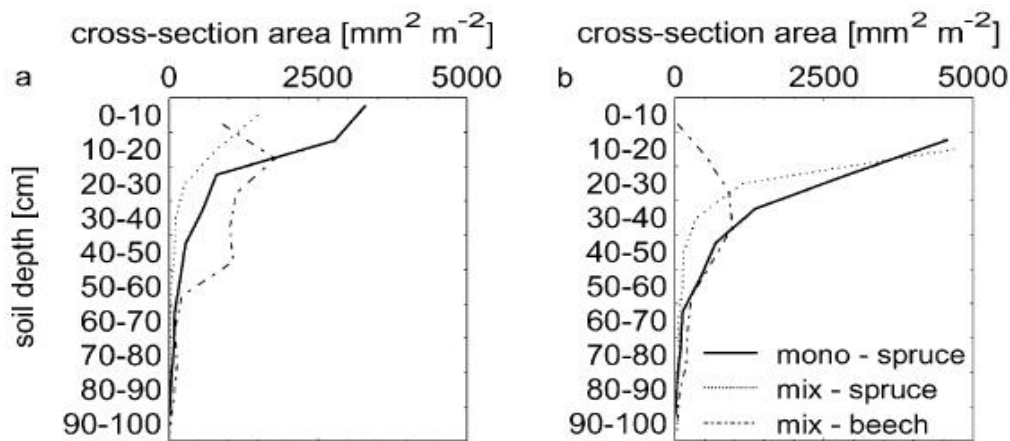


Figura 15: Distribuzione in profondità della densità radicale delle radici grossolane, nella formazione mista e pura su stagnic cambisol (a) e podsol cambisol (b) (Schmid e Kazda, 2002)

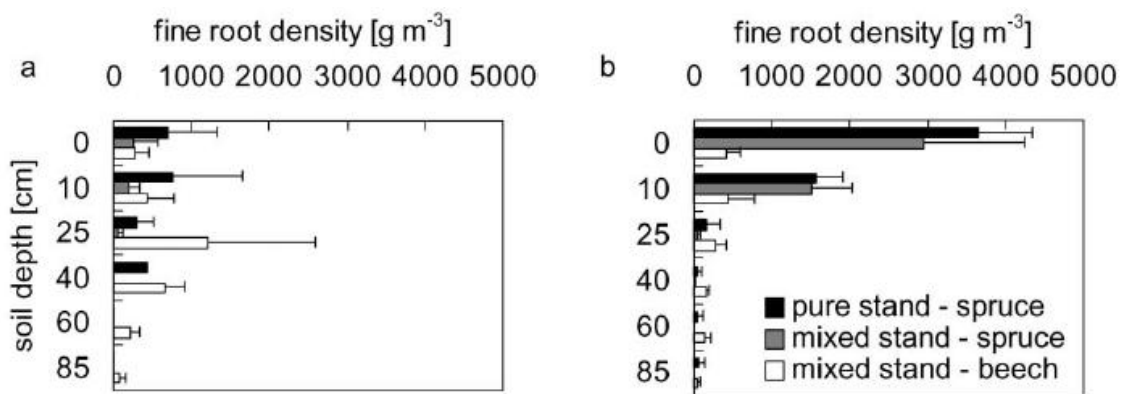


Figura 16: Distribuzione in profondità della densità radicale delle radici esili, nella formazione mista e pura su stagnic cambisol (a) e podsol cambisol (b) (Schmid e Kazda, 2002)

Dall'analisi di Schmid e Kazda si è visto come la densità radicale cambi al variare della profondità, delle condizioni stazionali, sia chimiche (presenza di elementi nutritivi) che fisiche (quantità di ossigeno), ed in presenza di altre specie.

Vi è un ulteriore fattore che incide sulla resistenza e sulla densità radicale: la gestione antropica del soprassuolo, intesa sia come forma di governo che come utilizzazione forestale.

Riguardo al primo aspetto, la forma di governo, da uno studio operato da Bischetti et al. (2005), è risultato che, in 2 siti con caratteristiche stazionali ed età del popolamento simili, la densità radicale del ceduo di faggio fosse doppia di quella a fustaia, anche se la profondità raggiunta era la metà. Una possibile spiegazione potrebbe essere desunta tenendo conto della capacità pollonifera delle piante ceduate: il taglio della ceppaia stimola un'elevata proliferazione di polloni da gemme avventizie e provventizie. Un tale effetto potrebbe indurre anche l'apparato radicale della pianta ad

emettere più radici, andando ad aumentare, in questo modo, la densità radicale nel suolo.

Il secondo aspetto riguarda l'effetto delle utilizzazioni forestali, in una fustaia.

Il taglio delle piante arboree, in bosco, porta ad una notevole e veloce decrescita della resistenza radicale.

La velocità di riduzione può dipendere anche dalla specie soprattutto tra conifere e latifoglie.

Secondo Ziemer e Swanston (1977), radici con diametri inferiori a 25 mm di piante di *Tsuga heterophylla* e *Picea sitchensis* perdono in tempi abbastanza veloci la capacità di rinforzo sul terreno a causa dello stato di deterioramento che consegue al taglio delle piante.

Confrontando le 2 specie, dopo 10 anni dall'esbosco, gli apparati radicali di *Picea sitchensis* presentano una perdita di resistenza più veloce che nel genere *Tsuga*.

In verità, questa diminuzione è difficile da definire a causa della relazione complicata tra "riduzione/mantenimento" della resistenza delle radici residue; nei primi 2-4 anni dopo l'esbosco, per *Picea sitchensis*, e 4-6 anni per *Tsuga heterophylla*, vi è ancora un significativo rinforzo da parte delle radici rimanenti.

