

4.1 INTERVENTI SULLA MORFOLOGIA

(M. Berti, C. Elmi, E. Muzzi, A. Simoni)

4.1.1 FINALITÀ

Rimodellamento delle superfici di escavazione al fine di assicurare una stabilità meccanica permanente, sia strutturale che superficiale, ricreando nel contempo forme diversificate, facilmente accessibili e in stretta connessione con il paesaggio circostante. L'obiettivo è approssimare un equilibrio tra forme e processi geomorfologici in atto.

4.1.2 QUADRO D'INSIEME

Il modellamento delle superfici di un'area di cava esaurita deve sottendere a diversi vincoli fondamentali:

- *vincolo meccanico*: l'area deve essere in primo luogo stabile da un punto di vista statico. In particolare, accanto ad una stabilità "generale", comunemente calcolata, che caratterizza il substrato minerale è necessario associare un'analisi della stabilità "superficiale", relativa allo strato di terreno riportato, dove si insedierà la vegetazione. Mentre la stabilità "generale" deve essere comunque verificata, anche in base alla normativa in vigore, la stabilità "superficiale" può invece presentarsi:
 - totalmente verificata: nelle aree pianeggianti o poco inclinate;
 - parzialmente verificata: nelle aree inclinate, dove gli interventi di ripristino devono sempre essere associati ad interventi di supporto di tipo ingegneristico (sostegni, drenaggi, ecc.);
 - non verificata: nelle aree molto inclinate, dove non sono auspicabili interventi di ripristino vegetazionale, bensì la valorizzazione del fronte litologico tal quale.
- Nel progetto possono coesistere situazioni e condizioni diverse: in tutti i casi il progetto deve tendere a minimizzare l'energia potenziale presente sul fronte di cava e ridurre al minimo la necessità di interventi di manutenzione, per rendere il sito stabile nel lungo periodo. Riusi intensivi possono disporre di risorse finanziarie e tecniche tali da consentire deroghe da questi principi, che mantengono però la loro valenza generale;
- *vincolo ecologico*: l'area deve essere caratterizzata dalla massima variabilità morfologica possibile: si devono creare delle condizioni locali omogenee, coordinarle tra loro e rapportarle con l'area circostante. Questo è il presupposto per la realizzazione e il successivo sviluppo di unità di paesaggio diversificate e stabili;
- *vincolo paesaggistico*: ogni progetto deve trovare un riscontro più ampio, partendo da un'analisi paesaggistica territoriale. Le forme di abbandono devono coordinarsi o, al contrario, contrapporsi all'ambito circostante, sulla base di un progetto che interpreti le complesse relazioni storiche e biologiche che caratterizzano il sito;
- *vincolo idraulico*: la risistemazione deve favorire un corretto regime idraulico permettendo la creazione di una rete di scolo delle acque, minimizzando nel contempo i possibili fenomeni di erosione associati.

Infine va ricordata anche la necessità di garantire al sito una buona accessibilità e condizioni ottimali di sicurezza nel breve e lungo periodo.

4.1.3 DETTAGLI

Gli interventi necessari per la progettazione e realizzazione delle forme di abbandono coinvolgono diversi aspetti, che vanno opportunamente approfonditi: gli aspetti statico-meccanici, gli aspetti paesaggistici, gli aspetti ecologici e quelli pratici. Tutti questi devono essere affrontati e risolti analiticamente, prima di sviluppare qualsiasi altra problematica. In particolare si considerano:

- la progettazione geomeccanica dei profili di abbandono;
- la progettazione ecologico-paesaggistica;
- la progettazione idraulica;
- l'accessibilità;
- la sicurezza.

4.1.3.1 PROGETTAZIONE DEI PROFILI DI ABBANDONO

Il problema della valutazione della stabilità dei profili di abbandono è fortemente dipendente dai materiali coinvolti e dalla scala del problema. In primo luogo occorre considerare separatamente la stabilità del substrato (terre e rocce) e del terreno di copertura, nel breve e nel lungo periodo. In secondo luogo va considerato il concetto di "settori di progetto", ossia settori dove i parametri che influenzano le condizioni di stabilità sono costanti. La loro definizione comporta la conoscenza dei principali parametri che influenzano le condizioni di stabilità (litologia, discontinuità, geometria del versante ecc.) e la formulazione di ipotesi riguardanti il cinematisma di rottura potenzialmente più pericoloso. La storia dell'attività estrattiva nel sito specifico può fornire informazioni preziose e permettere l'utilizzo di uno strumento quale l'analisi a ritroso per identificare le modalità di rottura e le resistenze mobilizzate.

Segue la fase più propriamente analitica con approcci di tipo deterministico e/o di tipo probabilistico. Il primo metodo, più propriamente ingegneristico, richiede la conoscenza esplicita delle caratteristiche meccaniche del materiale, delle condizioni idrauliche e della geometria del problema. Nell'approccio probabilistico ogni parametro viene descritto come una distribuzione di valori piuttosto che come un valore puntuale e la combinazione delle probabilità di ogni valore dei parametri permette di calcolare la probabilità di rottura.

Le sezioni seguenti, per la vastità del tema, devono intendersi come un "riassunto ragionato" per la progettazione dei fronti di abbandono e ripristino. Si raccomanda di consultare la letteratura di riferimento per i necessari approfondimenti.

Profili di abbandono in terra

In generale, i terreni naturali vengono distinti in terreni a prevalente frazione sabbioso-ghiaiosa (*terre granulari*) e terreni a prevalente frazione limoso-argillosa (*terre fini*).

In difformità a questo schema, esistono altri casi: termini come "terreni strutturati", "pseudo-coerenti", o "parzialmente cementati" descrivono mezzi granulari caratterizzati da una certa componente coesiva e per contro, termini come "terreni argillosi fessurati" o "strutturalmente complessi" indicano terreni fini soggetti nel tempo ad una progressiva diminuzione fino alla scomparsa della componente coesiva.

La corretta definizione dei materiali, e di conseguenza dei parametri di resistenza per l'analisi di stabilità dei versanti artificiali, assume importanza rilevante per i seguenti motivi:

- l'altezza, generalmente limitata delle scarpate, fa sì che un errore anche modesto nella stima delle resistenze disponibili porti ad un notevole errore nel fattore di sicurezza;
- i terreni affioranti sui fronti a fine coltivazione sono di norma rappresentati da materiali "strutturati", cioè da terreni caratterizzati da pseudo-cementazione, superfici di discontinuità, alterazione, ecc.;

- il fattore tempo gioca un ruolo determinante, comportando la progressiva diminuzione delle resistenze effettivamente disponibili alla scala del versante.

Terre granulari

Valutazione dei parametri di resistenza al taglio

In questi terreni (sabbia e ghiaia), si assume che gli sforzi siano trasmessi al contatto tra le particelle più grossolane e che la matrice limoso-argillosa eventualmente presente abbia un ruolo passivo, relegata a riempimento dei vuoti interstiziali. La classificazione AASHTO (1978) fissa al 35% in peso la percentuale di sabbia e ghiaia sopra la quale un terreno assume il comportamento di un mezzo granulare.

Nella Regione Emilia Romagna, rientrano in questa categoria: le ghiaie e sabbie di alveo, di terrazzo, di conoide attuale e di piana alluvionale (ghiaie di valle); le ghiaie e sabbie di *fan delta* e di antichi depositi alluvionali (ghiaie di monte); le porzioni alterate o non cementate dei depositi pleistocenici e pliocenici marini (es. Formazione delle Sabbie Gialle, ecc.).

Secondo i canoni classici della meccanica delle terre, la resistenza al taglio di un terreno granulare è frutto esclusivamente di forze attrittive. Riferendosi ad esempio al criterio di rottura di Mohr-Coulomb in termini di tensioni efficaci, la coesione drenata c' si può quindi considerare assente ($c' \cong 0$) ed è sufficiente un solo parametro del materiale (ϕ') per determinare la resistenza disponibile (τ) ad una certa tensione normale efficace agente sul piano di scorrimento considerato (σ'_{ff}):

$$\tau_{ff} = \sigma'_{ff} \tan(\phi')$$

[1]

L'angolo di attrito ϕ' dipende fortemente dalla densità del terreno e dall'entità della deformazione. A basse deformazioni, terreni granulari densi forniscono elevati valori dell'angolo di attrito di picco (ϕ'_p), dato che parte dello sforzo di taglio è speso per produrre la dilatazione del materiale (Fig. 4.1.1); dopo la rottura la dilatazione cessa, lo sforzo necessario per mantenere la deformazione cala, e le resistenze raggiungono un valore costante (angolo di attrito a volume costante o di stato critico, ϕ'_{cs}). Nei terreni granulari sciolti, invece, non si ha dilatazione in nessuna fase del taglio e le

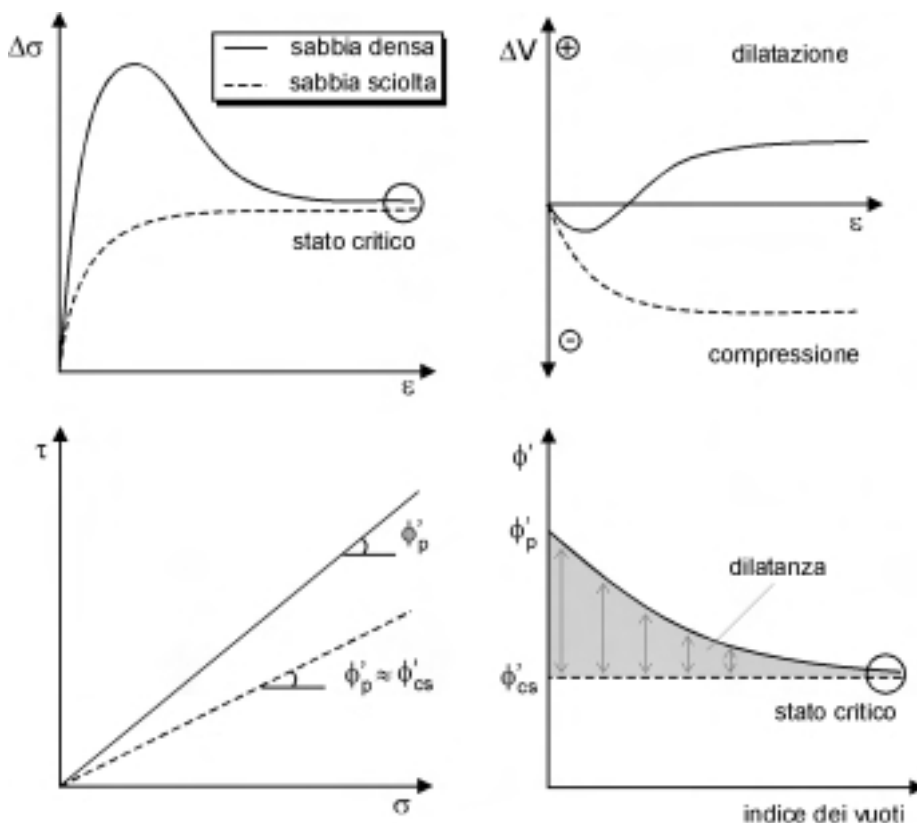


Fig.4.1.1. Comportamento meccanico ideale di una sabbia densa e di una sabbia sciolta.

resistenze a basse deformazioni, (di picco) coincidono con quelle a elevate deformazioni (di stato critico) e $\phi_p \cong \phi_{cs}$ (Fig. 4.1.1).

L'ipotesi di $c'=0$ è certamente valida per la gran parte dei terreni naturali recenti, per quelli artificiali, ed in generale per i mezzi granulari che hanno subito un rimaneggiamento meccanico o per quelli in cui la matrice limoso-argillosa è praticamente assente. Nel caso però dei depositi ghiaioso-sabbiosi pedeappennici (sabbie e ghiaie di monte), delle sabbie e ghiaie dei depositi terrazzati e, in gran parte dei conoidi recenti e della pianura alluvionale (sabbie e ghiaie di pianura), l'ipotesi di coesione assente spesso non è vera. Questi materiali sono infatti caratterizzati da legami di tipo pseudo-coesivo che, per quanto deboli, condizionano in modo netto il loro comportamento meccanico. Di norma l'azione "cementante" è svolta dalla frazione fine contenuta nel terreno granulare, sovraconsolidata per essiccamento, o da ridotte precipitazioni carbonatiche legate a circolazione di fluidi. Per tali terreni l'assunzione di $c'=0$ è spesso troppo conservativa. Dal punto di vista della stabilità di un fronte di cava, il fatto che il terreno abbia una certa coesione ($c'>0$) ha due effetti contrastanti: da un lato è una situazione più favorevole, visto che la resistenza disponibile aumenta, dall'altro comporta un aumento dell'intensità del fenomeno franoso potenziale, visto che la profondità della potenziale superficie di scorrimento aumenta all'aumentare della coesione disponibile.

Angolo di attrito: terreni sabbiosi

Data l'impossibilità di prelevare campioni indisturbati, si eseguono di norma prove di taglio diretto su materiale rimaneggiato e ricostituito a diversa densità, coprendo l'intero intervallo tra la densità minima e quella massima. Dato che la differenza tra l'angolo di resistenza al taglio in condizioni di densità massima e minima può essere dell'ordine dei 10° - 15° (Das, 1983), è ragionevole restringere il campo di variazione attorno ad un valore più probabile di ϕ , determinato da prove di taglio ad una densità simile a quella misurata in sito. Le tecniche standard più comuni per la misura della densità in sito sono descritte da Raviolo (1993).

Nel caso di terreni sabbiosi sciolti, invece, una stima dell'angolo di attrito può essere ottenuta sulla base del valore di densità relativa D_R determinato da prove in sito, quali SPT in foro di sondaggio e prove penetrometriche statiche o dinamiche (Cestari, 1990). Si scelga, tra le varie correlazioni empiriche in letteratura, quella determinata sul terreno più simile a quello di interesse per assortimento, forma e composizione mineralogica dei granuli.

Valori tipici di angolo di attrito di picco (ϕ_p) sono dell'ordine dei 28° - 38° per sabbie con granuli arrotondati (eoliche) e dei 30° - 45° per sabbie a granuli meno arrotondati.

Foto 4.1.1. Pareti finali di abbandono in terre granulari.



Minore variabilità si riscontra invece nei valori di angolo di attrito di stato critico (ϕ'_{cs}) che variano di norma tra 26° e 30° in sabbie con granuli arrotondati e tra 30° e 35° in sabbie a granuli angolari.

Angolo di attrito: terreni ghiaiosi

La determinazione sperimentale della resistenza di una miscela sabbia-ghiaia è un problema molto complesso, dato che la frazione maggiore di 2 mm non può essere inserita nelle usuali scatole di taglio. Testando la sola frazione sabbioso-limosa della miscela si ottengono generalmente valori cautelativi di ϕ'_p , perlomeno a basse densità. Nel caso dei terreni ghiaiosi, quindi, è possibile ottenere un “valore minimo” di ϕ'_p eseguendo prove di taglio sul passante ai 2 mm, ma non è possibile valutare quanto l'angolo di attrito misurato si discosti da quello reale del terreno in sito.

Anche la stima di ϕ' da prove in sito quali SPT e prove penetrometriche dinamiche deve essere presa con grande cautela. Le correlazioni empiriche tra D_R e ϕ' valide per le sabbie non sono infatti applicabili alle ghiaie. Prove speciali in sito, ad esempio la prova di taglio su campione prismatico di grandi dimensioni (Mirata, 1974), permettono una misura diretta sia di ϕ' sia dell'eventuale componente coesiva, ma il loro costo non è di norma accettabile nell'economia del progetto.

Valori tipici di angolo di attrito per terreni ghiaioso-sabbiosi sono dell'ordine dei 34° - 48° in condizioni di picco e dei 33° - 36° in condizioni di stato critico.

Coesione drenata e analisi a ritroso

La determinazione della coesione drenata effettivamente disponibile in sito in un terreno ghiaioso-sabbioso presenta problemi di difficile soluzione, in quanto i deboli legami eventualmente presenti tra le particelle vengono persi col campionamento e non sono ricostruibili in laboratorio. Risultati discreti a costi ragionevoli si ottengono con la prova su piastra, grazie alla quale si riesce a testare un volume elevato di terreno direttamente in sito (Cestari, 1990).

Una possibilità alternativa è quella dell'analisi a ritroso. E' sufficiente disporre di un fenomeno di instabilità del fronte di cava di cui siano noti la geometria pre-frana, le condizioni idrauliche a rottura e la posizione della superficie di scorrimento per effettuare una buona stima delle resistenze mobilizzate. I parametri che si ottengono consistono da un'unica coppia $c'-\phi'$ (o da un intervallo molto stretto di valori) nel caso di superficie di rottura circolare o pseudo-circolare (Fig. 4.1.2 A) e da infinite coppie $c'-\phi'$ nel caso di rottura traslativa (Fig. 4.1.2 B); in quest'ultima condizione, non risulta così possibile definire la coppia di valori effettivamente mobilizzati senza la conoscenza di almeno uno dei due parametri.

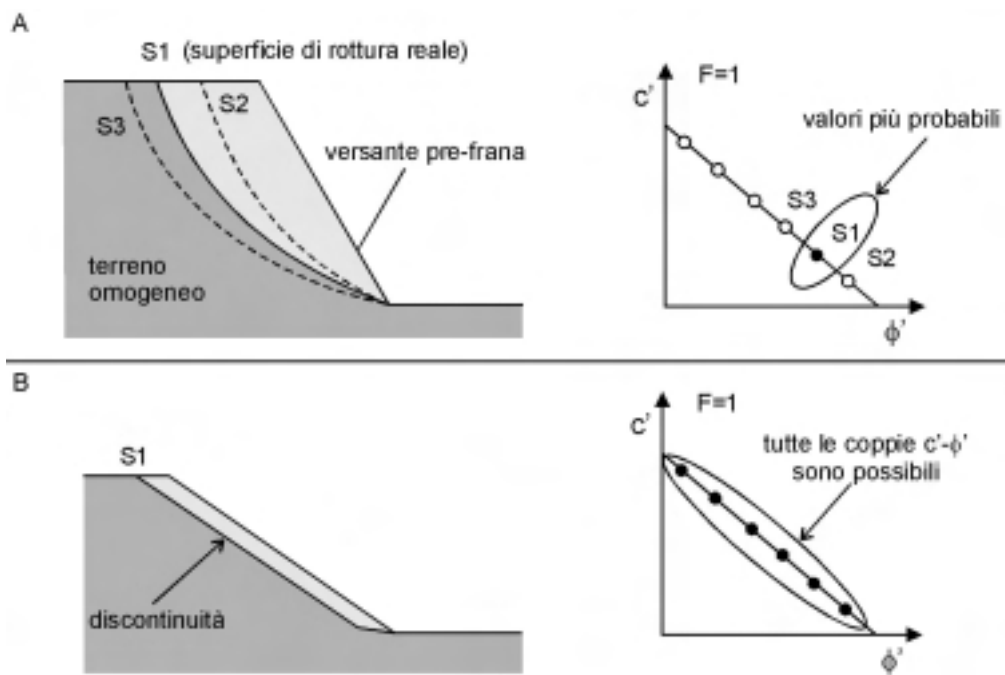


Fig.4.1.2. Uso dell'analisi a ritroso per la stima delle resistenze mobilizzate a rottura nel caso ideale di scorrimento rotazionale (A) e traslazionale (B). Le condizioni idrauliche a rottura si assumono note.

Il limite principale delle analisi a ritroso consiste nell'incertezza sulla effettiva distribuzione della pressione dei pori all'interno del versante, che si traduce in un'incertezza sulle resistenze mobilizzate: è pertanto buona norma ripetere l'analisi a ritroso considerando condizioni idrauliche molto variabili. Particolare attenzione dovrà essere posta infine al riconoscimento di eventuali letti o lenti di terreni fini o piani di discontinuità, visto che in questo caso le resistenze disponibili calcolate non saranno quelle del terreno ghiaioso-sabbioso ma, in larga misura, quelle del mezzo più debole.

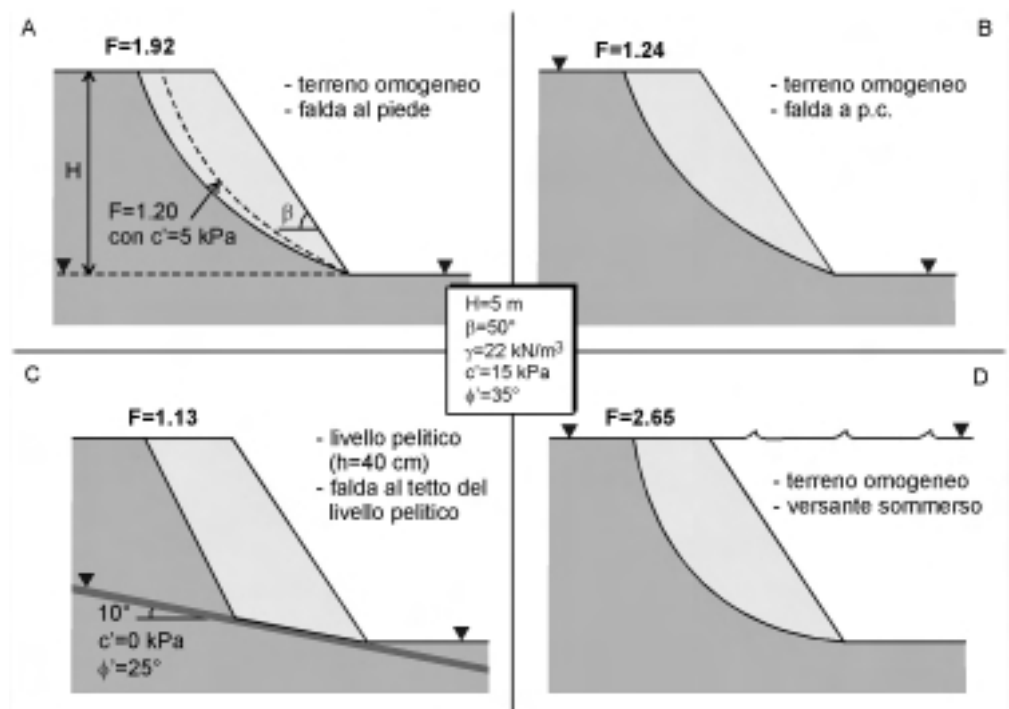
Analisi di stabilità all'equilibrio limite

Buona parte dei terreni ghiaioso-sabbiosi interessati dall'attività estrattiva regionale manifestano in sito i caratteri di un terreno debolmente coesivo. Pertanto in caso di scarpate alte e particolarmente acclivi si sviluppano scorrimenti di tipo rotazionale, per i quali il calcolo del fattore di sicurezza può essere eseguito con il metodo dell'equilibrio limite globale. Questo si basa su tre assunzioni:

1. massa di terreno perfettamente rigida;
2. rottura per scorrimento lungo una superficie;
3. resistenza del terreno completamente mobilizzata lungo l'intera superficie.

Nel caso di analisi a lungo termine su superficie non planare, il metodo dell'equilibrio limite è staticamente indeterminato per quanto riguarda modulo, direzione e punto di applicazione delle forze interconco. Diverse soluzioni sono state quindi proposte dagli autori sulla base delle diverse assunzioni adottate per tali forze. Le soluzioni più semplici dal punto di vista del calcolo sono quelle con le assunzioni più ardite: il metodo ordinario dei conchi o metodo di Fellenius ad esempio, che trascura la presenza delle forze interconco, permette il calcolo del fattore di sicurezza con una formula esplicita ma, in alcune situazioni particolari, può dare un errore del 60%.

Fig.4.1.3. Condizioni di stabilità di un fronte di scavo in terreni ghiaioso-sabbiosi debolmente cementati in quattro situazioni ideali.



In generale, i metodi che si basano sull'equilibrio dei momenti (Bishop semplificato) o contemporaneamente delle forze e dei momenti (Janbu rigoroso, Morgenstern e Price, Spencer) sono meno sensibili alle assunzioni sulle forze interconco di quelli che si basano sul solo equilibrio delle forze (Janbu semplificato) e sono quindi da preferire (Fredlund e Krahn, 1977). Per la velocità di calcolo oggi possibile, conviene quindi utilizzare un metodo completo, come quello di Morgenstern e Price (1965). In questo metodo è necessario quello di specificare una funzione che esprime le forze interconco, scelta tra alcune predefinite o impostata dall'utente; nel caso di scorrimento rotazionale si può scegliere una funzione "a mezzo seno" mentre, nel caso di

scorrimento traslazionale è più corretto utilizzare una funzione “costante”. Eventuali sollecitazioni sismiche possono essere introdotte con il metodo di Sarma (1979), oppure simulando l’azione del sisma con una semplice forza orizzontale commisurata al sisma di progetto e diretta verso l’esterno del pendio (analisi pseudo-statica).

Risultato di un’analisi all’equilibrio limite è il valore del fattore di sicurezza di una determinata superficie di scorrimento. I codici di calcolo commerciali usano una procedura automatica per la ricerca della superficie di scorrimento critica, generalmente basata sulla definizione di una griglia di centri di rotazione e di differenti raggi dell’arco circolare utilizzato per approssimare la superficie di scorrimento. Quando un certo numero di superfici di scorrimento è stato analizzato, i valori del fattore di sicurezza in ogni nodo della griglia possono essere collegati da isolinee. Se queste risultano chiuse e individuano un minimo locale del fattore di sicurezza (centro del cerchio critico) l’analisi si può dire compiuta; in caso contrario devono essere utilizzata una griglia di ricerca più ampia che permetta di individuare la superficie critica senza incertezze.

A titolo di esempio, la Fig. 4.1.3 riporta i risultati di analisi di stabilità all’equilibrio limite (espressi come fattore di sicurezza della superficie critica) eseguite in quattro situazioni ideali. Il versante considerato è un fronte di cava abbandonato di altezza limitata ($H = 5$ m) e costituito da terreni ghiaioso-sabbiosi debolmente cementati. Il caso A è certamente il più comune: il terreno si può considerare omogeneo e la falda è assente o comunque depressa rispetto alla sezione di interesse. In queste condizioni, il calcolo del fattore di sicurezza non presenta difficoltà ma il valore ottenuto risente sensibilmente del valore di coesione del materiale, di norma difficile da determinare.

Per quanto riguarda le condizioni idrauliche, invece, l’incertezza è generalmente minore e, con un adeguato piano di indagini, si riesce facilmente a ricostruire l’andamento della superficie piezometrica (caso B). Se non si dispone di dati sufficienti è necessario ipotizzare situazioni idrauliche estreme.

Per quanto lo scorrimento rotazionale sia sicuramente il cinematismo più frequente, vi sono casi in cui il meccanismo di rottura più probabile è quello traslativo. Parliamo ad esempio della stabilità di un profilo di abbandono esposto da tempo agli agenti esogeni, e sul quale si è sviluppata una coltre di alterazione, o di un terreno granulare che contenga al suo interno livelli pelitici sfavorevolmente orientati rispetto al fronte (franapoggio meno inclinato del pendio; Fig. 4.1.3 C). Il punto chiave dell’analisi è in questo caso la determinazione delle resistenze disponibili lungo la superficie di discontinuità, visto che da esse dipende in gran parte la stabilità del fronte.

L’analisi di uno scorrimento traslazionale può essere condotta con uno dei metodi sopra elencati, a condizione che il metodo sia valido per superfici di scorrimento non-circolari (ad esempio quello di Morgenstern e Price). Alternativamente, se la lunghezza del versante è molto maggiore dello spessore potenzialmente instabile, si può utilizzare la soluzione del pendio infinito, una formulazione semplice e molto versatile che sarà discussa in dettaglio nella sezione relativa alla stabilità della coltre di riporto.

Un caso frequente è la valutazione della stabilità di un versante sommerso, ad esempio la sponda di un bacino di scavo per l’estrazione di terreni ghiaiosi o sabbiosi sotto-falda. La presenza dell’acqua nel bacino ha un effetto stabilizzante e, a parità di altre condizioni, un versante sommerso è più stabile rispetto ad uno emerso (Fig. 4.1.3 D; Lambe e Whitman, 1969). L’immersione del terreno, però, può avere nel lungo termine un effetto negativo sulla stabilità delle sponde favorendo la perdita della coesione eventualmente presente. Questo effetto è difficile da quantificare per cui è consigliabile adottare criteri cautelativi quando deve essere garantita la stabilità nel lungo termine.

Terre fini

Valutazione dei parametri di resistenza al taglio

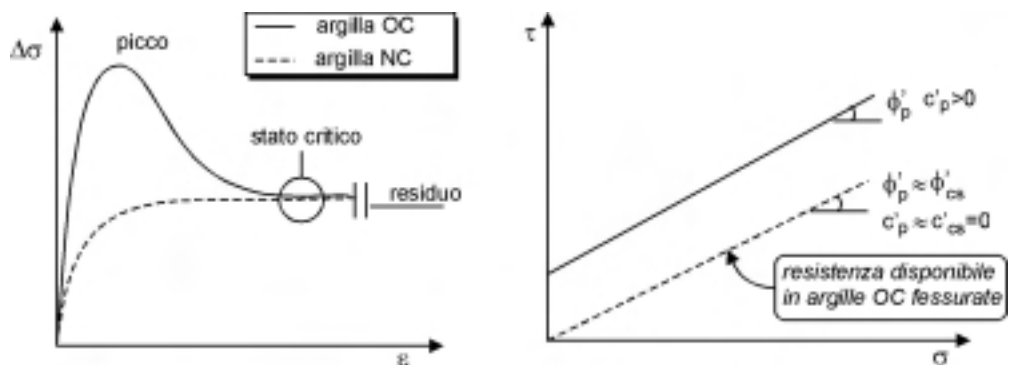
Con riferimento ai tipi litologici di interesse estrattivo regionale, rientrano nella categoria dei terreni fini: le argille e i limi, per laterizi, di pianura alluvionale o di terrazzo; le argille di monte (principalmente argille plioceniche); le argille per gres e ceramiche (argille plioceniche, red beds nelle argille scagliose e alluvioni antiche decalcificate e ferrettizzate). Si tratta in tutti i casi di materiali in cui la frazione limoso-argillosa è *dominante* su quella granulare, ovvero di terreni in cui la percentuale di fini è maggiore del 30-35% e impedisce il contatto tra le particelle più grossolane.

Argille fessurate

La presenza di discontinuità influenza negativamente sia la resistenza non drenata sia quella drenata e controlla il comportamento meccanico dell'ammasso alla scala del versante (Lo, 1970; Petley, 1984). Le resistenze mobilizzate *nel lungo termine* (cioè molto tempo dopo l'abbandono del fronte) sono in generale prossime a quelle di stato critico ($\phi_{cs}, c'_{cs} \approx 0$) piuttosto che a quelle di picco ($\phi_p, c'_p > 0$), e questo anche nel caso di rotture di primo innesco in ammassi non alterati (Fig. 4.1.4; Skempton, 1970; Chandler, 1984). E' plausibile che alla scala del fronte di scavo l'effetto delle discontinuità prevalga su quello dell'argilla intatta.

Dal punto di vista progettuale si tratta di una differenza notevole. La coesione di picco di un terreno argilloso sovraconsolidato può essere anche molto elevata (nelle argille plioceniche, ad esempio, c'_p è dell'ordine dei 20-30 kPa) e teoricamente è in grado di garantire la stabilità del fronte su notevoli pendenze: adottare i parametri di stato critico significa essenzialmente porre $c' \approx 0$ ed accettare pendenze di equilibrio molto inferiori. Progettare con parametri di stato critico può apparire eccessivamente cautelativo ma i dati oggi disponibili suggeriscono che, nel lungo periodo, questa è la scelta migliore. Nel breve termine, il discorso è ovviamente diverso: le fessure, infatti, riducono la coesione non drenata c_u ma non la annullano, ed è questa che garantisce la stabilità dei fronti in fase di coltivazione.

Fig.4.1.4. Comportamento meccanico ideale di un'argilla fortemente sovraconsolidata (OC) e di una normalconsolidata (NC).



Argille intatte

Nel caso di terreni fini non fessurati e non alterati, quali molti depositi argillosi recenti di pianura e di terrazzo alluvionale, le resistenze disponibili sono quelle di *picco* dell'argilla intatta. Trattandosi generalmente di terreni argillosi debolmente sovraconsolidati ad opera di modesti scarichi tensionali o per *aging*, la coesione efficace mantiene valori piuttosto modesti, anche se importanti alla scala dei fronti di scavo. L'annullamento del contributo coesivo può comunque avvenire anche in questo caso nel lungo periodo, quando sul fronte di abbandono si sviluppa una coltre di argilla alterata. Se in fase di progettazione si ritiene che il fronte possa subire nel tempo processi di alterazione, i parametri di resistenza da prendere in considerazione sono ancora una volta quelli di stato critico.

I parametri di stato critico possono essere determinati in modo relativamente economico sia per argille fessurate che non fessurate, da prove su campioni rimaneggiati (Lancellotta, 1987). La condizione in cui testare il terreno, impastato in laboratorio

ad un contenuto d'acqua pari a circa 1.5 volte il limite liquido e consolidato nella scatola di taglio, è quella di normalconsolidazione: i parametri attesi sono quindi $\phi = \phi_{CS}$ e $c' = c'_{CS} \approx 0$ (Fig. 4.1.4) ed ogni valore di c' significativamente maggiore di zero va visto come frutto di un'imprecisione nella prova.

La determinazione dei parametri drenati di picco necessita invece di provini indisturbati, estratti da campioni cubici o prelevati in foro di sondaggio, e può essere eseguita in laboratorio con prove triassiali consolidate-drenate (CD), o consolidate-non drenate (CU), o con prove di taglio diretto (Raviolo, 1993). È utile ricordare che le prove in sito di routine (prove SPT, penetrometrie, carico su piastra) forniscono i soli parametri non drenati di resistenza ($\phi_u = 0$, $c_u > 0$) e per tale ragione non sono utili ai fini di un calcolo della stabilità nel lungo periodo.



Foto 4.1.2. Fenomeno franoso superficiale in pendice argillosa di abbandono.

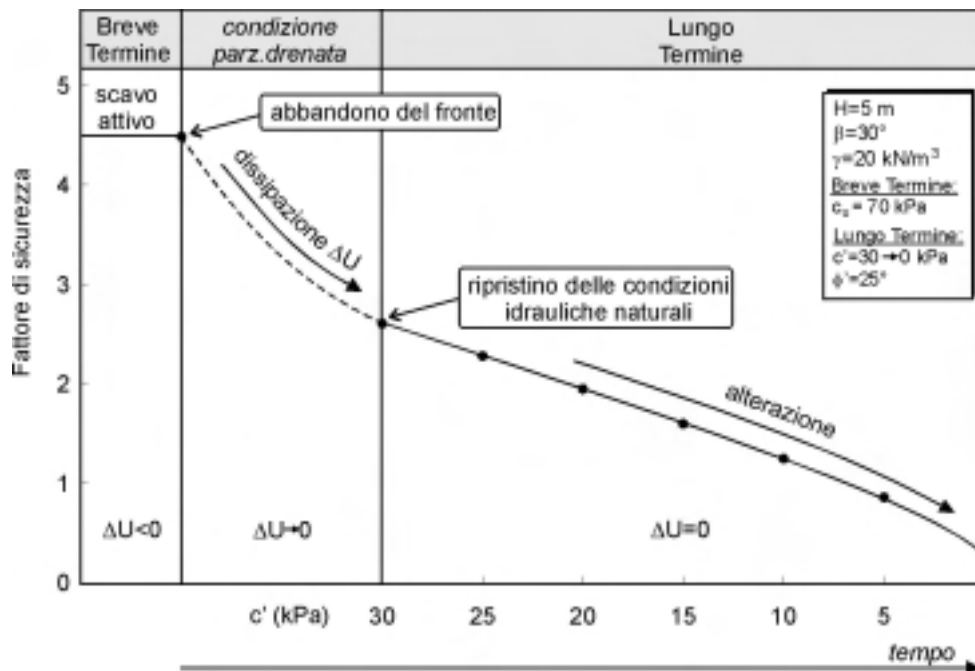
Analisi di stabilità

I cinematismi più frequenti in terreni fini sono lo scorrimento rotazionale (argille non alterate, sia fessurate sia non fessurate) e quello traslazionale (coltre di alterazione sui fronti di abbandono).

In entrambi i casi il fattore di sicurezza può essere calcolato tramite il metodo *dell'equilibrio limite globale*, come precedentemente discusso. La principale differenza rispetto alle terre grossolane sta nella distribuzione delle pressioni interstiziali. I terreni fini, caratterizzati da valori molto bassi di conduttività idraulica, sono in grado di sostenere gradienti idraulici elevati e l'assunzione di falda assente risulterebbe poco realistica. D'altra parte una distribuzione idrostatica delle pressioni dell'acqua a partire da un livello prossimo al piano campagna è spesso troppo cautelativa. Si tratta di un problema di difficile soluzione, che necessita di misure sperimentali del livello di falda per essere risolto con l'affidabilità necessaria.

Nel lungo termine, le resistenze da adottare sono quelle di stato critico, sia per le argille fessurate delle cave di monte sia per le argille intatte di pianura o di terrazzo. Il grafico di Fig. 4.1.5, illustrante questo concetto, indica la diminuzione nel tempo del fattore di sicurezza su un fronte inclinato di 30° , alto 5 m e costituito da argille intatte omogenee. Durante la fase di coltivazione, il fattore di sicurezza si calcola con un'analisi all'equilibrio limite in termini di tensioni totali (analisi non drenata) e nell'esempio considerato risulta molto elevato ($F = 4.49$). Subito dopo l'abbandono del fronte comincia il processo di dissipazione delle sovrappressioni interstiziali e il ritorno a condizioni idrauliche proprie di un versante naturale. Il fattore di sicurezza cala

Fig.4.1.5. Peggioramento delle condizioni di stabilità nel tempo di un fronte di scavo in argille intatte (ΔU = sovrappressioni interstiziali negative indotte dallo scavo).



progressivamente nel tempo, ma non è determinabile se non si hanno misure dirette della pressione dei pori.

Nell'ottica di un progetto di ripristino, comunque, la condizione che interessa è quella di lungo termine, dell'ordine dei decenni. Come si può notare in Fig. 4.1.5, anche nel lungo termine le condizioni di stabilità tendono a peggiorare nel tempo, per l'azione dell'alterazione superficiale. Nell'esempio riportato, il fronte arriva a rottura quando la coesione drenata cala a circa 7 kPa.

Questo schema concettuale è applicabile anche nel caso di argille fessurate, con l'unica eccezione che le resistenze di picco dell'ammasso sono verosimilmente prossime a quelle di stato critico anche *prima* dello sviluppo di una coltre di alterazione. Di conseguenza, all'inizio della fase di lungo termine il fattore di sicurezza è già prossimo a quello finale con $c' \approx 0$ e le condizioni di stabilità del fronte possono risultare critiche in tempi più brevi.

Il progetto di un profilo di abbandono nell'ipotesi di resistenze allo stato critico ($c' = c'_{cs} \approx 0$) e falda prossima al piano campagna appare sicuramente troppo penalizzante, ma sono condizioni che non possono essere escluse a priori. Una soluzione al problema può essere quella di assicurare condizioni idrauliche meno gravose, creando ad esempio un'opportuna rete di drenaggio superficiale o sotterraneo, o migliorando la stabilità della porzione più superficiale con tecniche di ingegneria naturalistica (vedi sezioni seguenti).

Profili di abbandono in roccia

Cinematismo di potenziale rottura

Il comportamento dell'ammasso roccioso è generalmente regolato dalle discontinuità. L'individuazione dei potenziali cinematismi di rottura è fatta mediante proiezioni stereografiche che permettono di identificare quale discontinuità o combinazione di discontinuità possa generare volumi di materiale per i quali la rottura risulti cinematicamente ammissibile. I vantaggi del loro utilizzo si possono individuare nella rapidità, nella semplicità dei dati di ingresso (direzione di immersione ed inclinazione delle discontinuità rilevate in affioramento) e nella possibilità di considerare numerosi meccanismi di rottura. Le proiezioni stereografiche debbono essere necessariamente affiancate da strumenti progettuali adatti alla valutazione delle condizioni di stabilità della scarpata e appositamente scelti in funzione del cinematismo individuato come si vedrà nei paragrafi successivi.



Foto 4.1.3. Fenomeni di crollo in parete di abbandono in una cava di gesso.

In alcuni casi, per litotipi particolarmente deboli o alterati o nel caso di ammassi rocciosi fittamente fratturati, il comportamento del materiale alla scala del versante può essere assimilato a quello di un mezzo continuo equivalente, le cui caratteristiche sono regolate sia dalle caratteristiche della roccia intatta che delle discontinuità. In pratica, l'ammasso roccioso si comporta come una terra nella quale i clasti sono rappresentati dai singoli blocchetti di roccia separati dalle discontinuità ravvicinate (Fig. 4.1.6). In questo caso bisogna necessariamente affidarsi ad uno schema classificativo che permetta di ricavare i parametri di resistenza e deformabilità di un mezzo continuo equivalente che approssima le caratteristiche dell'ammasso reale (Beniawski, 1989; Hoek, 2000).

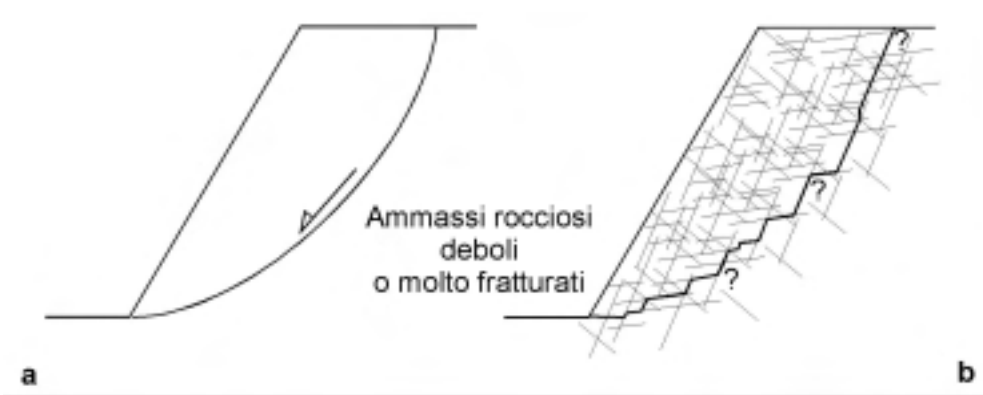


Fig.4.1.6. Rappresentazione schematica del meccanismo di rottura per scorrimento rotazionale (a) in un ammasso roccioso (b).

Scorrimento rotazionale

Lo scorrimento rotazionale è il meccanismo di rottura più comunemente scelto per versanti di grandi dimensioni all'interno dei quali non esista alcun evidente controllo strutturale (es. ammassi rocciosi fittamente fratturati o composti da litotipi particolarmente deboli o alterati). La superficie di scorrimento è assunta generalmente

come curva (Fig. 4.1.6 a) e rappresenta un modello semplificato. Nella realtà, si tratta di una serie di rotture per superamento delle resistenze al taglio disponibili lungo discontinuità pre-esistenti a cui si affianca la rottura di alcuni ponti di roccia intatta che separano giunti adiacenti (Fig. 4.1.6 b).

L'assegnazione delle proprietà di resistenza ad un ammasso roccioso è, probabilmente, il passo più delicato nella verifica della stabilità di versanti artificiali di grandi dimensioni per le difficoltà pratiche ed il costo associato all'esecuzione di prove in sito su volumi di roccia significativi. L'approccio più largamente accettato si basa sull'utilizzo di criteri di rottura tradizionali (Mohr-Coulomb) o specificamente ideati per ammassi rocciosi (Hoek - Brown) associati a schemi classificativi empirici, quali la classificazione RMR (Beniawski, 1989) e la classificazione GSI (Hoek, 2000), di più recente introduzione. Questa metodologia empirica, largamente utilizzata per le opere in sotterraneo, non è sufficientemente collaudata per la stabilità dei versanti. L'analisi a ritroso, quando applicabile, permette di giungere ad una stima più precisa e affidabile dei parametri di resistenza mobilizzati in occasione di fenomeni di instabilità passata.

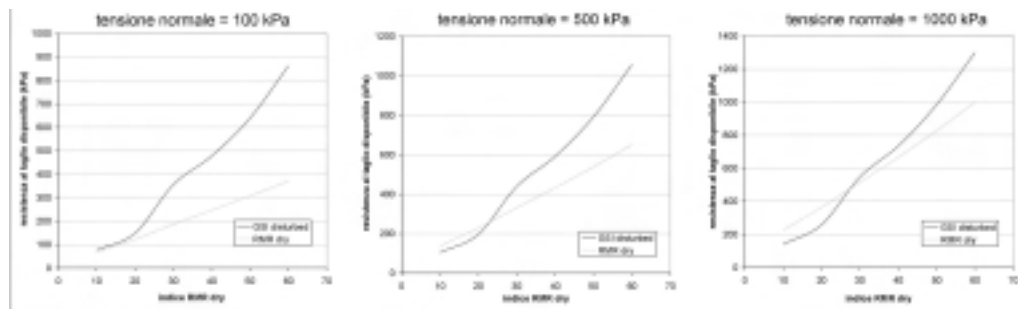
Classificazione dell'ammasso roccioso

La classificazione RMR (Bieniawski, 1989) si basa su parametri, acquisiti direttamente sull'ammasso affiorante. Essi comprendono la resistenza a compressione uniaassiale della roccia intatta, l'indice RQD, il numero dei principali sistemi di discontinuità, le loro caratteristiche in termini di spaziatura, lunghezza, rugosità, apertura, riempimento ed alterazione. A questi si aggiungono le condizioni idrauliche e l'orientazione relativa delle famiglie di discontinuità.

La classificazione GSI (Hoek, 1980) è molto più semplice ed intuitiva e si basa sull'aspetto generale dell'ammasso e sul suo grado di alterazione.

Data l'incertezza e la soggettività dei due sistemi, che sono legati da una relazione empirica ($GSI = RMR \text{ "dry"} - 5$), è consigliabile procedere alla classificazione dell'ammasso per via separata tramite i due metodi per poi verificare la coerenza dei risultati.

Fig.4.1.7. Grafici di confronto tra le resistenze dell'ammasso roccioso disponibili, secondo i criteri di rottura di Mohr-Coulomb (derivato da RMR) e Hoek-Brown (derivato da GSI "disturbed").



Determinazione dei parametri di resistenza

Un criterio di rottura empirico relativamente semplice per ammassi rocciosi fratturati (Hoek e Brown 1980, con modifiche di Hoek, 2000) porta alla seguente forma detta generalizzata:

$$\sigma_1 = \sigma_3 + \sigma_c \left(m_b \frac{\sigma_3}{\sigma_c} + s \right)^a$$

[11]

dove σ_1 e σ_3 sono gli stress principali a rottura, σ_c è la resistenza a compressione uniaassiale della roccia intatta, m_b e s sono parametri che dipendono dal tipo di roccia, dalla forma e grado di mutuo incastro dei singoli blocchi che costituiscono l'ammasso. Il parametro a assume il valore di 0.5 nel caso l'ammasso abbia un sufficiente grado di mutuo incastro, mentre può essere determinato dal valore di GSI nel caso quest'ultimo sia inferiore a 25. I valori di m_b e s possono essere ricavati dagli indici

classificativi dell'ammasso roccioso utilizzando lo schema GSI (Hoek, 2000) oppure indirettamente tramite lo schema RMR.

Il criterio di Hoek-Brown rappresenta un involucro di rottura curvo e, spesso, si ricorre alla sua trasformazione nel criterio lineare di Mohr-Coulomb, per la maggiore facilità di gestione analitica. Esistono vari metodi per la determinazione della coesione e dell'angolo d'attrito equivalenti dall'originario criterio di Hoek-Brown. Per i problemi di stabilità dei versanti di dimensioni rilevanti, le condizioni tensionali possono variare in maniera sensibile nelle diverse regioni attraversate da una possibile superficie di scorrimento e la scelta di un valore di tensione o di un intervallo tensionale appropriato può risultare piuttosto problematico. Hoek e Brown (1977) raccomandano un intervallo di tensioni piuttosto ampio, compreso tra 0 ed un quarto della resistenza a compressione uniaassiale della roccia integra (σ_c).

Alternativamente all'utilizzo del criterio di Hoek-Brown, è possibile ricorrere al classico criterio di Mohr-Coulomb tramite la derivazione dei parametri di resistenza dal valore dell'indice RMR secondo quanto proposto da Beniaowski (1989) tramite le due semplici relazioni seguenti:

$$c = \frac{5 \cdot RMR}{1000} \quad [12]$$

$$\varphi' = 5 + \frac{RMR}{2} \quad [13]$$

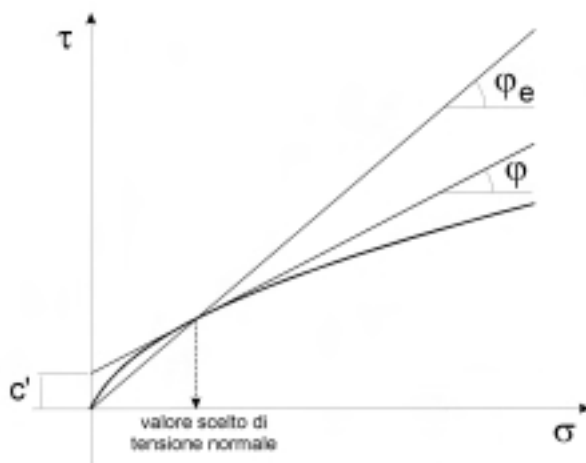


Fig.4.1.8. Illustrazione schematica dei metodi alternativi di approssimazione dell'involucro curvilineo con un involucro lineare.

Il metodo fornisce valori di resistenza generalmente conservativi.

L'analisi a ritroso di precedenti fenomeni di rottura rappresenta invece uno strumento molto utile in quanto permette la determinazione di parametri di resistenza generalmente rappresentativi alla scala del versante. In questo caso è raccomandato l'uso del criterio lineare di Mohr-Coulomb al fine di ridurre al minimo le variabili che concorrono alla definizione del modello.

Analisi all'equilibrio limite

I criteri generali del metodo sono stati brevemente descritti nel paragrafo relativo alla stabilità dei versanti in terreni granulari e si rimanda alla letteratura per i necessari approfondimenti (es. Nash, 1987). Per quanto riguarda le condizioni idrauliche, è opportuno utilizzare la reale superficie freatica desunta da misure puntuali e considerazioni sull'assetto idrogeologico del versante. Qualora mancasse qualsiasi indicazione sulla reale posizione della falda, sarà necessario procedere ad uno studio di sensibilità del fattore di sicurezza al variare della posizione della falda e fare poi assunzioni il più possibile cautelative.

Fenomeni di instabilità lungo le discontinuità

Determinazione dei parametri di resistenza lungo le discontinuità

Il metodo più diffuso per questo scopo è rappresentato dal criterio di rottura di Barton (Barton e Choubey, 1977):

$$\tau = \sigma_n \cdot \tan \left(\varphi_r + \left(JRC \cdot \log \frac{JCS}{\sigma_n} \right) \right) \quad [14]$$

dove σ_n è lo sforzo agente in direzione normale al giunto, JRC (Joint Roughness Coefficient) è un coefficiente che descrive la rugosità del giunto, JCS (Joint Compressive Strength) è la resistenza a compressione uniassiale della roccia lungo la discontinuità e φ_r è l'angolo d'attrito residuo lungo il giunto. Si tratta di un criterio di rottura dipendente dalla tensione normale agente lungo la discontinuità il cui involucro di rottura risulta curvo.

Il JCS può essere espresso tramite la resistenza a compressione uniassiale della roccia intatta, se le pareti del giunto non sono alterate, o indirettamente utilizzando il *martello di Schmidt*.

Il JRC può essere derivato dal confronto qualitativo tra i profili ricavati tramite *profilometro* lungo le discontinuità e quelli tipici (Barton e Choubey, 1977) oppure, in maniera indiretta, tramite prove di scivolamento lungo giunto, da effettuarsi in sito su campioni rappresentativi. In quest'ultimo caso il JRC viene indirettamente ricavato dalla [14] a patto che siano noti JCS e φ_r .

L'angolo d'attrito residuo della discontinuità (φ_p) corrisponde all'angolo d'attrito di base (φ_b) nel caso di giunti non alterati. In caso contrario si può ottenere una stima indiretta con la prova del martello di Schmidt applicando la relazione empirica:

$$\varphi_r = (\varphi_b - 20) + 20 \cdot \frac{r}{R} \quad [15]$$

in cui r ed R indicano le altezze di rimbalzo del martello di Schmidt sulla superficie del giunto e su una superficie levigata. A sua volta l'angolo d'attrito di base (φ_b) può essere misurato tramite prove di taglio lungo superfici di roccia piane, oppure derivato da tabelle di uso comune (Hoek e Bray, 1981).

In linea teorica la resistenza lungo una discontinuità può, quindi, essere descritta sulla base di misure di campagna e semplici prove di taglio in sito e/o laboratorio tramite il criterio empirico di Barton. E' comunque possibile che, per la presenza di riempimento, la resistenza stimata con il criterio di Barton possa diminuire bruscamente fino a diventare uguale a quella del materiale di riempimento. E' possibile assimilare ad una discontinuità con riempimento anche gli interstrati terrosi (argilliti, siltiti, marne argillose, ecc.) che si trovano in molte formazioni rocciose sedimentarie affioranti nell'Appennino settentrionale: la resistenza al taglio lungo l'interstrato risulterà interamente regolata dalle caratteristiche di resistenza del materiale terroso (vedi sezione "Terre fini").

Scorrimento Traslazionale

Nella realtà regionale di interesse gli scorrimenti traslazionali si verificano tipicamente in ammassi rocciosi stratificati e litologicamente complessi (Flysch). In linea generale, è possibile distinguere due differenti tipologie di scorrimento traslazionale:

- scorrimento traslazionale planare, nel quale la superficie di scorrimento, parallela al pendio, è rappresentata da un singolo piano di discontinuità
- scorrimento traslazionale di un cuneo, costituito da due piani di discontinuità di cui uno basale meno inclinato del pendio ed uno di nicchia più inclinato del pendio (scorrimento lungo superficie multipla).

L'analisi di stabilità di uno scorrimento traslazionale è semplice e può essere condotta con diversi metodi sia grafici (es. Attewell e Farmer, 1976; Hudson e Harrison,

1997) sia analitici (es. Bishop, 1955; Janbu et al., 1956). La scelta del metodo dipende essenzialmente dalla tipologia di movimento, dai dati disponibili e dallo scopo generale dell'analisi, in primo luogo se lo studio è di tipo areale o puntuale.

Analisi cinematica.

Affinché uno scorrimento planare si possa manifestare, devono essere verificate quattro condizioni (Hudson e Harrison, 1997):

- l'inclinazione del versante deve essere maggiore dell'inclinazione del potenziale piano di scivolamento, ovvero il piano di discontinuità deve essere a franapoggio rispetto al pendio;
- il potenziale piano di scivolamento deve emergere dal versante, ovvero il blocco roccioso deve essere in grado di muoversi;
- l'immersione del piano di scivolamento deve giacere approssimativamente entro $\pm 20^\circ$ rispetto all'immersione del versante;
- l'inclinazione del potenziale piano di scivolamento β_s deve essere uguale o maggiore dell'angolo di attrito ϕ .

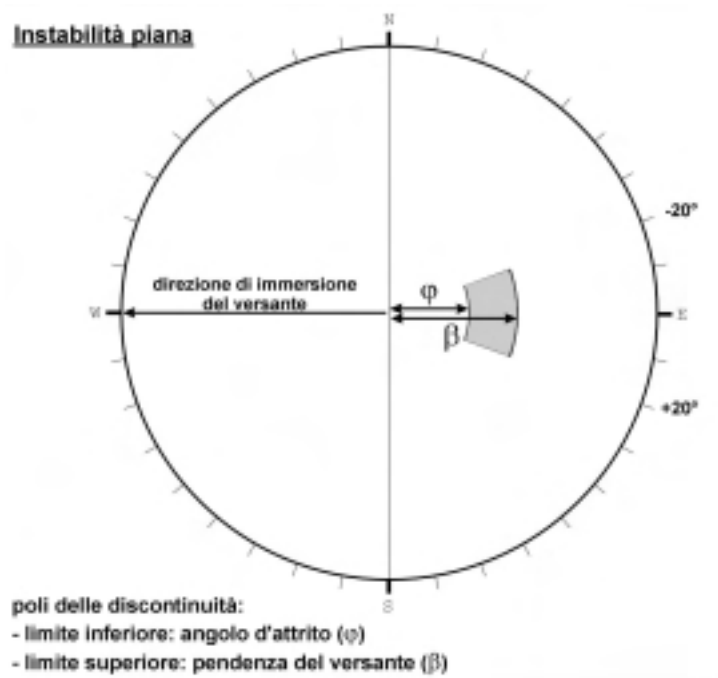


Fig.4.1.9. Definizione della zona di instabilità per l'analisi cinematica di scorrimento planare (Hudson & Harrison, 1997).

Le condizioni 1, 2 e 3 sono di tipo geometrico e, se verificate, indicano semplicemente che il blocco è potenzialmente in grado di muoversi. La condizione 4, invece, è di tipo meccanico ed esprime le condizioni di equilibrio statico del blocco (Fig. 4.1.9). Quest'ultima non ha validità assoluta ma è vera solo nelle condizioni di coesione nulla lungo il piano di discontinuità, di pressioni interstiziali nulle (assenza di falda) e di effetto trascurabile delle terminazioni in testa e al piede della superficie di scorrimento (pendio infinito). In tutte le altre condizioni, tale assunzione non è più valida. Nel caso sia presente una falda in movimento all'interno del versante, ad esempio, l'angolo limite per la stabilità è più basso dell'angolo di attrito ($\beta_{s-lim} < \phi$), fino a ridursi della metà per falda a piano campagna e flusso parallelo al versante $\tan(\beta_{s-lim}) \cong 1/2 \tan(\phi)$.

Ad ogni modo, l'analisi grafica è un mezzo veloce per l'individuazione della possibilità cinematica di movimento e per una valutazione di massima delle condizioni di stabilità.

Analisi all'equilibrio limite

Scorrimento traslazionale planare

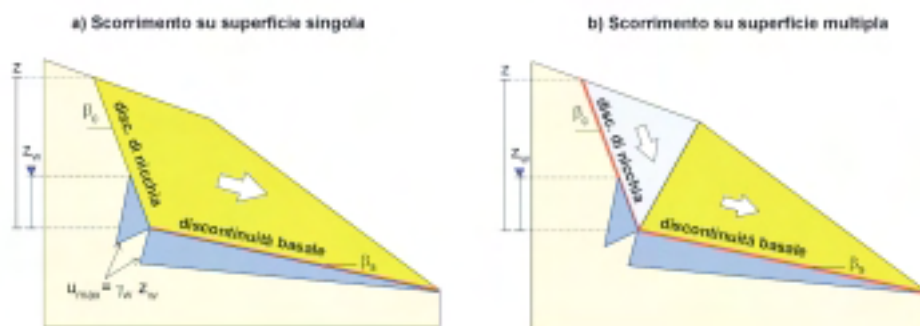
Nel caso dello scorrimento traslazionale planare l'analisi all'equilibrio limite può essere condotta adottando le semplificazioni proprie del pendio infinito. La formula

del pendio infinito verrà discussa in dettaglio nella sezione relativa alla stabilità della coltre di ripristino e, dal punto di vista numerico, quanto detto vale anche nel caso di scorrimento traslativo in roccia. Tale semplificazione trascura l'effetto dei tratti in entrata e in uscita della superficie di scorrimento (terminazioni): essa è accettabile solo quando il rapporto tra spessore del blocco D_r e lunghezza L_r è molto piccolo (< 0.05). Quando il contributo degli sforzi agenti lungo le terminazioni non è trascurabile, la formula del pendio infinito può portare a risultati conservativi eccessivamente gravosi. In tali casi è necessario ricorrere a soluzioni più generali dell'equilibrio limite, che prevedano lo scorrimento su superfici di forma irregolare (vedi sezione "Stabilità dei versanti in terreni granulari").

Scorrimento traslazionale lungo piano singolo o doppio

La condizione di superficie topografica non parallela alla superficie di scorrimento è frequente nei versanti artificiali e generalmente è data da una discontinuità basale meno acclive del versante e da una discontinuità di nicchia fortemente inclinata (Fig. 4.1.10). La discontinuità basale guida lo scorrimento traslativo e può coincidere con un piano di strato (eventuale interstrato a minore competenza) o una discontinuità molto persistente. Il fattore di sicurezza non può più essere calcolato tramite la relazione semplificata [5] venendo a cadere l'assunzione propria di pendio infinito.

Fig.4.1.10. Schema concettuale di scorrimento traslazionale di un cuneo di roccia nei due casi di scivolamento sulla sola superficie basale (a) e su entrambe le superfici (b).



Le condizioni di stabilità all'equilibrio limite del blocco roccioso possono essere calcolate considerando due situazioni distinte:

- scorrimento su superficie singola: lo scorrimento avviene solo lungo discontinuità basale e la discontinuità di nicchia si apre senza mobilitare alcuna resistenza (Fig. 4.1.10 a)
- scorrimento su superficie multipla: lo scorrimento avviene sia lungo la discontinuità basale sia lungo la discontinuità di nicchia, che quindi mobilita una certa aliquota di resistenza al taglio (Fig. 4.1.10 b)

Il primo caso è quello generalmente assunto nei versanti in roccia, dove il blocco potenzialmente instabile è visto come una massa compatta all'interno della quale non sono possibili fenomeni di scorrimento. Tutto il movimento si concentra così lungo il piano basale e la discontinuità di nicchia ha la sola funzione di separare il blocco dall'ammasso retrostante, senza però contribuire in modo attivo alle spinte destabilizzanti. Il fattore di sicurezza può essere ricavato in maniera diretta dall'equazione di equilibrio statico del blocco (Priest, 1993).

Nel secondo caso (Fig. 4.1.10 b) si assume che lo scorrimento avvenga anche lungo la discontinuità di nicchia, così che il cuneo di roccia superiore contribuisca attivamente al movimento del blocco. Poiché tale scorrimento sia possibile, è necessario ipotizzare che si abbia la rottura interna del blocco lungo un piano immergente all'interno del versante, in modo tale da compensare la diversa direzione di movimento dei due cunei, e che si formi una zona di *crushing* al piede del cuneo superiore.

Il fattore di sicurezza può essere calcolato considerando l'equilibrio statico di entrambi i blocchi che, a causa della presenza dell'interazione tra i due, risulta indeterminato. Generalmente si fanno delle assunzioni riguardanti l'angolo d'inclinazione della

forza risultante tra i due blocchi e si attribuiscono valori di tentativo alla stessa fino a che i fattori di sicurezza dei due blocchi non coincidono (Nash, 1987; Priest, 1993). Visto che il fattore di sicurezza complessivo è funzione dell'angolo assunto, è consigliabile un'analisi di sensitività su tale parametro.

In entrambi i casi (scorrimento su superficie singola, scorrimento su superficie multipla), si assume solitamente una distribuzione idrostatica della pressione dell'acqua con la profondità lungo la discontinuità di nicchia, mentre per la forza idraulica lungo la discontinuità basale si considera una diminuzione lineare delle pressioni, da un valore massimo u_{max} al contatto con la discontinuità in nicchia ad un valore minimo nullo all'uscita della superficie di scorrimento (Fig. 4.1.10 a).

Il fattore di sicurezza di uno scorrimento su superficie multipla può essere calcolato anche utilizzando le soluzioni dell'equilibrio limite per superficie non circolare (es. Morgenstern e Price, Janbu rigoroso ecc.), implementate nella maggior parte dei software commerciali. Purtroppo però, se la discontinuità di nicchia è fortemente inclinata, come accade generalmente nei fronti di scavo in roccia, possono insorgere problemi di instabilità numerica (es. GeoSlope, 1999) ed il calcolo non converge. L'approccio semplificato a cui si è fatto riferimento costituisce un'alternativa efficace ai metodi iterativi più generali.

Il fattore di sicurezza che si ottiene nel caso di scivolamento lungo superficie multipla è sensibilmente più basso di quello calcolato per lo scivolamento lungo superficie singola. Assume quindi particolare importanza il riconoscimento della possibilità di scorrimento lungo un'eventuale discontinuità di nicchia che può essere verificata tramite i metodi classici di rappresentazione spaziale dei piani (proiezione stereografica).

Scorrimento di cuneo

La geometria del blocco è solitamente tetraedrica, formata dalla mutua intersezione di tre discontinuità (due basali ed una di nicchia) e la parete, oppure dall'intersezione tra due discontinuità, la parete e la sommità del versante (Fig. 4.1.11). Vengono così mobilitate le resistenze disponibili su entrambi i piani in ragione alla sollecitazione normale presente sugli stessi e alle loro caratteristiche di resistenza che debbono esse-

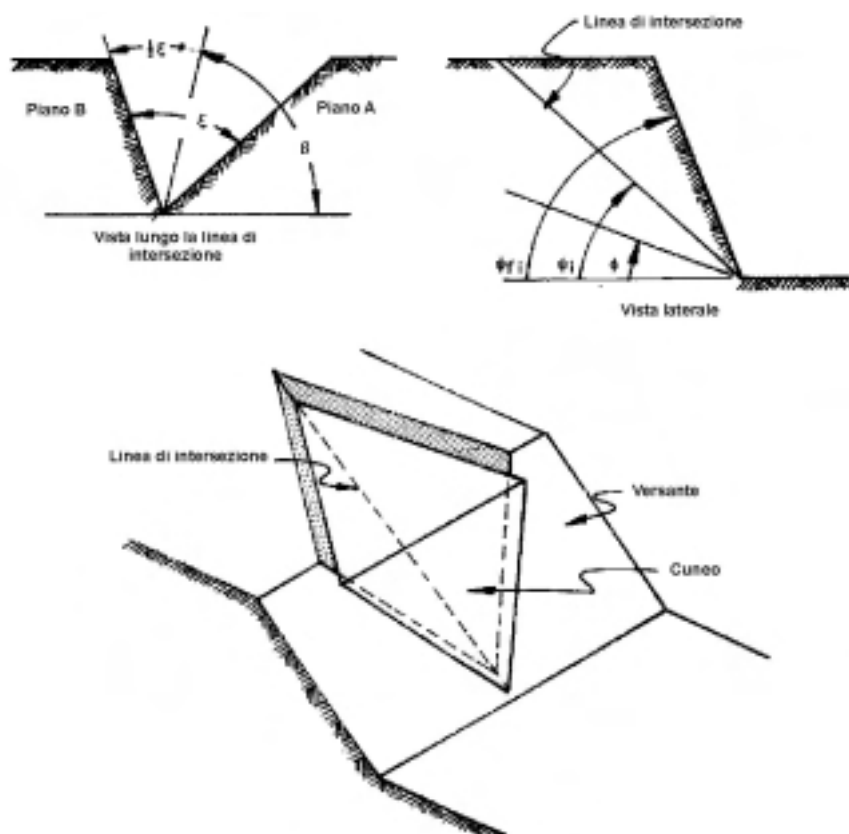


Fig.4.1.11. Scorrimento di un cuneo di roccia: illustrazione schematica (Hoek e Bray, 1981).

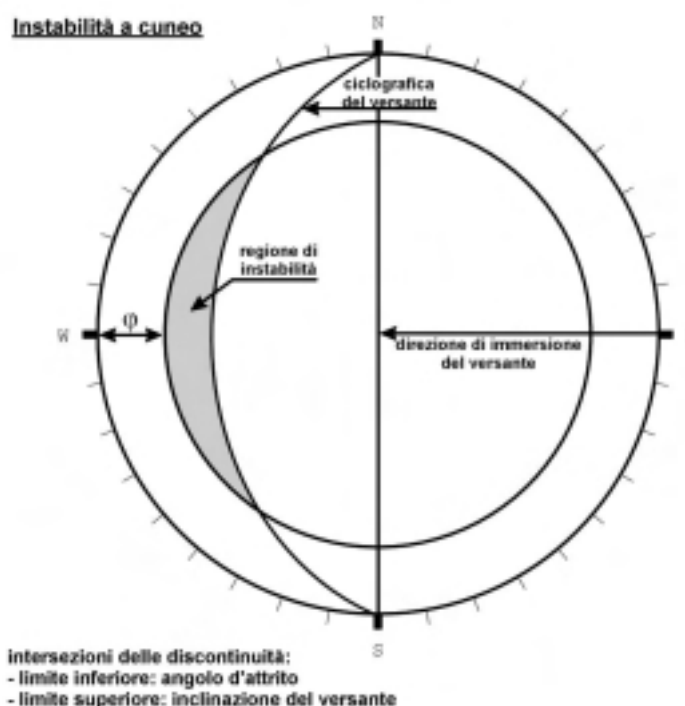
re valutate separatamente. Il movimento del blocco avviene lungo la direzione coincidente con la linea di intersezione dei due piani basali sui quali poggia il blocco.

Analisi cinematica

Come nel caso precedente, il movimento è essenzialmente traslazionale ma avviene lungo la linea di intersezione dei due piani che costituiscono la base del cuneo di roccia instabile. In questo caso i criteri geometrici sono i seguenti (Hudson e Harrison, 1993):

1. l'inclinazione del versante deve essere maggiore dell'inclinazione della linea di intersezione e cioè deve emergere dal versante;
2. l'inclinazione della linea di intersezione delle due discontinuità piane deve essere tale da raggiungere il valore di resistenza disponibile sui due piani: nel caso puramente attrittivo essa deve avere inclinazione maggiore dell'angolo d'attrito.

Fig. 4.1.12. Scorrimento di cuneo: definizione della zona di instabilità (ammissibilità cinematica di movimento).



