



APAT

Agenzia per la Protezione dell'Ambiente
e per i servizi Tecnici

Atlante delle opere di sistemazione dei versanti



MANUALI E LINEE GUIDA

10/2002



APAT

Agenzia per la Protezione dell'Ambiente
e per i servizi Tecnici

*A*tlante delle opere di sistemazione dei versanti

Manuali e linee guida 10/2002

Dipartimento Difesa del Suolo

Servizio istruttorie, Piani di Bacino, Raccolta dati e Tecnologie del Sito

Informazioni legali

L'Agenzia per la Protezione dell'Ambiente e per i Servizi Tecnici o le persone che agiscono per conto dell'Agenzia stessa non sono responsabili per l'uso che può essere fatto delle informazioni contenute in questa pubblicazione.

APAT - Agenzia per la Protezione dell'Ambiente e per i Servizi Tecnici

Via Vitaliano Brancati, 48 - 00144 Roma

www.apat.it

Dipartimento Difesa del Suolo

Serviziolstruttorie, Piani di Bacino, Raccolta Dati e Tecnologie del Sito

© APAT, Manuali e Linee guida 10/2002

ISBN 88-448-0286-6

Riproduzione autorizzata citando la fonte

Elaborazione Grafica

APAT

Grafica Copertina: Franco Iozzoli, Paolo Orlandi

Coordinamento tipografico

APAT

Autori

Coordinatore: Domenico Ligato

Tommaso Marasciulo, Fabio Pascarella, Maurizio Guerra

Valeria Sassanelli per i disegni tecnici

Si ringrazia Massimo Comedini per i preziosi suggerimenti, per i contributi specialistici e per le immagini fornite

Si ringrazia inoltre Stefania Silvestri per il contributo alla stesura finale

Supervisione: Leonello Serva - Direttore Dipartimento Difesa del Suolo

Presentazione

L'esperienza sin qui maturata dall'Agenzia Nazionale per la Protezione dell'Ambiente e per i Servizi Tecnici nelle attività di riduzione del rischio idro-geologico sul territorio nazionale ha portato alla realizzazione di questo atlante delle opere di difesa dei versanti, la cui nascita è stata supportata anche dalla constatazione della mancanza nel panorama nazionale di un documento di facile consultazione, che permettesse all'opinione pubblica, dai decisori politici di ogni livello al singolo cittadino, di conoscere l'intera gamma delle opere possibili per la sistemazione dei versanti, tenendo conto delle funzioni cui esse sono preposte e del loro impatto paesaggistico.

Per la prima volta, in un unico atlante, sono infatti riunite, le une accanto alle altre, le tecniche tradizionali dell'ingegneria geotecnica e le tecniche dell'ingegneria naturalistica con il dichiarato intento di superare la contrapposizione che spesso distingue queste due discipline, favorendo una progettazione che tenga conto della loro complementarietà e fornisca una soluzione razionale dei problemi connessi all'instabilità dei versanti.

L'intento primo era quindi il fornire quelle informazioni di base che permettessero un utilizzo consapevole delle opere strutturali di difesa del suolo allo scopo di operare sempre meglio e preservare le ricchezze naturali del nostro meraviglioso paese.

La prima stampa è stata presentata nel mese di giugno 2001. La crescente richiesta di copia da parte di svariati utenti - uffici tecnici regionali, provinciali e comunali, liberi professionisti, studi tecnici, società di ingegneria, istituti universitari che in qualche caso intendono utilizzarlo come testo di riferimento, studenti - ha fatto sì che si rendesse necessaria questa ristampa.

Veramente lieti del favore incontrato presso gli utenti, confidiamo che il nostro contributo possa essere di ausilio nel raggiungimento dell'obiettivo precedentemente menzionato.

Giorgio Cesari
Direttore APAT

Premessa

I paesaggi dell'Italia devono il loro fascino non solo alle bellezze naturali ma anche all'opera dell'uomo che da millenni interviene sul territorio. Tra gli esempi più eclatanti, in questo senso, si ricordano i terrazzamenti in pietra locale, riconoscibili dalle Alpi alla Sicilia, costruiti con il duplice scopo di sistemare i versanti e rendere possibile la coltivazione. L'uso di materiali locali comporta un naturale inserimento dell'opera nel territorio, dovuto principalmente alla somiglianza di colori e alla giustapposizione di strutture antropiche sulla roccia in posto che risultano così fondersi armoniosamente.

Negli ultimi decenni, invece, un uso "disinvolto" del territorio con l'utilizzo, a volte, improprio delle tecniche di costruzione sta conducendo ad un certo degrado paesaggistico o, più in generale, ambientale, che dovrebbe preoccuparci maggiormente. Ad esempio, per quanto concerne il cemento armato, la facilità di approvvigionamento, la rapidità di utilizzo e le caratteristiche strutturali, hanno portato ad una diffusione capillare sul territorio non sempre consona agli scopi per i quali viene utilizzato. Di cattive opere in cemento armato è, infatti, piena l'Italia, dai rifacimenti dei terrazzamenti in pietra locale, alle opere spondali sulle fiumare. Diventa allora estremamente importante invertire sin da oggi questa tendenza e scegliere tra le diverse soluzioni permesse dalle tecnologie moderne, quelle con maggior rispetto del paesaggio, o meglio dell'ambiente. Un'accorta progettazione consente ad esempio un uso più razionale del cemento come dimostrano alcune ottime opere già realizzate nel nostro paese.

La pubblicazione dell'"Atlante delle opere di sistemazione dei versanti" parte da queste considerazioni, sviluppate nell'ambito del lavoro che il Dipartimento Difesa del Suolo sta svolgendo nel campo della vulnerabilità ambientale connessa ai fenomeni naturali e alle attività antropiche. Con questo volume si intende, quindi fornire una casistica ragionata delle opere esistenti di sistemazione dei versanti. Per fare ciò si è anche preso spunto dall'attività di monitoraggio che il Dipartimento sta svolgendo sugli interventi strutturali urgenti per la riduzione del rischio geologico-idraulico, finanziati dal D.L. 180/98 e successive modifiche e integrazioni, che ha offerto la possibilità di verificare, nelle diverse fasi di progettazione e realizzazione, numerose opere in ogni parte d'Italia.

La novità di questo atlante risiede principalmente in due cose: il taglio della trattazione del tema delle opere di sistemazione dei versanti e il pubblico al quale ci si rivolge. È infatti la prima volta che tali interventi vengono trattati complessivamente, senza distinzione tra tecniche di ingegneria naturalistica e quelle tradizionali di ingegneria geotecnica che, proprio per le considerazioni appena fatte, non dovrebbero essere usate in contrapposizione ma, nel caso, sinergicamente.

Questo lavoro non si rivolge esclusivamente al mondo professionale (progettisti, società di ingegneria), che potrà comunque trovare elementi di novità nel taglio della trattazione e nelle numerose figure e fotografie, ma a tutte le persone ed organismi coinvolti nella progettazione e nella gestione dei problemi connessi alla difesa del territorio quali i tecnici, gli amministrativi ed anche i politici degli enti centrali e locali.

Nell'atlante sono descritte la maggior parte delle tipologie in uso con le relative varianti, partendo dalle opere superficiali, eseguite con i metodi dell'ingegneria naturalistica, per arrivare a quelle profonde eseguite con tecnologie speciali. L'organizzazione dei paragrafi fornisce, al lettore, oltre le generalità e la descrizione delle opere, gli usi principali e i relativi aspetti paesaggistico/ambientali, dato, quest'ultimo, che non poteva mancare in una pubblicazione APAT.

Leonello Serva
Direttore Dipartimento Difesa del Suolo

Indice

	Presentazione	I
	Premessa	II
Opere per il controllo dell'erosione superficiale	Rivestimenti antierosivi biodegradabili	2
	<i>Biotessili (Bioreti, Biofeltri), Biostuoie</i>	
	Rivestimenti antierosivi sintetici	5
	<i>Geostuoie, Geocompositi, Rivestimenti Vegetativi, Geocelle,</i>	
	Inerbimenti	10
	<i>Semina a spaglio, Zolle erbose, Nero-Verde, Idrosemina</i>	
Opere di stabilizzazione superficiale	Piantumazioni	18
	Fascinate vive	20
	Viminate e Palizzate vive	23
	Palificate vive	27
	Gradonate vive	29
	Grate vive	33
	Materassi	35
Opere di sostegno	Murature	39
	Muri in cemento armato	45
	Muri cellulari	50
	Terre rinforzate	55
	Gabbionate	63
	Pali	67
	Ancoraggi	71
	Spritz Beton	74
Opere difesa massi	Barriere	77
	Reti	83
	Valli e rilevati	86
	Gallerie	90
Opere di drenaggio	Drenaggi superficiali	93
	Cuneo filtrante	97
	Dreni suborizzontali	98
	Trincee	100
	Speroni	102
	Paratie	104
	Pozzi	105
	Gallerie	107
Opere speciali	Iniezioni	109
	<i>Iniezioni di miscela, Jet grouting</i>	
	Trattamenti termici	115
	<i>Congelamento, Alte temperature</i>	
	Trattamenti chimici	118
	Trattamenti elettrici	120
	Bibliografia	122

Opere per il controllo dell'erosione superficiale

Generalità

Le opere per il controllo dell'erosione superficiale creano condizioni ambientali e di stabilità necessarie all'attecchimento e alla crescita della vegetazione erbacea, arbustiva ed arborea impiantata sulle scarpate e sui pendii in terra o in situazioni particolari di rocce molto alterate. La copertura vegetale, così realizzata, consente un efficace controllo e mitigazione dei fenomeni d'erosione, proteggendo il terreno dall'azione aggressiva delle acque meteoriche e superficiali, del vento e delle escursioni termiche.

Le tecniche costruttive ed i materiali impiegati sono differenti in relazione alle caratteristiche litologiche, pedologiche, morfologiche e climatiche della zona d'intervento.

Tra le opere per il controllo dell'erosione superficiale, di seguito sono descritte le tipologie che più comunemente trovano applicazione nell'ambito degli interventi di sistemazione e di difesa dall'erosione e dalle frane dei versanti, quali:

- rivestimenti antierosivi con materiali biodegradabili
- rivestimenti antierosivi con materiali sintetici
- inerbimenti

Rivestimenti antierosivi con materiali biodegradabili

I prodotti in materiali organici biodegradabili sono rappresentati da:

Biotessili *Bioreti*
Biofeltri
Biostruoie

Rivestimenti antierosivi con materiali sintetici

I prodotti in materiale sintetico comprendono:

Geostruoie tridimensionali
Geocompositi antierosivi
Rivestimenti vegetativi
Geocelle

Inerbimenti

Le tecniche di inerbimento comprendono:

Semina a spaglio
Copertura con zolle erbose
Sistema Nero - Verde
Idrosemina

Esempio d'impiego di rete o georete in fibra di iuta utilizzata in abbinamento a viminate in un intervento di sistemazione di un pendio in erosione. Questa tipologia è particolarmente indicata per i rinverdimenti antierosivi di pendii, sponde fluviali o scarpate artificiali con necessità di trattenimento meccanico del terreno.



Generalità

I rivestimenti antierosivi biodegradabili sono usati, quasi sempre in associazione con idrosemina o con l'impianto di talee e piantine, negli interventi di sistemazione e consolidamento di pendii o scarpate o di altre opere di ingegneria. La loro realizzazione assicura al terreno trattato un controllo dei fenomeni erosivi per il tempo necessario all'attecchimento ed allo sviluppo di un efficace copertura vegetale.

I rivestimenti biodegradabili sono prodotti costituiti in genere da fibre di paglia, cocco, juta, sisal (fibra tessile ricavata dalle foglie di una specie di Agave), trucioli di legno o altre fibre vegetali, caratterizzati da una biodegradabilità pressoché totale che si realizza in un arco di tempo di 1/5 anni, da permeabilità e capacità di ritenzione idrica elevate e da spiccata azione protettiva superficiale del terreno.

In funzione del materiale, della struttura e delle tecniche costruttive, possono essere classificati in:

Biotessili *Bioreti*
 Biofeltri

Biostuoie

Aspetti ambientali

I rivestimenti antierosivi, rappresentano una soluzione ideale sia dal punto di vista tecnico-funzionale che dal punto di vista dell'inserimento estetico-paesaggistico ed ecologico dell'intervento.

La biodegradabilità e la non tossicità dei materiali utilizzati e la capacità di favorire una rapida copertura vegetale, garantiscono il loro inserimento completo e naturale nell'ambiente circostante.

Applicazioni

Questi prodotti hanno trovato recentemente una vasta applicazione in numerosi interventi di sistemazione idraulico-forestale, di consolidamento dei pendii instabili ed in numerose opere di ingegneria tra i quali si menzionano:

- rivestimento di pendii o scarpate naturali ed artificiali per il controllo dell'erosione e la protezione delle sementi dal dilavamento e creazione di condizioni microclimatiche più favorevoli all'attecchimento ed alla crescita della vegetazione;
- rivestimento e protezione delle scarpate e delle sponde fluviali dall'erosione;
- protezione, sostegno e contenimento del terreno seminato per favorire il rinverdimento di opere in terre rinforzate o di altro tipo;
- recupero di aree di cava dismesse o di discariche.

Esempi di materiali antierosivi:

Sinistra: biostuoia in fibre di paglia;

Centro: biostuoia in fibre miste di cocco e paglia,

Destra: biorete in fibre di juta, tessuta a maglia aperta (detta "geojuta")



Descrizione e Caratteristiche

Bioreti

Le bioreti sono costituite da fibre naturali di cocco, juta o di sisal, tessute a maglie aperte, annodate e/o saldate in modo da formare una struttura tessuta aperta e, nello stesso tempo, deformabile e capace di adattarsi al supporto.

La struttura e la resistenza alla trazione consentono di esercitare un'efficace azione di controllo sui processi erosivi delle acque meteoriche e di ruscellamento e di stabilizzazione del terreno trattato.

Le bioreti in fibre di juta (o geojute) sono una delle tipologie più usate negli interventi di rivestimenti antierosivi delle scarpate o pendii nei casi in cui si vuole ottenere un rapido sviluppo della copertura vegetale, grazie soprattutto alla loro elevata capacità di ritenzione idrica (fino a 5 volte il proprio peso).

Le bioreti in fibre di cocco hanno, rispetto alle geojute, una minore capacità di ritenzione idrica, ma sono molto più resistenti alla trazione ed alla degradazione. Per tale motivo sono più indicate in ambienti umidi o dove è richiesta una maggiore azione protettiva e consolidante del pendio o della scarpata da trattare con idrosemina.

Biofeltri

I biofeltri sono teli (o nappe) non tessuti agugliati, composti da un insieme di fibre vegetali sciolte o al massimo pressate, ottenuti grazie alla capacità "feltrante" dei filamenti.