Vi è da dire che, a causa del peso derivante dalla biomassa delle radici residue, si ha comunque una diminuzione del 60% (*Picea sitchensis*) e del 50% (*Tsuga heterophylla*) della capacità di rinforzo entro 24 mesi.

Anche nel caso della *Pseudotsuga menziesii* (Burroughs e Thomas, 1977) si è osservato una rapida diminuzione della resistenza dopo il taglio, con una perdita del 65% delle radici inferiori o uguali a 10 mm, dopo 24-60 mesi dall'esbosco. Durante l'analisi è risultato infatti che radici con un diametro oscillante tra 1 e 10 mm hanno una maggiore efficienza nel preservare la stabilità del pendio. Inoltre, gli stessi autori, hanno notato una maggiore frequenza di fenomeni franosi nella zona esaminata che molto probabilmente coincidono con la diminuzione della resistenza e del numero delle radici.

Studi simili, effettuati su boschi misti di conifere (Ziemer, 1981), hanno dimostrato che l'esbosco, dopo 2-3 anni da questo, porta ad un dimezzamento del rinforzo, operato dagli apparati radicali morti, e dopo 25 anni alla totale scomparsa di questo. Nello stesso studio, impiegando specie arbustive, come il *Ceanothus sp.* sull'area disboscata, l'autore ha notato come la componente arbustiva riesca a determinare un effetto positivo sulla stabilità del suolo, andando a coprire l'intera superficie dopo 7 anni dall'esbosco e a creare effetti stabilizzanti dopo 12. Inoltre, l'autore ha notato che durante questo periodo vi è un riacquisto del 70% del rinforzo originario.

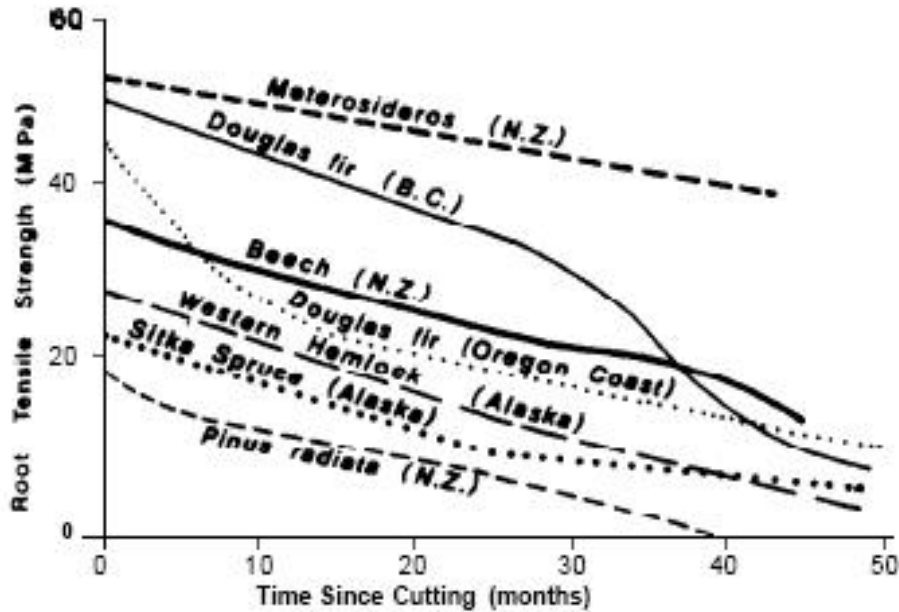


Figura 17: Riassunto grafico dei risultati derivanti da vari studi effettuati in diverse località e con diverse specie, dove N.Z.=New Zealand e B.C.=British Columbia (O'Loughlin e Ziemer, 1982)

A conclusione di questi studi (Burroughs e Thomas, 1977; Ziemer e Swanston, 1977; Ziemer, 1981;) si può dedurre che, da 3 a 10 anni dopo l'esbosco dell'area, questa sia molto suscettibile ai fenomeni di dissesto, dovuti soprattutto allo stato avanzato di decomposizione che si avrebbe, dopo questo periodo, nelle radici con diametri inferiori a 20 mm. Queste radici, perciò, hanno una notevole influenza sulla stabilità del pendio.

### 4.3. Il metodo dell'approccio energetico

Nei capitoli precedenti, fino ad ora, abbiamo parlato del fattore di sicurezza e dei suoi elementi, attraverso il metodo convenzionale del modello Mohr-Coulomb, definito anche come "metodo dell'equilibrio limite" (*Limit Equilibrium (LE) method*) ove il calcolo si basa difatti sull'equilibrio statico dell'intero pendio al momento del crollo del sistema suolo.

Secondo alcuni autori (Ekanayake e Phillips, 1999), in un suolo con presenza di radici, la validità del metodo LE risulta incerta per svariati motivi: innanzitutto vi è una difficoltà nella scelta dei valori da attribuire alla coesione e all'angolo di attrito del suolo con radici; è necessario conoscere la geometria delle radici, prima e dopo il taglio del versante ed infine la relazione tra forze normali e resistenza al taglio del suolo, coperto da radici, non risulta sempre lineare (Terwilliger e Waldron, 1990).

Vi è da aggiungere inoltre che il calcolo dell'apporto radicale, che nel metodo LE viene inteso solo come un aumento dell'attrito tra le particelle di terreno e le radici esili, porta ad una sottostima dell'azione vegetale, oltre ad escludere il ruolo che le radici più grossolane hanno sulla stabilità del pendio. Secondo gli Autori, difatti, la stabilità cresce con l'aumentare della maturità del bosco, sia da parte delle radici più piccole che di quelle più grandi, come dimostrano alcuni studi eseguiti su giovani piantagioni esotiche (Marden et al. 1991; Phillips et al. 1990).