Tali criteri sono riportati in forma schematica nello stereodiagramma di Fig. 4.1.12, dove in colore grigio è mostrata la regione di instabilità per le intersezioni delle discontinuità. Queste ultime vengono individuate dai punti di intersezione delle ciclografiche rappresentative dei piani di discontinuità. La regione di instabilità è definita da un arco di cerchio di raggio pari all'angolo d'attrito e da un tratto della ciclografica del versante.

Dati i limiti derivati dalle eccessive semplificazioni, si consiglia di utilizzare questo tipo di analisi esclusivamente per valutare l'ammissibilità cinematica del movimento e non per giungere a valutazioni delle condizioni di stabilità.

Analisi all'equilibrio limite

La valutazione delle condizioni di stabilità di un blocco tetraedrico possono venire valutate tramite l'utilizzo congiunto della proiezione stereografica e dell'analisi vettoriale delle forze.

Nel caso generale di scivolamento su due piani di discontinuità (Fig. 4.1.13 A) lungo la direzione coincidente con la linea di intersezione, il fattore di sicurezza per il blocco tetraedrico che scivola sui piani 1 e 2 può essere espresso come:

$$F_S = \frac{c'_1 A_1 + [n_1] \tan \varphi'_1 + c'_2 A_2 + [n_2] \tan \varphi'_2}{[S]} \quad [17]$$

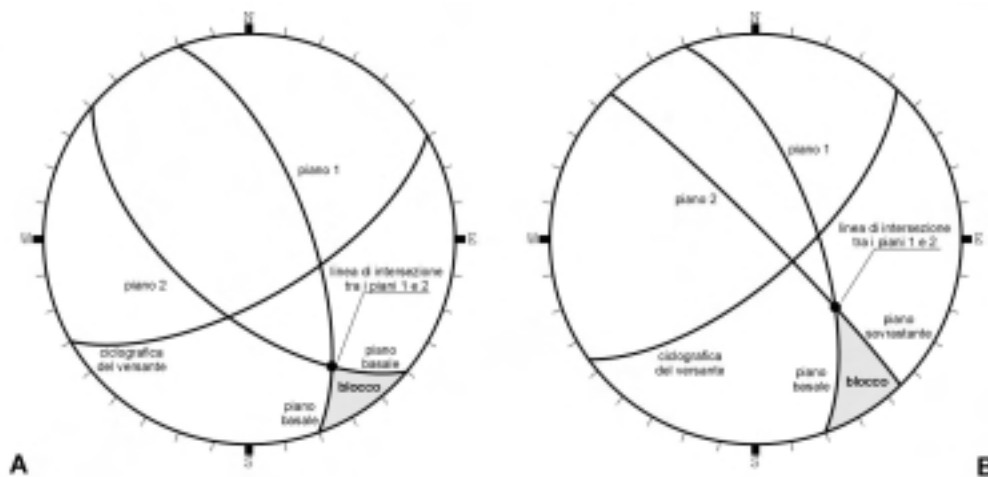


Fig.4.1.13. Proiezioni sull'emisfero inferiore che illustrano la mutua relazione tra discontinuità e blocco tetraedrico:
 (A) entrambe le discontinuità costituiscono piani basali del blocco,
 (B) uno dei piani di discontinuità è sovrastante il blocco e ciclografica relativa risulta concava rispetto al blocco.

dove $[n_1]$ ed $[n_2]$ rappresentano le forze normali agenti rispettivamente sui piani 1 e 2 e $[s]$ è l'intensità della forza di taglio agente lungo la linea di intersezione tra i piani 1 e 2.

Nel caso di scivolamento lungo un unico piano di discontinuità (Fig. 4.1.13 B) la [17] si semplifica annullando i termini relativi alla resistenza disponibile lungo il piano 2. La direzione di azione della pressione dell'acqua agente sui singoli piani deve essere valutata attentamente in funzione della posizione relativa tra il blocco ed il piano della discontinuità. Nel caso sia presente una discontinuità di nicchia (piano 3) è necessario tener conto anche della forza idraulica che agisce su di essa.

Il procedimento per ricavare $[n_1]$, $[n_2]$ ed $[s]$ da inserire nella [17] consiste essenzialmente in:

- rappresentare i piani che delimitano il tetraedro tramite proiezione stereografica sull'emisfero inferiore e calcolare le orientazioni ed intensità delle varie forze agenti sul tetraedro (gravità, forze idrauliche ed eventuali forze dovute a fattori esterni);
- calcolare la risultante r di tutte le forze agenti sul blocco (somma delle componenti cartesiane);
- scomporre la risultante r nelle sue componenti $[n_1]$, $[n_2]$ normali rispettivamente ai piani 1 e 2 e $[s]$ agente lungo la linea d'intersezione dei piani stessi (scomposizione algebrica o metodi grafici).

Tutti i metodi all'equilibrio limite per il calcolo del fattore di sicurezza relativo allo scivolamento di un cuneo di roccia assumono che i momenti abbiano un'influenza trascurabile nel processo di rottura e non tengono conto dell'eventuale resistenza a trazione delle discontinuità che, nella realtà, potrebbe essere data da ponti di roccia presenti lungo le discontinuità.

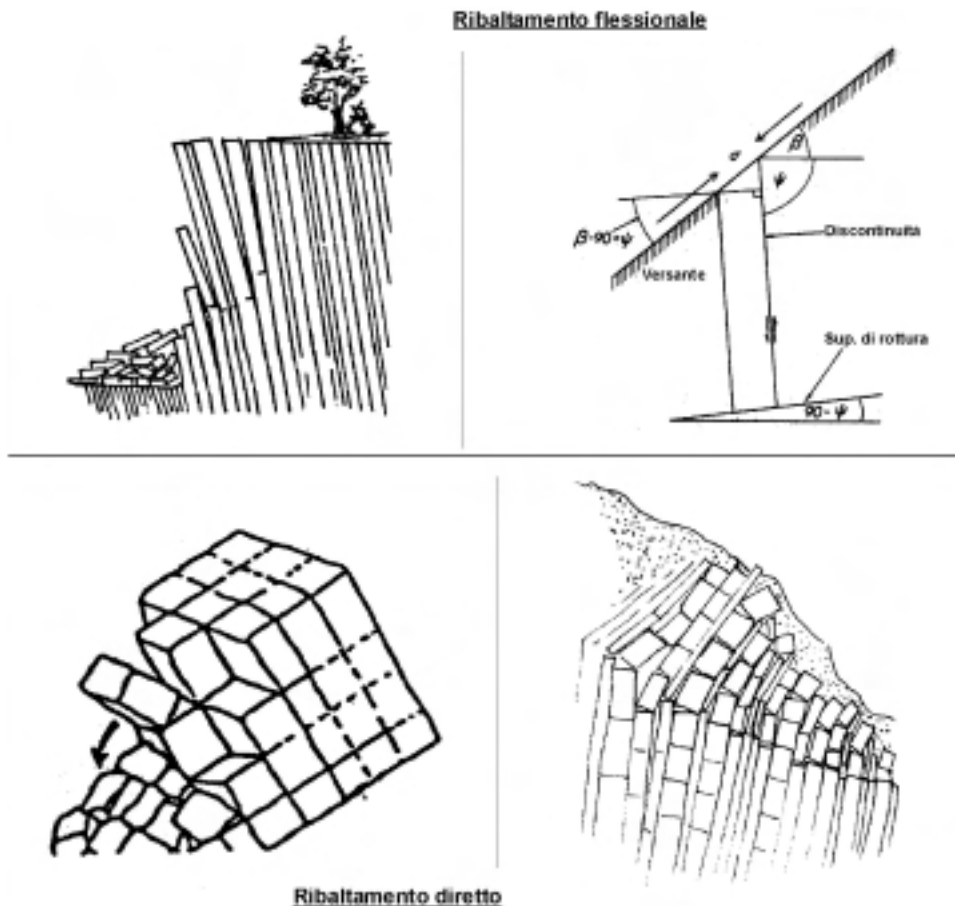
Ribaltamento

I fenomeni di instabilità per ribaltamento vengono generalmente divisi in movimenti per ribaltamento flessionale e ribaltamento a blocchi (Fig. 4.1.14; Cruden e Varnes, 1993).

Il ribaltamento flessionale si verifica quando un sistema di discontinuità subverticale separa in modo continuo lastre di roccia che, se sollecitate dalla parte di monte, o facilitate dall'effetto del peso proprio nel caso di leggera inclinazione a reggipoggio delle discontinuità, tendono a flettere fino a raggiungere le condizioni di rottura (Hoek e Bray, 1981).

Il ribaltamento a blocchi, o ribaltamento diretto, avviene quando singole colonne o lastre di roccia sono separate da giunti ortogonali ai piani che le separano. Il presupposto necessario è la presenza di un set di discontinuità con elevati valori di inclinazione, subparallelo al pendio e disposto preferibilmente a reggipoggio rispetto allo stesso.

Fig.4.1.14. Esempi schematici di fenomeni di ribaltamento diretto e flessionale.



Analisi cinematica

Ribaltamento flessionale e instabilità flessionale

L'unica condizione puramente geometrica prevista dalla verifica cinematica del ribaltamento flessionale riguarda l'esistenza di discontinuità subparallele al pendio e caratterizzate da elevati valori di inclinazione. Hudson e Harrison (1997) includono una seconda condizione ricavata dall'assunzione semplificativa che il ribaltamento inizi da un movimento di taglio lungo le discontinuità nella direzione di immersione (Fig. 4.1.15). In questo caso si può esprimere la condizione:

$$\beta \geq \varphi + (90 - \psi)$$

[18]

dove ψ è l'inclinazione della discontinuità, φ l'angolo d'attrito lungo la discontinuità e β l'inclinazione del pendio (Fig. 4.1.15). Visto che la [18] include solamente angoli, può agevolmente essere rappresentata graficamente in uno stereodiagramma che include i poli delle discontinuità e la ciclografica del versante. Inoltre, la direzione di immersione del piano di movimento deve giacere entro un intervallo di $\pm 20^\circ$ rispetto alla direzione di immersione del versante (Fig. 4.1.15). Il range può anche essere cautelativamente esteso (Cruden, 1989; Goodman, 1980).

Nella Figura 4.1.15 è stata inclusa una seconda regione di instabilità flessionale. In questo caso, la deformazione può avvenire per flessura della lastra vicino al piede del versante seguita da rottura per scorrimento della lastra che si trova al di sopra della zona soggetta a instabilità flessionale. Esistono alcuni semplici metodi analitici (Cavers, 1981; Goodman, 1980) che forniscono la lunghezza limite della lastra di roccia al di là della quale può avvenire la rottura per flessione. Di fatto l'instabilità flessionale è un tipo di rottura che si osserva raramente ed i metodi di analisi non sono in grado di fornire risultati rigorosi.

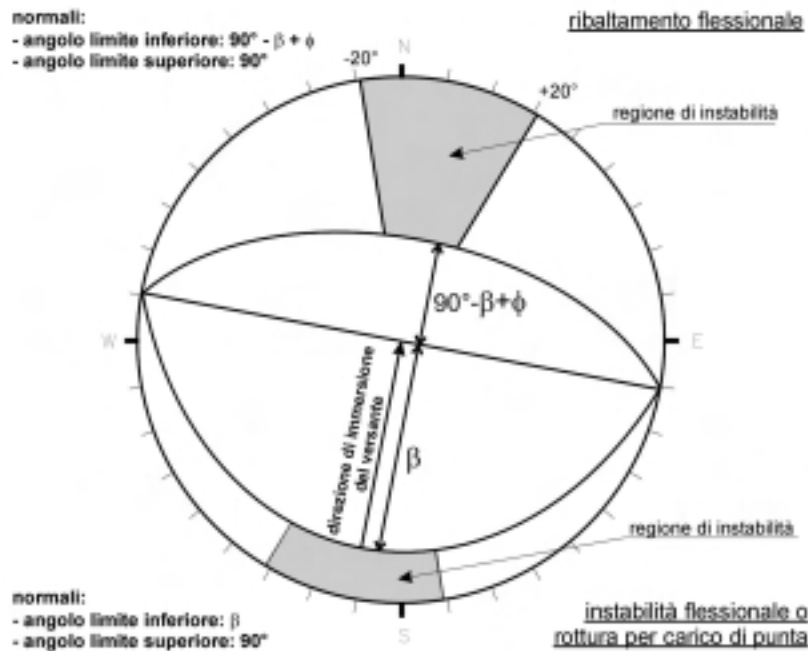


Fig.4.1.15. Definizione delle regioni di instabilità per il ribaltamento e l'instabilità flessionale.

Ribaltamento diretto

Le due condizioni per la verifica cinematica (Hudson e Harrison, 1993) sono:

1. debbono esistere due set di discontinuità piani la cui intersezione immerga verso l'interno del versante in modo da produrre le colonne di roccia con inclinazione superiore al valore $90 - \phi$;
2. deve esistere un set di discontinuità che costituisca la base dei blocchi ribaltanti.

Le discontinuità basali delle colonne/blocchi ribaltanti possono avere immersione a franapoggio.

La condizione 1 è rappresentata graficamente dalla forma conica limitata a $\pm 20^\circ$ rispetto alla direzione opposta a quella di immersione del versante e inferiormente dal valore $90 - \phi$. La condizione 2 riguarda i poli dei piani basali ed è rappresentata da un semicerchio limitato superiormente dal valore dell'angolo d'attrito al di sopra del quale si potrebbe avere scivolamento lungo la superficie basale piuttosto che ribaltamento (Fig. 4.1.16).

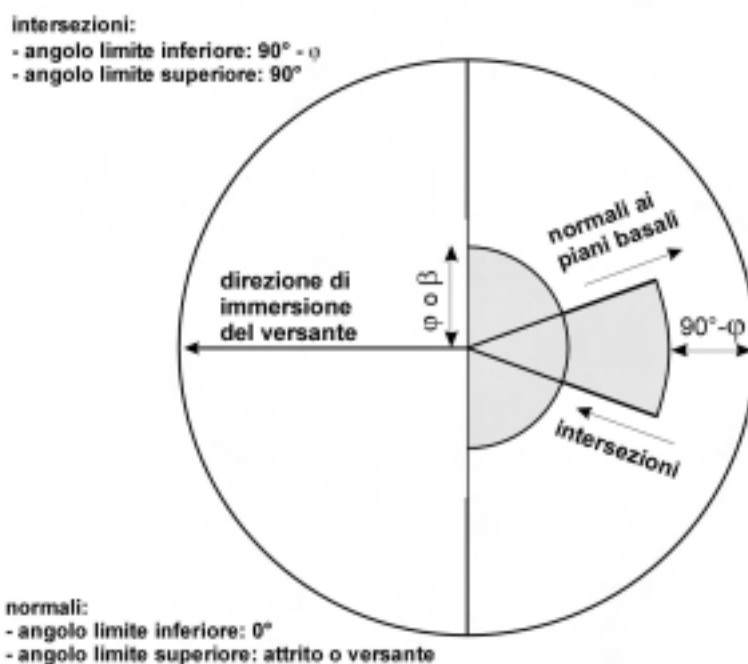


Fig.4.1.16. Definizione della regione di instabilità per il ribaltamento a blocchi.

Tra i metodi di analisi all'equilibrio limite il più largamente utilizzato è probabilmente quello proposto di Goodman (1980) che schematizza il problema come una serie di blocchi poggianti su una base a gradini: il momento destabilizzante esercitato dai blocchi superiori determina lo scivolamento dei sottostanti ed il progredire del movimento.

Controllo dei fenomeni di crollo

Il progetto dei profili di abbandono di una cava può includere, a causa di limitazioni di natura morfologica o per semplice scelta progettuale, porzioni di pareti rocciose molto acclivi per le quali non è prevista copertura. In questo caso è necessario prevedere il controllo di eventuali fenomeni di crollo indipendentemente dai risultati ottenuti dalle analisi volte all'individuazione dei cinematismi di potenziale rottura. Le semplificazioni introdotte dalle analisi cinematiche in termini di raggruppamento delle discontinuità in famiglie, ed i limiti insiti nelle stesse tecniche di rilevamento geomeccanico, non permettono di escludere piccoli fenomeni di crollo di massi nemmeno quando le verifiche riguardanti i principali cinematismi di rottura risultano negative. L'unico metodo per la valutazione qualitativa della potenzialità di crollo e per la stima delle massime dimensioni dei blocchi è rappresentato dal rilevamento di campagna dei depositi di crollo presenti ai piedi della parete in studio. Le dimensioni dei blocchi rilevati e le distanze percorse dagli stessi costituiscono importanti dati sperimentali per la progettazione di opportuni profili gradonati o di adeguate opere di difesa quali reti paramassi.

Il trattamento analitico dei fenomeni di crollo include equazioni che descrivono il moto di caduta libera, l'impatto con il terreno ed il rimbalzo, il rotolamento e lo scivolamento lungo il pendio (Giani, 1992). Procedure automatiche di elaborazione permettono la simulazione bidimensionale e tridimensionale dei fenomeni di crollo ai fini della stima di:

- possibili percorsi di caduta lungo il versante;
- velocità e massima energia di impatto dei blocchi;
- altezze delle traiettorie di caduta rispetto al versante.

Le suddette simulazioni possono essere inoltre utilizzate per la valutazione dell'influenza delle diverse possibili geometrie di abbandono (gradonature) sul problema. Un'opportuna gradonatura costituisce, infatti, nella maggior parte dei casi il miglior rimedio ai fenomeni di crollo in quanto ne impedisce o ne limita la propagazione lungo il pendio prima che le masse acquistino un'elevata energia cinetica.

Modellazione numerica

Esiste una varietà di metodi numerici di modellazione, quali il metodo degli elementi finiti e delle differenze finite per analisi di un mezzo continuo e quello degli elementi distinti per analisi di un mezzo discontinuo.

I metodi di modellazione numerica presentano indubbi vantaggi rispetto ai tradizionali metodi all'equilibrio limite: essi permettono, innanzi tutto, di superare le limitazioni legate alla definizione della superficie di scorrimento ed alla contemporanea mobilitazione delle resistenze lungo la stessa. Consentono inoltre di valutare in maniera più accurata e realistica il comportamento del versante in termini di condizioni tensionali e stato deformativo.

L'utilizzo della sola modellazione numerica per la valutazione delle condizioni di stabilità di un versante artificiale roccioso è, in generale, sconsigliata. E' bene procedere, in ogni caso, all'analisi tramite un metodo semplice e facilmente controllabile (equilibrio limite) per avere un termine di paragone. I risultati, sebbene non direttamente confrontabili, dovrebbero fornire indicazioni simili circa le condizioni di stabilità.

Come detto in precedenza a riguardo dello scorrimento rotazionale in roccia, per ammassi fittamente fratturati per i quali non esista un evidente controllo strutturale si può ricorrere all'approssimazione ad un mezzo continuo equivalente ideale con il

quale si tenta di riprodurre il comportamento dell'ammasso roccioso, tenendo conto sia delle caratteristiche della roccia intatta che delle discontinuità. Nei modelli numerici che riproducono il comportamento di un mezzo continuo, il campo delle deformazioni è sempre continuo, non esistono superfici definite di rottura e la posizione di quest'ultima viene dedotta dalle zone di concentrazione degli sforzi di taglio. Nel caso di modellazione di mezzi discontinui (es. metodo degli elementi distinti) l'ammasso roccioso viene considerato come un sistema costituito da un insieme di blocchi che interagiscono lungo i contatti e sono liberi di muoversi e compenetrarsi. Le discontinuità, in questo caso, sono considerate come zone di interazione tra i blocchi alle quali viene assegnato un modello di comportamento distinto da quello della roccia intatta che costituisce i blocchi.

Per la trattazione specifica dell'argomento si rimanda ai testi specifici (Cundall, 1971, 1976, 1980; Detournay et al., 1999).

Incertezza ed analisi probabilistiche

Le incertezze associate con l'esatta determinazione delle proprietà geotecniche e geomeccaniche dei materiali e delle condizioni idrauliche del versante ha spinto numerosi autori a sostenere la validità dei metodi probabilistici rispetto al tradizionale approccio deterministico.

Tale orientamento deriva dal riconoscimento che tutti i fattori che governano la stabilità dei versanti, artificiali o naturali che siano, presentano una variabilità naturale e che è praticamente impossibile attribuire valori certi alla maggior parte di essi.

I metodi deterministici possono tenere in considerazione l'incertezza solamente attraverso le cosiddette analisi di sensibilità o analisi parametriche, nelle quali un ampio campo di possibilità viene considerato per ottenere una stima dell'effetto della variazione dei parametri. L'utilizzo di un metodo probabilistico implica, invece, la definizione a priori delle distribuzioni di densità di probabilità dei vari parametri in gioco e fornisce come risultato la probabilità percentuale che il versante sia instabile.

Data la complessità del problema e l'elevato numero di variabili, per la valutazione probabilistica della stabilità di un versante vengono solitamente utilizzate tecniche di simulazione. La tecnica più conosciuta è rappresentata dal metodo Monte Carlo, nel quale le funzioni di distribuzione di ogni variabile stocastica debbono essere conosciute o stimate. Da ogni distribuzione, il valore del parametro viene campionato casualmente ed si ottiene così il valore della funzione (fattore di sicurezza). Il calcolo viene ripetuto un elevato numero di volte in modo da ottenere una distribuzione significativa del fattore di sicurezza. La probabilità di rottura viene così calcolata come il rapporto tra il numero dei casi nei quali è avvenuta la rottura ed il numero totale dei casi.

L'approccio probabilistico è teoricamente più corretto e permette di superare le limitazioni proprie di un approccio puramente deterministico, ma riserva due principali svantaggi. Il primo riguarda la difficoltà di conoscere la funzione di distribuzione di ogni variabile. Il secondo riguarda l'interpretazione del risultato ottenuto, cioè l'effettivo significato del valore di probabilità di rottura.. Quando il fattore tempo gioca un ruolo importante, inoltre, come nei versanti di abbandono e ripristino, la probabilità di rottura deve essere necessariamente tenuta molto bassa.

Stabilità della coltre di ripristino

Valutazione dei parametri di resistenza al taglio

I terreni utilizzati per il ripristino dei fronti di scavo sono generalmente rappresentati dall'originario strato di suolo presente sui versanti prima dell'escavazione. La natura del suolo è chiaramente legata a quella del substrato, così i terreni di ripristino risultano essenzialmente limoso-argillosi nelle zone estrattive di materiali fini e sabbioso-limosi o sabbioso-ghiaioso-limosi nelle zone estrattive dei materiali granulari. In altri casi, il terreno di ripristino può avere un legame molto debole col substrato e ciò può avvenire quando il suolo originario non è idoneo allo sviluppo di

una copertura vegetale permanente, per cui è necessario miscelarlo con altro terreno, o quando sono richiesti volumi molto maggiori di quelli disponibili.

Per queste ragioni, le caratteristiche granulometriche e fisico-meccaniche dei terreni di ripristino risultano molto variabili e vanno valutate caso per caso. Il parametro di resistenza da prendere in considerazione nelle analisi di stabilità, comunque, è in qualche modo generalizzabile visto che le tecniche di messa in posto della coltre ed i suoi rapporti col substrato mostrano caratteri comuni, indipendentemente dal materiale utilizzato per il ripristino.

Foto 4.1.4. Scivolamento superficiale della coltre di cappellaccio riportato, contrastata con una palizzata.



Nella gran parte dei casi, il terreno di riporto viene scaricato direttamente sul substrato e steso sul versante tramite pala meccanica. L'addensamento è in generale molto basso, sia perché è tecnicamente difficile ottenere una buona compattazione su un versante relativamente acclive sia perché l'umidità del terreno, lontana da quella ottimale, non lo consente. Lo spessore dello strato riportato deve essere funzione del tipo di copertura vegetale che si vuole impiantare ma di norma è dell'ordine del metro.

La parte critica del ripristino è il contatto substrato-terreno di riporto. Nell'ipotesi che la rottura avvenga in prossimità del contatto suolo-substrato, si può ipotizzare che lo scorrimento avvenga in parte lungo l'interfaccia ed in parte all'interno del più debole dei due mezzi a contatto, cioè del suolo.

La determinazione esatta delle resistenze disponibili risulta in questo caso molto complessa, ma un'ipotesi ragionevole è che essa sia prossima a quella di stato critico del terreno di riporto. Tale ipotesi implica che:

- la discontinuità si può considerare liscia alla scala del versante;
- lungo la potenziale superficie di rottura la coesione efficace è nulla ($c' = c'_{cs} \approx 0$);
- è nullo l'effetto di dilatanza nel terreno di riporto ($\phi = \phi_{cs} < \phi_p$);
- è trascurabile l'effetto delle radici sull'interfaccia.

Si tratta di un'ipotesi sostenuta sia da considerazioni di tipo teorico sia dall'osservazione del comportamento meccanico dei versanti ripristinati, che assume un carattere cautelativo nel caso di particolari configurazioni di ripristino, quali la realizzazione di indentature nel substrato o la messa in posto di uno strato di ghiaia all'interfaccia suolo-substrato.

I parametri di stato critico possono essere determinati in laboratorio in modo relativamente economico: essi infatti non dipendono dalla storia tensionale del deposito ma solo dalle caratteristiche intrinseche (mineralogiche e granulometriche) del terreno e per questo non necessitano del prelievo di campioni indisturbati e di particolari cure durante la preparazione del provino.

L'ipotesi di trascurare l'aliquota di resistenza offerta dalle radici è, nella maggior parte dei casi, realistica. Per essere efficaci ai fini di stabilità della coltre di ripristino, infatti, gli apparati radicali devono propagarsi all'interno del substrato, in modo tale che un'eventuale superficie di scorrimento che si sviluppa al contatto suolo-substrato è costretta a tagliarle. Nella maggior parte dei casi, però, le radici non riescono a penetrare il substrato o lo fanno solo localmente in corrispondenza di fratture e discontinuità; tipicamente, gli apparati radicali si allargano in senso orizzontale lungo l'interfaccia, contribuendo in maniera minima all'incremento della componente coesiva.

Una condizione nella quale, almeno teoricamente, potrebbe essere disponibile una certa aliquota coesiva è quella di tensioni capillari in terreni di riporto fini, e valori anche elevati di coesione possono insorgere quando il terreno è fortemente insaturo (Fredlund e Rahardjo, 1993).

Nella pratica, tale condizione è possibile solo in casi molto favorevoli di forte drenaggio della coltre di ripristino. In definitiva, si raccomanda di adottare valori di coesione c' maggiori di zero solo con cognizione di causa, quando effettivamente sussistano le condizioni meccaniche o idrauliche perché questo sia ipotizzabile al contatto coltre-substrato.

Analisi di stabilità

Il meccanismo di rottura tipico che si osserva nei versanti ripristinati è lo scorrimento traslazionale all'interfaccia coltre-substrato. Il modo più semplice e versatile per analizzare le condizioni di stabilità in tali condizioni è adottare l'ipotesi di pendio infinito. Le condizioni che devono essere rispettate perché questa ipotesi sia valida sono:

1. la superficie di scorrimento deve essere sub-parallela al piano campagna;
2. la massa potenzialmente instabile deve avere una lunghezza molto maggiore dello spessore, in modo tale da poter trascurare il contributo delle resistenze mobilizzate nelle terminazioni di testa e di piede (dove la prima assunzione non è valida);
3. le caratteristiche meccaniche e le condizioni idrauliche sono costanti lungo l'intera sezione di interesse.

Tutte e tre queste condizioni sono verificate in una configurazione tipica di ripristino di cava ed ipotizzando materiali omogenei.

Come è noto, la stabilità di pendio infinito è un problema staticamente determinato (le forze interconco si annullano ed il numero di equazione risulta maggiore del numero di incognite), per cui la soluzione all'equilibrio limite è esatta ed il fattore di sicurezza si può calcolare in modo esplicito:

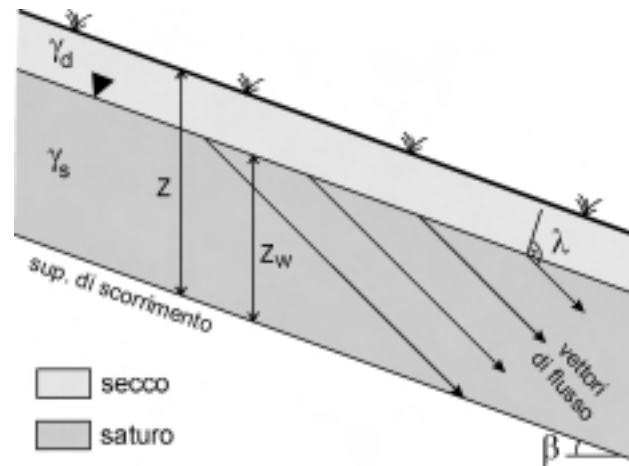
$$F = \frac{\tau_{resistivi}}{\tau_{agenti}} = \frac{c' + (\sigma - u) \tan(\phi')}{\tau_{agenti}} \quad [19]$$

dove:

$$\sigma = (z - z_w) \gamma_d \cos^2(\beta) + z_w \gamma_s \cos^2(\beta) \quad [20]$$

$$\tau_{agenti} = (z - z_w) \gamma_d \cos(\beta) \sin(\beta) + z_w \gamma_s \cos(\beta) \sin(\beta) \quad [21]$$

Fig.4.1.17. Schema di pendio infinito.



con (Fig. 4.1.17):

γ_d =peso dell'unità di volume del terreno sopra falda;

γ_s =peso dell'unità di volume del terreno sotto falda;

z =profondità della superficie di scorrimento;

z_w =spessore della falda;

u =pressione interstiziale sulla superficie di scorrimento;

β =inclinazione della superficie di scorrimento.

Nell'ipotesi solitamente adottata che il peso dell'unità di volume del terreno sopra e sotto falda sia uguale ($\gamma_d \cong \gamma_s = \gamma$), la [19] si può scrivere in forma compatta:

$$F = \frac{c' + (z\gamma \cos^2(\beta) - u) \tan(\phi)}{z\gamma \sin(\beta) \cos(\beta)} \quad [22]$$

Tra i vari parametri in gioco, il più difficile da valutare è senza dubbio la pressione interstiziale (u) agente sulla superficie di scorrimento. La pressione neutra, infatti, dipende sia dallo spessore della falda (z_w) sia dall'orientazione delle linee di flusso, cioè dal campo di moto dell'acqua all'interno del terreno di riporto. L'ipotesi che viene comunemente adottata nelle analisi di stabilità è quella di flusso stazionario parallelo al versante, cioè (es. Nash, 1987):

$$u = z_w \gamma_w \cos^2(\beta) \quad [23]$$

dove γ_w è il peso dell'unità di volume dell'acqua. Si noti come la pressione dell'acqua con flusso parallelo al versante risulti leggermente più bassa rispetto al caso idrostatico:

$$u = z_w \gamma_w \quad [24]$$

e quindi fornisca valori leggermente maggiori del fattore di sicurezza. La situazione idrostatica è in effetti più conservativa, ma il fatto che non sia realistica (in assenza di particolari condizioni al contorno, l'acqua all'interno del versante è in movimento) è una buona ragione per non considerarla.

In un caso più generale di flusso variamente orientato all'interno del versante, la pressione dei pori u è data da:

$$u = z_w \gamma_w \left(1 - \frac{\tan(\lambda + \beta - 90)}{\tan(90 - \beta) + \tan(\lambda + \beta - 90)} \right) \quad [25]$$

dove λ (Fig. 4.1.17) è l'angolo formato tra la direzione dei vettori di flusso e la normale alla superficie di falda (parallela alla superficie di scorrimento ed al piano campagna). Si noti che:

- per $\lambda=90^\circ$ -b (condizione analoga a quella idrostatica) la [25] si riduce alla [24];
- per $\lambda=90^\circ$ (flusso parallelo al versante) la [25] si riduce alla [23];
- per $\lambda=180^\circ$ -b (flusso verticale diretto verso il basso) la [25] tende a zero, come ci si attende in caso di filtrazione verticale in un mezzo saturo.

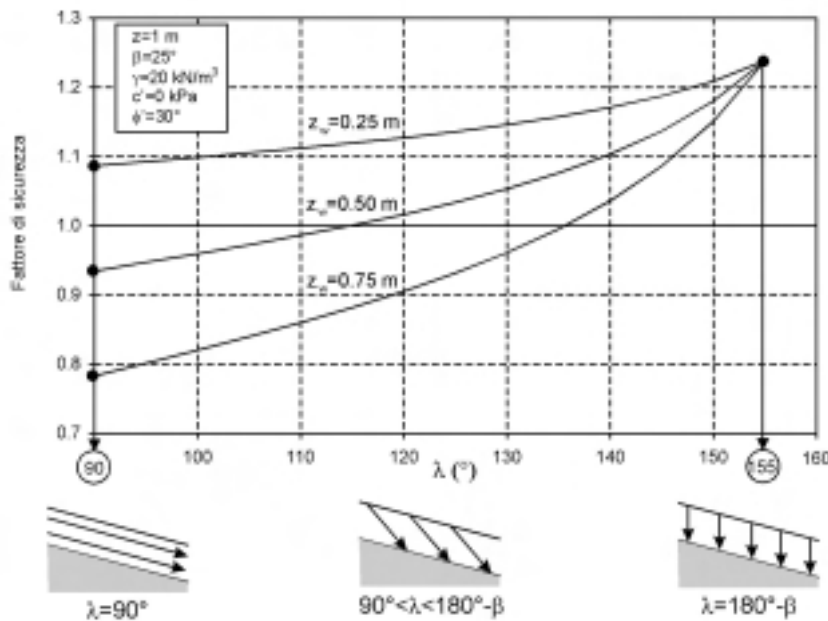


Fig.4.1.18. Variazione del fattore di sicurezza di una coltre di riporto in funzione dell'orientazione dei vettori di flusso per 3 casi di altezza di falda (z_w).

La Fig. 4.1.18 mostra l'influenza della direzione di flusso sul fattore di sicurezza per 3 diverse altezze di falda in un versante ideale a ripristino. In tutti i casi F è dipendente dall'orientazione dei vettori di flusso: la condizione più gravosa è quella di flusso parallelo al versante ($\lambda=90^\circ$) mentre la stabilità migliora all'aumentare dell'inclinazione dei vettori di flusso verso il basso fino a raggiungere un massimo nel caso di flusso perfettamente verticale ($\lambda=180^\circ-\beta$).

Valori di F ancora più bassi di quelli ottenuti con flusso parallelo al versante sono possibili se il flusso ha una componente diretta verso l'alto (25). In questo caso, infatti, la pressione di filtrazione agisce in direzione opposta alla gravità e tende a diminuire le tensioni intergranulari (tensioni efficaci) causando un netto peggioramento delle condizioni di stabilità. Situazioni di questo tipo si generano quando il flusso nella coltre viene ostacolato lateralmente da un limite di permeabilità (ad esempio la risalita del substrato o una porzione molto meno permeabile della coltre stessa) ed è costretto a dirigersi verso l'alto. Durante la messa in posta del materiale di riporto si deve quindi prestare la massima attenzione per evitare l'insorgere di tali problemi.

Un caso gravoso ma tutt'altro che irrealistico in un'ottica di lungo periodo è quello di una coltre con coesione assente ($c'=0$), falda a piano campagna ($z=z_w$) e filtrazione parallela al versante ($\lambda=90^\circ$). In queste condizioni, il fattore di sicurezza si calcola facilmente sostituendo la [23] nella [22] per arrivare alla nota relazione:

$$F = \left(1 - \frac{\gamma_w}{\gamma}\right) \frac{\tan(\phi)}{\tan(\beta)} \quad [26]$$

Si noti che l'angolo limite del versante risulta circa pari alla metà dell'angolo di attrito (ponendo $F=1$ si ottiene $\tan(\beta_{lim}) \cong 1/2 \tan(\phi)$) e ciò si traduce in una pendenza molto bassa del versante a ripristino.

Per migliorare le condizioni di stabilità e mantenere un'inclinazione maggiore del versante a ripristino possiamo agire sia sulla riduzione dell'acque di infiltrazione (che equivale a ridurre z_w) sia sul drenaggio all'interno della coltre di ripristino (che equivale ad aumentare λ): in entrambi i casi si ha una diminuzione delle pressioni dei pori u sulla superficie di scorrimento ed un conseguente aumento del fattore di sicurezza. L'abbattimento della falda è la soluzione tipicamente considerata nella pratica pro-

fessionale, ma anche un miglior drenaggio in profondità, con la conseguente rotazione verso il basso dei vettori di flusso, può essere molto efficace.

In una condizione teorica di drenaggio perfetto, operato ad esempio da uno spesso orizzonte permeabile posto alla base del terreno di riporto, i vettori di flusso diventano sub-verticali ($\lambda=180^\circ-\beta$) e le pressioni dell'acqua sulla potenziale superficie di scorrimento tendono a zero anche se la superficie di falda rimane al piano campagna. Ponendo $u=0$ nella [22] si ottiene:

$$F = \frac{\tan \phi'}{\tan \beta} \quad [27]$$

che è la classica relazione utilizzata per il calcolo di F in un terreno incoerente e pressioni interstiziali nulle. Si noti che in questo caso $\beta_{\text{lim}}=\phi'$ e ciò consente di progettare il versante a ripristino con un'inclinazione circa doppia rispetto al caso di flusso parallelo al versante.

Questi concetti sono validi anche se il meccanismo di rottura è di tipo rotazionale o roto-traslazionale ed il fattore di sicurezza viene calcolato con soluzioni più complesse del metodo dell'equilibrio limite (vedi paragrafo precedente). Cinematismi di questo tipo sono meno frequenti di quello traslazionale e possono interessare versanti caratterizzati da elevati spessori di riporto, andamento irregolare del contatto coltre-substrato o dove esistono ostacoli allo sviluppo di una rottura traslativa.

Considerazioni progettuali

Da quanto visto la stabilità meccanica rappresenta il primo e fondamentale aspetto da considerare nella risistemazione: rappresenta il presupposto di tutti i possibili riusi. Qualunque sia l'obiettivo finale prescelto è necessario che il progetto individui le condizioni migliori per assicurare una adeguata stabilità meccanica nel lungo periodo, affinché si possano attivare ed esplicitare tutti i processi ecologici o gli investimenti economici determinati dal riuso, pena il blocco di questi processi o la perdita di risorse.

L'idea stessa di riuso dell'area presuppone sempre una condizione di stabilità di lungo periodo. L'insediamento della vegetazione, sia sotto forma di colonizzazione spontanea o di inserimento mediante opportuni interventi, deve sempre avvenire in condizioni morfologiche stabili. Compito del progettista è raggiungere questa condizione di stabilità ed "abitabilità" del substrato, in funzione dei materiali presenti.

Innanzitutto è necessario definire, per ogni "unità" o "settore di progetto" individuate sulla base delle analisi di campagna e di laboratorio, le condizioni di sicurezza ammissibili previste dalla normativa. Questa prima analisi, che è innanzitutto funzione del materiale di fondo utilizzato nella profilatura di abbandono, la possiamo definire "*Analisi di stabilità strutturale del substrato minerale*".

Pur essendo questo il primo elemento indispensabile per il progetto esso non è comunque sufficiente a risolvere tutti i problemi di stabilità, specie quelli legati al riuso. Infatti si fa riferimento al solo substrato litologico di fondo impiegato nel rimodellamento e non ai materiali necessari nel ripristino vero e proprio. Questa è perciò un'analisi necessaria, ma non sufficiente: non permette di definire tutte le variabili e le condizioni che caratterizzano invece gli interventi di recupero o di riqualificazione ambientale. Infatti il progetto di recupero ed il riuso successivo intervengono su uno strato superficiale (< 2 m di profondità) che molte volte, se non sempre, presenta caratteristiche molto diverse dal substrato litologico utilizzato nel rimodellamento.

Diverse sono le opzioni a disposizione del progettista:

- a) abbandono delle pendici di scavo alla pendenza di fine lavori o di fine rimodellamento, senza alcun tipo di intervento su di esse;
- b) intervento diretto sulle pendici di scavo o di rimodellamento per favorire la creazione di condizioni edafiche favorevoli, almeno minimali, all'insediamento e alla crescita di una copertura vegetale (rippature, arature);

c) riporto sulle pendici rimodellate, di substrati più o meno pedogenizzati, sia autoctoni che alloctoni, per ricreare una condizione adeguata al successivo reimpianto della vegetazione.

Negli ultimi due casi (b - c) l' " *Analisi di stabilità strutturale del substrato minerale* " risulta essere inadeguata, viste le diverse caratteristiche fisico-meccaniche del riporto o del lavorato rispetto al materiale litologico utilizzato nel rimodellamento: in questi casi è perciò necessario associare una nuova analisi della stabilità meccanica che abbia come riferimento questi strati superficiali. Chiameremo questa: " *Analisi di stabilità della coltre di ripristino superficiale* ". Attraverso questa ulteriore e più dettagliata analisi si potranno definire le condizioni di stabilità di lungo periodo relative a questi strati superficiali, strati che saranno influenzati da fattori esogeni quali il clima e le componenti biotiche, e su cui si insedierà l'attività dell'uomo.

Con questo doppio livello di analisi di stabilità si possono definire tre possibili condizioni morfodinamiche tipo (Fig. 4.1.19):

a) aree strutturalmente stabili e superficialmente stabili:

dove il riporto superficiale di terreno si trova sempre in condizioni di stabilità, anche in presenza di una saturazione completa (basse pendenze). Questa è la condizione di massima sicurezza che consente una grande libertà progettuale: tutte le

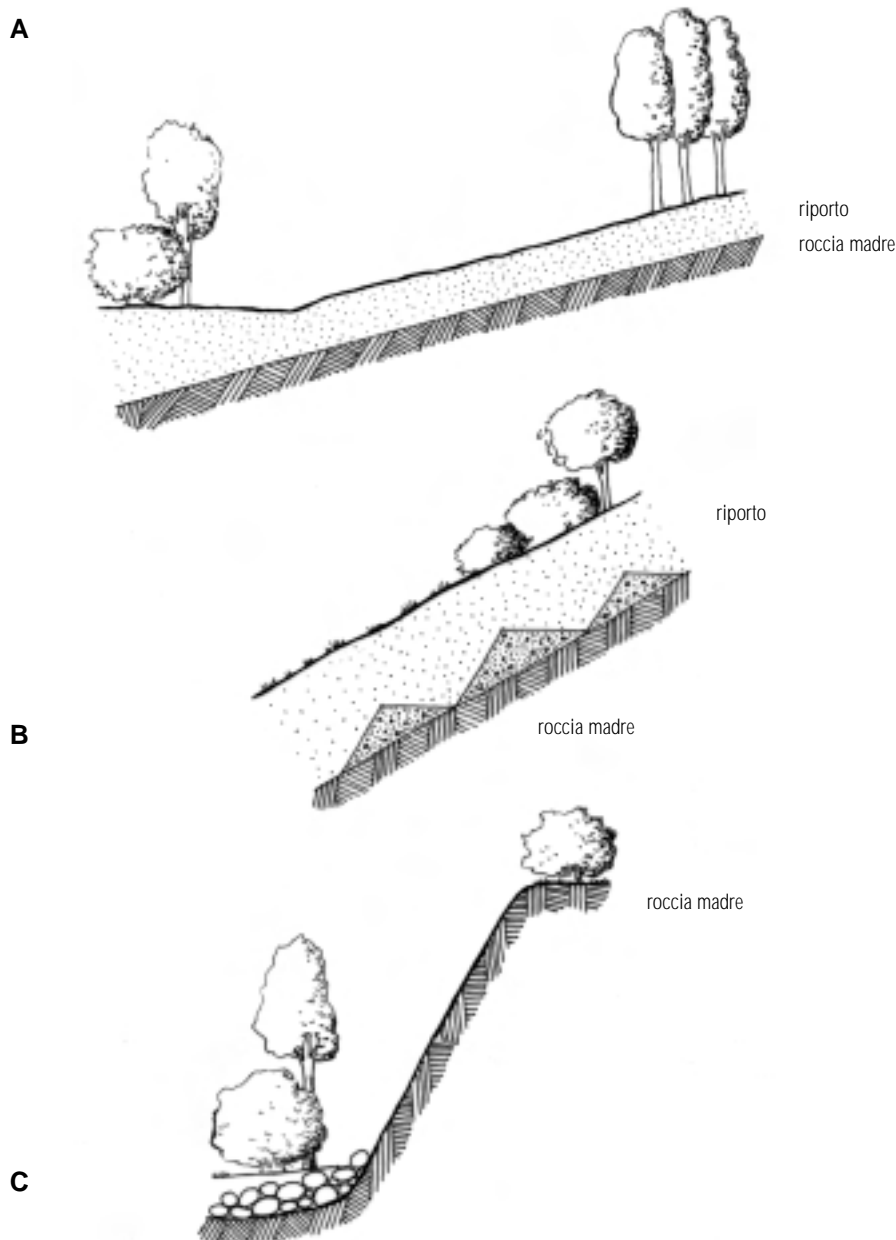


Fig.4.1.19. Condizioni morfodinamiche tipo nella risistemazione morfologica:
 A) aree strutturalmente e superficialmente stabili;
 B) aree strutturalmente stabili e superficialmente metastabili o substabili;
 C) aree strutturalmente stabili e superficialmente instabili.

diverse destinazioni d'uso sono possibili, così come tutte le tecniche di recupero ambientale. Il sistema è intrinsecamente stabile ed adattabile alle diverse condizioni, consentendo anche un riuso intensivo (agricolo, forestale, industriale, ecc.).

b) Aree strutturalmente stabili e superficialmente metastabili o substabili:

dove il riporto superficiale di terreno fertile si trova normalmente in condizioni di stabilità, anche se condizioni estreme, come la saturazione completa dello strato riportato, rendono la porzione superficiale instabile. Attraverso interventi, quali la regimazione delle acque o particolari rimodellamenti della superficie di contatto tra minerale e riporto, si può però ripristinare una condizione di completa stabilità nel lungo periodo. Qui il progettista ha una "libertà condizionata": esistono situazioni (casi critici) che possono mettere in crisi la sistemazione. Innanzitutto saranno preferibili solo riusi estensivi (paesaggistici, naturalistici, ecc.), inoltre sarà necessario predisporre degli interventi che impediscano al sistema di avvicinarsi a queste condizioni critiche. Questi potranno essere di due tipi:

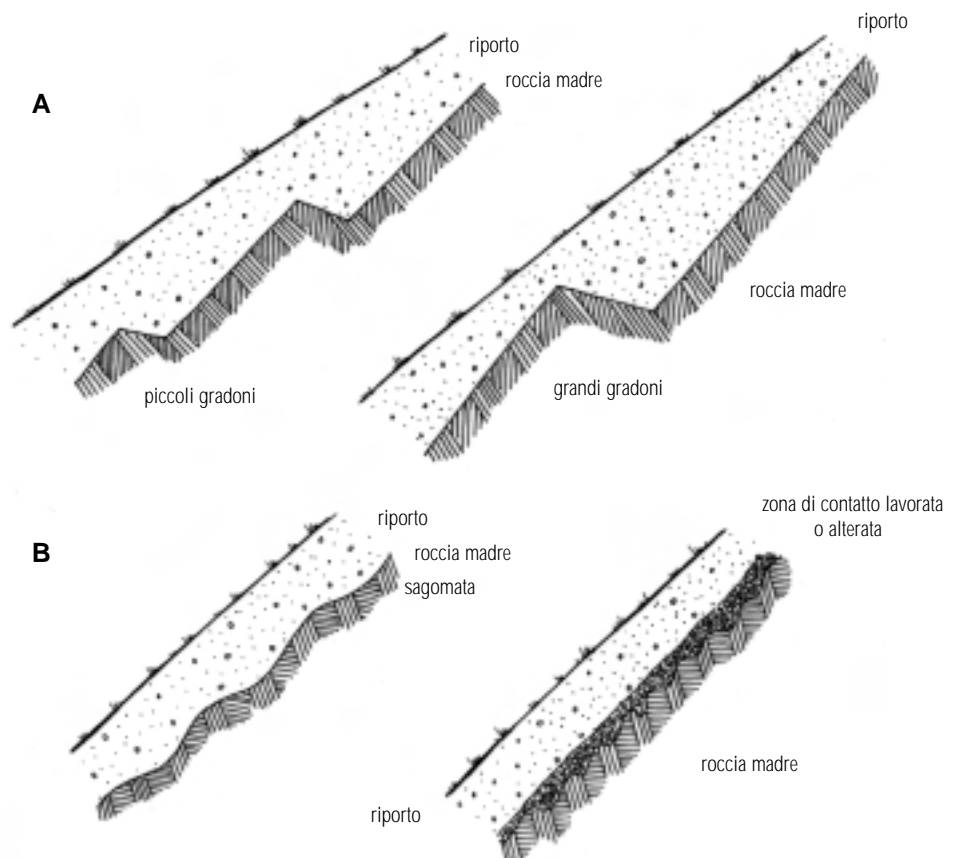
- *passivi*, dove è la sistemazione del sito e delle sue componenti a evitare la criticità;
 - *attivi*, dove sono infrastrutture o interventi mirati a limitare i possibili problemi.
- La differenza sostanziale tra le due modalità riguarda principalmente la manutenzione: gli interventi passivi non hanno bisogno di manutenzioni di sorta, a differenza di quelli attivi che, periodicamente, possono richiedere adeguamenti o rifacimenti. Più in particolare gli interventi possono essere così caratterizzati:

b1) Interventi di tipo passivo (Fig. 4.1.20):

- *modellamento del contatto tra gli strati*

E' possibile predisporre una morfologia di abbandono del substrato minerale finalizzata all'aumento della stabilità superficiale. Invece di realizzare delle superfici piane ed uniformi si può modellare il materiale secondo delle gradonature, piccole o grandi, per creare dei piani di appoggio per il substrato pedogenizzato e per le eventuali radici. Questa particolare geometria tende a interrompere il piano di scorrimento e crea delle contropendenze che innalzano il valore dell'E. Questi piani devono essere realizzati con una decisa contropendenza verso monte,

Fig.4.1.20. Interventi di stabilizzazione di tipo passivo:
A) modellamento del contatto;
B) aumento della scabrosità superficiale.



necessaria per favorire lo sgrondo delle acque dall'estremità superiore del gradone. E' poi sempre necessario dotare i gradoni di una pendenza trasversale ($< 5\%$) per favorire l'allontanamento laterale della falda sotterranea: in corrispondenza dei gradoni può inoltre essere inserito un sistema drenante;

- *compenetrazione degli strati, scabrosità superficiale*

E' sempre importante evitare la formazione di piani troppo omogenei e curati. E' preferibile invece mantenere un certo grado di irregolarità nel substrato minerale per aumentare la rugosità e quindi l'attrito tra gli strati. Si può anche ricorrere a lavorazioni come le ripuntature per favorire una maggior compenetrazione tra i materiali degli strati. Queste ripuntature possono essere eseguite in traverso od a ritocchino anche se quest'ultima pare la soluzione più corretta in quanto facilita lo sgrondo dell'acqua presente in profondità, evitando accumuli locali lungo il pendio; questi infatti possono provocare scivolamenti o smottamenti. Anche tecnicamente questa soluzione appare più semplice e sicura per gli operatori dei mezzi meccanici.

b2) *Interventi di tipo attivo (Fig. 4.1.21):*

- *controllo dell'acqua in superficie*

E' importante realizzare una rete di raccolta e scolo controllato delle acque di scorrimento superficiale, al fine di favorirne un veloce e sicuro allontanamento, limitando le possibilità sia di erosione superficiale che di infiltrazione profonda (cfr. Cap. 4.3);

- *controllo dell'acqua in profondità*

Può essere utile predisporre dei sistemi di drenaggio sotterraneo delle eventuali falde superficiali o di parte di esse per limitare le possibilità di scivolamento e di sovraccarico dello strato superficiale. E' necessario progettare e realizzare questo sistema drenante con la massima attenzione e lungimiranza in quanto eventuali intasamenti o problemi della rete non sempre potranno essere superati con la manutenzione ordinaria o straordinaria (difficoltà di accesso, assenza di risorse), mettendo così in crisi tutta la pendice. Inoltre è necessario valutare con attenzione le conseguenze di questo intervento, in quanto si viene a limitare la disponibilità idrica necessaria per la copertura vegetale. L'allontanamento delle acque profonde può essere realizzato anche attraverso l'azione emungente della vegetazione, anche se questo effetto si limita solo al periodo vegetativo e non sempre coincide con i periodi critici (fine inverno);

- *controllo del carico dovuto alla vegetazione*

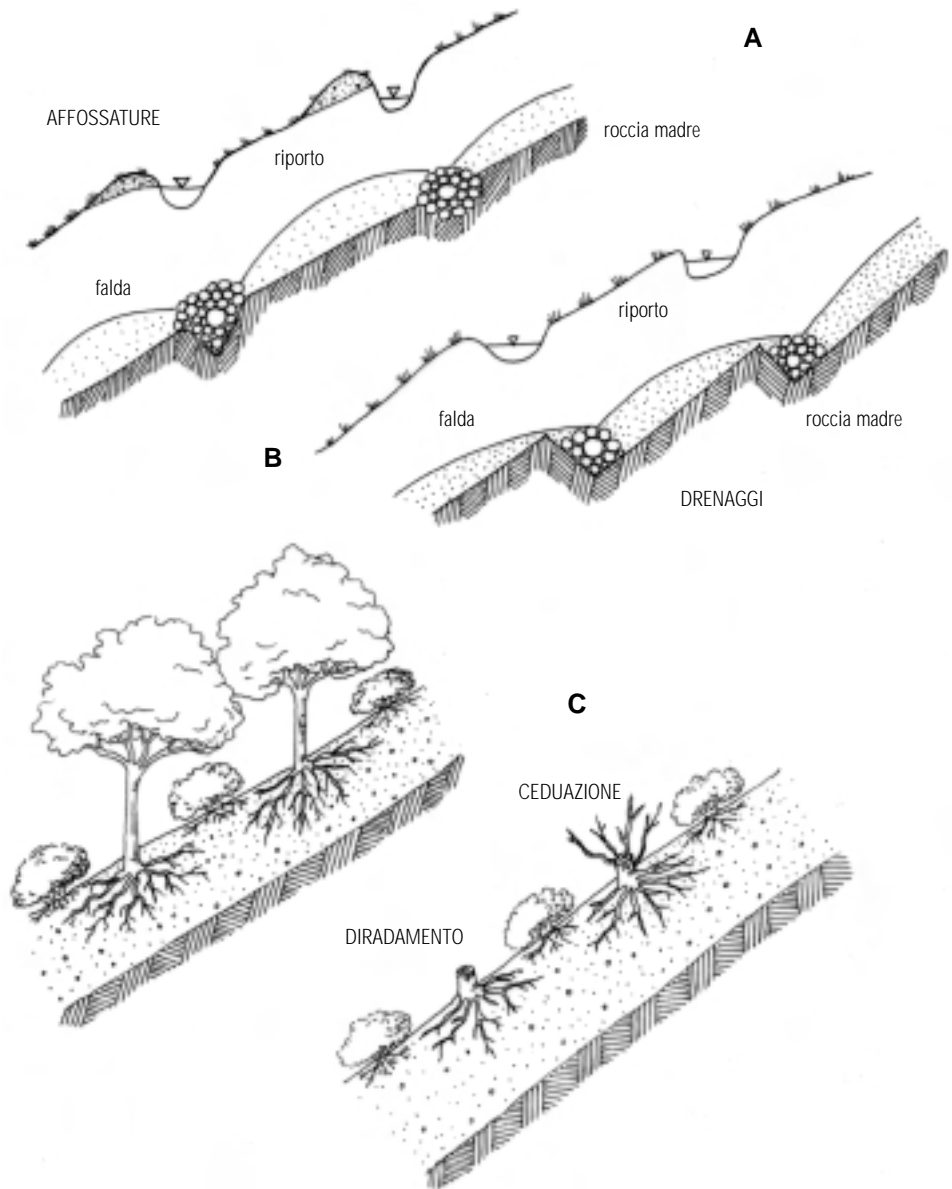
Lo sviluppo di una copertura vegetale può portare ad un sovraccarico eccessivo della pendice. Il valore del sovraccarico q_0 entra nella formula della stabilità in modo complesso: da una parte aumenta le forze agenti, dall'altra contribuisce ad aumentare la resistenza legata all'attrito del suolo. Comunemente il sovraccarico dovuto ad impianti arborei viene considerato un fattore negativo per la stabilità e quindi viene controllato e limitato attraverso interventi di diradamento, taglio, potatura. Lo scopo è quello di limitare la presenza di esemplari arborei di grandi dimensioni e favorire invece una copertura arbustiva, "leggera" e maggiormente consolidante, meno sensibile anche all'azione del vento. Il diradamento degli esemplari arborei di grandi dimensioni limita anche i possibili accumuli localizzati d'acqua dovuti alla vegetazione stessa, come il fenomeno dello "stem-flow" lungo il fusto, accumuli che in certe condizioni possono raggiungere valori molto elevati, mettendo in crisi tutto il sistema di drenaggio della pendice;

- *realizzazione di sostegni inerti permanenti, parzialmente o totalmente interrati*

(Fig. 4.1.22).

Possono realizzarsi delle opere di sostegno meccanico lungo il piano di contatto tra gli strati per aumentare la resistenza allo scivolamento. Strutture come gabionate, muri di sostegno, materassi drenanti, stecconate o pali in legno o ferro, opportunamente posizionati, possono aumentare la resistenza allo scivolamento

Fig. 4.1.21. Interventi di stabilizzazione di tipo attivo:
 A) controllo delle acque superficiali;
 B) controllo delle acque in profondità;
 C) controllo della vegetazione arborea.

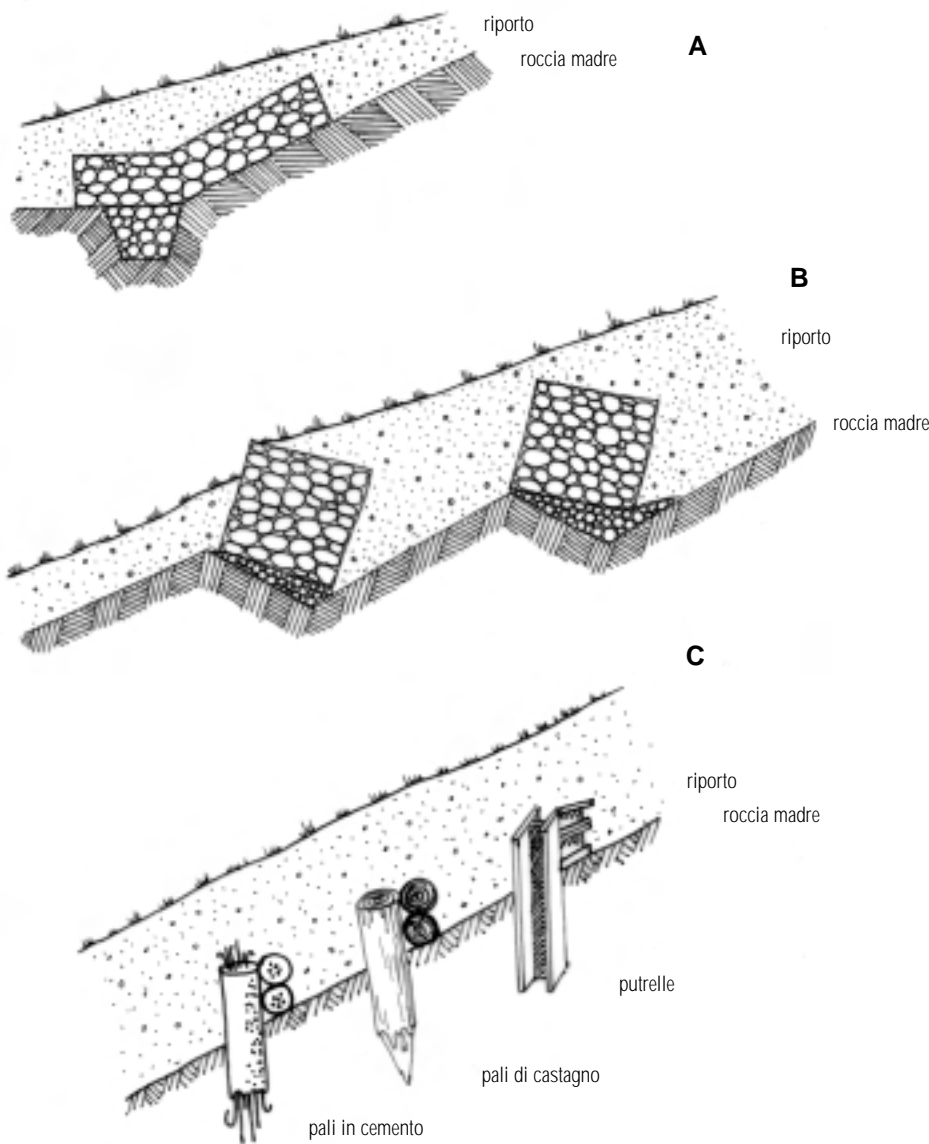


della pendice. Queste opere, specie le più pesanti, devono essere localizzate al piede del pendio, mentre le strutture leggere, come pali o steccate, possono essere posizionate con maggiore libertà nelle diverse parti della pendice. Devono essere tutte saldamente ancorate al substrato minerale coerente, attraverso banchinamenti, o palificazioni, ed avere una lunghissima durata. Sono comunque opere a forte impegno economico da utilizzare solo in presenza di esigenze particolari, dovute alla presenza di infrastrutture o manufatti da salvaguardare o nell'impossibilità di modificare le pendenze di abbandono. Sono elementi sempre da associare alla regimazione delle acque di scolo, in quanto ristagni di umidità possono metterne in crisi la stabilità.

c) Aree strutturalmente stabili, ma superficialmente instabili:

dove il riporto superficiale di substrato pedogenizzato non raggiunge mai condizioni di stabilità accettabili, anche in presenza di interventi di stabilizzazione estensivi, viste le pendenze molto elevate. Questa è la condizione che limita maggiormente il progettista: anche in presenza di interventi intensivi non è possibile o pensabile (in termini tecnici, economici e paesaggistici) l'inserimento di elementi diversi dalla componente litologica del sito. La destinazione dell'area sarà perciò fortemente condizionata, limitandosi a quella paesaggistica o naturalistica attraverso la valorizzazione diretta del substrato minerale rimodellato. Emerge però un problema complesso, di difficile definizione: un riuso tal quale di un'area solo strutturalmente stabile può

Fig.4.1.22. Interventi di stabilizzazione di tipo attivo:
 A) materassi drenanti;
 B) gabbionate parzialmente o totalmente interrate;
 C) palizzate o stecconate.



comportare l'avvio di fenomeni erosivi superficiali diffusi che si concretizzano in una dinamica morfologica che comunque deve essere preventivamente studiata e quantificata. Il progetto dovrà contenere tutte le soluzioni che evitino o limitino una sua amplificazione che investa aree limitrofe, destinate invece ad altri usi.

Queste sono le tre condizioni a cui devono essere riportate tutte le aree oggetto della progettazione di riqualificazione ambientale. In particolare per le aree metastabili (punto b) devono essere ben precisate sia le condizioni, sia gli interventi volti a ripristinare una situazione di stabilità di lungo periodo (interventi di ingegneria naturalistica, idraulica, di sistemazione morfologica, manutenzione, ecc.). Dalla individuazione di queste condizioni morfologiche derivano in cascata tutta una serie di conseguenze che condizionano direttamente ed indirettamente le scelte, gli interventi necessari e l'evoluzione naturale successiva. Perciò è molto importante individuare le condizioni presenti per poterle studiare e poter progettare con attenzione le soluzioni. Ogni area deve cioè avere una destinazione ben definita e deve essere ben progettata: non possono essere accettati elementi fuori controllo.

Fino ad ora si è lasciato volutamente fuori l'elemento "vegetazione" (Fig. 4.1.22). Molti autori riferiscono di un'azione positiva della vegetazione sulla stabilità meccanica delle pendici, attraverso l'azione di rinforzo delle radici (che aumentano la resistenza al taglio), l'azione delle ceppaie (che attraverso il sostegno, l'ancoraggio e l'innarcamento irrobustiscono la pendice) e l'azione della pianta in generale (che con l'at-

Foto 4.1.5. Rapporto morfologia - vegetazione: esempio di scivolamento di colico erboso su pendice sabbiosa di abbandono.



tività fisiologica propria consuma grandi quantità di acqua presente nel suolo, “alleggerendo” la pendice). Qui non abbiamo voluto considerare questi aspetti positivi di miglioramento della stabilità dei versanti in quanto l’azione della vegetazione può essere variabile nel tempo. Eventi accidentali e non prevedibili come incendi, malattie, infestazioni o periodi siccitosi, ma anche il normale avvicendamento colturale (tagli) e stagionale, possono limitare o compromettere la vitalità e quindi la funzionalità della vegetazione: non è perciò pensabile far riferimento in modo organico al suo effetto di rinforzo che può all’improvviso diminuire o venire a mancare. Inoltre la vegetazione si afferma con un certo ritardo rispetto al momento critico rappresentato dal periodo immediatamente successivo al rimodellamento: in questo periodo si può avere una totale mancanza di copertura vegetale. Infine, bisogna considerare che l’azione della vegetazione non è solo ed esclusivamente positiva. Essa infatti facilita l’infiltrazione dell’acqua e il suo approfondimento ed accumulo negli strati sub-superficiali (specie nel periodo autunno-inverno), facilita l’alterazione del materiale litologico, risente e trasmette al suolo l’azione del vento, tutti fattori che possono peggiorare le condizioni di stabilità di un versante, specie se questo è caratterizzato da una stratificazione ed una permeabilità molto diversificati, evenienza tipica dei substrati minerali di cava ricoperti con materiale pedogenizzato.

Pertanto gli interventi di rimodellamento delle superfici e gli impianti della vegetazione andranno progettati di pari passo. Allo stesso modo andrà progettata organicamente la manutenzione dei siti ripristinati.

4.1.3.2 PROGETTAZIONE ECOLOGICO PAESAGGISTICA (F. Neonato)

Variabilità morfologica ed ecologica

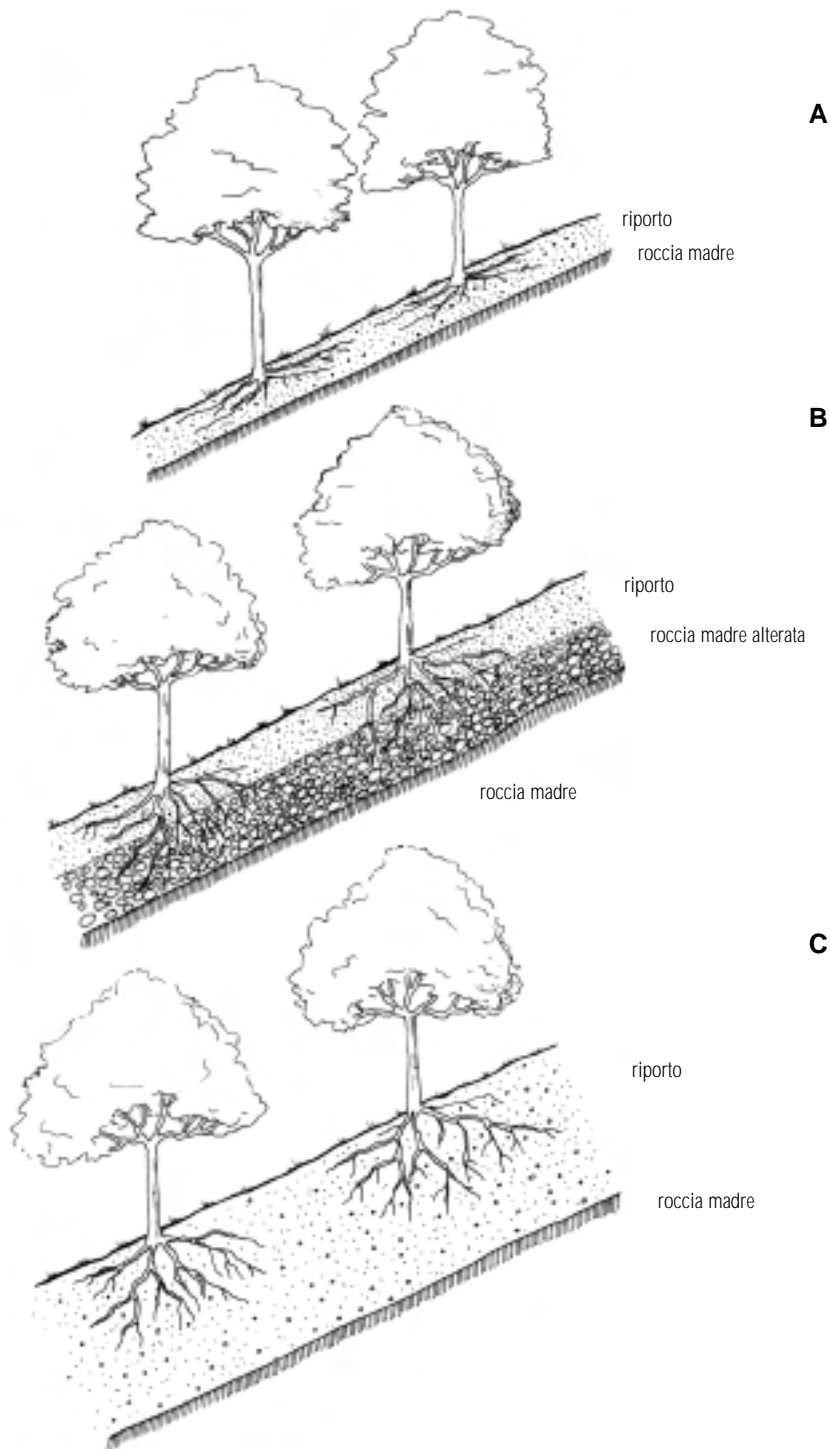
Le forme di abbandono delle superfici scavate assumono una funzione ecologica molto importante che va al di là della semplice percezione visiva. Le geo-forme sono il risultato di una intensa e complessa attività naturale: esse sono strettamente correlate con i processi che avvengono nel sito. Tutti questi processi e le loro interazioni creano le forme in un processo continuo di adattamento. La morfologia diviene perciò un indicatore dello stato e delle funzioni del paesaggio, cioè di tutte le interazioni presenti. Non si deve perciò sottovalutare il problema funzionale dei processi che

Fig.4.1.23. Ruolo della vegetazione sulla stabilità meccanica di una coltre di riporto:

A) sostegno radicale limitato o nullo;

B) sostegno radicale efficace;

C) sostegno radicale con effetto limitato sui movimenti profondi.



interagiscono con le forme. D'altra parte la forma rappresenta un elemento centrale per tutti i processi e quindi per tutta l'evoluzione del sito: il progetto di recupero deve perciò modellare le forme in funzione dei processi ecologici da rigenerare. Come regola generale la morfologia di abbandono deve favorire la massima diversificazione possibile degli ambiti, al fine di ricreare delle condizioni locali omogenee, ove ricostruire delle unità di paesaggio distinte, coordinate con il reticolo ambientale circostante. Questa massima variabilità morfologica è il presupposto della possibile variabilità ecologica che viene normalmente ricercata. La variabilità può avere diverse scale di riferimento:

- essere legata all'area circostante: svolgere cioè una funzione strutturale o di ampio respiro, mantenendo nel contempo un' elevata omogeneità al suo interno;
- essere legata al sito: svolgere cioè una funzione locale che coinvolge le diverse zone del sito che si stanno differenziando e che devono perciò essere ecologicamente interconnesse tra loro;

Foto 4.1.6. Confronto tra due diverse tipologie di rimodellamento: sistemazione a gradoni e sistemazione a pendio uniforme.

