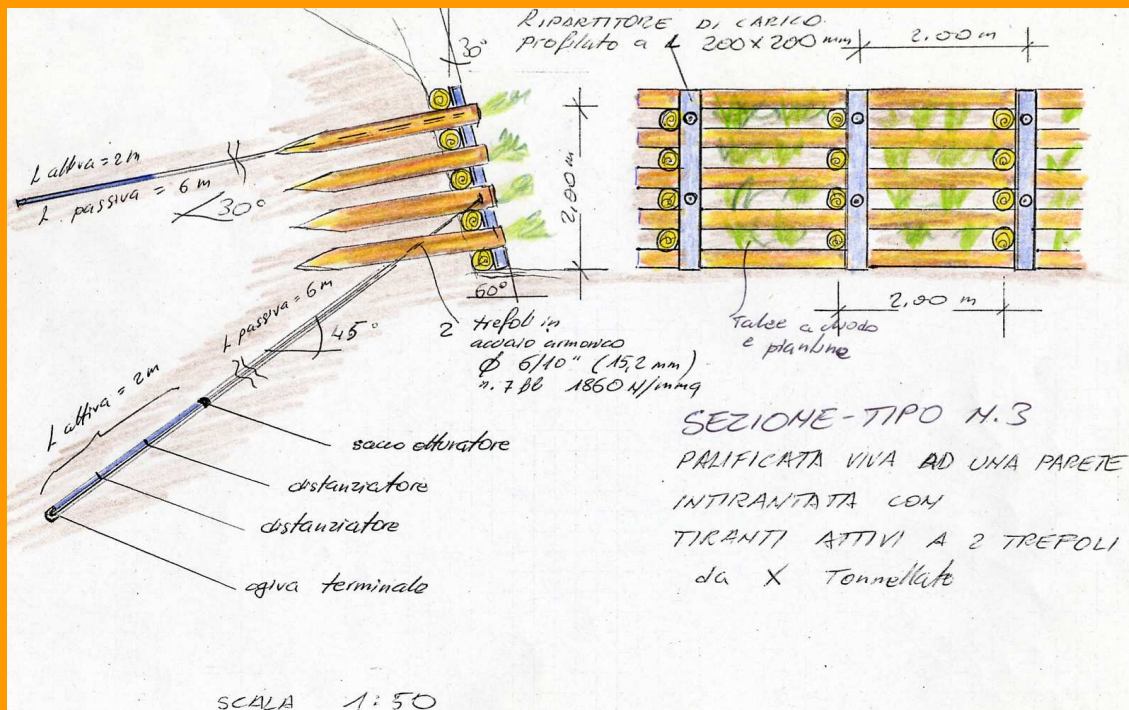




Impiego di tecniche integrate di Ingegneria Naturalistica e Geotecnica per la stabilizzazione di versanti.

Studio e applicazione a casi reali



SIMONA SISMONDINI

CLAUDIO SCAVIA

LUCA DE ANTONIS

VINCENZO MARIA MOLINARI

La presente pubblicazione è stata elaborata a partire dalla omonima tesi specialistica di laurea di Simona Sismondini in Ingegneria Edile del 16.03.2010, ed è frutto della collaborazione tra la Regione Piemonte, Direzione Ambiente, Settore Sostenibilità, Salvaguardia ed Educazione Ambientale e il Dipartimento di Ingegneria Strutturale e Geotecnica del Politecnico di Torino.

Il rapporto di collaborazione si concretizza attraverso approfonditi studi in materia di stabilità dei pendii naturali con l'impiego di tecniche naturalistiche.

Analisi e studi vengono costantemente riferiti ed applicati a casi reali.

Questo lavoro è stato redatto da Simona Sismondini e Luca De Antonis, funzionario tecnico del sopra citato Settore regionale, con il rispettivo e congiunto coordinamento di Claudio Scavia, professore ordinario di Geotecnica del Politecnico di Torino e di Vincenzo Maria Molinari, dirigente del Settore regionale

A vario titolo hanno collaborato:

Matteo Massara, funzionario tecnico del settore regionale;

Viola Erdini, funzionario tecnico del settore regionale;

CAPITOLO 1

EVOLUZIONE DELLE TECNICHE DI INGEGNERIA NATURALISTICA NEL CONSOLIDAMENTO DI PENDII

1.1 INTRODUZIONE: DEFINIZIONI E GENERALITA'

L'Ingegneria Naturalistica è una disciplina che riguarda la realizzazione di opere di tipo territoriale e ambientale, quali la regimazione idraulica e il drenaggio delle formazioni, la difesa spondale ovvero la stabilizzazione di alvei e impluvi, la difesa passiva dal pericolo di caduta massi, la difesa dei terreni dall'erosione superficiale, la ricostruzione strutturale dei versanti, ma anche la ricostituzione di ecosistemi e habitat, operando sulla gestione della compagine vegetale e con l'uso di materiali naturali quali il legno, la pietra e materiale vegetale vivo (figura 1).

Benchè di origine antica, oggi giorno le tecniche costruttive proposte dall'Ingegneria Naturalistica diventano più attuali che mai, dal momento che le problematiche legate alla stabilità dei pendii si manifestano in numero sempre maggiore, vista la periodicità di eventi meteorologici intensi.

Nel contempo, si è sviluppata da parte dell'uomo una particolare attenzione nei confronti dell'ambiente naturale in cui vive: per troppo tempo, infatti, la protezione dell'ambiente è rimasta in secondo piano rispetto allo sviluppo scientifico e tecnologico, poichè se da una parte il progresso ha portato benessere e ricchezza, dall'altra ha determinato, e tuttora crea, pericoli e rischi sempre più gravi e sempre meno controllabili.

Premettendo che esistono dissesti di origine naturale legati all'evoluzione dei suoli e delle condizioni climatiche, è possibile affermare che spesso le attività antropiche favoriscono e scatenano i fenomeni di degrado che stanno alla base dei problemi connessi con la tutela ambientale e dei paesaggi.

L'uomo ha spesso fatto un uso incontrollato del suolo, lo ha modificato secondo le sue esigenze senza tener conto dei risvolti negativi che questo poteva avere sull'ambiente stesso: lo ha reso più vulnerabile impermeabilizzando il suolo, disboscando o non gestendo le aree boscate, canalizzando i corsi d'acqua, infrastrutturando le sponde. La mancata gestione della rete di smaltimento secondaria delle acque superficiali può inoltre considerarsi come una delle cause innescanti di molti fenomeni di instabilità dei pendii.

Molte discipline si sono occupate e si occupano tuttora della tutela ambientale ma, tra tutte, è in quella tecnologica che si inserisce l'Ingegneria Naturalistica.

Essa promuove l'impiego di materiali rinnovabili e biologici capaci di assicurare la ricostruzione del manto vegetale, il consolidamento dei pendii, il trattenimento del suolo e delle acque, il reinserimento ambientale e paesaggistico.

Uno dei principi fondamentali che stanno alla base di questa disciplina è quello di utilizzare il materiale vegetale come materiale da costruzione, senza per questo introdurre vegetazione alloctona o non compatibile con il territorio naturale.

Un ulteriore principio enunciabile riguarda la possibilità di applicazione di queste tecniche dove le caratteristiche delle formazioni interessate lo consentano e permettano la sua sostituzione alle soluzioni tradizionali di Ingegneria Civile.

Va infatti precisato che i metodi di ripristino proposti dall'Ingegneria Naturalistica non possono essere considerati validi per qualunque tipo di problema, nè tantomeno possono sempre sostituirsi alle opere tradizionali.

L'opera "tradizionale", che nel presente lavoro si identifica come quella realizzata con murature in calcestruzzo, talvolta rappresenta l'unico rimedio possibile a fronte di immediate esigenze di messa in sicurezza di dissesti che si originano attraverso ingenti spinte attive da parte dei terreni coinvolti. L'utilizzo dell'Ingegneria Naturalistica è da considerarsi "sostitutiva" alle tecniche tradizionali solo qualora si possano conseguire risultati strutturalmente analoghi, operando attivamente sul miglioramento delle proprietà geotecniche dei terreni e ottenendo nel tempo – con lo sviluppo della componente vegetale – configurazioni stabili e forse anche migliori sul piano estetico, valorizzando le caratteristiche del contesto naturale.



Figura 1
Esempi di Ingegneria Naturalistica: a) consolidamento di un pendio; b) regimazione di un corso d'acqua.

Il materiale vegetale vivo viene spesso impiegato in abbinamento con materiali inerti non cementizi, come pietrame e massi, terra, legname, ferro e acciaio, fibre vegetali e sintetiche.

Il materiale vegetale vivo rappresenta l'elemento essenziale delle opere naturalistiche, in quanto ha l'importante compito di contribuire alla resistenza dei manufatti realizzati con materiali inerti.

Le costruzioni in legname e pietrame svolgono la funzione, una volta che il pendio è stato rimodellato, di fornire la resistenza necessaria al contenimento delle spinte del terreno a tergo dell'opera stessa. Tuttavia, con il passare del tempo, l'esposizione agli agenti atmosferici e l'usura meccanica provocano un deterioramento di tali materiali e un decadimento in termini di resistenza offerta. Gradualmente però si attiva l'azione del materiale vegetale vivo, poichè è proprio l'apparato radicale delle piante sviluppatosi all'interno dell'opera di sostegno che va sostituire la componente di resistenza persa con il deterioramento dei materiali inerti.

Si considerano ora più dettagliatamente i materiali maggiormente utilizzati per realizzare opere d'Ingegneria Naturalistica

Tra gli elementi vivi si annoverano i miscugli di specie erbacee, piantine a radice nuda o in contenitore e talee di specie arbustive o arboree (figura 2).