Queste considerazioni hanno portato gli autori J. C. Ekanayake e C. J. Phillips ad elaborare un metodo basato su un approccio di tipo energetico, per calcolare la stabilità del pendio (*Energy Approach (EA) method*): attraverso la relazione "resistenza al taglio-scorrimento del suolo", il metodo calcola l'energia consumata, come resistenza ai fenomeni di taglio, da parte del sistema radice-suolo.

Si ipotizzi, ad esempio, un'area con tre diversi tipi di suolo (A, B, C), ciascuno con una propria relazione "resistenza-spostamento", ma che cedono allo stesso valore di resistenza di picco ( $\tau_p$ ) come in figura 18.

Il caso A, rappresenta uno strato compatto che scorre sulla superficie solida di quello sottostante; a causa della rigidità che caratterizza il primo, al momento del cedimento, non si avrà nessuna deformazione di taglio, ma una rottura immediata.

I casi B e C, invece, si riferiscono a due terreni con proprietà reologiche, ovvero con proprietà basate sulla plasticità del suolo a seguito di sollecitazioni varie. Il caso C, inoltre, è tipico di suoli con presenza di radici.

Per il metodo LE, il fattore di sicurezza, inteso come  $\tau_p / \tau_1$ , si avvicina al valore unitario con l'avvicinarsi della resistenza di picco, nei casi B e C, oltre il quale il sistema suolo crolla. Questo, però, avviene con diverse modalità e valori per i casi B e C: nella curva "resistenza-spostamento" del caso B, non si riscontrano difficoltà nel trovare il punto in cui  $F_s$  è uguale a 1. Esso corrisponde alla resistenza di picco ovvero a  $x_{Bp}$ . Al contrario, nella curva C, il medesimo punto è poco chiaro: al raggiungimento della resistenza di picco ( $x_{Cp1}$ ), questa permane fino al punto  $x_{Cp2}$ . Questa forma piatta pone quindi il valore unitario del fattore di sicurezza in un range, con  $x_{Cp1}$  e  $x_{Cp2}$  come estremi.

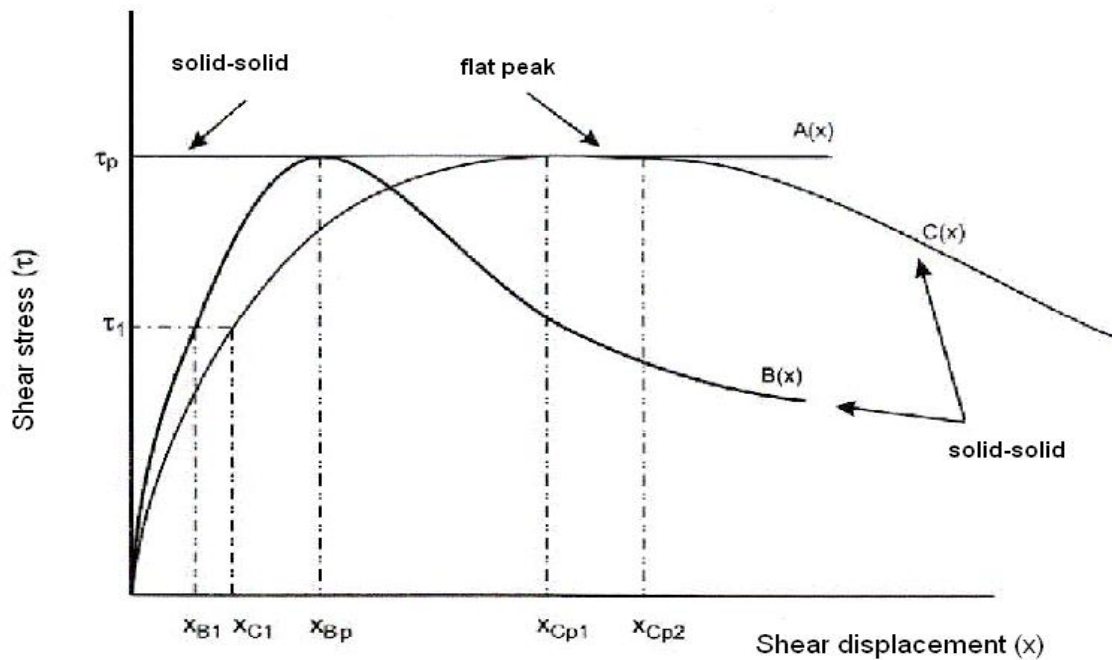


Figura 18: Le tre diverse curve "resistenza-spostamento" inerenti ai casi A, B, C (Ekanayake e Phillips, 1999)

Dal comportamento della curva C si può quindi dedurre che un eventuale aumento oltre il valore di sicurezza convenzionale ( $F_s = 1$ ), rappresentato da  $x_{Cp1}$ , non implica necessariamente un cedimento del pendio. Questo effetto dimostra la capacità del suolo C di sottoporsi ad un'ulteriore sollecitazione di taglio, che ne provoca una deformazione plastica, prima che la resistenza di picco crolli al raggiungimento di  $x_{Cp2}$ . Questo aspetto è molto importante in quanto, l'ulteriore resistenza permette al suolo di avere un tempo maggiore, in cui lo sforzo di taglio può ridursi, prima che avvenga il cedimento del pendio.

La forma della curva "resistenza-spostamento" ha quindi un'importanza maggiore nello studio di stabilità dei terreni simili al caso C. Essa è connessa direttamente con l'energia consumata durante il processo di taglio.