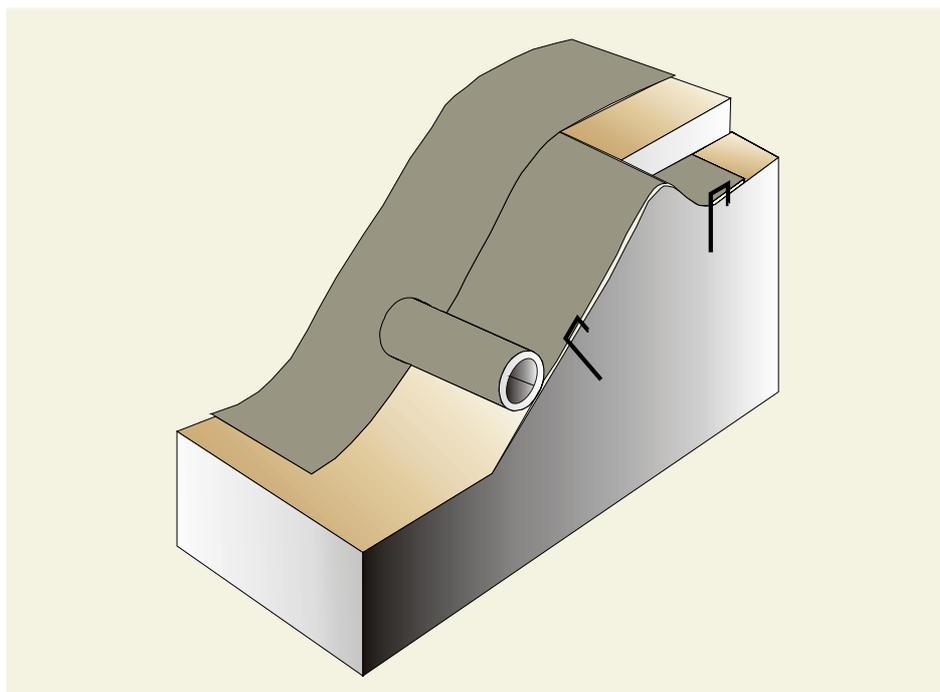
I biofeltri possono essere composti da fibre di paglia, di cocco, di paglia e cocco, di trucioli di legno e/o di altre fibre vegetali o miste biodegradabili.

I teli possono essere accoppiati, come le biostuoie, a reti in fibre naturali biodegradabili o sintetiche fotodegradabili ed a fogli di cellulosa.

I biofeltri sono usati per la protezione temporanea dai fenomeni erosivi di pendii e scarpate naturali o artificiali, trattate con semina, per favorire l'attecchimento e la rapida crescita della vegetazione.

Il biofeltro è un non-tessuto agugliato costituito da un insieme di fibre vegetali. Le bioreti possono essere in fibre di cocco o di sisal e sono disponibili anche come stuoie preseminate. La scelta del tipo più adatto dipende dalla durata e dalla resistenza meccanica richiesta e dalle condizioni climatiche.

Le stuoie biodegradabili hanno la funzione di proteggere provvisoriamente la semina dall'azione battente della pioggia e di creare un microclima ideale durante la prima fase di crescita della vegetazione. Sono disponibili biostuoie, biofeltri e bioreti. Le biostuoie possono essere in paglia, in legno ed in cocco.



Biostuoie

Le biostuoie sono costituite da strati di fibre naturali biodegradabili spesse una decina di mm, assemblati in modo da formare una struttura intrecciata, semiaperta e deformabile, capace di adattarsi con facilità al terreno sul quale è stesa.

Le biostuoie possono essere composte da fibre di paglia, cocco, paglia e cocco, juta o altre fibre vegetali biodegradabili e compatibili con l'ambiente.

Il materiale è trattenuto su entrambi i lati da microreti in materiale organico (tipo juta) o sintetico (tipo polipropilene), o confinato entro una microrete su un lato ed un foglio di cellulosa sul lato a contatto con il terreno.

Le biostuoie sono caratterizzate da un'elevata capacità di ritenzione idrica (specie quelle di paglia e juta), di protezione del terreno contro i fenomeni erosivi superficiali. Infatti la formazione di un microclima ideale e l'incremento di fertilità del suolo derivante dalla loro decomposizione, favoriscono notevolmente l'attecchimento e la prima fase di crescita della vegetazione.

La durata dei teli varia in funzione del materiale, della natura del suolo sul quale poggiano e delle condizioni climatiche locali. Mediamente le biostuoie in paglia si degradano nell'arco di un anno, mentre quelle in cocco, più resistenti alla degradazione, durano ½ anni. Le biostuoie in paglia o juta sono indicate per la loro maggiore capacità di ritenzione dell'umidità negli interventi di rivestimento antierosivi su pendii o scarpate in ambienti aridi. Le tipologie in cocco sono invece più adatte all'uso in ambienti umidi, come ad esempio il rivestimento di scarpate o sponde fluviali.

Le biostuoie in fibre miste di paglia e cocco sono utilizzate negli interventi di rivestimento di pendii o scarpate, soggetti a limitati fenomeni erosivi e poco umidi, quando si vuole conferire, con l'aggiunta della paglia, una maggiore ritenzione idrica alle caratteristiche di resistenza e durata del cocco.

Le biostuoie possono essere anche preseminate con varie miscele di sementi, in modo da ottenere una rapida copertura vegetale, di lunga durata, ed una discreta protezione del terreno dall'erosione superficiale. Queste sono usate principalmente per il rivestimento di pendii e scarpate, naturali o artificiali, formati da materiali fini umidi (es. sponde fluviali). In caso di terreni ghiaiosi o detritici con scarso materiale fino occorre riportare uno strato di terreno vegetale prima di stendere il materasso preseminato.

Impiego di biostuoia in un complesso intervento di sistemazione e consolidamento dei versanti di un torrente montano in forte erosione.

L'intervento ha previsto il ricorso a varie tecniche d'ingegneria naturalistica: rimodellamento del pendio, realizzazione di vimate, rivestimento del fondo dell'impluvio con tondame e costruzione di briglie in legname e pietrame, stesa di teli di biotessili ed inerbimenti.

La stesa dei rotoli di biotessili avviene dopo avere preventivamente regolarizzato la superficie del pendio dissestato, ed in modo da avere una certa sovrapposizione fra teli successivi di una decina di centimetri circa.

Terminato il posizionamento dei biotessili si procede al trattamento con idrosemina di specie vegetali idonee.



Generalità

I rivestimenti antierosivi sintetici sono realizzati con vari tipi di prodotti sia geosintetici che non. Queste tecniche si possono realizzare con dei prodotti prefabbricati che svolgono una o più funzioni od altrimenti abbinando materiali diversi posti in tempi successivi.

Di seguito si riportano alcuni dei materiali e delle tecniche più comunemente usati:

Geostuoie tridimensionali

Geocompositi

Rivestimenti vegetativi

Geocelle

Aspetti ambientali

L'impiego di prodotti formati da materiali di sintesi e/o naturali, offre la possibilità di realizzare opere d'ingegneria limitandone notevolmente l'impatto negativo sull'ambiente circostante. Nelle applicazioni antierosive oltre all'azione di protezione meccanica superficiale, possono svolgere funzioni di contenimento e di stabilizzazione corticale; in tal modo questi materiali consentono e favoriscono lo sviluppo di una copertura vegetale stabile in grado di svolgere un'efficace ruolo autonomo di consolidamento superficiale e di rinaturalizzare contesti degradati dalla costruzione di opere di ingegneria.

Impiego di geostuoia rinforzata con rete metallica a doppia torsione tipo "Macmat" per la stabilizzazione e il rinverdimento di un versante argilloso. Fase della posa (sopra) e dopo l'idrosemina (sotto).



Descrizione e Caratteristiche

Geostuoie tridimensionali

Le geostuoie tridimensionali sono dei materiali sintetici impiegati principalmente per il controllo dell'erosione superficiale su pendii e/o scarpate naturali o artificiali. Le geostuoie sono costituite da filamenti di materiali sintetici (polietilene ad alta densità, poliammide, polipropilene od altro), aggrovigliati in modo da formare un materassino molto flessibile dello spessore di 10-20 mm. La forma tipica di una geostuoia consiste in una struttura tridimensionale con un indice dei vuoti molto elevato, mediamente superiore al 90% (idonea al contenimento di terreno vegetale o dell'idrosemina).

Applicazioni

Le geostuoie sono principalmente impiegate con funzione antierosiva negli interventi di sistemazione idraulico-forestale e di consolidamento di pendii instabili. Sono sempre abbinata a sistemi di raccolta delle acque superficiali ed a materiali vivi; quando è necessario vengono utilizzate come un complemento delle opere di sostegno nell'ambito di sistemazioni più complesse. Dato l'elevato indice dei vuoti, le geostuoie si prestano molto bene ad essere intasate con miscele di idrosemina piuttosto dense quali quelle dell' "idrosemina a spessore", in tal modo svolgono sia una protezione antierosiva nei confronti del terreno che una funzione di "armatura dell'idrosemina" impedendone il dilavamento anche in situazioni difficili.

Esempio di struttura di geostuoia



Esempio di posa di una geostuoia rinforzata per la stabilizzazione di scarpate a basso angolo di attrito. Nella foto: discarica di rifiuti industriali bonificata.



Descrizione e Caratteristiche

Geocompositi antierosivi

I geocompositi sono materiali prefabbricati costituiti dall'associazione di prodotti geosintetici e non, aventi il compito di svolgere funzioni diverse. Nell'ambito dei rivestimenti antierosivi una categoria importante di geocompositi sono le geostuoie rinforzate; si tratta di prodotti realizzati mediante l'unione di una geostuoia tridimensionale e di un elemento di rinforzo.

L'elemento di rinforzo ha una funzione permanente di contenimento o di assorbimento di sforzi di trazione indotti nel geocomposito.

Tipicamente per l'armatura della geostuoia vengono usate reti metalliche a doppia torsione a maglie esagonali in trafilato d'acciaio protetto mediante rivestimento con lega di zinco-5% alluminio o geogriglie di fibre di poliestere tessute e protette con PVC.

Vengono fissati alla scarpata con una opportuna picchettatura e successivamente intasati con idrosemina a spessore.

Applicazioni

Le geostuoie antierosive rinforzate sono utilizzate per il controllo dell'erosione su scarpate in terra o in roccia alterata molto ripide; in questi casi oltre alla protezione dall'azione delle acque meteoriche è opportuno realizzare un elemento di contenimento in grado di controllare i piccoli movimenti gravitativi superficiali dovuti alla forte pendenza. Le geostuoie possono essere fissate con barre d'acciaio lunghe 0.6-0.7 m o anche con vere e proprie chiodature quando sia richiesto un consolidamento a maggiore profondità. Per migliorare l'azione di contenimento si possono aggiungere delle funi d'acciaio collegate alle teste dei chiodi.

Un'altra applicazione consiste nella stabilizzazione di terreno di riporto su scarpate in roccia o geosintetici (ad esempio le geomembrane nelle coperture di discarica) al fine di impedire lo scivolamento del terreno su un interfaccia con basso angolo di attrito.

Dopo avere steso ed ancorato il geocomposito, si riporta il terreno sopra di esso con spessore variabile da monte a valle; quando necessario si pone un geocomposito drenante al di sotto del geocomposito antierosivo per impedire la saturazione del terreno di copertura e migliorarne la stabilità.

Stabilizzazione di un pendio artificiale con chiodature, funi d'acciaio e geostuoia rinforzata con rete metallica a doppia torsione (tipo Macmat); su alcune porzioni del rilevato il rinverdimento è già completato.



Esempio di struttura di geostuoia rinforzata con rete a doppia torsione



Descrizione e Caratteristiche

Rivestimenti vegetativi

La tecnica consiste nella posa in successione di una biostuoia o geostuoia tridimensionale con funzione antierosiva, e di una rete metallica a doppia torsione a maglie esagonali in trafilato d'acciaio protetto mediante rivestimento con lega di zinco-5% alluminio, con funzione di contenimento. La posa avviene in maniera differenziata per i due elementi, pertanto è possibile rendere la stuoia ben aderente alla scarpata ed il sistema si presta molto bene anche ad applicazioni su superfici piuttosto irregolari. La rete preme sulla scarpata migliorando l'aderenza della stuoia ed impedendo i piccoli rilasci gravitativi tipici delle scarpate molto ripide.

Applicazioni

I rivestimenti vegetativi sono utilizzati per il controllo dell'erosione su scarpate, anche ripide, in terra o in roccia alterata.

Rivestimento vegetativo realizzato con rete metallica a doppia torsione a maglie esagonali protetta con rivestimento in lega zinco-alluminio e sottostante biostuoia in fibra di paglia e cocco. Fasi durante la posa (sopra) e al rivestimento completato (sotto).



Descrizione e Caratteristiche

Geocelle

Le geocelle sono dei geosintetici a struttura alveolare flessibili, resistenti e leggeri; vengono utilizzate come sistemi di stabilizzazione corticale per impedire lo scivolamento e l'erosione di strati di terreno di riporto su forti pendenze.

La struttura a "nido d'ape" o "alveolare" viene ottenuta per assemblaggio e saldatura di strisce di materiali sintetici con spessori maggiore o uguale a 1,2 mm ed altezza compresa tra 70 e 100 mm. Sono strutture facilmente trasportabili, caratterizzate da un ingombro molto contenuto, rapidità di applicazione ed adatte a diverse situazioni ambientali.

Dopo la posa delle geocelle ed il fissaggio con picchetti si effettua il riempimento con terreno vegetale e successivamente un'drosemina. Se necessario si deve abbinare una biostuoia od un biotessile qualora vi sia il pericolo di dilavamento da parte delle acque meteoriche; le geocelle hanno aperture piuttosto ampie e sono efficaci nell' impedire lo scivolamento superficiale del terreno di riporto mentre non contrastano sufficientemente il ruscellamento e soprattutto l'impatto delle gocce di pioggia.

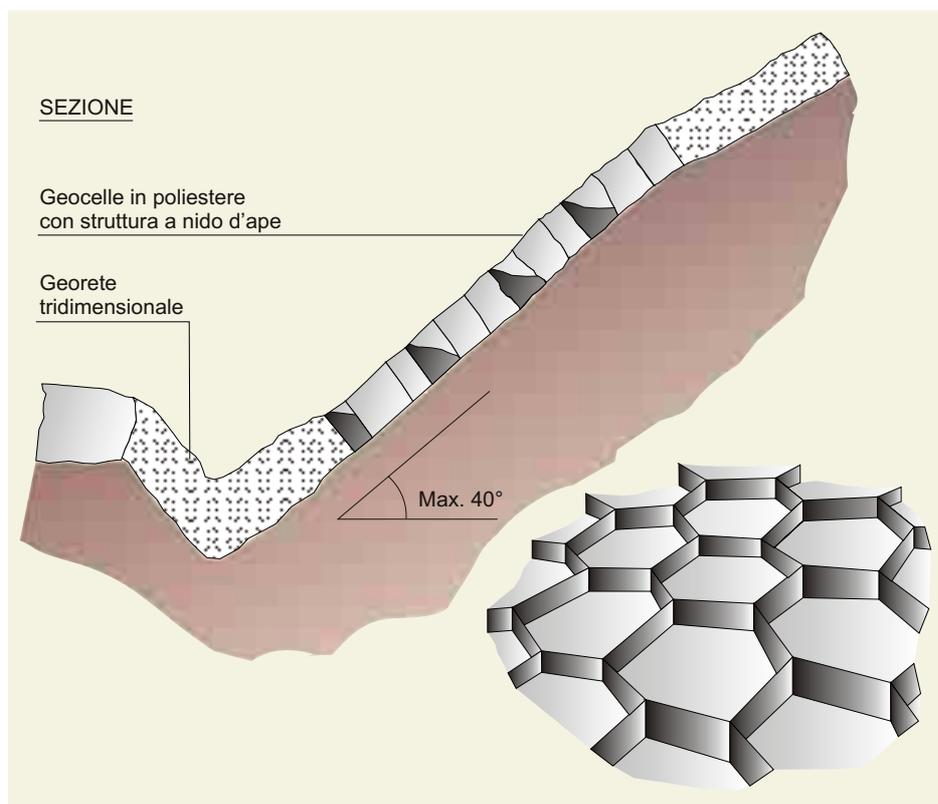
Quando possibile è sempre opportuno abbinare alle geocelle la messa a dimora di piantine o talee.