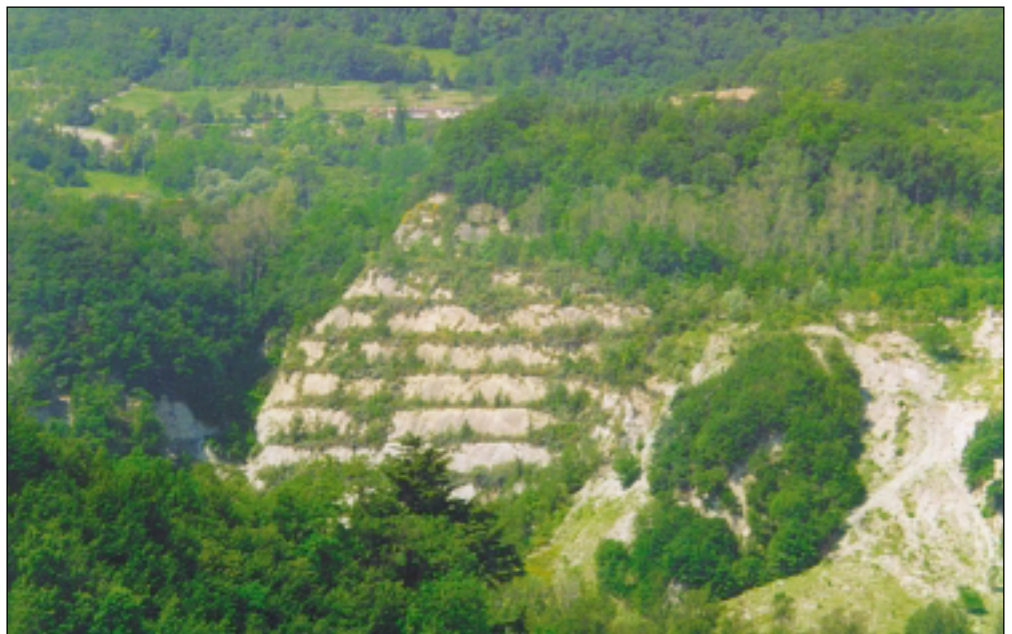


- essere legata al versante: svolgere cioè una funzione puntuale che coinvolge la singola unità di paesaggio, intrinsecamente omogenea al suo interno. Il progetto deve confrontarsi comunque con tutte e tre le scale di riferimento, privilegiando di volta in volta il reticolo e la funzione prescelti: questo nascerà da una analisi del paesaggio che dovrà coinvolgere tutto l'areale circostante il bacino estrattivo e avrà come ricaduta la individuazione delle unità di paesaggio da ricostruire.

Relazioni con il paesaggio circostante

Dall'analisi precedente si è visto come sia soprattutto la pendenza il fattore limitante che, correlato ad altri fattori, determina il grado di libertà del progettista. Esiste in realtà un altro fattore che deve pesare direttamente sulle scelte del progettista: il paesaggio, inteso come sintesi delle interrelazioni storiche tra uomo e risorse naturali. La comprensione di tali complesse interrelazioni si basa sia sulla classica analisi visiva, ovvero definizione del bacino visivo di riferimento, individuazione dei punti di vista chiave, delle emergenze e delle criticità, ma anche sull'indagine bibliografica ed iconografica della zona, una volta individuata l'unità di paesaggio d'appartenenza. Qualsiasi intervento, seppure localizzato e limitato, deve trovare un riscontro analitico più ampio, all'interno di un'analisi territoriale di bacino. Questa deve esse-

Foto 4.1.7. Risistemazione finale di fronte di cava a parete con gradoni.



re finalizzata a trovare le coordinate storiche di riferimento per quel sito, sia in senso spaziale (usi più o meno procrastinati, che hanno determinato nel tempo delle invariabili nel paesaggio, assimilabili ad altri elementi quali le emergenze geomorfologiche, o architettoniche, ed anche elementi “invisibili”, quali le tradizioni, le consuetudini, ecc.), che temporale (flussi energetici sul territorio, quali arterie e vie di comunicazione, dilatazioni demografiche, scambi commerciali).

A questo punto le condizioni di partenza per l'intervento di riconnesione al paesaggio possono essere ricondotte alle 3 diverse opzioni prospettate al paragrafo precedente (Cap. 4.1.3.1), ovvero condizioni per il progettista di massima, o di media o di minima libertà. E' chiaro che solo nel primo caso è realizzabile un intervento di recupero del paesaggio, ovvero una ricostruzione della facies esterna, dello stato percettivo, in continuità con il sistema paesaggistico di riferimento ed assimilabile alle condizioni ante cava. Pertanto la maglia, cioè le dimensioni delle sub unità di paesaggio, le loro dimensioni, le componenti biotiche e non, possono e devono essere cooptate dal contorno. Su di esse si immetteranno le scelte progettuali, in funzione evidentemente delle finalità, dei tempi e delle risorse economiche previste.

Nel terzo caso possono non valere più le considerazioni sopra esposte, se non per quanta riguarda il ricercare la continuità storico-spaziale con il territorio circostante. Chiaramente si verificherà una variazione della destinazione d'uso rispetto alla situazione *ante*, e pertanto l'intervento si caratterizza come una riqualificazione (e non un restauro). In questa luce, possono anche esser ignorate le leggi di funzionamento del paesaggio circostante, purché le scelte progettuali siano consapevoli in tal senso e circostanziate. Una parete verticale e scabra può assolvere una funzione decorativa, o sportiva, o altro ancora, anche se non avviene la ricostruzione delle cenosi vegetali preesistenti. In centro Europa, e soprattutto in Germania, ampi ambiti ex minerari sono stati riusati con questa logica conservativa: ad esempio, nelle miniere a cielo aperto della Sassonia, enormi macchinari usati in passato per l'estrazione della bauxite, sono stati conservati in loco e riutilizzati nella costruzione dei nuovi paesaggi. Questo approccio consente inoltre di limitare in certi casi i costi dell'intervento.

In posizione intermedia si pone chiaramente il secondo caso, laddove esistono limitazioni medie al progettista. In questo caso sarà soprattutto la natura del progetto ad imporre una scelta volta più ad una visione di recupero o di riqualificazione.

4.1.3.3 RIMODELLAMENTO DELLE ACQUE E GESTIONE DELLE ACQUE

Regimazione idraulica superficiale

La risistemazione morfologica gioca un ruolo molto importante anche nella gestione dell'acqua e nel controllo dei suoi effetti, sia dal punto di vista ecologico (disponibilità idrica) che tecnico (erosione superficiale): la progettazione complessiva di tutta la rete idraulica del sito è pesantemente condizionata dalla ricostruzione topografica. L'attenzione deve essere rivolta innanzitutto alla presenza di corsi d'acqua naturali: questi possono essere rigidamente tutelati (Codice di Polizia mineraria, Codice civile), limitando quindi ogni intervento diretto o, viceversa, essere interessati dall'attività estrattiva: al termine dei lavori questi corsi d'acqua dovranno essere risistemati se non ricostruiti nel loro percorso, mantenendo, od eventualmente potenziando, i parametri idraulici (ad es. sezioni), per tenere conto degli eventi critici di progetto (tempo di ritorno di progetto di almeno 100 anni). Si dovrà sempre preferire un approccio di tipo geomorfologico che richiami i caratteri originari del corso d'acqua (ampiezza, profondità, sinuosità), ben sapendo che le condizioni ricostruite sono comunque diverse da quelle originarie, per cui ci si dovrà aspettare una fase di aggiustamento fino al raggiungimento di un nuovo equilibrio. Si dovranno limitare gli interventi strettamente ingegneristici che portano alla realizzazione di aste fluviali

Foto 4.1.8. Fenomeni di erosione incanalata su pendice argillosa di abbandono.



regolari (idraulicamente ineccepibili), ma molto più rigidi nei confronti dei possibili aggiustamenti operati dal moto della corrente.

Viceversa, l'acqua di deflusso superficiale dell'area genera problematiche diverse, a seconda delle condizioni ambientali. In siti umidi o in aree particolarmente sensibili a fenomeni erosivi, e a movimenti di massa superficiali, il rimodellamento deve favorire un rapido e sicuro allontanamento delle acque in eccesso limitandone l'infiltrazione e l'accumulo. Pendii ripidi favoriranno un maggiore deflusso superficiale a scapito dell'infiltrazione; viceversa pendii poco inclinati favoriranno una maggiore infiltrazione, ed accumulo di acqua. Anche la lunghezza delle scarpate gioca un ruolo importante: al suo aumentare si registra sempre un aumento nei volumi del deflusso associati ad un aumento nella velocità e nell'erosione, specie quella incanalata. Così come la loro altezza: a parità di materiale, alti dislivelli risulteranno più stabili se modellati con pendii a limitata pendenza; mentre piccoli dislivelli potranno essere sistemati facendo ricorso a scarpate ripide, con pendenze forti, senza che si manifestino particolari problemi di stabilità. Invece la forma differenzia le superfici convesse, dove vi è un aumento diretto del deflusso, all'aumentare della pendenza, rispetto alle superfici concave, dove al diminuire della pendenza si ha, in genere, un forte decremento nel deflusso (Fig. 4.1.24).

In zone siccitose od in aree esposte a meridione si dovranno invece preferire forme che reindirizzino il deflusso rallentandolo, favorendo, ove è possibile, l'infiltrazione e/o lo

Fig.4.1.24. Forme elementari nella risistemazione morfologica e nella regimazione idraulica:

A) zona concava (con linee di flusso che convergono: più stabile meccanicamente, con più erosione incanalata, con più deflusso, con più umidità);

B) zona convessa (con linee di deflusso che divergono: più instabile meccanicamente, con più erosione diffusa, con minor deflusso, maggiormente siccitosa).

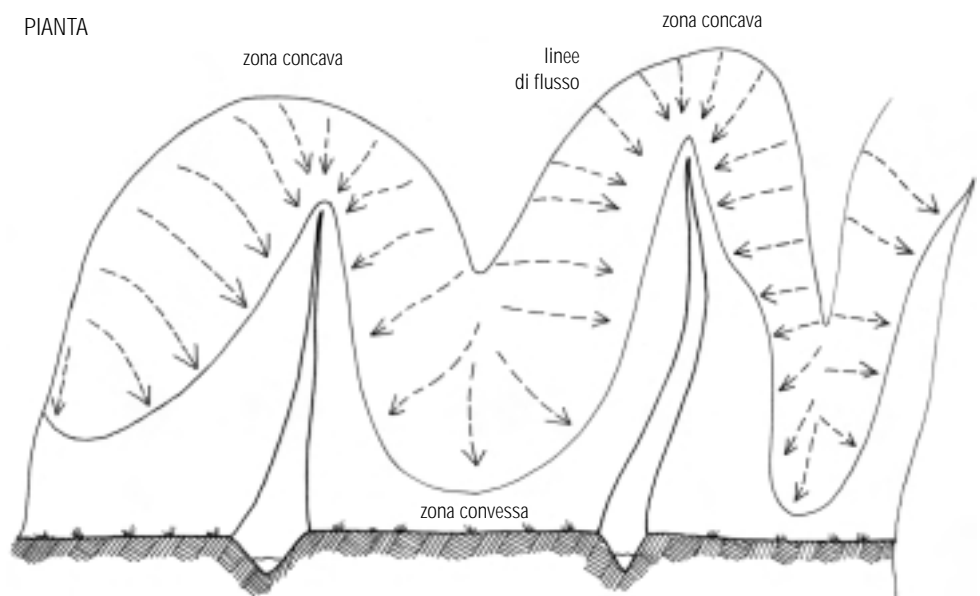




Foto 4.1.9. Fenomeni di erosione incanalata su substrato sabbioso.

stoccaggio delle acque meteoriche a servizio della vegetazione presente. In queste aree, infatti la disponibilità idrica rappresenta il fattore limitante di tutta l'attività biologica. Questo accumulo, sia superficiale che sotterraneo, non dovrà in nessun modo compromettere le condizioni di stabilità geomeccaniche del sito.

In tutte le situazioni il modellamento dovrà sempre minimizzare il rischio di erosione. Si dovranno evitare pendici troppo pendenti o troppo lunghe, così come si dovranno evitare grandi concentrazioni di deflusso, sia superficiale che sotterraneo, alla base dei versanti, interrompendo i lunghi pendii con zone subpianeggianti (gradoni, terrazzi), ove posizionare la rete di raccolta ed allontanamento dell'acqua in eccesso.

Presenza di falde

Altro elemento fondamentale per il mantenimento della stabilità è rappresentato dalla presenza di falde e dei relativi affioramenti a giorno. La loro azione si manifesta direttamente, con pressioni idrostatiche, idrodinamiche, saturazioni ed, indirettamente, con alterazioni delle rocce e lisciviazioni. Per un loro efficace controllo si possono adottare strategie passive, adattando le zone interessate dall'affioramento a queste condizioni più critiche, limitando ad esempio le pendenze, o all'opposto adottando strategie attive con interventi di tipo ingegneristico; si possono così progettare interventi che intercettino le falde, le captino, permettendo un abbassamento delle quote piezometriche ed un allontanamento controllato delle acque stesse.



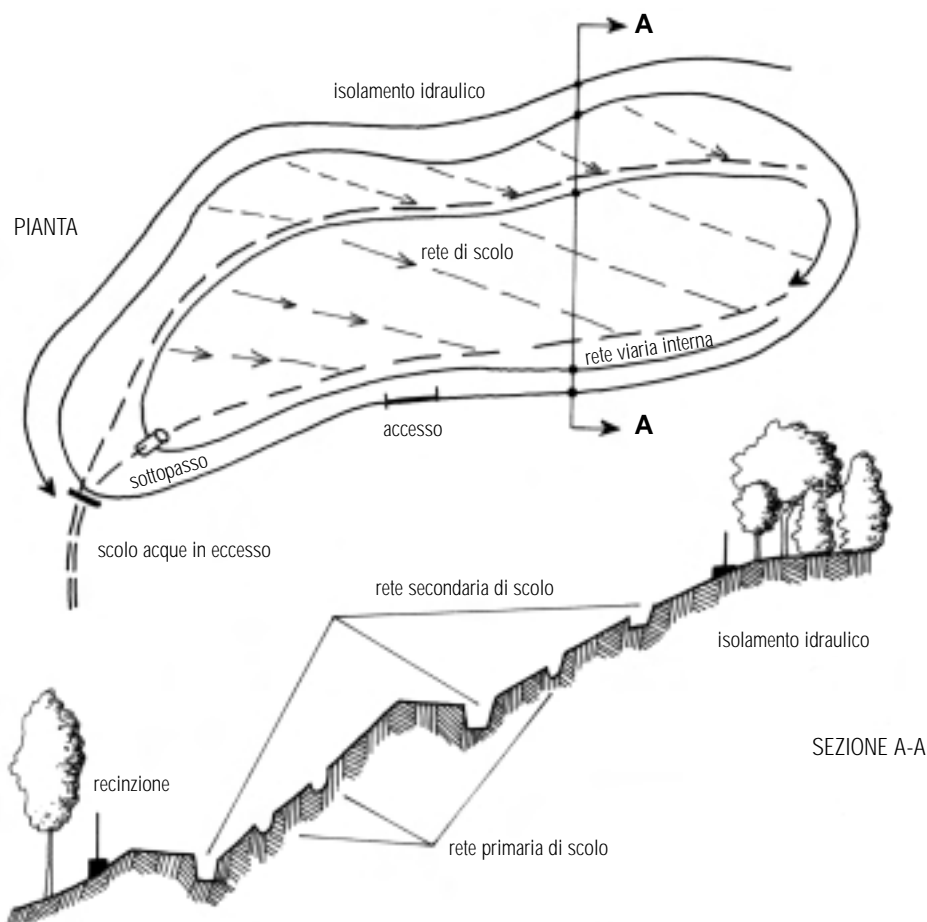
Foto 4.1.10. Elemento in calcestruzzo del sottopasso della pista interna crollato a causa dell'erosione della rete di scolo.

Visti gli ambiti di lavoro, è certamente preferibile un approccio di tipo passivo, che non comporta la presenza di opere artificiali, che hanno una operatività comunque limitata nel tempo. Si evitano in questo modo le conseguenze nefaste derivate dalla perdita delle loro funzioni, elemento certo nel lungo periodo. Non bisogna infatti dimenticare che si è in presenza di interventi, nella maggior parte dei casi, estensivi, con limitati ritorni di tipo economico e senza la possibilità di interventi di manutenzione costosi. Una strategia attiva può però essere necessaria in presenza di fattori limitanti che impediscono un adeguato rimodellamento o in presenza di manufatti od attività economiche che devono essere preservati, dove esiste cioè una disponibilità di risorse che permette una periodica manutenzione.

4.1.3.4. ACCESSIBILITÀ E VIABILITÀ

Un ulteriore elemento progettuale di grande importanza riguarda la predisposizione di vie di accesso alle diverse aree risistemate, in continuità con il reticolo viario territoriale (Fig. 4.1.25). Questo aspetto può apparire trascurabile, ma da un punto di vista operativo rappresenta invece un fattore decisivo: nel breve periodo per l'esecuzione dei lavori, per la manutenzione, per il recupero delle fallanze e per la sorveglianza; nel lungo periodo, per consentire le attività legate alla gestione dell'area, al suo controllo e per gli interventi straordinari, come per esempio l'azione antincendio.

Fig.4.1.25. Accessibilità a sito risistemato: schema tipo.



Durante la fase di scavo, in genere, la viabilità è sempre buona, mentre l'accessibilità viene limitata o fortemente controllata, sia per la presenza di infrastrutture costose, che per ragioni di sicurezza e responsabilità legale. Al termine dell'attività mineraria questo controllo, in genere, cessa o viene fortemente ridimensionato, in funzione della destinazione finale e dei possibili problemi di sicurezza (cfr. Cap.4.1.3.5). La problematica dell'accessibilità deve essere risolta in termini generali, predisponendo un accesso stabile, utilizzabile in tutte le stagioni, per consentire il passaggio



di macchine ed attrezzature necessarie sia alla risistemazione, che alla gestione ed utilizzazione finale del sito. L'accesso dovrà preferibilmente essere unico, presidiato o controllato, specie in presenza di elementi vulnerabili (laghi, falde superficiali), al fine di evitare danneggiamenti o scarichi abusivi. Le esigenze comunque variano in funzione della localizzazione del sito e della destinazione finale prescelta.

Dall'accesso esterno inoltre si dovrà sviluppare un sistema viario interno, che connetta tutte le diverse zone. Anche questo sistema dovrà essere stabile e percorribile, specie nei primi anni e nelle diverse stagioni, per favorire interventi di manutenzione rapidi. L'assenza di questa rete, od un suo sottodimensionamento, oltre che porre problemi in fase realizzativa, comporta problemi ben più gravi in fase di manutenzione, gestione e controllo. L'eventualità di interventi di risistemazione legati a cedimenti, risarcimenti, rilavorazioni (sia per scarpate, che per la rete idraulica) non deve mai essere sottovalutata, vista la natura dell'intervento. In assenza di un accesso comodo e stabile questi interventi imprevisi comporteranno la necessità di nuove piste di accesso, a volte anche per mezzi meccanici di dimensione e peso considerevoli. Queste sconvolgerebbero situazioni ed ambiti già risistemati e stabilizzati, con un conseguente aggravio tecnico-economico, sia in fase di apertura delle piste che nella loro risistemazione. Il sistema viario interno può comunque essere armonizzato con gli altri interventi, utilizzandolo, ad esempio, come sede di parte della rete idraulica di ordine superiore, facilitando così sia la sua costruzione che la sua gestione.

La problematica della viabilità all'interno dei siti di cava recuperati negli anni ha assunto una rilevanza sempre maggiore: mentre in passato si riutilizzavano le strutture realizzate in fase di coltivazione (piste, gradoni, ecc.), che consentivano una capillare accessibilità a tutti i fronti di scavo e di abbandono, negli ultimi anni si è poi affermata la tendenza a sostituire o sovrapporre questi elementi con altri più "naturali" e maggiormente rispondenti a criteri paesaggistici ed ambientali. Ciò ha fatto emergere il problema dell'accessibilità che deve così essere progettata con attenzione, per limitare gli impatti ma, allo stesso tempo, contenere i costi di risistemazione di zone e strutture interessate dal passaggio di mezzi meccanici.

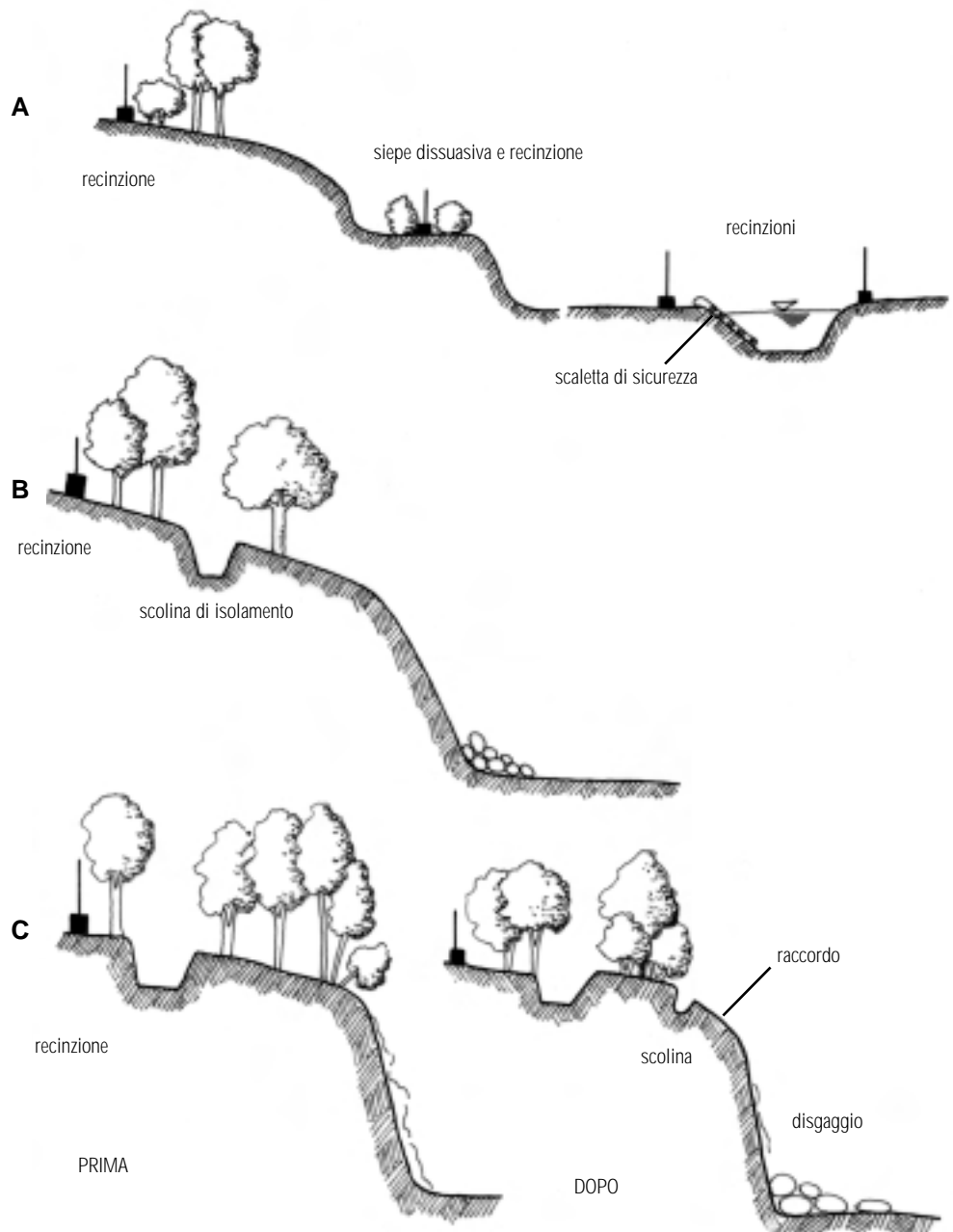
La viabilità deve perciò essere progettata di pari passo con la sistemazione morfologica, idraulica e paesaggistica, limitando allo stretto necessario le piste di accesso, raccordandola con i versanti e rendendola, nel contempo, la meno visibile possibile, grazie anche ad un uso accorto della vegetazione.

4.1.3.5 SICUREZZA

La progettazione morfologica deve infine cercare di massimizzare il grado di sicurezza dell'area risistemata. Infatti, anche in presenza di una corretta progettazione ingegneristica e geotecnica ed una accurata esecuzione dei lavori di risistemazione morfologica, esistono sempre situazioni di rischio legate alla morfologia ricreata (salti, scarpate, laghi, ecc.) ed alla natura delle rocce presenti (distacchi, crolli, frane, ecc.). In particolare è necessario considerare:

- rischi provenienti dall'esterno all'area, rappresentati da:
 - caduta di massi o altro materiale, in condizioni di stabilità precarie;
 - arrivi di acque superficiali e profonde non controllate;
 - presenza di salti o dirupi lungo i margini del sito;
- rischi interni all'area, rappresentati da:
 - cedimenti strutturali profondi;
 - distacco e caduta di singoli massi o ciottoli dalle pareti ricostruite;
 - smottamenti superficiali di materiale riportato;
 - presenza di situazioni di pericolo quali salti, bacini idrici o altro.

Fig. 4.1.26. Messa in sicurezza di scarpate e pareti:
A) interdizione;
B) isolamento idraulico;
C) scoronamento e raccordo.



Tutto questo comporta un certo grado di rischio, che deve essere attenuato se non eliminato del tutto. Una gran parte di questi rischi può essere abbattuta direttamente attraverso la progettazione generale, in modo tale da rendere le forme ricostruite le più stabili possibili, limitando al massimo le pendenze di abbandono finali. Ove questo non sia possibile, si dovranno allora adottare tutta una serie di misure attive di protezione, in funzione delle particolari situazioni locali.

Recinzione e segnaletica

Tutte le aree potenzialmente pericolose devono essere adeguatamente recintate e segnalate da appositi cartelli dissuasivi: in particolare tutte le aree scoscese, o a forte pendenza, devono sempre avere la loro barriera di protezione, associata ad apposite segnalazioni di pericolo (Fig. 4.1.26 A). Accanto a questi interventi, che comunque hanno una durata limitata nel tempo e richiedono controllo e manutenzione, può essere utile associare, ove possibile, una barriera naturale; questa può essere costituita da arbusti ed alberelli, possibilmente spinosi, messi a dimora con sesti molto ravvicinati, a formare un ostacolo permanente, invalicabile ed a crescita continua. A questo scopo, tradizionalmente in area emiliano-romagnola, si utilizzavano specie quali: *Paliurus spina-christi*, *Rhamnus catharticus*, *Prunus spinosa*, *Crataegus monogyna* e, a volte, anche *Robinia pseudacacia* e *Gleditsia triacanthos*. In certe zone di collina o verso la costa, più aride e a suolo sciolto si potrebbe utilizzare anche *Hippophae rhamnoides* oppure *Pyracantha coccinea*.

Allo stesso modo delle scarpate, debbono essere segnalate e isolate tutte le altre presenze pericolose, come i bacini d'acqua o le zone paludose, questo sia per evitare intrusioni pericolose che per difendere l'habitat da azioni fraudolente (scarico materiali, caccia non autorizzata, ecc.).

Isolamento idraulico

Lungo tutto il perimetro dell'area, in posizione stabile e sicura, è necessario predisporre una profonda affossatura, per raccogliere l'eventuale acqua di scorrimento superficiale proveniente dalle aree limitrofe; questa affossatura deve essere poi raccordata al reticolo idraulico territoriale. Quest'intervento ha lo scopo di isolare idraulicamente tutta l'area ed in particolare scarpate o pareti, evitando scorrimenti incontrollati che potrebbero favorire erosioni localizzate o cedimenti. Nel contempo questo limiterà la quantità di acque superficiali da gestire all'interno del sito (Fig. 4.1.26 B). Essendo l'affossatura un'opera fondamentale per il mantenimento di un buon livello di sicurezza, sarà necessario prevedere la realizzazione anche di tutte le opere accessorie, necessarie per favorire un veloce, sicuro e stabile allontanamento delle acque in eccesso (cfr. Cap. 4.3).

Scoronamento del ciglio e disgaggio delle scarpate

Lungo tutte le pendici presenti nell'area sarà necessario predisporre un intervento di scoronamento e di raccordo, per abbattere sia materiale roccioso, che terreno e vegetazione posizionati in prossimità del ciglio. A questo lavoro di messa in sicurezza va poi associato un intervento di rimodellamento dei bordi, al fine di creare delle superfici raccordate più stabili. In queste aree può anche essere utile inserire opere di ingegneria naturalistica, che mitighino l'effetto sia sul paesaggio che sull'erosione superficiale (cfr. Cap. 4.4). A tale proposito si può predisporre una canaletta di raccolta delle acque superficiali in prossimità del ciglio, collegata con il reticolo idraulico generale. Infine, in questa fase, si dovrà prevedere il disgaggio di tutte le scarpate, al fine di scaricare le pareti di tutto il materiale smosso presente (Fig. 4.1.26 C).

Messa in sicurezza delle pareti

Anche in presenza di un'attenta progettazione ingegneristica e geotecnica esiste sempre una probabilità di distacco di rocce e massi più o meno grandi dalle pareti forte-



mente inclinate, ottenute dallo scavo e dalla risistemazione finale. Questa probabilità aumenta all'aumentare della pendenza e dell'altezza delle pareti. Oltre ad un'azione preventiva diretta volta al disgiungimento di tutto il materiale instabile, per limitare gli effetti di questi eventuali distacchi può essere utile predisporre delle strutture di contenimento e difesa passiva. Al riguardo esistono diverse possibilità:

- *reti di protezione*: direttamente sulla parete può essere utile distendere e fissare una rete metallica, allo scopo di limitare il distacco e controllare l'eventuale caduta di materiale smosso. In genere si usa una rete tessuta in acciaio zincato (2.7-3 mm), a formare una struttura a doppia torsione, a maglie esagonali, capace di intercettare detrito fino a 80-100 cm di diametro (Fig. 4.1.27 A). Queste reti vengono fissate alla parete, mediante un sistema di ancoraggio costituito da bulloni, tasselli, barre, partendo dall'alto e via via scendendo, lasciando la parte inferiore allentata, per favorire l'accumulo del materiale caduto e l'eventuale sua asportazione. Per rinforzare le reti può essere utile posizionare funi di armatura in diverse direzioni anch'esse periodicamente ancorate. Queste strutture difensive hanno un certo impatto visivo, ma non limitano lo sviluppo della copertura vegetale, almeno fino ad un certo diametro. Visti i costi sono opere da prevedersi solo in prossimità di insediamenti civili (case, strade, piloni delle linee elettriche, ecc.), ove sia richiesta una protezione elevata, anche verso piccole cadute;
- *barriere paramassi*: sono strutture passive, posizionate al piede di scarpate, allo scopo di arrestare sassi e massi, anche di grosse dimensioni. Possono essere:
 - *barriere rigide*: realizzate in calcestruzzo, gabbionate o altro, a formare strutture di grandi dimensioni, capaci di assorbire impatti violenti. Hanno un impatto ambientale e soprattutto paesaggistico forte, sia in fase di realizzazione, per le opere accessorie che richiedono, sia in fase di esercizio. Si può in parte mitigarne l'effetto con un sapiente uso della vegetazione. Sono da utilizzare dove esistono spazi sufficienti al loro posizionamento e dove maggiore è il rischio di scarichi o flussi detritici di grandi dimensioni;
 - *barriere elastiche*: realizzate con elementi leggeri, facilmente deformabili e resistenti. Sono strutture semplici, di facile trasporto ed installazione, adatte anche ad ambiti scoscesi o in spazi ristretti (Fig. 4.1.27 B). Sono in genere formate da pannelli di rete estensibile, realizzate in acciaio galvanizzato, ad elevata resistenza. Questi pannelli devono essere posizionati al piede delle scarpate, utilizzando ritti metallici, opportunamente controventati, sia a monte che a valle, come sostegno. I singoli pannelli devono essere tra loro legati attraverso funi di cuci-

tura in acciaio. Tutti gli elementi di sostegno devono essere ancorati alla roccia o a barre o micropali. Hanno un impatto visivo limitato, sia nella fase di realizzazione che di esercizio. Si adottano dove non si prevedono cadute di grandi dimensioni. Molte volte sono associate ad altre strutture difensive, con lo scopo di rallentare e frenare il materiale in movimento;

- *valli e rilevati paramassi*: sono strutture passive, di grandi dimensioni, da posizionare alla base dei versanti rocciosi soggetti a possibili crolli, distacchi o colate di grandi dimensioni e sono realizzate attraverso scavi o riporti, a seconda delle condizioni morfologiche locali. Si possono avere:
 - *valli*: fossati ottenuti dallo scavo di una cunetta sagomata di grandi dimensioni che intercetta ed accumula il materiale in movimento. Il fondo dello scavo può essere difeso dagli urti da uno strato di materiale sciolto (50-100 cm di spessore) che attutisce l'effetto della caduta dei massi;
 - *rilevati*: costituiti da un terrapieno situato alla base del pendio, posto trasversalmente alla parete e realizzato con materiale incoerente prelevato *in situ*. Le possibilità costruttive variano in funzione degli spazi e delle disponibilità economiche, potendo anche associare gabbionate, muri cellulari, o sostegni in calcestruzzo. Sono strutture a forte impatto visivo, ma che possono essere adeguatamente rivestite e reinserite nell'ambito circostante (Fig. 4.1.27 C).

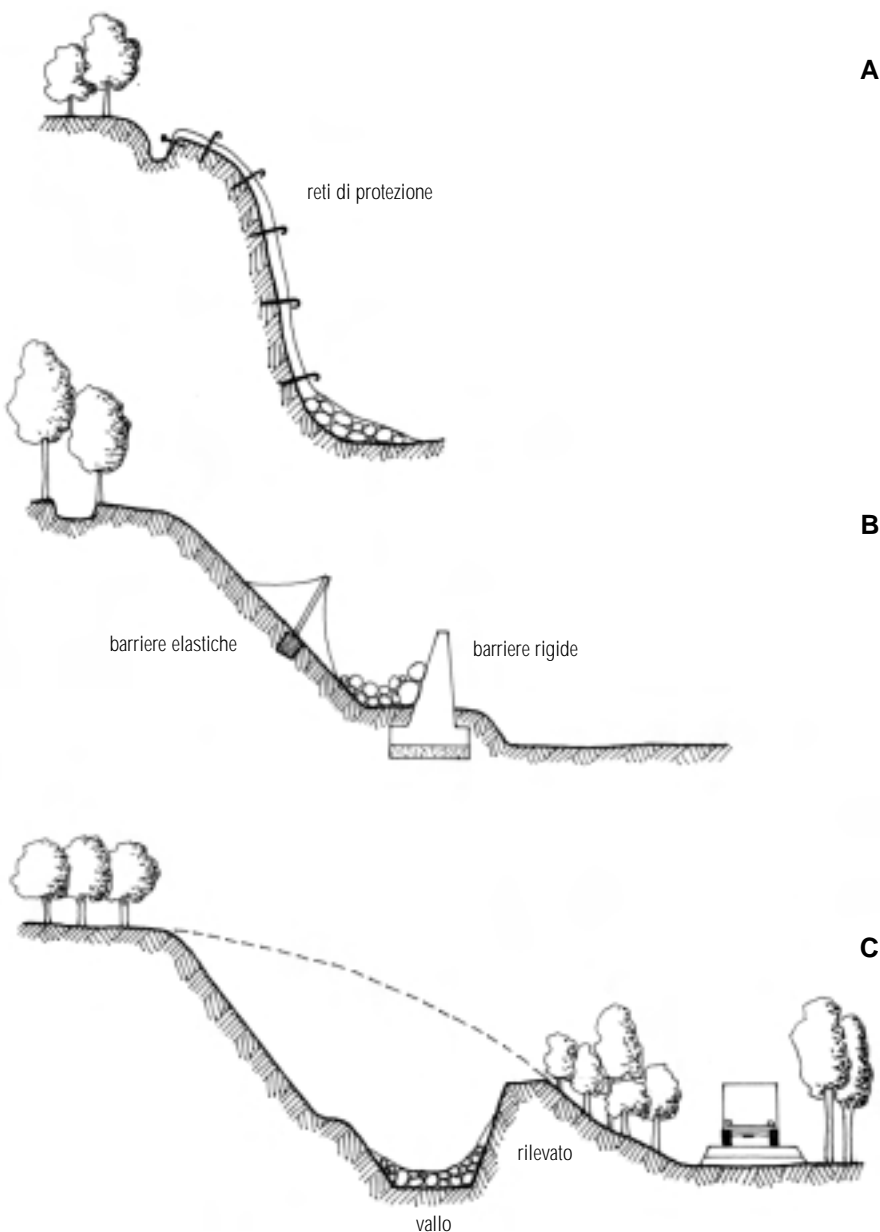
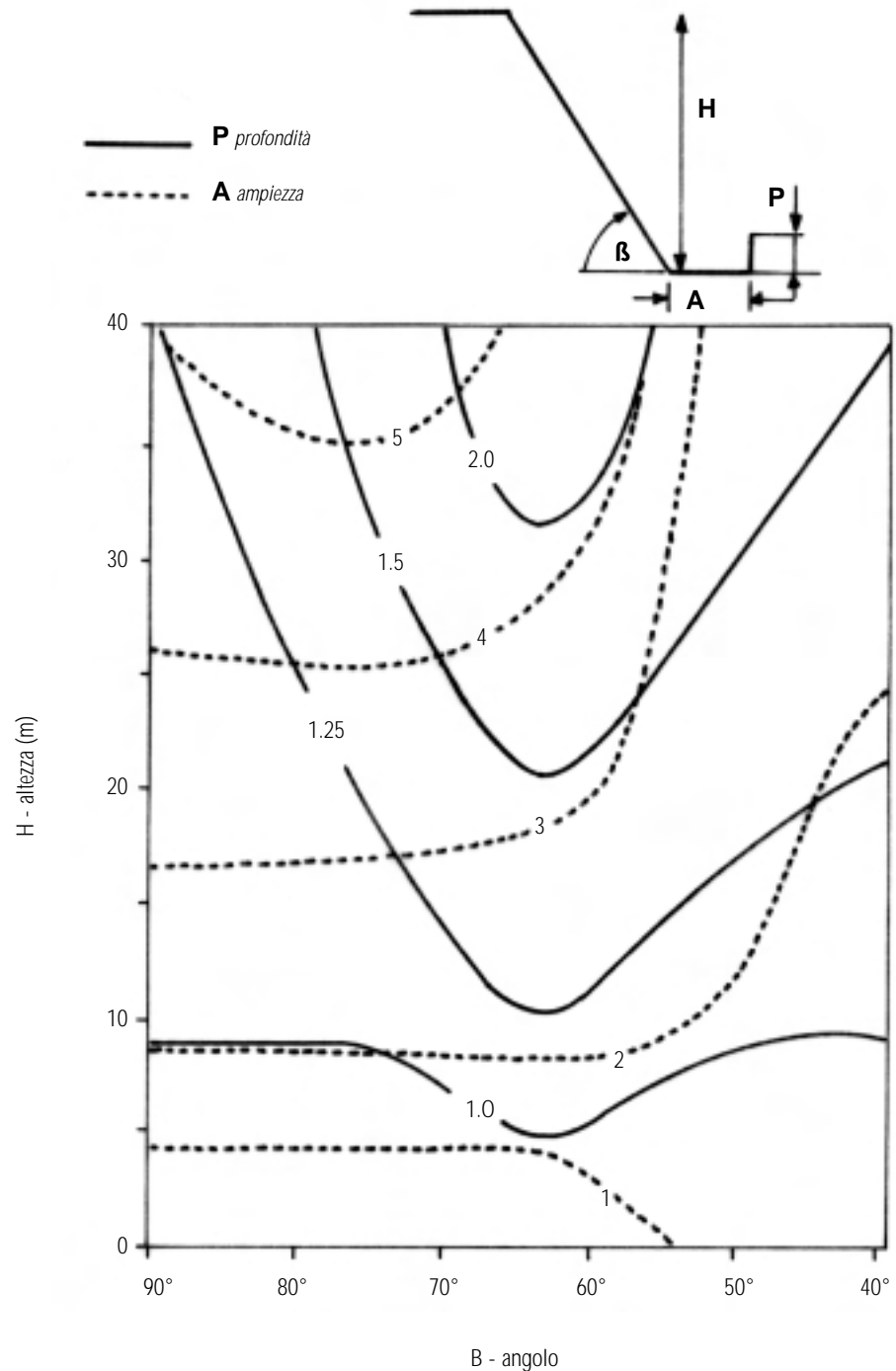


Fig.4.1.27. Messa in sicurezza di pareti con interventi di tipo passivo:
 A) reti di protezione;
 B) barriere paramassi;
 C) valli/rilevati paramassi.

Fig. 4.1.28. Dimensionamento di un vallo paramassi (ridisegnato da Whiteside, 1986).



Valli e rilevati sono entrambe strutture di tipo ingegneristico, per cui devono essere progettate sulla base di accurate analisi volte a definire i volumi, le traiettorie, il comportamento dei massi, argomenti questi che esulano dal contenuto di questo manuale. Pertanto si rimanda alla letteratura tecnica specifica.

Nelle risistemazioni delle aree estrattive esaurite la necessità di opere paramassi è in linea di principio limitata, sia per le destinazioni comunemente estensive, sia per l'azione preventiva, rappresentata dal rimodellamento del sito, a seguito di una attenta analisi geotecnica che riporta le aree critiche presenti a condizioni di stabilità. Solo in presenza di manufatti particolari (case, strade, impianti elettrici, ecc.) o di condizioni geomorfologiche particolarmente difficili può essere necessario ricorrere a queste opere.

4.2.1 FINALITÀ

Insieme degli interventi necessari per ripristinare o ricostruire, in tutte le situazioni morfologicamente stabili, un adeguato substrato pedologico, per consentire un efficace isolamento di eventuali materiali tossici, un ripristino della fertilità, un efficace reimpianto della vegetazione ed un veloce riavvio dell'evoluzione biologica generale del sito.

4.2.2 QUADRO D'INSIEME

Negli interventi di ripristino ambientale troppo spesso ci si concentra sull'impianto della vegetazione, dimenticando come questa sia in stretta relazione al substrato: in questi ambiti ricostruiti devono essere invece riavviati tutti i cicli trofici e tutte le interazioni tra le specie. Gli ambiti rinaturalizzati sono ambienti giovani, ai primi stadi di evoluzione delle serie dinamiche, per cui l'effetto della stazione ed in particolare del substrato minerale è ancora predominante sull'attività biologica. Bisogna perciò prestare molta attenzione agli aspetti pedologici. Del resto molte ricerche hanno dimostrato come la crescita della vegetazione sia significativamente correlata con l'apporto di materiale pedogenizzato (Muzzi e Roffi, 1999).

L'attenzione per il substrato deve iniziare già al momento delle scelte progettuali, attraverso una corretta interpretazione delle informazioni raccolte durante le indagini preliminari.

Innanzitutto si deve eseguire l'analisi pedologica dei diversi ambiti territoriali omogenei individuati nell'area da recuperare, per definire le caratteristiche del suolo originario, base su cui stabilire il carattere dell'intervento (cfr. Cap. 3.2), scegliendo poi tra l'opzione traslativa o quella ricostruttiva. In particolare, la scelta dell'opzione traslativa (che prevede il trasferimento contemporaneo del substrato e della copertura vegetale) comporta la definizione dei parametri (profondità, larghezza, lunghezza) delle unità da trapiantare, la predisposizione dei macchinari e delle sequenze operative, l'asporto, la rideposizione ed infine il recupero delle linee di frattura tra i diversi elementi.

Invece l'opzione ricostruttiva prevede la rimozione, la conservazione e la ricostruzione del profilo del suolo senza prestare particolari attenzioni alla copertura vegetale; questa operazione comunque permette, a fine escavazione, di disporre di materiale sempre molto utile al ripristino, in quanto già pedogenizzato (anche se rimescolato, diluito ed alterato). Anche in questo caso, bisognerebbe porre grande attenzione agli orizzonti superficiali (primi centimetri di profondità), in quanto ricchi in pedo-flora (es. funghi) e pedo-fauna (artropodi, anellidi), ma anche vera e propria "banca del seme" delle specie vegetali superiori che crescono spontaneamente nell'area, fondamentali per gli interventi di tipo naturalistico.

In caso di carenza di materiale pedogenizzato *in loco*, si dovrà invece provvedere al suo reperimento in zona; tuttavia si dovrà evitare, o per lo meno limitare, la raccolta e la distribuzione di materiale molto diverso dal substrato originario, vista l'elevata influenza che ha il substrato, almeno nel primo periodo, sull'attività biologica.

Il substrato deve essere rimosso in una stagione ed in presenza di condizioni adatte a minimizzare i danni della movimentazione; deve essere conservato in modo adeguato, differenziando gli interventi in funzione della qualità del materiale.

In caso di mancata disponibilità o reperibilità di un substrato pedogenizzato anche di scarsa qualità è possibile utilizzare direttamente la roccia madre, alterandola fisicamente ed arricchendola chimicamente e biologicamente, attraverso degli interventi agronomici (cfr. Cap. 4.6), anche se l'intervento può essere molto oneroso.

Altrettanto attenta deve essere la fase della ricostruzione dei diversi strati originali: bisognerà innanzitutto valutare la qualità del substrato litologico (roccia madre o eventuali residui di escavazione e lavorazione) in relazione alla vegetazione e all'ambiente che si vogliono ricostruire. La presenza di percentuali elevate di sostanze tossiche o fitotossiche, anche legate alla degradazione del minerale, comporta la necessità di isolare con spessori adeguati il materiale originale, ricorrendo a strati tampone o impermeabilizzanti, di spessore consistente, per limitarne gli effetti indesiderati.

Con il materiale pedologico disponibile, tenuto comunque conto delle altre variabili in gioco, si tenderà a differenziare il più possibile tra loro i diversi siti presenti nell'area di intervento (sub-aree omogenee); si aumenterà così la diversità in habitat e unità di paesaggio e quindi in forme di vita vegetale ed animale.

4.2.3 DETTAGLI

La progettazione degli interventi sul substrato pedologico si articola in diversi momenti. Partendo dall'analisi preliminare, è innanzitutto necessario aumentarne il dettaglio (cfr. Cap. 3.1.1.5). L'analisi deve portare alla delimitazione ed alla caratterizzazione delle diverse aree omogenee presenti nel sito.

Sempre in questa fase è necessario anche caratterizzare il materiale minerale che verrà utilizzato nel rimodellamento morfologico finale del fronte di cava (minerale in posto, minerale movimentato, scarti di lavorazione, ecc.). Innanzitutto è necessario definirne i parametri fisico - meccanici che ne condizionano la stabilità. Poi sono i parametri chimico - fisici che debbono essere quantificati. Il substrato rimodellato, infatti, potrebbe essere caratterizzato dalla presenza di elementi tossici sia per gli animali (asbesto, arsenico, ecc.) che per i vegetali (pirite, metalli pesanti, sodio, ecc.). In entrambi i casi può essere necessario, o utile, predisporre degli interventi che ne attenuino l'influenza: ad es. uno strato di isolamento tra il minerale stesso e l'ambito di pertinenza biologico.

Inoltre è molto importante prevedere le caratteristiche ecologiche che dovranno avere le diverse unità paesaggistiche ricostruite a conclusione dell'escavazione. Bisogna evitare, od almeno limitare, la creazione di ambiti e condizioni troppo diversi da quelli antecedenti l'attività di cava, in quanto questo potrebbe creare dinamiche e paesaggi estranei rispetto al territorio circostante per un lungo periodo di tempo.

Combinando assieme queste informazioni (stato di fatto, ipotesi progettuali) è possibile passare alla definizione delle scelte di progetto relative al substrato superficiale, al fine di giungere ad un armonico inserimento dell'area ripristinata nel paesaggio circostante.

4.2.3.1 CARATTERE DEL RIPRISTINO

Innanzitutto si deve scegliere il carattere del ripristino tra le opzioni traslativa e ricostruttiva (cfr. Cap. 3.2). Da questa scelta ne conseguono altre in funzione delle condizioni presenti.

Metodo traslativo (“*transplanting*”)

Questo metodo, come già illustrato nel Cap. 3.2, è applicabile solo in presenza di condizioni ambientali favorevoli dal punto di vista morfologico (bassa pendenza), pedologico (terreni profondi e fertili) e climatico (assenza di fenomeni di intensità estrema). Inoltre questo metodo potrà essere adottato solo in presenza di un'organizzazione dell'attività estrattiva che preveda il recupero in continuo del fronte di cava, a “*step*” cadenzati nell'anno, ed in presenza di un parco macchine opportunamente adeguato.

Trapianto di una prateria

Il trapianto di una prateria è la condizione più semplice, ma che ha fornito in diversi casi i risultati migliori. La tecnica si articola in diverse fasi:

- identificazione delle aree ove è possibile il trapianto, dove cioè l'accessibilità del sito, la giacitura delle superfici e lo sviluppo in spessore e tipo di suolo possono consentire un facile asporto *in toto* del terreno e della vegetazione soprastante, grazie a speciali macchine operatrici;
- individuazione dei diversi orizzonti del profilo del suolo da asportare e della profondità raggiunta dalle radici delle piante che qui crescono: sulla base degli spessori individuati e delle macchine disponibili (pale gommata di adeguata potenza) si stabiliranno le dimensioni ottimali degli elementi da trapiantare;
- preparazione dell'area di cava da ripristinare, ricostruendo un'adeguata morfologia, drenaggio ed esposizione, simili al sito di prelievo;
- preparazione della macchina operatrice specifica per questo lavoro, rappresentata da una pala gommata di potenza adeguata alla cui benna è collegata un'apposita appendice piana, che presenta un elemento frontale di taglio sagomato e ben affi-

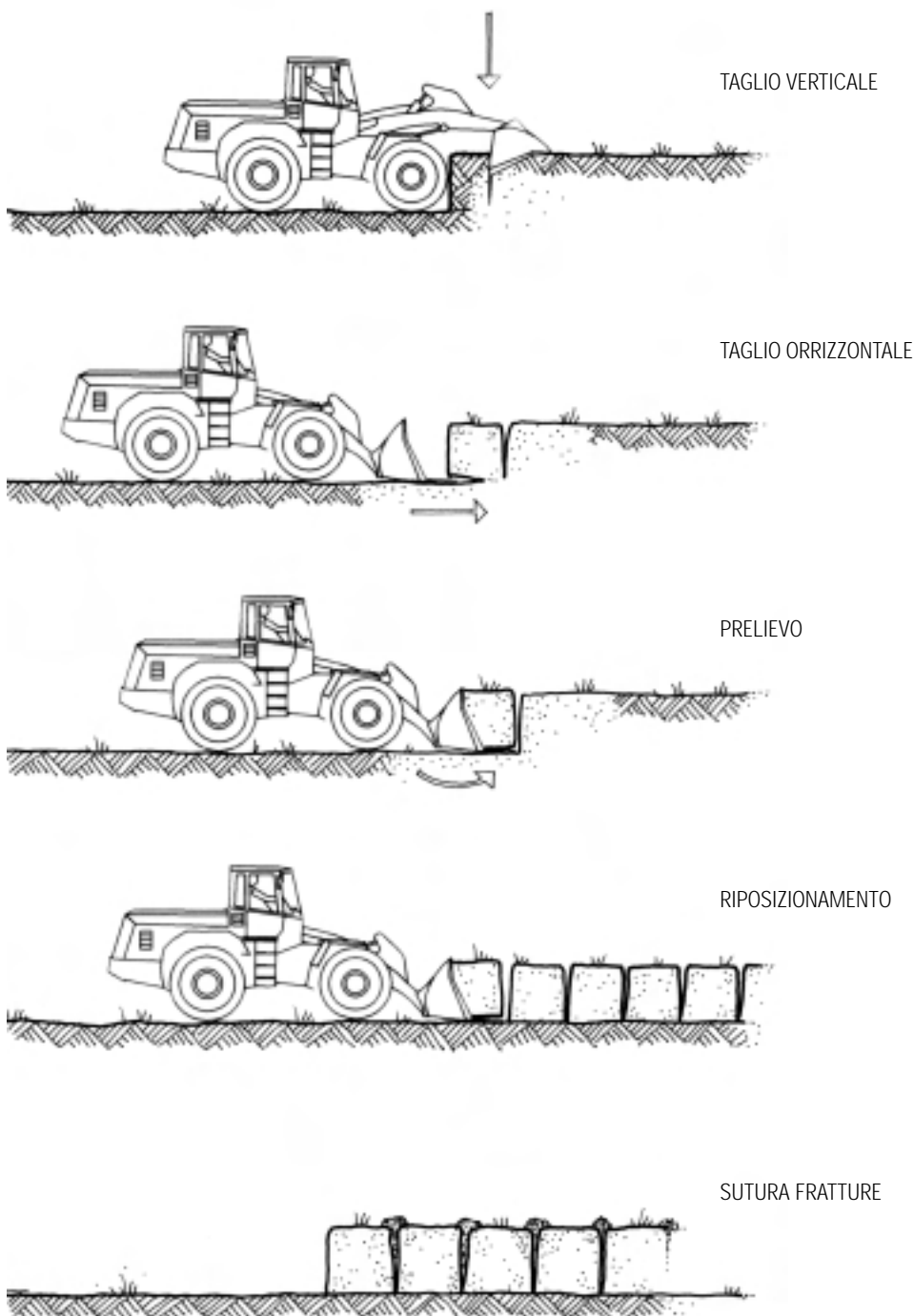
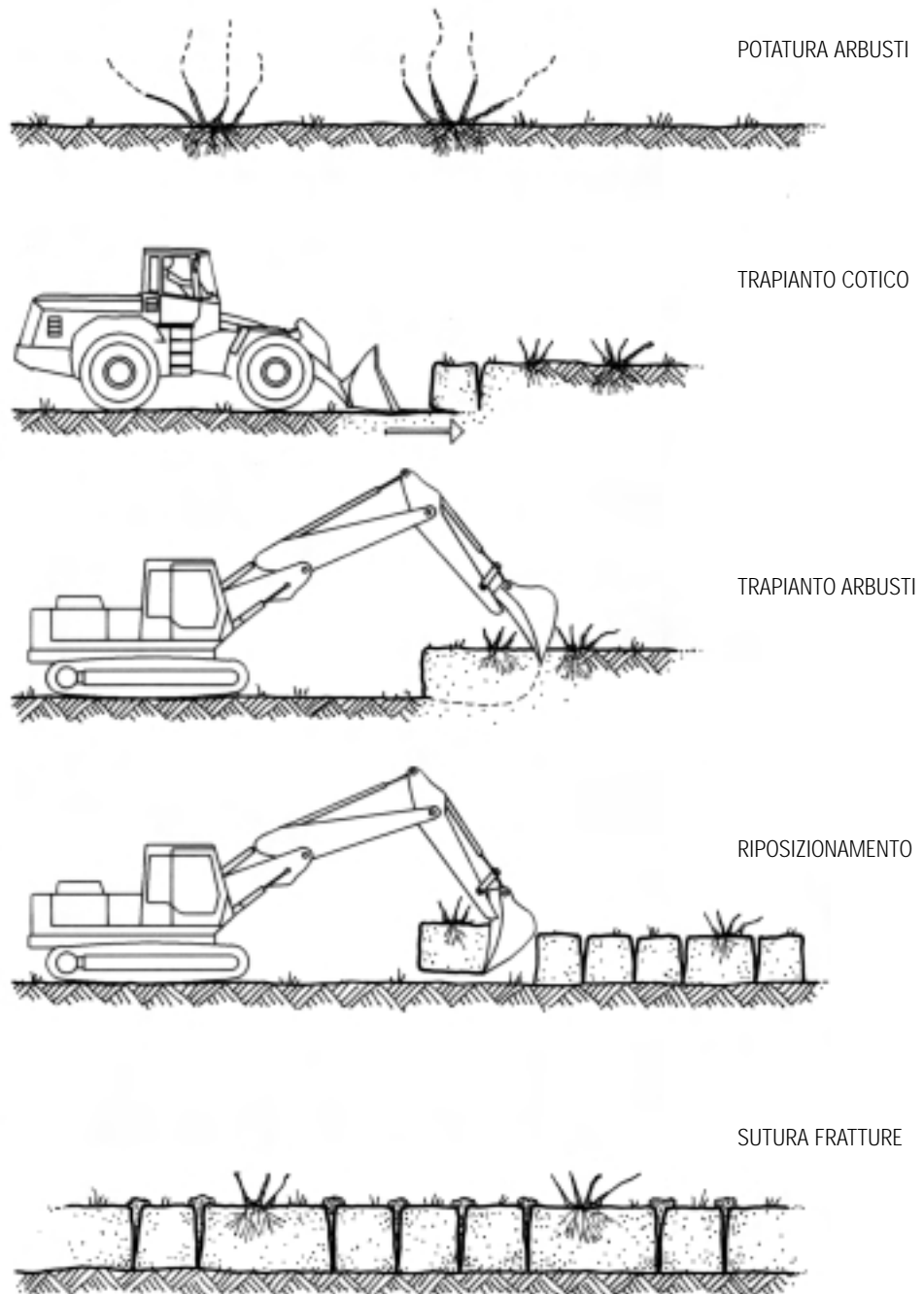


Fig.4.2.1. Metodo del "transplanting": fasi dello "spostamento" di una prateria.

Fig. 4.2.2. Metodo del "transplanting": fasi dello "spostamento" di un arbusteto.



lato, realizzato in acciaio indurito; inoltre sono presenti ai laterali, anch'esse sagomate (Fig. 4.2.1);

- predisposizione degli schemi operativi delle fasi di asporto e deposito, al fine di evitare eccessive alterazioni o calpestio;
- predisposizione, con escavatore, della trincea di testa e degli spazi di manovra, dove si posiziona e si muove la macchina operatrice;
- prelievo dell'elemento da trapiantare:
 - taglio frontale del cotico ruotando la benna fino alla posizione verticale e poi abbassandola;
 - sollevamento della benna e l'arretramento della macchina;
 - abbassamento e posizionamento orizzontale della benna alla quota desiderata;
 - lento avanzamento della macchina fino a raggiungere il taglio verticale;
 - sollevamento della benna;
- movimentazione immediata dell'elemento prelevato, evitando scossoni che causino disgregazioni e distacchi nella zolla;
- deposizione dell'elemento nel sito finale, mantenendo inalterata la stratificazione

originaria, ripiegando parzialmente la benna ed arretrando lentamente;

- realizzazione degli interventi di “sutura” delle linee di discontinuità generate dal trapianto, attraverso la distribuzione in questi varchi di terreno raccolto nel sito origine ed una sua prima compattazione;
- attivazione di misure di controllo della crescita e diffusione di specie vegetali ruderali ed annuali, eventualmente insediatesi su queste strisce di terreno nudo, attraverso sfalci o diserbo; lo scopo è quello di favorire l’insediamento di specie perenni, provenienti per propagazione naturale dalle unità trapiantate.

L’epoca di esecuzione di questo tipo di interventi varia in funzione del substrato:

- in ambiti sciolti si può optare per diverse epoche; esperienze inglesi hanno evidenziato nel periodo autunno inverno il momento ideale, con risultati migliori rispetto al periodo estivo. La presenza di una certa quantità di acqua favorisce una maggiore plasticità e coesione della massa, limitando i danni dovuti a fratture e vuoti che influenzano pesantemente la composizione della copertura, anche se possono aumentare i rischi di compattazione;
- in ambiti compatti si dovrà optare per i periodi più siccitosi, quando il suolo presenta il minimo contenuto in acqua, al fine di limitare i danni alla struttura e l’eccessiva compattazione dovuti all’uso delle macchine operatrici.

Trapianto di un prato arbustato

Nel caso in cui sul tratto di terreno da spostare e trapiantare siano presenti degli arbusti il problema diviene più complicato. In primo luogo la presenza di apparati radicali profondi ed espansi crea dei problemi nel taglio e nel distacco dei singoli elementi del cotico. Inoltre lo “scotico” con la benna può causare forti danni all’apparato radicale degli arbusti, così come la presenza di un apparato aereo espanso crea problemi nella movimentazione e nella successiva fase di attecchimento della pianta stessa. Questa tecnica perciò si adatta bene solo a siti con pochi arbusti o piccoli alberi. Questi devono comunque essere preventivamente potati o ceduati, al fine di ridurne le dimensioni (Fig. 4.2.2). Il distacco ed il trasporto delle piante arbustive è bene eseguirlo con il cucchiaio di un escavatore, in contemporanea con il distacco ed il trasporto degli elementi del cotico. La presenza di individui di medie e grandi dimensioni crea dei limiti temporali all’intervento, che dovrà coincidere con il riposo vegetativo degli stessi. La presenza di un numero elevato di arbusti oltre che creare problemi operativi e pratici pone anche problemi ecologici: il trapianto con una forte asportazione degli apparati aerei cambia drasticamente le condizioni stazionali entro la comunità stessa (es. ombreggiamento al suolo). Può quindi essere utile integrare l’originale copertura arbustiva potata con nuovi impianti.

Trapianto di un arboreto

In letteratura (Buckley, 1995) esistono anche esempi di trapianto di tratti di vegetazione arborea. I problemi sono gli stessi dei prati arbustati, ma molto più accentuati. Sono assai problematici la potatura, il prelievo e il trasporto dei singoli individui arborei, in associazione al prelievo del cotico erboso. Si hanno poi notevoli difficoltà nel ricreare in breve tempo le condizioni microambientali similari al sito originario. Esistono dei tentativi sperimentali, sempre in Gran Bretagna, dove accanto al trapianto di un certo numero di individui arborei preesistenti si è associato il trapianto di semenzali di specie a rapido accrescimento, a sesti di impianto molto stretti (1 m circa), per ricreare in breve tempo un adeguato addugiamento del cotico e preservare molte delle specie sciafile tipiche dei sottoboschi forestali; questi semenzali vanno poi periodicamente diradati.

Problemi del “transplanting”

Dalle esperienze di “transplanting” sono emersi diversi problemi operativi:

- difficoltà nella disponibilità di macchine atte a queste operazioni;

- difficoltà nella movimentazione a causa della facile disgregazione degli elementi del suolo, specie nei periodi secchi;
- difficoltà negli spostamenti delle macchine operatrici, soprattutto su substrati ricchi d'acqua o in periodi piovosi;
- difficoltà nel riposizionamento, con creazione di interstizi da chiudere manualmente;
- difficoltà nel ricreare una superficie regolare ed uniforme senza irregolarità;
- difficoltà nella preparazione, nel trapianto e nel successivo attecchimento di piante di grandi dimensioni;
- difficoltà nella ricostruzione di condizioni ambientali analoghe a quelle di partenza (es. boschi).

Metodo ricostruttivo

In tutti i casi dove le condizioni ecologiche e l'organizzazione del lavoro non consentono un agevole trapianto di tratti di vegetazione già esistente si dovrà ricorrere al metodo ricostruttivo: in questo caso le opzioni tecniche possibili si differenziano in funzione della disponibilità di materiale pedogenizzato. E' necessario, in primo luogo, confrontare le esigenze di materiale per il ripristino con le disponibilità. In particolare è necessario:

- definire i requisiti pedologici minimi, sia quantitativi che qualitativi, per le diverse sub-aree previste dal progetto;
- definire le quantità disponibili presenti;
- redigere un bilancio del materiale.

Si potranno avere perciò tre diverse possibilità:

- presenza adeguata di materiale pedogenizzato in sito;
- presenza non adeguata di materiale in sito, con possibilità di acquisizione parziale o totale del volume mancante dal circondario;
- assenza parziale o totale di materiale pedogenizzato sia autoctono che alloctono.

A seconda dei diversi scenari si dovranno adottare scelte tecniche diverse.

Presenza di materiale pedogenizzato

Definizione degli orizzonti del profilo da asportare

Sulla base delle informazioni raccolte in fase di analisi vanno definite:

- le profondità degli orizzonti da asportare e conservare;

Foto 4.2.1. Sezione del profilo pedologico in una cava di sabbia.



- le condizioni di conservazione dei diversi materiali prelevati: queste saranno diverse in relazione alla posizione stratigrafica ed alle condizioni ecologiche che caratterizzano le singole aree omogenee, individuate entro il sito di cava.



Foto 4.2.2. Stoccaggio di terreno agricolo in un cumulo di circa 10 m di altezza; in secondo piano cumulo di "smarino" di galleria.

Predisposizione dello "scotico" e del prelievo del materiale

L'asportazione dei diversi orizzonti che costituiscono il profilo del suolo deve avvenire solo dopo aver provveduto alla:

- individuazione e preparazione delle diverse aree in cui accumulare il materiale pedogenizzato movimentato. Bisogna fare particolare attenzione alle condizioni di conservazione: i cumuli dovranno essere messi al riparo dalle acque esterne (superficiali o sotterranee), da movimenti franosi, da erosione, da possibili inquinamenti esterni (gasolio, oli minerali, sali antigelo, ecc.). Queste aree devono avere una superficie adeguata alle esigenze della movimentazione, evitando il calpestio del materiale stesso da parte dei mezzi. I materiali più delicati, derivati dagli strati superficiali, dovranno essere posizionati in ambiti freschi, riparati (dal vento, dalle escursioni termiche, ecc.) e comunque non potranno essere più spostati, se non in fase di risistemazione finale;
- definizione dei tempi, dei mezzi e dei modi dell'asporto. Dovranno essere definiti i modi ed i tempi del prelievo in relazione al tipo di materiale: gli strati superficiali ("top soil") dovranno essere manipolati con molta attenzione, privilegiando metodi non distruttivi, evitando movimentazioni con macchine pesanti e/o a spinta (ruspe), prevedendo asporti più delicati e mirati. Si dovrà preferire l'uso di escavatori che consentono anche il carico immediato del materiale. Per gli strati sottostanti "sub soil", roccia alterata e roccia madre) si potranno utilizzare mezzi e tecniche più speditive ed invasive, mano a mano che cresce il tenore di minerale. Le condizioni climatiche in cui si opera dovranno essere sempre improntate alla salvaguardia dei caratteri del materiale, minimizzando le possibili alterazioni: si dovranno perciò evitare periodi e momenti eccessivamente umidi o aridi.

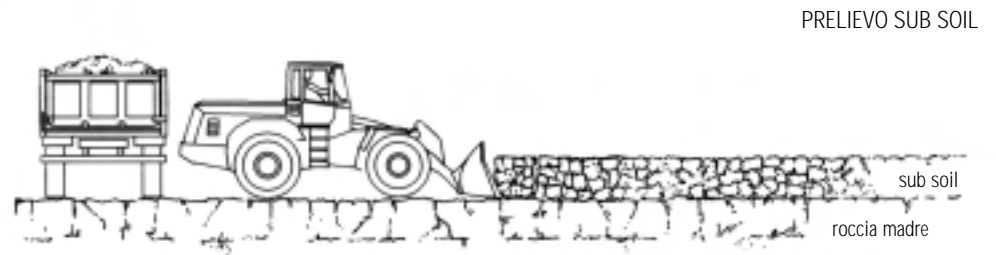
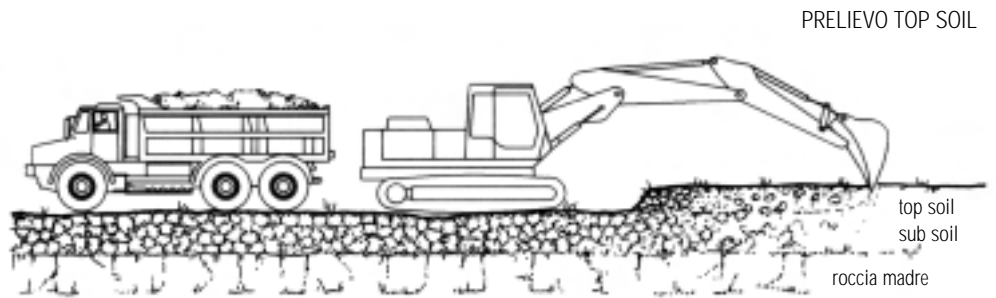
Asportazione del suolo

Questo dovrà essere eseguito con attenzione, evitando il rimescolamento tra i diversi orizzonti ed in particolare per quelli superficiali (Fig. 4.2.3). Il prelievo di questi dovrà coincidere con il loro immediato carico e deposizione nel sito di conservazione o di riuso finale. Dovrà sempre essere evitato il calpestio del materiale rimosso da parte delle macchine operatrici pesanti o movimentazioni ripetute.