Le specie erbacee sono impiegate sotto forma di miscugli di semi caratterizzati da una più o meno spiccata pluri specificità.

Come per tutti gli elementi vivi bisogna prestare attenzione al periodo vegetativo: il non rispetto di tale periodo pregiudica l'attecchimento e lo sviluppo delle specie vegetali messe a dimora. Per gli inerbimenti, che avvengono con lo sviluppo di erba da semente, tale periodo si traduce nella fase primaverile, fuori dal rischio di gelate, e in quella autunnale, prima dell'analogo calo delle temperature. La piena estate, come l'inverno, risultano essere periodi inidonei a tale pratica.

La formazione della cotica erbosa avviene attraverso la semina a spaglio oppure con la tecnica dell'idrosemina

Anche per la messa a dimora di piantine a radice nuda o in contenitore occorre rispettare la stagionalità, che dipende dalla quota altimetrica del sito e dalla sua esposizione. Questo tipo di materiale viene sviluppato in vivaio e maggiormente utilizzato quando si vogliono accelerare i processi di rinaturalizzazione. Per le stesse ragioni si può optare per l'uso di talee.

Una talea è un segmento di fusto separato dalla pianta madre capace di produrre radici e in grado di rigenerare un altro esemplare, a volte con sviluppi considerevoli ed in breve tempo. I salici sono le specie arboree utilizzate per la stragrande maggioranza degli interventi dato il loro elevato indice di attecchimento e la loro velocità nello sviluppo dell'apparato radicale.

Le talee possono avere diverse dimensioni e sono gli elementi di materiale vivo tra i più utilizzati nelle opere di Ingegneria Naturalistica, hanno capacità di rapido attecchimento e sviluppo, resistono a climi

privativi, ma occorre rispettare i tempi di messa a dimora avendo cura di effettuare tale operazione durante il periodo di riposo vegetativo.

La dimensione della talea determina la capacità della pianta a resistere per un lungo periodo (se ben conservata prima della messa a dimora e se ben interrata nelle strutture) quasi senza irrigazione.



Figura 2

Esempi di messa a dimora di materiale vegetale vivo.

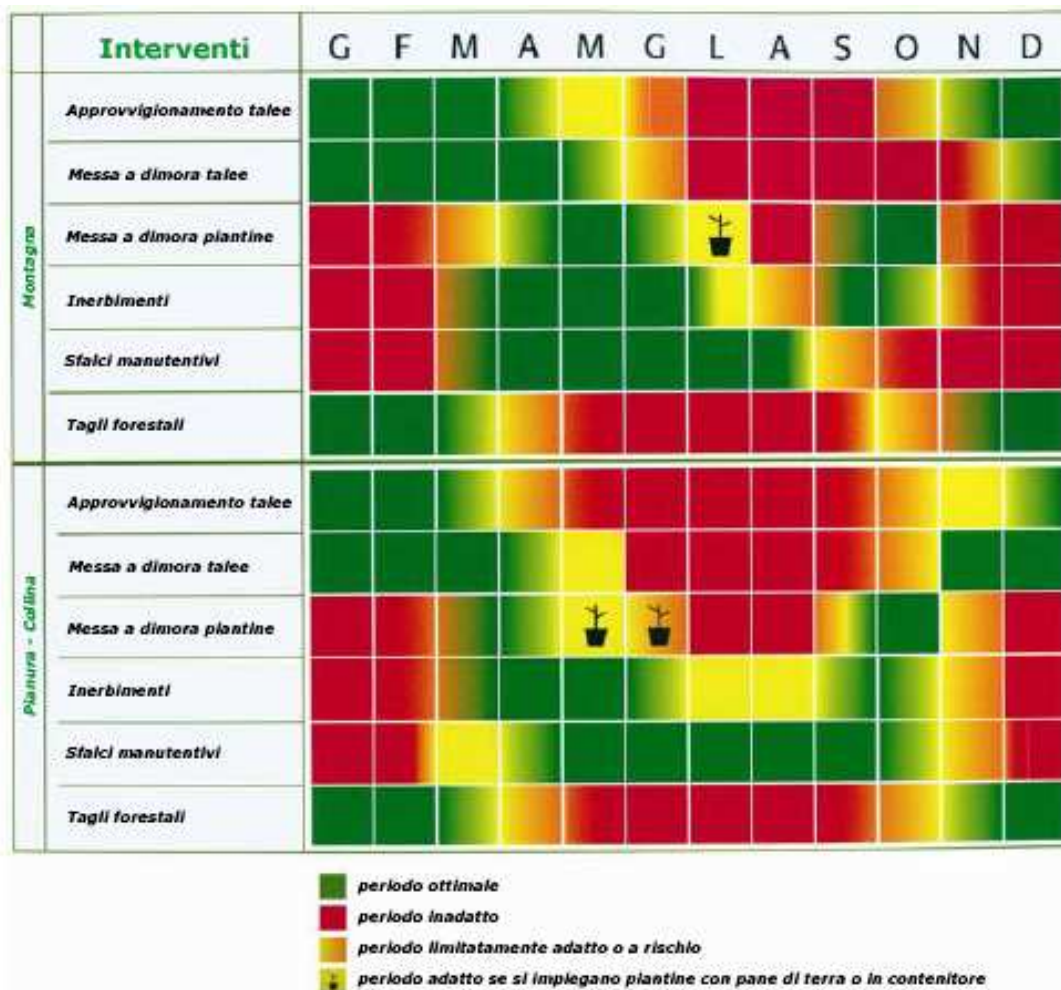
a) tecnica di inerbimento mediante idrosemina; b) messa a dimora di piantine radicate; c) talee posizionate orizzontalmente nello spazio a disposizione tra le file di correnti in legno; d) talee innestate nel terreno mediante la tecnica "a chiodo"; e) calendarizzazione delle opere a verde.



c



d



Tra i materiali inerti non cementizi ricordiamo il legname, pietre e massi, ferro e acciaio e materiali costituiti da fibre sintetiche e vegetali.

Il legname è utilizzato nella maggior parte delle opere di Ingegneria Naturalistica. La principale funzione che deve assolvere il legno è quella di consolidamento e resistenza alle spinte trasmesse dal terreno all'opera di sostegno. A tal proposito il legname impiegato deve avere proprietà meccaniche e di durabilità idonee al fine di resistere nel tempo assicurando un adeguato livello di prestazioni.

Le tipologie di legno che meglio rispondono a tali esigenze sono il larice e il castagno, in pali sempre scortecciati al fine di aumentarne la durabilità.

A seconda della tipologia di opera in cui vengono impiegati le dimensioni degli elementi variano ma comunque non è opportuno scendere al di sotto di un diametro minimo della paleria di 20-25 cm e di 30 cm per opere idrauliche. Legname con diametro minore non dovrebbe essere utilizzato come elemento di opere di sostegno.

Occorre inoltre prestare attenzione a utilizzare pali il più possibile rettilinei e senza difetti di fusto quali callosità, marcescenze e fessurazioni che potrebbero accelerare il processo di decadimento prestazionale una volta esposti agli eventi atmosferici.

Le più tipiche opere di sostegno dell'Ingegneria Naturalistica sono le palificate vive.

Per l'elevazione della struttura i pali vengono sovrapposti incrociando gli elementi longitudinali (correnti) con quelli trasversali (traversi). Per aumentare la resistenza dell'opera nel senso longitudinale, i correnti vengono incastrati gli uni con gli altri in corrispondenza dei traversi sottostanti attraverso delle sagomature rese solidali da barre di acciaio ad aderenza migliorata, comunemente impiegate nell'edilizia.

Le barre sono impiegate con diametro compreso tra 10-12 mm per chiodi o staffe e 24-32 mm per gli ancoraggi delle strutture al suolo.

I materiali ferrosi sono utilizzati, oltre che per la giunzione di elementi lignei e come ancoraggio, anche come rivestimento delle scarpate sotto forma di pannelli di funi o reti, le quali vengono poste a

contatto con il terreno e vincolate al pendio tramite barre e funi, assolvendo così l'importante compito di stabilizzare coltri superficiali di terreno e trattenere piccoli volumi di materiale roccioso.

Un altro inerte comunemente utilizzato per il consolidamento e contenimento di versanti, come difesa spondale e per le opere di protezione in generale, è il pietrame.

Ciottoli, ghiaie e massi di varie dimensioni, generalmente reperiti in loco, vengono impiegati per incrementare la capacità di drenaggio delle acque e, specialmente i massi, per realizzare fondazioni di opere di sostegno in legname.

Proseguendo nella descrizione dei materiali inerti che contribuiscono alla realizzazione di opere di Ingegneria Naturalistica, troviamo i geosintetici e le fibre naturali. I geosintetici derivano dall'industria tessile, della gomma, delle materie plastiche e dei materiali bituminosi. Nell'ambito dell'Ingegneria Naturalistica, svolgono diverse funzioni, tra cui filtro, drenaggio, protezione dall'erosione, supporto allo sviluppo vegetazionale, rinforzo (incremento della capacità portante e incremento dei parametri geotecnici) dei terreni, contenimento dei fenomeni franosi.

I prodotti di questa vasta famiglia possono a loro volta essere catalogati in sottocategorie a seconda delle loro composizione, delle loro caratteristiche, del loro impiego, ecc.