Applicazioni

Le geocelle possono essere utilizzate nell'ambito di interventi di stabilizzazione di pendii in frana, nel controllo dell'erosione e stabilizzazione di rilevati artificiali, nella stabilizzazione delle coperture di discariche e nel recupero ambientale delle cave.

L'inclinazione massima su cui possono essere utilizzate è intorno ai 40° sull'orizzontale.

Struttura di una geocella a "nido d'ape" o "alveolare". La morfologia romboidale delle celle è ottenuta per saldatura di strisce di polietilene ad alta densità con spessore maggiore o uguale a 1,2 mm.



Generalità

La realizzazione di rivestimenti vegetali è di norma sufficiente a proteggere gli strati più superficiali del terreno dall'azione aggressiva delle acque correnti meteoriche e superficiali, del vento e delle escursioni termiche. In molti casi lo sviluppo di una copertura vegetale naturale è ostacolato dall'instabilità dello strato superficiale del suolo o dalla scarsità di terreno vegetale ed humus, specie sui pendii rocciosi, e dall'aridità del clima e dai processi di erosione accelerata.

Per vincere la sterilità biologica dei pendii in terra, sono impiegate varie tecniche di semina o di rivestimenti vegetativi (con zolle o tappeti erbosi e/o con materassi e tasche vegetative).

Le tecniche costruttive ed i materiali impiegati sono differenti in relazione alle caratteristiche litologiche, pedologiche, morfologiche e climatiche della zona d'intervento. Generalmente l'inerbimento è abbinato a strutture ausiliarie, che hanno la funzione di ricoprire e fissare la superficie del terreno instabile da trattare. Le tecniche più comuni di inerbimento per semina o per posa in opera di rivestimenti vegetali comprendono:

- *semina a spaglio;*
- *coperture di zolle erbose;*
- *sistema nero-verde;*
- *idrosemina.*

Aspetti ambientali

I rivestimenti antierosivi di pendii e scarpate realizzati con le tecniche d'inerbimento, hanno un ridotto impatto ambientale. Questi sistemi rappresentano una delle soluzioni più indicate nelle zone di particolare pregio ambientale, dove occorre garantire, oltre all'efficacia tecnico-funzionale anche gli aspetti ecologici, estetico paesaggistici e naturalistici, ad esso connessi.

Queste tecniche infatti, se opportunamente realizzate, consentono un ottimo recupero naturale delle aree degradate, favorendo il consolidamento dei pendii, lo sviluppo successivo della copertura vegetale e/o il ripristino degli ecosistemi naturali danneggiati.

Inerbimento mediante la tecnica dell'Idrosemina di un'opera di sostegno in terra rinforzata. Nell'immagine si può osservare la buona riuscita dell'intervento a distanza di pochi mesi dall'ultimazione dei lavori.



Descrizione e Caratteristiche

Semina a spaglio

La semina a spaglio è una tecnica di copertura del terreno con tappeto erboso o specie arboree utilizzata negli interventi antierosivi di rivestimento di scarpate e pendii.

Questo tipo di semina è eseguito su pendii caratterizzati da pendenze basse (maggiore di 20°), per evitare l'asportazione dei semi e facilitare il lavoro degli operatori, e dalla presenza di un suolo relativamente fertile. Prima di procedere alla semina, occorre preparare il terreno eliminando i ciottoli più grossi e ammendandolo, con apporto di terreno vegetale o compost organico.

La semina può essere eseguita manualmente o con idonei mezzi meccanici, spargendo sul terreno umido un miscuglio standard di sementi selezionate (variabile tra 10 e 50 g/m²) o di fiorume (gli scarti non utilizzati per l'alimentazione degli animali).

Se i semi sono piccoli e leggeri si può aggiungere al miscuglio sabbia o argilla e, contemporaneamente, fertilizzante organico (50 - 150 g/m²).

Il periodo della semina dipende dalle condizioni pedoclimatiche del luogo, normalmente il più idoneo è quello compreso tra primavera e inizio autunno.

La semina manuale con solo fiorume viene oggi presa in considerazione limitatamente alla regione alpina al di sopra del limite del bosco, o in casi particolari sempre in aree montane qualora non sia più utilizzabile la semente in commercio.

Il fiorume non è reperibile in commercio ed è disponibile solo in modica quantità, in genere solo in aree adibite a pascoli. In ogni caso occorre potenziare la semina con l'aggiunta di concime complesso ternario minerale e granulare oppure concime animale.

Applicazioni

Le tecniche con semina manuale sono particolarmente indicate nelle aree collinari e montane per il rivestimento, quando si vuole ottenere in tempi brevi un'efficace copertura vegetale per il consolidamento e la protezione dall'erosione superficiale di pendii e scarpate, naturali o artificiali, con basse pendenze.

Descrizione e Caratteristiche

Inerbimento con copertura di zolle erbose

L'inerbimento realizzato con la posa di zolle o di tappeti erbosi, è una tecnica che viene utilizzata prevalentemente dove le piote o le zolle erbose sono facilmente disponibili in seguito alle operazioni di scotico preliminari ai movimenti terra per la realizzazione delle opere di sistemazione idraulico-forestale. In questi casi è utile quindi prelevare le zolle erbose ed utilizzarle per la successiva ricopertura delle scarpate nude. Tale intervento si rende oltremodo utile per le opere in quota dove l'attecchimento è più difficile.

Le zolle erbose che si ricavano in cantiere dovrebbero essere prelevate delle dimensioni più grandi possibili assieme al terreno compenetrato dalle radici e quindi conservate in modo idoneo. Per garantire la conservazione dell'integrità delle zolle erbose ed evitare il loro deterioramento per asfissia, mancanza di luce o disseccamento, è consigliabile non lasciare accatastato il materiale per troppo tempo, e cercare di effettuare il trasporto sul luogo d'impiego il più rapidamente possibile.

La posa in opera del rivestimento dipende dalla forma delle porzioni delle cotiche erbose e dalla loro composizione specifica. L'inerbimento, se realizzato a scacchiera od a strisce, riduce i costi e consente una copertura totale del pendio. Nel caso che le specie usate non riescano ad attecchire ed a colonizzare gli spazi vuoti, è opportuno riportare uno strato di terreno vegetale ed eseguire un trattamento con idrosemina. In questo caso, la sistemazione evidenzierà la sua natura artificiale per decenni.

Sono disponibili in commercio anche tappeti erbosi a rotoli: essi sono però indicati solo per il rivestimento di scarpate finemente livellate e non troppo ripide, a causa dell'omogeneità del miscuglio di semi usati e per il loro esiguo spessore.

Su pendii ripidi le zolle sono fissate con paletti che non debbono sporgere oltre la superficie della zolla.

Se la pendenza non è troppo elevata, con questo sistema è anche possibile rivestire fossi o canalette superficiali utilizzati per il deflusso delle acque di apporto meteorico lungo le scarpate.

Applicazioni

L'inerbimento con la posa di zolle o di tappeti erbosi è impiegato soprattutto per la riqualificazione ambientale e la protezione dall'erosione ed il consolidamento di scarpate e pendii, fossi e canalette.

Inerbimento di un pendio mediante la tecnica della semina potenziata col sistema nero-verde. In primo piano è possibile osservare un tratto di pendio trattato da poco con l'erba in fase di crescita, mentre sullo sfondo la copertura vegetale ha già raggiunto un buon livello e le scarpate si presentano completamente inerbite.



Descrizione e Caratteristiche

Inerbimento con sistema Nero-Verde

Il metodo Nero-Verde consiste nella formazione di una pellicola protettiva bituminosa sopra uno strato di paglia o di cellulosa sul quale sono stati sparsi semi e concimi. Tale sistema rappresenta una delle prime tecniche di semina potenziata introdotta negli interventi di inerbimento e consolidamento di versanti soggetti a fenomeni erosivi in alta quota, oltre i limiti del bosco.

I procedimenti esecutivi del sistema Nero-Verde, richiedono un complesso ed accurato svolgimento manuale ed in più fasi (difficoltoso soprattutto sulle lunghe scarpate e sulle superfici più ripide e scoscese), che comporta una forte incidenza dei costi della manodopera, nonché effetti estetici criticabili. Le fasi principali sono le seguenti:

- preparazione del terreno con eventuale riporto di terreno vegetale;
- stesa di uno strato continuo di paglia di segale, fieno o di altri cereali. La paglia deve essere asciutta per evitare che i semi si attacchino allo strato più superficiale. Le operazioni di sfogliatura delle balle di paglia e la stesa devono essere eseguite a mano per garantire l'uniformità della stesa. Inoltre la paglia può essere preventivamente irrorata con enzimi che ne accelerino la decomposizione;
- distribuzione con semina a spaglio di un apposito miscuglio di sementi sopra il letto di paglia mescolata a concime minerale od organico;
- aspersione di un'emulsione bituminosa instabile, diluita in acqua, per stabilizzare fisicamente lo strato di paglia ed evitare erosioni da parte del vento e dell'acqua;
- su terreni molto pendenti il suolo viene preventivamente consolidato mediante la posa di reti o griglie metalliche, sintetiche o in fibre organiche a maglia stretta fissate al suolo con graffe metalliche e successivamente inerbite.

La quantità e la qualità dei singoli elementi da impiegare nella miscela sono scelti sulla base di un'attenta analisi dei luoghi, valutando in special modo i fattori pedologici e climatici, scegliendo in giusta proporzione le essenze erbacee, graminacee, leguminose ed eventualmente quelle arboree ed arbustive più adatte alle condizioni del luogo in cui si opera.

L'intervento deve essere effettuato in genere durante i mesi più umidi.

Il reticolo di paglia con emulsione idrobituminosa forma uno strato protettivo che assolve alle seguenti funzioni:

- riduzione dell'azione erosiva da parte delle acque di pioggia e/o del vento;
- protezione e preservazione delle sementi dalla perdita per dilavamento o per predazione da parte di animali (uccelli, roditori ed altro);
- creazione di un particolare microclima, in prossimità del terreno, favorevole alla crescita della vegetazione, in seguito al mantenimento dell'umidità e attenuazione degli sbalzi termici;
- degradazione lenta dello strato protettivo che si trasforma in un substrato favorevole allo sviluppo della vegetazione.

Applicazioni

Questo sistema è indicato soprattutto in situazioni critiche, caratterizzate da scarsità di suolo vegetale e condizioni climatiche severe con siccità, piogge violente e frequenti sbalzi termici, come quelle che si riscontrano in alta montagna, ed in tutti gli altri casi dove si vuole ottenere un rapido inerbimento e consolidamento dei pendii per limitare i processi di degrado idrogeologico ed ambientale dei versanti, dovuti a cause naturali e antropiche.

E' una tecnica molto costosa che oggi si usa solo per casi particolari in alta quota.

Descrizione e Caratteristiche

Idrosemina

L'inerbimento ed il consolidamento mediante idrosemina consistono nello spruzzare ad alta pressione, sul terreno preventivamente preparato, una soluzione di acqua, semi, collante ed altri eventuali componenti.

La possibilità di variare in molti modi la composizione delle miscele, rende l'idrosemina adatta alla soluzione di quasi tutti i problemi di rinverdimento. L'efficacia di questo sistema sarà però assicurata generalmente solo se esso verrà utilizzato in abbinamento ad altre tecniche sia di protezione che di regimazione delle acque meteoriche. Questa tecnica è adatta a coprire grandi e medie superfici anche a elevata pendenza e scarpate con scarsa copertura.

Un componente spesso presente nelle idrosemine è il mulch, termine con cui ci si riferisce a tutti quei materiali che aggiunti alla miscela conferiscono una maggiore resistenza meccanica e capacità di ritenzione idrica.

In relazione alla composizione della miscela si distingue tra:

Idrosemina di base e Idrosemina con mulch

idrosemina di base:

Preparazione del letto di semina con eventuale eliminazione dei ciottoli presenti tramite rastrellatura.

Distribuzione mediante l'impiego di motopompe volumetriche (non devono danneggiare i semi), dotate di agitatore meccanico che garantisca l'omogeneità della miscela, montate su mezzi mobili di una particolare miscela base costituita da rapporti variabili di: acqua, miscuglio di sementi di specie erbacee e facoltativamente arbustive idonee alla stazione (35-40 g/mq), fertilizzante organo-minerale bilanciato (150 g/mq), leganti o collanti, sostanze ammendanti, fitoregolatori atti a stimolare la radicazione delle sementi e lo sviluppo della microflora del suolo.

E' adatta su terreni in cui è presente un'abbondante frazione fine e colloidale, ma con inclinazioni non superiori a 20°.

Idrosemina con mulch:

Alla miscela dell'"idrosemina base" si devono aggiungere fibre di legno o paglia in ragione di non meno di 180 g/mq. Le fibre devono essere per il 20% almeno lunghe 10 mm; nelle situazioni meno gravose il 50% del mulch potrà essere costituito da pasta di cellulosa. Il mulch deve avere caratteristiche chimiche che non siano sfavorevoli alla crescita della vegetazione. Il collante sarà a base naturale ed in quantità non inferiore a 5,5 g/mq.

E' un'idrosemina particolarmente adatta su terreni con le stesse caratteristiche della prima ma con inclinazioni fino a 35° e con presenza di fenomeni erosivi intensi.

Inerbimento di una scarpata mediante idrosemina. L'idroseminatrice è costituita da un serbatoio, una pompa e da un distributore girevole (tipo cannoncino antincendio) che permette l'aspersione della miscela di acqua, miscuglio di sementi, fertilizzanti, collanti ed altre sostanze ammendanti del terreno sulla superficie della scarpata da trattare.



idrosemina a fibre legate:

Sono idrosemine in cui alla miscela dell' "idroesmina base" si aggiunge un mulch di fibre di legno, in quantità di almeno 350g/mq e per il 50% lunghe almeno 10 mm. Il collante dovrà essere molto viscoso ed in grado di creare legami tenaci tra le fibre; la quantità di collante sarà almeno di 35 g/mq e comunque in ragione del 10%.