All'interno del grafico, l'energia totale spesa per unità di area di taglio, è rappresentata come l'area sotto la curva di "resistenza-spostamento".

Nel caso A, non si ha nessuna energia consumata.

Nel caso B, l'energia totale richiesta, per unità di area di taglio, è data da:

$$E_B(x_{Bp}) = \int_0^{x_{Bp}} B(x) dx \quad (3.1)$$

dove  $x_{Bp}$  rappresenta lo spostamento di taglio alla resistenza di picco  $\tau_p$ ,  $B(x)$  è l'andamento della curva di taglio nel caso B e  $x$ , lo spostamento di taglio.

Nel caso C, se si ipotizza che il completo cedimento avvenga al punto  $x_{Cp2}$ , l'energia totale richiesta per unità di area di taglio è:

$$E_C(x_{Cp2}) = \int_0^{x_{Cp2}} C(x) dx \quad (3.2)$$

dove  $x_{Cp2}$  rappresenta lo spostamento alla fine della resistenza di picco  $\tau_p$  e  $C(x)$  la curva di spostamento del taglio nel caso C.

I tre casi, quindi, cedono allo stesso sforzo  $\tau_p$ , ma impiegano quantità di energia totale differente: nel caso A l'energia spesa è nulla, mentre il caso C rappresenta quello in cui vi è stato il maggior dispendio.

Nei test di taglio diretto, gli Autori hanno notato come l'energia totale, atta a spostare gli strati di terreno, veniva impiegata sotto forma di deformazione del suolo e della struttura radicale. In campo, l'energia applicata era equivalente alla riduzione di potenziale di scivolamento del pendio. Secondo gli Autori, difatti, una parte di questa energia veniva immagazzinata, sotto forma di energia elastica e di tensione, dalle deformazioni che avvengono nelle placche argillose e nelle particelle di suolo, ma anche dall'aumento delle pressioni neutre nel suolo e dalle deformazioni della geometria delle radici. Una frazione di questa energia veniva poi rilasciata in concomitanza con il rilascio della forza applicata, dovuto all'alleviamento degli sforzi e al ritorno della tensione entro i valori elastici di limite. Inoltre l'energia spesa contro le forze d'attrito, veniva dissipata e convertita in energia termica.

Come abbiamo visto, l'energia spesa in un suolo con o senza radici è diversa. Vediamo ora in dettaglio come varia il fattore di sicurezza, ipotizzando un suolo privo (F) e dotato (R) di apparati radicali, in un pendio infinito.

Il fattore di sicurezza, nell'approccio energetico (metodo EA), deriva dal rapporto tra la capacità di energia totale dell'area di taglio del grafico, al picco di resistenza, e l'energia già consumata nell'area di taglio (Fig. 19).

Nel suolo F, il fattore di sicurezza del metodo EA ( $FS_{FE}$ ) è:

$$FS_{FE} = \frac{\int_0^{x_{Fp}} F(x) dx}{\int_0^{x_{F1}} F(x) dx} \quad (3.3)$$

dove al numeratore vi è la capacità di energia totale al picco di resistenza ( $x_{Fp}$ ) e al denominatore l'energia già consumata nell'area di taglio da 0 a  $\tau_1$ .

Il fattore di sicurezza del metodo LE ( $FS_{FL}$ ), sempre per il suolo F, è:

$$FS_{FL} = \tau_{Fp} / \tau_1 \quad (3.4)$$

ove  $\tau_{Fp}$  rappresenta lo sforzo di resistenza al picco e  $\tau_1$  lo sforzo di resistenza allo spostamento  $x_{F1}$ .

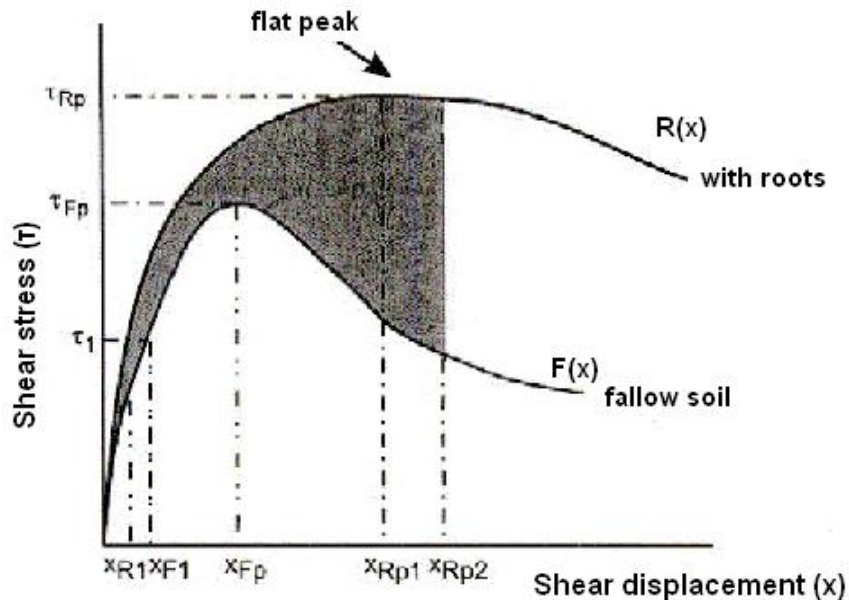


Figura 19: Curva "resistenza-spostamento" tra i suoli F e R; l'area scura rappresenta la capacità maggiore di energia del suolo con radici (Ekanayake e Phillips, 1999)

Il suolo R, mostra una capacità maggiore di sfruttamento dell'energia, prima del cedimento totale del pendio. Il fattore di sicurezza è dato da:

$$FS_{RE} = \frac{\int_0^{x_{Rp2}} R(x) dx}{\int_0^{x_{R1}} R(x) dx} \quad (3.5)$$

dove  $x_{Rp2}$  rappresenta lo spostamento di taglio alla fine della resistenza di picco e  $x_{R1}$  è lo spostamento allo sforzo  $\tau_1$ .