Conservazione differenziata

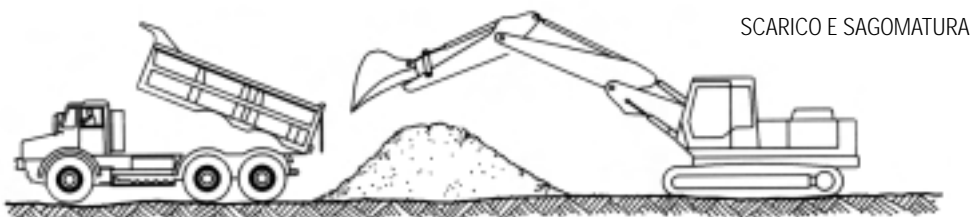
I diversi orizzonti prelevati (Fig. 4.2.4) devono avere una conservazione differenziata: a) lo strato più superficiale (0-20 cm), "top soil", deve essere trattato con estrema cura: si dovrà evitare la creazione di cumuli troppo elevati (al massimo 1 m di altezza) ;

Metodo ricostruttivo:
fase 1) prelievo
e movimentazione dei diversi orizzonti del
substrato in
presenza di materiale
pedogenizzato.



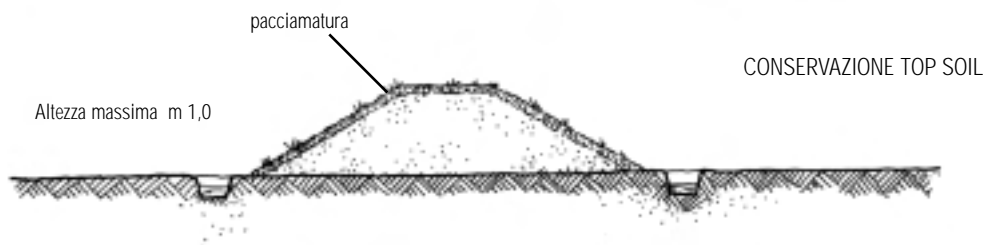
non si dovrà calpestare il materiale con macchine operatrici; si dovrà mantenere umida la massa attraverso irrigazioni, pacciamatura, ecc.; si dovrà mantenere la massa aerata attraverso periodiche lavorazioni, come anche evitare la crescita e moltiplicazione di specie vegetali stimolate dal disturbo, sfalcando il cotico periodicamente, sempre prima della disseminazione dei propaguli da parte delle infestanti; si dovrà seminare dei miscugli di leguminose per arricchire il substrato di elementi nutritivi ed organici. Questa fase di conservazione, oltre che limitare le alterazioni, può avere una importante funzione di transizione del substrato verso condizioni ecologiche diverse da quelle iniziali (bosco, arbusteto, ecc.). Le nuove condizioni saranno caratterizzate da densità di vegetazione maggiore, minore capacità di ritenuta dell'acqua, più insolazione, maggiori escursioni termiche ecc.; ne consegue che tutte le componenti biologiche attive dovranno, quando possibile, riadattarsi. La conservazione deve rappresentare un momento graduale di passaggio;

- b) la porzione più profonda "sub soil" (20-50/100 cm) deve essere ancora trattata con cura, realizzando cumuli non elevati (1-2 m di altezza); anche questi dovranno essere mantenuti freschi ed aerati, controllando la vegetazione ruderale e la sua disseminazione;
- c) gli strati alterati profondi, possono invece essere trattati con minor attenzione, prevedendo cumuli di dimensioni maggiori ed evitando l'attivazione di particolari controlli sulla vegetazione ruderale. Questi ammassi non necessitano di semine in copertura, né di controlli particolari dei processi di umidificazione e mineralizzazione;



SCARICO E SAGOMATURA

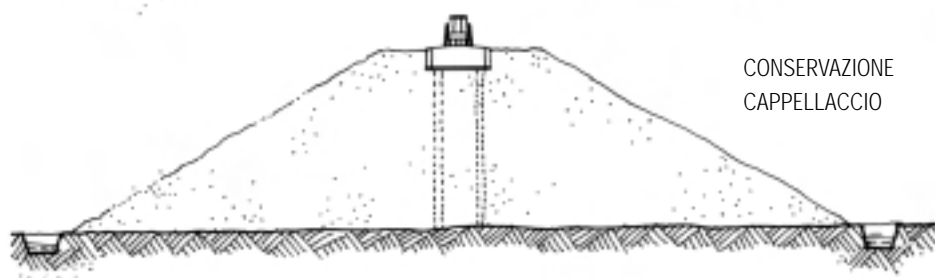
Metodo ricostruttivo:
fase 2) deposito e conservazione dei diversi orizzonti del substrato, in presenza di materiale pedogenizzato.



CONSERVAZIONE TOP SOIL



CONSERVAZIONE SUB SOIL



CONSERVAZIONE
CAPPELLACCIO

La durata della conservazione dovrà comunque essere commisurata alle esigenze della risistemazione, privilegiando il riuso in tempi brevi, viste le diverse condizioni ambientali in cui il materiale viene a trovarsi. E' preferibile un riuso entro l'anno: più la conservazione si prolunga maggiori sono le alterazioni che il materiale subisce, specie nella componente biologica.

Acquisizione di materiale pedogenizzato alloctono

In caso di carenza di materiale pedogenizzato *in loco* si può ricorrere all'acquisizione in zona di altro materiale. In particolare si potrà ricorrere, in una scala di preferenze, a:

- suolo derivato da ambiti forestali o comunque naturali (praterie, cespuglieti), prelevato in aree limitrofe che presentino condizioni simili alle zone in ripristino;
- strati superficiali di suolo agrario;
- substrato sotto forma di terra fine, sciolta, originato da scavi e movimentazioni;
- substrato minerale, solo nel caso abbia proprietà ammendanti tali da permettere la correzione della tessitura in posto.

Per questi materiali vanno comunque rispettate delle regole essenziali per tutelarne e conservarne la qualità, cercando di:

- evitare di movimentare substrati ricchi d'acqua, tipici di aree con falda superficiale e ristagnante, o in periodi piovosi;
- evitare la compattazione del materiale, sia con i mezzi di scavo, che di carico; questo dovrà essere tassativo per gli strati superficiali, ricchi in sostanza organica e già strutturati;

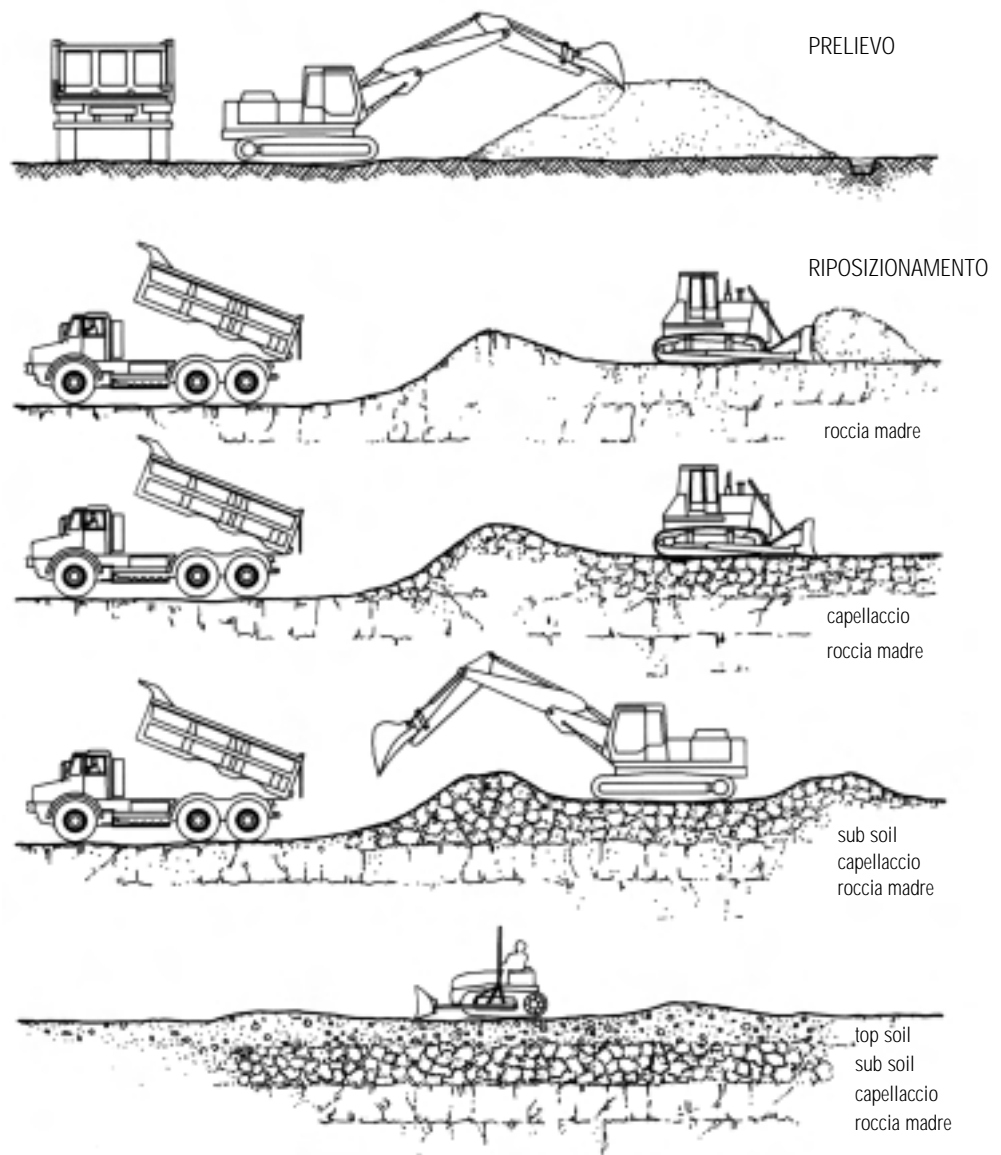
- evitare di mescolare strati e materiali di qualità diversa, cercando di rispettare il materiale pedogenizzato di qualità, per limitarne la diluizione o l'alterazione;
- evitare l'acquisizione di materiale accumulato da lungo tempo o disposto in cumuli eccessivamente elevati. Forti saranno infatti i danni dovuti all'azione meccanica delle macchine ed al peso del materiale stesso, che si manifestano in compattazione, aumento di densità ed asfissia.

Conservazione differenziata dei materiali alloctoni

Per questi materiali valgono le stesse regole già elencate per il materiale pedogenizzato autoctono:

- lo strato più superficiale deve essere trattato con estrema cautela: non fare cumuli troppo elevati (al massimo 1 m); non calpestare con macchine; mantenere la massa umida ed aerata; evitare la crescita e moltiplicazione di specie vegetali stimolate dal disturbo, magari seminare delle leguminose, sfalciare prima delle disseminazioni;
- la porzione profonda del terreno: deve essere conservata in cumuli non elevati (1-2 m), mantenuti freschi ed aerati, controllando la vegetazione rudera che si sviluppa in superficie;
- gli strati alterati profondi, possono invece essere trattati con meno cautele: cumuli più elevati, senza controlli sulla vegetazione rudera superficiale e senza controlli sull'umidità o della massa.

Fig.4.2.5. Metodo ricostruttivo: fase 3)
ricostruzione del profilo finale in presenza
di materiale pedogenizzato.



Ricostruzione della sequenza verticale dei suoli e creazione di eventuali strati tampone

Nella fase di recupero è necessario, partendo dal materiale raccolto, ed eventualmente accumulato e conservato, ricostruire la corretta sequenza degli strati (Fig. 4.2.5). Si dovrà cioè:

- ricostruire con cura l'alternanza di strati osservati prima dell'intervento, ove le condizioni di stabilità morfologica e di equilibrio ambientale lo consentano, sia per gli interventi di "transplanting" che ricostruttivi;
- ricostruire, in alternativa, una nuova sequenza di strati di suolo, ritenuta più idonea (rispetto all'originale) per l'impianto e lo sviluppo della vegetazione che si vuole far crescere, ma anche per una sua rapida evoluzione: devono cioè essere poste le basi per un processo pedogenetico rapido, evitando la creazione di fattori limitanti che rallenterebbero o bloccherebbero anche la dinamica delle successioni del soprassuolo. A tal fine è importante prevedere uno spessore dello strato superficiale organico adeguato alle finalità del progetto ed alle condizioni di stabilità dell'area: destinazioni di tipo arboreo e/o forestale richiedono suoli di spessore sempre superiore al metro, mentre semplici inerbimenti richiedono almeno 30-50 cm di materiale pedogenizzato. Gli spessori saranno anche funzione della presenza di eventuali sostanze tossiche (metalli pesanti o altro), in considerazione della loro possibile migrazione dagli strati sottostanti, causa risalite capillari o freatiche, o assimilazione da parte delle radici. Solo in presenza di minime quantità di questi elementi si potrà operare un ritombamento diretto (< 0.1% del totale dei metalli presenti); in caso contrario si dovrà provvedere ad un maggior isolamento del substrato litologico;
- realizzare, ove necessario, strati "isolanti" che presenteranno di volta in volta caratteri diversi a seconda delle esigenze di salvaguardia:
 - *strati impermeabilizzanti*: dove cioè si vuole evitare un qualsiasi rapporto tra la componente biotica ed il sottostante substrato minerale tossico, attraverso la realizzazione di uno strato uniforme e compatto di materiale a bassa conducibilità idrica. Questo sia per difesa della componente superficiale (presenza di sostanze volatili tossiche, infiammabili; ecc.) che per la difesa degli strati profondi da infiltrazioni (presenza di falde, sorgenti ecc.). Lo spessore degli strati sarà funzione della natura del materiale e delle esigenze di salvaguardia. Lo spessore non potrà mai essere minore di 30 cm (30-100 cm);
 - *strati isolanti*: dove invece si vuole creare solo uno strato di separazione tra suolo superficiale e minerale sottostante, per limitare gli effetti di quest'ultimo sulle piante, (presenza di sali, di minerali alterabili (pirite), di sostanze fitotossiche,



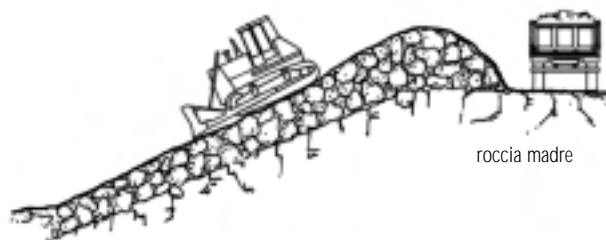
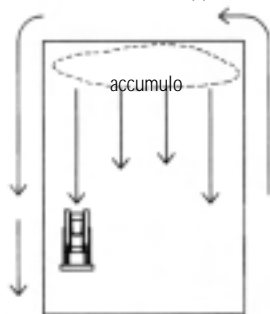
Foto 4.2.3. Prelievo di materiale pedogenizzato dal cumulo di stoccaggio.

ecc.); in questo modo si limita anche la risalita in superficie delle sostanze tossiche, dovuta all'azione emungente delle radici, con successivo accumulo in superficie dei materiali tossici assorbiti. Questo obiettivo si raggiunge realizzando uno strato di almeno 100-200 cm di spessore composto da materiale grossolano che interrompa la continuità idrica del suolo; questo strato sarà costituito da breccia, ghiaia o roccia caotica non tossica, magari ben dotata di minerali di calcio. Dove la disponibilità di materiali sia grossolani che pedogenizzati è limitata, è possibile realizzare questo strato direttamente in superficie, utilizzando però materiali di limitata fertilità. Esperienze inglesi (Haigh, 2000) hanno dimostrato che lo sviluppo di una copertura di specie vegetali resistenti a condizioni limitanti (con radici superficiali) è più stabile nel tempo rispetto a miscugli di specie foraggie- re seminate su substrati tampone fertili, dove le piante rapidamente raggiungono lo strato tossico.

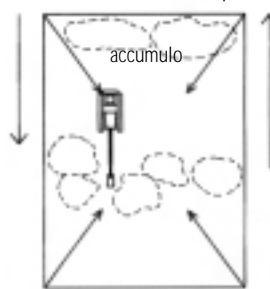
Nella fase di riposizionamento dei diversi materiali pedogenizzati molto importante è evitare o limitare la compattazione degli strati stessi. Questa in genere deriva comunemente dall'assestamento in fase di conservazione, dal traffico dei mezzi meccanici utilizzati, dall'azione degli strumenti di lavoro (benne, lame ecc.) e dalle lavorazioni agronomiche finali. Esiste anche una componente legata all'alterazione del materiale minerale utilizzato nei rimodellamenti che via via si disgrega, rilasciando grandi volumi di particelle fini. E' perciò molto importante non solo prelevare e conservare bene il materiale, evitando cumuli elevati, ma è altrettanto importante organizzare tutte le fasi di movimentazione con l'obiettivo di minimizzare la compattazione (Fig. 4.2.6). Infatti la ricostituzione degli strati richiede il riposizionamento di volumi molto gran-

Fig.4.2.6. Metodo ricostruttivo: organizzazione del cantiere con un'unica zona di accumulo.

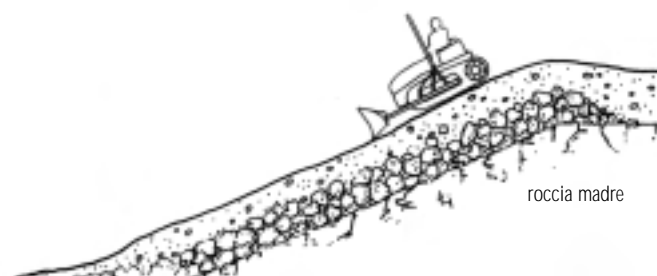
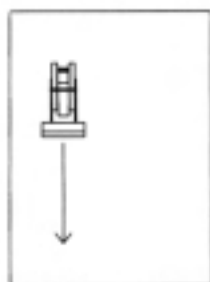
FASE 1 e 2: stesa cappellaccio e sub soil con macchine pesanti



FASE 3: distribuzione top soil



FASE 4: livellamento con macchine leggere



di di materiali, tali da richiedere l'uso di mezzi di carico e trasporto pesanti che possono esercitare pressioni molto elevate sul substrato fino a raggiungere gli 800 kPa. Questi mezzi devono poi essere impiegati in modo reiterato sull'area da risistemare (fino a 500-1000 viaggi ad ettaro). E' perciò necessario progettare con attenzione questa operazione, definendo dei percorsi precisi entro cui queste macchine operatrici possano muoversi, evitando il loro libero movimento che porterebbe alla compattazione di percentuali di superfici ancora maggiori. Va tenuto anche presente che le zone compattate saranno aree maggiormente soggette a fenomeni di erosione incanalata; bisognerà perciò evitare percorsi lungo le massime pendenze, oppure prevedere interventi mirati, per non favorire fenomeni di scavo nel tempo. Il materiale inoltre così posizionato dovrà poi essere distribuito sulla superficie, privilegiando in questa operazione macchine leggere, meglio se agricole, che esercitano pressioni pari a 100-200 kPa. Le macchine cingolate esercitano a proposito una pressione sul substrato pari alla metà circa di quelle gommate. Anche in questa fase di dovrà organizzare il lavoro per limitare i troppi passaggi. Per il "top soil" si dovrà infine prevedere il prelievo, il trasporto ed il deposito definitivo in campo, utilizzando escavatori e mezzi agricoli, limitando sempre il calpestio del materiale: si dovrà cioè preferire una distribuzione in continuo e definitiva, evitando successivi spianamenti e livellamenti. La sistemazione definitiva sarà eventualmente raggiunta nella fase di preparazione generale del substrato di impianto (cfr. Cap. 4.5).

Variabilità nella ricostruzione del substrato

Nell'ambito delle disponibilità di materiale è preferibile provvedere alla creazione di ambiti differenziati anche all'interno nelle diverse aree omogenee ricostruite. Questo

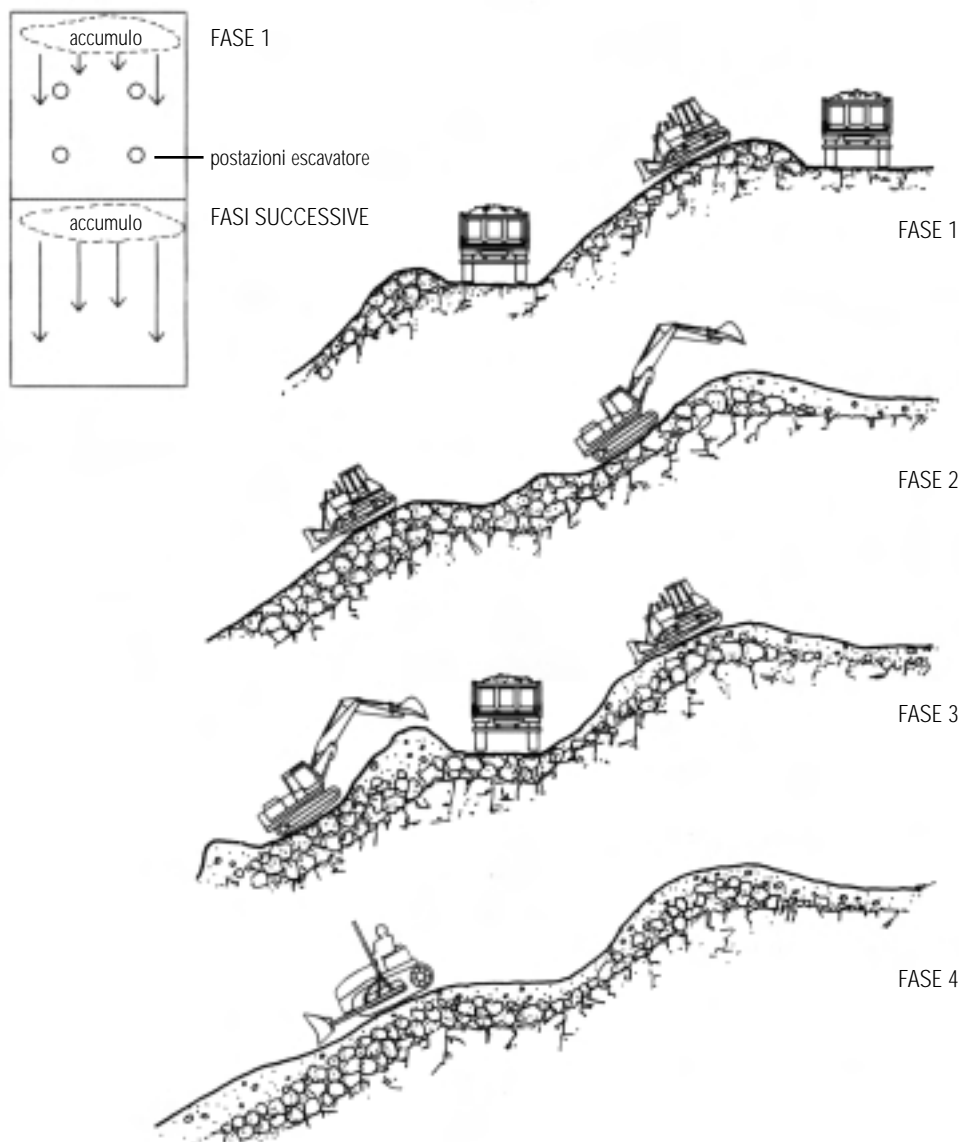
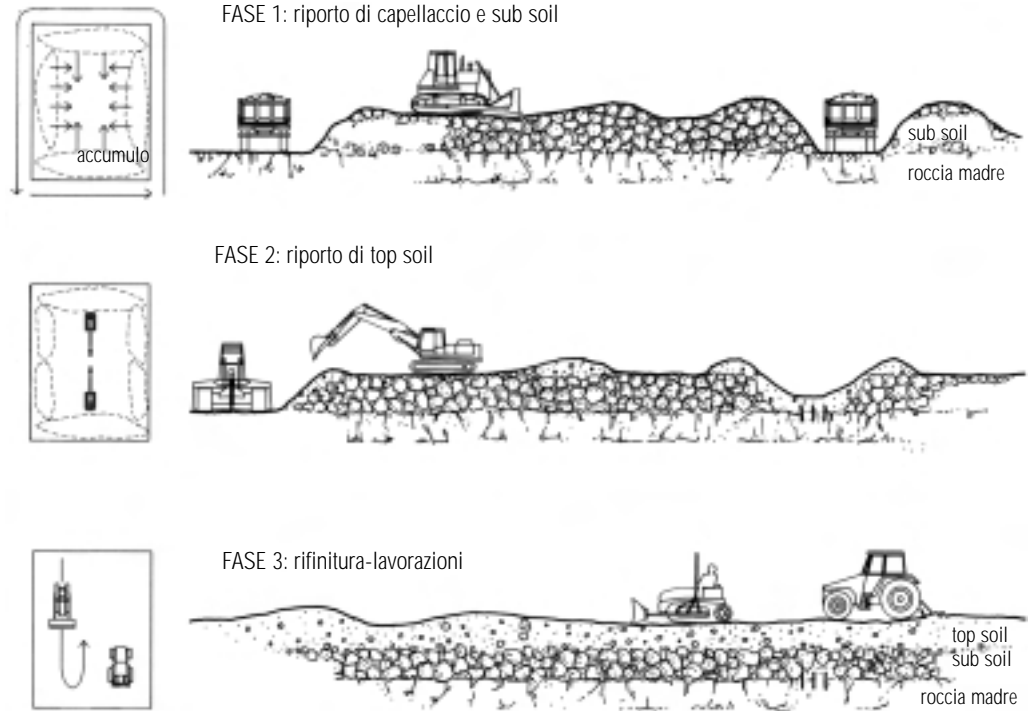


Fig.4.2.7. Metodo ricostruttivo: organizzazione del cantiere con più zone di accumulo.

Fig.4.2.8. Metodo ricostruttivo: organizzazione del cantiere con accumuli perimetrali.



si otterrà modificando lo spessore dei diversi strati riportati secondo uno schema che rafforzi la rete di collegamenti ecologici tra le diverse unità di paesaggio. Si affianca in questo modo alla variabilità spaziale delle unità di paesaggio una variabilità locale, interna alle stesse.

Compenetrazione tra gli strati

Almeno per gli strati superficiali sarà comunque opportuno prevedere (cfr. Cap. 4.5), degli interventi di lavorazione, ricorrendo a strumenti discissori (ripper, scarificatori), tali da favorire comunque una buona compenetrazione tra gli strati stessi. Questo dovrà interessare una profondità di almeno 1 m, cioè quegli strati maggiormente interessati da processi pedogenetici. Inoltre la compenetrazione tra i diversi strati sovrapposti ne aumenta la stabilità reciproca, evitando possibili fenomeni di scivolamento. La profondità di lavorazione non dovrà comunque interferire con le opere predisposte per potenziare il collegamento (contatto) tra il materiale minerale in posto ed il riporto sovrastante (cfr. Cap. 4.1).

Foto 4.2.4. Deposito del materiale pedogenizzato in fase di ripristino, prima della distribuzione finale: notare la pista lasciata dal dumper sul materiale.





Assenza di materiale pedogenizzato

In tutte le situazioni in cui la disponibilità di materiale pedogenizzato autoctono od alloctono viene a mancare è necessario predisporre tutta una serie di interventi per ricreare comunque un minimo di condizioni tali da permettere l'insediamento e lo sviluppo della copertura vegetale.

Innanzitutto è necessario individuare le aree per cui non si dispone di materiale pedogenizzato e dove è possibile un riuso diretto del substrato, vista l'assenza di fattori anomali come la presenza di sostanze tossiche, sia per i vegetali che per gli animali. Tra queste aree si dovrà fare una prima distinzione in relazione alla stabilità, specie quella superficiale tra:

- quelle che presentano condizioni di stabilità complessiva adeguate, dove potranno applicarsi diverse tecniche di miglioramento del substrato, in funzione delle necessità della vegetazione;
- quelle in cui non sono verificate condizioni di stabilità adeguate: in questo caso si potrà fare ricorso ad interventi di controllo dell'erosione superficiale o sottosuperficiale (cfr. Cap. 4.4); viceversa si potrà mantenere l'area con la roccia madre affiorante, lasciandola ad una evoluzione totalmente naturale (cfr. Cap. 4.1).

In tutte le situazioni morfologicamente adeguate, con pendenze contenute e con facile accessibilità, il progetto dovrà successivamente definire le tecniche agronomiche comunque necessarie per favorire il riavvio dell'attività biologica (Fig.4.2.7). Si potrà optare tra un'opzione minimalista: che non prevede alcun intervento agronomico diretto migliorativo, lasciando all'evoluzione ed alla colonizzazione naturale il compito di riavviare il ciclo della fertilità, prevedendo solamente una regimazione idraulica ed il controllo dell'erosione; invece nell'opzione che potremmo definire "intensivista", si potranno adottare tutte le tecniche agronomiche ritenute necessarie per migliorare lo strato superficiale del suolo. In quest'ultimo caso si dovrà prevedere:

- una profonda alterazione dello strato roccioso superficiale, attraverso rippature, arature, raccolta o disgregazione di massi e pietre, per favorire la creazione di uno strato in cui le radici possano penetrare, dotato quindi di una adeguata porosità all'aria e permeabilità all'acqua;
- il riporto di altri materiali minerali, al fine di migliorare la tessitura e quindi regolare la porosità presente: questi materiali potranno essere materiali presenti in cava, ma anche scorie di lavorazione, come limi di decantazione o filtrazione;
- il controllo e/o l'aggiustamento del pH della soluzione circolante, per correggere eventuali eccessi rappresentati da salinità, alcalinità;

- l'ammendamento dello strato attraverso la distribuzione di grandi quantità di sostanza organica, utilizzando materiali diversi sia per composizione che per grado di umificazione. Questo ammendamento organico metterà le basi per il riavvio di tutta l'attività biologica all'interno del substrato, favorendo la disponibilità di sostanze trofiche, la creazione od il miglioramento dei legami tra i componenti minerali a formare una struttura stabile, l'aumento della CSC del substrato e quindi la creazione di una riserva di sostanze trofiche nel suolo;
- la distribuzione di sostanze minerali od organiche concimanti, per arricchire la disponibilità di elementi nutritivi utili per l'attività biologica.

L'insieme di questi interventi favorirà certamente un buon insediamento della vegetazione anche se l'efficacia di questo nel tempo scemerà, viste le difficoltà di ricreare *ex novo* la fertilità (cfr. Cap 4.5). Molta attenzione dovrà perciò essere posta nelle scelte progettuali, quali il livello di complessità da raggiungere, nonché la scelta delle specie, predisponendo una intensa attività di controllo e gestione nel breve-medio periodo, per sostenere l'intervento (cfr. Cap. 4.8).

Fig.4.2.9. Metodo ricostruttivo in assenza di materiale pedogenizzato.

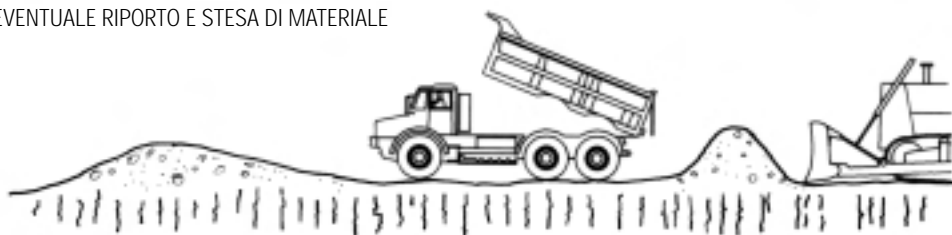
RIMODELLAMENTO



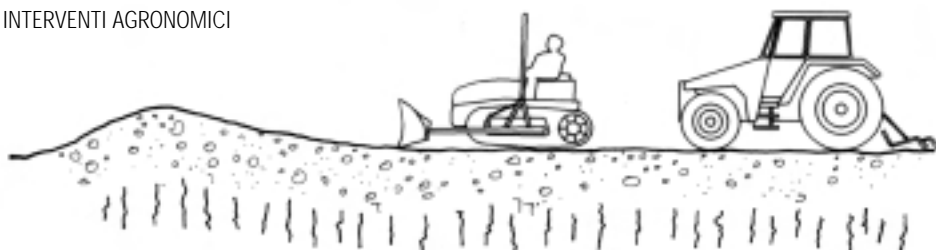
RIPPATURA



EVENTUALE RIPORTO E STESA DI MATERIALE



INTERVENTI AGRONOMICI



Classificazione dei terreni ricostruiti secondo FAO UNESCO (Haigh, 2000)

ANTHROSOLS

Caratteri del sito

- sito alterato tecnologicamente, con livellamenti, terrazzamenti, ecc.;
- rapporti idrologici modificati: drenaggio, irrigazione, alterazione falde, ecc..

Caratteristiche del profilo

- dove presenti, orizzonti superficiali relativamente profondi (300-500 mm) ed arricchiti con materiali organici;
- strati disturbati e mescolati possono giacere direttamente su, o vicini a, materiali di natura completamente differente;
- gli orizzonti del profilo del suolo possono essere seppelliti sotto altri sedimenti;
- le condizioni chimiche spesso includono arricchimenti artificiali con concimi, specie fosforo e potassio ed includono altre sostanze chimiche e metalli spesso come contaminanti;
- spesso includono strati compatti, dovuti al passaggio di macchine ed all'aratura. Questi possono essere associati ad idromorfismo, screziature.
- il sub soil è compatto, spesso attraverso l'uso di macchine pesanti. Qualche orizzonte compattato in passato può mostrare segni di rottura dovuto alla coltivazione profonda.

Classificazione terreni ricostruiti secondo la Soil Taxonomy

ENTISUOLS

Gruppo Tassonomico

Caratteristiche Diagnostiche

Ordine: ENTISUOL

“Suoli recenti” azonali, che coprono il 12.5% delle terre emerse. Questi suoli minerali non hanno orizzonti pedologici distinti entro 10-15 cm dalla superficie del suolo. Devono avere orizzonti, includendo uno strato arricchito organicamente alla superficie del suolo, ma non orizzonti eluzioni o illuviali.

Subordine: **Spolent**

Molte delle proprietà degli Spolent sono una diretta conseguenza degli aspetti tecnici della loro creazione. Gli Spolent hanno in comune almeno tre delle seguenti proprietà:

1. Frammenti grossolani disordinati (frammenti di dimensioni della ghiaia sono più del 10% in volume e più del 50% di questi hanno una lunghezza dell'asse maggiore compresa tra 20 e 250 mm e sono orientati di almeno 20° da qualsiasi piano riconoscibile nella sezione).
2. Screziature colorate si manifestano e non hanno una relazione con la profondità o con la tessitura del materiale.
3. I frammenti grossolani hanno margini scheggiati più che arrotondati.
4. I vuoti possono essere collegati tramite frammenti grossolani.
5. Uno strato superficiale di sassi grossolani è immediatamente sovrainposto sopra uno strato con una inusuale elevata percentuale di particelle fini (> 2 mm) . La profondità di questo strato varia tra 25 e 100 mm.
6. Tasche di materiali diversi sono mescolate irregolarmente nel profilo.
7. Il profilo include manufatti: metalli lavorati, ferro, vetro, ecc..

8. Il profilo contiene frammenti di minerali lavorati, come carbone.
9. La distribuzione di carbonio organico ossidabile nel profilo è irregolare.

Grandi gruppi di **Spolents**:

Crysolents: si ritrovano in aree fredde dove l'azione del gelo è il processo dominante.

Tropospolents: ritrovati in ambiti tropicali.

Udispolents: si ritrovano in ambienti udici. Sono ambienti dove il suolo non è secco né per 90 giorni cumulativi né per 60 giorni quando la temperatura a 508 mm di profondità eccede i 5° C.

Usticspolents: si ritrovano in ambienti secchi (ustici).

Xerospolents: si ritrovano in ambienti secchi, dove il suolo non contiene umidità disponibile per le piante per metà dell'anno e la temperatura del suolo a 508 mm è più elevata di 5° C.

Sottogruppi di **Udispolents**: questi sono descritti in funzione della composizione e della morfologia dei materiali in:

Pyrolithic Udispolents: hanno almeno il 50% di frammenti caotici alterati attraverso la combustione dei materiali carbolitici. Questi frammenti sono rosa, rossi, crema o gialli.

Matric Udispolents: hanno meno del 10% di frammenti grossolani (minori di 2 mm).

Plattic Udispolents: hanno più del 65% di frammenti grossolani (minori di 2 mm) come le arenarie.

Fissile Udispolents: hanno più del 65% di frammenti grossolani (minori di 2 mm) come scisti finemente laminati (maggiori di 2 mm) rotti in frammenti più piccoli.

Shlicking Udispolents: hanno più del 65% di frammenti grossolani come scisti o sassi di fango con "lamina" (< 2 mm) e non mostrano reazione al HCl al 10%.

Kalkig Udispolents: hanno almeno più del 65% di frammenti grossolani (minori di 2 mm) calcarei a sufficienza da reagire con HCl al 10%.

Carbolithic Udispolents: hanno più del 50% di frammenti grossolani con una striatura di 3 o meno nelle carte di Munsell. La ragione è che presentano molti scisti carboniosi o carbolitici e sassi di fango.

Typic Udispolents: non sono derivati da nessun tipo di roccia, hanno più del 10% di frammenti grossolani (minori di 2 mm) e non hanno subito combustione.

Lithic Udispolents: sono sottili strati di meno di 500 mm sopra un letto di roccia non alterato ecc..

4.3 INTERVENTI SULLA RETE IDRAULICA (E. Muzzi)

4.3.1 FINALITÀ

La rete idraulica deve consentire l'allontanamento veloce ed in sicurezza delle acque in eccesso, sia superficiali che profonde. Questo obiettivo si realizza limitando l'effetto meccanico di scavo dovuto all'acqua superficiale (diminuendo la velocità e quindi l'erosione ed il trasporto solido), ed all'opposto, velocizzando il deflusso dell'acqua presente in profondità (limitando così l'azione gravitativa e la lubrificazione degli strati). Non tutta l'acqua dovrà comunque essere allontanata, in quanto essa è indispensabile al mantenimento di una copertura vegetale. Questa azione di controllo delle acque dovrà essere mantenuta nel breve e nel lungo periodo, al fine di rendere stabile l'area risistemata, nonostante le modificazioni a cui questa andrà in contro. Queste finalità si raggiungono attraverso:

- 1) un'adeguata progettazione e dimensionamento della rete di scolo;
- 2) una corretta realizzazione della rete di scolo.

Il dimensionamento e la realizzazione devono essere modulate tenendo conto delle condizioni particolari presenti ("giovinezza morfologica del sito", pendenze accentuate, movimenti e stratificazioni artificiali del substrato, substrato destrutturato, limitata presenza della copertura vegetale). Questo comporta la necessità imprescindibile di assicurare una riuscita certa e di lunga durata dell'intervento, anche alla luce degli scarsi dati teorico-pratici disponibili in letteratura per i piccoli bacini idrografici o per le scarpate (deflussi, tempi di corrivazione, ecc.). In questa fase devono essere affrontate e risolte anche le problematiche relative alla sistemazione e gestione dei bacini d'acqua, più o meno permanenti. La progettazione della rete idraulica deve indirizzarsi verso il contenimento degli elementi artificiali, privilegiando sempre quelli naturali, con un approccio di tipo estensivo ed un costo limitato.



Foto 4.3.1. Erosione della rete di ordine superiore a causa della pendenza eccessiva: scavo di circa 2 m di profondità in 12 anni, su un substrato argilloso.

4.3.2 QUADRO D'INSIEME

La progettazione della rete di scolo in una risistemazione ambientale deve prevedere due diverse fasi:

a) Dimensionamento della rete

E' necessario realizzare una rete che allontani gli eventi meteorici critici ed i possibili apporti idrici ipogei, in piena sicurezza, senza effetti negativi sulla stessa rete (erosione, cedimenti e scavi) e sul territorio circostante (esondazioni, trasporto solido, frane).

Rete superficiale

E' innanzitutto necessario definire l'evento critico che la rete deve sopportare:

- calcolando i casi critici, partendo da dati meteorologici storici o da una loro estrapolazione da una stazione di rilevamento vicina;
- scegliendo il caso critico di riferimento su cui dimensionare la rete;
- calcolando la portata massima che attraversa la sezione che sottende una certa area, con pendenza e conformazione definite. Partendo da questi dati è possibile definire tutti i parametri idraulici e geometrici delle diverse porzioni della rete di scolo;
- posizionando la rete: la rete, specie quella primaria, deve essere capillarmente diffusa nell'area per intercettare sia l'acqua di scorrimento superficiale sia l'acqua ristagnante nelle aree pianeggianti, concentrandola e convogliandola verso il recipiente di scolo finale;
- calcolando le dimensioni della sezione e di tutti i parametri idraulici (pendenza del fondo, pendenza delle sponde, scabrezza): elementi molto importanti specie per la rete di ordine superiore che deve raccogliere e concentrare i singoli deflussi; tale sezione dovrà essere adeguata ai volumi critici previsti;
- valutando le possibili modificazioni che i parametri idraulici subiranno nel tempo, come conseguenza dell'assestamento dell'area e dello sviluppo della vegetazione, definendo anche gli interventi necessari per mantenere tali parametri stabili nel lungo periodo. Questo favorirà il progressivo passaggio da un sistema idraulico artificiale ad un sistema più naturale, altrettanto adeguato e stabile.

Rete profonda

L'attività di scavo e di rimodellamento può portare a giorno falde profonde che interagiscono con la risistemazione: è perciò necessario definirne le caratteristiche per dimensionarle ed eventualmente regimarle. Per ragioni pratiche questi arrivi ipogei vanno valutati ed intercettati con una rete di raccolta già al momento della risistemazione morfologica. E' importante poi analizzare la necessità di una rete di raccolta profonda delle acque di infiltrazione superficiali ed, in particolare, di eventuali accumuli localizzati al piede dei pendii. Il riporto di substrato pedogenizzato sopra dei substrati minerali crea in molte situazioni una repentina variazione nella permeabilità e quindi la formazione di falde superficiali. L'allontanamento di questi accumuli di acqua in pendio rappresenta una priorità al fine di mantenere la stabilità meccanica, necessaria alla risistemazione. Attenzione deve però anche essere posta sulle necessità idriche della vegetazione: un capillare allontanamento di tutte le riserve idriche sotterranee può avere delle forti ripercussioni a livello sia della componente vegetale sia dell'intero sistema ecologico. E' necessario raggiungere un compromesso tra necessità del soprassuolo e stabilità meccanica della pendice.

La regimazione profonda deve perciò individuare:

- la presenza di fonti idriche ipogee: localizzazione e caratteri idraulici (stagionalità, portata, ecc.);
- l'entità dell'infiltrazione dovuta agli eventi meteorici in funzione del substrato e della copertura vegetale;

- l'altezza massima di acqua che può essere trattenuta in sicurezza dal sito e quindi i volumi da allontanare;
- la posizione e la dimensione della rete di raccolta profonda.

Nella progettazione della rete profonda è infine necessario considerare con molta attenzione il parametro "durata dell'opera". La perdita di efficacia nel tempo di questo tipo di opere può infatti creare grossi problemi alla stabilità del sito, mettendo in discussione tutti i risultati già raggiunti. E' perciò necessario un utilizzo molto ponderato delle strutture idrauliche profonde, privilegiando sempre soluzioni, anche morfologico-paesaggistiche, che ne limitino la diffusione o che consentano comunque periodi di efficienza particolarmente lunghi.

b) Realizzazione della rete

La rete idraulica di scolo deve essere:

- stabile ed efficace fin da subito: quindi ben dimensionata e ben costruita;
- durevole: i parametri idraulici (velocità, sezione, ecc.) devono rimanere funzionali alle esigenze di salvaguardia e modificarsi in modo controllato con l'affermarsi dell'attività biologica;
- flessibile: deve adattarsi nel lungo periodo alle modificazioni locali legate sia all'assessamento che allo sviluppo della vegetazione;
- a bassa manutenzione, o ancora meglio, con una forte "capacità autoriparante", imponendo nella realizzazione delle opere di presidio idraulico un ruolo fondamentale alla vegetazione.

La rete deve quindi essere adeguata al sito, ben costruita, capace di resistere nel tempo e capace di adattarsi alle variazioni di lungo periodo. Deve cioè essere sempre efficace in quanto operante su aree potenzialmente instabili (sterri, riporti, stratificazioni di terreno), e fortemente artificiali. Inoltre la mancanza di un adeguato controllo delle acque comporta sempre un forte disturbo all'evoluzione biologica del sito e/o degli interventi realizzati, con conseguenze molto negative, vista l'elevata artificializzazione presente in queste opere. La progettazione deve indirizzare l'evoluzione della rete idraulica nella trasformazione verso un sistema di scolo ad alta naturalità, ma sempre stabile ed efficace.

4.3.3 DETTAGLI

4.3.3.1 REGIMAZIONE SUPERFICIALE

Costruzione dei casi critici

In primo luogo si deve calcolare, o stimare, la quantità di acqua meteorica che è necessario regimare. Si deve far riferimento ai dati meteorologici raccolti dal Ministero dei Lavori Pubblici (Ufficio Idrografico) e dalla Regione (Servizio Meteorologico) da oramai molti decenni, con particolare attenzione agli eventi meteorici critici, suddivisi anno per anno in intervalli orari (1, 3, 6, 12, 24 ore). Partendo da questi dati si possono applicare metodi di analisi differenti:

a) Metodo delle curve di possibilità pluviometrica

E' un metodo che si può applicare in presenza di una ampia disponibilità di dati che coprono il tempo di ritorno prescelto. Questo metodo si sviluppa in diversi momenti:

- raccolta degli eventi massimi, anno per anno, suddivisi in intervalli orari (Tab. 4.3.1);
- ordinamento dei valori raccolti, dal massimo al minimo nelle diverse fasce orarie (Tab. 4.3.2);

Tab.4.3.1. Valori di piovosità massimi annui suddivisi ora per ora nel periodo 1934-2001 per la stazione di Bologna (Dati Ufficio Idrografico e Mareografico di Bologna).

INTERVALLO DI MISURAZIONE					
ANNO	1 ORA	3 ORE	6 ORE	12 ORE	24 ORE
1934	47.8	61.4	79.6	80.2	81.6
1935	35	35.8	37.6	57	64.8
1936	0.61	64.4	64.4	64.4	64.4
1937	18.2	21.8	36.6	43	68.2
1938	22.2	22.2	30.2	38.4	43
1939	27	27.2	28.2	35.6	48.8
.....					
1996	26	43.6	49.4	58.8	91.6
1997	14.8	24.6	31.8	35.4	49.8
1998	17.8	25.4	35.2	29.4	39.4
1999	22.8	31.2	38.6	45.4	51.4
2000	26.4	37.4	37.4	37.4	37.
2001	26.8	36	36.4	43	56

- costruzione, su una carta logaritmica, del diagramma cartesiano, partendo dai dati massimi (primo evento critico), dati che vanno posizionati in funzione del tempo e dell'intensità;

Tab.4.3.2. Valori di piovosità massimi della stazione di Bologna, ordinati per ora.

PRG.	FREQUENZA (ϕ)	1 ORA	3 ORE	6 ORE	12 ORE	24 ORE
1	0.014492754	10.4	14.5	19.6	23.6	29.6
2	0.028985507	11	16.6	20.4	26.2	31.8
3	0.043478261	11.6	17	22	29.4	32.2
4	0.057971014	12	18.2	22.2	29.8	34
5	0.072463768	13.4	19	23.4	30.2	36.4
6	0.086956522	13.6	19.6	23.6	30.4	37.4
7	0.101449275	14	20.2	24.6	32.4	39.4
.....						
60	0.869565217	34	48	57.6	71.8	96.2
61	0.884057971	35	48.2	58.8	74.6	98.8
62	0.898550725	38.8	48.4	62	79.8	101.2
63	0.913043478	40	58.8	64.4	80.2	101.6
64	0.927536232	44	61.4	64.8	80.2	102.6
65	0.942028986	44.4	64.4	70.4	84.4	105.8
66	0.956521739	47.8	64.8	79.6	89.2	110
67	0.971014493	48.2	73.2	79.8	92.4	119.8
68	0.985507246	6	74	99	119	134.6

- interpolazione dei punti attraverso una funzione lineare: $y = A + Bt$ dove:

$$y = \log(h);$$

h = altezza di precipitazione (mm);

t = tempo (ore);

$A = \log(a)$, logaritmo del parametro della curva;

$B = (n)$, parametro della curva.

Con una trasformazione matematica di ottengono i parametri della curva segnalatrice di possibilità pluviometrica:

$$h = a t^n$$

- queste operazioni si devono ripetere per tutte le successive serie di valori che rappresentano i casi critici successivi;
- in alternativa si possono calcolare direttamente le equazioni partendo dai dati originali interpolati con una curva di potenza, utilizzando il metodo dei minimi quadrati (Fig. 4.3.1).

b) Metodo di probabilità pluviometrica di Gumbel

E' un metodo che si può applicare in presenza di una disponibilità di dati meteorici limitata, comunque inferiore al tempo di ritorno previsto. Questo secondo metodo può essere sviluppato con metodologie diverse:

a) *Metodo grafico*: che si sviluppa attraverso una serie di passaggi:

- raccolta dei dati su eventi meteorici massimi annuali suddivisi in fasce orarie;
- ordinamento degli N dati in modo crescente (Tab. 4.3.1-2);
- calcolo della frequenza totale:

$$\phi = \frac{m}{N + 1} \quad \text{con } 1 \leq m \leq N$$

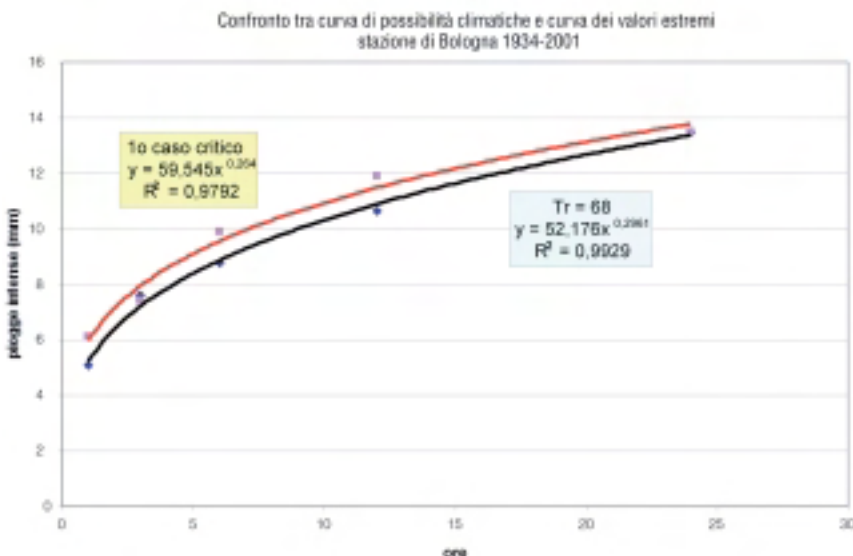
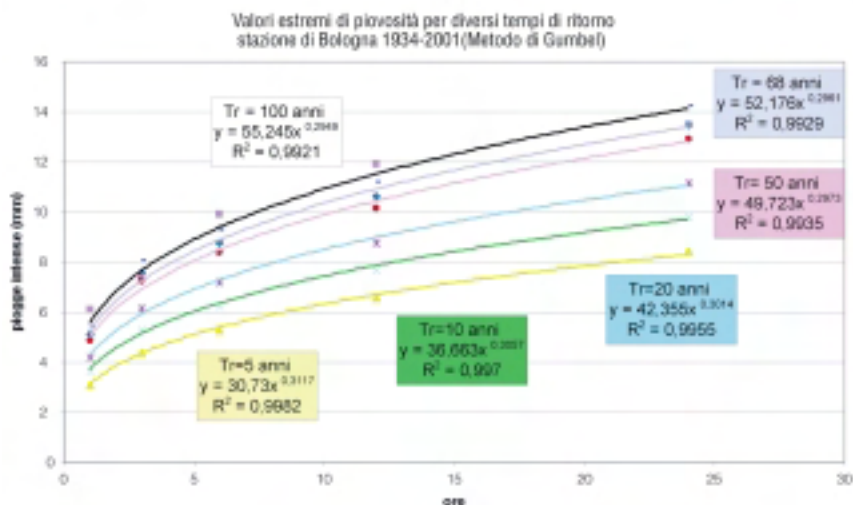
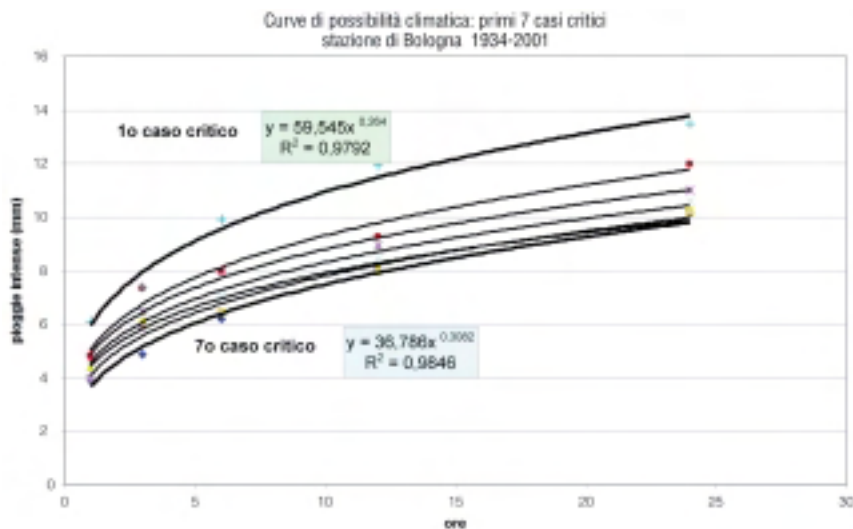


Fig.4.3.1. Calcolo delle piogge critiche con il metodo delle possibilità climatiche ed il metodo di Gumbel per la stazione di Bologna (1934-2001).

- costruzione di un cartogramma probabilistico, posizionando le N coppie (x_m, ϕ_m) ;
- interpolazione dei punti con una retta di compenso;
- verifica della presenza di punti outliers, che hanno una frequenza molto superiore a quella loro attribuita;
- definizione del tempo di ritorno T_r , attraverso una scala presente sul cartogramma; questo T_r è legato alla frequenza dalla relazione:

$$T_r = \frac{1}{1 - \phi(x)}$$

- reiterazione della sequenza di operazioni per tutti gli intervalli di tempo disponibili: 1, 3, 6, 12, 24 ore (Fig. 4.3.2);
- calcolo dell'equazione corrispondente al tempo di ritorno prescelto attraverso la interpolazione dei punti ricavati dalle curve ottenute alle diverse ore.

b) *Metodo analitico*: che si sviluppa attraverso una serie di passaggi:

- calcolo dei parametri delle diverse serie orarie: media e deviazione standard;
- calcolo dei parametri statistici della variabile Y ridotta (Tab. 4.3.3);
- calcolo di:

$$X(T_r) = \bar{X} - \frac{S_x}{S_N} \bar{Y}_N + \frac{S_x}{S_N} Y(T_r) \quad \text{e} \quad X(T_r) = \text{moda} + \text{alfa} * Y(T_r)$$

dove:

$X(T_r)$ = altezza di precipitazione massima al tempo di ritorno T_r (mm);

\bar{X} = media della serie storica delle precipitazioni per singola ora (mm);

S_x = deviazione standard della serie storica delle precipitazioni per singola ora;

S_N = deviazione standard della variabile ridotta (Tab. 4.3.3);

\bar{Y}_N = media della variabile ridotta (Tab. 4.3.3);

$Y(T_r) = -\ln(-\ln(T_r-1/T_r))$.

- calcolo della curva finale interpolando, con il metodo dei minimi quadrati, i valori dei diversi intervalli temporali e per ottenere una funzione del tipo:
 $h = at^n$ (Tab. 4.3.4, Fig. 4.3.1).

Tab.4.3.3. Valori dei parametri Y_n e S_n secondo Gumbel.

N	MEDIA RIDOTTA Y_n									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
10	0.4952	0.4996	0.5035	0.5070	0.5100	0.5128	0.5154	0.5177	0.5198	0.5217
20	0.5236	0.5252	0.5268	0.5282	0.5296	0.5309	0.5321	0.5332	0.5443	0.5353
30	0.5362	0.5371	0.5380	0.5388	0.5396	0.5403	0.5411	0.5417	0.5424	0.2430
40	0.5436	0.5442	0.5448	0.5453	0.5458	0.5463	0.5468	0.5472	0.5477	0.5481
50	0.5485	0.5489	0.5493	0.5497	0.5501	0.5504	0.5508	0.5511	0.5515	0.5518
60	0.5521	0.5524	0.5527	0.5530	0.5532	0.5535	0.5538	0.5540	0.5543	0.5545
70	0.5548	0.5550	0.5552	0.5555	0.5557	0.5559	0.5561	0.5563	0.5565	0.5567
80	0.5569	0.5571	0.5573	0.5574	0.5576	0.5578	0.5580	0.5581	0.5583	0.5584
90	0.5586	0.5588	0.5589	0.5591	0.5592	0.5593	0.5595	0.5596	0.5598	0.5599
100	0.5600	0.5602	0.5603	0.5604	0.5605	0.5606	0.5608	0.5609	0.5610	0.5611

N	DEVIAZIONE STANDARD RIDOTTA S_n									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
10	1.0010	1.0148	1.0270	1.0378	1.0476	1.0564	1.0644	1.0717	1.0785	1.0847
20	1.0904	1.0958	1.1008	1.1055	1.1098	1.1140	1.1178	1.1215	1.1250	1.1283
30	1.1314	1.1344	1.1372	1.1399	1.1425	1.1449	1.1473	1.1496	1.1518	1.1538
40	1.1559	1.1578	1.1597	1.1614	1.1632	1.1649	1.1665	1.1680	1.1696	1.1710
50	1.1724	1.1738	1.1752	1.1765	1.1777	1.1789	1.1801	1.1813	1.1824	1.1835
60	1.1846	1.1856	1.1866	1.1876	1.1886	1.1895	1.1904	1.1913	1.1922	1.1931
70	1.1939	1.1947	1.1955	1.1963	1.1971	1.1978	1.1986	1.1993	1.2000	1.2007
80	1.2014	1.2020	1.2027	1.2033	1.2039	1.2045	1.2052	1.2057	1.2063	1.2069
90	1.2075	1.2080	1.2086	1.2091	1.2096	1.2101	1.2106	1.2111	1.2116	1.2121
100	1.2126	1.2130	1.2135	1.2139	1.2144	1.2148	1.2153	1.2157	1.2161	1.2165

Tab.4.3.4. Calcolo analitico delle piovosità massime secondo il Metodo di Gumbel per la stazione di Bologna nel periodo 1934-2001.

VALORI DELLE SERIE STORICHE RACCOLTE					
1 ora	3 ora	6 ora	12 ora	24 ora	
media	23.658	32.850	40.614	51.555	66.3647
std.dev.	8.921	14.039	15.342	17.803	22.345

VALORI DELLA SERIE NORMALE (TAB. 4.3.3)					
media	0.554	0.554	0.554	0.554	0.554
dv.st.	1.1922	1.1922	1.1922	1.1922	1.1922
Parametri					
moda	19.513	26.326	33.485	43.282	55.981
alfa	7.483	11.775	12.869	14.933	18.742

Y(T _r) A DIVERSI TEMPI DI RITORNO					
T _r	1 ora	3 ore	6 ore	12 ore	24 ore
5	1.4999	1.4999	1.4999	1.4999	1.4999
10	2.2503	2.9701	2.9701	2.9701	2.2503
20	2.9701	2.9701	2.9701	2.9701	2.9701
50	3.9019	3.9019	3.9019	3.9019	3.9019
68	4.2121	4.2121	4.2121	4.2121	4.2121
100	4.6001	4.6001	4.6001	4.6001	4.6001

INTENSITÀ DI PIOGGIA MASSIMA A DIVERSI TEMPI DI RITORNO					
T _r	1 ora	3 ore	6 ore	12 ore	24 ore
5	30.738	43.989	52.788	65.682	84.0943
10	36.353	52.826	62.445	76.888	98.1595
20	41.740	61.303	71.709	87.638	111.651
50	48.713	72.275	83.700	101.55	129.114
68	51.034	75.927	87.691	106.18	134.928
100	53.938	80.497	92.685	111.97	142.201

RELAZIONI ALTEZZA DI PIOGGIA - DURATA EVENTO, PER I DIVERSI TEMPI DI RITORNO

T _r	Funzione	r ²
5	$h = 30.73 * t^{0.3117}$	0.998
10	$h = 36.663 * t^{0.3075}$	0.997
20	$h = 42.335 * t^{0.3014}$	0.995
50	$h = 49.723 * t^{0.2973}$	0.993
68	$h = 52.176 * t^{0.2961}$	0.993
100	$h = 55.245 * t^{0.2949}$	0.992

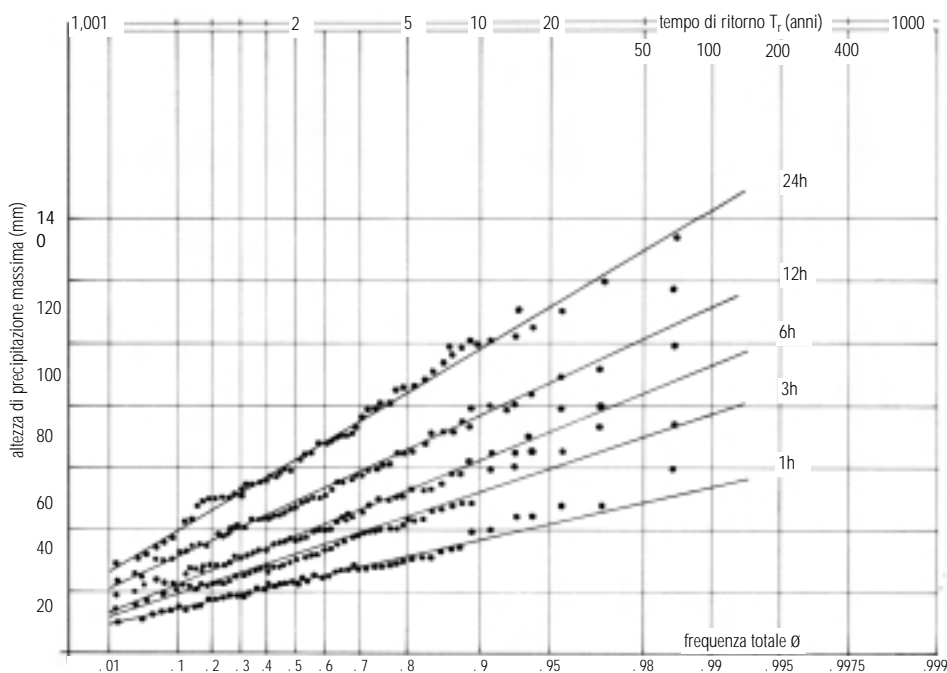


Fig.4.3.2. Calcolo delle piogge critiche secondo il metodo di Gumbel: metodo grafico.

Rispetto al metodo precedente si ottengono valori via via divergenti all'aumentare del tempo di ritorno dell'evento, ed in particolare il metodo di Gumbel calcola altezze di pioggia inferiori a quelle del metodo dei casi critici (Fig. 4.3.1).

Scelta del caso critico di riferimento

La scelta del caso critico rappresenta una incognita molto forte, non esistendo regole definite. Sulla base del periodo di dati meteorologici a disposizione si deve decidere la frequenza di superamento del caso critico. Viste le particolari condizioni in cui si opera (movimenti di substrati minerali e di substrati pedogenizzati, pendenze elevate, superfici limitate, assenza della vegetazione, almeno nei primi anni, e carenza di elaborazioni sperimentali su piccole o piccolissime superfici) è senz'altro consigliabile essere conservativi, scegliendo sempre un caso critico gravoso, corrispondente almeno ad un tempo di ritorno di 100 anni. Questo può comportare un certo sovradimensionamento degli interventi, con un aggravio di costi di costruzione, ma oltre che limitato, questo aggravio verrà ripagato da un minor costo negli interventi di controllo, di manutenzione e di riparazione, in corrispondenza di eventi meteorici fuori dalla norma. Vi è inoltre la necessità assoluta di evitare i danni dovuti al moto non controllato delle acque di deflusso, visti gli ambiti morfologici molto delicati (sterri, riporti, pendici molto inclinate, ecc.) che caratterizzano le aree di cava dismesse e rimodellate.

Tab.4.3.5. Curve di possibilità climatica puntuali relative ad alcune stazioni pluviometriche con diversi tempi di ritorno (Maione, 1998).

Province Tempi (anni)	Al		Br		RE		Mo		Fi	
	a	n	a	n	a	n	a	n	a	n
2	18.5	0.284	28.2	0.269	19.9	0.306	23.3	0.271	28.2	0.210
5	25.3	0.269	39.5	0.249	27.4	0.288	31.5	0.294	40.1	0.188
10	29.8	0.263	46.9	0.241	32.4	0.280	36.9	0.303	49.4	0.179
20	34.1	0.258	54.1	0.235	37.2	0.274	42.1	0.309	57.5	0.173
50	39.6	0.254	63.3	0.230	43.4	0.268	48.9	0.315	68.0	0.167
100	43.8	0.251	70.3	0.226	48.0	0.265	53.9	0.318	75.9	0.163
200	48.0	0.249	77.2	0.224	52.7	0.262	59.0	0.321	83.7	0.160

Calcolo della portata massima in una sezione

Per poter stimare il valore della portata massima in una qualsiasi sezione della rete di scolo si possono utilizzare approcci diversi: nonostante la disponibilità di molti modelli sviluppati per calcolare questa incognita, esistono altrettanti problemi circa la loro applicazione: in particolare le piccole superfici interessate (pochi ettari), nonché la mancanza di dati idrografici puntuali. Noi utilizzeremo due approcci semplici: uno analitico, attraverso il "Metodo razionale" e uno empirico, con il "Metodo di Hudson".

Metodo analitico: metodo razionale

Per sviluppare questo metodo è necessario calcolare innanzitutto i parametri idraulici del bacino posto a monte di una data sezione.

Tempo di corrivazione

Il tempo di corrivazione, t_c , rappresenta il tempo necessario perché una particella di acqua caduta nel punto idraulicamente più lontano del bacino possa far sentire il suo effetto sulla sezione di riferimento. La determinazione di questo valore rappresenta un'incognita molto grande. Tutti gli studi idraulici pubblicati in genere considerano bacini idrografici di dimensioni molto superiori a quelle di nostro interesse. Le formule utilizzabili, già di per se molto indicative, diventano ancor più imprecise, il che rende assai difficile una loro applicazione puntuale. Regola generale è calcolare il t_c con diversi metodi e scegliere il valore minore, considerato maggiormente critico. Qui di seguito sono riportate alcune formule per il calcolo del t_c in condizioni differenziate:

- Giandotti:

$$t_c = \frac{4\sqrt{A} + 1.5L}{0.8\sqrt{h_m}}$$

dove:

t_c = tempo di corrivazione (ore);

A = area (km^2);

L = lunghezza dell'asta principale del corso d'acqua, fino allo spartiacque (km);

h_m = altezza media del bacino rispetto alla sezione (m):

$$\left(h_m = \frac{\sum h_i A_i}{A} \text{ dove: } h_i = \text{altezza media dell'area } A_i \right).$$

E' una formula proposta negli anni 30 per bacini compresi tra 170 e 70000 km^2 , e sembra che sottostimi il t_c per piccoli bacini montani.

- Kirpich:

$$t_c = 0.95 \frac{L^{1.155}}{d^{0.385}}$$

dove:

t_c = tempo di corrivazione (ore);

L = lunghezza dell'asta principale (km);

d = dislivello tra lo spartiacque e la sezione terminale (m).

E' una formula nata in ambito agricolo montano più che per bacini idrografici e viene molto utilizzata all'estero.

- Kerby:

$$t_c = \left(\frac{0.342 L n}{\sqrt{I}} \right)^{0.467}$$

dove:

t_c = tempo di corrivazione (ore);

L = lunghezza dell'asta principale (km);

I = pendenza media della rete di drenaggio (m/m):

$$I = \frac{\sum i_i A_i}{A}$$

n = fattore di ritardo compreso tra 0.2 (superficie rivestita) e 0.8 (superficie inerbita). Formula che tiene conto della pendenza della intera rete di drenaggio e delle caratteristiche della copertura.

Portata Massima

Per il calcolo della portata massima si può utilizzare il metodo proposto da Turazza nel 1880, che richiede l'applicazione della formula:

$$Q = k C i A$$

dove:

Q = portata massima (m^3/s);

A = area scolante (km^2);

C = coefficiente di deflusso che tiene conto dell'infiltrazione;

i = intensità della precipitazione che origina la piena;

k = coefficiente per uniformare le unità di misura.