E' una idrosemina con un forte potere protettivo ed elevata capacità di ritenzione idrica. E' adatta a terreni fortemente erodibili con inclinazione fino a 50°-60°, mediamente poveri di materia organica e di frazione fine.

idrosemina a spessore:

Alla miscela dell' "idroesmina base" si aggiunge mulch in fibre di legno in ragione di almeno 250 g/mq. Almeno il 20% delle fibre avrà lunghezza di 10 mm. Inoltre verrà impiegata materia organica sotto forma di torba in ragione di almeno 250 g/mq. Quando il terreno è molto argilloso si potranno aggiungere 100 g/mq di compost. Nei terreni molto sassosi si potrà arrivare a quantità di mulch di torba pari a 350 g/mq rispettivamente. L'idrosemina verrà realizzata in due passate, lasciando asciugare la prima. Nella seconda passata si spruzzerà solo mulch e collante. Nelle terre rinforzate od in condizioni particolarmente difficili a causa di pendenze elevate si aggiungerà una ulteriore passata con 100 g/mq di mulch di fibre di legno e 100 g/mq di paglia tritata. Questo tipo di idrosemina è adatto alle situazioni in cui il substrato è particolarmente povero di materiale organico, è sassoso o costituito da rocce tenere alterate

Applicazioni

Le tecniche con idrosemina sono impiegate soprattutto nelle situazioni in cui il terreno si trova completamente denudato e privo di copertura organica con ripristini vegetazionali che consentano di generare in tempi brevi un manto vegetale di protezione. Le applicazioni più comuni comprendono:

- protezione dall'erosione di sponda;
- protezioni di superfici soggette a movimenti di terra a causa di lavori per la costruzione di opere, di sistemazioni superficiali e riprofilature di scarpate in scavo e in rilevato.
- sistemazione di scarpate e di conoidi;
- recupero ambientale e ripristino naturale di cave e discariche,
- inerbimenti di piste da sci.

Sistemazione di una scarpata di un rilevato stradale in terra rinforzata. Nell'immagine in primo piano è visibile la biostuoia che ha il compito di trattenere il materiale fino a permettere l'esecuzione dell'idrosemina per il rinverdimento finale dell'opera



Idrosemina a forte spessore in alta quota su cono di detrito, prima (sopra) e dopo (sotto) l'inerbimento.



Generalità

L'abbinamento di materiali vivi (talee, piantine radicate) e inerti di legname, o altro materiale (terre, rocce, calcestruzzo, metallo, sintetici ecc.) consente di stabilizzare e consolidare pendii e scarpate instabili, interessati da fenomeni franosi di tipo prevalentemente superficiale. Infatti questa soluzione permette di realizzare strutture di rinforzo del terreno entro cui impiantare talee o piantine radicate. I materiali vivi hanno una funzione non solo ecologica (di rinaturalizzazione), ma anche tecnica: le piante impediscono l'erosione superficiale, intercettando e rallentando il deflusso delle acque meteoriche, e rinforzano con lo sviluppo del loro apparato radicale il terreno, esercitando al tempo stesso un efficace azione di prosciugamento. Gli interventi di stabilizzazione superficiale possono essere puntiformi o disposti linearmente.

Aspetti ambientali

La realizzazione di opere di consolidamento superficiale che utilizzano materiali vegetali vivi in legname o altro materiale (piantumazioni, viminata o graticciata, fascinata, gradonate, palificata, palizzata, grate) hanno un impatto ambientale molto ridotto. Infatti la loro costruzione non necessita di movimento terra significativi in grado di arrecare danni alla vegetazione o all'ecosistema. La struttura garantisce un rapido effetto di consolidamento delle scarpate in dissesto. Se infatti il legno può marcire in tempi relativamente brevi, il radicamento e la crescita delle talee e delle piantine assicurano, nella fase successiva, la stabilità dei versanti. Questi sistemi rappresentano una delle soluzioni più indicate nelle zone di particolare pregio ambientale, nelle quali occorre garantire, oltre che l'efficacia tecnico-funzionale dell'intervento anche gli aspetti ecologici, estetico paesaggistici e naturalistici, ad esso connessi. Gli interventi stabilizzanti consentono un ottimo recupero naturale delle aree degradate, favorendo il consolidamento dei pendii e lo sviluppo successivo della copertura vegetale e il ripristino degli ecosistemi naturali danneggiati.

Rimboschimento e rinfoltimento di un versante dissestato mediante l'impianto di conifere (Appennino Umbro Marchigiano). Queste tecniche di sistemazione idraulico forestale che utilizzano materiali vivi sono molto efficaci negli interventi di consolidamento e di difesa dall'erosione delle aree degradate in ambiente montano.



Generalità

La tecnica d'impianto mediante la messa a dimora di piantine arboree ed arbustive e/o il trapianto di rizomi o cespi selvatici, avviene di solito in zone dove le caratteristiche di pendenza ed il terreno lo consentono, e dove si richiede un rapido sviluppo della copertura vegetale. Questa tecnica di stabilizzazione dei versanti sfrutta la capacità degli apparati radicali delle piante di legare e consolidare le particelle di terreno sciolto e le capacità di regimazione idrologica derivanti dalla intercettazione dell'acqua meteoriche e dal prosciugamento dell'acqua superficiale.

Descrizione e Caratteristiche

L'impianto di specie arbustive ed arboree comprende le due seguenti tecniche.

Messa a dimora di talee di salici, tamerici ed altre specie

Le talee devono essere di specie arbustive idonee a questa modalità di trapianto vegetativo, prelevate dal selvatico di 2-3 anni d'età, e messe a dimora nel verso della crescita previo taglio a punta e con disposizione perpendicolare o leggermente inclinata rispetto alla superficie del pendio. L'infissione nel terreno avviene mediante battitura con mazza di legno, previa apertura di un foro con un'apposita punta metallica. La densità d'impianto varia tra 2 e 10 talee per mq. Particolare attenzione va posta nelle modalità di prelievo, trasporto e stoccaggio al fine di preservare le capacità vegetative delle piante.

Piantagione di semenziali o trapianti di arbusti, di alberi e/o di specie pioniere

La messa a dimora avviene entro delle buche, scavate con mezzi manuali o meccanici di dimensioni prossime al volume dell'apparato radicale, se si impiegano piantine a radice nuda, o maggiore, se si utilizzano piantine in fitocella o con vasetti o in pani di terra.

La preparazione delle buche deve tenere conto delle condizioni pedoclimatiche: nelle zone aride è bene che il livello della buca, dopo aver eseguito il riempimento risulti inferiore al terreno circostante; al contrario in zone con ristagni d'acqua è preferibile realizzare un drenaggio centrifugo.

Le piantine (pioppi, salici) possono essere impiantate a radice nuda, con zolla di terra o in contenitori biodegradabili, in genere si tratti di esemplari di età variabile tra 1 e 3 anni ed altezze comprese tra 20 - 30 cm e 100 - 150 cm.

L'impianto di specie a radice nuda si esegue prevalentemente durante il periodo estivo, per le piantine in zolla o in contenitori il trapianto può essere effettuato anche durante i mesi di riposo vegetativo.

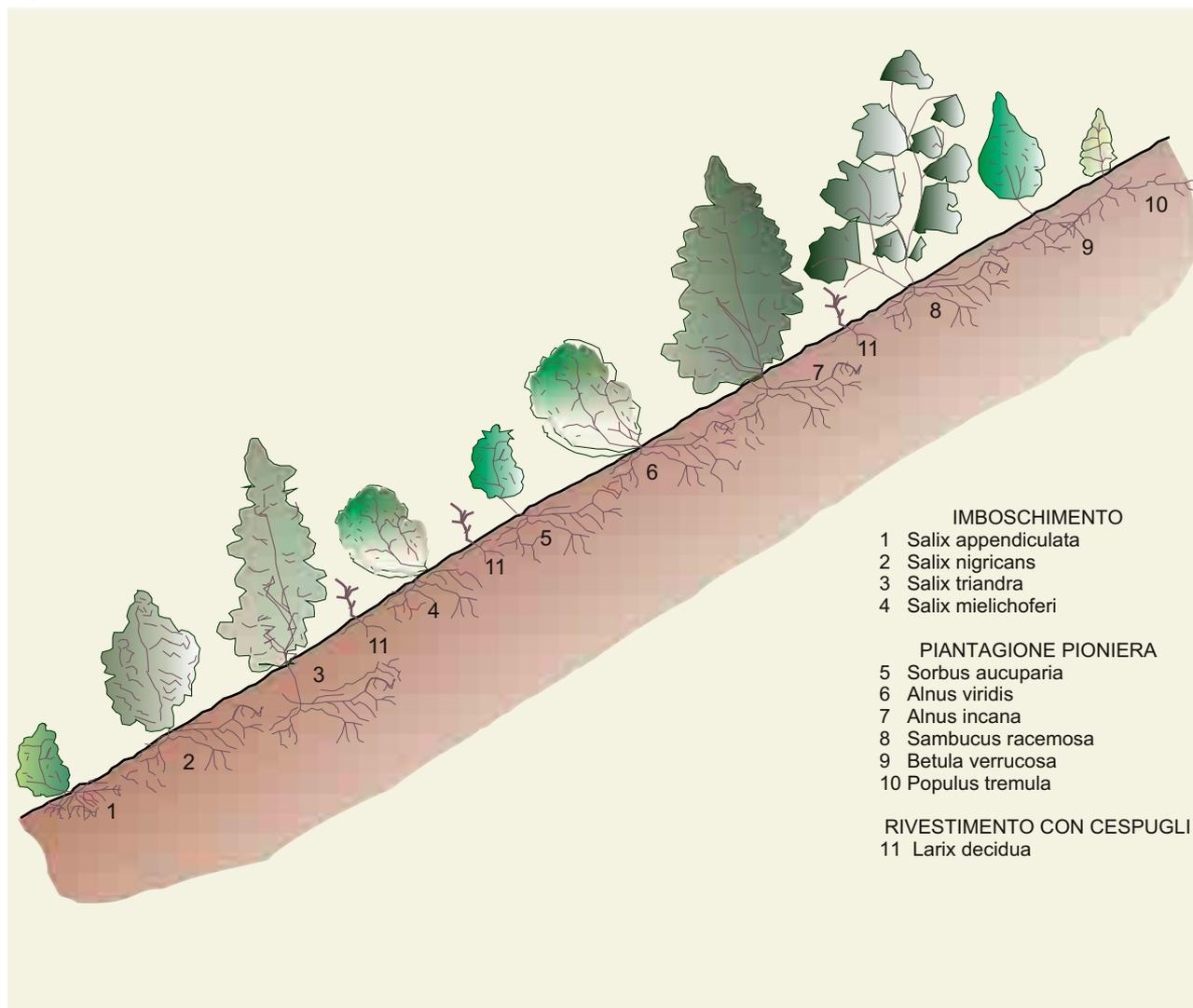
Per la messa a dimora di specie pioniere su terreni molto difficili (aridi o poco fertili) è consigliato procedere al ricoprimento della buca, dopo l'impianto, con uno strato (2 - 4 cm) di torba, paglia, cellulosa sminuzzata o sostanza organica, allo scopo di mantenere umido il terreno. In questi tipi di terreni si ricorre all'impiego di fertilizzanti o concimi contestualmente al trapianto.

La densità e la tipologia d'impianto (lineari, a quinconce, ecc.) varia in funzione delle specie e delle caratteristiche pedoclimatiche dell'area: i sestri d'impianto possono variare molto, da 0,5 x 0,5 m (40.000 piante/ettaro) per impianti arbustivi; a 1 x 1 m (10.000 piante/ettaro) fino a 3 x 3 m (circa 1.000 piante/ettaro) per impianti prevalentemente arborei.

Applicazioni

Le piantumazioni sono particolarmente indicate nelle zone collinari e montane o su terreni aridi, quando si vuole ottenere in tempi brevi un'efficace copertura vegetale per il consolidamento e la protezione dall'erosione superficiale di pendii e scarpate o il rinverdimento e consolidamento di opere strutturali.

Piantumazione di essenze arboree per il ripristino della copertura arbustiva e il consolidamento di pendii in dissesto. Nella sezione è riportato lo sviluppo radicale dopo circa 3 periodi vegetativi di alcune specie vegetali.



Generalità

Le fascinate vive sono utilizzate negli interventi di sistemazione dei versanti con pendenza non superiore ai 30°-35°.

Con questo sistema si ottiene il rinverdimento ed il drenaggio superficiale dei pendii mediante la formazione di file di gradoni, disposti parallelamente alle curve di livello, nei quali sono sistemati delle fascine di astoni o ramaglia, possibilmente lunghi e diritti, prelevati da piante legnose con elevata capacità di diffusione vegetativa.

Descrizione e Caratteristiche

Le fascinate vive comprendono due tipologie costruttive differenziate in base al materiale vegetale impiegato:

- fascinate vive con ramaglia;
- fascinate vive con piantine.

Fascinate vive con ramaglia

La loro realizzazione comporta un ridotto movimento di terra e comprende l'escavazione di solchi profondi da 0,3 a 0,5 m ed altrettanto larghi, ove vengono sistemate orizzontalmente le fascine di ramaglia, prelevate da specie legnose con buona capacità di propagazione vegetativa. E' sufficiente che in ogni sezione trasversale della fascina siano presenti 5 verghe di almeno 1 cm di diametro, con punti di legatura distanti 70 cm uno dall'altro.

La costruzione avviene fissando le fascine di ramaglia con paletti in legno vivo (pioppi o salici) o morto (castagno, larice, ecc.) lunghi almeno 60 - 100 cm e diametro compreso fra 5 e 10 cm, infissi nel terreno attraverso la fascina od a valle di essa. Lo scavo è quindi ricoperto con un leggero strato di terreno proveniente dagli scavi dei fossi superiori.

Le file di gradoni con le fascine di ramaglia sono eseguite orizzontalmente, secondo le curve di livello o con una leggera inclinazione obliqua rispetto al pendio per aumentare la capacità di deflusso delle acque superficiali e l'efficacia drenante del sistema. La distanza tra file successive si aggira mediamente intorno a 1,5-2 m.

Una variante di questo sistema, applicata dove si richiede una maggiore efficacia consolidante dell'intervento, prevede l'associazione delle fascine con viminate.

Fascinata viva con piantine

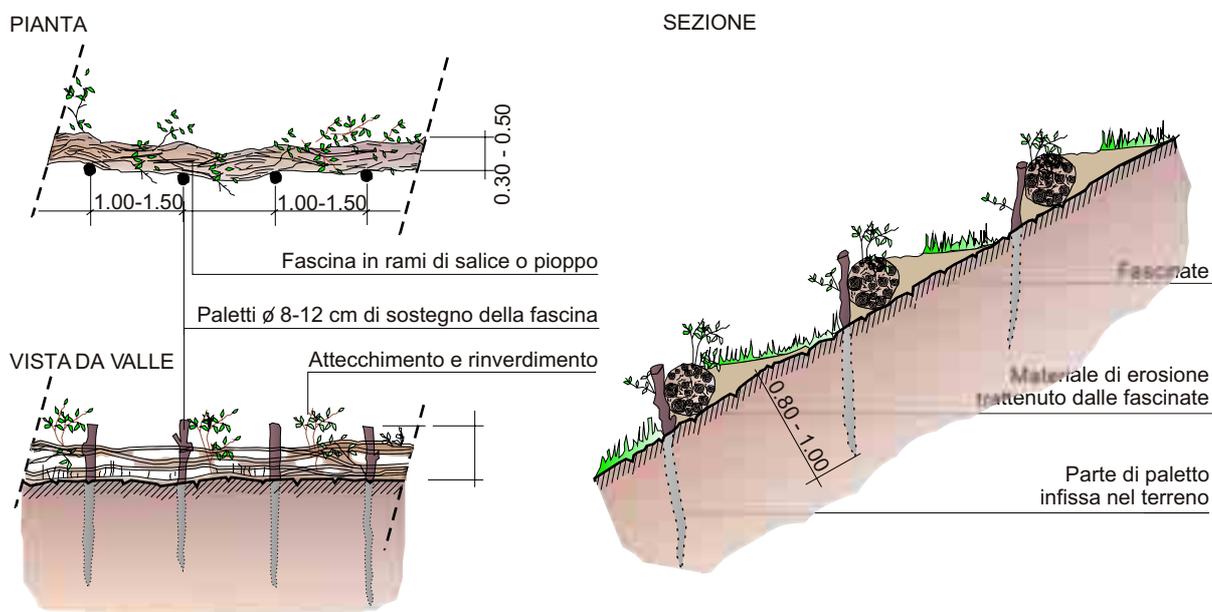
Nella variante con piantine radicate di specie arbustive, l'esecuzione dell'intervento comporta alcuni accorgimenti e procedure diverse da quelle della tecnica precedente. Infatti le fascine di ramaglia sono più leggere e con meno verghe (3-6), i solchi sono più larghi di circa 10-15 cm e le piantine radicate sono messe a dimora in numero di circa 1 -2 esemplari per metro.