Per il metodo convenzionale (metodo LE) il fattore di sicurezza è:

$$FS_{RL} = \tau_{Rp} / \tau_1 \quad (3.6)$$

Come mostra la figura 19, nel suolo con radici, il fattore di sicurezza del metodo EA è maggiore di quello convenzionale LE, ad eccezione del punto di picco. La spiegazione risiede nel diverso tipo di rapporto: il fattore di sicurezza del metodo LE rappresenta il



rapporto tra la resistenza di picco ( $\tau_{Rp}$ ) e la resistenza ad una data deformazione ( $\tau_1$ ), mentre il metodo EA è dato dal rapporto fra le due aree di taglio..

Le formule 3.3 e 3.5 sono applicabili solo se le curve “resistenza-spostamento” vengono ottenute da test di taglio diretto, eseguiti in campo, su suoli caratterizzati da un piano di taglio potenziale e con condizioni molto vicine a quelle che potrebbero innescare il fenomeno di taglio. Questo aspetto fa sì che nelle formule 3.3 e 3.5, la presenza delle pressioni neutre dell’acqua e dei parametri di forza del suolo, non sia particolarmente necessaria e quindi le due formule sono indirettamente dipendenti da queste variabili.

In una situazione reale, durante un evento intenso di pioggia ed in presenza di un suolo contenente radici e con condizioni iniziali non sature d’acqua, le forze effettive aumenteranno seguendo l’andamento della curva R, a causa della crescente pressione derivante dal sovraccarico prodotto dalla continua filtrazione di acqua piovana. In questa situazione, utilizzando il metodo LE, il fattore di sicurezza raggiunge il suo valore unitario a  $x_{Rp1}$  (Fig. 19), oltre il quale si ha il possibile crollo del pendio. Nell’ottica, invece, del metodo EA, il sistema è ancora stabile ed il maggior tempo derivante, può permettere al suolo di scolare le acque in eccesso e ridurre di conseguenza la pressione prodotta dal carico eccessivo di quest’ultime, prima che le forze oltrepassino il punto  $x_{Rp2}$  e determinino il cedimento del pendio. Secondo il metodo EA, la stabilità del pendio non è ancora a rischio, proprio per la caratteristica del metodo di tenere in conto la capacità energetica del suolo, fornito di radici, che gli permette di sostenere un ulteriore deformazione di taglio.

Secondo gli Autori, quindi, il metodo LE tende a sottostimare il fattore di sicurezza dei pendii provvisti di apparati radicali.

Il contributo totale degli apparati radicali alla stabilità del pendio, rappresentato graficamente dall’area scura della figura 19, viene espresso in termini energetici dalla seguente formula:

$$\Delta E (x_{Rp2}) = \int_0^{x_{Rp2}} [R - F](x) dx \quad (3.7)$$

dove  $R(x)$  rappresenta la curva “resistenza-spostamento” del suolo contenente radici e  $F(x)$  la curva “resistenza-spostamento” del suolo privo di radici.

L'esempio che segue, proposto dagli Autori, mostra con maggior chiarezza la differenza del fattore di sicurezza tra i due metodi.

Lo studio è stato effettuato su un pendio contenente una falda acquifera coincidente con il piano di taglio potenziale. Inoltre, lo studio ha coinvolto suoli caratterizzati dalla presenza di radici di piante arboree di *Pinus radiata*, con età del popolamento pari a 2 anni, e di piante arbustive di *Kunzea ericoides*, con età pari a 16 anni (Ekanayake et al., 1997).

I test sono stati eseguiti simulando le condizioni di saturazione al livello del piano di taglio. Per quanto concerne le pressioni neutre, a causa delle difficoltà che comporta la loro valutazione, spesso accompagnata da cambiamenti di volume, si è considerato un valore nullo. Se però teniamo conto del fatto che l'energia totale consumata durante il processo di taglio, sia su terreno nudo che su uno contenente radici, sia direttamente proporzionale all'area posta sotto la curva "resistenza-spostamento", non si ha l'esigenza di conoscere i valori di pressione neutra o di altri parametri inerenti al sistema radice-suolo.

Dalle prove di taglio diretto, eseguite sull'area esaminata, gli Autori hanno individuato i valori di resistenza di picco ( $\tau_{Rp}$ ) e di spostamento di taglio al picco ( $x_{Rp}$ ). Tramite, poi, una formula empirica basata sulle curve di "resistenza-spostamento", derivanti dalle prove, si è ottenuto il valore di resistenza reale ( $\tau$ ):

$$\tau = \tau_{Rp} \left[ 1 - \left( \frac{x}{x_{Rp}} - 1 \right)^2 \right]^{0,5} \quad (3.8)$$

Conoscendo i valori di  $\tau_{Rp}$ ,  $x_{Rp}$  e  $\tau$  ed unendo le formule 3.5 e 3.8, si è proceduto al calcolo del fattore di sicurezza del suolo con radici, al variare dello spostamento di taglio ( $x$ ):

$$FS_{RE} = \frac{\pi x_{Rp}^2}{2 \left[ (x - x_{Rp}) \sqrt{x_{Rp}^2 - (x - x_{Rp})^2} + x_{Rp}^2 \sin^{-1} \frac{(x - x_{Rp})}{x_{Rp}} \right] + \pi x_{Rp}^2} \quad (3.9)$$

A differenza del metodo convenzionale del *Limit Equilibrium*, la suddetta formula porta alla definizione di un fattore di sicurezza indipendente dai caratteristici parametri del suolo, come la densità ( $\gamma$ ), coesione ( $c$ ), angolo d'attrito ( $\varphi$ ) e angolo di pendenza ( $\alpha$ ): esso dipende solamente dallo spostamento al picco e dallo spostamento reale di taglio. In verità, i parametri del suolo appena citati sono indirettamente inclusi nella formula,

giacché la curva “resistenza-spostamento” è stata ottenuta da test sottoposti già a condizioni di pressione neutra e di sovraccaricamento.