Questo metodo presuppone una piovosità costante ed uniforme nel bacino scolante, cosa del tutto plausibile viste le limitate dimensioni delle superfici interessate (poche decine di ettari al massimo).

Partendo dalla curva di possibilità pluviometrica calcolata per il caso critico prescelto ($h = at_p^n$) e ponendo la condizione che il tempo di pioggia coincida con il tempo di corrivazione ($t_p = t_c$), situazione limite in quanto tutto il bacino per un istante contemporaneamente contribuisce al deflusso in presenza di una pioggia di durata minima e quindi più intensa, si ottiene che:

$$h_c = at_c^n \quad \text{da cui} \quad i = \frac{h_c}{t_c}$$

e quindi sostituendo nella formula iniziale si ottiene:

$$Q_{\max} = \frac{C h_c A}{3.6 t_c}$$

dove:

Q_{max} = portata massima (m^3/s);

C = coefficiente di deflusso;

h_c = altezza di pioggia corrispondente al tempo di corrivazione (mm);

A = superficie area scolante (km^2);

t_c = tempo di corrivazione (ore).

Scelta del coefficiente di deflusso (C)

Questo coefficiente rappresenta il rapporto tra il volume defluito in una certa sezione in un tempo t ($t_p + t_c \Rightarrow$ tempo di pioggia + tempo di corrivazione) e l'acqua meteorica caduta nel bacino idrografico. Per ricavare il coefficiente corretto per l'area scolante si possono utilizzare delle tabelle di riferimento (Tab. 4.3.6).

Tab.4.3.6. Valori del C in funzione dell'uso, della pendenza e del tipo di suolo.

USO REALE E PENDENZA	TIPO DI SUOLO			
	BOSCO	SCIOLTO	FRANCO	PESANTE
0 - 5%	0.10	0.30	0.40	
5 - 10%	0.25	0.35	0.50	
10 - 30%	0.30	0.50	0.60	
Pascolo				
0 - 5%	0.10	0.30	0.40	
5 - 10%	0.15	0.35	0.55	
10 - 30%	0.20	0.40	0.60	
Arativo				
0 - 5%	0.30	0.50	0.60	
5 - 10%	0.40	0.60	0.70	
10 - 30%	0.50	0.70	0.80	

Nel caso di un bacino scolante con un uso del suolo diversificato è necessario che questi valori vadano moltiplicati per le superfici relative per ottenere un valore di C medio pesato.

E' risaputo che il Metodo Razionale permette di calcolare un valore fortemente sovrastimato e può essere utilizzato come prima approssimazione: del resto un certo sovradimensionamento della rete non è di per se controproducente in quanto può aumentare la sicurezza della sistemazione.

Accanto a questo esistono molti altri metodi più complessi che però richiedono sempre la conoscenza di parametri idrologici (media delle massime piovosità, ecc.) o idraulici (serie delle portate storiche), informazioni non disponibili, specie a livello di piccoli o piccolissimi bacini imbriferi. Inoltre sono metodologie sviluppate sempre su grandi superfici, dell'ordine dei chilometri quadrati, difficilmente estrapolabili a situazioni puntuali dell'ordine dei pochi ettari.

Tab.4.3.7. Stima della media Q e del relativo scarto quadratico medio s delle portate istantanee massime annuali (Maione, 1998).

FIUME PO, AFFLUENTI IN DESTRA PO, RENO, BACINI DELLA ROMAGNA E MARCHE

$$Q = 5.25 \cdot 10^{-4} s^{0.64} h_1^{0.73} h_g^{1.53}$$

h_1 = media massimi annuali delle piogge della durata di 1 ora (mm);

$$s = 9.65 \cdot 10^{-4} s^{0.55} h_1^{4.43} h_g^{1.53}$$

h_g = media piogge giornaliere (mm);

Al tempo di ritorno(T):

$$Q(T) = 1.73 Q ((0.45 + 0.779 \ln(1/T))^{0.8} CV^{1.35})$$

o approssimativamente:

$$Q(T) = s (3.01 + 0.62 \ln(T))$$

b) Metodo empirico: metodo di Hudson

Questo metodo è stato sviluppato empiricamente per piccole superfici in Africa, in assenza di dati pluviometrici precisi e successivamente adattato a diversi ambienti climatici. Richiede la definizione di una serie di coefficienti, in funzione della copertura vegetale, pendenza, tipo di suolo e drenaggio; questi parametri, sommati tra loro, determinano un valore di riferimento (CC), da utilizzare come valore di ingresso in una apposita tabella (Tab. 4.3.8). A sua volta poi questo dato viene incrociato

con la superficie dell'area scolante al fine di ottenere l'entità del deflusso (Tab. 4.3.9). Il valore così ottenuto va infine corretto in funzione del clima, della forma del bacino scolante e del tempo di ritorno voluto (Tab. 4.3.10).

E' un metodo del tutto empirico, ma ha il vantaggio di essere stato pensato specificatamente per piccole superfici ed in assenza di dati pluviometrici: può eventualmente essere usato come controllo e verifica del Metodo Razionale, pur sapendo come quest'ultimo sovrastimi il deflusso.

CARATTERISTICHE DELLA COPERTURA VEGETALE		CC
Foresta o prato a copertura		10
Arbusteto o prato a copertura mediamente elevata		15
Coltivo		20
Terreno nudo o eroso		25
TIPO DI SUOLO E DI DRENAGGIO		
Suolo profondo ben drenato, sabbioso		10
Suolo profondo moderatamente drenato, siltoso		20
Suolo poco profondo poco permeabile, limoso		25
Suolo sottile con drenaggio bloccato		30
Suolo mediamente impermeabile, argilloso o roccioso		40
Superficie impervia o suolo saturo		50
PENDENZA		
Orizzontale	(0 - 3°)	5
Moderata	(3 - 6°)	10
Andante	(6 - 9°)	15
Accentuata (collina)		20
Forte (montagna)		25

Tab.4.3.8. Metodo di Hudson: valori del coefficiente CC in funzione delle caratteristiche del sito, del suolo, del tipo di drenaggio e della pendenza (Morgan, 1986).

AREA (ha)	VALORE DEL CC CALCOLATO											
	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70	75	80
5	0.2	0.3	0.4	0.5	0.7	0.9	1.1	1.3	1.5	1.7	1.9	2.1
10	0.3	0.5	0.7	0.9	1.1	1.4	1.7	2.0	2.4	2.8	3.2	3.7
15	0.5	0.8	1.1	1.4	1.7	2.0	2.4	2.9	3.4	4.0	4.6	5.2
20	0.6	1.0	1.4	1.8	2.2	2.7	3.2	3.8	4.4	5.1	5.8	6.5
30	0.8	1.3	1.8	2.3	2.9	3.6	4.4	5.3	6.3	7.3	8.4	9.5
40	1.1	1.5	2.1	2.8	3.5	4.5	5.5	6.6	7.8	9.1	10.5	12.3
50	1.2	1.8	2.5	3.5	4.6	5.8	7.1	8.5	10.0	11.6	13.3	15.1
75	1.6	2.4	3.6	4.9	6.3	8.0	9.9	11.9	14.0	16.4	18.9	21.7
100	1.8	3.2	4.7	6.4	8.3	10.4	12.7	15.4	18.2	21.2	24.5	28.0
150	2.1	4.1	6.3	8.8	11.6	14.7	18.2	21.8	25.6	29.9	35.0	40.6
200	2.8	5.5	8.4	11.7	15.3	19.1	23.3	28.0	33.1	38.5	45.0	52.5
250	3.5	6.5	9.7	13.2	17.2	21.7	27.0	32.9	39.6	46.9	55.0	63.7
300	4.2	7.0	10.5	14.7	19.6	25.2	31.5	38.5	46.2	54.6	63.7	73.5
350	4.9	8.4	12.6	17.2	23.2	30.2	37.8	46.3	53.8	62.5	71.5	81.0
400	5.6	10.0	14.4	19.4	25.6	33.6	42.2	51.0	60.0	69.3	79.5	90.0
450	6.3	10.5	15.5	21.5	28.5	36.5	45.5	55.5	65.5	76.0	86.5	97.5
500	7.0	11.0	17.0	23.5	31.0	40.5	51.0	62.0	73.0	84.0	95.0	106.5

Tab.4.3.9. Metodo di Hudson: massimo deflusso in funzione delle caratteristiche di trattenuta e della superficie (m³/s) per un tempo di ritorno di 10 anni (Morgan, 1986).

Tab.4.3.10. Metodo di Hudson: coefficienti di aggiustamento per intensità di pioggia, forma del bacino e tempo di ritorno (Morgan, 1986).

<u>INTENSITÀ DI PIOGGIA:</u>	elevata (tropicale):	1
	bassa (temperata)	0.75
<u>FORMA DEL BACINO:</u>	lungo e stretto:	0.8
	circolare/quadrato	1
	ampio e corto	1.25
<u>TEMPO DI RITORNO:</u>	2 anni	0.90
	5 anni	0.95
	10 anni	1.0
	25 anni	1.25
	50 anni	1.5
	100 anni	2.0 (stimato)

Esempio di applicazione del metodo di Hudson:

SUPERFICIE SCOLANTE DI 50 ETTARI SUDDIVISI IN:

Superficie	Copertura veg.	Pendenza	Tipo di suolo
A:10 ettari	suolo nudo	forte pendenza	suolo roccioso sottile
B:15 ettari	coltivato	pendenza andante	limoso
C:25 ettari	pascolo	piano	argilloso
50 ettari totali.			

UTILIZZANDO I PARAMETRI DELLA TABELLA 4.3.9 SI CALCOLA IL CC:

	Copertura		Pendenza		Suolo		% Sup.	Totale
A	25	+	20	+	20	x	0.20	= 17
B	20	+	10	+	25	x	0.30	= 18
C	10	+	5	+	40	x	0.50	= 27.5
Totale								62.5

Con i valori $CC = 62.5$ e superficie = 50 ettari si ottiene dalla Tab. 4.3.9 un deflusso massimo di 9.25 m^3 .

Posizionamento e distanze tra le affossature

Il corretto posizionamento delle affossature rappresenta un elemento qualificante il progetto in quanto il sistema di scolo deve intercettare l'acqua di scorrimento superficiale prima che questa assuma, con l'aumento della velocità, un carattere altamente erosivo. Questo è di particolare importanza per la rete primaria composta dall'insieme delle prime affossature. In realtà il problema è più complesso, in quanto vi è una interazione tra l'effetto lunghezza di scorrimento e suscettibilità del materiale rispetto all'erosione (non sempre si è trovata una relazione lunghezza di scorrimento - entità dell'erosione). Esistono diverse formule semplificate che, per ambienti diversi, definiscono l'intervallo verticale tra due affossature parallele in funzione della pendenza, P . Tra tutte si possono considerare quelle sviluppate in un ambito mediterraneo ed in particolare:

- formula israeliana:
$$H = \frac{P}{10} + 2$$

- formula di Rauser:
$$H = 0.305 \left(\frac{P}{a} + b \right)$$

dove:

H = distanza verticale tra le affossature (m);

P = pendenza;

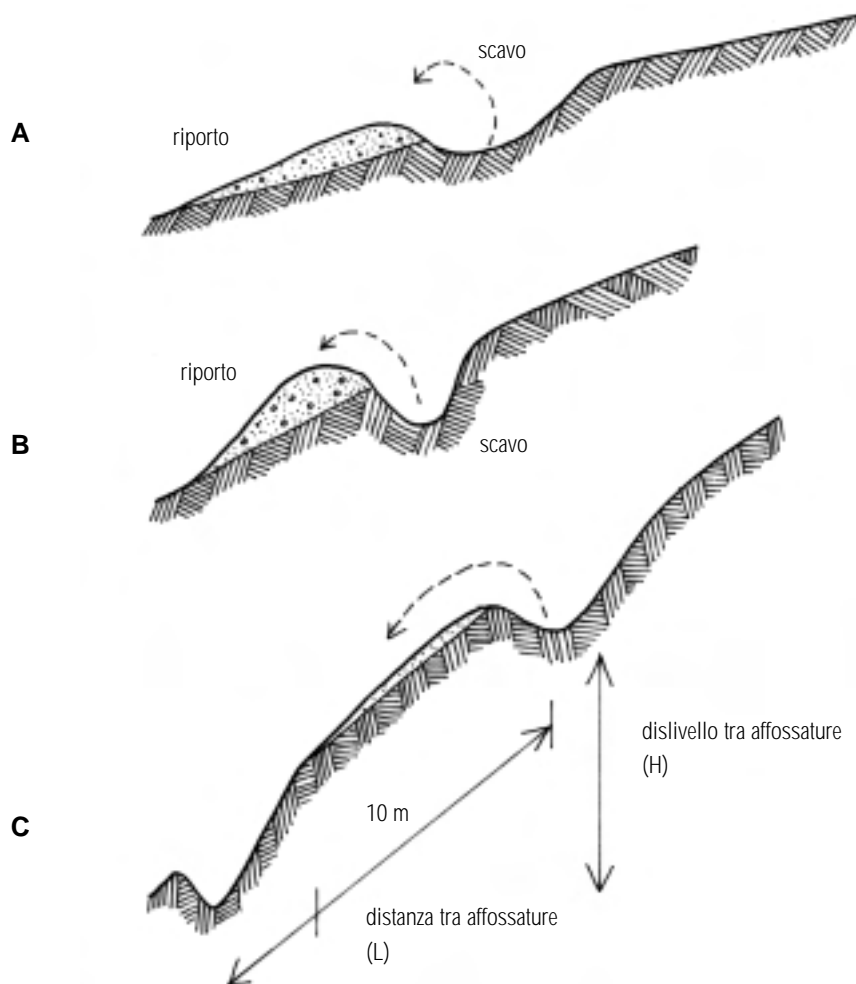
$a = 1.5-4$ in funzione della intensità di pioggia (intensità limitata - intensità elevata);

$b = 1-3$ in funzione della natura del suolo (suolo compatto - suolo sciolto).

Questa ultima formula tiene conto, almeno in parte, della variabilità climatica e pedologica presente nelle diverse situazioni.

Come regola pratica, verificata nell'uso corrente, su inclinazioni molto accentuate (>

Fig.4.3.3. Tipologie di affossature di primo ordine in funzione della pendenza:
 A) con pendenza limitata (< 7°); B) con pendenza intermedia (7 - 30°);
 C) con pendenza elevata (> 30°) (ridisegnato da Morgan, 1986).



20°) si posizionano le affossature ogni 10 m di pendice lungo la massima pendenza (Fig. 4.3.3). Queste scoline devono avere poi una pendenza longitudinale sempre molto limitata, dell'ordine dei pochi gradi, per evitare fenomeni di erosione incanalata. L'insieme della rete primaria deve poi essere commessa a capifossi di ordine superiore. Anche il posizionamento di quest'ultimi assume una grande importanza per la stabilità del sito, specie nel lungo periodo. Innanzitutto, è necessario suddividere il più possibile l'area scolante in sottobacini tra loro idraulicamente indipendenti, per evitare il propagarsi di fenomeni erosivi, causati da alterazione di parti della rete (Fig. 4.3.4). Inoltre, il posizionamento dovrà tener conto delle problematiche della velocità dell'acqua raccolta. Le necessità di lungo periodo (rinaturazione, assenza di risorse per manutenzione e ricostruzione) richiede che siano minimi i manufatti artificiali presenti (briglie, soglie, rip-rap) che nel tempo possono alterarsi modificando i parametri idraulici della rete stessa (pendenze o altro). L'intero sistema idraulico deve essere, infine, connesso alla rete idrografica presente, naturale (torrenti, fiumi) od artificiale (scolo in canali di bonifica), attraverso manufatti che devono essere progettati



Foto 4.3.2. Scavo di una scolina del primo ordine a sezione trapezoidale con un mini-escavatore.

Foto 4.3.3. Scavo manuale di una scolina del primo ordine in pendio sabbioso ad elevata pendenza.

tati e realizzati con attenzione visti i maggiori volumi di deflusso che controllano e per evitare ripercussioni a monte delle eventuali variazioni dei recipienti finali. Nelle sistemazioni in pianura il problema idraulico è legato principalmente ad un eccessivo ristagno dell'acqua. In questi casi è necessario realizzare una rete di scolo che allontani con la massima velocità le acque in eccesso. In genere nelle aree pianeggianti si dovrà ricostruire e/o ripristinare la rete di scolo presente in precedenza (es. nel riuso agricolo): in questi casi il ripristino dovrà riprendere i parametri idraulici tipici della zona, già collaudati nel tempo. I valori di riferimento per i volumi delle affossature comunque variano tra un minimo di 200 ed un massimo di 400 m³/ha e possono essere verificati utilizzando le formule di Hoogouth e Ernst (cfr. Cap. 4.3.3.2), sostituendo la profondità del dreno con l'altezza di acqua nel fosso.

Calcolo delle sezioni

Il calcolo delle sezioni, e quindi dei volumi, deve essere effettuato per tutte le porzioni della rete, ma assume una importanza fondamentale per la rete di raccolta di ordine superiore, visti i volumi interessati. La progettazione si articola in diversi momenti:

a) *definizione della velocità massima ammissibile* in funzione delle caratteristiche del sito, per evitare che questa assuma una capacità di scavo e di trasporto eccessive; si può utilizzare la formula:

$$V_{avv} = V_{max} * K_s$$

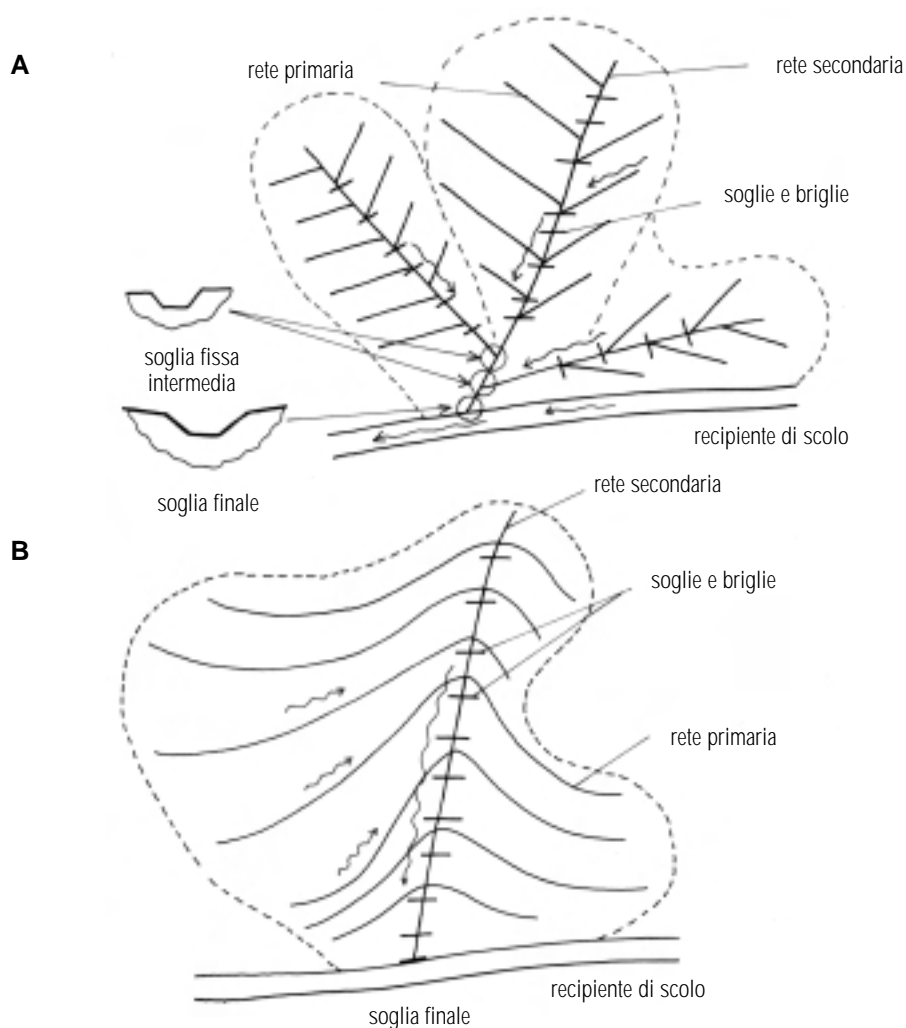
dove:

V_{am} = velocità massima ammissibile (m/s);

V_{max} = velocità massima (m/s);

K_s = coefficiente di stabilità, compreso tra 0.5-0.9, in relazione ai caratteri del sito.

Fig. 4.3.4. Posizionamento della rete idraulica di scolo delle acque in eccesso:
A) in presenza di sottobacini idraulicamente indipendenti;
B) con un unico bacino scolante.



SUBSTRATO	VELOCITÀ	
	SENZA TRASPORTO	CON TRASPORTO
Terreno sabbioso fine	0.45	0.75
Terreno argilloso sabbioso	0.55	0.75
Terreno argilloso limoso	0.60	0.90
Terreno limoso	0.75	1.05
Terreno argilloso compatto	1.15	1.50
Ghiaia fine	0.75	1.50
Ghiaia grossolana	1.20	1.85
Ciottoli e breccia	1.50	1.70

Tab.4.3.11. Velocità massima del flusso in funzione del tipo di substrato con e senza trasporto di materiale colloidale su superficie nuda (m/s).

b) definizione della scarpa massima ammissibile:

si deve calcolare il valore della scarpa, o inclinazione delle sponde, attraverso la formula:

$$n = \tan(\alpha)$$

dove:

n = scarpa;

α = angolo di inclinazione della sponda rispetto alla verticale (cfr. Tab. 4.3.13).

SUBSTRATO	COPERTURA		
	TERRENO NUDO	ERBACEA MEDIA	ERBACEA OTTIMALE
Sabbia - limo leggeri	0.3	0.7	1.5
Sabbia sciolta	0.5	0.9	1.5
Sabbia grossolana	0.75	1.25	1.7
Terreno sabbioso			
Argilla - marna sode	1.0	1.7	2.0
Argilla compatta o			
ghiaia compatta	1.5	1.8	2.5
Ghiaia grossolana	1.5	1.8	
Scisto, roccia tenera, ecc.	1.8	2.1	
Conglomerato fortemente cementato	2.5		

Tab.4.3.12. Velocità massima di sicurezza nella rete in funzione della copertura vegetale (m/s).

Questo valore varierà in funzione del substrato. Sarà comunque sempre necessario evitare i valori massimi ammissibili, privilegiando condizioni più appoggiate, maggiormente stabili, per favorire il successivo insediamento della vegetazione.

Substrato	n	α (°)
Sabbioso	2 - 3	63 - 72
Medio - impasto	1.5 - 2	56 - 63
Ghiaioso	1.25 - 1.5	51 - 56
Argilloso	1 - 1.25	45 - 51
Roccioso	0.25 - 0.10	5 - 14

Tab.4.3.13. Valori di scarpa massima in funzione del tipo di substrato e relativo angolo di inclinazione.

c) calcolo dell'area della sezione:

avendo a disposizione portata e velocità è possibile ora calcolare l'area della sezione necessaria per contenere il deflusso del caso critico considerato:

$$A = \frac{Q_{\max}}{V_{\text{am}}}$$

dove:

A = area della sezione (m²);

Q_{\max} = portata massima (m³/s);

V_{am} = velocità di sicurezza ammissibile (m/s).

Questo valore può eventualmente essere aumentato allo scopo di prevedere un certo margine di sicurezza ed evitare il completo riempimento della sezione. A tale riguardo, viste le esigenze di lungo periodo legate alla rinaturazione della rete di scolo, può

essere utile prevedere, almeno nei tratti di ordine superiore (collettori principali), una profilatura del terreno in prossimità dell'alveo tale da poter eventualmente sopportare eventi catastrofici caratterizzati da tempi di ritorno superiori a quelli previsti dal progetto (Fig. 4.3.5).

Fig.4.3.5. Sezione tipo per le affossature di ordine superiore con sezione di raccordo per contenere piene eccezionali.



Perciò, invece di limitarsi alla realizzazione di un semplice fosso, può essere utile prevedere un "volume accessorio", realizzato attraverso il raccordo tra le sponde dell'alveo e il terreno circostante, dove mantenere i deflussi eccezionali e rari, e nel contempo insediare subito una adeguata vegetazione. Quest'ultima dovrà comunque

Foto 4.3.4. Scavo di una affossatura del primo ordine con lama.



avere una densità ed una dislocazione tali da non rallentare troppo il deflusso delle acque in eccesso. Esperienze passate hanno infatti dimostrato come un eccessivo rigoglio incontrollato della vegetazione possa rallentare in modo eccessivo il deflusso. A tale riguardo andranno privilegiate sempre essenze arboree che comunque presentano un impatto più contenuto sul deflusso.

Tab.4.3.14. Parametri idraulici di alcune sezioni tipo.

Tipologia Sezione	Area Bagnata	Contorno Bagnato	R	Ampiezza superiore
<p>TRAPEZOIDALE</p>	$bd + zd^2$	$b + 2d\sqrt{z^2 + 1}$	$\frac{bd + zd^2}{b + 2d\sqrt{z^2 + 1}}$	$b + 2dz$
<p>TRIANGOLARE</p>	zd^2	$2d\sqrt{z^2 + 1}$	$\frac{bd + zd^2}{b + 2d\sqrt{z^2 + 1}}$	$2dz$
<p>PARABOLICA</p>	$\frac{2}{3}td$	$t + \frac{8d^2}{3t}$	$\frac{t^2d}{1.5t^2 + 4d^2} \approx \frac{2}{3}d$	$\frac{\text{Area}}{0.67d}$
<p>CIRCOLARE</p>	$\frac{R^2}{2} \left(\frac{\pi\alpha}{180} - \sin(\alpha) \right)$	$\frac{1}{2}(360 - \alpha)D$	$\frac{1}{2} \left(1 - \frac{\sin(2\pi - \alpha)}{2\pi - \alpha} \right) D$	$2\sqrt{h(D-h)}$

d) *Definizione dei parametri della sezione strettamente legati alla V_{am} :*

- determinazione della pendenza di fondo per quel tratto di rete: I;
- determinazione della forma della sezione e calcolo del raggio idraulico R: conoscendo l'area (A) ed il valore della scarpa (n) si può definire la forma della sezione e calcolare il valore del contorno bagnato (C), con cui ricavare il raggio idraulico (Tab. 4.3.14):

$$R = \frac{A}{C}$$

- determinazione della scabrezza nel breve periodo (Tab. 4.3.17): in assenza di un manto erboso stabile e in presenza di una rete ancora non ben stabilizzata, si avrà una maggior velocità nel deflusso: questa non deve superare il valore soglia di riferimento legato al tipo di substrato (Tab. 4.3.17-18);
- determinazione della scabrezza nel lungo periodo: in presenza di una rete assestata, già inerbita e/o arbustata in modo permanente si avrà un aumento nella scabrezza (Tab. 4.3.17-18) e quindi una riduzione nella velocità: attenzione quindi al dimensionamento corretto della sezione di deflusso in quanto una eccessiva riduzione della velocità, limitando le portate in uscita, richiederà sezioni e volumi maggiori. Allorché l'inerbimento si sarà affermato si avrà anche un aumento nella stabilità del fondo e delle scarpate, tale da permettere un incremento nella velocità massima ammissibile del deflusso (Tab. 4.3.19). Questo sarà un elemento di sicurezza molto importante nel lungo periodo quando il sistema di scolo evolverà verso un grado maggiore di naturalità. E' necessario verificare che la rete sia adeguata nel breve e nel lungo periodo, stante l'assestamento del substrato e l'evoluzione della copertura vegetale.

e) *verifica della velocità ottenuta nelle condizioni previste, nel breve e nel lungo periodo:*

sulla base dei precedenti parametri si può ora verificare la velocità del deflusso utilizzando la formula dello Chezy:

$$V = \chi \sqrt{RI}$$

o di Manning:

$$V = \frac{1}{n} R^{2/3} I^{1/2}$$

dove:

χ = coefficiente di Chezy che dipende da scabrezza e raggio idraulico; calcolabile con diverse formule: Bazin, Kutter, ecc;

n = coefficiente di scabrezza di Manning ($m^{1/2}/s$);

R = raggio idraulico;

I = pendenza del fondo;

il cui valore dovrà essere compatibile sia con la necessità di assicurare un adeguato deflusso che con l'esigenza di stabilità della rete nel tempo.

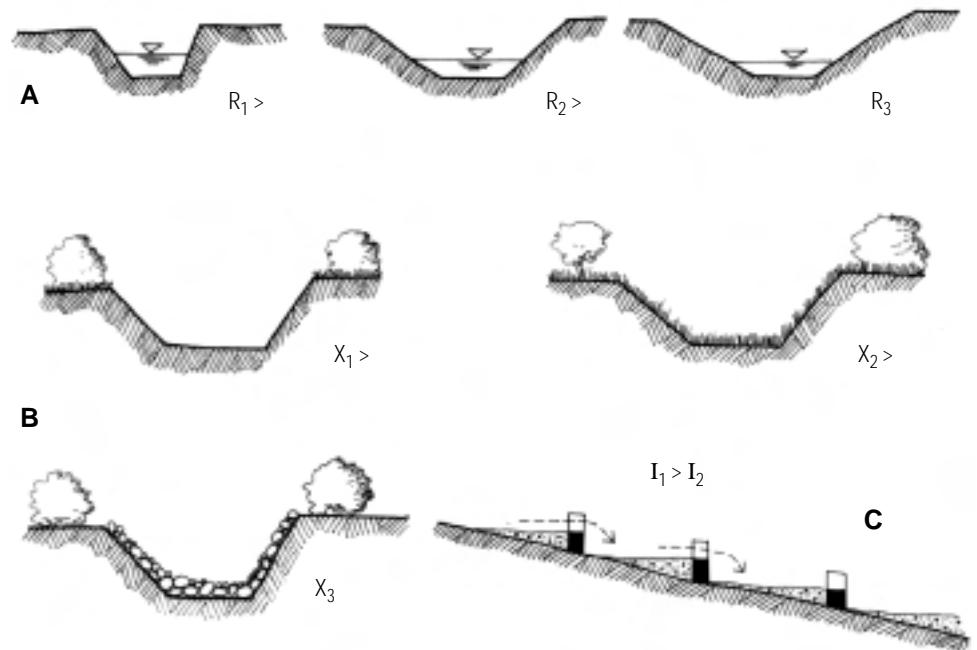
Controllo della velocità

In molte risistemazioni il problema è la presenza di tratti di rete idraulica con pendenze molto accentuate, che comportano velocità elevate e quindi un alto rischio di erosione incanalata. E' quindi necessario intervenire sui parametri che condizionano direttamente la velocità quali:

a) *Raggio idraulico (R)*

Si deve preferire sempre una affossatura ampia più che profonda, con un esteso contorno bagnato C e quindi, a parità di area A, un raggio R più limitato (con un valore di h, profondità della corrente, minore) e quindi una velocità di deflusso più bassa (Fig. 4.3.6 a). Una sezione ampia con scarpate appoggiate risulterà più stabile e più facilmente rivegetabile. In genere non si hanno problemi di spazio, o di tare, ne problemi di costo: i volumi di scavo rimangono costanti. Aumentano solo

Fig.4.3.6. Interventi per ridurre la velocità all'interno delle affossature:
 A) diminuzione del raggio idraulico;
 B) aumento della scabrezza del fondo e delle pareti;
 C) diminuzione della pendenza di fondo.



le quantità del materiale da utilizzare nelle eventuali opere di stabilizzazione. Sono da evitare gli interventi di riempimento della sezione con materiale di grosse dimensioni (massi e sassi disposti casualmente) con lo scopo di aumentare i valori del contorno bagnato (C) oltre che della scabrezza. Infatti dall'osservazione di diverse esperienze già realizzate si è visto che l'acqua o esonda e/o crea vie preferenziali di scorrimento attorno e sotto ai massi, divagando ed erodendo lateralmente oltre che approfondendosi.

b) Scabrezza (γ di Bazin, m di Kutter, n di Manning, ecc.)

Aumentando la scabrezza si diminuisce la velocità, favorendo anche il deposito di una parte di materiale fine (Fig. 4.3.6 b). E' sempre preferibile aumentare la scabrezza attraverso la vegetazione, in quanto questa si ancora al substrato, è autoriparante ed è a crescita continua, utilizzando sia essenze erbacee (che stabilizzano la superficie) che arbustivo-arboree (che stabilizzano la massa a profondità maggiori) (Tab. 4.3.15).

Tab.4.3.15. Specie da utilizzare nella rivestimento della rete di scolo.

ERBACEE

Lolium perenne/multiflorum, *Cynodon dactylon*, *Agrostis tenuis*, *Festuca rubra*,
Poa pratensis, *Agropyron repens*, *Trifolium hybridum*, *Trifolium repens*, *Trifolium pratense*, *Lotus corniculatus*, *Melilotus officinalis*

ARBUSTIVE

Cornus sanguinea (x), *Crataegus monogyna*, *Euonymus europaeus*, *Frangula alnus* (x), *Prunus spinosa*, *Rosa canina* (x), *Salix elaeagnos* (x), *Salix purpurea*, *Salix cinerea* (x),
Salix triandra (x), *Ulmus campestris* (x)

ARBOREE

Salix alba (x), *Salix capraea* (x), *Salix fragilis* (x), *Alnus glutinosa* (x), *Populus alba* (x), *Populus nigra* (x), *Fraxinus excelsior*, *Fraxinus oxycarpa*

[(x) specie resistenti alla sommersione prolungata]

Invece l'utilizzo di materiali inerti per aumentare la scabrezza del fondo delle affossature pone dei problemi di costo e di durata nel lungo periodo, in quanto eventuali rotture e trasporti a valle, dovuti a piene eccezionali o a cedimenti, devono essere riparate attraverso interventi di manutenzione periodici; questi non sono proponibili nel lungo periodo, specie nelle destinazioni di tipo naturalistico. Lo sforzo a cui questi elementi devono resistere è funzione della velocità (e quindi pendenza, raggio idraulico o altezza della corrente) e delle dimensioni e caratte-

ristiche specifiche del materiale impiegato: è quindi necessario valutare con attenzione il diametro del materiale impiegato. Infatti lo sforzo tangenziale medio sul perimetro dell'alveo è pari a:

$$\tau_o = \gamma R i$$

dove:

τ_o = tensione tangenziale media sul perimetro (kpa/m²);

γ = peso specifico dell'acqua (t/m³);

R = raggio idraulico;

i = pendenza del fondo;

mentre il valore critico dello sforzo che mobilita un elemento minerale di diametro d e peso specifico γ_s su un fondo di alveo piano in assenza di forze di coesione è pari a:

$$\tau_{cr} = 0.06 (\gamma_s - \gamma) d \quad \text{per } d \ll h$$

$$\tau_{cr} = 0.06 \left(1 + 0.67 \left(\frac{d}{y} \right)^{0.33} \right) (\gamma_s - \gamma) d \quad \text{per } d = h$$

dove:

τ_{cr} = tensione critica (kp/m²);

γ = peso specifico dell'acqua (t/m³);

γ_s = peso specifico del minerale (t/m³);

d = diametro del granulo (m);

h = tirante della corrente (m).

Inoltre il materiale situato sulle sponde è soggetto anche ad altre forze che tendono a spostarlo lungo la sponda stessa per cui la formula di modifica in:

$$\tau_{cr}(\alpha) = \tau_{cr}(0) (\cos(\alpha)) \sqrt{1 - \frac{\text{tg}^2(\alpha)}{\text{tg}^2(\varphi)}}$$

dove:

$\tau_{cr}(\alpha)$ = tensione critica sulla sponda inclinata di α (kp/m²);

$\tau_{cr}(0)$ = tensione critica sul fondo (kp/m²);

α = angolo di inclinazione della sponda;

φ = angolo di attrito del materiale.

I valori così ricavati devono comunque essere considerati con attenzione in quanto riferiti a velocità medie. La velocità puntuale può infatti essere maggiore anche del 50% o più rispetto al valore medio.

Substrato	Trascinamento
Sabbia Grossa	0,65
Ghiaietta	1.25
Ghiaia	1.40
Ghiaia grossa	3.10
Ciottoli	5.00

Tab.4.3.16. Forza di trascinamento limite per materiale di diverso diametro (kPa/m²) (Benini, 1990).

Nel caso si ricorra a materiale inerte di copertura si deve evitare l'uso di sassi e/o massi disposti alla rinfusa od anche solo affiancati in modo sbrigativo: se la velocità dell'acqua è elevata ed il substrato è un materiale erodibile si manifestano da subito dei sottoscavi, con un progressivo approfondimento del livello di scorrimento dell'acqua, o delle divagazioni laterali, con un allargamento del fosso ed un progressivo interrimento dei massi. Se si opta per la ricopertura del fondo con materiale inerte questa deve essere realizzata in modo tale che il materiale sia ben posizionato, incastrato e bloccato (Fig. 4.3.7). Questo si ottiene attraverso:

- lo scavo di una parte dell'alveo secondo una forma continua (circolare o ellittica), evitando variazioni repentine nelle pendenze laterali;
- la predisposizione di uno strato di fondo, spesso 15-20 cm, utilizzando materiale minuto, pietrisco (0-30 mm) o graniglia (5-50 mm);

- il posizionamento dei sassi di grandi dimensioni, tra loro simili, partendo dal centro del fossato ed appoggiando ed incastrando i grossi sassi fino alle estremità spondali;
 - il riempimento degli interstizi tra i sassi con pietrisco grossolano.
- Il dimensionamento della sezione e delle dimensioni dei fossi sono funzione delle pendenze e delle portate (Schiechtl, 1982). Questo fa sì che il costo dell'opera sia comunque molto elevato e quindi proponibile solo in condizioni particolari.

Tab.4.3.17. Valori del coefficiente di scabrezza n di Manning.

Tipo di canale

A. SCAVATO O DRAGATO	Min.	Norm.	Max
a) in terra, rettilineo ed uniforme			
a.1) pulito, completato di recente	0.016	0.018	0.020
a.2) pulito, dopo alterazione meteorica	0.018	0.022	0.025
a.3) in ghiaia, pulito, sezione uniforme	0.022	0.025	0.030
a.4) con graminacee basse, poche dicotiledoni	0.022	0.027	0.033
b) in terra, serpeggiante e lento			
b.1) senza vegetazione	0.023	0.025	0.030
b.2) con graminacee, poche dicotiledoni	0.025	0.030	0.033
b.3) dicotiledoni dense o vegetazione acquatica nell'alveo	0.030	0.035	0.040
b.4) fondo in terra sponde con breccie	0.028	0.030	0.035
b.5) fondo sassoso e sponde inerbiti	0.025	0.035	0.040
b.6) fondo ciotoloso e sponde pulite	0.030	0.040	0.050
c) scavato con benna a lancio o dragato			
c.1) senza vegetazione	0.025	0.028	0.033
c.2) con piccoli arbusti sulle sponde	0.035	0.050	0.060
d) scavato nella roccia			
d.1) arrotondato ed uniforme	0.025	0.035	0.040
d.2) frastagliato ed irregolare	0.035	0.040	0.050
e) non mantenuto, erbacee ed arbustive non tagliati			
e.1) dicotiledoni dense, alte come il flusso	0.050	0.080	0.120
e.2) fondo pulito, arbusti sulle sponde	0.040	0.050	0.080
e.3) fondo pulito ma con flusso più alto	0.045	0.070	0.110
e.4) arbusti densi con alto livello del flusso	0.080	0.100	0.140
B. PICCOLO CORSO D'ACQUA NATURALE			
a) in pianura			
a.1) pulito, rettilineo senza incisioni o buche profonde in piena	0.025	0.03	0.033
a.2) pulito, rettilineo con più ciottoli ed erbacce	0.030	0.035	0.040
a.3) pulito, sinuoso con qualche buca e deposito	0.033	0.040	0.045
a.4) pulito, sinuoso ma con più ciottoli ed erbacce	0.035	0.045	0.050
a.5) pulito, sinuoso in magra con scarpate e sezioni irregolari	0.040	0.048	0.055
a.6) come al punto a.5) ma con più ciottoli	0.045	0.050	0.060
a.7) tratti con corrente lenta, coperti di erbacce con buche fonde	0.050	0.070	0.080
a.8) tratti molto inerbiti, buche profonde, con tronchi e sottobosco	0.075	0.100	0.150
b) in montagna senza vegetazione nell'alveo, sponde ripide, alberi e sottobosco lungo le sponde sommergibili			
b1) fondo in ghiaia, ciottoli e qualche masso	0.030	0.040	0.050
b2) fondo in ciottoli e grandi massi	0.040	0.050	0.070

TIPO DI VEGETAZIONE	ALTEZZA	n
Graminacee dense molto alte	(> 60 cm)	0.06 - 0.20
Graminacee alte	(25 - 60 cm)	0.04 - 0.15
Graminacee medio alte	(15 - 25 cm)	0.03 - 0.08
Graminacee basse	(5 - 15 cm)	0.03 - 0.06
Graminacee molto basse	(< 5 cm)	0.02 - 0.04

c) Pendenza della rete (I)

La pendenza del fondo di riduce attraverso:

- *una adeguata organizzazione della rete*: attraverso una attenta progettazione sia dell'area (cfr. Cap. 4.1) che della rete di scolo, si può organizzare ed indirizzare la rete in ambiti stabili e poco pendenti. Questo obiettivo però deve essere raggiunto evitando la creazione di tratte eccessivamente lunghe e complesse: meglio predisporre sempre tratte corte, poco pendenti e tra loro idraulicamente indipendenti per evitare il manifestarsi di alterazioni e la loro successiva propagazione a monte. Inoltre in presenza di pendenze contenute, sempre inferiori al 10%, può essere semplice tappezzare la rete di scolo, specie la primaria, con una copertura vegetale permanente, utilizzando specie adatte e resistenti (Tab. 4.3.19). Alle volte limitazioni esterne (vincoli) possono impedire una corretta risistemazione, costringendo il progettista a scelte ardite, attraverso l'impiego di strutture permanenti (artificiali o naturali);
- *l'inserimento di briglie e soglie*: si può limitare una pendenza eccessiva costruendo una serie continua di salti di fondo (Fig. 4.3.6 c), caratterizzati da una zona a monte sub-

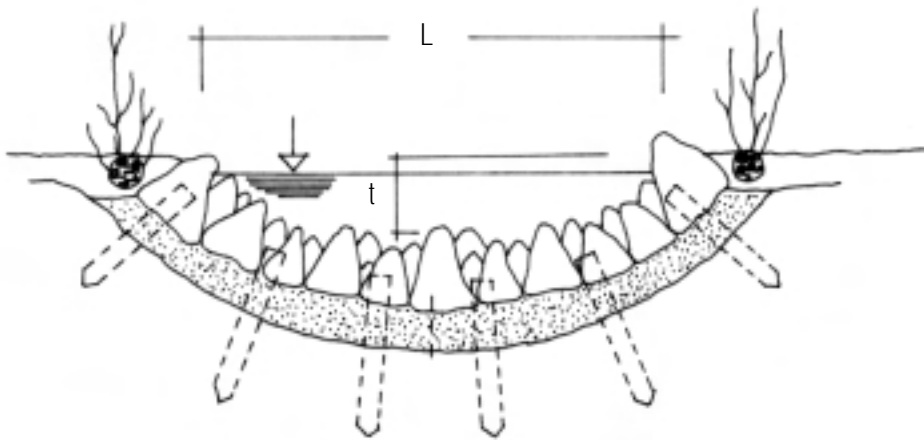


Fig.4.3.7. Sezione di cunettono a fondo scabroso (ridisegnato da Schiechl, 1982).



Foto 4.3.5. Fenomeni di erosione in un cunettono ad un anno dalla sua costruzione.

pianeggiante dove si sedimenta il materiale, ed una zona a valle, dove si infrange l'acqua in caduta dallo stramazzo della briglia. Queste brigliette devono essere progettate e posizionate correttamente, non solo per limitare le pendenze, ma anche per evitare scavi e sottoscavi localizzati, fuoriuscite e rotture; inoltre queste opere debbono consentire, se non favorire, una successiva fase di rivegetazione. Queste strutture si adattano bene a tutte le situazioni in cui è possibile prevedere una periodica manutenzione. Viceversa, in siti a destinazione più naturalistica, o destinati all'abbandono, è necessario prevedere soglie caratterizzate da una durata prolungata, da associare ad una successiva fase di rinaturalizzazione, che stabilizzi in modo permanente la rete. La progettazione e la realizzazione delle briglie si può quindi articolare in due diverse fasi: breve e lungo periodo.

Tab. 4.3.18. Variazione nell' *n* di Manning in funzione della vegetazione erbacea presente.

SPECIE	PENDENZA (%)	VELOCITÀ (m/s)	
		SUBSTRATI RESISTENTI	SUBSTRATI ERODIBILI
<i>Cynodon dactylon</i>	< 5	2.4	1.8
	5 - 10	2.1	1.5
	> 10	1.8	1.2
	< 5	2.1	1.5
<i>Poa pratensis</i>	5 - 10	1.8	1.2
<i>Festuca arundinacea</i>	> 10	1.5	0.9
<i>Phalaris arundinacea</i>	< 5	1.5	1.2
	5 - 10	1.2	0.9
<i>Festuca rubra</i>			
<i>Agrostis alba</i>	< 5	1.0	0.8
<i>Medicago sativa</i>			

Interventi nel breve periodo

Nel breve periodo l'obiettivo è realizzare, attraverso questi salti di fondo, una rete artificiale stabile ed adeguata alle caratteristiche del sito ed alle esigenze di stabilità.

Progetto

La progettazione delle briglie nel breve periodo deve risolvere diversi aspetti:

- *aspetti idraulici*: in particolare:
 - definizione del franco di sicurezza sopra le briglie al fine di contenere in sicurezza nell'alveo del canale il deflusso massimo previsto;
 - determinazione dell'altezza della soglia dello stramazzo rispetto al fondo del fosso (H_s); valori elevati limitano il numero delle briglie necessarie ma aumentano la forza di scavo dell'acqua in caduta ed in caso di cedimenti causano forti problemi di erosione che si ripercuotono a monte. Valori di altezza limitati comportano un numero maggiore di briglie, o soglie, ma limitano i problemi in caso di cedimenti;
 - determinazione della distanza tra le briglie: si può utilizzare quanto proposto da Heede (1976):

$$D = \frac{H_s}{K \tan(\psi) \cos(\psi)}$$

dove:

D = distanza verticale tra le briglie (m);

H_s = altezza delle soglie (m);

K = coefficiente pari a: 0.2 per $\tan(\psi) < 0.2$ oppure 0.5 per $\tan(\psi) > 0.2$;

ψ = angolo di inclinazione del fondo del canale;

- dimensionamento della gaveta della briglietta, al fine di contenere il caso critico previsto e per mantenere il flusso della corrente al centro del canale, evitando serpeggiamenti e deviazioni; inoltre deve avere una larghezza che non ecceda la larghezza del fondo per evitare erosioni che possono minare la stabilità laterale della struttura.

- *Aspetti meccanici:*

le briglie devono essere stabili, resistere alle pressioni esercitate dal terreno e dall'acqua, essere ben immorsate sul fondo e nelle scarpate dell'affossatura; inoltre devono impedire in modo assoluto sottoscavi e aggiramenti laterali. Le briglie devono inoltre favorire il rallentamento della velocità dell'acqua e quindi la sedimentazione di parte del materiale di trasporto nella zona a monte della stessa: devono perciò essere evitate la formazione di vie di scorrimento preferenziali entro o sotto le briglie: l'acqua deve cadere dalla gaveta o infiltrarsi lentamente attraverso il sedimento a monte e la briglia (Fig. 4.3.8).

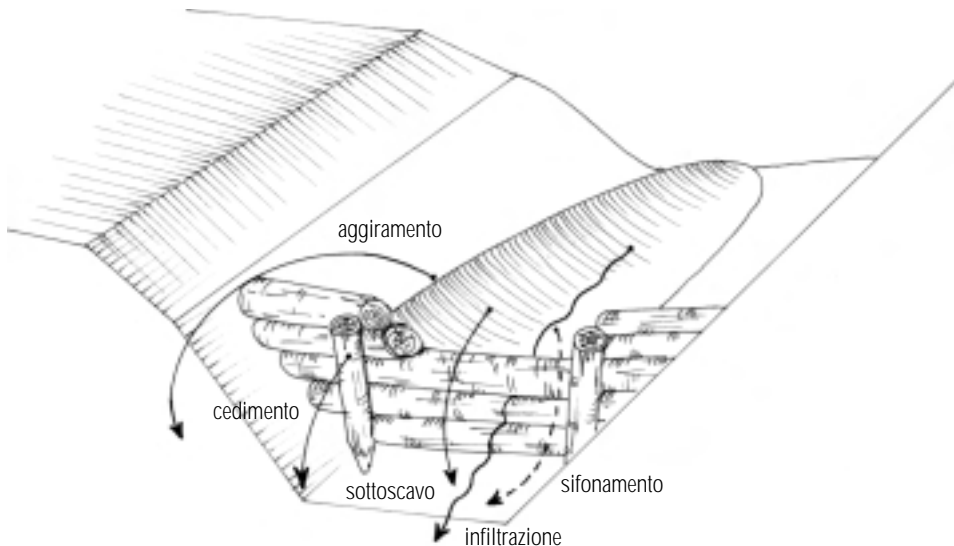


Fig.4.3.8. Briglia in tondate: problemi nella progettazione e realizzazione: aggiramento (insufficiente ammorsamento laterale dei pali orizzontali, insufficiente costipamento a monte); cedimento (insufficiente ammorsamento laterale dei pali orizzontali, insufficiente infissione dei pali verticali); sifonamento della struttura (insufficiente compattazione a monte, riempimento con materiale di diametro elevato o non graduato); infiltrazione attraverso la struttura (insufficiente compattazione a monte, riempimento con materiale di diametro elevato o non graduato); sottoscavo a valle (errato posizionamento longitudinale delle briglie, assenza di una controbriglia).

- *Aspetti pratico-economici:*

le briglie devono mantenere la loro funzione a lungo nel tempo, senza che sia necessario alcun intervento di manutenzione, al fine di favorire l'insediamento e l'evoluzione della vegetazione; questo poi migliorerà le condizioni di stabilità, sia della pendice che della rete idraulica e modificherà in senso favorevole anche tutti i parametri idraulici di progetto (deflusso, scabrezza, raggio idraulico ecc.). Essendo le



Foto 4.3.6. Fenomeno di sottoscavo in una briglia di tondate con platea in calcestruzzo.

Foto 4.3.7. Aggiramento laterale di una briglietta.

Foto 4.3.8. Erosione di una briglietta dovuta all'infiltrazione del deflusso a monte.



briglie realizzate con materiali che si alterano, dovranno essere predisposti degli interventi nel lungo periodo, che assecondino queste modificazioni verso un nuovo equilibrio.

Realizzazione

Le briglie e le brigliette di contenimento possono essere realizzate in forme e modi diversi, in funzione delle situazioni ecologiche ed economiche locali. Possono essere impermeabili o meno al flusso idraulico, limitando in questo modo la spinta idrostatica. Possono essere realizzate in materiali naturali, come il legno, o in materiali artificiali, come il ferro o il calcestruzzo. In genere, si preferisce limitare al massimo l'uso di materiali artificiali per ragioni ecologiche ed estetico-paesaggistiche, impiegando i materiali estranei solo in situazioni particolari (sezioni di uscita, sottopassi, ecc.). I materiali naturali sono rappresentati sia da parti vive che inerti. In questa prima fase sono certamente da preferire gli interventi con materiali inerti, che consentono la realizzazione di strutture stabili ed efficienti fin da subito; gli interventi con materiale vivo possono invece essere concentrati nel medio-lungo periodo. Si possono utilizzare pali e/o tavole di materiale a lenta degradazione, in castagno o altro legno impregnato. Le dimensioni e lo spessore del materiale devono essere compatibili con la lunga durata: è quindi preferibile abbondare nelle dimensioni e nella qualità del materiale. Si possono realizzare diverse tipologie di briglie: con tondame e/o tavole in legno, con sassi o con entrambi i materiali.

Foto 4.3.9. Affossatura di ordine superiore presidiata con briglie in tondame o geotessuto.



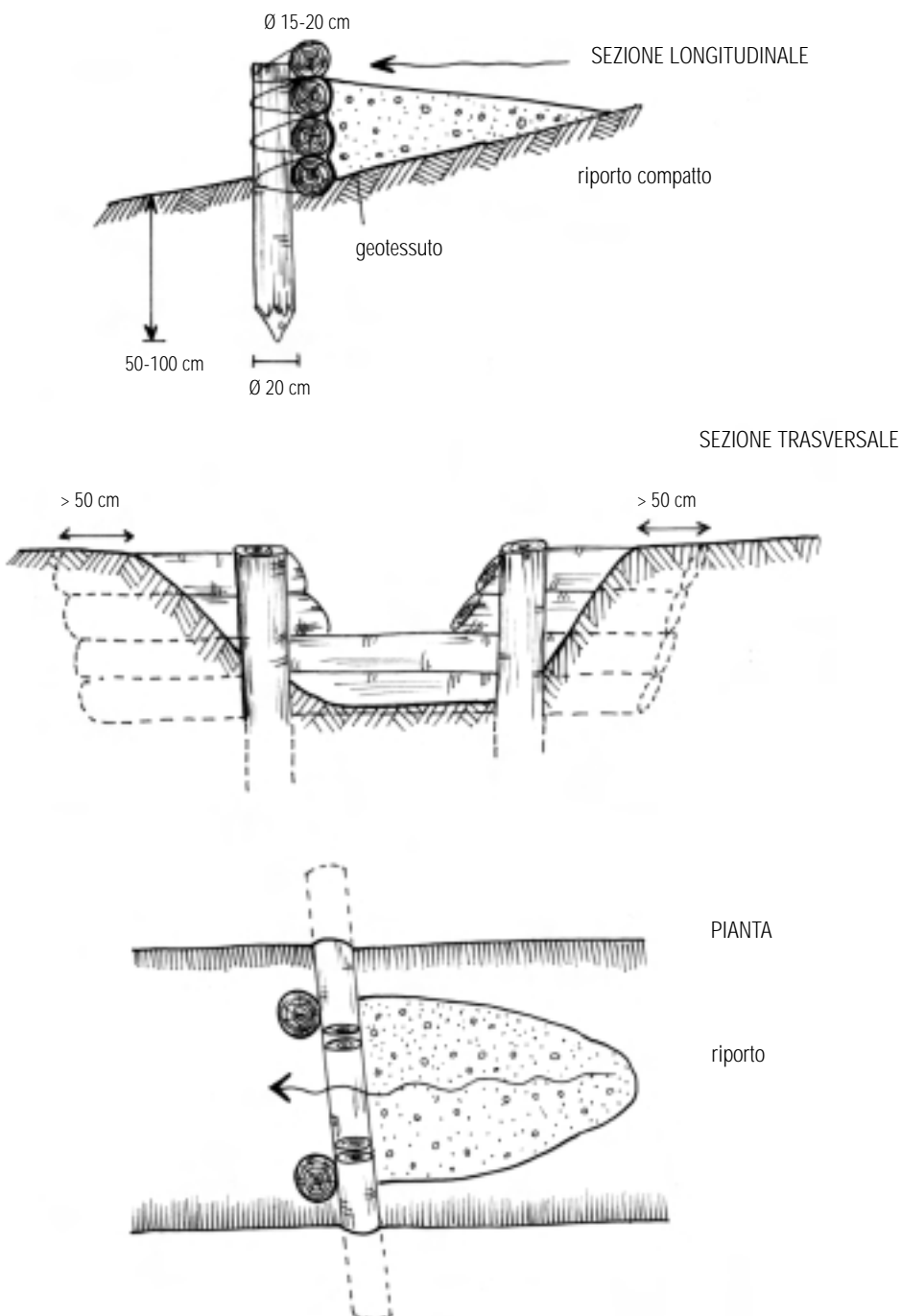
Briglie con tondame e/o tavole

La realizzazione di queste briglie (Fig. 4.3.9) comporta:

- la preparazione del materiale necessario, adattandolo alla situazione locale;
- lo scavo della trincea di fondo, al fine di raggiungere uno strato compatto e penetrare le sponde in modo adeguato (0.5 m);
- lo scavo dei buchi dove infiggere i sostegni verticali, posizionati il più lateralmente possibile, entro le sponde;

- l'infissione e battitura dei pali verticali, che dovranno essere interrati per almeno 1/2-2/3 della loro lunghezza;
- il posizionamento dei pali/tavole orizzontali, in modo da occupare in lunghezza tutto lo scavo realizzato: è da curare con particolare attenzione alla sovrapposizione tra i diversi pali/tavole: non devono essere presenti escrescenze o deformazioni che impediscano un contatto continuo tra gli elementi;
- la legatura dei pali/tavole con filo di ferro zincato o chiodi in acciaio;
- il posizionamento delle ali laterali alla gaveta e la loro legatura ai pali orizzontali e verticali; la loro assenza può comportare il divagamento laterale della corrente con erosione delle sponde e scalzamento delle briglie;
- il posizionamento e fissaggio del geotessuto a monte della briglia e lungo una porzione del fondo dell'alveo, con funzione di contenimento del materiale e limitazione sia degli scavi che dei sottoscavi;
- il riempimento della faccia a monte della briglia con il materiale di scavo o di altro materiale di riporto, fino al livello della gaveta. Alle volte si preferisce, per comodità organizzative o di reperimento, utilizzare pietrame di dimensione media per rin-

Fig.4.3.9. Briglia in tonname: sezioni tipo.



- calzare a monte la briglia. Questa pratica è da evitare, in quanto difficilmente impedisce la creazione di passaggi preferenziali del deflusso, favorendo fenomeni di scavo;
- la compattazione accurata del materiale di riempimento e la sua sagomatura lungo le sponde;
- la costruzione della platea: la zona di caduta dell'acqua deve essere presidiata in modo molto attento al fine di evitare scavi, sottoscavi ed erosione. La lunghezza minima varia tra 1.5-1.75 volte l'altezza della soglia in funzione della pendenza (Gray et al., 1982). La platea assume grande importanza quando non viene rispettata la distanza corretta tra le briglie (D) e si innescano fenomeni di scavo. Sono diverse le possibilità ed i materiali per progettare questo elemento della briglia. (Fig. 4.3.10):

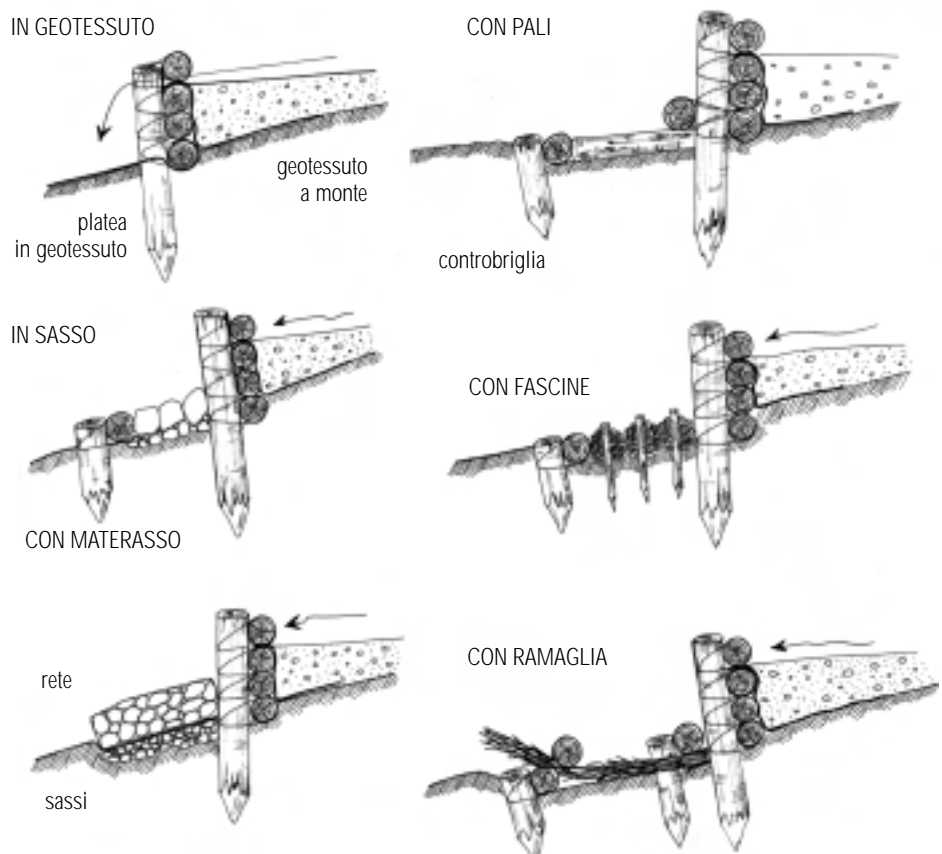
a) *geotessuto*

Si inserisce un telo di geotessuto in corrispondenza del primo palo/tavola orizzontale, fissandolo a monte della briglia. È un metodo semplice, efficace, con una buona capacità di adattamento alle modificazioni del fondo operate dalla corrente. Il limite è rappresentato dalla durata, non ben definita ma comunque limitata. Al geotessuto si possono anche associare fascinate o talee infisse attraverso il tessuto stesso (di salice, pioppo, ontano nero).

b) *Sassi*

Sassi di adeguate dimensioni possono essere posizionati al di sotto della gaveta per attenuare l'energia dell'acqua. Questi vanno bloccati in posto per evitare che siano facilmente fluitati dalla corrente. Si può, ad esempio, utilizzare una rete di ferro zincato prefabbricata come contenitore (es. materassi Reno), oppure si può realizzare, a valle dei massi, una struttura di ritenuta, come una piccola graticciata o controbriglia. Per migliorarne le capacità e la durata è preferibile disporre i sassi di più grosse dimensioni sopra uno strato di materiale più fine, che funzioni da filtro e protezione rispetto al fondo del canale. In caso contrario l'azione battente favorirà un'erosione localizzata, tale da disarticolare tutto l'insieme. Tutto questo sarà poi accentuato nel caso di interassi tra le briglie troppo ampi. Attraverso lo strato di massi e ghiaia è possibile anche inserire delle talee di arbusti ed alberi.

Fig.4.3.10. Tipologie costruttive della platea di una briglia in tondame.



c) *Pali*

E' possibile costruire la platea ricorrendo a pali di legno (castagno od altro a lenta alterazione) disposti sia longitudinalmente che trasversalmente. Questi possono essere fissati in diversi modi utilizzando picchetti, filo di ferro zincato e/o chiodi. Sono di facile realizzazione anche se richiedono una certa attenzione costruttiva. Si possono adattare a condizioni diverse ma hanno il limite della durata e della difficoltà nell'inserimento della vegetazione. Anche in questo caso si possono manifestare fenomeni di scavo a valle dei pali specie in canali a forte pendenza, dove l'interesse tra le briglie risulta essere eccessivo.

d) *Ramaglia viva e morta*

E' possibile presidiare la zona di caduta dell'acqua facendo ricorso alla ramaglia viva e/o morta. La ramaglia morta ha una funzione di difesa passiva di breve durata, mentre la ramaglia viva deve radicare e svilupparsi, mantenendo nel tempo una funzione protettiva. Si possono utilizzare diverse soluzioni progettuali:

- con fascinate: poste in trasverso rispetto al fondo del canale, fissate con picchetti, magari anch'essi vivi, inserendo come terminale della platea un palo trasversale di 20 cm di diametro (e relativi picchetti), con funzione di sostegno e trattenuta dell'acqua;
- con strati di ramaglia: disposti sia trasversalmente che longitudinalmente alla corrente, fissati con pali, picchetti e filo di ferro zincato.

Sono soluzioni più onerose ma che innescano fin da subito una evoluzione naturale del sistema idraulico. Sono adatte a porzioni delle rete dove l'umidità è elevata e su substrati non rocciosi. Richiedono molto materiale vegetale fresco e devono essere messe a dimora solo in certe stagioni dell'anno (autunno-inverno), per favorire l'attecchimento e la sopravvivenza: questo può creare problemi operativi visti i problemi di accesso che si hanno in questo periodo.

Briglie in sasso

Accanto alle strutture realizzate con materiali organici esiste la possibilità di costruire briglie in materiale inerte (Fig. 4.3.11). Esistono a riguardo diverse tipologie di briglie/soglie in sasso, in relazione alle dimensioni della rete.

Briglie di grandi dimensioni

La realizzazione di questo tipo di briglie richiede:

- la preparazione del materiale: i massi devono essere graduati (cioè presenti in percentuali definite) nelle dimensioni, al fine di limitare gli scavi interni o sottopassi.

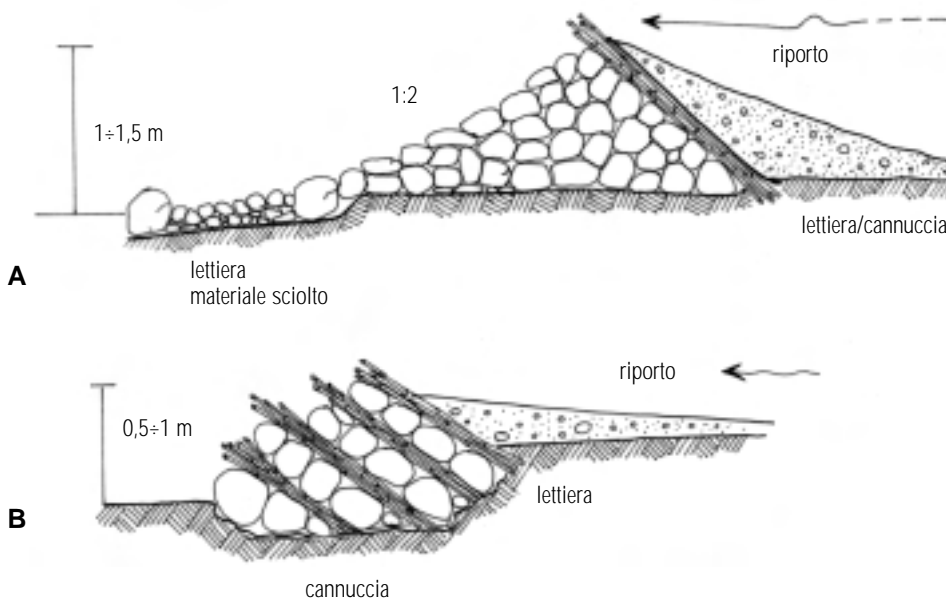


Fig.4.3.11. Briglie in sasso:
A) medio-grandi;
B) piccole.

Foto 4.3.10. Piccola soglia
in sasso.



Heede (1976) consiglia di avere una distribuzione granulometrica così composta:

25%	massi del diametro di 100-140 mm,
20%	massi del diametro di 150-190 mm,
25%	massi del diametro di 200-300 mm,
30%	massi del diametro di 310-450 mm;

- lo scavo della sezione e delle trincee trasversali (profondità 10-15 cm);
- il posizionamento di grossi massi nelle trincee trasversali;
- la costruzione delle briglie con i massi, provvedendo ad una accurata sistemazione delle diverse dimensioni per limitare vani e cavità interne. La scarpata in corrente dovrà avere una pendenza compresa tra 1:2 ed 1:1.5. Importante è la ricopertura di tutta la sezione del fosso e la creazione di un invito centrale che indirizzi la corrente ed eviti divagazioni laterali;
- la sistemazione di uno strato di lettiera, paglia, o canne palustri (20 cm di spessore) sulla faccia a monte della briglia, per favorire un'azione di filtro e di deposito del materiale in sospensione, strato tenuto in posizione da terriccio e/o massi;

Foto 4.3.11. Briglietta in sasso con evi-
denti fenomeni
di sifonamento.



- la sistemazione di uno strato di lettiera, di paglia, di canna (10-15 cm di spessore) o di geotessuto nella platea della briglia;
 - il ricoprimento della lettiera con massi ben incastrati, bloccati da una doppia serie a monte ed a valle, di esemplari di grosse dimensioni ricoprendo il fondo e le sponde.
- Questo tipo di briglia è adatta per sezioni ampie e profonde (1.5-3 m).