Il solco, dopo la messa a dimora delle fascine e delle piantine, è riempito con il terreno, eventualmente ammendato, proveniente dagli scavi.

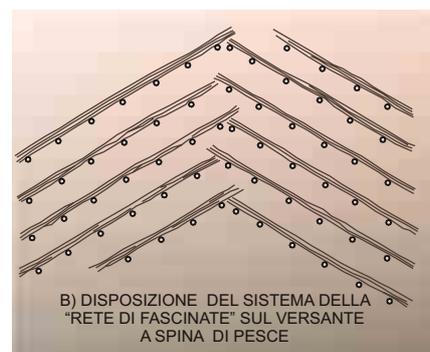
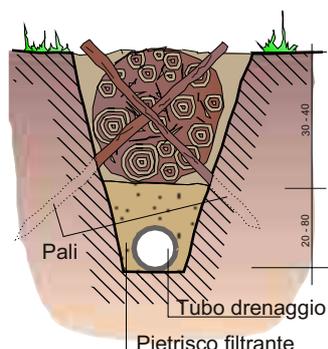
Le fascinate, come tutti gli altri interventi che impiegano materiali vivi, devono essere realizzate solo durante il periodo di riposo vegetativo.

Applicazioni

La fascinata è un sistema di stabilizzazione non indicato negli interventi di sistemazione dei versanti in materiali poco coesivi, in quanto presenta un modesto effetto consolidante in profondità, che avviene solo dopo la radicazione delle verghe e l'attecchimento delle piantine. Inoltre, questa tecnica può essere usata solo su pendii con inclinazioni non elevate (minori di 30° - 35°) e in condizioni climatiche non estreme.



Fascinata viva con ramaglia realizzata per il ripristino vegetazionale di una scarpata con pendenza inferiore ai 35° . La struttura forma delle piccole gradonate che consentono di raccogliere il materiale terroso di riporto e lo sviluppo della vegetazione. L'interasse tra i gradoni varia da 1 a 2 metri.

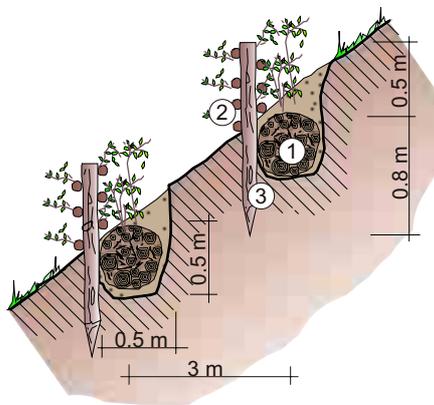


Sezione tipo di un sistema di drenaggio con fascine associato a materiale arido e tubo drenante. La profondità del fosso è maggiore rispetto allo schema tipico delle fascinate (in genere maggiore di 40 cm), sul fondo dello scavo è posto il tubo drenante ed uno strato di pietrisco e/o ghiaia e ciottoli, dello spessore di 20-80 cm, sopra al quale poggia la fascina. Questo sistema si usa quando le acque da drenare e da far defluire si trovano ad una profondità maggiore di 40 cm dalla superficie del terreno.

Disposizione planimetrica delle fascinate. Nei sistemi di drenaggio con fascine i solchi possono essere disposti sul versante:

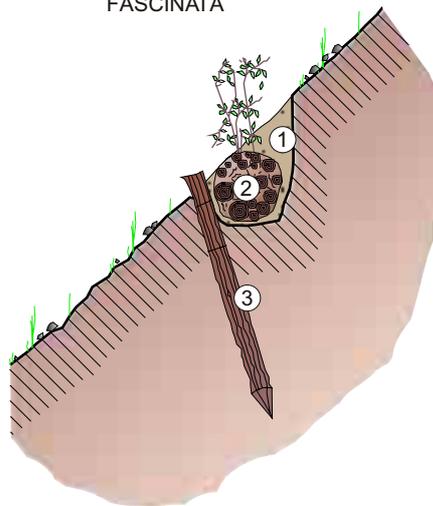
- A) ad "elementi continui", su file parallele con angolo d'inclinazione variabile tra 0° - 20° per evitare ristagni d'acqua;
- B) a disposizione diagonale a formare linee a "zig zag" od "a spina di pesce", con angolo d'inclinazione compreso tra 10° e 30° rispetto all'orizzontale e con sovrapposizione dei tratti interni dei singoli elementi di almeno 50 cm. L'interasse tra file successive varia in funzione della pendenza del versante (da 1,5 a 2,5 m).

FASCINATA
(con viminata)



- 1 - Fascine con almeno 5 rami di diametro > 1 cm
- 2 - Verghe di salice di diametro: 2-3 cm
- 3 - Paletti di legno di diametro 4-7 cm

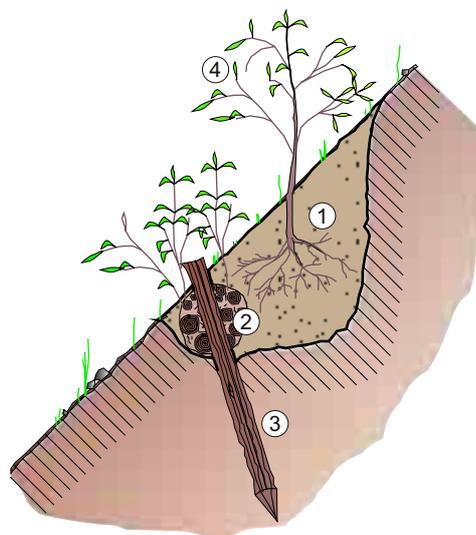
FASCINATA



- 1 - Fosso profondo 30-50 cm e largo altrettanto.
- 2 - Fascine con almeno 5 rami di diametro > 1 cm.
- 3 - Paletti di legno di lunghezza > 60 cm.

FASCINATA
(CON MESSA A DIMORA DI PIANTINE RADICATE)

Impianto di una fascinata viva su pendio: Le fascine composte da 5-6 verghe di specie pioniere (salici o altro tipo) sono appoggiate orizzontalmente sul fondo dello scavo, profondo circa 30-50 cm ed interrate col materiale di sterro della banchina successiva. L'interasse tra file successive varia da 1,5 a 2 m. Le fascine sono fissate al terreno con paletti di legno (verde o morto) infilati in mezzo ai rami o posti immediatamente a valle degli stessi.



- 1 - Fosso profondo 50 cm e largo altrettanto
Riempimento con miscuglio di terreno vegetale e di terreno di scavo.
- 2 - Fascine vive con un minimo di 5 rami di diametro > 1 cm.
- 3 - Paletti di legno posti ogni 80-100 cm e di lunghezza > 60 cm.
- 4 - Piantine radicate (densità: 1-2 ogni metro).

Generalità

Viminate vive

La viminata viva ha la funzione di consolidamento superficiale per mezzo delle piante ed un immediato effetto di regimazione delle acque meteoriche. Questo sistema comporta una tecnica mista tra materiali vivi (astoni e talee) e materiali morti. Un tempo largamente impiegate per il consolidamento di piccole frane, oggi le viminate sono sostituite da sistemi stabilizzanti più efficaci e meno costosi

Descrizione e Caratteristiche

La viminata è costituita da paletti di legno (castagno, larice, salice o altro) lunghi circa 100 cm, infissi nel terreno per 70 cm, con un interasse di circa 100 cm. A questi paletti vengono collegati, intrecciandoli, 3 - 8 rami lunghi e flessibili di salice disposti longitudinalmente e legati con filo di ferro zincato.

La parte terminale di questa deve essere interrata al fine di ridurre i rischi di scalzamento della struttura e di favorire il radicamento delle talee. L'altezza fuori terra delle viminate è di circa 30 cm.

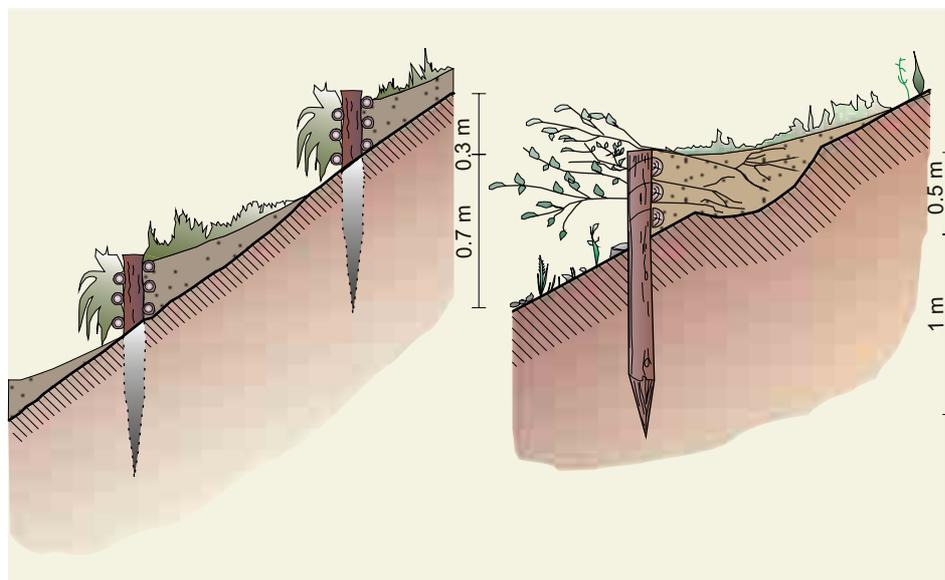
L'impianto è posizionato lungo le curve di livello, a valle ed a monte delle zone dissestate.

Le viminate possono essere disposte sui pendii a file parallele distanti da 1,5 a 3 metri, o a file diagonali a formare una disposizione a forma di rombo, o di quadrato, a sviluppo orizzontale e verticale in modo da trattenere il terreno. Una variante è rappresentata dalla disposizione seminterrata in piccoli solchi di 20 cm circa al fine di aumentare la percentuale di attecchimento.

Un limite di questo sistema, oltre alla complessa laboriosità dell'impianto, è la difficoltà di reperire materiale vegetale molto lungo e nel contempo ad alta capacità radicante, che implica costi relativamente alti in rapporto all'efficacia dell'intervento.

Per ottenere la massima efficacia di consolidamento del terreno è necessario eseguire le viminate durante il periodo di riposo vegetativo. In tal caso le talee radicano ed hanno la possibilità di ritenere immediatamente il terreno sul pendio, formando solidi gradoni. In casi particolari si può combinare la tecnica delle viminate (anche morte) con quella della gradonata con talee, ottenendo in tal modo un immediato consolidamento del terreno dal punto di vista meccanico ed un rapido rinverdimento grazie alle talee.

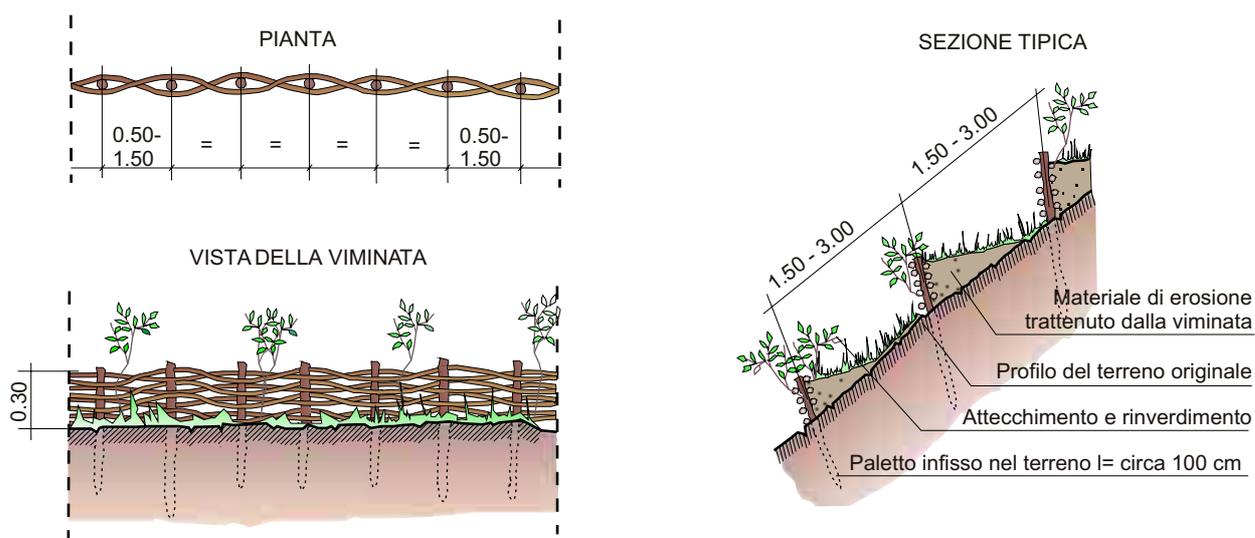
Sezioni tipo di una viminata (a sinistra) e di una palizzata semplice con talee e piantine (a destra). Le viminate sono strutture in legname analoghe alle palizzate, ma caratterizzate da una durabilità e resistenza molto minore, dovuta alla necessità di utilizzare verghe di piccole dimensioni per realizzare l'intreccio. Le palizzate sono strutture con una maggiore efficacia consolidante e stabilizzante e di più semplice e rapida realizzazione.



Applicazioni

Le viminate e le palizzate sono impiegate in generale, negli interventi di sistemazione e consolidamento dei pendii in materiali sciolti, interessati da frane di tipo superficiali e da fenomeni erosivi. Inoltre è applicato con successo anche per la sistemazione ed il consolidamento di alte scarpate artificiali (ad esempio rilevati stradali o argini).

Particolare di un'intervento di stabilizzazione di una scarpata mediante la realizzazione di più ordini di viminate disposte su file orizzontali trasversalmente rispetto alla linea di massima pendenza.



Esempio di schema d'impianto di vimate viva visto in pianta, prospetto e sezione.