Gli Autori specificano, però, che la formula 3.9 non può essere utilizzata in modo universale, ma solamente per quei pendii con caratteristiche fisiche identiche a quelle dell’area oggetto di studio.

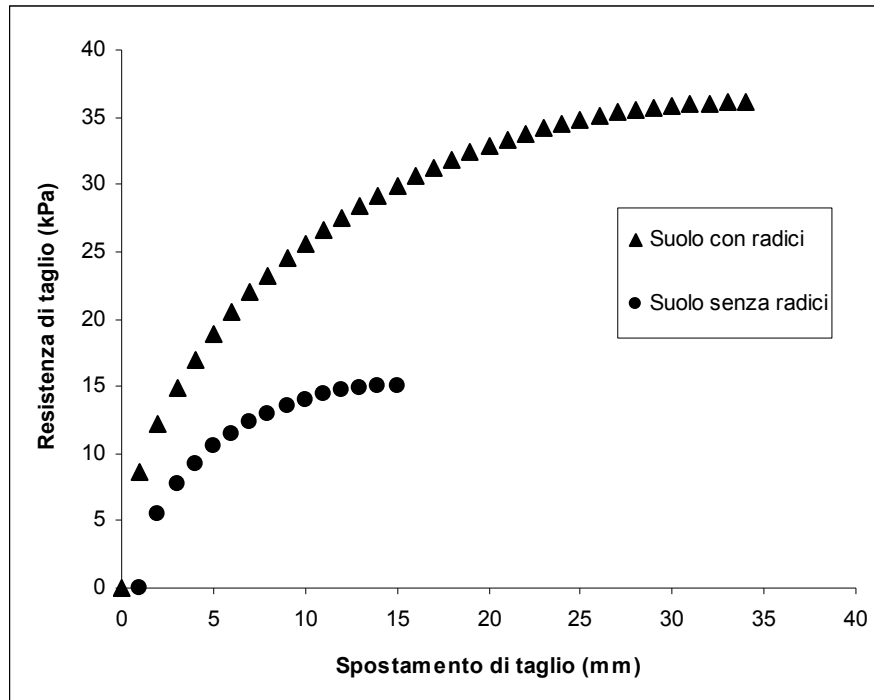


Figura 20: Curva resistenza-spostamento di taglio tra il suolo privo e con apparati radicali.

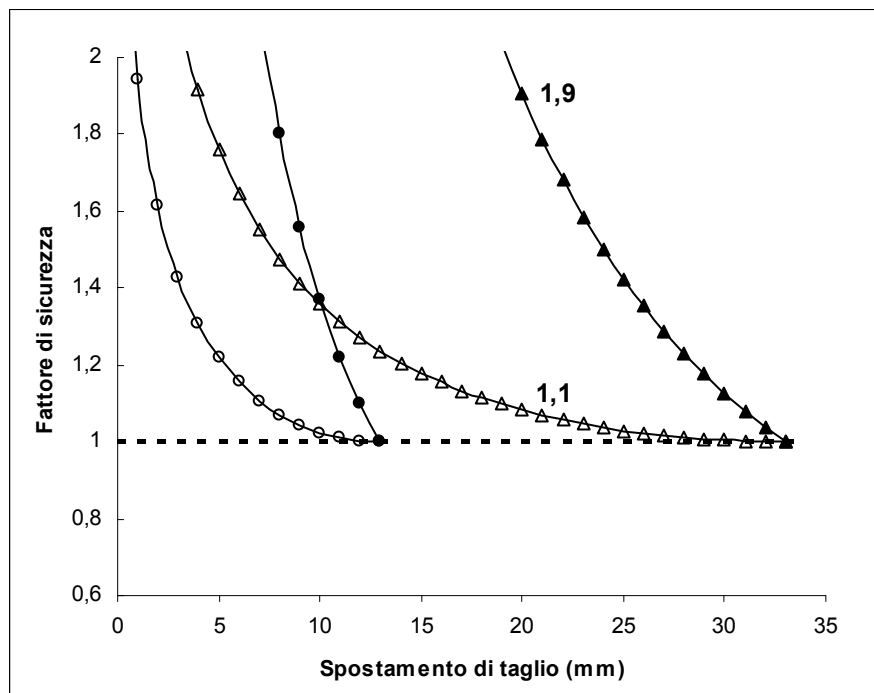


Figura 21: I fattori di sicurezza derivanti dai 2 diversi metodi: ○ suolo privo di radici (metodo LE), ● suolo privo di radici (metodo EA), △ suolo con radici (metodo LE), ▲ suolo con radici (metodo EA).

Il grafico di figura 21, mostra chiaramente la differenza di valore tra i fattori di sicurezza acquisiti dai due metodi, sia per il suolo nudo che per quello provvisto di radici. In entrambi i casi, comunque, il fattore di sicurezza raggiunge il suo valore unitario allo spostamento di picco, mostrato in figura 20.