Briglie di dimensioni ridotte

Dove invece le dimensioni dei fossi sono più limitate è possibile realizzare delle piccole briglie, o soglie attraverso:

- lo scavo della trincea;
- posizionamento di materiale fine, canna o geotessile per limitare l'eventuale sottoscavo;
- il posizionamento dei massi lungo tutto il profilo della sezione, utilizzando quelli più grossi e regolari (meglio se a spigoli vivi);
- la creazione di almeno 3 livelli di massi ben incastrati e posizionati, a formare un invito centrale;
- il posizionamento di massi verso monte, sfalsati sia come dimensione che posizione, per limitare eventuali varchi nella massa; per avere un'azione idraulica ottimale è necessario che l'acqua cada dalla gaveta e non si infiltri tra i massi stessi;
- il posizionamento di strati "filtro" (di canna, ramaglia, geotessuto) tra i diversi livelli di massi, tenuti in posizione dal peso dello strato successivo, per rallentare e/o impedire il flusso entro la struttura;
- il rinalzo a monte della briglietta con terreno compattato;

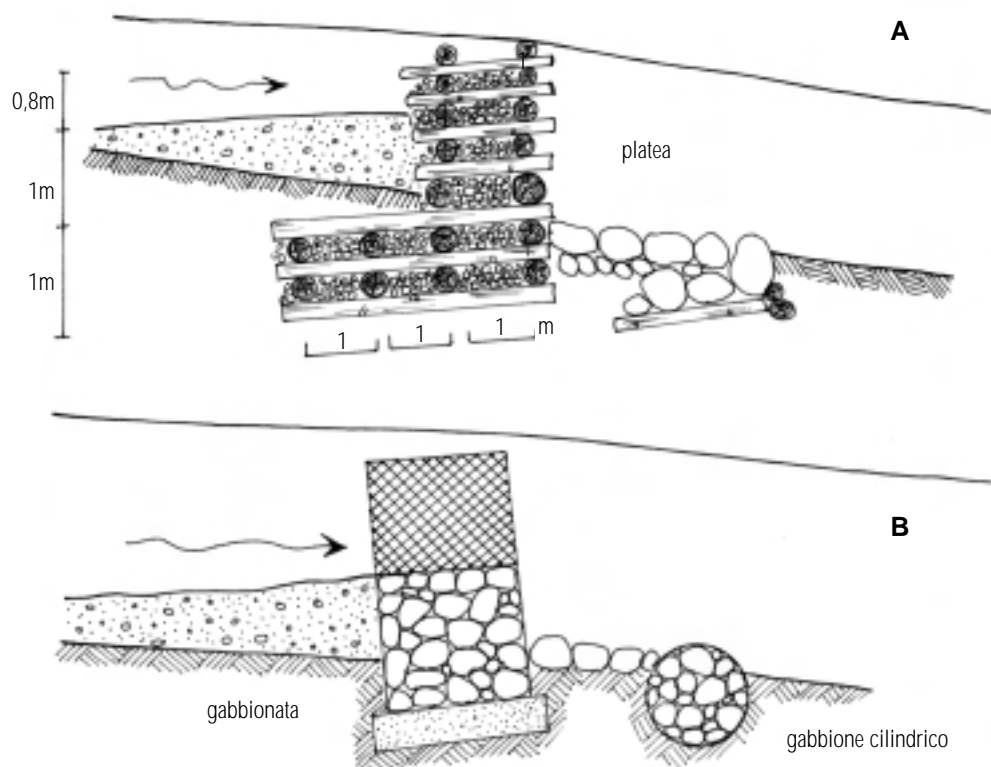


Fig.4.3.12. Tipologia di briglie di medie dimensioni:
A) briglia in tondate e pietrame;
B) gabbionata.

- il rinalzo a valle della gaveta, a formare una controbriglia su cui si infranga il flusso in caduta, realizzato con massi ben incastrati, disposti su uno strato filtrante (canna, geotessuto, lettiera) e bloccati da una serie di grossi massi posizionati a valle. La larghezza di questa platea deve essere superiore alla larghezza della gaveta ed adattarsi al profilo trasversale dell'affossatura.

Queste soglie piccole non consentono una attenta gradazione del materiale, né una accurata sistemazione dei massi e quindi si possono avere problemi di scavo o sottoscavo, con conseguente necessità di una manutenzione periodica, specie nei primi anni di funzionamento. E' da evitare il semplice posizionamento di un ordine di

massi di traverso al fosso, senza le necessarie opere complementari: questo in genere favorisce un rapido divagamento del deflusso, con aggiramento dell'ostacolo.

Foto 4.3.12. Briglia in tondame e pietrame.

Foto 4.3.13. Gabbionata utilizzata come briglia.



Briglie in legname e sasso e gabbionate

Una ulteriore possibilità deriva dalla associazione del legname e del pietrame in una struttura complessa (Fig. 4.3.12). Questo consente la realizzazione di briglie di dimensioni anche considerevoli che si adattano a condizioni morfologiche ed idrauliche gravose. Nella risistemazione di bacini estrattivi è preferibile evitare la realizzazione di queste strutture di grandi dimensioni che nel tempo richiedono interventi di gestione e manutenzione onerosi. In assenza di un controllo continuo nel medio periodo si corre il pericolo di cedimenti e l'innescare di fenomeni di scavo che possono mettere in crisi i risultati della risistemazione. A meno che non esistano precisi interessi che possano veicolare risorse per la loro gestione è meglio preferire soluzioni più leggere.

Foto 4.3.14. Briglietta in tondame e pietrame con sifonamento laterale.

Foto 4.3.15. Briglietta costituita da gabbionata e tondame, con sifonamento.



Più semplice può essere il ricorso a gabbionate o materassi realizzati con rete metallica zincata riempiti di ciottoli a formare opere trasversali di consolidamento. Oltre ad essere molto adattabili queste strutture sono di facile realizzazione ed inserimento. Con le gabbionate si possono realizzare strutture a più ordini anche di grosse dimensioni, anche se aumentano in questo caso le necessità di controllo e gestione nel tempo. Per soglie e briglie di piccole dimensioni realizzate con gabbioni o materassi si sono avuti problemi di filtrazione e sottoscavo legati alla elevata permeabilità della massa e ad una loro errata collocazione. In questi casi è necessario sempre prevedere un adeguato interrimento della struttura e la realizzazione di un sottofondo a bassa permeabilità su cui poggiare il materasso zincato.

Interventi nel lungo periodo

Nel lungo periodo il progetto deve definire gli interventi per favorire una rapida ed efficace trasformazione della rete verso un sistema di scolo a maggiore naturalità, stabile ed efficace.

Progetto

Nell'ottica del lungo periodo devono essere considerati:

- *gli aspetti idraulici:*

la rete deve mantenere inalterata la sua funzione di scolo. Certamente gli interventi di rivegetazione, che caratterizzano la sistemazione finale, avranno già avuto un certo effetto e quindi i parametri idraulici del sito saranno modificati: aumenterà la quantità di acqua intercettata ed utilizzata dalla vegetazione, aumenterà l'infiltrazione, diminuirà lo scorrimento superficiale e quindi anche l'erosione diffusa. Questo modificherà, almeno in parte, i parametri idraulici (volumi, tempi di corruzione, ecc.) che dovranno via via stabilizzarsi nel tempo. Nel contempo però parte delle briglie realizzate in materiale organico subirà un processo di alterazione e di degradazione e dovrà quindi essere sostituita da altri "manufatti" che mantengano stabile e funzionale la rete, sempre con elevato carattere di naturalità. Questi nuovi interventi non dovranno in alcun modo alterare le capacità di deflusso complessive, al fine di evitare problemi con eventi limite;

- *gli aspetti tecnico pratici:*

gli interventi dovranno richiedere un limitato uso di macchine operatrici (per non alterare la risistemazione del sito), essere poco costosi e favorire la vegetazione arbustivo-arborea, allo scopo di stabilizzare il fondo e le banchine in modo permanente.

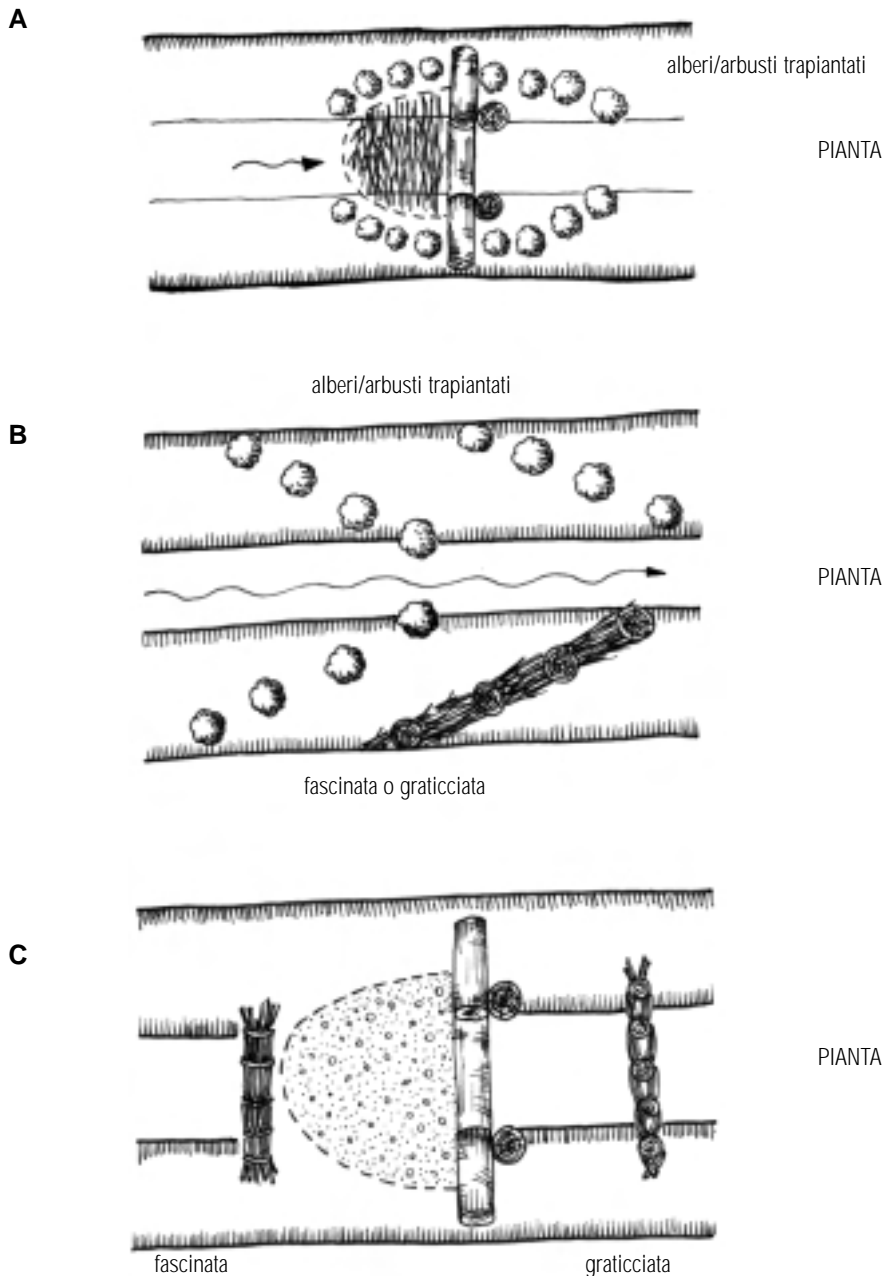


Fig. 4.3.13. Interventi di lungo periodo per la stabilizzazione della rete di scolo: A) rinforzo delle briglie; B) rinforzo delle banchine; C) rinforzo del fondo.

Realizzazione

Nel lungo periodo devono essere previste diverse tipologie di intervento che stabilizzino la rete.

Rinforzo delle briglie

Attraverso l'utilizzo di talee e piante radicate di specie arbustive ed arboree ben adatte a questi ambiti si possono consolidare le brigliette sia a monte, nella zona di deposito dei sedimenti, che a valle, in corrispondenza della briglia e della platea (Fig. 4.3.13 a). La posizione stabile e la funzione di consolidamento richiesta permettono anche l'utilizzo di specie arboree.

Rinforzo delle banchine

Sempre utilizzando talee o piantine radicate di specie adatte è possibile realizzare delle fasce arbustate lungo le banchine, disposte nella direzione della corrente con una funzione di consolidamento delle sponde e di indirizzamento del moto dell'acqua eventualmente associandole a fascinate o graticciate (Fig. 4.3.13 b). Sono da preferire arbusti ed alberi di piccole dimensioni, con capacità di consolidamento (*Salix*, *Alnus*, *Euonymus*, ecc.). L'impianto può essere realizzato su più file parallele, formando sempre un angolo rispetto alla direzione della corrente.

Foto 4.3.16. Sottoscavo in una briglia in
tondame a causa
dell'eccessiva distanza tra
le barriere.



Rinforzo del fondo del canale

Il fondo del canale può essere consolidato attraverso l'uso di fascinate o graticciate, utilizzando talee e ramaglia di specie igrofile quali i salici (Fig. 4.3.13 c). Lo sviluppo del sistema radicale di queste piante ha come obiettivo la realizzazione di piccole soglie vive, sempre in crescita e con capacità autoriparanti, lungo il fondo dell'affossatura, realizzando così una rete di salti di fondo vivi che sostituiscono in toto od in parte le briglie che nel lungo periodo si disgregheranno. A questa soluzione è sempre meglio associare anche soglie e brigliette in sasso che non hanno problemi di degradazione.

Rinforzo delle aree di rispetto

Anche l'area di raccordo eventualmente predisposta attorno alla rete di ordine superiore dovrà essere interessata da interventi di stabilizzazione mirati: si dovranno inserire lungo linee convergenti la direzione del deflusso fasce di vegetazione, preferibilmente arborea, a densità elevate; ciò aumenterà la stabilità dell'area e limiterà l'affermazione e la crescita di un piano arbustivo, che interferisce maggiormente con il deflusso rallentandolo.

Costruzione di briglie "vive"

Utilizzando ramaglia viva è possibile costruire anche delle briglie vive per sezioni di dimensioni medio-piccole (Fig. 4.3.14). E' necessario innanzitutto modellare un trat-

to della sezione della rete; poi si piantano dei picchetti, di almeno 10 cm di diametro, ad una distanza di 50 cm l'uno dall'altro, per i 2/3 della loro lunghezza. Attorno a questi vanno posizionate delle lunghe branche vive di salici, ontani o pioppi, in corrispondenza delle biforcazioni dei rami (con la sezione di taglio rivolta a monte); queste saranno accumulate a formare uno strato molto spesso che, con l'uso di pali disposti in traverso e legati ai picchetti infissi, verrà fortemente compresso e conformato a forma di "V", per concentrare il flusso al centro dell'affossatura. La ramaglia deve essere posizionata disponendo le branche più lunghe sul fondo e via via utilizzando branche sempre più corte. La lunghezza di questa deve essere almeno 1.5-2 volte l'altezza della barriera dopo la compressione. A monte, in corrispondenza dei monconi delle branche tagliate, deve essere posizionata della lettiera, della paglia o della canna a cui si appoggerà del terreno (o materiale di scavo), che andrà anch'esso compattato con attenzione. Può essere utile posizionare uno strato di lettiera, canna o paglia sul fondo dell'affossatura, prima di posizionare le branche, con lo scopo di limitare i possibili sottoscavi e le infiltrazioni localizzate. E' una tecnica efficace, ma richiede una grande quantità di materiale vivo ed una certa manutenzione nei primi anni, per limitare eventuali sottoscavi o cedimenti localizzati.

Soluzione integrata

Gli interventi descritti in precedenza non si escludono a vicenda: devono essere tutti associati e coordinati, al fine di realizzare una soluzione integrata che permetta di

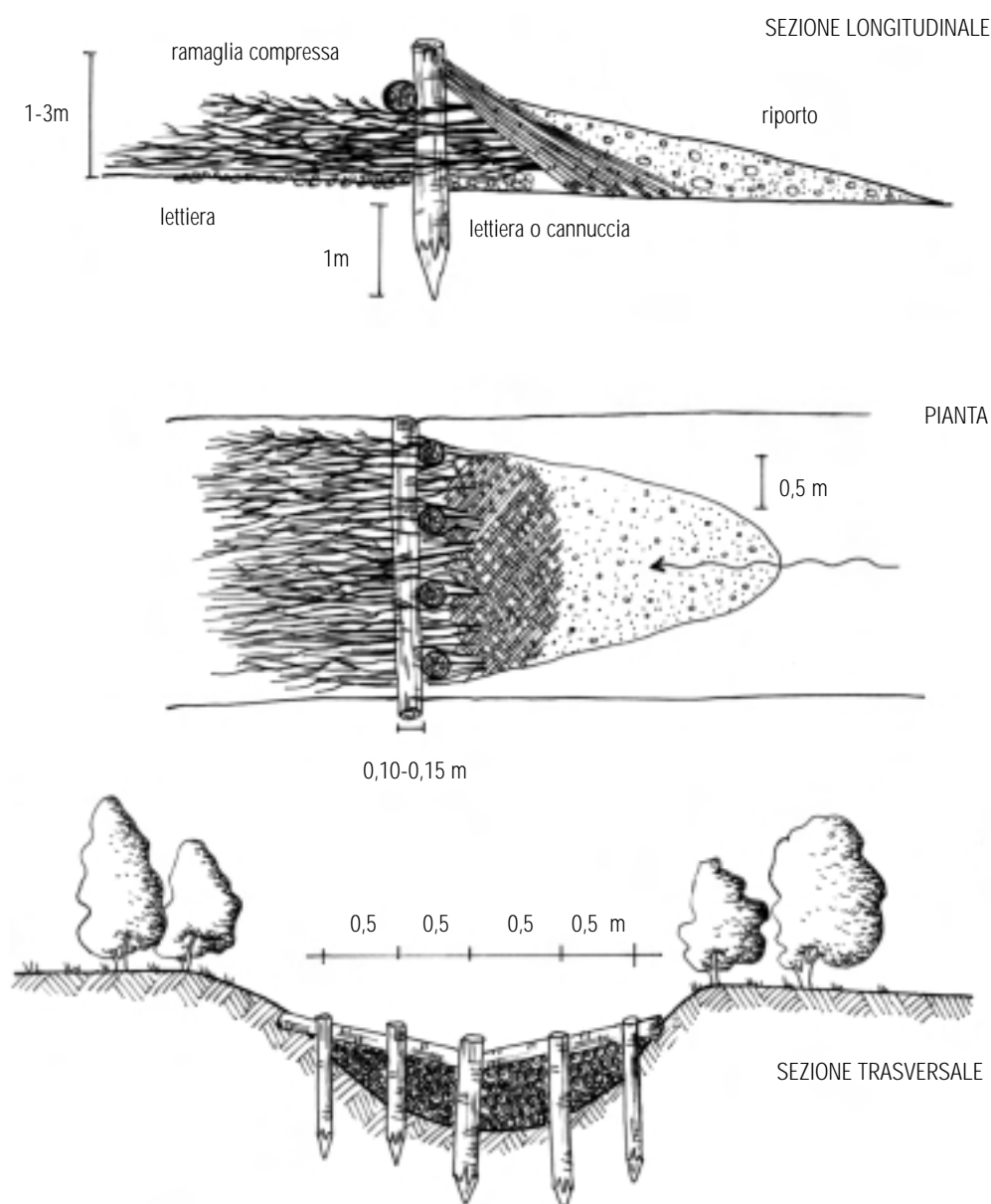


Fig.4.3.14. Schema tipo di briglia "viva"
(Grey e Leiser, 1982).

raggiungere e mantenere nel tempo la stabilità prevista. Tutti gli interventi possono essere realizzati in una fase immediatamente successiva alla costruzione della rete. Stabilizzato il sistema di scolo con manufatti inerti è già possibile intervenire con sistemi naturali di rinforzo e salvaguardia, in modo da dare alla vegetazione il tempo e le condizioni di stabilità, necessari per un suo adeguato sviluppo. In questa fase è anche possibile eseguire interventi di manutenzione (recupero fallanze, diradamenti, potature, ceduzioni, ecc.) che indirizzino la vegetazione verso gli obiettivi previsti. La presenza fin dai primi anni della vegetazione consente inoltre di recuperare eventuali cedimenti che possono avvenire nel sistema di briglie; ciò potrebbe verificarsi a causa di errori di progettazione, realizzazione o di eventi eccezionali, aumentando quindi l'elasticità e l'adattabilità della rete, rispetto ad eventuali modificazioni dei parametri idraulici (cambi di pendenza, modifica della scabrezza, ecc.).

Canalette prefabbricate

In particolari condizioni (presenza di strati permeabili, di elevate pendenze, o di frane in movimento) può essere necessario ricorrere a manufatti di raccolta ed allontanamento delle acque in eccesso, diversi dalle tradizionali affossature. Questi manufatti, in genere prefabbricati, sono realizzati in ferro zincato o calcestruzzo. Le canalette in ferro sono disponibili in forme e dimensioni diverse: quelle semicircolari (comunemente corrugate trasversalmente) in genere sono utilizzate per allontanare grosse portate, in forti pendenze; invece le sezioni a forma trapezoidale (cunette, corrugate longitudinalmente) vengono usate anche per raccogliere il deflusso superficiale o allontanare piccole portate. In entrambi i casi sono elementi che vengono posizionati ad embrice e legati tra loro con bulloni e dadi. Gli elementi di piccole dimensioni possono essere fissati al suolo con picchetti o traverse, mentre quelli più grossi richiedono delle soglie in calcestruzzo. La loro efficacia è comunque funzione dell'uso e del posizionamento in campo. Le sezioni semicircolari non possono essere usate per raccogliere i deflussi superficiali diffusi: la forma della sezione fa sì che nel giro di poco tempo il deflusso si infiltri al di sotto del bordo della lamiera, rendendole del tutto inutili a questa funzione. Particolare attenzione deve poi

Foto 4.3.17. Canaletta in acciaio zincato utilizzata nella risistemazione di un pendio sabbioso, in presenza di fenomeni franosi e di suffosione.

Foto 4.3.18. Canaletta in acciaio zincato a sezione semicircolare: l'acqua di scorrimento superficiale non entra nella sezione ma defluisce parallelamente ed inferiormente erodendo.



essere posta nella realizzazione del manufatto iniziale, dove l'acqua, già raccolta, si immette nella canaletta. Anche gli assestamenti dei siti creano dei problemi causa i movimenti e le tensioni che possono causare in queste strutture, e vanno contrastati realizzando soglie fisse. Nel caso dei prefabbricati in calcestruzzo esistono elementi di forme e dimensioni diverse. Di solito sono usati prefabbricati di piccole dimensioni, a forma trapezoidale, disposti ad embrice e trattenuti in sito dal loro peso. Essendo piccoli, si adattano meglio a situazioni orografiche complesse o ad eventuali assestamenti, ma richiedono un controllo maggiore, in quanto possono muoversi, interrompendo il flusso controllato generando erosione.

4.3.3.2 REGIMAZIONE PROFONDA

Il controllo delle acque profonde può essere realizzato attraverso opere di drenaggio sotterraneo. A tale riguardo è necessario prestare molta attenzione alla particolare condizione in cui si trovano i substrati ricostruiti e/o riposizionati, tipici delle aree estrattive ripristinate. Tutti i rimaneggiamenti a cui questi substrati sono stati sottoposti comportano una forte alterazione nella struttura pedologica. Questo crea due fenomeni contrastanti: da un parte vi è la mobilizzazione di grandi quantità di particelle fini che possono rapidamente intasare tutte le strutture drenanti profonde; dall'altra la forte fessurazione e gli ampi vuoti creati dai movimenti di terra causano la formazione di vani e condotte sotterranee preferenziali, tali da favorire, in una prima fase, dei moti ipogei molto veloci, con riflessi anche sui picchi di piena dei bacini scolanti (Haigh, 2000). Questo fenomeno con il tempo, tende a stabilizzarsi, sia per l'assestamento del materiale che per il progressivo intasamento di molte di queste vie preferenziali. E' perciò necessario porre molta attenzione sia alla scelta di strutture drenanti ipogee sia al loro dimensionamento, in quanto un loro eventuale intasamento o cedimento può causare problemi di stabilità meccanica all'area ripristinata. A seconda della morfologia e del tipo di falda presenti si possono perciò avere problematiche diverse.

Controllo delle acque sotterranee esterne

In piano

Il sistema di scolo può essere a cielo aperto o, più comunemente, di tipo interrato. La posizione e la profondità della rete sono funzione della stratigrafia locale e vanno valutate caso per caso. E' perciò preferibile realizzare questo sistema drenante in contemporanea con la risistemazione morfologica, quando sono in atto grossi movimenti del substrato: questo permette di operare in condizioni ottimali, limitando i problemi tecnici, di sicurezza e, nel contempo, i costi. In genere questi arrivi vanno intercettati nella loro interezza e quindi assume una grande importanza la valutazione della portata e della stagionalità della falda, specie in presenza di portate significative. Può essere necessario drenare dei piani orizzontali che intercettano arrivi freatici provenienti dal basso. La portata da drenare (q o portata specifica) dipende dalle caratteristiche della falda. Per definire l'interasse tra i dreni si può fare ricorso alle formule sviluppate per un regime permanente da Hoogoudt:

$$L^2 = \frac{8 K_2 d \Delta h + 4 K_1 \Delta h^2}{q}$$

dove:

L = interasse tra i dreni (m);

q = portata specifica (m/g);

K_1 = coefficiente di permeabilità dello strato sovrastante il piano dei dreni (moto orizzontale) (m/g);

K_2 = coefficiente di permeabilità dello strato sottostante il piano dei dreni (moto radiale) (m/g);

Δh = dislivello tra il piano dei dreni ed il punto più elevato della falda all'equilibrio (m);

d = spessore dello strato equivalente (m) che si ricava dalle formule:

$$d = \frac{L}{8(W_o + W_r)}$$

con

$$W_o = \frac{(L - 1.4 D)^2}{8 D L} \quad W_r = \frac{1}{\pi} \ln \frac{0.7 D}{r}$$

dove:

D = distanza dei dreni dallo strato impermeabile (m);

r = raggio dei dreni (m);

o in modo veloce ma approssimativo: $d = \frac{0.4 L}{\ln \frac{L}{\pi r}}$ con $D > 1/4 L$.

La formula di Hoogoudt si può adattare a diverse situazioni stratigrafiche:

- con un unico strato omogeneo: $K = K_1 = K_2$;
- con due strati distinti a diversa permeabilità ma con il piano dei dreni che coincide con il limite degli strati: si hanno due valori distinti di permeabilità: K_1 per lo strato superiore e K_2 per lo strato inferiore;
- con due strati distinti a diversa permeabilità ma con il livello dei dreni posto al di sotto del limite degli strati: $K_1 = 0$, $K_2 > 0$;
- con due strati distinti con diversa permeabilità ma con il livello dei dreni posto al di sopra del limite degli strati. Qui la formula di Hoogoudt non è più applicabile ed è preferibile ricorrere a quella di Ernst:

$$\Delta h = q \frac{D_1}{K_1} + \frac{q L^2}{8 K_2 D_2} + a L W_r$$

dove:

D_1 = spessore della falda superiore al piano dei dreni (m);

D_2 = spessore della falda posta inferiormente al piano dei dreni fino allo strato impermeabile (m);

W_r = flusso radiale, si ricava dall'abaco (Fig. 4.3.15).

Stabilito il valore di L è possibile definire la portata di emungimento con la formula:

$$q_{tot} = q L_d L$$

dove:

q_{tot} = portata massima al termine del dreno (m^3);

q = portata specifica (m/g);

L_d = lunghezza totale del dreno (m);

L = interasse tra i dreni (m).

Tab.4.3.20. Valori indicativi dei coefficienti di permeabilità K (m/g) (Chown, 1964).

Materiale	Permeabilità	K
Ghiaia pulita	molto grande	$K > 10^3$
Sabbia pulita, Miscela sabbie - ghiaia pulita	grande	$10^3 < K < 1$
Sabbia fine, Limo, Miscela sabbia - argilla, Argille moreniche	media	$1 < K < 10^{-4}$
Argille non alterate	molto bassa	$K < 10^{-4}$

In pendio

L'arrivo di falde di acque esterne in aree di pendio pone problemi di stabilità alla massa, per l'aumento di peso degli strati. E' necessario intervenire per intercettare ed abbassare il livello della falda. La portata da drenare è stimata dalle formule:

$$q_i = K_j H \tan(\alpha) \quad q_u = K_u H \tan(\beta) \quad q_d = q_i - q_u$$

dove:

q_{dr} = portata drenata per unità di lunghezza e di tempo ($m^3/m g$ o m^2/g);

q_i = portata a monte del dreno ($m^3/m g$);

q_u = portata a valle del dreno ($m^3/m \text{ g}$);
 H = altezza falda a monte (m);
 h = altezza falda a valle (m);
 K = conducibilità idrica sopra e sotto il dreno (m/g);
 α = angolo di inclinazione dello strato impermeabile sopra il dreno;
 β = angolo di inclinazione dello strato impermeabile sotto il dreno;
 $h = D_0$ = altezza del dreno rispetto alla strato impermeabile (m);
 se la resistenza radiale del flusso ipogeo è bassa.
 L'altezza dell'acqua nel dreno si può ricavare dalla formula:

$$H - h = \frac{q_u}{q_i} H \text{ (m)}$$

Da questi valori è possibile definire dimensioni e caratteristiche dello scolo drenante.

Controllo delle acque sotterranee locali

Eventi meteorici intensi possono infiltrarsi nel terreno e formare degli accumuli ipogei in prossimità di strati impermeabili. Questa condizione può essere pericolosa per la stabilità o per la vegetazione quando l'innalzamento della falda raggiunge una altezza che approssima lo spessore dello strato permeabile. Per ovviare a ciò è necessario drenare questa acqua infiltrata.

In piano

Sul piano il dimensionamento del drenaggio deve far riferimento alle formule del regime variabile come ad esempio le formule di Dumm. In presenza di uno strato omogeneo attraversato dal piano dei dreni si utilizza la formula:

$$L^2 = \frac{\pi^2 K D t}{\mu \ln(1.17 \frac{h_0}{h_t})}$$

dove:

L = interasse dei dreni (m);
 K = coefficiente di permeabilità (m/g);
 h_0 = altezza della falda al tempo 0 (m);
 h_t = altezza della falda al tempo t (m);
 t = tempo necessario per passare da h_0 ad h_t (g);
 μ = Capacità idrica massima - Capacità idrica di campo (%);

$D = D_0 \frac{h_0 + h_t}{4}$ altezza di riferimento della falda (m);

D_0 = spessore della falda al di sotto dei dreni fino allo strato impermeabile (m).

Se risulta vera la relazione:

$$D \ln\left(\frac{D_0}{2r + b}\right) < 0.4L$$

allora è necessario introdurre un fattore di correzione, per cui:

$$L_c = L - D \ln\left(\frac{D_0}{2r + b}\right)$$

dove:

$2r + b = C$ = contorno bagnato del dreno, con base della trincea (b) e del raggio del dreno (r) comprensivo di eventuale rivestimento.

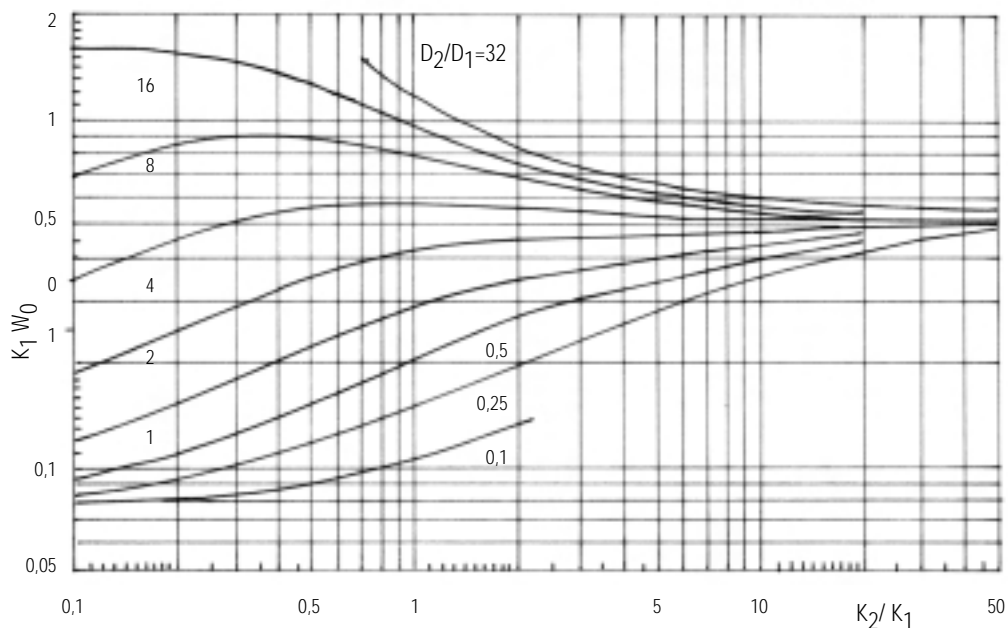
Nel caso di dreni poggianti su di uno strato impermeabile si utilizza la formula:

$$L^2 = \frac{4.5 K h_0 h_t t}{\mu(h_0 - h_t)}$$

La portata massima di progetto, che defluisce al tempo 0 dalla sezione satura dei dreni si calcola in questo caso dalla formula:

$$q = \frac{2\pi K h_0 \left(D_0 + \frac{h_0}{2} \right)}{L^2}$$

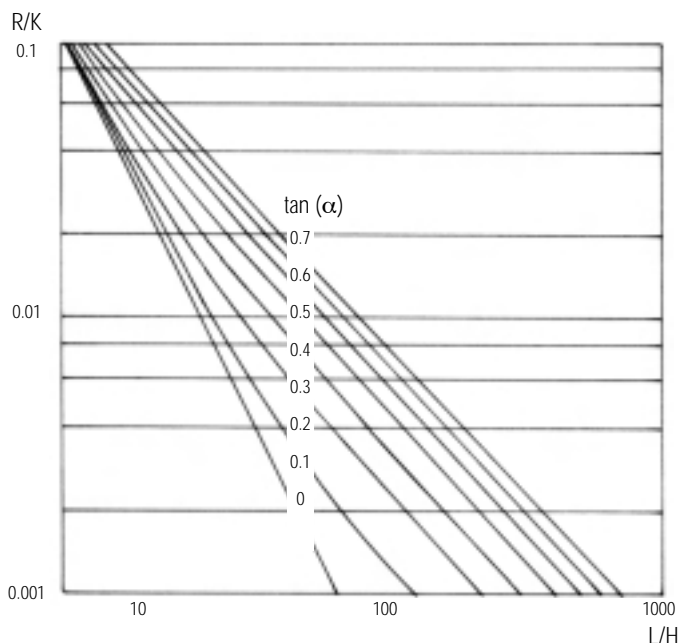
Fig.4.3.15. Abaco per il calcolo della resistenza radiale W_r .



In pendio

Per dimensionare questo drenaggio si può far riferimento al diagramma di Schmid e Luthin (1964) dove in funzione della pendenza ($\tan(\alpha)$) e del rapporto tra R velocità di ricarica da pioggia per unità di superficie (m/giorno) e K (coeff. di permeabilità (m/giorno)) è possibile ricavare l'interasse tra i dreni in rapporto all'altezza massima della falda (L/H) (Fig. 4.3.16). In genere le condizioni operative non sono così ben definite. Alle volte gli eventi meteorici, anche i più intensi, non raggiungono mai valori critici o all'opposto la presenza di sistemi a cielo aperto, realizzati nel riporto superficiale sottile, opera un drenaggio sufficiente anche per le acque ipogee. Quello che spesso avviene, invece, è il concentrarsi di questo flusso ipogeo in corrispondenza di cambi di pendenza (pedate di gradoni), o di conducibilità (passaggi di macchi-

Fig.4.3.16. Relazione tra L/H e R/K (dopo Schmid e Luthin, 1964).



ne) o di spessore. In questi casi si ha un locale innalzamento di questa falda, con un aumento del carico e il manifestarsi di possibili cedimenti che si concentrano nella parte bassa della scarpata. Una sistemazione morfologica che privilegi lunghe scarpate favorisce la concentrazione di grosse quantità di acqua che, pur essendo locali si accumulano e vanno drenate come fossero arrivi esterni.

Calcolo dei parametri idraulici

Partendo dai valori di interasse e di portata si possono calcolare tutti gli altri parametri della rete idraulica, definendo la pendenza e le dimensioni del dreno che permettano il deflusso previsto. A tale riguardo si può utilizzare la formula di Manning per tubi di plastica corrugati:

$$v = 71 R^{2/3} J^{1/2}$$

dove:

v = velocità del deflusso (m/s);

R = raggio idraulico;

J = pendenza del dreno (deve funzionare a pelo libero).

La velocità del deflusso dovrà comunque essere elevata (sempre > 0.20 m/s) per evitare la sedimentazione delle particelle di sabbia fine e limo.

Realizzazione

La rete drenante profonda assume, in certe situazioni morfologiche, una importanza decisiva specie per la sicurezza e la stabilità. E' perciò fondamentale, visti i costi e le difficoltà operative per rimediare ad eventuali problemi, predisporre un sistema efficiente, stabile e nel possibile, di facile manutenzione. La tipologia dei sistemi drenanti profondi risulta essere molto ampia in funzione dei caratteri morfologici presenti (profondità, estensione) che dei materiali costruttivi utilizzati (Fig. 4.3.17).

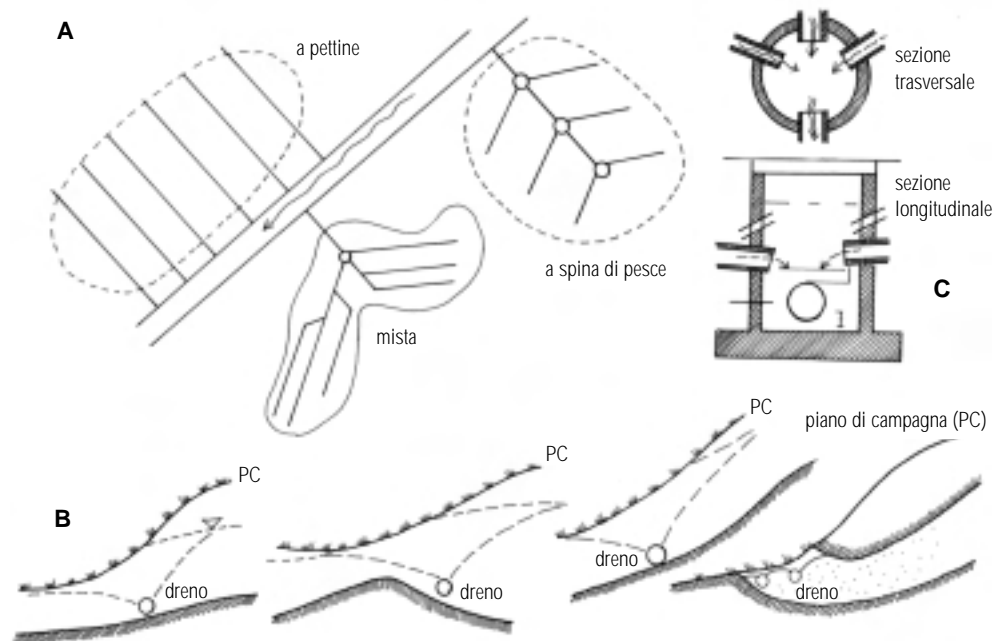


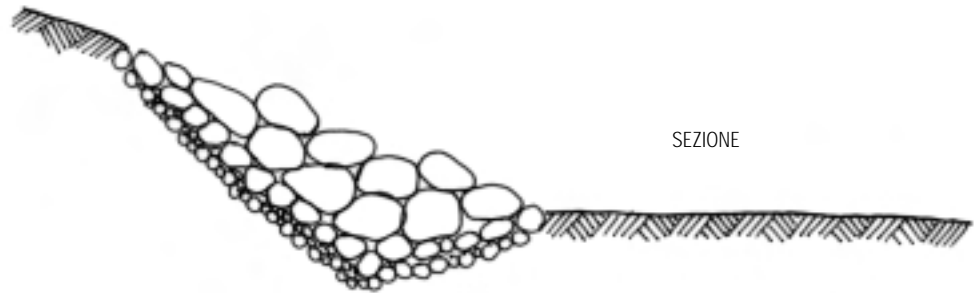
Fig.4.3.17. Drenaggio tubolare: A) disposizione planimetrica della rete sotterranea; B) venuta a giorno di una falda; sezioni tipo; C) pozzetto di raccordo ed ispezione: particolari costruttivi.

Cunei filtranti

Sono accumuli di materiale grossolano e sciolto, permeabile, riportati al piede di pendii con lo scopo di favorire un rapido allontanamento delle acque infiltrate in profondità, per evitare la saturazione ed il conseguente facile scivolamento della massa impregnata al piede della scarpata (Fig. 4.3.18). In genere si opera un preventivo scavo raccordato con il profilo esistente, per allontanare materiale poco permeabile. Questo volume viene poi riempito con materiale grossolano e permeabile, corredandone la base con un sistema di allontanamento controllato delle acque filtrate (dreno,

fossa drenante). In condizioni di stabilità limitata si associa al materiale drenante una struttura di sostegno, variamente posizionata (muretto verticale, inclinato ecc.).

Fig.4.3.18. Cuneo filtrante.



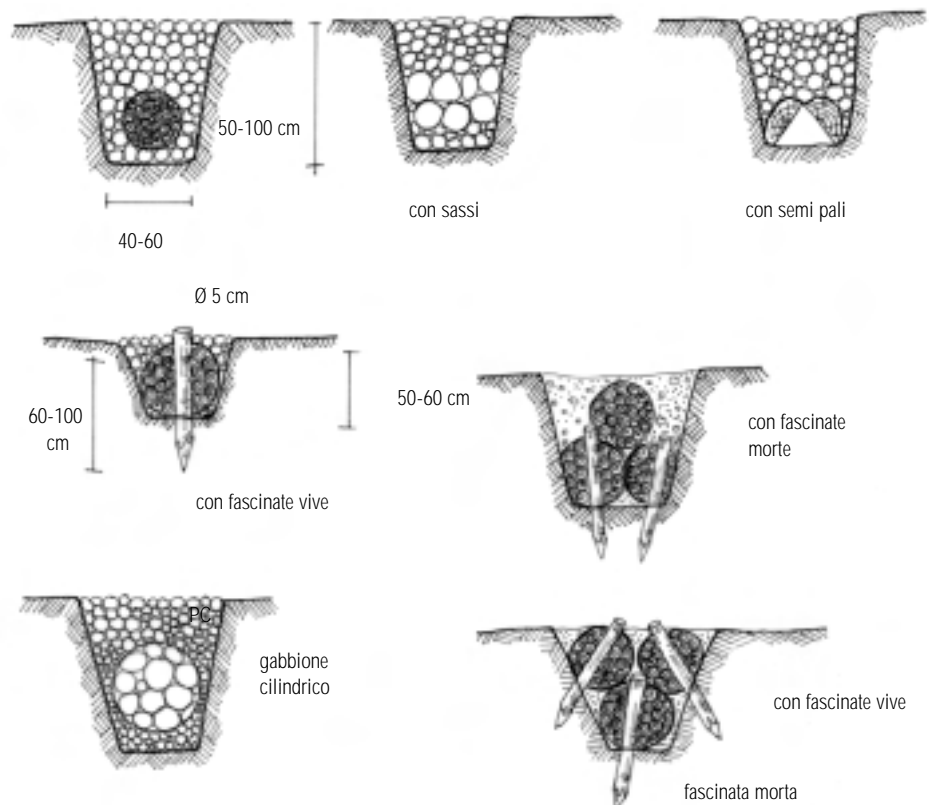
Fosse drenanti

Sono delle affossature di 50-100 cm di profondità e 40-60 cm di ampiezza riempite con materiale ghiaioso drenante, che vengono realizzate per la raccolta delle acque sotterranee ma anche per la raccolta delle acque di scorrimento superficiale (Fig. 4.3.19). Le tipologie costruttive sono molto diversificate. Nelle fosse drenanti più profonde si realizza uno scavo, dotato di una pendenza minima del 2%, sul fondo del quale si può posizionare un sistema di scolo realizzato con:

- fascinate di materiale secco;
- gabbionate cilindriche con sassi;
- pali, semipali e/o tavole;
- massi di grosse dimensioni, posizionati alla rinfusa.

Questi diversi cunicoli vengono ricoperti con sassi grossolani e poi con materiale drenante più fine come pietrisco o ghiaia. Nelle fosse più superficiali (50-60 cm) lo scavo può essere riempito con fascine di materiale vegetale, vivo e con capacità di radicazione, aventi un diametro di 20-40 cm, fissate con picchetti (lunghi 60 cm e del diametro di 5 cm) e quasi interamente ricoperte di terreno. Le fascine possono anche essere affiancate, per riempire scavi più larghi, od essere sovrapposte. In questo caso le fascine più interrate sono realizzate con materiale vegetale secco. In genere queste fosse sono posizionate lungo direttrici principali e sono caratterizzate da una forte pendenza.

Fig.4.3.19. Tipologia di fosse drenanti.



TERRENO	L
Argilloso	6 - 12
Argilloso - Medio impasto	8 - 15
Argilloso - Limoso, Limoso	7 - 14
Medio impasto	10 - 20
Sabbioso - Limoso	10 - 20
Sabbioso - Medio impasto	16 - 30
Sabbioso	20 - 40

Tab.4.3.21. Valori indicativi della distanza tra i dreni, in funzione del substrato (m) (dreni ad una profondità di 80 - 100 cm).

Drenaggio tubolare

E' il sistema drenante più comune. Si posiziona un tubo fessurato ad una profondità compresa tra i 50 ed i 150 cm all'interno di una trincea drenante riempita con ghiaia (8-15 mm) e pietrisco (30-70 mm) puliti e dotata di una pendenza superiore al 2-3% (Fig. 4.3.20). In ambiti collinari è spesso difficile ricorrere ad una meccanizzazione completa utilizzando macchine posadreni. Questo fa sì che nella posa delle reti tubolari si ricorra a:

- scavo della trincea fino a raggiungere la quota stabilita o lo strato impermeabile, incidendolo per 25-30 cm;
- posizionamento del geotessuto lungo il fondo e le pareti della trincea (opzionale);
- predisposizione di uno strato uniforme di ghiaia pulita, per uno spessore di 10-30 cm;
- stesa del tubo drenante fessurato;
- copertura del tubo fessurato con ghiaia pulita in uno strato uniforme di 20-30 cm;
- sistemazione del geotessuto sopra la ghiaia sovrapponendo i due lembi laterali o aggiungendo un elemento di tessuto apposito (opzionale);
- chiusura della trincea.

Di questa tecnica esistono molte varianti. Non sempre è possibile portare la ghiaia lungo il dreno: tradizionalmente nel bolognese si sostituiva il pietrisco con mezzi pali

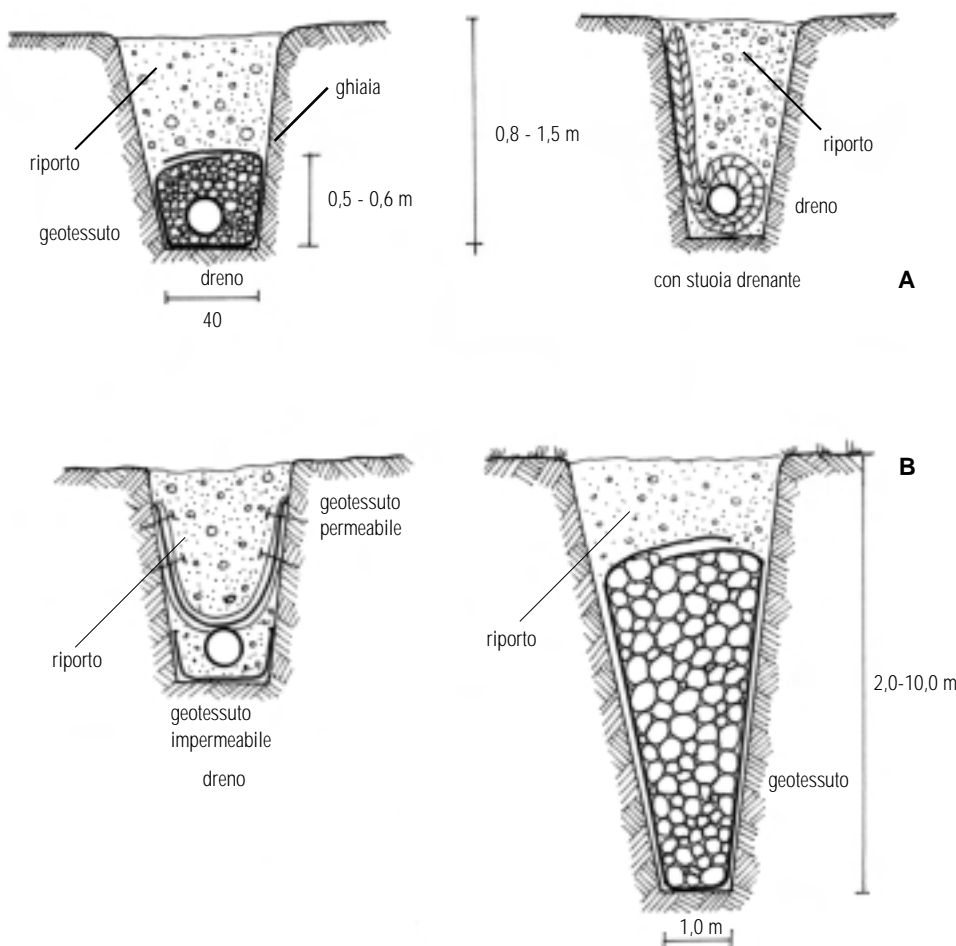


Fig.4.3.20. Tipologia di drenaggi tubolari (A): con geotessuto e ghiaia; con stuoie drenante, con fondo impermeabilizzato; e di trincee drenanti (B).

di castagno, opportunamente sistemati sopra il dreno. Oggi si può far ricorso a stuoie tridimensionali in materiale plastico (es. Pacdrain o Enkadrein) che si posizionano al di sopra ed intorno al dreno: sono tessuti leggeri, facilmente manipolabili e quindi adatti ad essere impiegati in condizioni disagiate. Oppure si riutilizza il terreno scavato, contenendolo sopra il dreno con fogli di geocompositi drenanti.

Anche per quanto riguarda i tubi esiste una vasta gamma di possibilità anche se ormai si ricorre quasi esclusivamente al pvc corrugato e fessurato (con diametri che in genere vanno da 5 a 20 cm) che è leggero, duraturo, resistente e disponibile in lunghe bobine. Lo stesso tubo può poi essere nudo o ricoperto di materiale filtrante. Esistono diversi tipi di materiale filtrante (geotessuti, fibre di polipropilene, fibra di cocco, ecc.) anche se negli ultimi anni si preferisce utilizzare tubi drenanti senza filtro diretto. E' infatti preferibile favorire il deposito dei sedimenti (sabbia fine e limo) entro il tubo, dove può essere più facilmente allontanato con interventi di manutenzione.

Particolare attenzione deve essere posta nella scelta delle caratteristiche del geotessuto da associare al dreno. Due sono i fattori da considerare:

- la ritenzione: al fine di limitare un'eccessiva rimozione delle particelle fini del substrato ed evitare la "perforazione" del filtro (Tab. 4.3.22);
- la permeabilità: al fine di limitare l'intasamento del filtro (Tab. 4.3.22).

La permeabilità del geotessile dovrà sempre essere molto elevata, specie nella fase di messa in opera, per evitare che eventuali successivi intasamenti non ne modifichino la funzione.

Tab.4.3.22. Criteri di ritenzione e permeabilità dei geotessili in flusso unidirezionale (Loudière et al. 1983 da Deppo et al., 1997).

A) RITENZIONE:

Geotessile	Terreno	Coeff. Uniformità del terreno	Criterio di ritenzione
Tessuto e non tessuto	incoerente	$U > 4$	$Of < D_{95}$
Tessuto e non tessuto	incoerente	$U < 4$	$Of < 0.8 \cdot D_{50}$
Tessuto e non tessuto	coesivo	$U > 4$	$Of < D_{85}$ $Of \Rightarrow 50 \mu$
Tessuto e non tessuto	coesivo	$U < 4$	$Of < D_{50}$ $Of \Rightarrow 50 \mu$

[D = diametro delle particelle del terreno (m); $U = D_{60}/D_{10}$ del substrato;
Of = diametro di filtrazione del geotessile (10^{-6} m)]

B) PERMEABILITÀ:

$$K_g > 10^2 K$$

[K_g = permeabilità verticale del geotessile (m/s); K = permeabilità del terreno (m/s)]

Per limitare i rischi di intasamento di un dreno è possibile concentrarsi sulla granulometria del materasso ghiaioso per adattarlo alle caratteristiche del substrato circostante evitando in questo modo l'uso di geotessili. L'U.S. Bureau of Reclamation ha proposto per il materiale ghiaioso attorno al tubo l'uso di materiale a granulometria diversificata che soddisfi le seguenti condizioni:

a) **METODO SEMPLIFICATO**: in cui deve essere verificata la relazione:

- con substrato uniforme: $\frac{D_{50} \text{ filtro}}{D_{50} \text{ substrato}} = 5 - 20$

- con substrato misto: $\frac{D_{50} \text{ filtro}}{D_{50} \text{ substrato}} = 12 - 58$

dove:

D_x = diametro alla percentuale X nel diagramma granulometrico;

b) *METODO ANALITICO*: in cui devono essere verificate 4 diverse condizioni:

$$- \frac{D_{15 \text{ filtro}}}{D_{15 \text{ substrato}}} \geq 5 \quad 5 < \frac{D_{15 \text{ filtro}}}{D_{15 \text{ substrato}}} < 40$$

$$- \frac{D_{15 \text{ filtro}}}{D_{85 \text{ substrato}}} \leq 5$$

$$- \frac{D_{85 \text{ filtro}}}{\text{Massima apertura dreno substrato}} \geq 2$$

- la distribuzione particelle del filtro deve essere parallela a quella del materiale base oppure:

$$\frac{D_{60 \text{ filtro}}}{D_{10 \text{ filtro}}} \leq 20$$

Le scelte progettuali devono comunque tenere presente la necessità di mantenere una elevata efficacia idraulica per un lunghissimo periodo di tempo, limitando al massimo gli interventi di manutenzione. A tale riguardo è preferibile adottare una struttura semplice (tratte uniche, senza diramazioni) per consentire periodici interventi di manutenzione. Importante è avere sempre una pendenza costante ed elevata (> 2-3%), evitando anse e depressioni, per limitare i depositi di materiale entro il tubo. Alle volte si preferisce non posizionare il geotessuto attorno allo scavo limitandosi a posizionarlo solo sopra del materasso ghiaioso perché, nel lungo periodo, aumentano i rischi di intasamento del tessuto con limitazioni nel funzionamento del dreno. La realizzazione del dreno partirà sempre dal collettore e proseguirà verso l'alto in modo tale da permettere fin da subito lo sgrondo dell'acqua raccolta. Elemento da curare con attenzione è lo sbocco nel collettore: bisogna evitare scavi ed erosioni localizzate all'uscita del dreno, predisponendo manufatti di protezione (massi, briglie, ecc.).

Trincee drenanti

Le trincee drenanti sono trincee fonde da 2 a 5-6 m ed oltre, larghe circa 100 cm, riempite di materiale grossolano (ghiaia, massi, pietrisco) che può essere raccolto nelle vicinanze o ancor meglio acquistato, ripulito dal limo, presso un frantoio (Fig. 4.3.20B). La trincea, dotata di una pendenza di fondo elevata (>2-3%), può essere riempita quasi interamente (2/3 dell'altezza) con il materiale drenante su cui si predispose uno strato di ghiaia di dimensioni più contenute (2-3 cm di diametro), seguito tradizionalmente da uno strato filtrante di ramaglia fresca, o paglia o canna, ricoperto di terreno sino al piano di campagna. In questo caso il materiale grossolano funge sia da vespaiatura che da cunicolo per l'allontanamento dell'acqua.

Le trincee drenanti più profonde si differenziano in quanto la vespaiatura grossolana può riempire solo parte della profondità dello scavo, in funzione della stratificazione. Per aumentare la velocità di allontanamento dell'acqua drenata delle varianti prevedono la creazione di un cunicolo inferiore attraverso massi piatti opportunamente sistemati, fascine di ramaglia o canna, stanghe o semi-pali di legno, gabbioni o tubi (comunemente in pvc o in pe-hd, eventualmente doppi, per aumentarne la resistenza meccanica). Un problema di questo sistema è rappresentato dalla diversità nei materiali e nella loro messa in opera, elementi che causano una grande variabilità nei parametri idraulici. Per migliorare la durata nel tempo delle trincee si riveste lo scavo e/o il materiale drenante con geotessuto. In presenza di scavi molto profondi si preferisce posizionare il geotessuto solo sopra la vespaiatura, anche per limitare i pericoli per gli operatori ed evitare un eventuale puntellatura dello scavo. E' comunque indispensabi-

le mantenere sempre separate le acque superficiali da quelle profonde: ognuna di esse deve avere un suo sistema di allontanamento indipendente. Infatti le acque superficiali presentano un elevato trasporto solido che nel tempo intaserebbe il dreno profondo. Alle volte si inserisce uno strato di polietilene sul fondo della trincea, quando questa interseca strati permeabili, per evitare divagazioni incontrollate dell'acqua raccolta. Sono state sviluppate anche nuove soluzioni per questi tipi di dreni: sono stati realizzati dei dreni prefabbricati (come ad esempio i dreni in polistirolo e geotessuto contenuti entro gabbionate in filo metallico zincato), di facile manipolazione e posizionamento, che consentono un'elevata produttività del cantiere, limitando al massimo i problemi di sicurezza dello scavo.

In tutti i casi queste trincee sono strutture costose, sia per lo scavo che per i materiali richiesti, nonché molto impegnative da un punto di vista realizzativo, sia per la pericolosità dello scavo che per l'organizzazione del cantiere: il loro utilizzo va quindi considerato solo in condizioni particolari, tipicamente nel controllo di abbondanti acque profonde o di grandi movimenti di massa.

4.3.3.3 SISTEMAZIONE DI BACINI

La progettazione e la realizzazione di bacini con accumulo di acqua (temporanei o permanenti), situati entro aree estrattive, presenta problematiche differenziate, in relazione alla morfologia, alla destinazione ed al tipo di approvvigionamento finale previsto. In particolare questi bacini possono avere diverse funzioni:

- *bonifica*: per accumulare e smaltire le acque di scolo della rete di bonifica dell'area di scavo e/o di aree limitrofe; è tipica delle situazioni di pianura, dove lo scavo porta alla formazione di depressioni in cui viene a mancare il carico idraulico necessario allo scolo;
- *irrigua*: per accumulare e poi redistribuire, a scopi irrigui e/o produttivi, il volume d'acqua accumulato; tipico in aree agricole o produttive, in prossimità di fiumi o canali, che fungono da fonti di approvvigionamento;
- *idraulica*: per accumulare e successivamente restituire, laminato, un certo volume d'acqua durante le piene dei corsi di acqua naturali e/o artificiali (casse di espansione); è una destinazione che sta diffondendosi nella pianura ad integrazione di opere idrauliche di salvaguardia ed è sempre in fregio a corsi d'acqua od a canali;
- *ricreativa*: per permettere tutta una serie di attività ludiche legate all'acqua, dalla pesca, al nuoto, dal canottaggio, alla vela, ecc;
- *naturalistica*: per ricreare delle zone umide destinate alla flora ed alla fauna spontanee;
- *mista*: nel caso di funzioni plurime, tra quelle sopra specificate.

Utilizzando invece come criterio di classificazione la fonte di approvvigionamento è possibile classificare i bacini in diverse categorie:

- *a fonte ipogea*: che sfruttano la presenza di falde, ricavandone l'acqua necessaria, tipici di ambiti di pianura; in genere per queste fonti si impone un'analisi approfondita della relazione tra bacino e falda circostante. Una destinazione ed un uso scorretto del bacino possono infatti creare problemi di alterazione e/o inquinamento, che si possono ripercuotere rapidamente alla falda circostante. Attenzione deve essere posta alla presenza di eventuali pozzi ad uso potabile che rappresentano un vincolo molto restrittivo;
- *a fonte epigea*: a sua volta suddivisa in:
 - naturale: che si approvvigiona dalla rete superficiale naturale;
 - artificiale: che si approvvigiona da canali di bonifica o di irrigazione.

Per entrambe queste situazioni il problema principale è rappresentato dalla qualità dell'acqua, che molte volte risulta esser non adatta agli scopi prefissati.

In genere i bacini, in aree di cava, sono ricavati nelle depressioni, residuo dell'attivi-

tà estrattiva. Nel prosieguo si farà riferimento a questa situazione, mentre nel caso di progettazione e realizzazione *ex novo* di laghetti è necessario fare riferimento a testi specifici circa la realizzazione di dighe in terra.

Per ognuna delle funzioni individuate è necessario definire e risolvere differenti problematiche progettuali.

Bacini con funzione di bonifica (Fig. 4.3.21 a)

Gli elementi progettuali principali da considerare risultano essere:

a) Volume di acqua da smaltire

Per determinare i volumi di acqua da smaltire è necessario, innanzitutto, avere a disposizione dati meteorologici di lungo periodo della zona, per conoscere la pluviometria media, ed anche la massima.

Partendo da questo dato si può applicare la formula:

$$Q = 10 k h A$$

dove:

Q = afflusso medio annuo (m³);

k = coefficiente di deflusso: rapporto tra volume medio annuale defluito in un sezione ed il volume medio annuo di pioggia caduto in un intervallo di tempo prolungato (comunque superiore a t_p + t_c);

h = altezza media annua di pioggia (mm);

A = superficie del bacino (ha).

SITO	DEFLUSSO MEDIO ANNUO
Grande bonifica ferrarese	0.326
Comprensori padani	0.30 - 0.40
Bacino del Po	0.60
Bacino del Garda	0.733
Bacino del Piave	0.80
Bacino del Reno	0.39
Bacino dell'Ofanto	0.24
Bacino del Bradano	0.20

Tab. 4.3.23. Coefficienti di deflusso medio annuo in diversi bacini idrografici italiani.

Il valore che si ottiene è indicativo: su piccole superfici come quelle da noi considerate, la piovosità media risulta essere un dato molto impreciso (specie in assenza di una stazione pluviometrica in loco), ed inoltre non si hanno le compensazioni tipiche dei grandi bacini imbriferi. Il coefficiente di deflusso è poi un parametro influenzato da molti fattori locali ed in genere si ricava più da osservazioni dirette che non da tabelle, e comunque sempre per bacini imbriferi di dimensioni molto superiori a quelle qui considerate. Il calcolo può anche essere eseguito per intervalli di tempo inferiori all'anno, come il mese od il trimestre, il che consente una maggiore precisione (Tab. 4.3.24).

La formula diviene allora:
$$Q = \sum_i^n 10 k_i h_i A$$

con n = intervallo di tempo prescelto.

dove:

Q = afflusso medio annuo (m³);

k_i = coefficiente di deflusso del periodo i considerato;

h_i = altezza media di pioggia del periodo i considerato (mm);

A = superficie del bacino (ha);

n = intervallo di tempo prescelto in cui è suddiviso l'anno.

In certe situazioni, il volume può invece essere calcolato partendo dalla condizione di piovosità massima riscontrata nel periodo di osservazione: è una condizione di sicurezza che impedisce eventuali tracimazioni e sommersioni.

Tab.4.3.24. Coefficienti di deflusso medi annui e mensili in diversi bacini idrografici regionali (Ufficio Idrografico e Mareografico di Bologna, Annali idrografici).

SITO	ANNUO	MESI DELL'ANNO											
		G	F	M	A	M	G	L	A	S	O	N	D
Grande bonifica ferrarese	0.33	0.62	0.70	0.56	0.38	0.34	0.14	0.11	0.11	0.18	0.46	0.54	0.62
Po a Piacenza (42030 km ² , -, impermeabile, 1924-1970)	0.62	0.80	0.72	0.72	0.51	0.65	0.78	0.70	0.45	0.50	0.52	0.60	0.74
Po a Borretto (55183 km ² , -, impermeabile, 1942-1970)	0.59	0.83	0.65	0.82	0.55	0.61	0.64	0.55	0.39	0.46	0.51	0.58	0.74
Po a Pontelagoscuro (Fe) (70091 km ² , -, impermeabile, 1932-1970)	0.60	0.78	0.74	0.71	0.52	0.60	0.67	0.61	0.42	0.45	0.52	0.58	0.74
Reno a Molino del pallone (89 km ² , 951 m slm, impermeabile, 1951-1970)	0.70	0.90	0.84	1.00	0.89	0.83	0.61	0.39	0.23	0.25	0.42	0.67	0.76
Reno a Casalecchio (1051 km ² , 639 m slm, impermeabile, 1921-1970)	0.58	0.79	0.81	0.99	0.73	0.54	0.40	0.30	0.19	0.17	0.30	0.54	0.70
Reno a Bastia (3410 km ² , 324 m slm, impermeabile, 1929-1970)	0.39	0.63	0.58	0.76	0.51	0.34	0.26	0.11	0.08	0.14	0.19	0.31	0.49
Samoggia a Calcara (170 km ² , 375 m slm, impermeabile, 1959-1970)	0.38	0.74	0.68	0.84	0.63	0.27	0.19	0.04	0.02	0.05	0.21	0.35	0.50
Quaderna a Palesio (21.9 km ² , 216 m slm, impermeabile, 1949-1970)	0.44	0.78	0.79	0.80	0.64	0.42	0.29	0.08	0.08	0.13	0.19	0.32	0.55
Limentra a Stagno (66.3 km ² , 911 m slm, impermeabile, 1948-1970)	0.72	1.02	0.95	1.11	0.83	0.72	0.59	0.39	0.23	0.22	0.40	0.66	0.84
Ronco a Meldola (442 km ² , 569 m slm, permeabile 3%, 1926-1970)	0.53	0.81	0.96	0.93	0.67	0.44	0.33	0.18	0.10	0.10	0.26	0.46	0.68
Savio a S.Vittore (597 km ² , 525 m slm, permeabile al 3%, 1937-1970)	0.49	0.71	0.91	0.95	0.62	0.45	0.32	0.15	0.10	0.11	0.20	0.39	0.60
Secchia a P.Bacchello (1291 km ² , 606 m slm, permeabile al 19%, 1923-1970)	0.47	0.60	0.60	0.89	0.76	0.59	0.32	0.12	0.07	0.10	0.23	0.46	0.54
Tor Scodogna (Taro) a Casemare (10.8 km ² , 270 m lsm, impermeabile, 1965-1970)	0.40	0.93	0.83	0.61	0.33	0.25	0.45	0.06	0.04	0.05	0.12	0.41	0.65
Parma a Ponte Bottego (618 km ² , 650 m slm, permeabile 3%, 1956-1970)	0.35	0.51	0.49	0.59	0.60	0.29	0.16	0.0	0.0	0.07	0.19	0.34	0.52

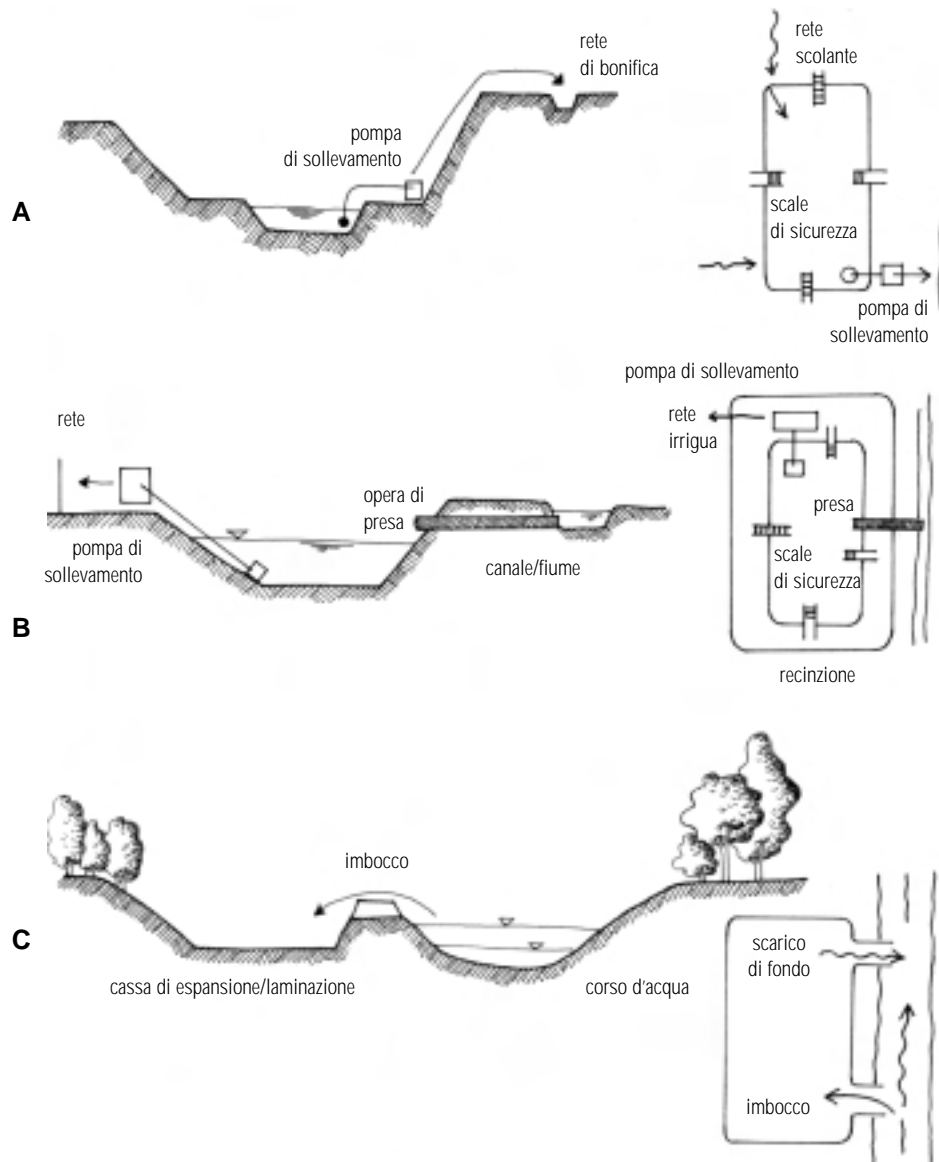
b) Dimensioni e forme del bacino

Conosciuto il volume da contenere è necessario definire forma e dimensioni del bacino. Non si hanno esigenze funzionali particolari da soddisfare, se non il volume di accumulo e il rispetto di un franco di sicurezza e/o coltivazione (Tab. 4.3.25), che permetta lo sviluppo degli apparati radicali: quindi si può ricorrere ad una forma regolare, dove per limitare la superficie interessata si può lavorare sulla profondità, stante la giacitura ottenuta dalla sistemazione ed il sistema di allontanamento delle acque. La profondità deve essere adeguata alle necessità di pescaggio della eventuale pompa di sollevamento.