Possiamo pertanto individuare:

Geotessili: sono caratterizzati da filamenti di polipropilene, poliestere etc. e vengono a loro volta suddivisi in

- *Tessuti:* aventi strutture caratterizzate da trama e ordito con un'elevata resistenza a trazione, solitamente impiegati per il rinforzo dei terreni e per l'incremento della loro capacità portante (sottofondi stradali);
- *Non tessuti:* presentano strutture prive di orditura e sono caratterizzati da non elevata resistenza a trazione. Sono utilizzati per incrementare la capacità filtrante dei terreni (trincee drenanti, sottofondo a scogliere spondali etc.).

Geomembrane: vengono utilizzate per impermeabilizzare bacini, invasi, coperture di fabbricati e sono disponibili in teli. Anch'esse vengono suddivise in due sottocategorie a seconda della loro composizione:

- *Polimeriche:* sono costituite da polimeri quali polietilene (PE) o cloruro di polivinile (PVC);
- *Bituminose:* vengono ricavate per impregnazione di non tessuti con bitume addittivato.

Geogriglie: sono caratterizzate da una notevole resistenza a trazione e vengono utilizzate per il rinforzo di terreni e l'incremento della loro capacità portante. Sono fili, nastri o bandelle di polipropilene, poliestere etc., intrecciati o saldati a formare strutture a rete con maglie aperte;

Georeti: anch'esse presentano una struttura a rete con maglie aperte composta da fili, nastri o bandelle di polipropilene, poliestere etc., intrecciati o saldati e presentano una buona resistenza a trazione. La loro funzione è quella drenante, di tenuta e di supporto ai geotessili. Una precauzione nell'uso di questo elemento deriva dal fatto che una lunga esposizione ai raggi UV può attenuare le buone caratteristiche meccaniche di cui è dotato, pertanto occorre prevedere una rivegetazione dell'area interessata in modo che questa possa offrire una giusta protezione alle georeti.

Geostuoie: sono pannelli stratiformi costituiti da filamenti sintetici aggrovigliati in HDPE, poliammide o polipropilene. Vengono principalmente utilizzate come antierosivo per la rivegetazione di superfici impermeabilizzate (canalette);

Geocompositi: sono formati da più strati accoppiati di materiali a seconda della funzione cui devono assolvere, anche se usualmente vengono impiegati nel drenaggio delle formazioni e sono disponibili sotto forma di rotoli o pannelli stratificati;

Geocelle: vengono utilizzate come antierosivo e supporto alla rivegetazione, sono costituite da materiale sintetico o geomembrana e hanno una struttura alveolare;

Biotessuti, biostuoie e biofeltri: sono tutti elementi che assicurano una buona azione antierosiva che può esaurirsi nell'arco di un anno (juta) o di alcuni anni (agave e cocco) e di supporto alla rivegetazione. Sono caratterizzati da ridotta resistenza a trazione e la loro efficacia, che si riduce nel tempo, viene sostituita dallo sviluppo vegetativo sottostante. Le reti in fibra naturale, sono spesso il supporto ottimale per lo sviluppo degli inerbimenti perchè trattengono le particelle più fini e riducono l'evaporazione idrica a vantaggio del mantenimento del microclima utile allo sviluppo del verde.

I materiali elencati hanno tutti un compito preciso nell'ambito delle costruzioni naturalistiche. Grazie a loro è possibile risolvere numerosi problemi legati alle instabilità di versante in modo da soddisfare al meglio le esigenze sia di stabilità strutturale che di ricostruzione del manto vegetale, così come richiesto dall'ingegneria Naturalistica.

Dopo quest'ampia panoramica sui materiali si rimanda al prossimo paragrafo la descrizione dei manufatti tipici di questa disciplina.

1.2 LE TECNICHE DI INGEGNERIA NATURALISTICA

Le opere di Ingegneria Naturalistica vengono solitamente classificate in base ai materiali con i quali sono realizzate, in base alla funzione che prevalentemente svolgono o in base al dissesto su cui devono agire.

In questo lavoro si andranno a individuare tali manufatti e tecniche di intervento in base alla profondità di coltre detritica che sono in grado di stabilizzare. Inoltre si farà una rapida disamina anche sulle opere idrauliche in quanto facenti parte a tutti gli effetti tra le opere di Ingegneria Naturalistica, anche se meno rilevanti ai fini di questo lavoro rispetto alle opere legate alla stabilità dei pendii.

La tabella rappresentata in seguito riassume le tecniche di ingegneria Naturalistica che verranno analizzate in questo paragrafo.

TECNICHE NATURALISTICHE

DIFESA DALL'EROSIONE	CONSOLIDAMENTO COLTRI SUPERFICIALI	CONSOLIDAMENTO PENDII E SCARPATE	DRENAGGIO DI FORMAZIONI	SISTEMAZIONE ALVEI E SPONDE
1. Rimodellamenti superficiali	1. Rivegetazione: Posa di talee a chiodo Gradonate vive Messa a dimora di arbusti e alberi	1. Palificate vive di sostegno a doppia parete	1. Canalizzazioni regimazione acque a cielo aperto	1. Briglie e soglie
2. Rivegetazione: inerbimenti	2. Palificate semplici	2. Terre rinforzate	2. drenaggio sotterraneo con perforazioni e trincee, fascinate.	2. Scogliere rivegetate
3. Reti a contatto	3. Palificate vive di sostegno ad una parete	3. Ricostruzione morfologica di pendii		3. Palificate spondali
4. Grate vive				4. Coperture diffuse con astoni

Occorre fare alcune importanti premesse, tutte valide per qualsiasi intervento di Ingegneria Naturalistica e indispensabili al fine di raggiungere un risultato finale ottimale.

Tutte le opere devono essere precedute dai necessari lavori di taglio della vegetazione instabile, pulizia del terreno, accantonamento della terra di scotico, approvvigionamento di acqua per le lavorazioni ma anche per la successiva messa a dimora della vegetazione, consolidamento o disaggio di porzioni di roccia instabili, riprofilatura e rimodellamento di versanti e scarpate che sono stati colpiti da eventi franosi, in modo da porre le basi per eseguire un lavoro a regola d'arte e soprattutto in condizioni di sicurezza per gli operatori.

1.2.1 DIFESA DALL'EROSIONE SUPERFICIALE

Quando la porzione di suolo dissestata non supera la profondità del metro, si può parlare di erosione superficiale e i metodi utilizzati per risolvere i problemi legati a questo tipo di dissesto sono:

1. **Rimodellamenti:** questa pratica, già elencata tra gli interventi preliminari alla realizzazione di strutture vere e proprie, consiste nella riprofilatura dei terreni, che sono stati oggetto di eventi franosi, realizzata mediante la movimentazione delle terre, o nel caso di roccia, il disgaggio e l'asportazione di quelle parti fratturate che sono instabili. La riprofilatura dovrebbe tener conto dell'angolo di naturale acclività del pendio attraverso l'angolo di attrito dei suoi materiali e realizzando le pendenze necessarie per sopportare le spinte agenti senza incorrere in nuovi eventi franosi.
2. **Rivegetazione:** è una tecnica di tipo estensivo che consiste nel realizzare una copertura vegetale consolidante, per spessori da decimetrici (copertura erbacea) a metrici (copertura arbustiva e arborea), generalmente uniforme su ampie superfici o su linee prestabilite, in modo da ottenere uno strato stabilizzante sfruttando lo sviluppo dell'apparato radicale del materiale vegetale vivo. La tecnica dell'inerbimento si suddivide in tre sottocategorie che individuano le diverse modalità di intervento possibili: la semina manuale a spaglio, le semine protette e l'idrosemina. La semina manuale a spaglio consiste nello spargimento manuale di miscugli di sementi, di origine certificata, su superfici destinate alla rivegetazione ed è indicata su superfici piane o con pendenze inferiori a 30°. Laddove ve ne sia la necessità la semina è abbinata allo spargimento di concimanti organici e/o inorganici. La semina con coltre protettiva (figura 3-a). è impiegata in presenza di superfici particolarmente povere di *humus*, e quindi dotate di bassa fertilità. In questi casi si distribuisce sul terreno, una miscela composta di paglia triturata, fieno e concime. Le sementi sono dunque distribuite sul terreno e poi ricoperte da materiale vegetale a funzione protettiva. la tecnica dell'idrosemina (figura 2-a) prevede l'aspersione di una miscela composta da acqua, sementi erbacee, concime, collanti, e sostanze miglioratrici del terreno. Il tutto viene distribuito sul terreno per mezzo di macchine (idrosemiatrici) che irrorano la miscela spruzzandola, a forte pressione, sulla superficie da trattare. Una importante tipologia di idrosemina è certamente il *mulch*: una coltre in grado di fornire protezione meccanica e di svolgere un'azione regolatrice nei confronti dell'umidità e dell'apporto organico. Questo elemento è molto importante qualora si effettui idrosemina su terreni con forti pendenze. L'idrosemina risulta vantaggiosa per la rapidità e l'uniformità di lavorazione, ed offre una più sicura rivegetazione, ma diventa poco conveniente nel caso di difficile accesso al sito e per l'inerbimento di piccole superfici. Più in generale, gli svantaggi comuni a ogni tipo di inerimento risiedono ovviamente nel limitato effetto in profondità. Il reticolo radicale è approfondito nel terreno per una altezza che varia tra i 10 e i 30 cm. Infine, come elemento comune a tutte le tecniche di Ingegneria Naturalistica, l'applicazione di questa tecnica non consente un'immediata azione di difesa ma è necessario un periodo di stabilizzazione dell'intervento prima di ottenerne l'efficacia.
3. **Reti a contatto:** sono elementi in grado di stabilizzare scarpate di pendii costituiti da terreni detritici, trattenendo il terreno superficiale sul quale sono disposte, ma anche ciottolame e piccoli volumi di roccia. Le reti vengono realizzate in filo di acciaio a semplice o doppia torsione, con maglie di tipo esagonale o romboidale e fornite in rotoli di lunghezza e dimensione standardizzata. Il loro assemblaggio avviene tramite funi di collegamento ancorate in roccia o al terreno con barre in acciaio. Le maglie di ancoraggio hanno tipicamente dimensioni 2m x 2m oppure 3m x 3m. Le reti in fibra vegetale possiedono una più blanda funzione stabilizzante, ma offrono un ottimo supporto alla vegetazione che verrà successivamente messa a dimora, migliorandone il regime idrico e apportando un contributo nutrizionale al terreno durante la loro fase di decomposizione. Le due tipologie di reti a contatto (rete di acciaio e rete in fibra naturale) possono essere usate singolarmente oppure accoppiate in caso di pendii molto acclivi (figura 3-c). Particolare cautela deve essere osservata durante la posa in opera: bisogna accertarsi che le reti aderiscano perfettamente al terreno e che i lembi di due porzioni di rete vengano sovrapposti e ancorati per evitarne il sollevamento.