Rimodellata la superficie del pendio da stabilizzare, si infiggono nel terreno paletti di legno appuntiti, lunghi circa 100 cm e con diametro di 4-8 cm, per circa 2/3 della loro lunghezza. L'interasse tra i paletti varia tra 50-150 cm, tra questi si pongono a distanza di circa 30 cm paletti più corti costituiti da talee vive. Ai paletti s'intrecciano le verghe in numero sufficiente a formare un intreccio d'altezza pari a circa 30 cm.

Generalità

Palizzate vive

La tecnica della palizzata in legname con talee e/o con piantine è un sistema simile alle viminate, che unisce l'impiego di talee con strutture fisse in legno per la stabilizzazione di pendii e scarpate, naturali o artificiali, in dissesto.

Con questo sistema si tende a rinverdire le scarpate attraverso la formazione di piccoli gradoni lineari, sostenuti dalle strutture di legno, che corrono lungo le curve di livello del pendio e dove, a monte, si raccoglie del materiale terroso. Le piante, una volta che la vegetazione si sarà sviluppata, garantiranno un consolidamento del terreno con l'apparato radicale e una resistenza all'erosione superficiale, con la loro parte epigea.

Descrizione e Caratteristiche

La costruzione della palizzata prevede le seguenti modalità d'esecuzione:

- Preparazione del terreno e modellamento del pendio con formazioni di gradoni, iniziando dal piede della scarpata e procedendo per file parallele verso l'alto, eseguito a mano o con l'ausilio mezzi meccanici di piccole dimensioni;
- Infissione nel terreno di pali di larice o di castagno, lunghi circa 1,30 m e con diametro di 10-15 cm, posti ad una distanza di 1-2 m. I pali sono conficcati nel terreno per una lunghezza di 1 m, in modo che restino sporgenti di almeno 30 cm;
- Posa in opera dei mezzi tronchi di larice o di castagno, con diametro di circa 10 cm e lunghezza superiore ai 2 m, aventi la funzione di trattenerne il materiale di risulta dello scavo, posto a tergo della struttura, e di garantire la sua stabilità. I mezzi tronchi sono fissati con chiodi o filo di ferro ai pali infissi;
 - Messa a dimora, appoggiate sul fondo dello scavo, di talee e/o di piantine radicate disposte a pettine una accanto all'altra con un numero variabile, a seconda delle condizioni pedoclimatiche e della tipologia dell'impianto, da 5 a 10 piante per metro lineare. Queste sono interrate per buona parte della loro lunghezza (per 3/4 le talee, e per circa 2/3-3/4 le piantine) con il terreno dello scavo di riporto del gradone superiore.

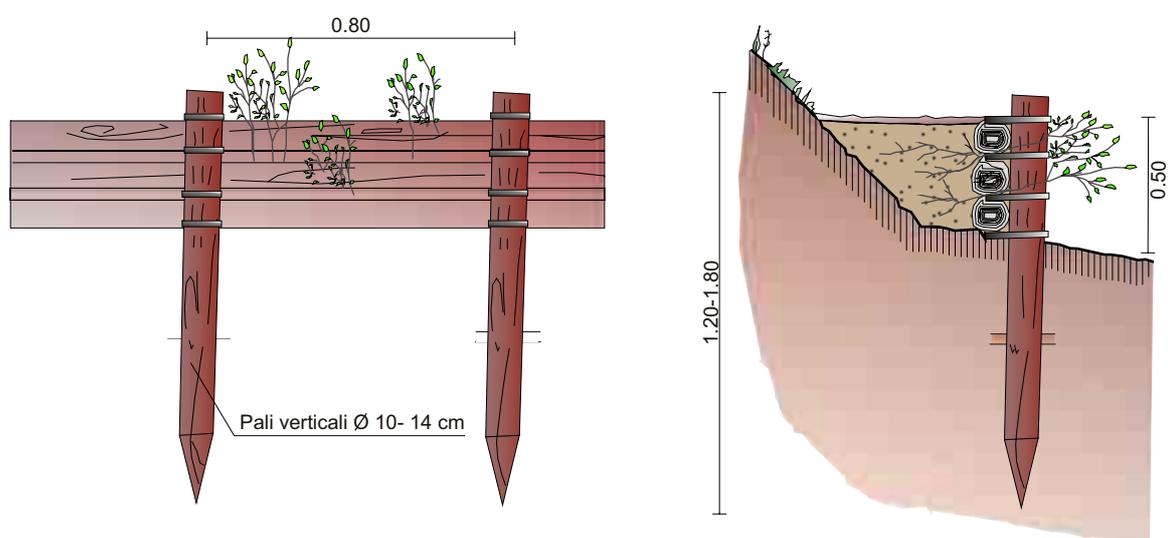
Per ottenere la massima efficacia di consolidamento del terreno è necessario eseguire l'impianto durante il periodo di riposo vegetativo. In tal caso le talee radicano ed hanno la possibilità di ritenere immediatamente il terreno sul pendio, formando solidi gradoni

Particolare di un tratto della palizzata a lavoro appena ultimato. Alle spalle della struttura (realizzata mediante l'infissione di pali di legno nel terreno e mezzi tronchi fissati con chiodi e filo di ferro ai pali infissi) sono state poste a dimora circa 7-8 piantine per metro lineare. Il materiale di rinterro è stato arricchito con sostanze organiche per permettere un miglior attecchimento e crescita delle piantine.





Intervento di stabilizzazione del versante a monte della strada statale SS n. 77 Foligno-Muccia (Appennino Umbro-Marchigiano) consistente nella realizzazione di palizzate semplici in legname con talee e piantine. Il versante, caratterizzato dalla presenza di un' ampia fascia di detrito calcareo instabile e da elevata acclività (circa 30° - 40°), è stato sistemato mediante la costruzione di strutture di circa 3-4 m di lunghezza, disposte su file alterne e/o irregolari sul pendio preventivamente rimodellato e preparato.



PIANTAE PROSPETTO DI UNA PALIZZATA CON TALEE E/O PIANTINE

Generalità

Le palificate vive con talee e/o con piantine sono impiegate con successo negli interventi di stabilizzazione di pendii e scarpate, naturali o artificiali, in dissesto. Questo sistema favorisce il rinverdimento di pendii attraverso la formazione di strutture fisse in legname, che hanno la funzione di formare delle piccole gradonate a monte delle quali si raccoglie il terreno. In questo modo si crea lungo le curve di livello una struttura più resistente delle viminate, in cui si interrano dei fitti "pettini" di talee e/o di piantine radicate. Lo sviluppo dell'apparato radicale garantisce il consolidamento del terreno, mentre la parte aerea contribuisce a contenere l'erosione superficiale.

Descrizione e Caratteristiche

In funzione della modalità costruttive si distinguono palificate vive in legname o con piantine:

- a parete semplice;
- a parete doppia;

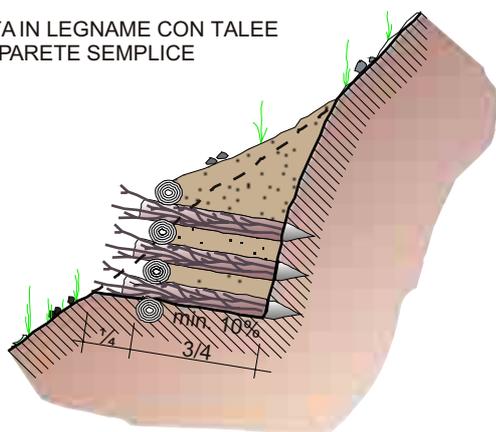
Palificata a parete semplice:

In questo sistema i tronchi longitudinali sono disposti su di unica fila orizzontale esterna, mentre i tronchi trasversali appoggiano con la parte terminale nella parete dello scavo;

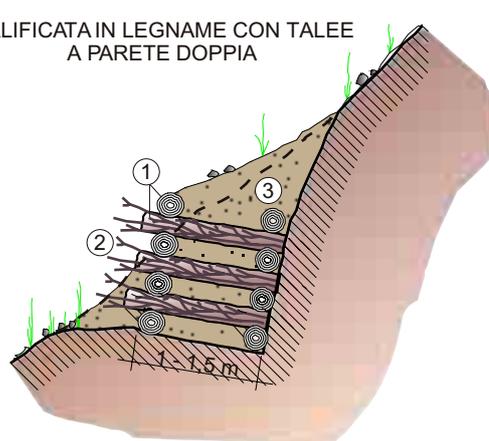
Palificata a parete doppia:

Con questo sistema la palificata è realizzata disponendo i tronchi longitudinali su due file orizzontali sia all'esterno che all'interno della struttura. La palificata a due pareti necessita di uno scavo di maggiori dimensioni, compensato, però, dalla capacità di resistere a spinte del terreno maggiori, e dalla possibilità di realizzare strutture aventi un'altezza superiore.

PALIFICATA IN LEGNAME CON TALEE
A PARETE SEMPLICE



PALIFICATA IN LEGNAME CON TALEE
A PARETE DOPPIA



Sinistra. Schema d'impianto di una palificata in legname con talee e piantine a parete semplice. I tronchi in legname sono posti nello scavo a "L", alternativamente in senso longitudinale ed in senso trasversale, formando una specie di castello di legno. I tronchi sono fissati tra loro con chiodi o fili di ferro. La struttura è riempita con il materiale di risulta dello scavo, procedendo alla messa in opera delle talee e delle piantine radicate.

Destra. Schema d'impianto di una palificata in legname con talee e piantine a parete doppia. In questa variante la palificata è realizzata disponendo i tronchi su due file orizzontali sia all'esterno sia all'interno della struttura, appoggiata alla parete dello scavo.

1 - Tondame scortecciato o legname squadrato (diametro: 10-25 cm).

2 - Ramaglia viva o talee.

3 - Terreno di riporto.

La tecnica d'esecuzione delle palificate comprende le seguenti fasi: nel versante si esegue una serie di scassi a forma di "L", in modo da formare la base d'appoggio della palificata in legname, con una contropendenza trasversale dello scavo pari almeno al 10 - 15%, mentre il paramento a valle deve avere una pendenza di circa il 30-50% per garantire la migliore crescita delle piante. La profondità massima dello scavo, generalmente di circa 2 - 2,5 m, è legata alla lunghezza delle talee, che devono sempre raggiungere la parete. Per altezze superiori a 2,5 m si possono costruire serie di palificate a gradoni. Preparata la base d'appoggio, la palificata è realizzata ponendo in opera il tondame scortecciato o legname squadrato di conifere e/o di castagno (diametro 20-30 cm) alternativamente in senso longitudinale ed in senso trasversale (L = 1,50-2,00 m), in modo da formare una specie di castello in legname. I tronchi sono fissati con chiodi, tondini, graffe metalliche o fili di ferro. Completata la posa di ogni elemento longitudinale ed il riempimento della struttura con il terreno di risulta dello scavo, si procede alla messa a dimora di talee e/o di piantine radicate di specie pioniere, disposte a pettine una accanto all'altra, con un numero variabile, secondo le condizioni pedoclimatiche e della tipologia dell'impianto, da 5 a 10 per metro lineare. Le talee e le piantine devono sporgere per circa 10-25 cm dalla palificata, ed arrivare nella parte posteriore fino alla parete dello scavo, dove queste sono infisse per 15 -20 cm. In alcuni casi, specie in presenza di terreni molto aridi o sassosi, si può arricchire e ammendare il terreno con aggiunta di sostanza organica e/o di compost vegetale. Sul fronte della palificata è anche possibile utilizzare una georete per il contenimento del terreno.

Applicazioni

Questo sistema, in generale, è utilizzato con successo negli interventi di sistemazione delle frane di tipo superficiale, e nel consolidamento di sponde fluviali in dissesto.

Consolidamento di una scarpata in frana mediante l'esecuzione di palificata in legname con talee a parete doppia. La palificata a due pareti necessita di uno scavo più grande, compensato, però, dalla capacità di resistere a spinte maggiori del terreno, e dalla possibilità di realizzare strutture aventi un'altezza superiore.



Generalità

La tecnica delle gradonate vive con talee e/o con piantine è un sistema impiegato con successo negli interventi di stabilizzazione di pendii e scarpate, naturali o artificiali, in materiali sciolti.

La realizzazione di gradonate permette di rinverdire le scarpate attraverso la formazione di piccoli gradoni lineari, che corrono lungo le curve di livello del pendio, in cui si interrano dei fitti "pettini" di talee e/o di piantine radicate. Lo sviluppo dell'apparato radicale garantisce il consolidamento del terreno, mentre la parte aerea contribuisce a contenere l'erosione superficiale.

Descrizione e Caratteristiche

Nell'ambito delle gradonate si possono distinguere tre tipologie costruttive, differenziate soprattutto in funzione del materiale vegetale impiegato:

Gradonata con talee (sistemazione a cespuglio secondo Schiechtl);

Gradonata con piantine (sistemazione a siepe secondo Schiechtl);

Gradonata mista con talee e piantine (sistemazione a siepe - cespuglio secondo Schiechtl);

La tecnica d'esecuzione delle gradonate, indipendentemente dal tipo d'intervento, è sostanzialmente la stessa: nel versante si eseguono una serie di scassi orizzontali con leggera contropendenza, a forma di "L", nei quali si impiantano talee o piantine radicate. Il tutto è poi ricoperto con materiale proveniente dallo scavo del gradone superiore.

In particolare la realizzazione delle gradonate prevede le seguenti fasi d'esecuzione:

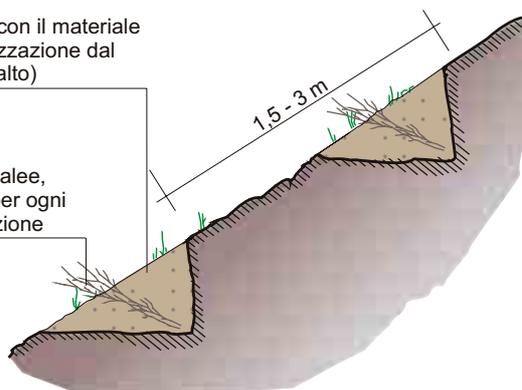
- scavo e costruzione dei gradoni o terrazzamenti, iniziando dal piede della scarpata e procedendo per file parallele verso l'alto, eseguito a mano o con l'ausilio mezzi meccanici di piccole dimensioni (apripista, scavatrici idrauliche, o ragno). Il materiale di sterro del gradone superiore è utilizzato per il riempimento di quello inferiore. La profondità (o larghezza) dei gradoni varia da 0,5 fino a 2,0 m, in funzione della pendenza della scarpata e della tipologia costruttiva, con una contropendenza trasversale dello scavo pari almeno al 10%. La distanza tra gradoni successivi varia da 1,5 a 3 metri, in funzione della pendenza, delle caratteristiche fisico-meccaniche dei terreni e della tipologia costruttiva.

- messa a dimora, sul fondo dello scavo, di talee e/o di piantine radicate disposte a pettine una accanto all'altra in numero variabile, a seconda delle condizioni pedoclimatiche, del tipo di pianta e della tipologia dell'impianto, da 5 - 10 a 30 piante per metro lineare. Queste sono interrate per buona parte della loro lunghezza (per 3/4 le talee, e per circa 2/3-3/4 le piantine) con il terreno dello scavo di riporto del gradone superiore.