Tab.4.3.25. Profondità media di falda ottimale in funzione del terreno e della coltura (cm).

TERRENO	COLTURA			
	ERBACEA	ORTICOLA	PRATIVA	ARBOREA
Compatto	80 - 90	50 - 60	70 - 80	100 - 120
Medio impasto	70 - 80	40 - 50	60 - 80	100 - 120
Leggero	60 - 70	40	50 - 70	80 - 100

Fig. 4.3.21. Tipologia di bacini permanenti con diverse destinazioni:
 A) per la bonifica di terreni limitrofi;
 B) per uso irriguo;
 C) per uso idraulico (casse di espansione).



c) Permeabilità dell'invaso

La qualità dell'acqua di raccolta, specie in aree agricole o produttive, non sempre risulta essere elevata: si accumulano prodotti di sintesi e concimi che possono alterare eventuali falde limitrofe. E' conveniente quindi ricorrere ad una adeguata impermeabilizzazione del bacino o sfruttare eventuali lenti di argilla presenti. Si può utilizzare dell'argilla, a formare uno strato di almeno 50 cm oppure ricorrere a bentonite ($4-5 \text{ kg/m}^2$) mescolata con il substrato presente, rullata ed umidificata.

d) Modalità e tempi di svuotamento dei volumi accumulati

Il volume accumulato deve essere allontanato. Si può pensare ad uno svuotamento meccanico, utilizzando quindi il bacino come sistema di accumulo disaccoppiato dalla rete di bonifica generale, attraverso una apposita pompa che fornisca il carico per sollevare l'acqua fino al piano di campagna originario. Le caratteristiche della pompa e dell'impianto annesso dipendono molto dal progetto: si può prevedere un ampio bacino, sufficiente per un accumulo prolungato e quindi utilizzare una pompa di dimensioni contenute o, all'opposto, si può progettare un bacino di limitate dimensioni, dotato di un impianto di sollevamento di maggior potenza, magari automatizzato, per allontanare velocemente il volume raccolto. Bisogna porre molta attenzione a variazioni troppo veloci nella quota del pelo libero del bacino che possono dare luogo a smottamenti nel materiale di sponda saturo, nonché variare troppo bruscamente le condizioni di vita di piante ed animali.

Un'altra possibilità può prevedere un allontanamento del tutto naturale dell'acqua di scolo, sfruttando l'evaporazione o la traspirazione delle piante, evitando così tutti i costi relativi al sistema di pompaggio. Questo richiede però un'attenta analisi del bilancio idrologico: la profondità del bacino sarà certamente più contenuta e maggiori saranno le superfici interessate al bacino ed alla zona umida. In ogni caso va valutato con attenzione il mantenimento di un franco di sicurezza dalla falda, sufficiente alle piante e alle colture presenti nell'area scolante, definendo con attenzione i tempi di sommersione massimi che il sistema può mantenere nella fase di svuotamento.

Tab.4.3.26. Giorni di sommersione massimi in funzione del tipo di colture (giorni).

TIPO DI COLTURE	GIORNI DI SOMMERSIONE
Colture orticole	1
Colture in pieno campo e colture arboree delicate	2
Praterie e colture arboree resistenti	9

e) *Inserimento ambientale*

Il bacino, viste anche le profondità, deve innanzitutto avere un sistema di protezione (recinzione) che eviti intrusioni. Inoltre dovrà essere predisposto un sistema di accesso protetto all'acqua (scaletta) in caso di incidenti o cadute. Attorno ad esso è anche possibile creare una barriera vegetale, arbustivo-arborea, per ricreare una condizione più naturale, favorendo anche un certo consolidamento delle sponde del bacino. In presenza di uno smaltimento per evaporazione si può pensare alla formazione di una zona umida, a sommersione parziale, dove insediare la vegetazione igrofila ed idrofita differenziata, in base alle diverse esigenze delle piante che la costituiscono.

Bacini con funzione irrigua (Fig. 4.3.21 b)

Gli elementi progettuali principali da considerare risultano essere:

a) *Volume di invaso*

Parametro che nasce dal confronto tra le esigenze produttive, le dimensioni dell'invaso disponibile, l'entità dell'approvvigionamento e il bilancio idrologico.

b) *Dimensioni e forme del bacino*

Le dimensioni del bacino sono diretta conseguenza dell'attività estrattiva e delle esigenze definite nel punto precedente. Essendo solo un accumulo di acqua non si hanno particolari necessità e quindi la forma da adottare risente solo delle esigenze tecnico-economiche che privilegiano scelte geometriche e regolari. Anche le pendenze delle sponde sono legate principalmente a problemi di stabilità (1:1.5 - 1:2). I volumi richiesti in genere comportano una elevata profondità che associata alla presenza di sponde ripide, limita i problemi di gestione della vegetazione ripariale.

c) *Qualità dell'acqua*

La qualità dell'acqua è un fattore determinante, specie in presenza di un riuso agricolo (Tab. 4.3.28). Questa è funzione del tipo di approvvigionamento prescelto: fonti superficiali, in genere, creano problemi maggiori, vista la presenza di inquinanti nelle acque. Per mantenere quindi un buon livello di qualità dell'acqua è necessario definire con precisione modi e tempi di approvvigionamento. Anche i problemi legati all'eutrofizzazione del bacino risultano essere contenuti, visto il continuo riciclo del volume d'acqua e dell'elevata profondità della massa idrica, che favorisce una buona stratificazione. Lo svuotamento dell'invaso può però rompere questa stratificazione, rimettendo in circolo lo strato ipolimnico, con il suo carico

di nutrienti e conseguente fioritura algale che può interferire con i sistemi di irrigazione. Ricorrendo a fonti naturali di superficie deve essere considerato con attenzione anche il problema del trasporto solido. Il progetto deve perciò prevedere anche le modalità di gestione e manutenzione periodica dell'invaso.

d) Modalità e tempi di riempimento e di svuotamento

I tempi di riempimento sono legati alla fonte di approvvigionamento. La disponibilità di una portata cospicua limita il periodo all'inverno-primavera, in presenza di deflussi sufficienti sia nelle reti di bonifica che nei fiumi. L'esigenza di salvaguardare la qualità dell'acqua (inquinanti e trasporto solido) riduce ancora di più i momenti ideali di approvvigionamento: bisogna evitare le onde di piena (eccesso di trasporto solido) ed i periodi di magra (eccesso di concentrazione degli inquinanti), privilegiando le code di piena. Lo svuotamento invece è funzione del tipo di utilizzo previsto.

Elemento da considerare nella progettazione è rappresentato dalla velocità di abbassamento del pelo libero del bacino, al fine di evitare smottamenti delle rive. E' comunque necessario progettare le strutture e gli impianti necessari al funzionamento del bacino (opere di presa, impianti di sollevamento, sfioramento) ed alla sicurezza degli operatori (scalette, baluardi ecc.).

e) Riduzione delle perdite

Essendo il bacino solo un accumulo temporaneo è molto importante prevenire e limitare tutte le possibili perdite. Accanto alle perdite di evaporazione che possono essere stimate dalla relazione:

$$P_e = S_i * E_a$$

dove:

P_e = perdite per evaporazione (m^3);

S_i = superficie dell'invaso (m^2);

E_a = altezza di evaporazione (m): ricavabile dalla formula:

$$E_a = 90 T$$

dove:

T = temperatura media del periodo considerato ($^{\circ}C$);

ed essere contenute attraverso la limitazione della superficie del pelo libero dell'invaso, è necessario anche prevedere degli interventi che riducano l'entità della percolazione. Oltre che rappresentare una perdita nella disponibilità, la percolazione ha anche ripercussioni ambientali in quanto la massa d'acqua può filtrare in falda, esponendo quest'ultima a possibili problemi di inquinamento. Per ovviare a questi si deve perciò impermeabilizzare l'invaso per rendere l'infiltrazione trascurabile. Anche in questo caso si può ricorrere all'argilla per formare uno strato impermeabile di spessore compreso tra 50 e 100 cm. In presenza di rapidi svuotamenti dell'invaso si possono avere fenomeni di distacco di questo strato, causa sovrappressioni nelle sponde, così come si possono avere fessurazioni legate all'essiccazione della superficie argillose. Per limitare o evitare ciò è necessario integrare lo strato argilloso con una coltre di ghiaia e sassi per uno spessore di circa 50-60 cm. Per la soluzione di questi problemi è necessario far riferimento a testi ingegneristici specifici.

f) Inserimento ambientale

Il bacino, viste anche le profondità adottate, deve innanzitutto avere una barriera di protezione (recinzione) che eviti intrusioni ed incidenti, associata ad un sistema di scalette di sicurezza per favorire la facile uscita dall'acqua. Attorno ad esso è anche possibile creare una barriera vegetale arbustivo-arborea con funzione di mascheramento e di rinaturalizzazione almeno per una certa superficie attorno all'invaso, favorendo nel contempo il consolidamento delle sponde del bacino.

Bacini con funzione idraulica (Fig. 4.3.21 c)

Gli elementi progettuali principali da risolvere risultano essere:

a) Volumi e quote necessari

Il volume e le quote necessari al funzionamento della cassa di espansione derivano da analisi idrologiche ed idrauliche specifiche che esulano dalla finalità del manuale; rappresentano un dato di riferimento per la progettazione sia dell'attività di scavo che della risistemazione.

b) Dimensioni e forme del bacino

Le dimensioni della cassa sono innanzitutto funzione dei volumi da contenere. Non vi sono particolari vincoli rispetto alla forma, stante la necessità di favorire un facile ingresso ed un altrettanto facile deflusso della massa accumulata.

c) Vie di ingresso ed uscita delle piene

Per la operatività del bacino è fondamentale predisporre e gestire in modo corretto le vie di ingresso e di uscita delle acque. Essendo un ambito caratterizzato da una rapida evoluzione della vegetazione la corretta progettazione e manutenzione di questi percorsi consente il mantenimento della funzionalità della cassa nel tempo.

d) Tempi di riempimento e svuotamento

E' necessario conoscere con precisione innanzitutto i tempi di ritorno (o di funzionamento) della cassa e stabilire sia i tempi di riempimento, che di sommersione e di deflusso, al fine di valutare la possibilità di creare degli ambiti fluviali e/o lacustri ad uso plurimo, dove accanto alla funzione idraulica si possano associare altre funzioni, da quella produttiva a quella naturalistica.

e) Inserimento ambientale

Il bacino, viste anche le profondità adottate deve innanzitutto avere una barriera di protezione (recinzione) che eviti intrusioni ed incidenti. Attorno ad esso è anche possibile creare una barriera vegetale arbustivo-arborea con funzione di mascheramento e di rinaturalizzazione.

Un bacino di laminazione può avere usi plurimi, in funzione dei tempi di ritorno definiti. Zone ad inondazione molto frequente possono essere destinate solo a funzioni naturalistiche (zone umide), mentre aree a sommersione limitata possono avere altre destinazioni, quali quella produttiva (agricoltura, arboricoltura da legno) o naturalistica differenziata (boschi igrofilo) o paesaggistica (parchi), il tutto senza alterare la funzionalità idraulica. Questa differenziazione nei tempi di ritorno può essere raggiunta già a livello di progetto, predisponendo delle aree a quote altimetriche differenziate. E' comunque necessario predisporre già da subito un piano di gestione di tutte le diverse attività presenti nella cassa di espansione, al fine di armonizzare gli interventi di manutenzione. In un'area con finalità idraulico-naturalistiche, ad esempio, sarà necessario organizzare gli interventi di ripulitura delle sponde dalla vegetazione e ripristino delle quote in funzione delle esigenze dell'oasi naturale (periodi di nidificazione degli uccelli, fioriture, ecc.).

Programmando gli interventi solo in certi periodi dell'anno (fuori dai momenti riproduttivi) ed interessando solo parte delle superfici, si possono limitare i danni alla flora ed alla fauna, anche se ciò aumenterà la frequenza, la durata ed i costi degli interventi.

	BALNEAZIONE	PESCA		IRRIGAZIONE
		SALMONIDI	CIPRINIDI	
Colore	Assente			
pH	6-9	6-9	6-9	
Solidi Sospensione (mg/l)		25	25	
NH ₃ ⁺ (mg/l)		0.04	0.2	
NO ₂ ⁺ (mg/l di N)		0.01	0.03	
NO ₃ ⁺ (mg/l di N)				45-90
P totale ((mg/l)		0.2	0.4	
BOD ₅		3	6	
Conducibilità (mS)				750
O ₂ (% sat)		50>9 (mg/l) 100>7 (mg/l)	50>8 (mg/l) 100>5 (mg/l)	2 (mg/l)
Cl ⁻ (mg/l)				100-300
SO ₄ ⁻ (mg/l)				500-1000
Na ⁺ (mg/l)				
Ca ⁺⁺ (mg/l)				5000
Mg ⁺⁺ (mg/l)				1000
HCO ₃ ⁻ (mg/l)				75
Tensioattivi (mg/l)	0.5			
F ⁻ (mg/l)				1.2-6
Cu ⁺⁺ (mg/l)		0.04	0.04	0.1
Cr Tot (mg/l)				0.5-2
Zn ⁻ (mg/l)		3	1	0.5
Pb ⁺⁺ (mg/l)				0.2
B (mg/l)				2
SAR				10
Trasparenza (m)	1			
Oli minerali /mg/l)	0.5			
Fenoli (mg/l)	0.05			
Coliformi tot (MPN/100) 2000				2
Coliformi fecali (MPN/100)	100			
Streptococchi fecali (MPN/100)	100			
Salmonelle	0			

Bacini con funzione ricreativa (Fig. 4.3.22)

Gli elementi progettuali principali da affrontare sono:

a) Fruizione dell'invaso

E' innanzitutto necessario definire con precisione il tipo di fruizione a cui è destinato l'invaso: sono infatti diverse le esigenze da soddisfare a seconda se si predilige la pesca sportiva rispetto alla balneazione od alla nautica. Ognuno di queste destinazioni d'uso richiede condizioni e sistemazioni molto differenti, in particolare per quanto riguarda le dimensioni, la profondità, la forma e la qualità dell'acqua.

b) Dimensioni e forme del bacino

Pesca sportiva

Si preferiscono bacini medio piccoli (comunque > 2 ha), di profondità compresa tra i 2 ed i 5 m. Le rive devono essere principalmente di tipo piatto, di facile accesso, alternate a ripe ripide. Alcune zone di sponda devono essere attrezzate ad acque basse per favorire la biologia del popolamento ittico, e devono essere di difficile accesso e comunque conformate e rivegetate in modo naturale. Le zone di pesca

richiedono invece una sponda raccordata ed aperta, con pendenze limitate (1:3 - 1:5), anche per ragioni di sicurezza. In caso di sponde ripide è da prevedere la periodica presenza di accessi all'acqua facilitati (scalette).

Balneazione

In genere devono avere una superficie media (> 5 ha) ed una profondità media limitata (3 m) nelle zone di balneazione. Le sponde più adatte sono quelle di tipo piatto (1:10), per problemi di sicurezza. La forma da preferire è certamente raccordata, evitando insenature, per favorire un buon ricircolo dell'acqua. E' preferibile contenere la balneazione in una parte del perimetro del bacino (< 30%), mentre nella restante parte è possibile adottare sponde più inclinate, ma sempre aperte e appoggiate (1:2 - 1:3), eventualmente contornate da fasce di vegetazione, con funzione dissuasiva. Nelle zone non direttamente balneabili le profondità del bacino possono raggiungere valori molto più elevati, anche per limitare i problemi di qualità dell'acqua.

Nautica

I bacini adatti a questo uso sono quelli di grandi dimensioni (> 20 ha), con profondità elevate (> 5 m) e una conformazione delle sponde varia, ma sempre raccordata. Le sponde possono essere sia ripide che di tipo piatto, ma sempre ben accessibili ai natanti per ragioni di sicurezza.

c) Fonti di approvvigionamento e qualità dell'acqua

La scelta del tipo di fruizione è sempre funzione del tipo e dell'entità dell'approvvigionamento disponibile. Da questo infatti dipende la definizione delle portate e della qualità dell'acqua immessa. La balneazione ed anche la nautica richiedono una qualità dell'acqua molto elevata, mentre la pesca può accontentarsi di vincoli meno stringenti, anche se certe specie ittiche risultano essere molto esigenti (Tab. 4.3.27-28). Questo comporta la necessità di ricorrere a fonti di approvvigionamento pulite. L'altro problema riguarda la variazione del livello del pelo libero: devono essere previste delle opere che evitino un eccessivo innalzamento (sfioratori) così come è da evitare un eccessivo abbassamento del livello durante il periodo estivo: solo un limitato abbassamento può essere compatibile con le sistemazioni previste.

Tab.4.3.28. Classificazione delle acque in funzione dell'uso e del tipo di popolamento ittico.

CLASSE	CARATTERISTICHE	USO/POPOLAMENTO
CLASSE I	Clorofilla < 2 mg/m ³ Trasparenza 5 m	Uso ricreativo con popolamento ittico a salmonidi
CLASSE II	Clorofilla < 5 mg/m ³ Trasparenza 2-5 m	Uso ricreativo, non adatto ad un popolamento a salmonidi
CLASSE III	Clorofilla < 10 mg/m ³ Trasparenza 1-2,4 m	Scarso valore ricreativo, con popolamento di ciprinidi relativamente pregiati
CLASSE IV	Clorofilla > 10 mg/m ³ Trasparenza <1 m	Nessun valore ricreativo, con popolamento ittico poco pregiato

d) Limitazione delle perdite

Le perdite di acqua sono legate all'evaporazione ed alla percolazione profonda. Le prime vanno valutate con una certa attenzione in quanto sarà necessario prevederne la compensazione attraverso la fonte di approvvigionamento. Variazioni nella quota del pelo libero sono da limitare, per evitare lo sviluppo di vegetazione infestante e all'opposto evitare esondazioni ed eutrofizzazione dell'acqua. La percolazione va controllata attraverso l'impermeabilizzazione solo dove si hanno limitazioni nella portata di approvvigionamento.

e) Gestione della massa idrica

La massa d'acqua deve mantenere nel corso di tutto l'anno i caratteri di qualità previsti. E' assolutamente necessario gestire questa massa in modo tale da limitare le possibilità di eutrofizzazione dell'acqua: bisogna rimanere in condizioni di oligotrofia. In fase costruttiva vanno allontanate tutte le possibili fonti di sostanze fertilizzanti (in particolare il fosforo), rappresentate dal terreno e dagli arrivi di acqua da scoli superficiali. Questi ultimi vanno controllati con la costruzione di un fosso di guardia tutto intorno al bacino, che scarichi al di fuori dello stesso. Va controllato il livello del pelo libero dell'acqua, per evitare che nei periodi invernali si innalzi e lambisca le sponde con terreno, predisponendo opere idrauliche di sfioramento. Tutto il bacino deve essere realizzato con materiali minerali puliti. Viste le esigenze di trasparenza previste dalla normativa, tutte le zone accessibili devono essere realizzate in ghiaietto e sabbia grossa, per limitare il sollevamento del materiale fine del fondo. Eventuali approvvigionamenti superficiali possono essere fitodepurati in vasche di immissione, utilizzando la flora ad elofite.

E' necessario limitare la presenza di piante arboree direttamente lungo la sponda, in quanto fonte di materiale marcescente che cade nell'acqua (fogliame). Nel caso si prevedano impianti arborei lungo la sponda sono da preferire specie a lenta degradazione (salici, pioppi) e sono da evitare quelle a rapida mineralizzazione come gli ontani. E' certamente utile una periodica raccolta dello strato di fanghiglia sul fondo dei bacini, nei periodi di chiusura, o l'allontanamento di parte dello strato ipolimnico. Può essere utile una periodica raccolta di igrofite o elofite, per diminuire il potenziale biologico del lago. Ogni progetto deve quindi prevedere fin da subito un piano di gestione che individui le condizioni ottimali e tutti gli strumenti da mettere in opera per mantenere queste condizioni.

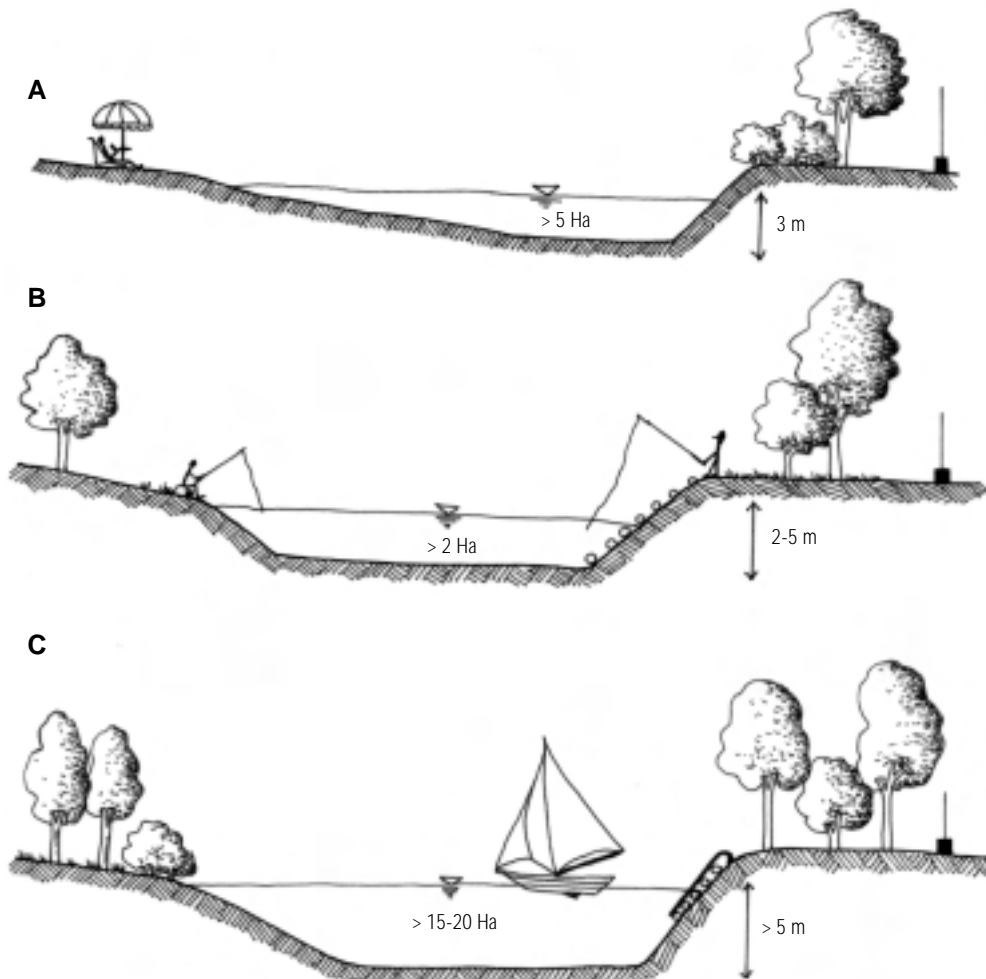
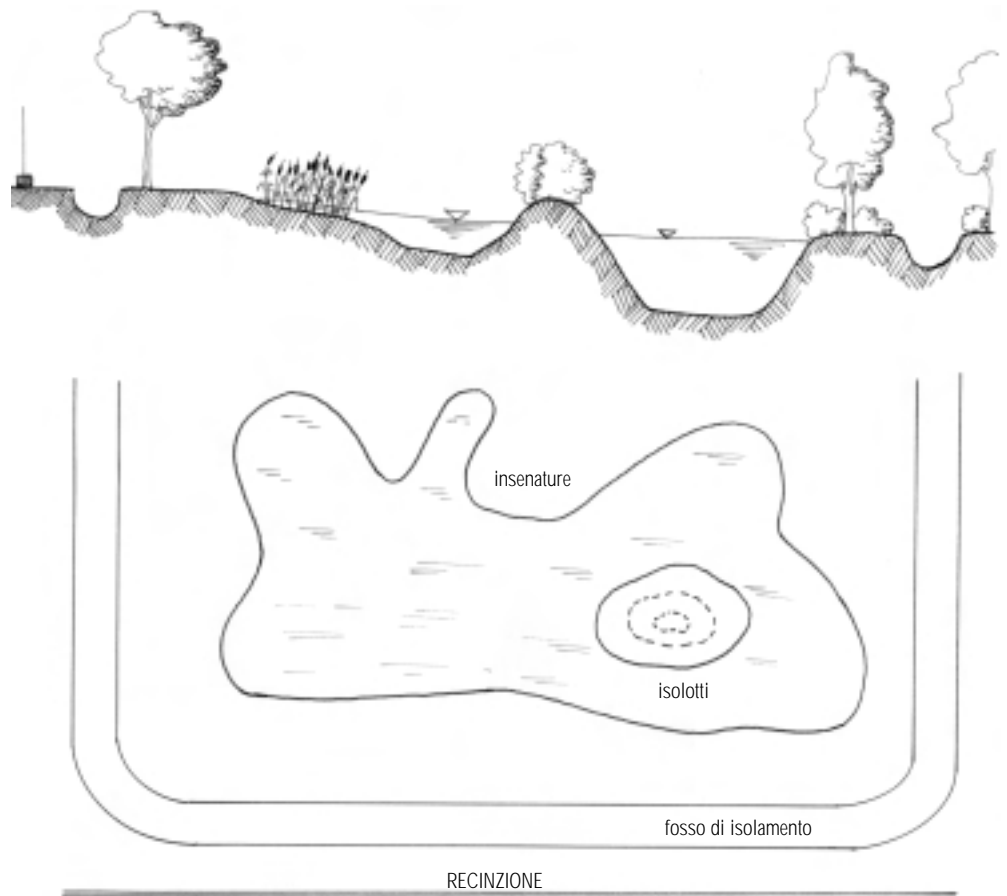


Fig.4.3.22. Tipologia di bacini ad uso ricreativo:
A) balneazione;
B) pesca sportiva;
C) nautica.

f) *Inserimento ambientale*

In ambiti ricreativi è fondamentale una progettazione paesaggistica di tutta l'area. Inoltre essendo richiesti degli standard qualitativi ed igienici molto elevati è importante prevedere un controllo attento degli accessi, al fine di evitare incidenti o scarichi abusivi, ed un sistema di recinzione perimetrale.

Fig.4.3.23. Tipologia di bacino ad uso naturalistico.



Bacini con funzione naturalistica (Fig. 4.3.23)

Gli elementi progettuali principali da risolvere risultano essere:

a) *Bilancio idrologico e fonti di approvvigionamento*

Come ogni bacino artificiale è necessario definirne il bilancio idrologico e la caratterizzazione delle fonti di approvvigionamento. Questo consente di valutare le periodiche oscillazioni del livello di acqua nonché ipotizzare il tipo di avifauna ospitabile in tali condizioni. Non avendo dei vincoli legislativi particolarmente restrittivi è possibile ricorrere alle diverse fonti di approvvigionamento, evitando solo i corpi idrici particolarmente inquinati. Scoli di bonifica od acque di fiume in genere non creano troppi problemi se non per il loro carico trofico. Esiste forse un problema nel rapporto con eventuali falde sotterranee in quanto il sistema naturale andrà certamente incontro ad una progressiva eutrofizzazione, con possibilità di inquinamento della falda sottostante. In questi casi è certamente da preferire una impermeabilizzazione del bacino, senza però i vincoli progettuali visti in precedenza: non si hanno problemi particolari di torbidità, né di svuotamenti o crepacciature e quindi l'impermeabilizzazione risulta essere meno onerosa. Un problema può nascere da fonti troppo ricche di sedimenti e di nutrienti. A parte una maggior attenzione ai momenti di derivazione (coda di laminazione ad esempio), è possibile realizzare, in associazione al bacino naturalistico, un bacino di sedimentazione e di fitodepurazione, dimensionato in funzione della portata derivata e dei tempi necessari alla sedimentazione ed alla depurazione. Questo piccolo bacino

dovrà essere periodicamente ripulito per mantenerne inalterate le sue funzioni. In ogni caso le variazioni del battente idraulico devono essere controllate, al fine di evitare modifiche agli ambiti ecologici di pertinenza delle singole specie; inoltre queste variazioni devono avvenire in modo molto graduale ed uniforme in tutta l'area, al fine di evitare moti turbolenti.

Dovranno perciò essere realizzate opere di immissione permanenti e stabili ed in ogni caso regolabili, al fine di variarne le caratteristiche in funzione delle esigenze ecologiche delle diverse specie vegetali ed animali (Fig. 4.3.24). Per favorire variazioni uniformi nei livelli idraulici è sempre preferibile realizzare una rete di canali profondi che interessi tutta la superficie allagata. Le opere di carico e scarico (chiaviche) dovranno essere sempre collegate direttamente a questa rete profonda, per favorire rapide modifiche, come nel caso di un prosciugamento del sito (per anossia, botulismo, controllo della flora). E' sempre necessario predisporre un sistema di svuotamento dell'invaso, sia a gravità che meccanico.

b) Dimensioni e forme dell'invaso

La dimensione è un elemento definito dalla disponibilità idrica nell'anno, in relazione al tipo di avifauna che si vuole insediare. Infatti diverse sono le dimensioni minime richieste in funzione del tipo di avifauna: 10 m² per insetti e invertebrati, 100 m² per anfibi e rettili, 2500 m² per i pesci e 10000 (50000) m² per gli uccelli. La profondità dell'acqua dovrà essere anch'essa varia, per ricreare ambienti diversi necessari alla alimentazione ed alla nidificazione delle diverse specie: in particolare si dovrà prevedere un'elevata porzione di superficie (fino al 50%) con una profondità contenuta (50 cm). E' necessario perciò prevedere: zone ad acque alte (> 1.5 m fino a 2-2.2 m) dove si insediano i laminati (es. ninfea o nannufero); zone ad acque basse (0.5-1.5 m) dove si insediano le elofite (es. tifa o canna di palude); zone a periodica sommersione (< 0.5 m) dove si insediano i macrocariceti (specie del genere *Carex*) e il bosco igrofilo (salici, pioppi, frassini). Le forme e le dimensioni di un bacino di questo tipo sono improntate alla massima variabilità. Molto importante poi è variare anche l'inclinazione delle rive: modificando infatti la pendenza si potranno favorire associazioni di flora e fauna specifiche.

E' necessario ricreare ambiti naturali differenziati in modo tale da permettere la creazione di condizioni utili all'insediamento ed allo sviluppo della flora e fauna spontanee e nel contempo creare condizioni che limitino la propagazione di specie troppo invadenti, come canne e tife (Fig. 4.3.25). In particolare si deve prevedere un 30 % a canneto, un 20% a vegetazione rada, un 30% a vegetazione erbaceo-arbustiva ed un 20% con aree scoscese. Le forme saranno quindi molto mosse e diversificate, con formazione di penisole ed anfratti. E' necessario prevedere anche zone ad inondazione periodica stagionale, ad acqua bassa, utili in particolare agli anfibi. La necessità di ricreare ambiti differenziati in spazi contenuti comporta anche il rimodellamento delle sponde, con la formazione di zone sopraelevate, dove insediare una vegetazione arborea mesofila. Se la superficie è molto ampia si può anche prevedere la costruzione di isolotti, distanti dalle rive e quindi difficilmente raggiungibili da parte di molti predatori (Fig. 4.3.26). A tale scopo si può ricorrere a dei gabbioni Reno per formare la base di appoggio dell'isolotto: attenzione alle variazioni di altezza del pelo libero dell'acqua per evitare emersioni o sommersioni eccessive. Possono essere utilizzate anche isole galleggianti, opportunamente ancorate al fondo, che sopportano bene variazioni del livello idrico dei bacini. Anche per le isole vale il discorso delle sponde diversificate e frastagliate. Per difendere l'avifauna dai predatori (ad esempio volpi) può essere utile realizzare zone a massima profondità lungo tutto il perimetro del sito: questo rappresenterà anche in periodi di magra o di secca una difesa permanente.

c) Inserimento ambientale

Essendo un'area a destinazione naturalistica è necessario limitare gli accessi sia per ragioni biologiche che legali. Si deve cercare di limitare l'accesso ad animali terrestri (cani, gatti ed anche l'uomo) con la costruzione di una recinzione a maglie strette ed adeguatamente interrata (40 cm) oppure, se lo spazio lo consente, associare anche un canale largo almeno 5-6 m e fondo 2-2.5 m. E' preferibile evitare la creazione di sentieri od altro, mentre risulta essere indispensabile progettare e rivestire tutta la zona circostante il bacino al fine di isolare e separare la zona naturalizzata dall'ambito circostante.

4.4 CONTROLLO DELL'EROSIONE E DEI MOVIMENTI DI MASSA SUPERFICIALI (E. Muzzi)

4.4.1 FINALITÀ

Insieme degli interventi necessari per stabilizzare le pendici, limitare i fenomeni erosivi, ridurre l'impatto visivo dell'attività estrattiva, attraverso un uso associato di materiali inerti e viventi.

4.4.2 QUADRO D'INSIEME

Come già evidenziato nel capitolo relativo agli interventi morfologici (cfr. Cap.1), esistono situazioni in cui il progettista deve intervenire su pendici caratterizzate da pendenze elevate, che richiedono interventi di difesa dall'erosione. A questo fine si possono utilizzare diversi metodi che possono essere raggruppati in tre diverse classi:

- a) metodi di stabilizzazione superficiale: che hanno lo scopo di limitare l'erosione superficiale, favorendo l'insediamento e lo sviluppo della copertura vegetale;
- b) metodi di stabilizzazione sottosuperficiale (o interrati): che hanno il compito di evitare il manifestarsi di eventi, quali slittamenti, colate, cedimenti e frane superficiali;
- c) metodi di stabilizzazione profonda: che hanno funzioni strutturali, investendo problematiche di tipo geotecnico.

Il progettista deve quindi individuare tutte le aree interessate da problemi di stabilità potenziale, definire e progettare, ove lo ritenga opportuno, le relative opere di contenimento. Buona regola, sarà comunque quella di limitare al massimo questi tipi di interventi, attraverso un'appropriata progettazione morfologica, al fine di minimizzare l'energia potenziale presente sulle scarpate e sui fronti di abbandono; questo anche in funzione delle difficoltà, sia tecniche che economiche, legate agli interventi di manutenzione e ricostruzione. Queste necessità limitano l'impiego di queste tecniche soprattutto ad ambiti fortemente antropizzati, a corredo di opere ed infrastrutture, dove esistono risorse per la gestione nel lungo periodo.

4.4.3 DETTAGLI

Il controllo dell'erosione si esercita con tecniche diverse, in relazione al tipo di fenomeni ed alla loro profondità.

4.4.3.1 METODI DI STABILIZZAZIONE SUPERFICIALE

Rappresentano un insieme di tecniche molto importanti per la rivegetazione, in quanto esercitano la loro azione nelle fasi iniziali dell'insediamento della copertura vegetale, quando la vegetazione è assente o è in fase di attecchimento: hanno quindi una funzione limitata nel tempo, venendo soppiantate con lo sviluppo della vegetazione. Senza un'adeguata e pronta copertura vegetale si possono infatti innescare fenomeni erosivi, che coinvolgerebbero il substrato, ma anche piante o semi: è necessario perciò adottare delle tecniche che favoriscano un rapido insediamento della vegetazione, al fine di ottenere un controllo diversificato e permanente dell'erosione.

Pacciamatura

Utilizzando materiali di diversa natura, organici e/o inorganici, è possibile realizzare uno strato superficiale con funzione antierosiva e/o agronomica (attraverso la modifica delle condizioni ambientali del substrato). In genere, si ricorre a materiale vegetale di diversa natura, normalmente scarti delle produzioni agricole o forestali: paglia

e fieno sono i materiali più diffusi, ma vi sono esempi di utilizzo di cippato di legno o di scorza d'albero o di altri sottoprodotti. Questo strato superficiale esercita un'azione antierosiva attraverso:

- la limitazione dell'azione battente dell'acqua piovana;
- l'aumento della permeabilità, dell'infiltrazione e dell'accumulo dell'acqua meteorica;
- l'aumento della scabrezza superficiale, con conseguente riduzione della velocità di scorrimento superficiale e la sedimentazione del trasporto solido;
- l'aumento della stabilità degli aggregati e della porosità, attraverso la trasformazione del materiale pacciamante in sostanza organica;
- l'aumento dell'attività biologica del terreno.

Materiali

Nelle condizioni ambientali del territorio emiliano-romagnolo si fa un uso quasi esclusivo di paglia di cereali vernini o di fieno. La discriminante tecnica nella scelta è data dalla pendenza: su superfici piane è da preferire la paglia, meno costosa e più persistente, mentre sulle pendici inclinate è da privilegiare il fieno, in quanto più lungo e più ruvido, con una maggior stabilità e resistenza all'azione combinata dell'acqua e della gravità. Le dosi di utilizzo sono in relazione alle altre funzioni che deve assolvere la pacciamatura. Dalle prove disponibili in letteratura si va dalle 2 t/ha alle 10 t/ha. Nei nostri climi si hanno due esigenze fondamentali: la difesa dagli eventi meteorici molto intensi e la difesa da un eccessivo irraggiamento ed essiccamento. Questo porta comunemente all'uso di dosi elevate di pacciamatura superficiale. In genere si considera una buona copertura pacciamante quando la superficie coperta uguaglia o supera il 70-75% (Morgan, 1986).

La pacciamatura si distribuisce normalmente a mano, anche se esistono diverse macchine pneumatiche che lanciano il materiale ad una distanza di 30 m o macchine idrauliche dove il cippato di legno, la paglia sminuzzata o la fibra di legno, associati a semi, fertilizzanti e leganti, vengono spruzzati sulla superficie da ricoprire (idropacciamatura). In ogni caso la pacciamatura rappresenta l'intervento di sistemazione finale, in quanto essa stessa limita le possibilità di accesso o ulteriori lavori come coltivazioni, scavi od altro.

Tab.4.4.1. Confronto tra diversi tipi di pacciamature (Johnson e Bradshaw, 1979).

	DOSE (t/ha)	PERSISTENZA (1-4)	STABILITÀ (1-4)	RITENZIONE (1-4)	EFFETTI NUTRIZIONALI (1-4)
Scarti legnosi	4	3	2	2	1
Cippato di legno	10	3	2	3	1
Scorza in pezzi	4	4	2	3	1
Torba	2	2	2	2	1
Stocchi di mais	10	4	2	2	1
Fieno	3	2	2	2	2
Paglia	3	3	2	2	1
Fibra di vetro	1	4	3	2	0

La durata di una pacciamatura risulta essere legata:

- alle caratteristiche dei diversi materiali che la compongono: residui con un rapporto C/N basso tendono a decomporsi più velocemente, mentre un C/N elevato favorisce una maggior persistenza. Le paglie durano nei nostri climi attorno ai 2-3 anni, mentre il fieno si degrada in 1-2 anni al massimo;
- alla modalità di applicazione: i materiali interrati totalmente o parzialmente si alterano in tempi molto più ravvicinati;
- agli interventi associati: la concimazione può favorire una più veloce degradazione, modificando il rapporto C/N;
- alle caratteristiche del substrato: si hanno forti differenze con un substrato pedogenizzato o meno;
- alle caratteristiche morfologiche: nel piano si ha una maggior persistenza dell'umi-

- dità con un aumento nella degradazione, mentre in pendio il materiale risulta essere sempre più secco e quindi degrada più lentamente;
- alle condizioni microclimatiche.

Messa in opera

La pacciamatura può essere distribuita direttamente sulla superficie, oppure parzialmente o totalmente interrata. Una distribuzione superficiale si adatta a tutte le diverse situazioni orografiche, ma in presenza di forti pendenze, richiede interventi integrativi per stabilizzare lo strato pacciamante contro lo scivolamento. A tale riguardo si sono sperimentate diverse tecniche utilizzando:

- picchetti e filo di ferro;
- reti metalliche elettrosaldate, zincate o meno;
- reti di plastica a diversa degradabilità;
- reti di tessuto vegetale (cocco, juta);
- sostanze emulsionanti: bitume, leganti chimici, ecc.

La scelta tra le diverse tecniche è funzione del tipo di utilizzo del sito, del suo grado di naturalità, della durata e del grado di sicurezza richiesto all'intervento in quell'area. Un metodo alternativo consiste nell'interrare parzialmente la pacciamatura, utilizzando mezzi meccanici diversi (erpici, rulli, aratri), anche se tutti hanno un limite operativo nella pendenza e negli spazi operativi, per poter lavorare in piena sicurezza. In alcune esperienze si è ricorso ad un interrimento più spinto, limitando in questo modo l'azione anti-erosiva superficiale (azione battente, accumulo superficiale, ecc.), ma favorendo invece un sostegno meccanico diretto dello strato superficiale, attraverso l'azione dei culmi che, in modo casuale, esercitano un'azione di supporto, assorbendo parte della forza di taglio presente sulle superfici inclinate, sostituendosi, almeno nei primi anni, all'azione stabilizzante delle radici.



Foto 4.4.1. Scarpata di conglomerati pliocenici dove è stata realizzata un'idrosemina.

Problemi

Contatto pacciamatura - substrato

Se non si ottiene un buon contatto tra materiale pacciamante e substrato si ha la formazione, nel tempo, di vie di scorrimento preferenziali sotto lo strato superficiale che riducono, se non annullano, le proprietà idrauliche ed idrologiche della pacciamatura. Questo comportamento diviene molto evidente in presenza di materiale a culmo lungo, mentre elementi corti o meglio ancora, sostanze sminuzzate, tendono ad aderire in modo completo a tutte le asperità del substrato, con un'azione più efficiente e prolungata nei confronti del deflusso, specie se distribuite pneumaticamente o idrau-

licamente. Per contrastare questo fenomeno in presenza di materiali grossolani può essere prevista, ove possibile, una rullatura o compattazione che migliori l'adesione tra i due materiali.

Blocco degli elementi nutritivi

Nel processo di degradazione della sostanza organica alcune sostanze minerali, per esempio l'azoto, possono essere immobilizzate e quindi sottratte alla soluzione circolante ed alla vegetazione, anche per un lungo periodo. E' necessario quindi considerare la possibilità di integrazioni attraverso apposite fertilizzazioni chimiche.

Limitazione dell'emergenza dei semi

In presenza di strati pacciamanti non idonei o troppo consistenti si possono avere delle limitazioni nell'emergenza del seme distribuito, a causa dell'eccessivo aduggiamento, con ripercussioni negative sul successivo inerbimento.

Limitazione dell'irraggiamento

Uno strato consistente di pacciamatura limita decisamente l'irraggiamento dovuto ai raggi solari. Se questa azione è positiva nei periodi estivi, con riduzione delle temperature e dell'evaporazione, in inverno - primavera diviene negativa, in quanto ritarda il riscaldamento del substrato, specie in terreni compatti ed umidi, con conseguenti limitazioni e ritardi nella germinazione dei semi e nella ripresa vegetativa delle piante.

Liberazione di sostanze tossiche

Alcuni materiali pacciamanti possono avere degli effetti biochimici negativi, dovuti alla tossicità di sostanze o metaboliti liberati nella fase di degradazione. E' necessario fare attenzione sia ai materiali che alle dosi impiegate, per limitare eventuali danni alla copertura vegetale che si sta insediando.

Infiammabilità

Tutti i materiali organici, e parte dei sintetici, sono facilmente infiammabili e quindi possono creare dei problemi durante la stagione estiva, in zone soggette a lunghi periodi siccitosi.

Foto 4.4.2. Parcella sperimentale su cui è stato appena eseguito il "nero verde".



Nero verde (metodo Schiechl)

E' una variante della pacciamatura. Dopo aver preparato il substrato (modellamenti, lavorazioni, concimazioni) si distribuisce sullo stesso un congruo strato di paglia asciutta (preferibilmente a culmo lungo) nella dose di $0.3-1 \text{ kg/m}^2$, su cui si semina il miscuglio di specie erbacee prescelto (fino a 50 g/m^2), alle volte in associazione ai concimi organici e/o sintetici. In aree a forte pendenza può essere necessario un ulteriore rinforzo, per stabilizzare lo strato pacciamante superficiale, che può essere realizzato con picchetti di ferro infissi fino a 50 cm; questi sono poi collegati tra loro con

filo di ferro, o con delle reti, sia in materiale ferroso, che sintetico o naturale. Queste reti vengono posizionate e fissate sempre con picchetti sopra lo strato pacciamante. Il tutto viene poi irrorato con una sostanza legante, in genere una emulsione bituminosa con acqua, che funge da collante, per evitare possibili movimenti o asportazioni dello strato superficiale. Del metodo esistono molte varianti: ad esempio si sono avuti ottimi risultati anche su substrati compatti, non preventivamente preparati. I risultati nelle nostre condizioni climatiche sono stati nella stragrande maggioranza dei casi positivi, anche in condizioni di pendenze estreme. Vista la natura tipicamente estensiva degli interventi di restauro ambientale, bisogna fare attenzione all'uso di materiale non degradabile o lentamente degradabile: le reti di ferro devono essere utilizzate solo in prossimità di manufatti che richiedono un controllo continuo (strade). In tutti gli altri casi o si ricorre a materiali degradabili (plastiche od ancora meglio organici) o si deve predisporre un successivo intervento di asportazione di queste strutture, una volta superata la fase di insediamento delle vegetazione (in genere dopo 3 anni).



Foto 4.4.3. Messa in opera di rete di juta su substrato pedogenizzato riportato, su scarpata argillosa.

Geotessili

I geotessili sono dei prodotti industriali di natura e forma diversa, utilizzati in molti settori:

- filtrazione;
- drenaggio;
- separazione di strati;
- rinforzo dei substrati;
- contenimento dell'erosione;
- miglioramento delle condizioni superficiali per favorire l'insediamento della vegetazione;
- impermeabilizzazione.

In questo paragrafo considereremo solo gli aspetti relativi al contenimento dell'erosione ed al miglioramento delle condizioni superficiali del substrato. Per raggiungere questi obiettivi i geotessili, o in termini più generali geosintetici, devono simulare alcune caratteristiche tipiche della vegetazione vera e propria (Tab. 4.4.2) e vengono comunemente classificati in diverse categorie:

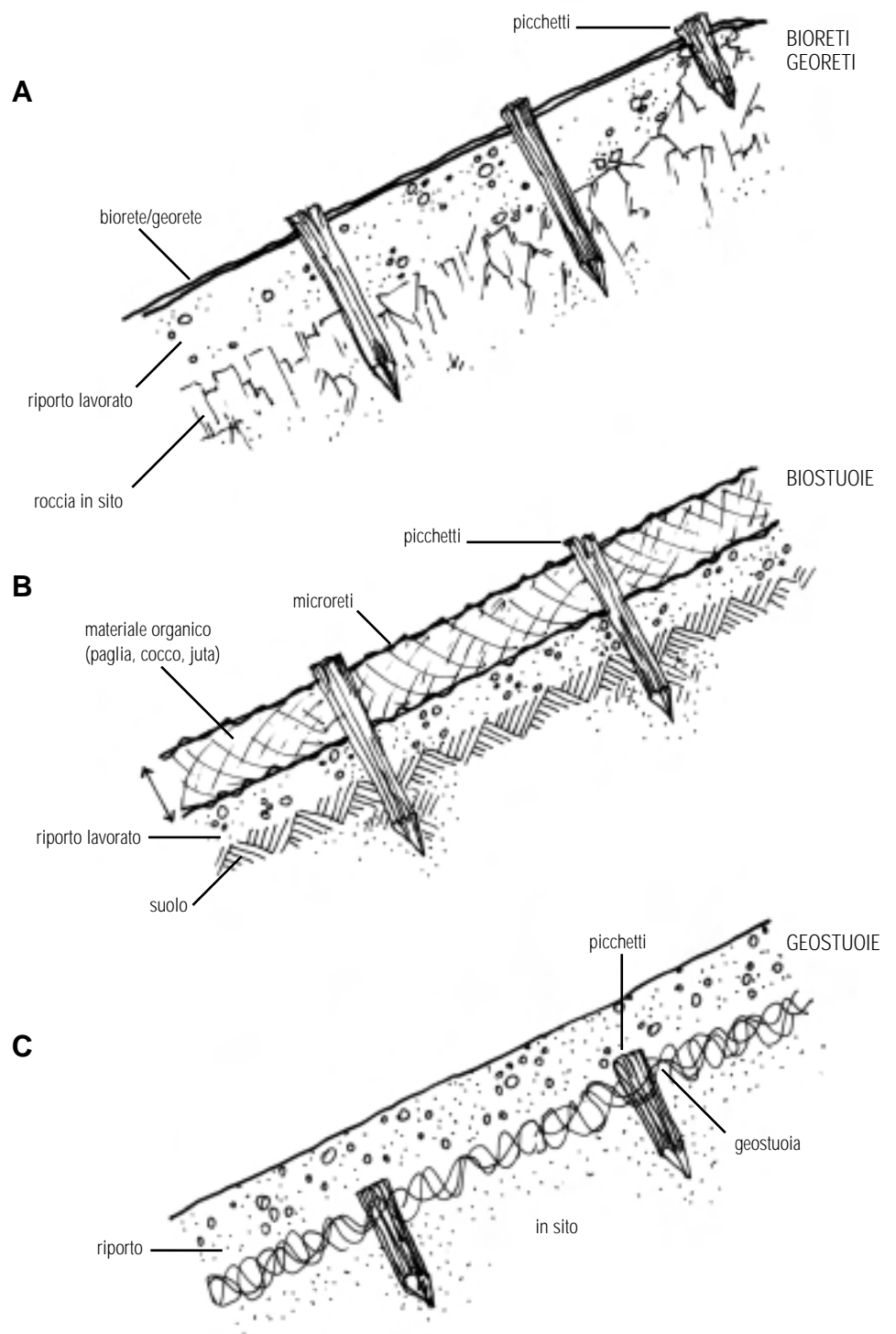
- bioreti: tessuti a maglia differenziata (10-50 cm), composti da fibre naturali (cocco, juta) che si distendono sulla superficie (Fig. 4.4.1a);
- biostuoie: materassi di materiali naturali a spessori diversi (circa 1 cm) composti da fibre (cocco, juta, ecc.), tenute assieme da microreti in materiale organico o sintetico (polipropilene), che si distendono sulla superficie (Fig. 4.4.1b);

- georeti: tessuti sintetici, di materiale diverso, a maglia differenziata che si distendono sulla superficie;
- geostuoie: tessuti sintetici in tre dimensioni, che si distendono sul substrato per poi essere ricoperti con del terreno pedogenizzato (Fig. 4.4.1c);
- geocelle: tessuti sintetici, ed anche naturali, in tre dimensioni, che aperti e fissati sul substrato vengono riempiti con terreno pedogenizzato (Fig. 4.4.2).

Criteri più analitici di classificazione individuano:

- il materiale:
 - naturale (cocco, juta, paglia o carta, ecc.);
 - sintetico (nylon, polipropilene, polietilene, ecc.);
- la durata della loro azione:
 - temporanea (per i geotessili che si alterano nel breve periodo);
 - permanente (per i geotessili che si alterano nel medio periodo);
- la posizione di utilizzo:
 - superficiale;
 - interrata.

Fig. 4.4.1 Geotessili: tipologia di soluzioni:
 A) bioreti;
 B) biostuoie;
 C) geostuoie.



	CHIOMA	FUSTO	RADICI	LETTIERA
Rete tessuta (Biorete, georete)	**	**		*
Materasso (Biostuoia)	**	*		**
Rete tridimensionale (Geostuoia)			**	
Geocelle			*	

[** = performance identiche alla vegetazione; * = performance simili alla vegetazione]

In generale una buona azione antierosiva superficiale richiede un geotessile con:

- un'elevata percentuale di copertura;
- la presenza di fibre che assorbano una elevata quantità di acqua meteorica;
- un buon contatto con la superficie del substrato;
- una salda aderenza con il substrato;
- la presenza di fibre di grosse dimensioni che intercettino le particelle schizzate dalle gocce di pioggia (fino a 5 cm di diametro).

La presenza di questo materiale si ripercuote anche sul microclima e sull'insediamento della vegetazione con:

- una temperatura più bassa nei primi strati superficiali;
- una maggior disponibilità di acqua in profondità (più infiltrazione e meno evaporazione);
- una minor quantità di luce, che può essere anche usata nel controllo delle infestanti;
- un'azione di rinforzo contro il calpestio;
- una maggior azione di difesa dall'azione del vento (minori distacchi, minor azione abrasiva).

Tutto ciò porta ad una maggiore resistenza contro l'azione battente della pioggia e ad una riduzione della velocità di deflusso dell'acqua in eccesso, con un aumento nell'infiltrazione e nella sedimentazione del trasporto solido ed infine con un miglioramento nelle condizioni e nelle possibilità di insediamento per la vegetazione.

Il progettista deve perciò scegliere tra diversi tipi e materiali disponibili in funzione delle esigenze del sito. In un ambito naturalistico, od estensivo, sono sempre preferibili i materiali naturali degradabili; solo in situazioni particolari, in presenza di manufatti (arterie stradali o altro) può essere preferibile ricorrere a materiali sintetici ad azione e persistenza prolungata. In entrambi i casi, comunque, deve essere sempre possibile una interazione con la copertura vegetale, che dovrà insediarsi in associazione ai geosintetici. I materiali naturali si sono sperimentalmente dimostrati più flessibili e quindi più adattabili alle situazioni più irregolari e scabrose. Essi sono più efficienti nella formazione di piccoli arresti di materiale terroso sciolto, con creazione di dighette ed accumulo di acqua (effetto cuscino, contro l'azione battente) e sedimentazione del trasporto solido. Inoltre i materiali naturali sono più scabrosi, con un conseguente aumento nei coefficienti relativi e viceversa una riduzione nella velocità di deflusso.

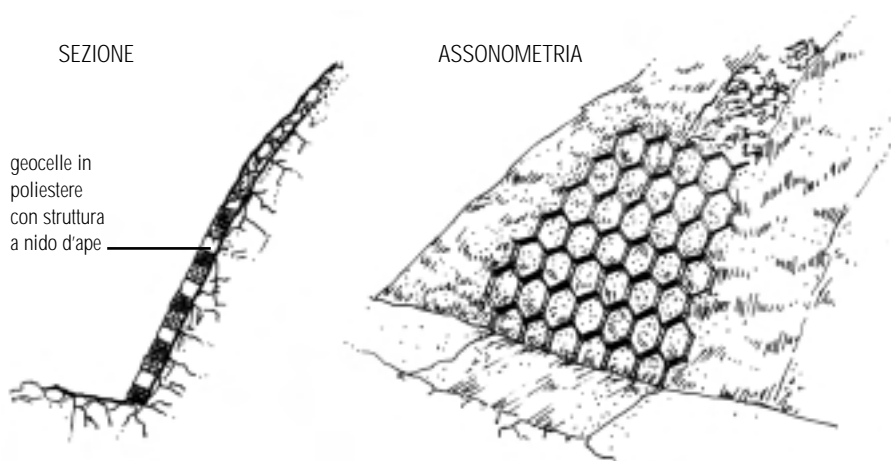


Fig. 4.4.2. Rivestimento
con geocelle.

Messa in opera

Bioreti

Nella loro applicazione l'aspetto fondamentale da perseguire è rappresentato dalla massima adesione con la superficie del substrato, già preventivamente preparato (lavorazioni, concimazioni, ammendamenti, semine). Un uso poco attento delle bioreti comporta una forte diminuzione nell'azione di difesa, favorendo il divagamento dell'acqua di ruscellamento al di sotto della rete, senza che questa possa limitarne gli effetti. Per ottenere quindi una buona aderenza è necessario utilizzare materiale flessibile, picchettarlo con cura lungo tutta la sua lunghezza (con picchetti di 15-50 cm di lunghezza, di ferro o di legno), limitare o evitare le tratte lunghe ed uniche. Il tessuto deve essere tagliato in elementi corti, più facilmente gestibili ed adattabili al terreno. Questo è fondamentale in pendenza, specie utilizzando fibre naturali che assorbono grandi quantità d'acqua: il peso da loro raggiunto si trasforma in una forza di trazione verso il basso, con conseguente messa in tensione del geotessuto e distacco dal substrato. Meglio sarebbe disporre il telo trasversalmente al pendio, anche se questo pone problemi organizzativi. Nello srotolamento e nel picchettamento (1-3 picchetti/m²) si dovrà perciò prestare molta attenzione, visto che i geotessuti sono commercializzati in rotoli (1-4 m di larghezza x 20-100 m di lunghezza). A riguardo non si deve dimenticare che i geotessuti spesso sono utilizzati in sostituzione della pacciamatura, proprio in aree inclinate, dove risultano più stabili ed efficienti dei materiali sciolti. Le bioreti devono essere affiancate con una sovrapposizione di almeno 10-20 cm, per evitare aree scoperte e devono essere rincalzate con attenzione lungo tutto il perimetro esterno, per evitare scalzamenti e l'azione di sollevamento del vento, ed essere ancorate fortemente in testata.

Biostuoie

Un discorso particolare riguarda le biostuoie: essendo delle strutture in spessore, realizzate con materiali organici diversi in cui a volte sono associati sia la semente (15-40 g/m²) che le sostanze fitostimolanti, possono essere utilizzate direttamente sul substrato senza preventivi interventi agronomici (semina, concimazione). Risultano quindi molto comode nell'uso, anche se costose. Presentano però degli inconvenienti, rappresentati in primo luogo dalla loro limitata flessibilità, che impedisce una buona aderenza, specie in presenza di un substrato irregolare. Inoltre esiste il problema dell'interazione con il substrato sottostante. La semente che germina dalla biostuoia deve avere la possibilità di approfondire le radici, di penetrare nel substrato ed affrancarsi dalla stuoia superficiale. In caso contrario, legato sia alla natura del substrato (compatto e pesante) o all'andamento climatico (alternanza di umido e di secco), i semi presenti, pur germinando, non riescono ad affrancarsi, scomparendo nel giro di una sola stagione vegetativa. In questo caso l'azione della biostuoia si riduce ad una azione antierosiva, limitata dal suo disfacimento, senza che questa sia velocemente integrata da una copertura vegetale. Fondamentale quindi è una attenta preparazione del substrato al di sotto delle biostuoie a cui deve seguire un preciso posizionamento e picchettamento, operato in una stagione che dia la massima possibilità alla vegetazione di insediarsi (nei nostri climi ad esempio nella tarda estate).

Geostuoie - geocelle

Sono elementi principalmente in materiale sintetico, che vengono utilizzati per aumentare la resistenza al taglio degli strati superficiali di aree pendenti. Non aumentano la resistenza del substrato, bensì rafforzano la zona di contatto tra due materiali diversi (substrato minerale – substrato pedogenizzato) come nel caso delle geostuoie, o definiscono una struttura tridimensionale di sostegno che, fissata con picchetti, assorbe gli sforzi dello strato superficiale riportato. Elemento comune è rappresentato dal riporto di terreno pedogenizzato, dopo il posizionamento ed il fissaggio dei geosintetici. Questo comporta la disgregazione della struttura e la perdita di compattezza del materiale, con conseguente erosione, specie nella prima fase,

dovuta all'azione battente delle gocce di pioggia. E' necessario quindi porre molta attenzione a questa fase transitoria, dove la vegetazione inizia ad insediarsi. Un ulteriore elemento da considerare è rappresentato, nei nostri climi, dallo spessore del terreno di riporto, in relazione alle possibilità di sopravvivenza della vegetazione. Spessori limitati di materiale pedogenizzato infatti limitano gli accumuli di riserve idriche. Se a questo si associano strati compatti di substrato sottostante, allora la vegetazione è impossibilitata a sviluppare degli apparati radicali in profondità e quindi ad affrancarsi; il risultato è il disseccamento della vegetazione stessa. Il loro uso va quindi studiato con attenzione, non solo da un punto di vista statico, ma anche da quello biologico, per evitare insuccessi imbarazzanti, visti anche gli immobilizzi economici che richiedono.

Problemi

I geotessuti presentano anche aspetti negativi:

- limitano l'emergenza del seme distribuito;
- limitano l'irraggiamento e quindi ritardano il riscaldamento del substrato in primavera, specie in terreni compatti ed umidi;
- possono essere altamente infiammabili;
- possono non adattarsi a siti scabrosi ed irregolari;
- possono limitare l'approfondimento dei sistemi radicali delle piante;
- sono più costosi delle pacciamature.

Graticciate - Vimate

Sono delle piccole barriere in ramaglia viva intrecciata attorno a dei picchetti anch'essi vivi, che vengono poi reinterrate a monte, con del terreno di riporto; sono da posizionare su pendici non troppo inclinate, con una funzione di protezione superficiale (Fig. 4.4.3). La loro funzione è di esercitare un sostegno temporaneo, necessario perchè altre tecniche di intervento associate, come semine o trapianti od anche gradonate, possano affermarsi e quindi stabilizzare la porzione superficiale del pendio.

Messa in opera

Si utilizzano dei picchetti di castagno vivi di 1 m di lunghezza e 5-10 cm di diametro, che vengono infissi per circa i 2/3 della loro lunghezza nel substrato, ad una distanza compresa tra 50 e 100 cm. Attorno ad essi si intrecciano lunghi rami vivi in genere di salice (*Salix* sp. pl.), ma anche di maggiociondolo (*Laburnum anagyroides*) o di tamerice (*Tamarix gallica*), alternandoli attorno ai picchetti, a polarità invertite, per aumentarne la resistenza. Ogni ramo intrecciato deve essere compresso con cura al fine di creare una struttura compatta e piena, che comunque non supera mai i 7-8 palchi, per una altezza massima di 30-40 cm al picchetto. L'intreccio può infine essere fissato con filo di ferro per bloccarlo in modo permanente al picchetto. La struttura deve poi essere ricoperta a monte con del terreno di riporto, che va compattato con cura, per evitare sia dei possibili scalzamenti, sia per mantenere un buon contatto tra struttura e terreno. In mancanza di ciò la struttura dissecca facilmente, operando solo un'azione di contenimento passiva e quindi temporanea. La disposizione delle vimate, in genere, è lungo le linee di livello, anche se si può adottare una leggera pendenza trasversale, per favorire un eventuale deflusso superficiale.

Problemi

Limitato affrancamento

I risultati nei nostri climi sono in genere limitati nel medio e lungo periodo. Queste strutture tendono cioè facilmente a seccarsi senza possibilità di affrancamento. Questo è certamente legato a modalità costruttive errate con strutture realizzate troppo fuori terra e al tipo di materiale vegetale da intreccio utilizzato, rappresentato quasi esclusivamente da salice (*Salix alba*, *S. elegnos*, *S. capraea*, *S. cinerea*, *S. purpurea*, ecc.). Questo

limita l'areale di utilizzo della tecnica solo a zone fluviali, o comunque con un substrato sciolto e profondo, molto umido per tutto l'anno. Possiamo quindi considerare queste strutture a durata limitata, da associare ad altre tecniche permanenti.

Sottoscavi

Se non si opera una buona compattazione del riporto a monte sono possibili fenomeni di sottoscavo della struttura, specie in assenza di una adeguata regimazione idraulica delle acque di deflusso, con possibilità di danni sia alla struttura stessa che alle eventuali piantagioni poste a monte.

Costi

Il costo di questo intervento risulta essere elevato. Non esistono possibilità di meccanizzazione e quindi tutta la realizzazione deve avvenire manualmente. Inoltre è necessario considerare i costi relativi alla raccolta del materiale vivo e alla sua preparazione.

Foto 4.4.4. Graticciata a pochi mesi dalla messa in opera.

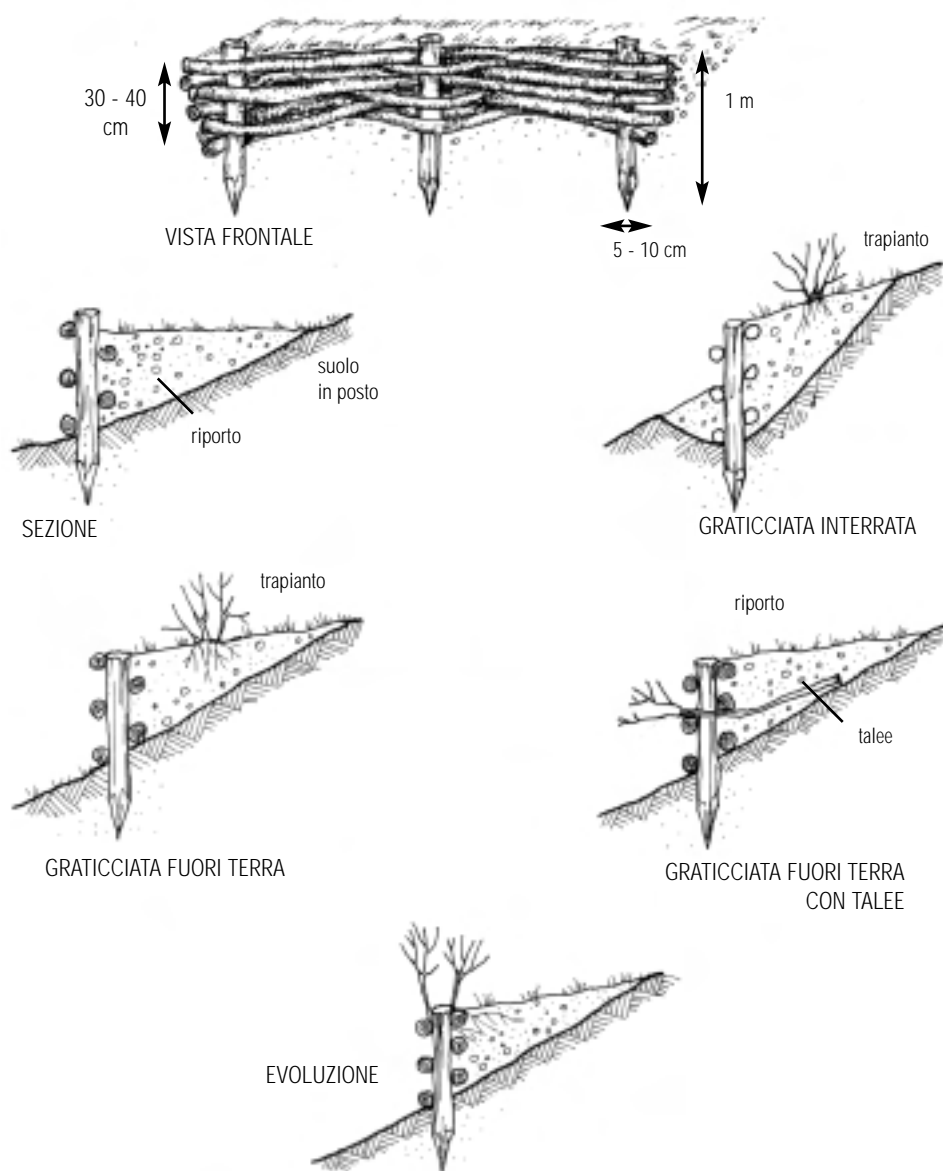


Steconate - Palizzate

Per il contenimento di materiale superficiale, specie quello di riporto, su pendici molto inclinate, per periodi medio-lunghi, sono da preferire le palizzate - steconate (Fig. 4.4.4). Si utilizzano cioè tronchi, semi-tronchi, o grosse tavole, per formare delle strutture trasversali al pendio, alte 30-40 cm, utili a contenere il substrato e favorire interventi quali semine o trapianti di talee o piantine radicate (Fig. 4.4.5). Sono strutture che si adattano a substrati sciolti o mossi, dove le radici delle piante trapiantate possono, nel tempo, approfondirsi ed affrancarsi.

Messa in opera

Si utilizzano dei pali di castagno, o altra essenza a lenta degradazione, per predisporre dei picchetti di 15-20 cm di diametro, lunghi in genere 100-150 cm, che vanno infissi per i 2/3 della loro lunghezza, lungo la pendice inclinata. Ad essi sono appoggiati orizzontalmente dei tronchi, dei semi-tronchi o delle tavole di grosso spessore, che sono poi fissati con filo di ferro e/o chiodi. Alle volte si realizza una palizzata con 2 ordini di tronchi, sia in verticale che in obliquo verso monte, lasciando anche uno spazio tra i tronchi per inserire delle talee. Se il substrato è molto duro o molto coerente si possono utilizzare pali o putrelle di ferro, come picchetti. A monte della struttura si riporta una certa quantità di materiale sciolto, su cui si possono insediare delle talee (10 per metro) o piantine radicate (5 per metro), che sviluppandosi ed ancorandosi al substrato costituiscono la sistemazione finale.



Problemi

Sottoscavi

In caso di forti pendenze, se non si opera una buona compattazione del riporto a monte sono possibili fenomeni di sottoscavo della struttura, specie in assenza di un'adeguata regimazione idraulica delle acque di deflusso, con possibilità di danni, sia alla struttura che alle eventuali piantagioni a monte. Può essere utile, in presenza di fenomeni di ruscellamento superficiale, predisporre degli strati filtranti con paglia, fieno, canna o lettiera, direttamente a contatto con la steconata, prima di posizionare il materiale di riporto e compattarlo: nei primi anni eserciterà un'utile azione di filtro e sedimentazione.

Durata

E' necessario utilizzare materiale di specie e di assortimento resistente affinché la durata di queste strutture sia sufficiente per favorire l'insediamento e lo sviluppo della copertura vegetale, che integrerà e sostituirà l'azione di sostegno delle steconate.

Grate

Su pendenze molto forti, ma stabili, si può ricostruire una copertura vegetale in funzione sia stabilizzante che di mascheramento, attraverso la realizzazione di grate, cioè di strutture a maglie realizzate in legname; queste esercitano un'azione di sostegno del substrato, sia questo in posto o di riporto (Fig. 4.4.6). Entro le maglie poi si impianterà la vegetazione, sia erbacea che arbustiva. Nella stragrande maggioranza

Fig.4.4.4. Stecconate su pendii inclinati.