Per il suolo nudo, l'andamento del fattore di sicurezza risulta simile tra i due metodi: entrambi, difatti, decrescono più o meno rapidamente. La stessa cosa non si verifica per il sistema radice-suolo: il metodo convenzionale ha un andamento particolarmente veloce che lo porta ad avere un fattore di sicurezza inferiore a 2 già dopo i primi 5 mm di spostamento di taglio, per poi assumere un comportamento tendenzialmente piatto; mentre il metodo EA ha un andamento ripido che lo porta ad avere un fattore di sicurezza alto, anche poco al di sotto del valore di picco. Se si confrontano le due curve del suolo con radici, attraverso un valore di spostamento pari a 20 mm (come in Fig. 21), i due metodi assumono margini di sicurezza molto vari: il metodo LE determina un fattore di sicurezza pari a 1,1, mentre il metodo EA pari a 1,9. Nel metodo LE, il rapporto tra lo sforzo al picco e quello attuale comporta dei picchi più lievi, che determinano di conseguenza un margine di sicurezza stretto. Nel metodo EA, invece, il rapporto tra le aree della curva "resistenza-spostamento", con picchi più accentuati, porta ad avere un margine di sicurezza più ampio di quello derivante dal metodo convenzionale.

Come già detto precedentemente, il metodo LE quindi tende a sottostimare il fattore di sicurezza nei suoli contenenti radici.

L'applicazione del metodo EA avviene attraverso quattro passaggi, ivi descritti.

Il primo comporta l'acquisizione, attraverso le prove dirette di taglio in campo, di due formule empiriche: l'una per la stima della resistenza di picco ( $\tau_{Rp}$ ), l'altra per la deformazione/spostamento di taglio al picco ( $x_{Rp}$ ) ad ogni determinata densità radicale. Nel secondo passo, viene valutata la resistenza reale ( $\tau$ ) al taglio, attraverso il calcolo di fattori come la densità del suolo a saturazione ( $\gamma_{sat}$ ), l'angolo di pendenza ( $\alpha$ ) e la profondità del piano di taglio ( $z$ ) secondo la formula 4.0:

$$\tau = \gamma_{sat} z \cos\alpha \sin\alpha \quad (4.0)$$

Nella terza fase, per mezzo di una formula empirica basata sulle curve "resistenza-spostamento" acquisite dai test di taglio diretto, si definiscono i valori di spostamento ( $x$ ) al variare di  $\tau$ , attraverso l'uso dei valori di  $\tau$ ,  $x_{Rp}$  e  $\tau_{Rp}$  in precedenza calcolati.

L'ultima fase prevede infine la definizione del fattore di sicurezza del suolo oggetto di studio, attraverso i valori di  $x$  e  $x_{Rp}$ , come nella formula 3.9.

## 5. CONCLUSIONI

La valutazione del pericolo di instabilità dei versanti, in un pendio infinito sollecitato da forze di taglio, avviene tramite la definizione del suo fattore di sicurezza. Esso viene determinato dal rapporto tra le forze stabilizzanti e destabilizzanti: le prime vengono ricavate dalla formula di Mohr – Coulomb, attraverso la coesione del suolo e l'angolo di attrito interno; le seconde, invece, avvengono tramite le forze di infiltrazione della falda acquifera e del peso di terreno sovrastante il piano di taglio.

Nel calcolo delle forze stabilizzanti, viene aggiunto anche il contributo degli apparati radicali, presenti nel terreno. Le radici, grazie alle varie azioni di rinforzo che esplicano, vanno ad aumentare la resistenza del terreno ai fenomeni di taglio.

La stima del contributo radicale avviene impiegando il modello Wu – Waldron, che si basa sulla resistenza, di ogni radice, ad opporsi ad una forza di sfilamento derivante dallo scorrimento dello strato instabile sullo strato più saldo di terreno.

Questa resistenza radicale dipende soprattutto da tre variabili.

Innanzitutto dal diametro delle radici: all'aumentare di questo parametro, la resistenza diminuisce.

La seconda variabile rappresenta invece il modo con cui le radici si distribuiscono nel terreno. La presenza di un apparato radicale composto da una o poche radici, rispetto ad un altro più ramificato, determina una diversa resistenza: nel primo caso si avrà un unico valore di picco, oltre il quale si ha il collasso del sistema radicale; nel secondo, al contrario, si avrà una serie di picchi prima che avvenga il cedimento.

L'ultima variabile è data dalla densità radicale, ovvero il rapporto tra l'area occupata dalle radici e quella totale. Essa dipende fortemente dalla profondità: all'aumentare di quest'ultima, la densità decresce fino a scomparire, a causa della scarsità di elementi nutritivi e di ossigeno. La densità, inoltre, decresce se si è in un bosco misto invece che puro, a causa della forte competizione tra individui di specie diverse.

Un elemento ulteriore che può diminuire, o eliminare, la resistenza radicale è la gestione da parte dell'uomo, dell'area boscata, ovvero gli effetti che provoca l'esbosco.

L'eliminazione del soprassuolo porta ad una progressiva perdita della resistenza con il passare degli anni, a causa del deterioramento dell'apparato radicale.

Il fattore di sicurezza, calcolato tramite il modello di Wu e Waldron, secondo alcuni autori, tende a sottostimare l'azione delle radici. Utilizzando, invece, un approccio di tipo energetico, si può valutare con più accuratezza il contributo derivante dalle radici.

Il metodo si basa sul calcolo grafico delle aree delle curve di "resistenza al taglio –

spostamento”. Queste curve derivano dalle resistenze e relativi spostamenti di picco, acquisiti durante le prove di taglio in campo o laboratorio. Attraverso formule empiriche si definiscono, poi, le resistenze reali ed i relativi spostamenti, fino alla definizione dei fattori di sicurezza.