4. **Grate vive:** questa ultima tipologia di opera di difesa dall'erosione superficiale è una struttura in tondame ottenuta mediante la posa di pali verticali e orizzontali, di diametro non inferiore ai 20 cm, disposti perpendicolarmente tra loro e chiodati tra loro con barre d'acciaio (figura 3-b). Come per le altre tecniche di difesa dall'erosione, viene successivamente eseguita nei quadri della grata la messa a dimora di specie vegetali con alta capacità di radicazione. Il tutto viene ricoperto con materiale terroso e inerbito con idrosemina. Qualora fosse necessario, è bene porre sul pendio reti elettrosaldate e/o geosintetici al fine di creare le condizioni adatte per il contenimento del terreno e l'attecchimento della vegetazione. Questa tecnica rappresenta un'ottima soluzione ai fenomeni di erosione in presenza di versanti con pendenze che possono raggiungere anche i 60°. I limiti costruttivi delle grate vive risultano evidenti in presenza di forti spinte del terreno o notevoli altezze. In tutti questi casi occorrerà aumentare la capacità di contrasto della struttura mediante ancoraggi oppure ricorrere a opere più idonee.





Figura 3
Esempi di opere di difesa dall'erosione.
a) inerbimento a semina protettiva;
b) grate vive;
c) reti a contatto in fibra naturale e acciaio accoppiate.

1.2.2 CONSOLIDAMENTO DI COLTRI SUPERFICIALI

In questa categoria di tecniche naturalistiche rientrano i manufatti che hanno la capacità strutturale di stabilizzare delle coltri più profonde, che interessano profondità di terreno anche superiori al metro. Anche in questo caso l'impiego di materiale vegetale vivo sarà di fondamentale importanza per tutte le opere che verranno descritte.

1. **Gradonate vive:** consistono nella messa a dimora di talee o piantine radicate di specie arbustive e arboree di vario tipo, lungo linee suborizzontali di un pendio, al fine di consolidare il terreno attraverso il solo impiego del materiale vegetale. Questa tecnica può essere pensata come intervento a sé stante ma anche come parte di altri interventi. La realizzazione di gradonate permette di rivegetare le scarpate attraverso la formazione di piccoli gradoni lineari, che corrono lungo le curve di livello del pendio (ma non perfettamente orizzontali, al fine di non favorire la formazione di giunti di trazione), in cui si interrano dei fitti "pettini" di talee e/o piantine radicate. Quest'ultime hanno il duplice scopo di sviluppare l'apparato radicale garantendo così il consolidamento del terreno, mentre la parte aerea contribuisce a contenere l'erosione superficiale. Le immagini di figura 4-a-b-c illustrano uno schema e le applicazioni di tale tecnica.

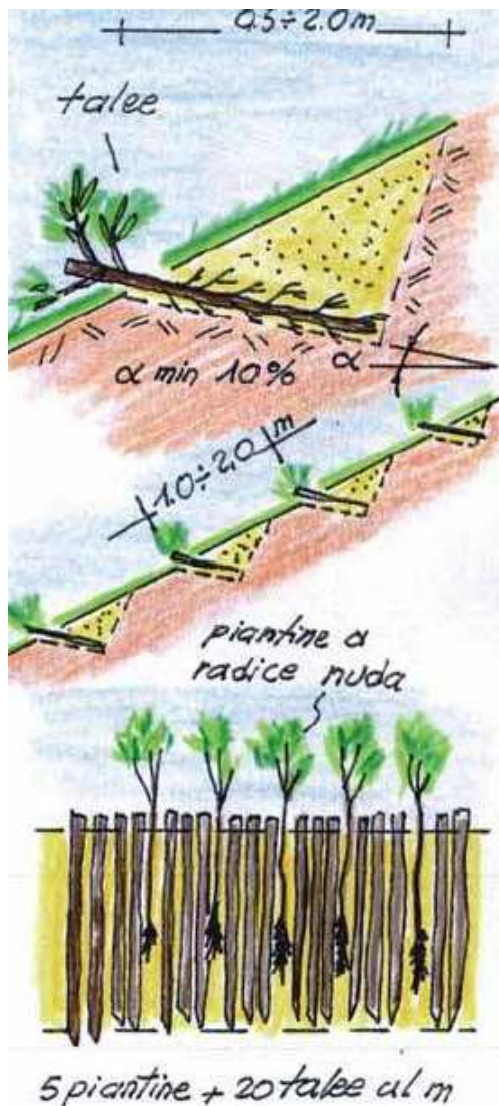


Figura 4-a-b-c
tecniche di consolidamento delle coltri
superficiali di terreno: gradonata viva.



2. **Palificate semplici:** sono in grado di stabilizzare scarpate coinvolte da instabilità, consentendo un consolidamento strutturale che dipende dalla profondità raggiunta dal sistema di ancoraggio e dallo sviluppo dell'apparato radicale della vegetazione posta a completamento dell'opera. Questo manufatto realizzato in legname di larice o castagno, è costituito da elementi orizzontali aventi diametro minimo di 20 cm disposti perpendicolarmente alla linea di massima pendenza del pendio, legati e fissati al terreno del versante mediante ancoraggi con picchetti o piloti in legno o in acciaio. La profondità di infissione dei piloti è di circa 1 - 2 m, o comunque fino al raggiungimento di uno strato più profondo e compatto, in modo da realizzare un ancoraggio saldo (vedi figura 4-a). Esistono anche numerose varianti delle palificate semplici, create in modo da rispondere nel miglior modo possibile a molteplici situazioni di instabilità. Tra queste si ricordano le palificate semplici a pali sovrapposti e le palificate a piloti incrociati. I limiti di queste opere sono la difficoltà di infissione dei piloti nel caso si incontrino formazioni ghiaiose-ciottolose, ma anche lo svuotamento della palificata stessa, causato dall'afflusso delle acque superficiali non correttamente regimate. Lo svuotamento della palificata non è un problema che colpisce solo le palificate semplici ma interessa anche le palificate vive di sostegno, sia a una che a doppia parete, che verranno descritte di seguito. Le figure 4-d-e-f mostrano lo schema costruttivo di una palificata semplice e l'evoluzione nelle due varianti sopra citate.

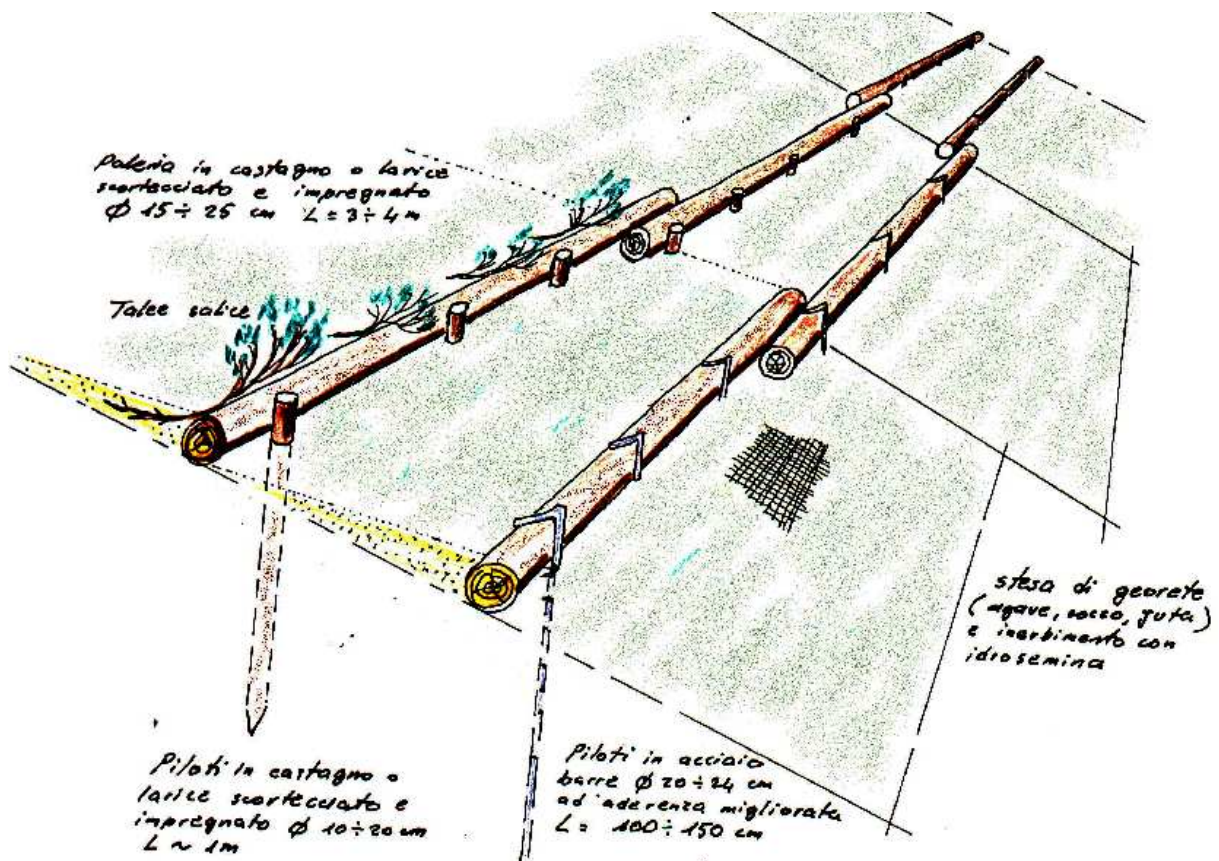


Figura 4-d
tecniche di consolidamento delle coltri
superficiali di terreno: palificata semplice.