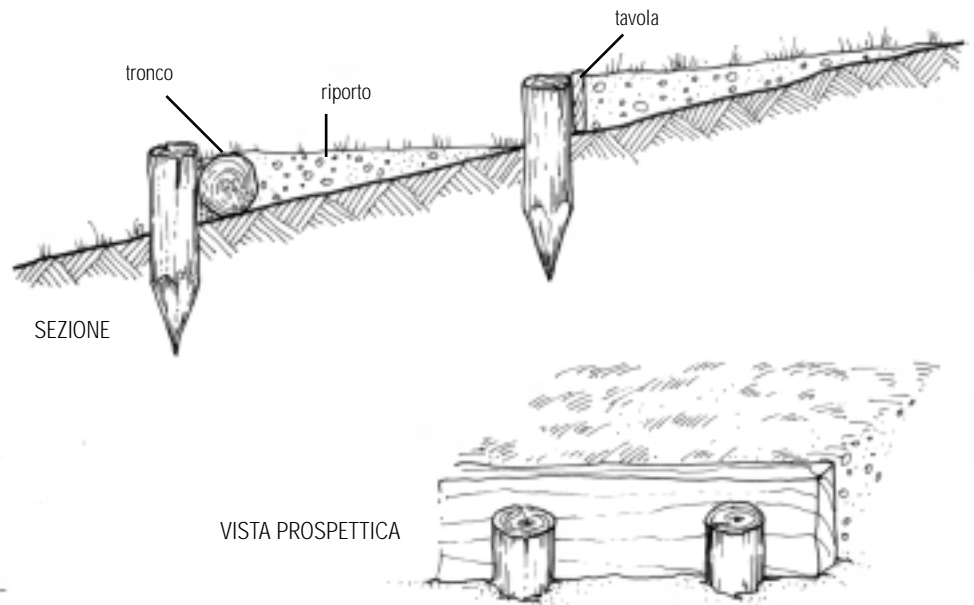
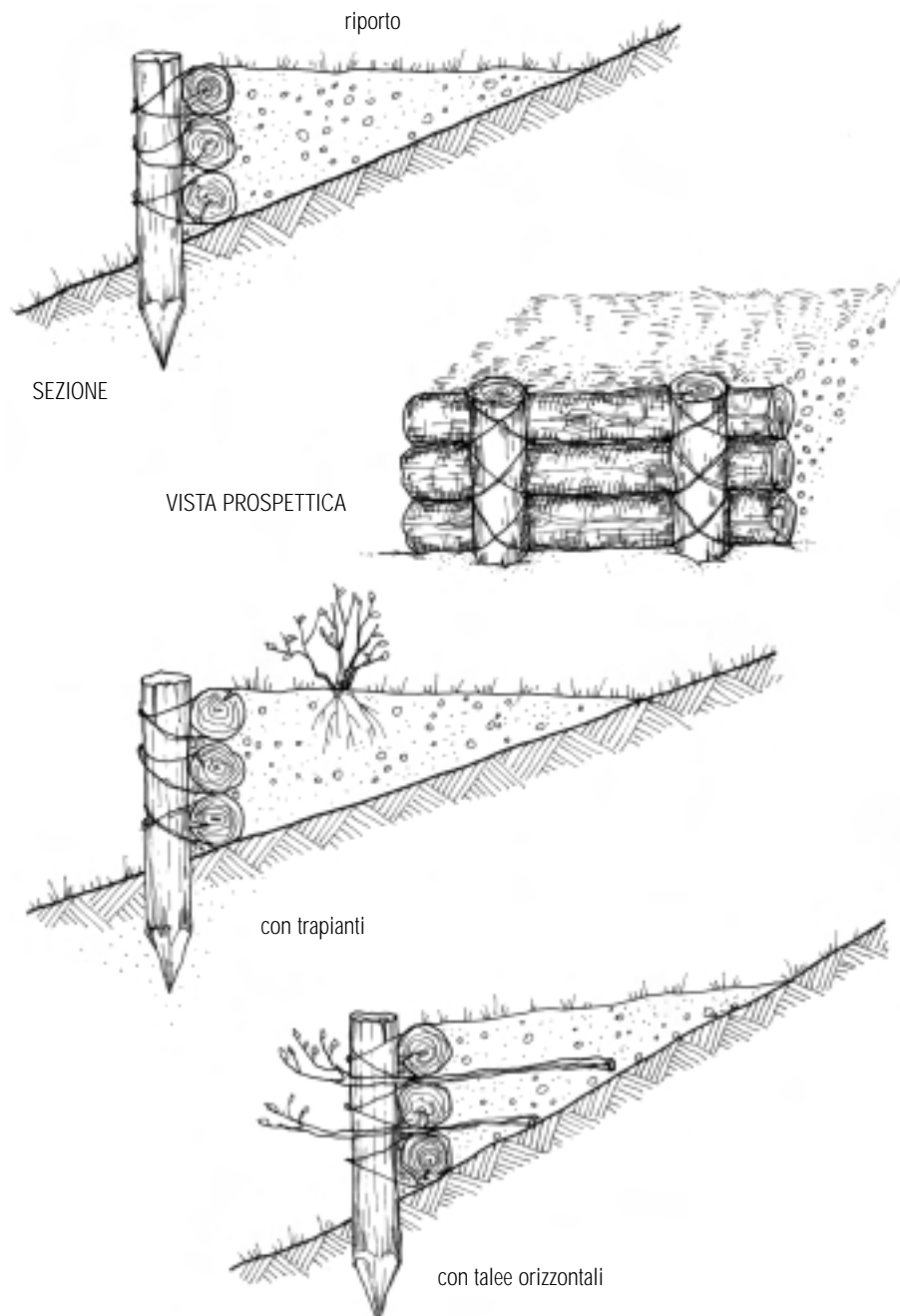


Fig.4.4.5. Palizzate: particolari costruttivi.



dei casi però la vegetazione non avrà la possibilità di affrancarsi del tutto dalla struttura portante e di sostituirsi ad essa nell'azione di sostegno: saranno perciò necessari interventi di manutenzione e ricostruzione periodici.

Messa in opera

Le tecniche costruttive sono diverse in funzione del materiale disponibile. Avendo disponibilità di tondame si realizza un appoggio saldo, come una palificata oppure un muro a secco; su di esso si appoggiano dei tronchi verticali, ogni 1-2 m, di diametro compreso tra 20 e 25 cm. Questi tronchi poi vengono adagiati contro la pendice ed uniti trasversalmente con traverse sempre in tondame, di 15-20 cm di diametro, poste ad una distanza variante tra 0.4 e 2 m, in funzione della pendenza. Viene



Foto 4.4.5. Particolare di piccola palizzata.

così a formarsi una griglia o spalliera a maglie. Le traverse possono essere posizionate sia sotto che sopra gli elementi verticali. In corrispondenza degli incroci si inseriscono dei picchetti, sia in legno (diametro 10 cm) che in metallo, infissi fermamente nel substrato per ancorare la struttura (lunghezza minima 1 m). Le maglie, o camere, così formate sono riempite e/o coperte con del substrato pedogenizzato, sciolto, su cui poi si procederà alla semina e/o trapianto di specie vegetali. I collegamenti tra gli elementi portanti possono essere realizzati con chiodi o filo di ferro ed anche con graffe. Molte volte in corrispondenza delle traverse è necessario inserire delle talee o delle piantine radicate, di essenze frugali (salici, pioppi, ontani, sambuco), per favorire un più veloce mascheramento, associato ad una migliore stabilizzazione della pendice e del materiale di riporto; la pendice, comunque, riuscirà ad affrancarsi in modo stabile solo al momento della degradazione delle strutture portanti della grata. In corrispondenza delle traverse, a volte, si inserisce una rete elettrosaldata, per migliorare l'azione di trattenuta del substrato riportato. La grata, specie per scarpate non troppo elevate (4-7 m) può essere utile anche come struttura diretta di sostegno, a mo' di cavalletto, per sostenere la corona di pendio posta superiormente. Esistono anche varianti di grate in spessore che prevedono la realizzazione di due livelli di maglie, separati da elementi di collegamento (Fig. 4.4.7). Queste varianti consentono di recuperare anche smottamenti localizzati più profondi, in quanto tutta la struttura viene riempita con materiale pedogenizzato e poi rivegetata.

Avendo invece a disposizione dello squadrato o del tavolame grezzo si possono realizzare dei sistemi a grata più leggeri ("ladder grid") di dimensioni variabili, con camere comprese tra i 90 x 60 cm ed i 180 x 120 cm. Qui gli elementi portanti ver-

ticali sono delle liste di 5 x 10 o di 10 x 10 cm che vengono uniti con degli elementi orizzontali di 2.5 x 10 - 5 x 10 cm, utilizzando rinforzi e biette inchiodati. Anche questa struttura richiede di essere fissata alla pendice, attraverso picchetti di diverso materiale che devono essere distribuiti con regolarità e profondamente infissi. Le camere così realizzate sono poi ricoperte totalmente o parzialmente con del substrato

Fig.4.4.6. Grate: in tondame e travame.

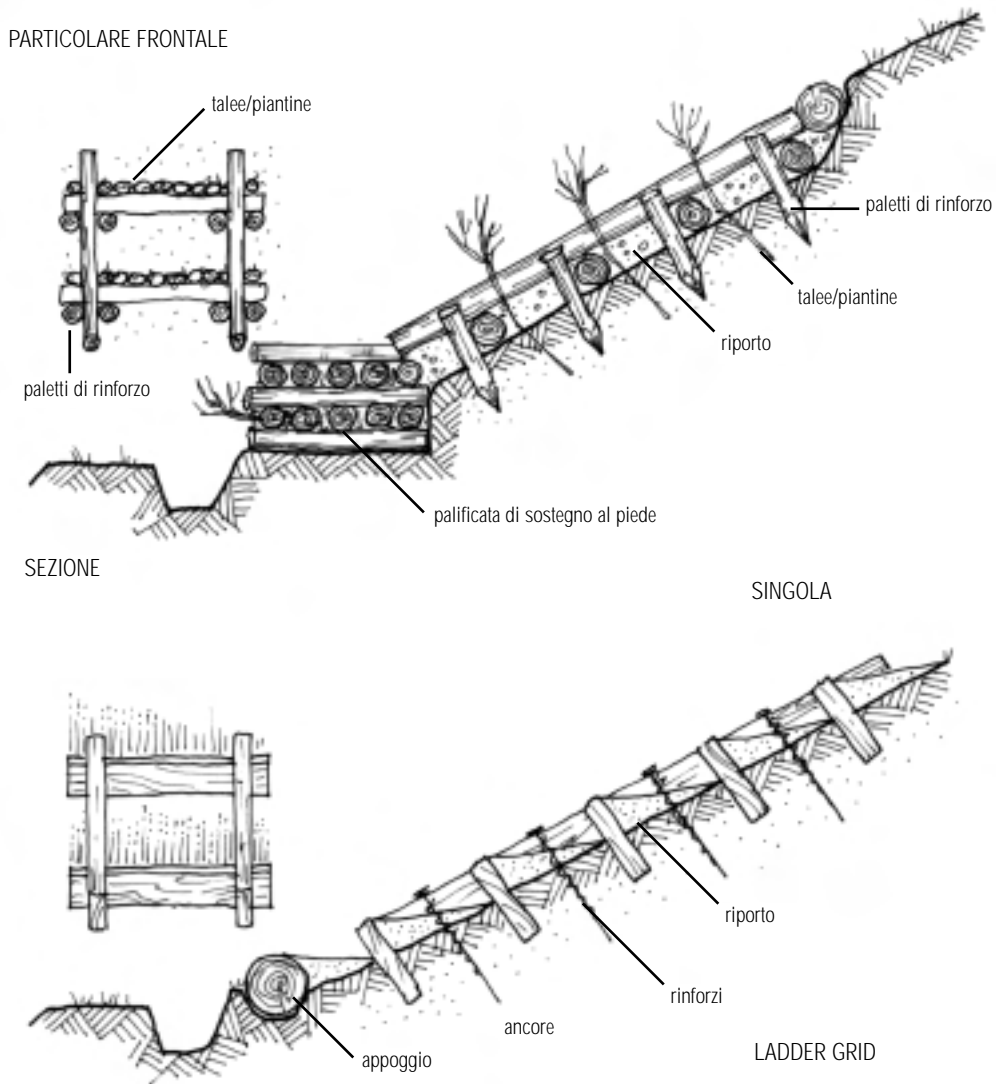
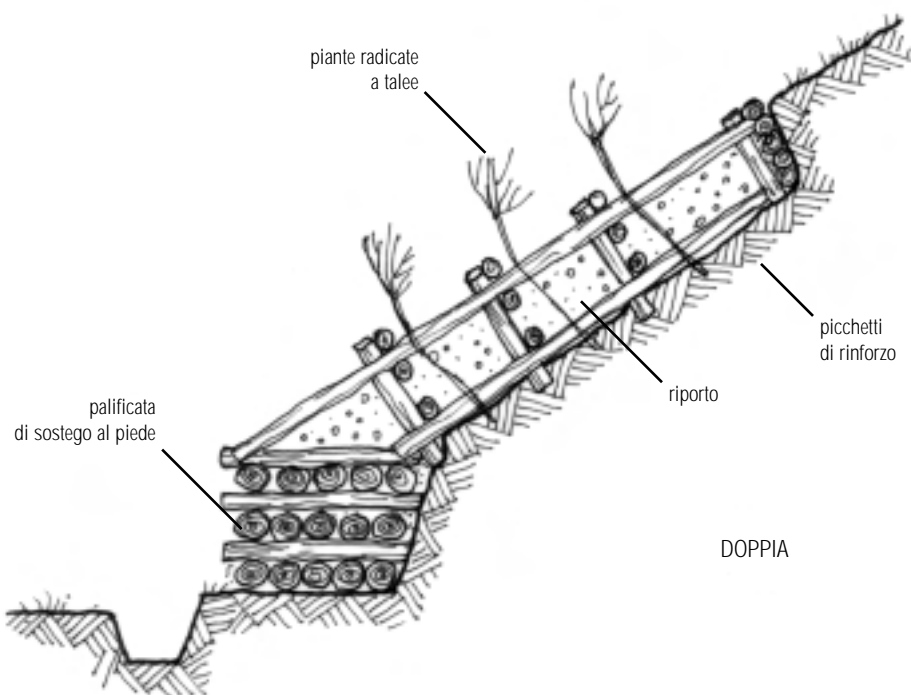


Fig.4.4.7. Grata doppia in tondame.



pedogenizzato, che deve essere immediatamente rivegetato. A differenza delle grate con tondame, qui è richiesta una preventiva ed attenta preparazione del piano di appoggio, che dovrà essere molto regolare ed uniforme. Questo tipo di grata si adatta bene a pendenze non elevate di materiale sciolto o pedogenizzato di spessore elevato, su cui si può sviluppare in tempi brevi una copertura vegetale stabile, che potrà supportare e sostituire l'azione della struttura.

Problemi

Svuotamento delle camere

Se non si realizza un controllo molto attento dell'infiltrazione (sia meteorica che di scorrimento superficiale) vi è la possibilità di un veloce svuotamento delle maglie della grata. Particolare attenzione deve essere posta nel posizionamento dei traversi, che devono essere ben adagiati, se non infissi nel substrato sottostante. Nel sistema a tavole, ad esempio, le tavole delle traverse orizzontali hanno un'altezza superiore a quella delle liste; questa consente una loro infissione nel substrato, aumentando l'azione di sostegno e contenimento. Immediatamente sopra i traversi è sempre preferibile posizionare piantine o talee, associate a materiali filtranti (paglia, lettiera), per aumentare la stabilità e l'azione di filtraggio nei confronti di un eventuale deflusso.

Affrancamento dalla struttura portante

La vegetazione che viene inserita nelle maglie deve avere la possibilità di affrancarsi e legarsi direttamente al substrato originale sottostante la grata, al fine di rendersi indipendente dall'azione di sostegno della struttura artificiale creata. L'inserimento efficace di questo tipo di struttura dipende quindi molto dal substrato presente, che deve essere idoneo per un saldo ancoraggio dei sistemi radicali.

4.4.3.2 METODI DI STABILIZZAZIONE INTERRATI SOTTOSUPERFICIALI

A volte può essere necessario realizzare dei sistemi di stabilizzazione interrati, che investano i primi strati delle pendici e limitino, attraverso l'azione attiva della vegetazione, fenomeni quali gli scivolamenti, le colate e tutti gli altri smottamenti poco profondi. A tale proposito si possono utilizzare diverse tecniche come fascinate, graticciate e palizzate.

Fascinate

La fascinata è una tecnica che prevede il posizionamento di fasci di materiale vegetale (vivo e /o morto) in trincee, lungo le linee di livello di scarpate o di traverso al pendio, con una inclinazione laterale non superiore ai 10-20° (Fig. 4.4.8). E' una tecnica che si adatta a pendici non troppo pendenti. Il materiale vegetale impiegato deve essere costituito principalmente da lunghi fusti legnosi di specie arbustive ed arboree a facile radicazione, graduati in relazione al diametro, per aumentarne le proprietà filtranti, legati assieme da filo di varia natura non facilmente degradabile. La fascinata ha diverse funzioni:

- stabilizza lo strato sottosuperficiale;
- dissipa parte dell'energia dell'acqua e del trasporto solido, aumentando la resistenza al moto dell'acqua;
- intercetta parte del trasporto solido;
- aumenta l'infiltrazione, riducendo lo scorrimento superficiale ed aumentando localmente le riserve idriche;
- facilita l'insediamento della vegetazione, come diretta conseguenza della ridotta erosione. La vegetazione della fascinata, per lo più, si comporta come una copertura temporanea, lasciando il passo alle specie naturali o trapiantate.

E' una tecnica di difesa delle pendici non molto diffusa in Europa mentre, all'opposto, è stata largamente impiegata negli U.S.A. ed in particolare in California, su pen-

denze contenute ($< 30^\circ$). Può però essere adatta alle nostre condizioni climatiche (transizione tra continentale e mediterraneo) in quanto consente, accanto alla stabilizzazione della pendice, un certo accumulo localizzato d'acqua di scorrimento, elemento molto utile nei lunghi periodi siccitosi estivi.

Messa in opera

Nel realizzare una fascinata è necessario innanzitutto scegliere delle specie a facile radicazione. Tradizionalmente negli ambienti continentali si utilizzano specie del genere *Salix*. Prove eseguite nelle nostre condizioni climatiche hanno mostrato però risultati contrastanti: solo in stazioni fortemente umide si è avuta una risposta positiva dei salici. In tutte le altre condizioni questi, spesso, non superavano l'anno di vita, causa la forte siccità estiva. E' necessario perciò utilizzare i salici solo in ambienti fluviali o comunque freschi. In tutte le altre situazioni è necessario individuare altre specie, ad azione consolidante e di facile radicazione. Risultati definitivi per i

Fig.4.4.8. Fascinate: particolari costruttivi.

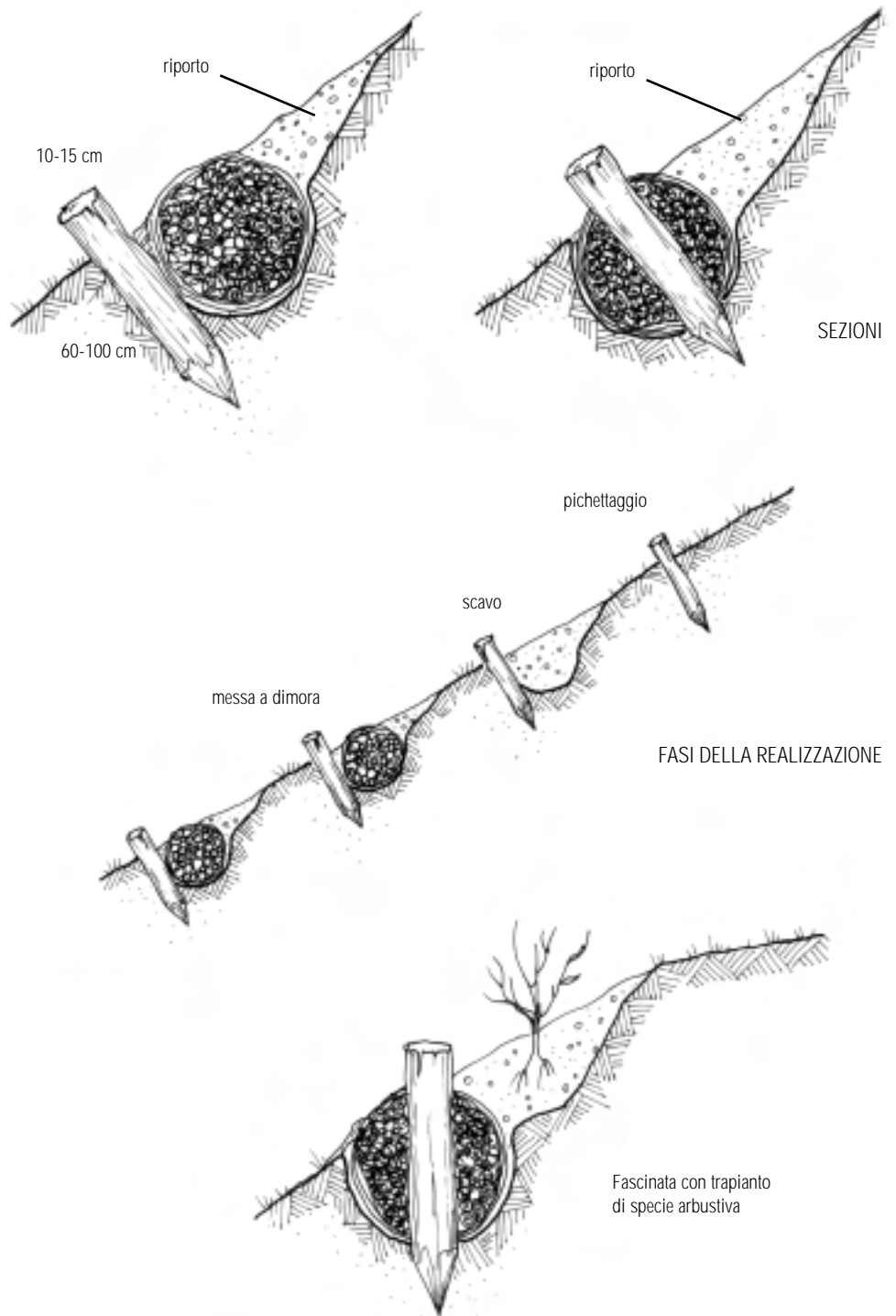




Foto 4.4.6. Fascinata a pochi mesi dalla messa in opera.

Foto 4.4.7 Fascinata su substrato argilloso: messa in opera in superficie con disseccamento del materiale vegetale.

nostri climi di prove sperimentali non sono ancora disponibili, anche se da esperienze simili si possono ottenere indicazioni verso specie quali: *Ligustrum vulgare*, *Sambucus nigra*, *Ulmus minor*, *Cornus sanguinea*, *Hippophae rhamnoides*, *Berberis vulgaris*, *Cytisus scoparius*, *Viburnum lantana*, *Rosa* sp. pl.. Il materiale da utilizzare deve essere sufficientemente lungo, dritto e flessibile, con un diametro non maggiore ai 4-5 cm. Con questa ramaglia si formano dei cilindri composti da almeno 5-6 lunghe verghe (60-200 cm), alternando casualmente le estremità più grosse nelle due direzioni. Questi cilindri sono tenuti assieme da spago o filo di ferro, in modo tale da formare una massa compatta con un diametro di circa 25-30 cm. Le estremità vanno rastremate in diametri più piccoli, per favorire una eventuale sovrapposizione laterale tra fascine. I legacci devono essere distanziati lungo le fascine circa 30-50 cm. La fascina, così preparata, deve essere nel più breve tempo possibile interrata in una trincea appositamente predisposta e poi trattenuta in posto tramite picchetti, meglio se vivi, da posizionarsi nel substrato compatto sottostante. Il fascio di ramaglia deve essere quasi interamente interrato (80-90 % del diametro): in questo modo intercetta e rallenta il deflusso, filtra i sedimenti e rimane umido a sufficienza per poter radicare e svilupparsi. Infine la fascina deve essere ricoperta con materiale sciolto, che deve essere ben sistemato e compattato tra gli interstizi delle talee, a riempire tutti gli spazi ed i vuoti dello scavo. L'epoca migliore per l'installazione delle fascinate è l'autunno, quando le piante entrano in dormienza, per consentire la massima differenziazione di radici avventizie nel periodo invernale e la sopravvivenza delle talee.

La scelta della tecnica, delle specie ed il posizionamento delle fascine vanno valutati con molta attenzione. E' un sistema che si adatta a substrati profondi, sciolti, dotati di pendenze non eccessive. In genere si inseriscono in pendici già sistemate con rete di scolo e/o sistemi meccanici di sostegno (muri di sostegno, gabbionate, ecc.) integrando il sistema di difesa del suolo. Si posizionano lungo le linee di livello con degli interassi verticali, che possono variare tra 1 e 6 m (normalmente 1-3 m), in funzione

delle condizioni locali e della pendenza. Partendo dal basso verso l'alto, le trincee vanno scavate in concomitanza con la preparazione del materiale vegetale, limitando al massimo i tempi di esposizione all'aria e l'essiccamento. La fascina deve essere picchettata con attenzione, specie nelle posizioni laterali di sovrapposizione. La tecnica classica richiede una particolare attenzione nella creazione di sistemi a livello. Dove però sono possibili cedimenti locali dovuti ad eccessi di infiltrazione ed accumulo è possibile dotare la fascinata di una leggera pendenza per favorire lo sgrondo delle acque in eccesso convogliate verso un recipiente predisposto a questo compito.

Rispetto ad altri sistemi di stabilizzazione sottosuperficiale, le fascinate presentano dei vantaggi:

- minor preparazione del sito, legata solo allo scavo della trincea;
- minor disturbo del substrato;
- minore quantità di materiale vegetale richiesto.

E' un sistema che si adatta bene a pendici esistenti, anche in forte erosione.

Problemi

Azione di controllo superficiale

L'azione di stabilizzazione della fascinata risulta essere molto superficiale, almeno nei primi anni dall'impianto ed è comunque legata quasi esclusivamente allo sviluppo del sistema radicale avventizio. Non esiste od è molto limitata, un'azione meccanica diretta del materiale vegetale, in quanto posizionato troppo in superficie e disposto di traverso alla pendice, anche se fermamente ancorato al substrato attraverso i picchetti.

Possibilità di sottoscavo elevata

Specie in presenza di eventi meteorici intensi e di pendenze longitudinali elevate la fascinata può essere sottoscavata. Questo fenomeno può anche essere favorito dal tipo di substrato, specie se sciolto, nonchè da accumuli localizzati di acqua: si può ovviare a questo cercando di migliorare sia l'azione di filtro del deflusso, attraverso paglia o lettiera, entro ed attorno alla fascinata, sia dotando la fascinata di una leggera pendenza trasversale per favorire il deflusso accumulato.

Difficoltà nella scelta del materiale vegetale

Le condizioni climatiche in Emilia-Romagna, (prolungata siccità estiva), limitano, come si è detto la possibilità di utilizzo di specie quali i salici e costringono al ricorso di altre specie quali *Ligustrum*, *Crataegus*, *Prunus*, *Rosa*, che devono però essere valutate con attenzione di caso in caso, anche per limitazioni nell'uso di ordine fitosanitario.

Difficoltà nel reperimento del materiale

Viste le esigenze del materiale richiesto da questa tecnica (elementi lunghi e dritti) vi è molta difficoltà nel reperire grandi quantità di materiale vegetale adatto, in particolare per le specie arbustive.

Costo elevato

La tecnica richiede la raccolta e l'allestimento manuale del materiale con relativa legatura. Questo deve avvenire sempre in contemporanea con lo scavo per evitare disseccamenti. Inoltre è necessario predisporre e posizionare tutta una serie di picchetti (vivi e/o morti), non presenti in altre tecniche.

Epoca di realizzazione

L'epoca migliore per la sua realizzare coincide con il riposo vegetativo delle specie impiegate. Questo limita la possibilità di intervento a periodi piovosi, dove l'accessibilità al versante e l'operatività sono però molto condizionate dal tipo di substrato. Questo limita o impedisce anche il ricorso a mezzi meccanici, permettendo solo un intervento manuale, molto oneroso, in termini di tempi e di costi.

Gradonate

Rappresentano un intervento consolidante utilizzato per rinforzare dei versanti di materiale sciolto. Il consolidamento si realizza attraverso l'azione di sostegno di bran-

che legnose e l'azione legante delle radici di talee o piantine che sono posizionate all'interno di una trincea scavata lungo le curve di livello della scarpata (Fig. 4.4.9). Richiama come principio le terre rinforzate (terre armate), anche se le talee e le branche non possono avere una lunghezza superiore a 1.5-2 m, a differenza delle strisce metalliche delle terre armate. All'opposto però le talee/branche possono radicare, consolidando il versante in modo attivo, cosa non possibile con le strisce metalliche. Questa tecnica ha delle assonanze con le fascinate lungo le curve di livello, da cui però differisce in quanto:

- le talee e le piante sono inserite normalmente alla pendice e non trasversalmente, per cui l'azione di rinforzo ha il giusto orientamento per resistere ai cedimenti;
- non si hanno problemi di fissaggio e picchettamento;
- è possibile inserire altri elementi di rinforzo nell'impianto per accrescerne la resistenza.

Messa in opera

Si hanno tecniche di realizzazione differenti in funzione delle condizioni locali:

- a) durante la costruzione di un riporto/terrapieno:* si possono realizzare periodicamente degli strati di ramaglia, con talee di piante che radicano (tipicamente del genere *Salix*), lunghe fino a 2 m, con un diametro compreso tra 3 e 6 cm, affiancate ed incrociate tra loro con una densità compresa tra 5-10 piante per metro ed inclinati di circa 10°, durante il riporto del materiale di riempimento. Questi "pettini intrecciati" vengono poi immediatamente ricoperti con strati di materiale di riporto, che vengono compattati ed innalzati per uno spessore che è funzione della pendenza, della morfologia e della posizione, ma comunque compreso tra 1 e 3 m. Le estremità delle talee devono sporgere dalla superficie della pendice di almeno 5-10 cm e mai più di 20-25 cm. In associazione allo strato di talee alle volte si impiega della rete metallica, sia sotto che sopra, a formare dei "materassi rinforzati di ramaglia" o uno strato di carta catramata, sia come elemento di difesa della testata dello scavo che di raccolta di acqua di scorrimento superficiale;
- b) su pendici già esistenti:* su pendici in essere, anche in erosione, è possibile realizzare una gradonata, predisponendo innanzitutto lo scavo della banchina, di larghezza variabile tra 50 e 150 cm, entro cui si posizionano a pettine le talee e/o le

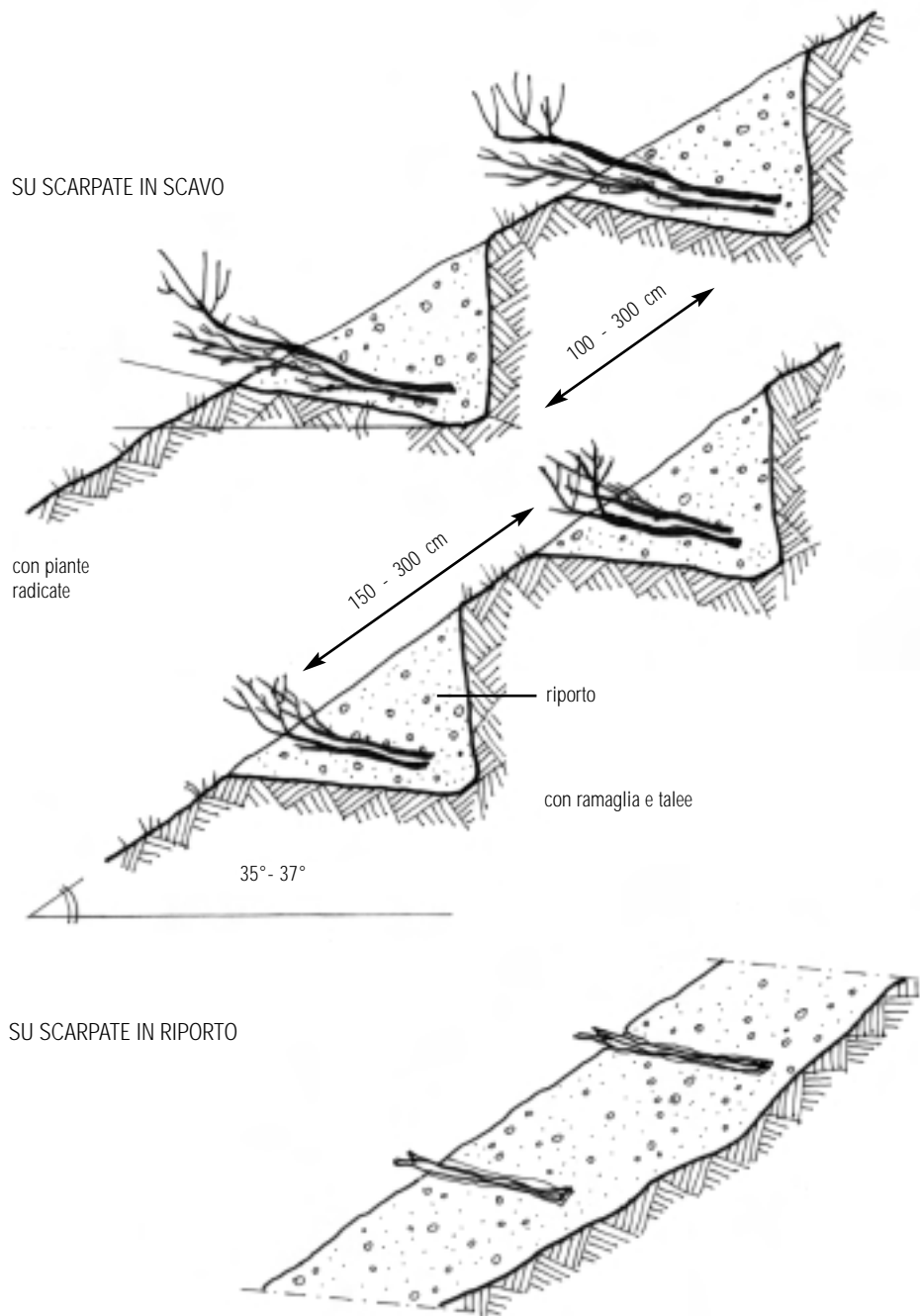


Foto 4.4.8. Cordonata a 3 anni dall'impianto, su substrato argilloso: fenomeni di erosione localizzati, associati al disseccamento delle talee di salice qui utilizzate.

piantine che devono essere immediatamente ricoperte; a tal fine si utilizza il materiale smosso dallo scavo della trincea sovrastante, che deve essere poi compattato con cura. L'intervento si sviluppa dal basso verso l'alto, su pendii già consolidati strutturalmente e già dotati di opere di drenaggio. Questo tipo di intervento ha il limite nelle pendenze: è preferibile non superare mai il 75% (37°), causa la difficoltà nel trattenere fermo lo scavo. In presenza di forti pendenze conviene sempre avanzare a piccoli tratti, che devono essere immediatamente ricoperti. L'interasse verticale tra gli strati di talee varia tra 1.5 e 4.5 m, in funzione della pendenza e della larghezza delle banchine.

Il materiale vegetale per le talee varia in funzione delle condizioni climatiche: elemento base è sempre rappresentato da specie diverse di salice (*Salix alba*, *S. purpurea*, *S. eleagnos*, *S. capraea*, *S. nigricans*, *S. cinerea*, *S. triandra*, *S. apennina*) o da *Laburnum anagyroides*, *Sambucus nigra* e *Ligustrum vulgare*. Ad esso si associano normalmente piantine radicate di arbusti o piccoli alberi come: *Corylus avellana*, *Crataegus monogyna*, *Viburnum opulus*, *Viburnum lantana*, *Sambucus nigra*, *Cornus sanguinea*, *Cornus mas*, *Rhamnus cathartica*, *Frangula alnus*, *Prunus spinosa*, *Hippophae*

Fig.4.4.9. Gradonate - cordonate.



rhamnoides, *Sorbus* spp., *Rosa* sp. pl., *Alnus glutinosa* o di alberi di dimensioni maggiori come *Fraxinus excelsior*, *F. ornus*, *Acer* sp. pl., *Prunus avium*, *Populus tremula*, ecc. Nella scelta delle specie, di volta in volta, bisognerà preventivamente considerare l'area geografica in cui si va ad operare e quindi la specifica fascia fitoclimatica di inserimento (Ubaldi et al., 1996), nonché le condizioni locali microclimatiche, nonché quelle di stabilità della pendice, privilegiando nelle condizioni pendenti una copertura arbustiva e non arborea.

Problemi

Scelta delle specie

Questa tecnica è mutuata da ambiti continentali ed alpini e quindi fa ricorso ad un uso estensivo di specie quali i salici o i maggiociondoli. Per quanto riguarda i salici, esperienze nei nostri climi hanno dimostrato l'impossibilità di un uso generalizzato di queste specie: solo gli ambiti umidi consentono un adeguato sviluppo. In tutti gli altri ambiti le talee di queste specie difficilmente riescono a superare l'anno di vita, disseccando rapidamente. Va comunque privilegiato l'uso di piante radicate, tra quelle sopra menzionate, in associazione alla ramaglia verde, che dovrà essere usata solo come supporto morto. Per il loro reperimento è consigliabile fare riferimento a vivai forestali pubblici o privati, specializzati nella produzione di arbusti ed alberi per interventi a carattere naturalistico. E' sempre preferibile utilizzare materiale proveniente localmente.

Epoca di realizzazione

Nelle nostre condizioni climatiche l'epoca migliore per realizzare l'intervento coincide con il riposo vegetativo delle specie impiegate. Questo è un periodo in cui l'accessibilità al versante e l'operatività sono molto condizionate dal tipo di substrato: ciò limita o impedisce, il ricorso a mezzi meccanici, permettendo solo un intervento manuale molto oneroso in termini di tempi e di costi.

Tecnica

In molte situazioni l'orografia e la morfologia limitano la possibilità di interventi meccanici ordinari. E' necessario ricorrere a mezzi speciali, adatti alle condizioni estreme, come il ragno, mezzi però non molto diffusi nei nostri ambiti collinari – montani, con conseguenti difficoltà organizzative nella predisposizione dei cantieri.

Materiali

Grande è la quantità di materiale vegetale richiesta, specie per quanto riguarda il materiale per le talee. E' perciò importante valutare bene le necessità e quindi predisporre delle fonti di approvvigionamento adeguate, visti anche i problemi di tipo ecologico, oltre che di reperimento sul mercato.

Costi

Il costo di questa tecnica risulta essere molto elevato, specie per quanto riguarda i versanti già in essere, i quali molte volte, possono essere lavorati solo manualmente.

4.4.3.3 SISTEMI DI STABILIZZAZIONE PROFONDA

Rappresentano l'insieme dei sistemi utilizzati per sostenere meccanicamente porzioni anche profonde di scarpate. A differenza dei metodi precedenti questi hanno una funzione statica, che non può in alcun modo essere sostituita nel tempo dalla vegetazione. Quest'ultima può avere solo una funzione accessoria di mascheramento e di integrazione paesaggistico-ecologica. A questo riguardo è importante sottolineare che il progettista di ambiti estrattivi, a differenza di altri interventi, ha molta libertà di scelta sia nella coltivazione che nella risistemazione: questa possibilità deve concretizzarsi in progetti che minimizzino l'uso di queste strutture, visti i costi di realizzazione e la periodica manutenzione che questi richiedono. Tra tutti i possibili metodi a disposizione si sono individuati quelli ecologicamente più compati-

bili: muri a secco, gabbionate e palificate, mentre per tutti gli altri si rimanda a testi specialistici.

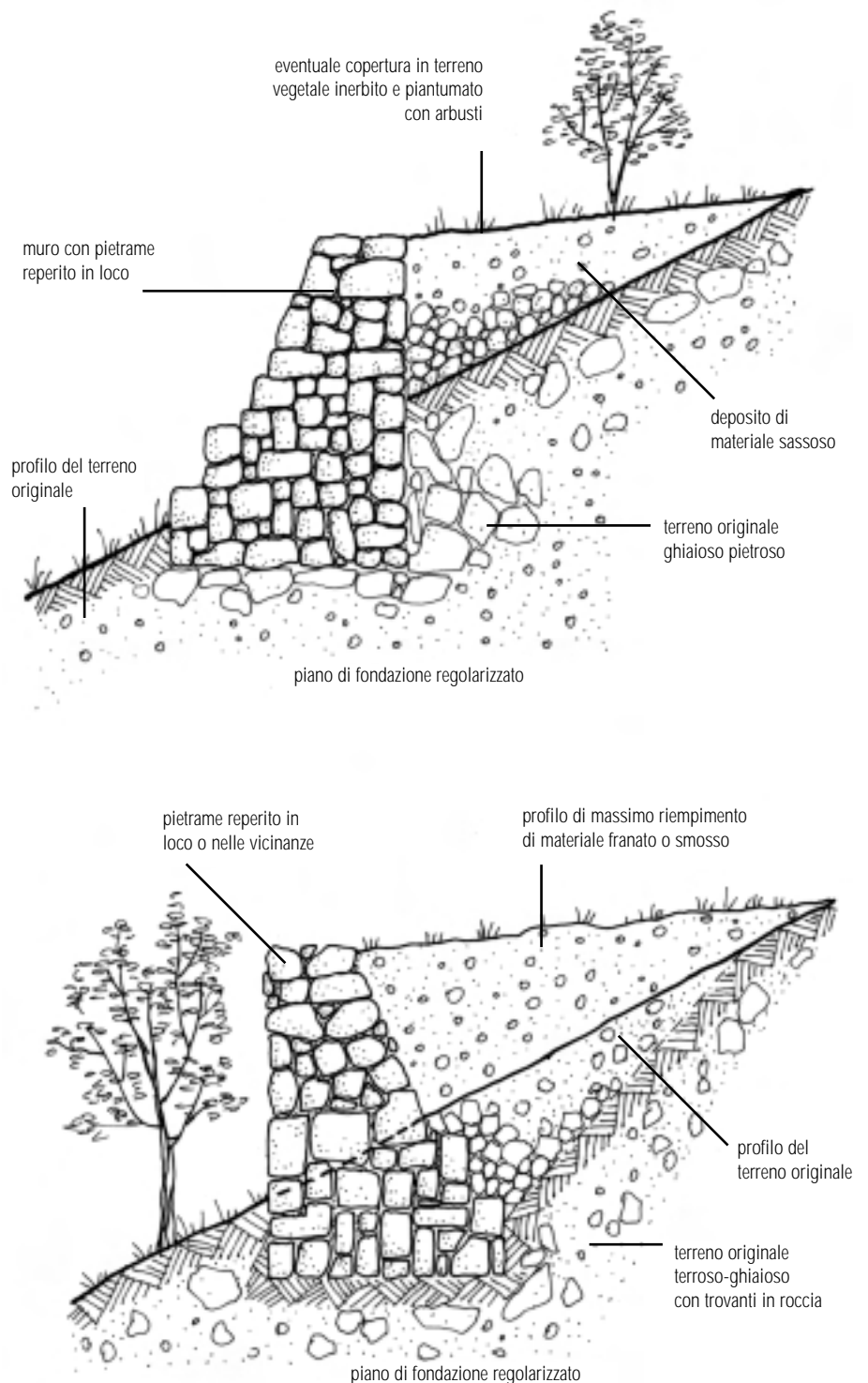
Muri a secco

Sono strutture che lavorano a gravità, formate da elementi tra loro incoerenti e quindi resistono solo a compressione e taglio (Fig. 4.4.10). A volte sono utilizzati per delimitare delle infrastrutture come le vie di accesso. Vengono preferiti quando si ha una buona disponibilità in sito di materiale roccioso di dimensioni medio-grandi.

Messa in opera

Sono realizzati approntando un'area di appoggio salda e compatta a ridosso immediato della scarpata che deve essere poco disturbata. Ad essa va associato un riempimento posteriore di materiale sciolto, ben compatto, che deve raccordarsi con la

Fig.4.4.10. Muretti a secco.



scarpata. L'altezza massima dei muretti a secco non deve mai superare 1-1.5 m. La struttura viene realizzata ammassando pietre e massi disponibili in sito, che devono avere una dimensione compresa tra 25 e 10 cm, posizionando gli elementi più grossi alla base. Come regola è necessario che ogni masso si appoggi ad almeno tre punti di contatto con lo strato sottostante, posizionando il baricentro del masso stesso in basso e dotando ogni strato di una certa pendenza verso il piede della pendice. La faccia esterna del muro deve presentare comunque una inclinazione di 1:6 verso monte. Essendo formati da massi senza leganti, queste strutture consentono un facile sgrondo delle eventuali falde posteriori. A tale riguardo è importante predisporre un sistema di raccolta ed allontanamento controllato delle acque di sgrondo e filtrazione, per evitare erosioni al piede e sottoscavi, che possono mettere in pericolo la stabilità della struttura. Entro questa struttura è possibile inserire talee di specie a facile radicazione che consolidano la pendice posteriore, facilitando anche l'allontanamento di eventuale acque ipogee. Nel riempimento posteriore compattato è anche possibile inserire piantine radicate. Per le specie di rimanda al punto precedente.

Problemi

Reperimento del materiale

Sono strutture che si possono realizzare solo in siti in cui abbondano del materiale lapideo adeguato. Molte volte il riuso di questi materiali evita i problemi del loro smaltimento.

Rigidità strutturale

Sono strutture che non riescono ad adattarsi a possibili assestamenti od erosioni delle fondamenta e quindi possono creare problemi di manutenzione, specie in presenza di movimenti di terra e del mancato controllo delle acque di scolo.

Costi

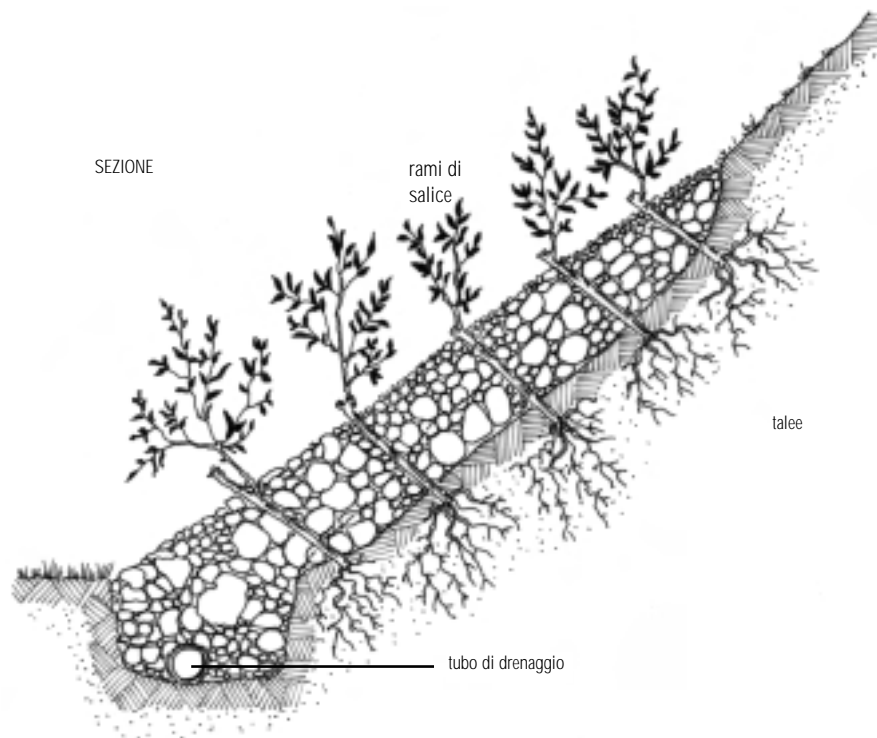
Essendo una struttura che deve essere realizzata a mano, presenta dei tempi e dei costi di realizzazione elevati. In certi ambiti si è cercato di limitare gli oneri sostituendo il muro ben strutturato con un cumulo di massi posizionati alla rinfusa, realizzati attraverso l'uso di grandi pale gommate: si hanno a questo riguardo delle riserve, sia per problemi statici, sia per problemi paesaggistici, vista la difficoltà di rivegetare questi cumuli in via di assestamento, che di sicurezza.

Cunei filtranti

Sono strutture da realizzare al piede dei pendii con la duplice funzione di favorire il drenaggio delle acque di deflusso (cfr. Cap. 4.3) e/o sostenere staticamente la pendice inclinata. Sono realizzate solo su pendici molto inclinate (più facilmente in frana), lunghe (dove si accumula più acqua in profondità) ed in corrispondenza di tagli di pendio (Fig. 4.4.11). Sono opere di costo variabile in funzione dell'entità delle strutture portanti, realizzate comunemente con muretti a secco di varia inclinazione e forma. Hanno la caratteristica di non richiedere manutenzioni ordinarie o straordinarie nel lungo periodo.

Messa in opera

La realizzazione prevede un preventivo scavo con modellamento e raccordo con il profilo esistente. Il volume liberato viene poi riempito a strati con materiale grossolano (massi e pietre con funzione di sostegno) e con materiale fine (ciottoli, pietrisco, ghiaia, sabbia grossolana, per riempire i vuoti), ma comunque permeabile, fino a raggiungere spessori compresi tra 0.6-3 m ed una pendenza in genere minore di quella del pendio preesistente. A questo materiale inerte si può associare, in superficie, parte del materiale pedogenizzato superficiale precedentemente escavato, per favorire una successiva rapida rivegetazione. Sulla massa permeabile può poi essere predisposta una piantagione di talee o barbatelle (cioè talee radicate) di specie consolidanti a rapido ricaccio. Queste talee, o anche piante radicate, possono avere lunghezze diverse in



funzione della profondità dello scavo e del riempimento. Al piede del cuneo deve essere predisposto una trincea ove posizionare il sistema di raccolta ed allontanamento delle acque raccolte. Questo può essere risolto attraverso drenaggi tubolari, o fosse drenanti, dotate di una pendenza longitudinale e raccordati al sistema idraulico di scolo. Per aumentare le capacità di sostegno del cuneo è possibile associare strutture come muretti, terrazzamenti o scogliere in pietrame, variamente conformati, in relazione alle condizioni locali. E' un sistema parzialmente o totalmente meccanizzabile, in funzione della presenza di un eventuale muretto di sostegno associato.

Problemi

Disponibilità di materiale litoide adeguato

Un limite è rappresentato dalla difficoltà di reperimento di pietre e sassi adatti nelle vicinanze dell'area da sistemare. Questo comporta dei costi aggiuntivi, dovuti all'acquisto ed al trasporto, tali da rendere l'operazione molto onerosa.

Costi

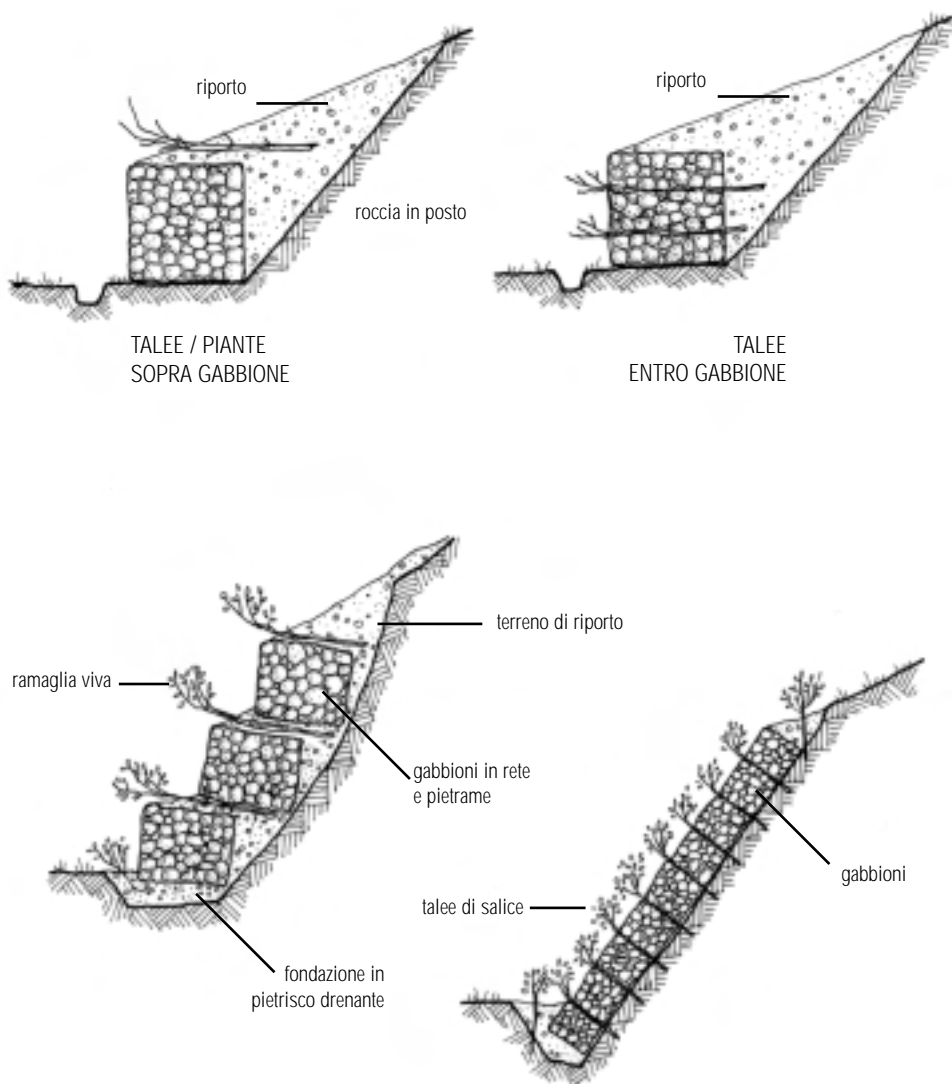
Nel caso si associ al cuneo il muretto a secco di sostegno aumentano decisamente i costi sia per il reperimento di materiale adeguato sia per la sua messa in opera.

Gabbionate

E' una tecnica di stabilizzazione, derivata dagli interventi sui fiumi e torrenti, che si è imposta anche nelle sistemazioni di scarpate, specie quelle caratterizzate da elevata dinamicità. Le gabbionate hanno infatti una buona elasticità e capacità di adattamento a limitati movimenti nel pendio, conseguenti alle caratteristiche mineralogiche del substrato. La loro diffusione è anche in relazione al costo contenuto ed alla relativa facilità e velocità di realizzazione. Sono preferite ai muri a secco quando in sito si ha disponibilità solo di materiale di piccole dimensioni.

Messa in opera

La tecnica prevede innanzitutto la scelta del tipo di struttura necessaria tra quelle disponibili, in funzione delle specifiche richieste. Si deve allora predisporre una base di appoggio salda (sia in terra, che in roccia o in conglomerato cementizio) e su questa si posizionano i gabbioni in filo di ferro zincato, a doppia torsione di 2.7-3 mm di diametro (Fig. 4.4.12). I singoli elementi devono essere aperti e legati tra di loro; poi



vanno riempiti con del pietrame e dei sassi di materiale coerente, non friabile, di dimensioni che variano tra i 10 ed i 30 cm, comunque superiori alle maglie della rete del gabbione (in genere compresa tra 6-8 x 10-12 cm). Eventuali tiranti in filo di ferro trasversali sono posizionati tra le facce del gabbione, per evitarne un'eccessiva deformazione nel riempimento. Il gabbione riempito deve essere infine richiuso e la rete superiore fissata fermamente lungo gli spigoli.

Le gabbionate possono essere rivegetate e mascherate:

- con interventi superficiali: si posiziona sulla faccia superiore un adeguato strato di materiale sciolto da raccordare con il pendio retrostante, su cui possono essere inserite delle talee, barbatelle o piantine;
- con interventi interni al gabbione: nella fase di riempimento con i sassi periodicamente può inserirsi una serie di talee o di piante radicate, che vanno posizionate con cura, in modo che le estremità posteriori o il sistema radicale sia ben inserito nel substrato retrostante, per potere affrancarsi ed esercitare un'azione positiva, sia nel sostegno che nel richiamo di acqua di falda.

Problemi

Disponibilità di materiale litoide adeguato

Un limite alla diffusione dei gabbioni è rappresentato dalla difficoltà di reperimento di pietre e sassi adatti nelle vicinanze dell'area da sistemare. Questo comporta dei costi aggiuntivi dovuti all'acquisto ed al trasporto, che possono rendere l'operazione molto onerosa.



Durata

La durata dei gabbioni viene normalmente valutata in almeno 20 anni, intervallo di tempo limitato rispetto ad altre tecniche, con un conseguente aumento nei costi di manutenzione periodica.

Drenaggio

Il gabbione ha la caratteristica di essere molto permeabile all'acqua: questo limita i possibili problemi legati a spinte idrostatiche ma nel contempo espone la struttura, specie in scarpata, a possibili scavi e sottoscavi localizzati dovuti a deflussi non controllati. E' quindi necessario associare a queste strutture un adeguato sistema di regimazione ed allontanamento delle acque di risulta.

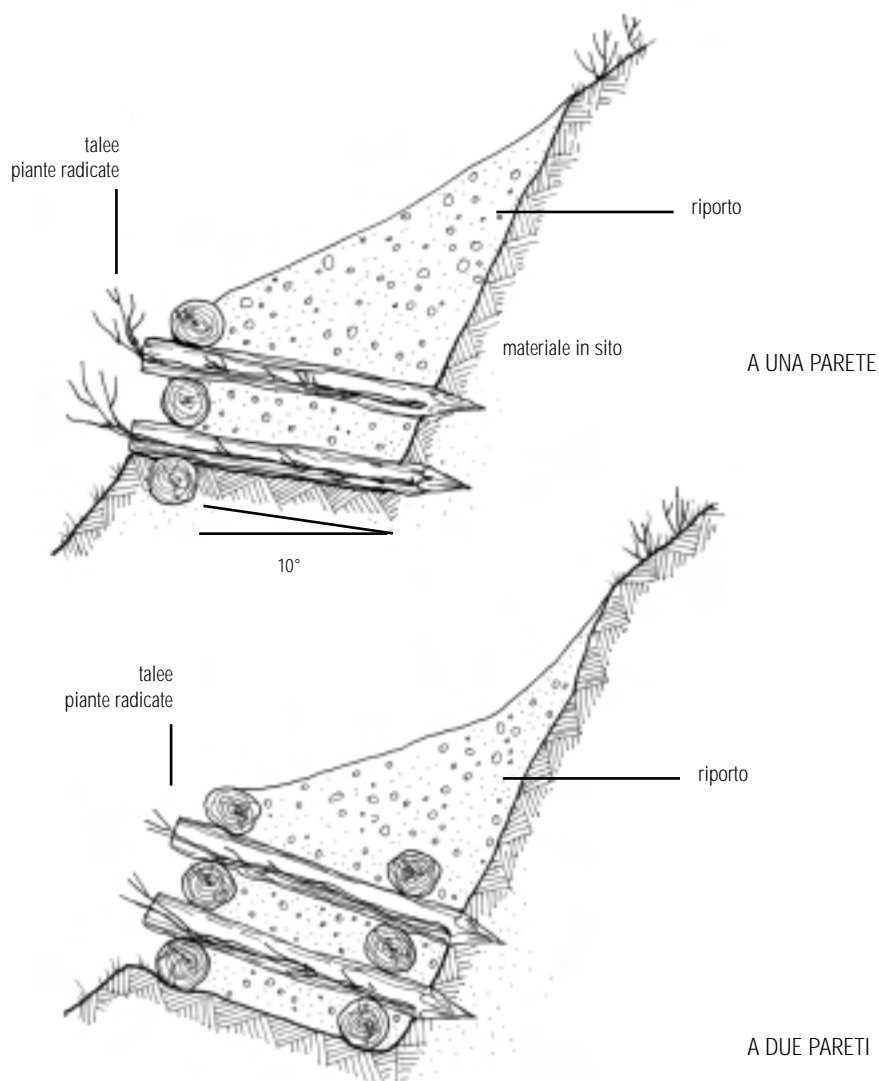
Palificate

Sono strutture di sostegno in legname, utilizzate per il consolidamento di pendici e di fenomeni franosi, per moderare i profili e ridurre le pendenze e per contenere il piede di riporti o scarpate (Fig. 4.4.13). Sono sistemi autoportanti, dotati di una certa capacità di adattamento a piccoli movimenti di assestamento. Il materiale utilizzato è rappresentato da tondame di specie a lenta alterazione (tipicamente castagno, ma anche legnami impregnati o trattati), di diametro compreso tra 15 e 30 cm. Sono sistemi capaci di resistere anche in presenza di rotture negli elementi della struttura.

Messa in opera

Si deve eseguire uno scavo nel piano di posa, fino a raggiungere una stratificazione stabile e compatta. Lo scavo deve essere inclinato di circa 10° verso l'interno. In questo si posiziona il tondame longitudinalmente, parallelo al pendio; poi si appoggiano gli elementi trasversali, distanti tra loro circa 1.5-2 m, collegandoli ai primi tramite perni in tondino di ferro (di 10 mm di diametro) o tramite graffe. In aggiunta, nei punti di contatto tra i legni si dovrebbero approntare dei piccoli incastri. La struttura poi si ripete, fino allo strato terminale, formato da un ordine di tondame longitudinale. Parallelamente al posizionamento del tondame, in corrispondenza di ogni strato longitudinale, si esegue un riporto di materiale sciolto, mentre per ogni strato trasversale si posizionano delle talee o meglio delle piantine radicate, associate in testata a sassi, necessari per limitare lo svuotamento. Le palificate possono essere realizzate ad una od a due pareti, intendendo con pareti lo strato di elementi longitudinali presenti. Il tipo a due pareti richiede in genere scavi maggiori, ma resiste a spin-

Fig. 4.4.13. Palificate:
A) ad una parete;
B) a due pareti.



te superiori. La facciata esterna deve essere preferenzialmente inclinata di almeno 10° , per limitare i fenomeni di erosione.

E' necessario fare molta attenzione ai problemi di sgrondo della struttura: da esperienze straniere risulta che strutture ben drenate hanno una vita più lunga, mentre strutture con problemi di drenaggio possono causare un aumento eccessivo della spinta idrostatica esercitata a monte.

Problemi

Svuotamento della struttura

Bisogna fare attenzione a fenomeni di erosione, dovuti ad acqua di ruscellamento che, infiltrandosi nella struttura, asporta il materiale di riempimento, specie nella parte alta. E' quindi necessario associare a queste strutture un sistema di allontanamento controllato delle acque di scorrimento. Un altro accorgimento per limitare lo svuotamento è posizionare dei sassi in corrispondenza della testata degli elementi trasversali.

Attecchimento delle talee

Le talee inserite nella struttura, soprattutto se di salice, possono trovare un ambiente troppo siccitoso inadatto per radicare e svilupparsi, vanificando questo intervento, che generalmente accompagna la costruzione della palificata. A tale riguardo sono certamente da preferire piantine radicate di specie frugali che possono adattarsi a queste condizioni. Si rimanda pertanto alle specie in precedenza citate.

Fessurazioni e cedimenti nel fondame

Le spinte e gli sforzi sulla struttura possono causare fessurazioni nel fondame, specie in corrispondenza dei collegamenti tra gli elementi. Questo aumenta la veloci-

Foto 4.4.10. Fenomeni di sottoscavo di una palificata, realizzata su un pendio sabbioso.



tà di alterazione del legno e la possibilità di cedimenti. Molta attenzione deve perciò essere posta nella progettazione, evitando che la struttura sia sottoposta a sforzi eccessivi, che amplificano il problema. Vista la capacità di adattamento della struttura a cedimenti o movimenti strutturali, molta attenzione deve essere anche posta nei punti di giunzione tra i diversi elementi longitudinali: sono da preferire unioni “a fetta di salame”, rispetto a sistemi ad incastro, per limitare sforzi e cedimenti localizzati.

Ancoraggio insufficiente

Specie nei sistemi a singola parete, su substrati dinamici, quali possono essere quelli argillosi, si possono avere dei problemi di ancoraggio e di cedimento, specie se non si è ben drenata la struttura.

Difficoltà nei calcoli strutturali

Esistono difficoltà nel quantificare le capacità di resistenza di questo tipo di struttura, che perciò deve essere usata con ampi margini di sicurezza.

4.4.3.4 MANUTENZIONE DEGLI INTERVENTI

Oltre che ad una corretta progettazione e realizzazione è sempre necessario, con questo tipo di interventi, prevedere una fase di manutenzione, che copra i primi anni dopo l'impianto. E' in questa fase, infatti, che possono manifestarsi problemi, sia nella componente organica che in quella inerte. E' perciò sempre necessario definire un piano di manutenzione nel breve periodo, per poter controllare ed affrontare questi aspetti. A questa fase iniziale (o pre-collaud) è poi necessario associare una fase di controllo nel medio periodo (cfr. Cap. 4.8): si tratta infatti quasi sempre di interventi di tipo ingegneristico che solo in particolari casi hanno la possibilità di autoaffermarsi nella loro componente vegetale e rendersi autonomi. Nella maggior parte dei casi citati, invece, la componente inerte manterrà nel tempo una funzione statica importante, solo in parte demandata alla vegetazione. Di conseguenza con una periodicità variabile, in funzione delle condizioni stagionali e della qualità del materiale impiegato, sarà sempre necessario intervenire con manutenzioni ordinarie e straordinarie. Questo è certamente un elemento limitante la diffusione di queste tecniche: solo soggetti con disponibilità di risorse possono organizzare una gestione continua di queste opere. Nel caso di usi naturalistici o estensivi è perciò prefe-

ribile limitare al massimo questo tipo di interventi, privilegiando risistemazioni con tecniche meno impegnative. Scelte errate possono innescare cedimenti strutturali che poi possono ripercuotersi sulle zone circostanti.

Interventi sulla componente vegetale

Recupero fallanze

Nei primi anni dopo l'impianto delle specie vegetali si possono avere percentuali di fallanze elevate, in funzione del tipo di materiale impiegato (talee) e delle condizioni stazionali predisposte (substrati minerali). A differenza dei normali interventi di rimboschimento, la vegetazione inserita in questo tipo di opere esercita quasi sempre funzioni di contenimento, sostegno e difesa molto importanti: le fallanze devono perciò essere recuperate nell'immediato, ripristinando la densità ottimale. Nei primi anni dopo l'impianto è perciò necessario predisporre un annuale intervento di sostituzione delle piante morte. Nel caso le fallanze siano legate all'azione di patogeni è necessario prevedere la sostituzione delle specie attaccate con specie diverse, mentre nel caso di danni dovuti ad animali superiori (lepri, cinghiali, caprioli, cervi, ecc.) è necessario invece predisporre, assieme al reimpianto, degli interventi di difesa, sia individuali ("tree-shelter") che collettivi ("chiudende") per limitarne gli effetti.

Risemine

Anche la semina di essenze erbacee può avere risultati limitati in relazione a fattori diversi: qualità del materiale, condizioni stazionali o qualità e tempestività dell'intervento. E' anche in questo caso necessario predisporre da subito, anche nell'annata stessa dell'impianto, un intervento di risemina per ripristinare le condizioni di copertura ottimali ed evitare l'insacco di processi di erosione superficiali. Può essere utile associare alla risemina un intervento di miglioramento del substrato per superare eventuali limitazioni della stazione.

Sfalci

A parte la prima stagione vegetativa (fase di impianto e stabilizzazione) è preferibile prevedere un periodico intervento di sfalcio della copertura erbacea presente nella zona di intervento. Quest'operazione è utile per vari aspetti: favorisce indirettamente le specie legnose messe a dimora, togliendo loro, almeno temporaneamente, i competitori per i nutrienti e la luce; favorisce l'approfondimento ed il potenziamento degli apparati radicali; facilita la diversificazione floristica, limitando l'azione competitiva delle specie erbacee più "aggressive", liberando nicchie per altre specie. Questo consente la formazione di un cotico erboso più denso e compatto, in grado di esercitare un'azione antierosiva più efficiente.

Potature

L'intervento di potatura su arbusti ed alberi rappresenta nei primi anni uno strumento importante per favorire un maggiore sviluppo radicale ed una forma epigea adeguata alle esigenze di protezione. E' perciò necessario prevedere un certa percentuale di "sgarrettatura" su piantine e talee messe a dimora (cfr. Cap. 4.8).

Interventi sulla componente inerte

Sostituzione elementi e riposizionamento del materiale di riempimento

Gli elementi inerti possono per varie ragioni subire dei danni (caduta massi, cedimenti, errori di progettazione, di posizionamento). E' necessario perciò intervenire per sostituire gli elementi difettosi, per ripristinare le condizioni di lavoro ottimali e predisporre il riposizionamento del materiale eventualmente disperso. Questo è particolarmente importante nel breve-medio periodo quando la vegetazione non ha

ancora raggiunto il pieno sviluppo e la piena funzionalità, demandando gran parte dell'azione di contenimento e difesa alle strutture inerti. E' perciò sempre necessario prevedere e contabilizzare una percentuale di sostituzione nei primi anni dalla realizzazione.

Consolidamento

Molte volte, sia il progetto che la sua realizzazione risultano essere non adeguati alle condizioni locali. E' perciò necessario prevedere una percentuale di imprevisti legata all'eventuale consolidamento delle opere realizzate. Tale voce di spesa sarà proporzionale alle condizioni orografiche ed alla funzione e all'importanza che l'opera riveste. In genere, questo intervento si esaurisce già nei primi anni, in quanto eventuali difetti strutturali si manifestano da subito e subito devono essere tamponati e contrastati.