I capitoli precedenti mostrano chiaramente il ruolo importante, se non fondamentale, che le piante hanno nella stabilità dei fragili pendii montani.

Gli apparati radicali, attraverso una serie di azioni, tra cui la trattenuta delle particelle di suolo, rafforzano il terreno e contrastano le spinte inducenti il taglio.

Questo contributo, però, non sempre viene preso in considerazione nelle opere di assestamento, dove la scelta ricade molto spesso sull’impiego di metodi tradizionali basati su materiali morti e soluzioni strutturali. Questo comportamento può essere imputato alla scarsa conoscenza generale che si ha dell’argomento, anche se il crescente interesse verso le tematiche ambientali, spinge verso una maggiore consapevolezza dell’esistenza di metodi alternativi a quelli tradizionali.

Le ricerche analizzate e riassunte nella tesi, rappresentano una chiara dimostrazione di quanto sia importante l’azione delle piante, sia a livello di singolo individuo sia in formazioni forestali, come il bosco.

Si ritiene, in prospettiva, che le future ricerche sperimentali faranno comprendere con sempre maggiore chiarezza, l’importanza che l’ecosistema “bosco” riveste in particolari situazioni di fragilità del versante.

## 6. BIBLIOGRAFIA

- AA. VV. (1993) *Manuale tecnico di ingegneria naturalistica*. Assessorato all'Ambiente della Regione Emilia-Romagna e Assessorato Agricoltura e Foreste della Regione Veneto. Bologna.
- ABE K., ZIEMER R.R. (1991) *Effect of tree roots on shallow-seated landslides*. USDA Forest Service, General Technical Report, 11-20.
- BISCHETTI G. B., CHIARADIA E. A., SIMONATO T. (2004) *Valutazione del contributo degli apparati radicali nell'analisi di stabilità dei movimenti franosi superficiali*. Rivista di Ingegneria Agraria nr. 3, 25-32.
- BISCHETTI G. B., CHIARADIA E. A., SIMONATO T., SPEZIALI B., VITALI B., VULLO P., ZOCCO A. (2005) *Root strenght and root area ratio of forest species in Lombardy (Northern Italy)*. Plant and Soil nr. 278, 11-22.
- BISCHETTI G. B., D'AGOSTINO V. (2002) *Sull'utilizzo di talee nelle sistemazioni di versante*. XXVIII Convegno Nazionale Idraulica e Costruzioni Idrauliche, 231-238. Potenza. Editoriale Bios. 16-19 settembre.
- BROMHEAD E. N. (1991) *Stabilità dei pendii*. Palermo. Dario Flaccovio editore.
- BURROUGHS E. R. JR., THOMAS B. R. (1977) *Declining root strength in Douglas-fir after felling as a factor in slope stability*. USDA Forest Service Research Paper INT-190, 27.
- COLOMBO P., COLLESELLI F. (2004) *Elementi di geotecnica*. Bologna. Zanichelli editore.
- D'AGOSTINO V. (2008) *Lezione di Soil, forest and hillslope stability: an interdisciplinary approach* del corso in *Sustainable erosion control and stream restoration in mountain basins* (SUFONAMA). Anno Accademico 2008 – 2009. Università degli Studi di Padova.
- EKANAYAKE J. C., PHILLIPS C. J. (1999b) *A method for stability analysis of vegetated hillslope: an energy approach*. Canadian Geotechnical Journal nr. 36, 1172-1184.
- FLORINETH F. (2007) *Piante al posto del cemento. Manuale di ingegneria naturalistica e verde tecnico*. Borghetto Lodigiano (LO). Il verde editoriale.
- HENDRIKS C. M. A., BIANCHI F. J. J. A. (1995) *Root density and root biomass in pure and mixer forest stands of Douglas-fir and Beech*. Netherlands Journal of Agricultural Science nr. 43, 321-331.

- LONGO C., MARZIANI G. (2005) *Biologia delle piante: forme e funzioni elementari*. Torino. UTET Scienze Mediche editore.
- O'LOUGHLIN C. L., ZIEMER R. R. (1982) *Importance of root strength and deterioration rates upon edaphic stability of steepland forests*. In Proceedings of IUFRO Workshop, 70-78, Ecology of Subalpine Ecosystems as a Key to Management., Oregon State University. Corvallis, OR. Corvallis, OR. August 2-3.
- PAIERO P., SEMENZATO P. e URSO T. (1996) *Biologia vegetale applicata alla tutela del territorio*. Padova. Libreria Progetto s.n.c.
- SCHMID I., KAZDA M. (2002) *Root distribution of Norway spruce in monospecific and mixed stands on different soils*. Forest Ecology and Management nr. 159, 37-47.
- SPURR S. H. e BARNES B. V. (1980) *Forest ecology*. USA. John Wiley & Sons Inc.
- WU T. H. (1995) *Slope stabilization*. ed. R. P. C. Morgan e R. J. Rickson, 221-264. London. E & FN Spon.
- ZIEMER R. R. (1981) *Roots and the stability of forested slopes*. IAHS Publication nr. 132, 343-357 (citato da O'Loughlin C. L., Ziemer R. R. (1982) *Importance of root strength and deterioration rates upon edaphic stability of steepland forests*.)
- ZIEMER R.R., SWANSTON D.N. (1977) *Root strength changes after logging in southeast Alaska*. USDA Forest Service Research Note PNW-306, 10. (citato da O'Loughlin C. L., Ziemer R. R. (1982) *Importance of root strength and deterioration rates upon edaphic stability of steepland forests*.)
- ZILLOTTO U. (2008) *Alpicoltura*. Appunti del corso. Anno Accademico 2007 – 2008. Università di Padova.