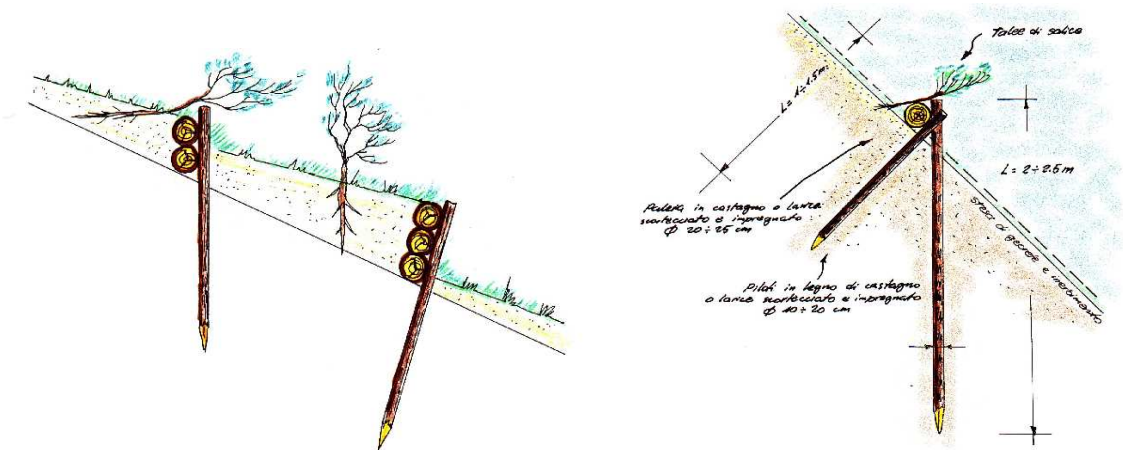


Figura 4 –e-f
tecniche di consolidamento delle coltri
superficiali di terreno:
a sinistra, palificata viva a pali sovrapposti;
a destra, palificata semplice a pali incrociati.

3. **Palificate vive di sostegno ad una parete:** sono dette anche palificate ad infissione, hanno la possibilità di stabilizzare coltri più approfondite rispetto a quelle ottenibili con la palificata semplice e permettono il recupero di quote maggiori di pendio. Questo tipo di opera, illustrata in figura 4-g-h, rappresenta un'evoluzione della palificata semplice illustrata in precedenza, in quanto vengono inseriti dei trasversi (pali trasversali) tra i correnti (pali longitudinali) della palificata semplice. Questi pali trasversali sono infissi manualmente (con mazze) o meccanicamente (trivella + miniescavatore) fino a raggiungere una coltre di terreno stabile e, pertanto, contrastano le moderate spinte del versante mediante la resistenza ad attrito tra pali infissi e terreno indisturbato a tergo dell'opera. Il vantaggio rispetto alle palificate doppie che verranno descritte in seguito, è che le palificate ad una parete necessitano di uno scavo di sbancamento molto minore, tuttavia presentano lo svantaggio di possedere una minor resistenza alla spinta attiva del terreno retrostante.

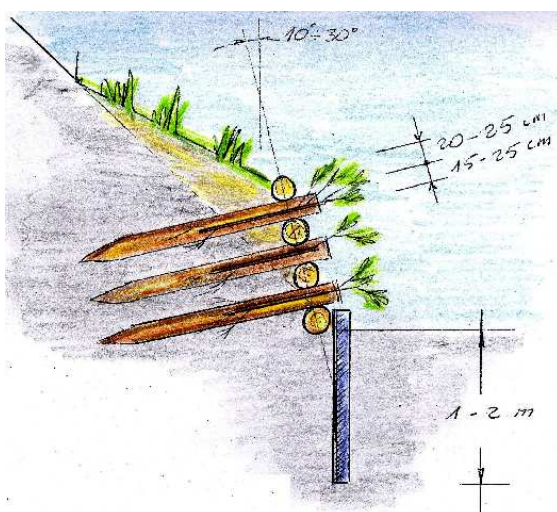


Figura 4-g-h
tecniche di consolidamento delle coltri superficiali di terreno: palificata viva di sostegno ad una parete.

1.2.3 CONSOLIDAMENTO DI PENDII E SCARPATE

I manufatti che rientrano in questa categoria sono opere che devono possedere un'elevata resistenza alle spinte del terreno quando sono finalizzate alla stabilizzazione di coltri di volume considerevole. Sono strutture autoportanti, assimilabili ai muri a gravità, solitamente utilizzate per ricostruire versanti che sono stati interessati da fenomeni franosi, svolgendo un'azione di sostegno, contenimento al piede e consolidamento di pendii.

1. **Palificate vive di sostegno a doppia parete:** rappresentano un'evoluzione delle palificate vive di sostegno ad una parete. Sono costituite da una sorta di "cassa" di pali di legno a struttura cellulare, riempita di materiale inerte e materiale vegetale vivo (che con il tempo andrà a incrementare e sostituire la resistenza alle spinte fornite dalla struttura). I materiali impiegati sono sempre legnami di larice e castagno scortecciati, associati a materiali lignei o ferrosi usati quali ancoraggi. Questa tipologia di opera, (mostrata in figura 5-a-b), è una tra le più usate nell'ambito dell'Ingegneria Naturalistica. Le dimensioni tipiche sono 1,5 – 2 m di base per massimo 4 metri d'altezza. Altezze maggiori possono essere raggiunte attraverso la disposizione di palificate a gradoni: questi vengono realizzati disponendo più palificate le une sulle altre e distanziandole di una certa profondità (figura 5-c).

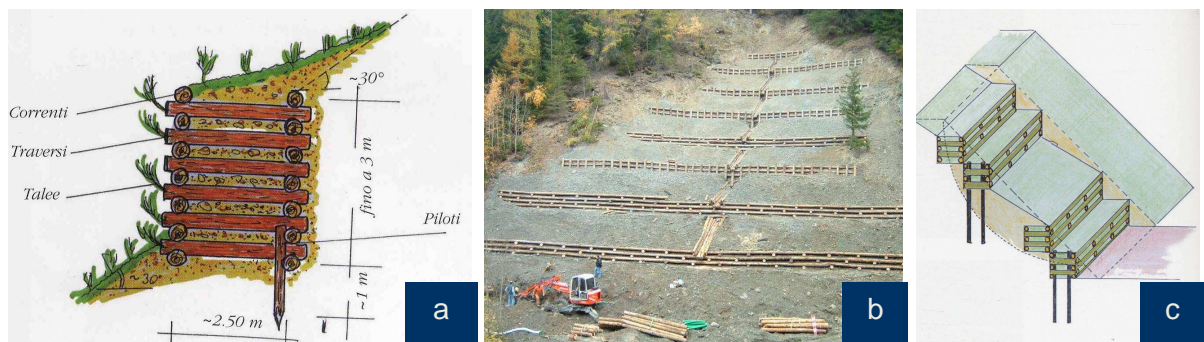


Figura 5
Consolidamento di pendii e scarpate.
a) schema palificata doppia;
b) posa in opera di palificate doppie;
c) palificata doppia a gradoni;

2. **Terre rinforzate:** queste opere permettono di raggiungere altezze maggiori rispetto alle palificate doppie; il loro grande vantaggio rispetto alle opere tradizionali è quello di permettere deformazioni relative qualora si verificassero assestamenti dei terreni. Altra loro caratteristica è quella di avere una buona capacità drenante e un'elevata capacità di assorbimento delle energie cinetiche d'impatto; infatti vengono spesso utilizzate come barriere paramassi, per consolidare la base dei pendii e come massicciate stradali (figura 5-d-e). Le terre rinforzate si basano sul fatto che è possibile migliorare le caratteristiche di stabilità di un pendio con il miglioramento delle caratteristiche meccaniche del terreno che lo costituisce, attraverso il suo rinforzo con materiali (geotessili o geogriglie) che gli conferiscono maggiore coesione e resistenza a taglio. Questi manufatti in terra rinforzata possono avere varie forme e dimensioni; più comunemente gli strati (formati da casseri, geosintetici, fibre naturali e terre compattate), sono posizionati in modo da creare una configurazione di versante "naturale" o, in taluni casi, a gradoni. Da non dimenticare che queste opere devono essere sempre appoggiate su una base stabile, eventualmente in massi, e devono sempre essere previste le opportune opere di collettamento delle acque al fine di mantenere la struttura drenata.