Gradonata con talee; le talee di specie pioniere (salici o altro tipo) sono appoggiate sul fondo dello scavo, a forma di "L", con disposizioni a pettine ed interrate col materiale di sterro del gradone successivo per circa 1/4 della loro lunghezza. L'interasse tra gradoni successivi varia da 1,5 a 3 m.

Riempimento con il materiale di scavo (realizzazione dal basso verso l'alto)

Ramaglia viva o talee, almeno 10 rami per ogni metro di sistemazione



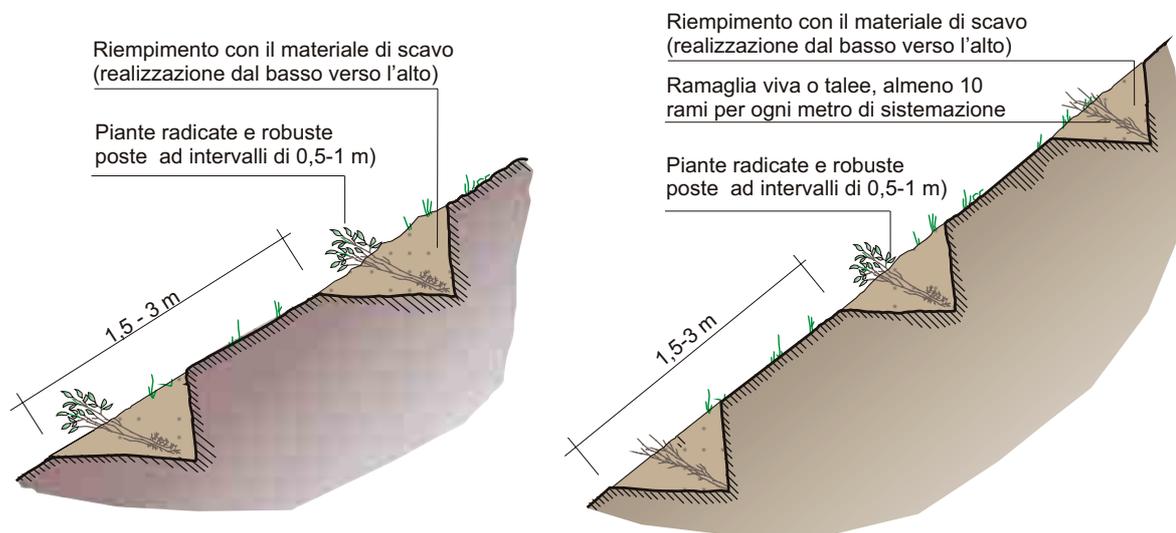
Gradonata con talee (sistemazione a cespuglio secondo Schiechl)

Questo sistema prevede che sul fondo dello scavo venga appoggiato un letto di talee, disposte "a pettine", di piante legnose con buona capacità di riproduzione vegetativa (salici, tamerici, pioppi e altre specie), in numero variabile da 10 a 30 per metro lineare. Le talee, ricoperte con il terreno dello scavo di riporto del gradone superiore, devono avere una lunghezza minima di circa 100 cm con diametri del fusto di circa 1- 7 cm e devono sporgere verso l'esterno per circa 1/4 della loro lunghezza.

E' molto importante, in presenza di terreni aridi o pietrosi, riempire accuratamente con terreno gli spazi vuoti tra le talee o piantine per evitare un'eccessiva circolazione dell'aria che può provocarne il disseccamento. Inoltre, su terreni instabili, lo scasso deve essere realizzato per piccoli tratti, predisposte le talee o le piante, e subito richiuso per evitare degli smottamenti secondari e preservare, in tal modo, anche l'umidità del terreno.

Una variante, applicata nella costruzione di scarpate artificiali (ad es. rilevati stradali, ferroviari od argini), consiste nel realizzare la gradonata con talee durante la compattazione dei singoli strati di terreno del rilevato. Le talee (10-30 per metro lineare), lunghe 2 o più metri, sono posate sulla parte superiore dello strato finito, in prossimità del ciglio, e ricoperte dallo strato successivo del rilevato. La parte che sporge dal terreno non deve essere superiore ai 25 cm. Con questo sistema si realizza, oltre al rinverdimento della struttura, anche un miglioramento delle caratteristiche meccaniche del terrapieno, in quanto le radici esercitano un'efficace azione rinforzante aumentando la stabilità del rilevato.

Un'altra variante, utilizzata in situazioni difficili caratterizzate da pendenze elevate, fenomeni erosivi, franosi e condizioni climatiche estreme, è rappresentata dalla "gradonata rinforzata". In questa tipologia viene utilizzato un rinforzo longitudinale, rivestendo la parte esterna del gradone per una larghezza di circa 30 cm con una striscia di carta catramata (od altro materiale sintetico), allo scopo di ridurre gli effetti dei fenomeni erosivi e consentire un miglior attecchimento delle talee. Questo sistema di rinforzo, se necessario, può essere applicato anche agli altri tipi di gradonate.



Schema d'impianto di una gradonata con piantine: le piantine di specie resistenti e robuste, di 2-3 anni d'età, sono interrate per circa 2/3-2/4 della loro lunghezza sul fondo dello scavo del gradone, con una contropendenza verso monte di circa il 10%. L'interasse tra i vari gradoni varia da 1,5 a 3 metri

Schema d'impianto di una gradonata mista con piantine e talee: la sistemazione della scarpata o del pendio, avviene attraverso la formazione di file alterne di gradoni con talee e gradoni con piantine radicate. L'interasse tra i vari gradoni varia da 1,5 a 3 metri.

Gradonata con piantine (sistemazione a siepe secondo Schiechl)

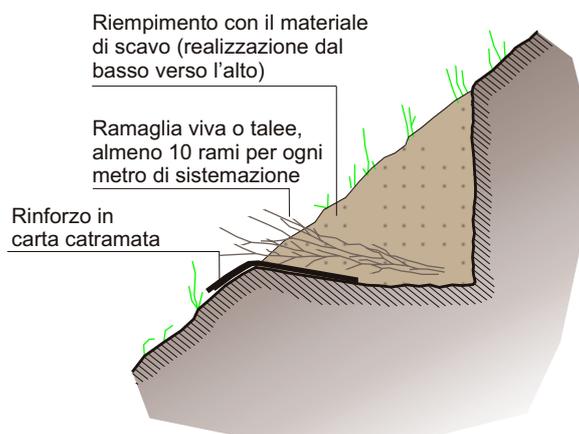
La sistemazione del pendio con questa tecnica è fatta mettendo a dimora sul fondo dello scavo, con profondità variabile da 0,5 a 0,7 m e contropendenza verso monte intorno al 10-15%, piantine radicate di 2-3 anni d'età, in numero di 5-10 piante per metro, appartenenti a specie in grado di produrre radici avventizie dal fusto (pioppi, salici, ontani, ecc.). La lunghezza dei fusti deve essere maggiore di 70-80 cm, con diametri di 1-3 cm. Le piantine sono ricoperte col materiale di sterro dello scavo del gradone superiore, per circa 2/3-2/4 della loro lunghezza.

La spesa maggiore dell'impiego delle piantine, rispetto all'uso delle talee, deve essere giustificata da situazioni particolari quali la necessità di un rapido e definitivo rinverdimento. Questa tecnica ha in genere un potere consolidante minore e può essere eseguita solo durante la stagione di riposo vegetativo. Nei casi di presenza di terreni molto aridi o sassosi, si può ammendare il terreno stesso con aggiunta di sostanza organica e/o di compost vegetale.

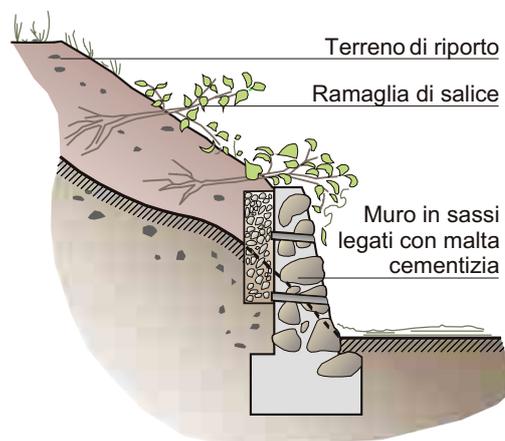
Gradonata mista con talee e piantine (sistemazione a siepe - cespuglio secondo Schiechl)

Questa tecnica costituisce la tipologia più efficace ed interessante tra quelle comunemente impiegate negli interventi di sistemazione dei versanti. Infatti l'opera viene effettuata alternando file di gradoni con talee a file di gradoni con piantine radicate. L'impianto ha costi leggermente più alti rispetto alle tecniche precedenti, ma offre il vantaggio di avere la messa a dimora contemporanea sia delle specie preparatrici (salici o altre specie pioniere) che delle specie definitive (piantine radicate e robuste di ontani, pioppi e altro). In questa maniera si ottiene un'associazione vegetale più stabile, un rapido attecchimento delle piante ed un maggiore effetto consolidante.

Per quanto riguarda l'efficacia del consolidamento del terreno valgono le considerazioni già espresse nelle viminate.



Schema d'impianto di una gradonata con talee rinforzate. La struttura è rinforzata rivestendo la parte esterna dello scavo dei gradoni con una striscia di carta catramata per una larghezza di circa 25-30 cm. Il rinforzo longitudinale garantisce una maggiore resistenza contro i fenomeni erosivi superficiali, ed un migliore attecchimento delle piante, grazie anche ad una maggiore ritenuta idrica.



Schema d'impianto di una gradonata con talee su rilevati artificiali. La struttura è eseguita contemporaneamente alla formazione dei vari strati del rilevato, mettendo a dimora sulla parte superiore di ogni singolo strato, un letto di talee ricoperte dal materiale dello strato successivo. I rami devono sporgere dal terreno per circa 25 cm. Con questo sistema si ottiene, oltre al rinverdimento della struttura, anche un notevole incremento della stabilità dovuto all'azione drenante e consolidante delle piante.

Applicazioni

Questo sistema è generalmente utilizzato negli interventi di sistemazione e difesa dalle frane e dall'erosione dei versanti instabili in materiali sciolti. Esso si applica con successo anche per la sistemazione ed il consolidamento di scarpate artificiali (ad esempio rilevati stradali o argini).

Consolidamento di una scarpata interessata da frane superficiali mediante l'esecuzione di gradonate con talee. Questo sistema è indicato negli interventi con tecniche d'ingegneria naturalistica, per il consolidamento ed il rinverdimento rapido di pendii o scarpate interessate da piccoli movimenti franosi.



Generalità

La tecnica della grata viva con talee e/o con piantine è una tipologia d'intervento più complessa rispetto ad altri sistemi d'ingegneria naturalistica, ma molto efficace negli interventi di sistemazione, stabilizzazione e rinverdimento di versanti e di scarpate anche con elevata acclività.

Descrizione e Caratteristiche

La grata può essere semplice o doppia in funzione della geometria del corpo di frana.

La tecnica d'esecuzione prevede fasi di lavorazione descritte nel seguito.

Al piede del versante si esegue lo scavo di una piccola trincea sul terreno stabile, in modo da formare la base d'appoggio della grata. Questa può essere anche realizzata mediante la posa di tronchi longitudinali di sostegno, o attraverso la costruzione di una palificata in legname con talee. Al disopra della base si costruisce una specie di spalliera a maglie regolari, formata da elementi verticali ed orizzontali (tondi di legno), con una lunghezza di circa 2-5 m, e diametro di 15-25 cm. Gli elementi verticali sono quelli portanti con distanza di 1-2 m, mentre gli elementi orizzontali, fissati con chiodi o altro ai primi e con interdistanza di 0,40-1,00 m, possono avere dimensioni minori, e densità maggiore (in funzione dell'inclinazione del pendio) rispetto a quelli verticali. La struttura è fissata al substrato stabile mediante l'infissione di picchetti di legno lunghi 1 metro circa. Si procede, poi, al riempimento dei riquadri con materiale inerte e terreno vegetale ed alla messa a dimora di talee, ramaglia disposta a strati e/o piantine radicate di specie pioniere, con l'eventuale supporto di rete metallica elettrosaldata per il contenimento del terreno fine. La superficie esterna della struttura può essere inerbata per una migliore resistenza all'erosione. L'altezza massima che è possibile raggiungere non supera in genere i 15-20 m. La struttura può essere realizzata in legno vivo (salice) per pendii di altezza limitata, oppure con filagne di legname resistente alla decomposizione (larice, castagno) negli altri casi. Al fine di prevenire eventuali infiltrazioni di acqua da monte, che potrebbero creare problemi di erosione e portare allo scalzamento della struttura, è necessario realizzare una canalizzazione o una impermeabilizzazione della testa della grata con carta incatramata opportunamente ancorata.

Consolidamento di una scarpata con acclività elevata (maggiore di 40°) interessata da frane superficiali, mediante l'esecuzione di una grata in legname con talee semplice. Questo sistema è indicato negli interventi con tecniche d'ingegneria naturalistica, per il consolidamento ed il rinverdimento rapido di pendii o scarpate interessate da movimenti franosi e da fenomeni di erosione superficiale, dove non è possibile intervenire con altri sistemi, quali ad esempio la gradonatura o il modellamento del pendio.