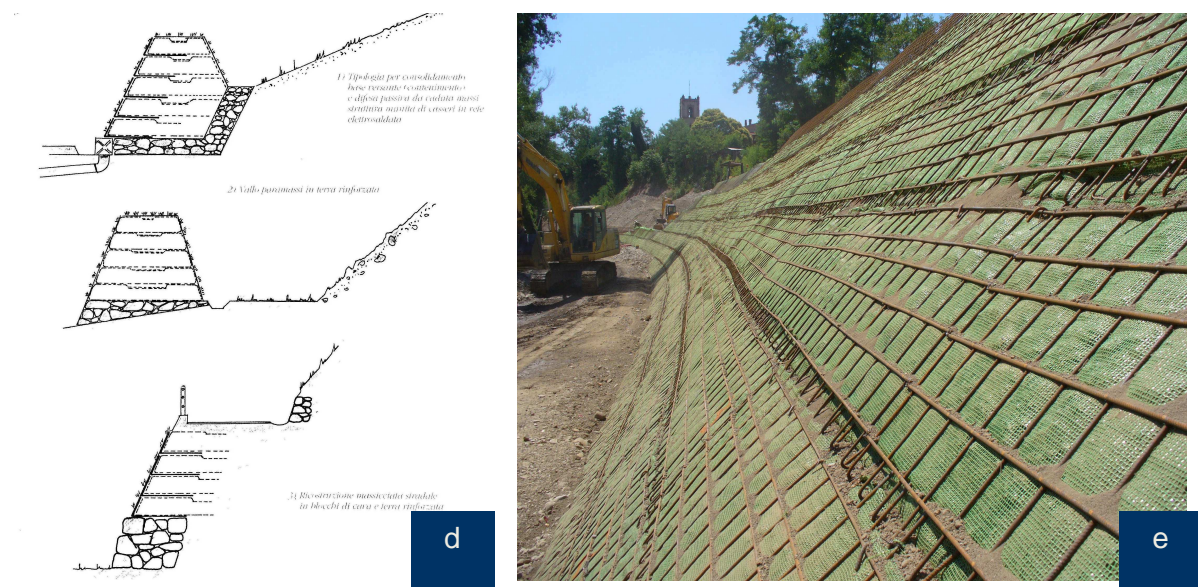


Figura 5
Consolidamento di pendii e scarpate.
d) schema costruttivo terre rinforzate;
e) pendio realizzato con terre rinforzate.

1.2.4 DRENAGGIO DI TERRENI E VERSANTI

Le opere di drenaggio si suddividono in due principali famiglie: drenaggio superficiale e drenaggio profondo.

Il **drenaggio superficiale** ha lo scopo di raccogliere e convogliare le "acque di ruscellamento", che divagano in superficie e sono responsabili di tipici fenomeni di erosione del suolo. In questa categoria di opere si individuano:

- canalizzazioni in terra;
- canalizzazioni in terra impermeabilizzate con geosintetici
- canalizzazioni in legname e pietrame.

Queste opere necessitano di periodici interventi di manutenzione al fine di garantirne l'efficienza nel tempo.

Il **drenaggio profondo** deve invece ricevere e smaltire le "acque di infiltrazione", ossia quelle che penetrano nel sottosuolo grazie alla permeabilità del terreno. Le acque ai livelli più profondi vengono pertanto intercettate da:

- trincee drenanti;
- pozzi drenanti;
- tubi microfessurati posti sub-orizzontalmente;
- cunei drenanti;
- drenaggi con fascinate.

In figura 6 e 7 vengono mostrati alcuni esempi dei drenaggi superficiali e profondi appena descritti.



Figura 6

Esempi di drenaggi superficiali.

a) - b) canalette in terra impermeabilizzate con geosintetici; c) canalizzazione in legname e pietrame

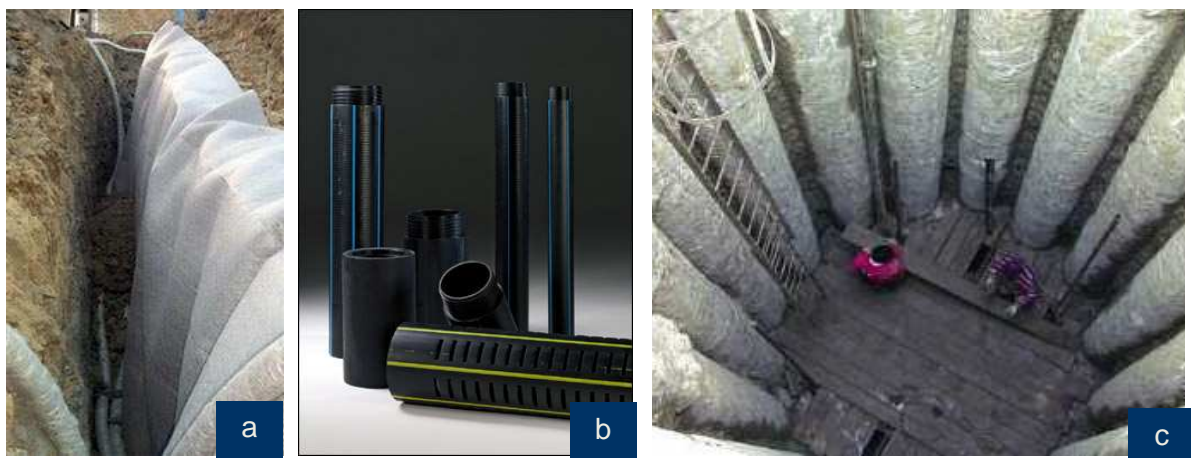


Figura 7

Esempi di drenaggi profondi.

a) trincea drenante; b) porzioni di tubi microfessurati per il drenaggio; c) pozzo drenante.

1.2.5 SISTEMAZIONI IDRAULICHE

In questa famiglia di tecniche naturalistiche rientrano le opere previste per correggere il profilo di fondo alveo e la velocità di deflusso e per proteggere gli alvei dall'erosione delle acque.

Ricordiamo i seguenti manufatti:

1. **Briglie e soglie in legname e pietrame:** sono realizzate trasversalmente agli alvei con l'obiettivo di correggere la loro pendenza, regimare il corso d'acqua rallentando la velocità della corrente e trattenere il materiale solido trasportato dalle acque. La loro struttura è simile a quella delle palificate di sostegno a doppia parete (riempite di pietrame), con l'aggiunta di una platea in massi posta a valle dell'opera in modo da dissipare l'energia cinetica dell'acqua originata dal salto provocato dalla briglia (figura 8-a). L'opera presenta buone caratteristiche per quanto riguarda l'assorbimento di piccoli assestamenti delle sponde, si presta ad essere messa in opera in luoghi di difficile accesso ma necessita di un'accurata e periodica manutenzione.
2. **Scogliere rivegetate:** lo scopo di queste opere è di costituire delle difese spondali per contrastare l'azione erosiva dei corsi d'acqua. Le scogliere sono realizzate in massi di cava di elevato volume medio (da 0.5 a 1 metro cubo), rivegetate mediante l'intasamento con terra dei vani tra i massi e la successiva messa a dimora di materiale vegetale; la figura 8-b ne mostra un esempio.
3. **Le palificate spondali,** siano esse a infissione o a doppia parete, svolgono anch'esse il compito di protezione dall'erosione da parte di corsi d'acqua caratterizzati da velocità della corrente non troppo elevate. Al fine di evitare a tali strutture un eccessivo stato di sollecitazione dinamica, queste vengono talvolta poggiate sopra un corso di massi: in tal modo si evitano le sommersioni periodiche dovute alle piene ordinarie e si demanda alla scogliera di base il compito di far fronte alla più consistente sollecitazione tangenziale che caratterizza l'attività erosiva del corso d'acqua (esempio mostrato in figura 8-c).
4. **Coperture diffuse con astoni:** vengono realizzate per stabilizzare, consolidare e al tempo stesso rivegetare, la superficie spondale tramite la messa a dimora di materiale vegetale vivo in astoni di salice allineati in continuo ad assicurare una copertura totale della superficie stessa. Gli astoni vengono vincolati al suolo con picchetti e filo d'acciaio di collegamento e ricoperti da un sottile strato di terra. Questa soluzione sortisce buoni risultati in sponde fluviali caratterizzate da basse velocità della corrente, ma presenta una certa vulnerabilità in fase di cantiere (figura 8-d).





Figura 8
Esempi di opere di sistemazione idraulica.
a) realizzazione di briglie e soglie in legname e pietrame;
b) scogliera in massi intasata di terra e rivegetata;
c) palificata spondale;
d) messa a dimora di copertura con astoni.

1.3 INTERVENTI INTEGRATI

Come si è potuto evincere dai paragrafi precedenti le tecniche di Ingegneria Naturalistica hanno portato numerosi vantaggi nell'ambito della sistemazione e consolidazione dei pendii. L'utilizzo di tali opere ha permesso di riportare in sicurezza versanti colpiti da fenomeni di instabilità tramite l'utilizzo di materiali naturali quali il legno e la vegetazione; in questo modo si è evitato di inserire elementi estranei, di elevato peso, spesso di difficile cantierizzazione e di disturbo nell'ambiente naturale, quali ad esempio sono i manufatti in calcestruzzo.

Pertanto oltre a un ottimo risultato finale a livello estetico, si è potuto constatare come e quanto queste metodologie siano valide anche da un punto di vista strutturale.

Dall'analisi delle tecniche naturalistiche è emerso come alcune metodologie usate nell'ambito dell'Ingegneria Naturalistica non abbiano particolari limiti, se non quelli legati al non rispetto di alcune disposizioni di disciplinare prestazionale da parte degli operatori, all'impiego di materiali inadeguati o all'errato uso di tali materiali.



Figura 9: difetti di costruzione: a) legname non scortecciato b) errato ancoraggio di reti a contatto; c) eccessiva sporgenza e alterazione di traversi in castagno, con relativa fratturazione del legname; d) insufficiente regimazione delle acque superficiali in rapporto alla pendenza della strada.



Altrettanto non può essere detto per certe opere destinate al consolidamento di pendii, scarpate e coltri superficiali. Infatti, nel caso specifico delle palificate semplici e delle palificate vive di sostegno a una parete e a parete doppia, non è sufficiente rispettare regole comportamentali o adottare tecniche adeguate poiché queste opere possono essere interessate da considerevoli sollecitazioni di spinta da parte dei terreni, talora di difficile determinazione.

Le palificate a parete singola o doppia si caratterizzano per una certa leggerezza strutturale, proprietà molto apprezzata nella sistemazione dei cigli di frana, in quanto la realizzazione di queste opere non va a gravare ulteriormente su versanti già colpiti da dissesti., ma in altri casi questa proprietà può rappresentare un problema.

Infatti, come per i muri, anche le palificate di sostegno, quelle doppie in particolare, sono opere il cui principio base di funzionamento è proprio il peso dell'opera, tanto è vero che sono definite "opere a gravità".

Come tali devono soddisfare le stesse verifiche di stabilità a cui sono sottoposte quest'ultime: verifica a ribaltamento, scorrimento sul piano di posa e capacità portante.

Secondo la normativa attualmente in vigore (D.M. 14/01/2008), verificare una struttura significa che questa deve assicurare una resistenza superiore a determinati fattori di sicurezza nei riguardi delle sollecitazioni gravanti su di essa.

Le palificate, in quanto assimilabili ad opere a gravità, hanno bisogno del fattore peso per adempiere alle proprie funzioni di stabilizzazione qualora vengano utilizzate come infrastrutture di sostegno al piede dei versanti: talvolta, questo peso non è sufficiente a contrastare le spinte a tergo del manufatto.

Per queste ragioni sia nelle palificate, ma più in generale in tutte le tecniche naturalistiche, è possibile apportare delle modifiche all'opera al fine di migliorarne le caratteristiche e le capacità di risposta nei confronti delle spinte del terreno.

Nei paragrafi precedenti sono già state individuate alcune varianti costruttive, si pensi ad esempio alle palificate semplici a piloti incrociati (figura 4-b), che rappresentano una variante della palificata semplice nata con l'obiettivo di aumentare la superficie di attrito tra terreno e struttura.

Per le palificate vive di sostegno le varianti più utilizzate sono quelle che prevedono l'inserimento di ancoraggi verticali e inclinati, che interessano la base della struttura o anche l'intera altezza del manufatto (figura 10-a-b e figura 11-a). Questi elementi longilinei infissi nel terreno, generalmente in acciaio o legno, hanno lo scopo di incrementare la resistenza della struttura ed evitare scorrimenti e ribaltamenti dell'opera stessa sotto le spinte del terreno.



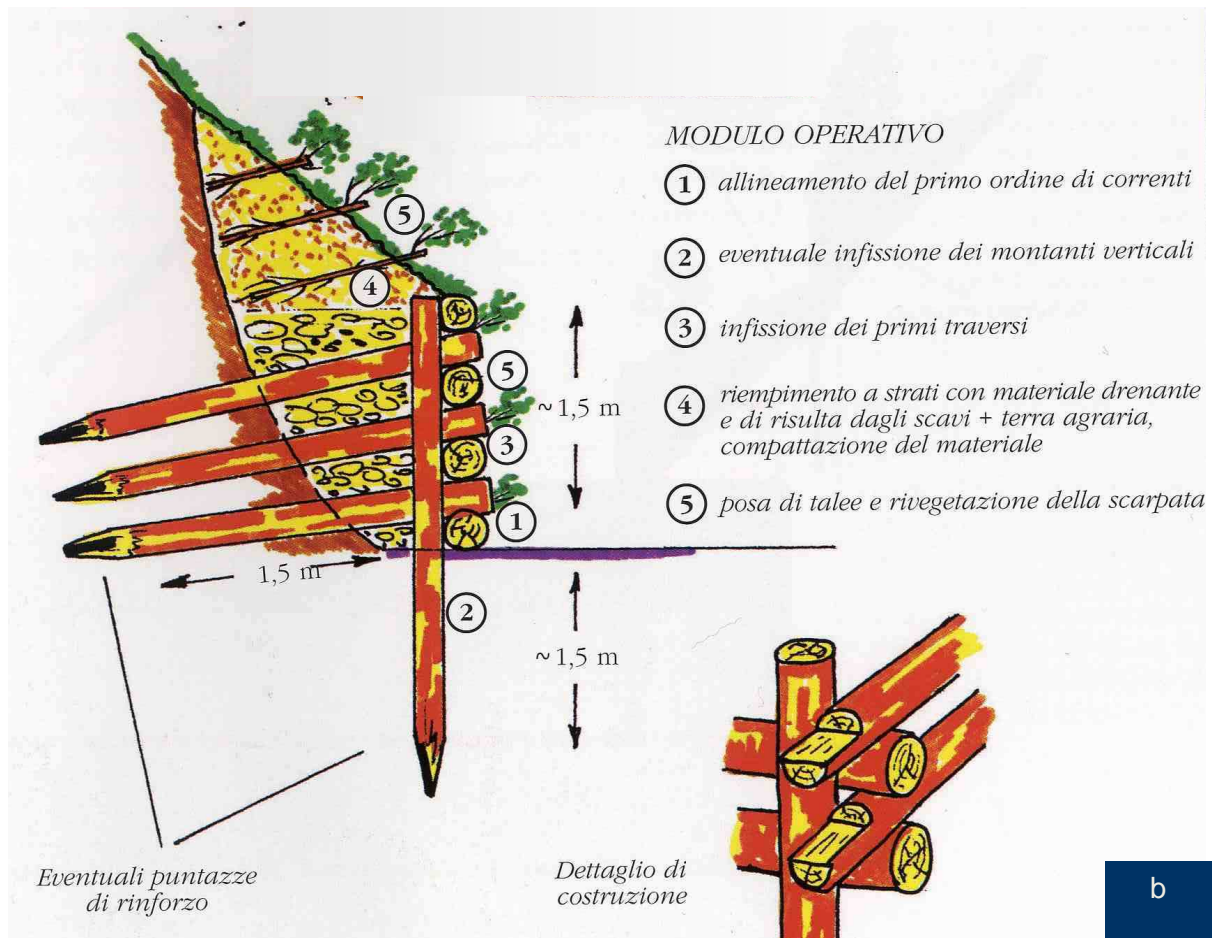


Figura 10

L'inserimento di ancoraggi può avvenire sia in palificate doppie che ad una parete. In entrambi i casi hanno lo scopo di stabilizzare la struttura in legname.

a) doppio ancoraggio in legname in palificata doppia; b) montante verticale in palificata singola.

Quando il terreno è omogeneo e di granulometria fine, l'ancoraggio delle opere in legname può essere eseguito mediante l'infissione di pali di legno di varia profondità. Questa casistica tuttavia è limitata ad un numero ristretto di casi: si può onestamente affermare che le condizioni per una sicura infissione di una lunghezza cospicua di ancoraggio possano avvenire solo in un terreno di tipo sabbioso (o più fine) non sovraconsolidato e privo di ciottolame. In presenza di terreni di scarsa qualità (eterometrici, con presenza di ciottoli) si rende necessario l'utilizzo di ancoraggi metallici (barre in acciaio). Altri problemi possono essere rappresentati, oltre che dalla resistenza del terreno all'infissione degli ancoraggi, alla presenza di materiale facilmente sfaldabile, che continuamente evolve disgregandosi e non permettendo l'aggancio sicuro dell'opera.

Il contributo alla resistenza da parte dei pali infissi è dato dall'attrito che si viene a creare tra le pareti di questi elementi e il terreno in cui sono introdotti pertanto, come già preannunciato, le condizioni ottimali sono fornite da terreni di tipo sabbioso.

Se nemmeno con l'adozione di tali varianti è possibile risolvere i problemi legati alla stabilità delle strutture naturalistiche soggette alle spinte del terreno, occorre rivolgere l'attenzione alle opere che rientrano nella famiglia dei manufatti tipici dell'ingegneria tradizionale. Adottando le tecniche tradizionali è possibile risolvere con più facilità i problemi sopra descritti, soprattutto attraverso l'utilizzo del cemento armato. Quest'ultimo infatti risulta più versatile rispetto alle opere in legname, soprattutto perché fornisce una quasi immediata azione di resistenza al pendio, ma sicuramente per quanto riguarda l'inserimento ambientale, l'impatto della cantieristica e la possibilità di conferimento di migliori caratteristiche alla geotecnica del suolo, l'effetto non è soddisfacente quanto quello delle opere naturalistiche.

Come si è visto, né le tecniche naturalistiche né quelle tradizionali rappresentano in assoluto la soluzione migliore ai problemi di stabilità, pertanto si deve ricorrere all'una o all'altra tipologia a seconda delle caratteristiche del problema da risolvere.

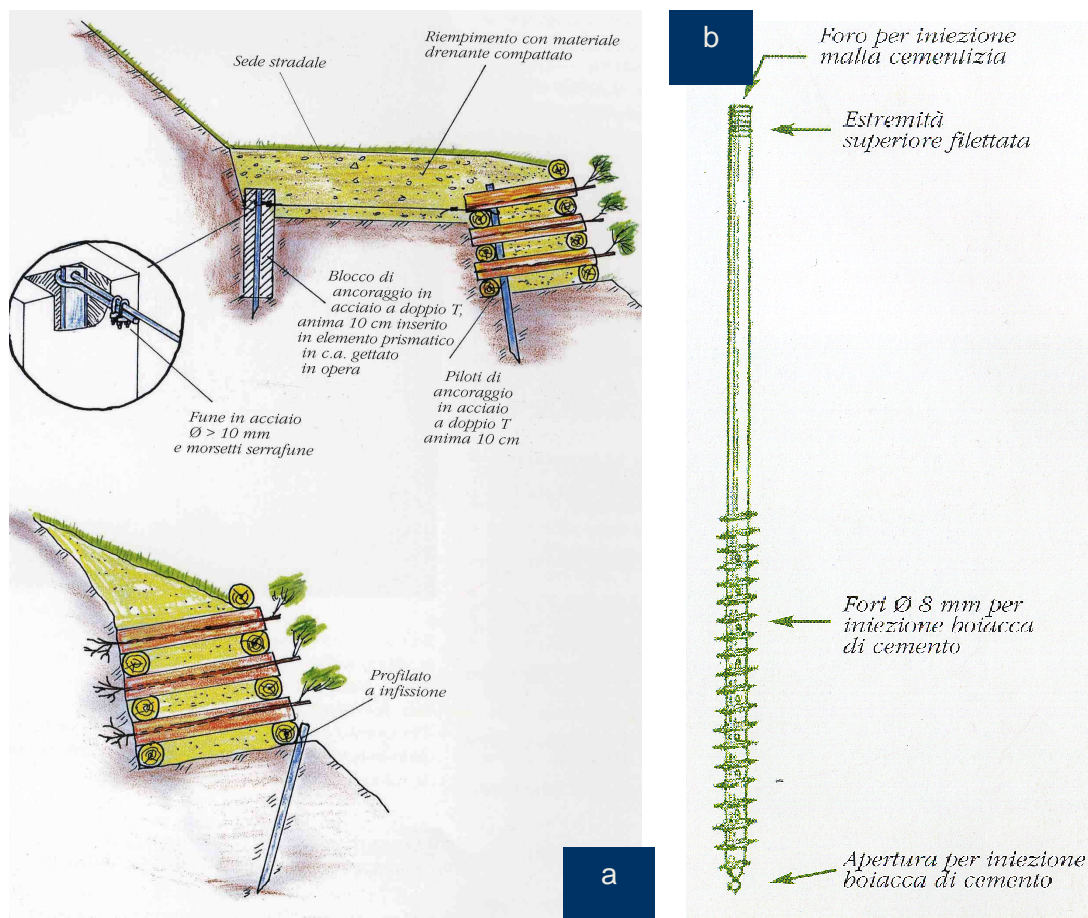
Ma queste osservazioni fatte finora possono indurre a pensare che sia possibile realizzare delle opere integrate, ossia dei manufatti che prevedano la fusione di tecniche tipiche dell'Ingegneria Naturalistica e Civile, in modo da ottenere un'opera che sfrutti al meglio i vantaggi delle due discipline, laddove le proprietà dell'una possano compensare gli svantaggi dell'altra.

Per tali motivi si è avviata in tempi recenti la tendenza a realizzare, ove necessario, delle opere ibride formate da palificate vive di sostegno, profilati metallici, micropali e tiraggi di ancoraggio.

Tutti questi elementi hanno il compito di incrementare la resistenza della palificata, evitando che questa abbia degli scorrimenti o rotazioni dovuti alle spinte del terreno. In figura 11 sono mostrate alcune applicazioni pratiche di questi elementi.

I micropali sono utilizzati come ancoraggio della struttura. Possono essere posti alla base oppure internamente al "cassone" formato dagli elementi della palificata e penetrano nel terreno fino a raggiungere lo strato di coltre resistente profonda posta al di sotto del piano di fondazione, permettendo in tal modo all'opera di sostenersi ed espletare le funzioni per le quali è creata (figura 11-c).

Questi elementi, appartenenti alla categoria delle fondazioni profonde, sono stati ideati in qualità di strutture in grado di sopportare carichi verticali di compressione, ma nell'impiego come ancoraggi sono soggetti anche a sforzi di flessione e taglio. Occorre infatti precisare che mentre la risposta dei micropali a sforzi di compressione è ben definita e risulta essere ottimale, non altrettanto definita è la risposta a sforzi di taglio e flessionali in quanto tali elementi, essendo snelli e dotati di flessibilità, potrebbero non assorbire correttamente tali sollecitazioni



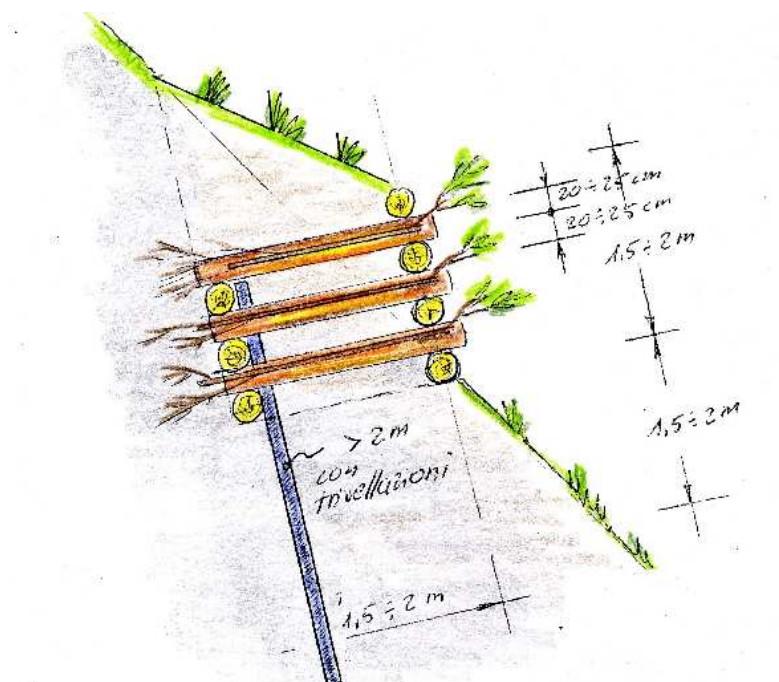


Figura 11

Ancoraggi per la stabilizzazione di opere naturalistiche.

a) ancoraggio con profilati in acciaio; b) esempio di ancoraggio a rapida infissione; c) ancoraggio attraverso l'uso di micropali.

Nel caso dei tiranti, invece, l'impiego nelle strutture naturalistiche (peraltro raramente utilizzato) è più simile all'impiego tradizionale. L'uso di tali elementi può avvenire sia in roccia che in terreno attraverso l'infissione tramite perforazione di barre rigide o funi a trefoli. I tiranti sono generalmente realizzati creando un foro, immettendo in esso la barra rigida o la fune e successivamente iniettando della malta cementizia creando così un bulbo che indurendo crea attrito tra il tirante e il terreno circostante. Esistono anche in questo caso numerose varianti costruttive che verranno successivamente illustrate nel dettaglio in un apposito capitolo dedicato ai tiranti di ancoraggio.

In figura 12 sono illustrati alcuni tipi di ancoraggio con funzione di tirante in roccia, uno schema d'applicazione su grate vive ed un esempio di tirante in terreno.

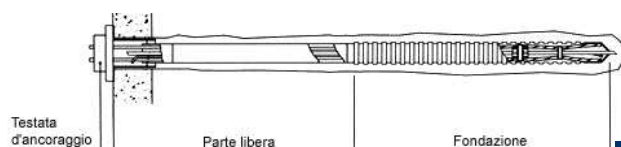
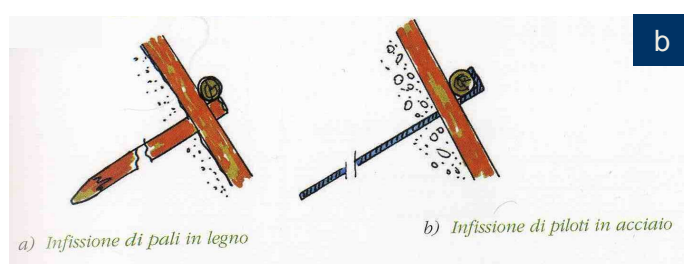
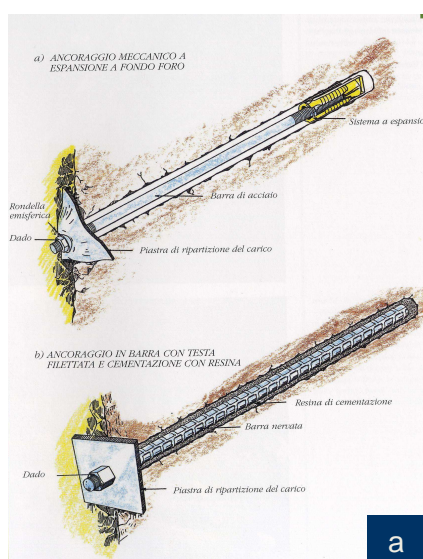


Figura 12

Ancoraggi e tiranti.

a) tipologie di ancoraggio in roccia; b) ancoraggi su grate vive; c) schema di tirante.

L'unione di questi elementi tradizionali alle opere di Ingegneria Naturalistica rappresenta una buona soluzione perché oltre ad aumentare la resistenza e la stabilità della struttura principale, non ostacola la rivegetazione dell'opera e di conseguenza lo sviluppo di quell'apparato radicale tanto importante per le opere naturalistiche.