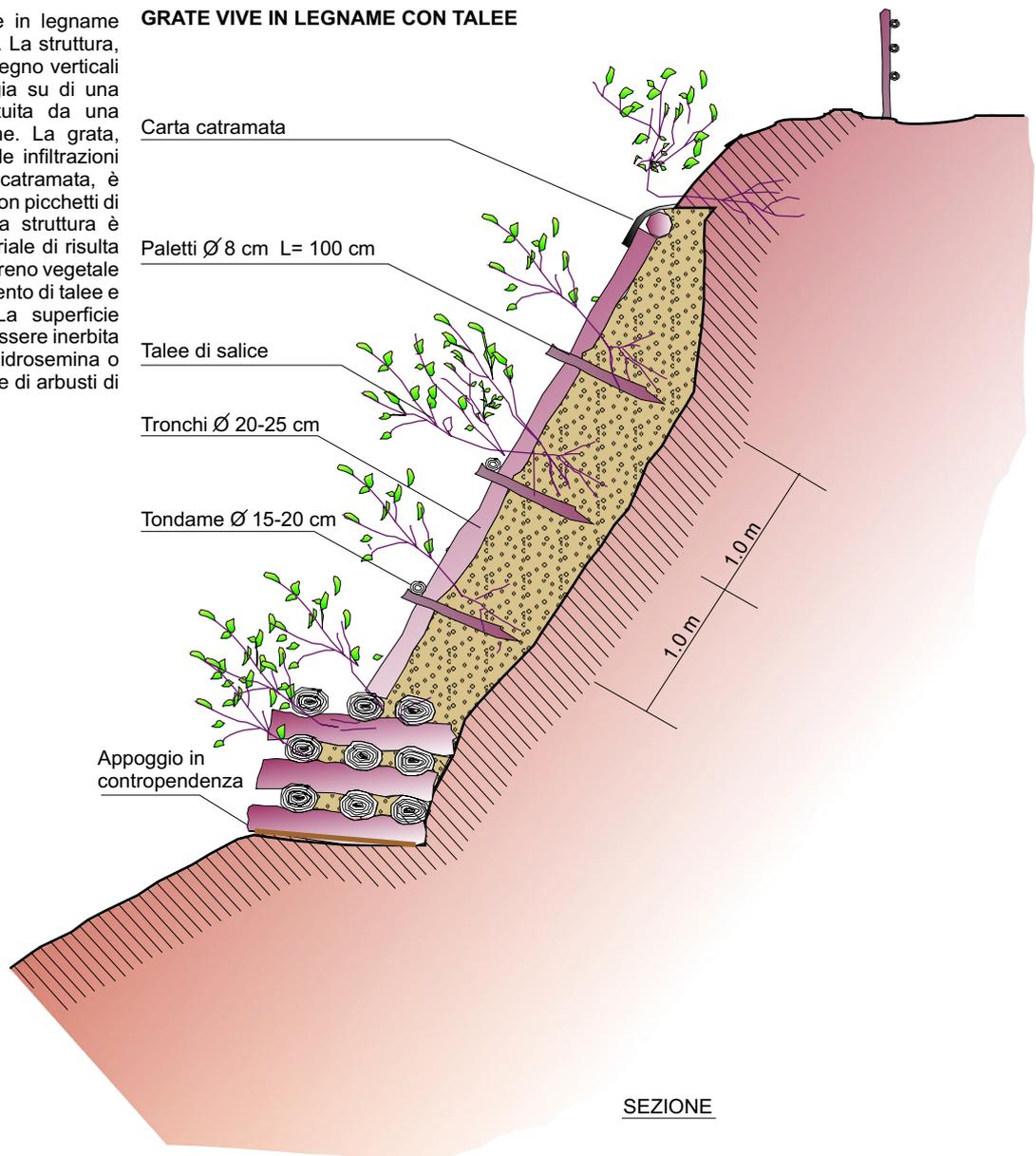


Applicazioni

La grata viva è un sistema utilizzato con successo negli interventi di sistemazione e stabilizzazione di pendii in erosione o in frana, caratterizzati da inclinazione molto elevata (anche maggiore di 45°), dove non è possibile ridurre la pendenza con il modellamento dei versanti. Questo sistema garantisce, al tempo stesso, un'efficace azione di sostegno ed una protezione dall'erosione superficiale.

Grata viva semplice in legname con talee e piantine. La struttura, formata da tondi di legno verticali ed orizzontali, poggia su di una base stabile, costituita da una palificata in legname. La grata, protetta in testa dalle infiltrazioni d'acqua con carta catramata, è fissata al substrato con picchetti di legno o di ferro. La struttura è riempita con il materiale di risulta dello scavo e con terreno vegetale idoneo all'attecchimento di talee e piantine radicate. La superficie esterna può anche essere inerbita con le tecniche dell'idrosemina o con la piantumazione di arbusti di specie autoctone.

GRATE VIVE IN LEGNAME CON TALEE



Generalità

I materassi in rete metallica rinverditati o con tasche vegetali sono strutture comunemente utilizzate per il rivestimento e la protezione dall'erosione di sponde fluviali e di scarpate molto ripide.

Descrizione e Caratteristiche

I materassi in rete metallica rinverditati sono utilizzati in tutte le situazioni in cui sia necessario rinaturalizzare superfici rocciose ripide su cui un riporto di terreno non stabilizzato risulterebbe non efficace.

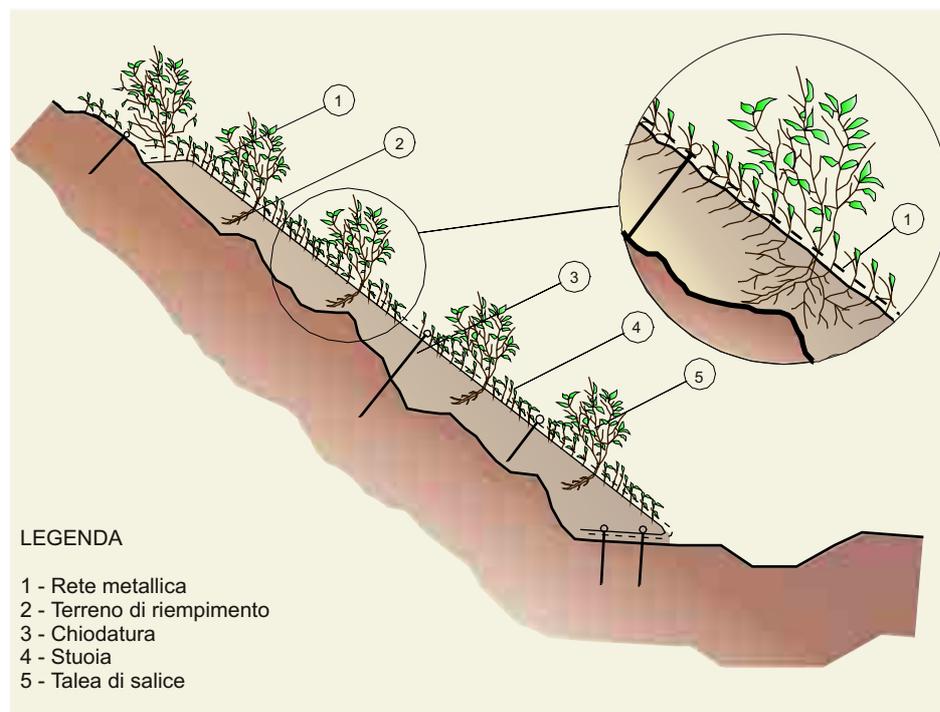
Sono realizzati con rete metallica a doppia torsione in trafilato d'acciaio di diametro 2.7 o 3 mm a maglie esagonali, protetto con rivestimento in lega di zinco-alluminio (galvan) e generalmente anche plastificato.

I materassi possono essere realizzati secondo due diverse modalità:

Materassi prefabbricati

Per inclinazioni fino a 40-45° e superfici di posa regolari, si possono utilizzare materassi tipo Reno spessi 17-30 cm, larghi 2 m e lunghi 3 o più m, dotati di diaframmi che andranno posti in direzione perpendicolare alle linee di massima pendenza. Il materasso una volta messo in scatola, viene posato sulla scarpata, fissato con delle chiodature costituite da barre d'acciaio, foderato al suo interno con una biostuoia, riempito di terreno, coperto con una ulteriore biostuoia di protezione ed infine chiuso con un coperchio in rete metallica a doppia torsione. In alternativa la chiusura può venire effettuata con una geostuoia tridimensionale rinforzata con una rete metallica a doppia torsione (in tal caso non è necessaria la biostuoia). Successivamente si potranno mettere a dimora piantine, talee ed effettuare una idrosemina.

Consolidamento e rivestimento di una scarpata con materassi in rete metallica rinverditati. Il pendio, opportunamente rimodellato, è rivestito con i materassi in rete metallica, riempiti con terreno, abbinati ad una georete tridimensionale o geostuoia. La struttura è successivamente rinverditata mediante l'inerbimento con idrosemina o con impianto di talee.



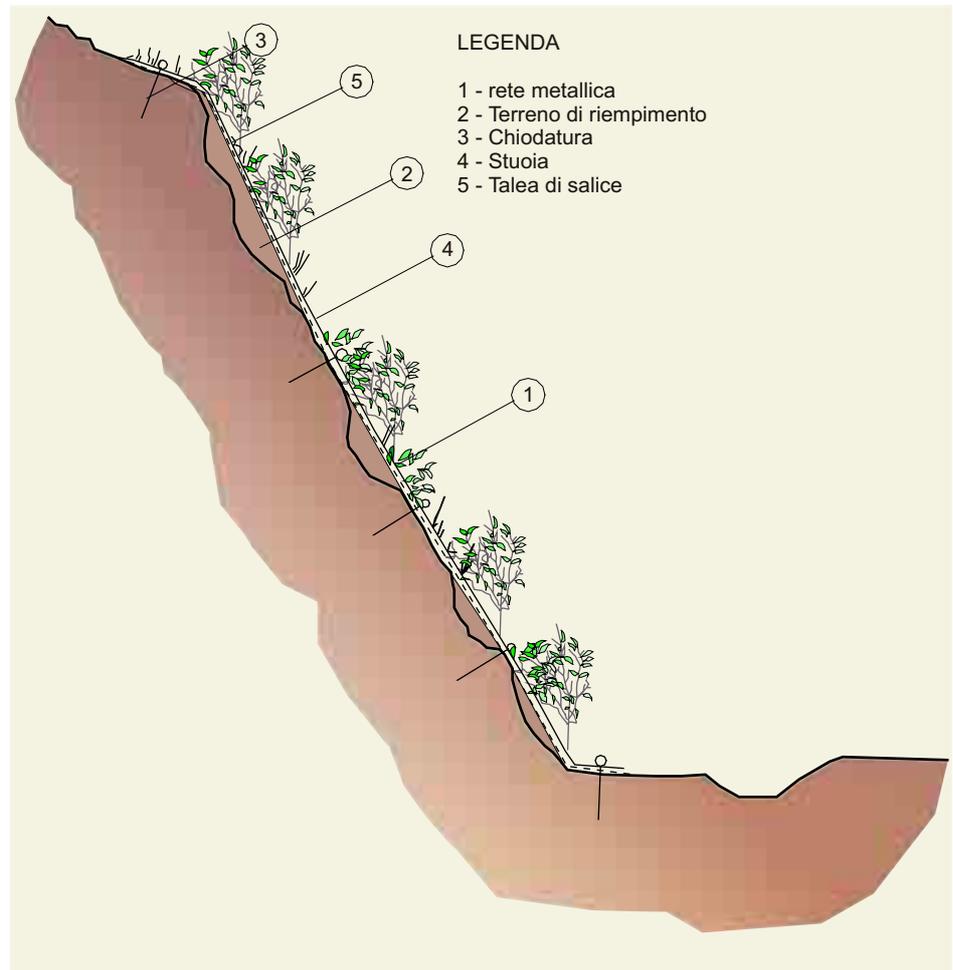
Rivestimento a tasche:

Per inclinazioni superiori a 40-45° e fino a 55-65° e superfici di posa irregolari si possono realizzare dei rivestimenti riportando del terreno tra una rete di contenimento ed il pendio. L'elemento di contenimento sarà costituito da una geostuoia tridimensionale in polipropilene armata con rete metallica a doppia torsione a maglie esagonali realizzata con trafilato d'acciaio protetto con lega eutettica di zinco-alluminio (galvan). La geostuoia armata verrà ancorata con idonee chiodature alla scarpata rocciosa. Successivamente si potranno posare piantine, talee ed effettuare una idrosemina a spessore.

Applicazioni

Questo sistema è utilizzato negli interventi di sistemazione, ripristino ambientale e consolidamento dei pendii e delle scarpate in materiali granulari o roccia, privi di terreno vegetale, e caratterizzati da pendenze molto alte, superiori ai 35° - 40°. I rivestimenti con materassi rinverditi e con tasche vegetative sono impiegati frequentemente negli interventi di risanamento di siti estrattivi degradati, nella protezione e nel rinverdimento di scarpate naturali, come pareti rocciose, o artificiali, come ad esempio scarpate di rilevati ferroviari o stradali.

Consolidamento e rinverdimento vegetale di una parete a forte pendenza. L'intervento è stato realizzato mediante il rivestimento della parete con tasche in rete metallica a doppia torsione, zincata, riempite con idoneo materiale sciolto e terreno vegetale rivestito internamente con georete o geostuoia. L'impianto di talee, cespi ed arbusti radicati e l'idrosemina consente di ottenere un buon risultato dell'intervento.



Applicazione di materassi per la sistemazione dei versanti presso la diga di Ridracoli (Appennino tosco-romagnolo).



Opere di sostegno

Generalità

Le opere di sostegno sono interventi il cui utilizzo è finalizzato a risolvere una serie di situazioni in cui il ruolo della statica diventa predominante negli interventi delle opere strutturali.

Negli ultimi anni le tecniche dell'ingegneria civile sono state ampiamente utilizzate nella sistemazione dei versanti, qualche volta anche violentando il paesaggio.

Oggi si tende a diversificare le tecniche d'intervento, usando di più le tecnologie naturalistiche e di meno il cemento, cercando inoltre di progettare l'opera con qualità formali che tengano conto dell'ambiente in cui sono inserite.

Queste strutture sono impiegate negli interventi di sistemazione e consolidamento dei versanti in frana e nella realizzazione di un'ampia gamma di opere di ingegneria per stabilizzare e/o sostenere terreno o altro materiale, quando per cause naturali o artificiali, quali scavi e riporti, si hanno condizioni che non permettono al terreno di assumere la sua naturale pendenza d'equilibrio.

Tratto della cinta muraria che circonda il centro storico della città di Orvieto (Perugia). Le mura, di varie epoche storiche, sono state costruite in muratura con malta utilizzando il tufo litoide della spessa placca tufacea sulla quale poggia l'abitato.

Le opere di sostegno possono essere rigide o flessibili in relazione alla capacità di adattarsi alle deformazioni e/o cedimenti dei terreni o degli ammassi rocciosi, senza rotture o danni significativi. Negli ultimi anni si sono diffuse alcune categorie di opere di sostegno e di consolidamento speciali che rispondono all'esigenza di minimizzare l'impatto degli interventi sull'ambiente e di favorire il ripristino naturale dell'area.



Generalità

Terrazzamenti sostenuti con muretti a secco, per la coltivazione della vite in Valtellina (Sondrio). Questi muretti sono stati realizzati con pietre locali costituite da roccia metamorfica. I vari ordini di terrazzi sono collegati tra loro da un rete di ripide scale, costruite anche queste in pietra, che conducono alle stradine d'accesso per il passaggio di piccoli trattori e carri.

Murature in pietrame a secco

I muri in pietrame sono opere che hanno origini antichissime. L'uomo, infatti, ha da sempre utilizzato la pietra naturale, dove questa era facilmente reperibile in loco, per le costruzioni a secco sia per la costruzione di edifici civili e militari, sia per la sistemazione dei versanti (terrazzamenti). A titolo di esempio si possono citare le imponenti "mura megalitiche" che caratterizzano importanti siti archeologici come ad esempio le mura ciclopiche delle antiche città degli Ernici o Volsci e di altre civiltà preromane, in Centro e Sud America presso gli Aztechi in Messico o gli Incas in Perù, (terrazzamenti di Macchu Piccu e di Sacsayhuaman) fino alla lontana Isola di Pasqua, in Oceania.

Queste antiche opere erano realizzate con grossi blocchi di pietra di varie forme e dimensioni, da irregolare a perfettamente poligonali, sgrezzati e lavorati a mano in modo da consentire la massima superficie d'appoggio ed il miglior incastro. I grossi massi sono sovrapposti "a secco" su più filari in modo da realizzare strutture di grande altezza (più di 15 m) e spessore.

Questa tecnica di costruzione, tramandata con poche variazioni fino ai giorni nostri, è stata impiegata soprattutto per la sistemazione "a terrazze" dei versanti collinari e montuosi per scopi agricoli e per la difesa del suolo dall'erosione e dalle frane. Famose sono le "terrazze" per la coltivazione dei vigneti delle Cinque Terre in Liguria, o i terrazzamenti con muri a secco in pietra realizzati in numerose regioni italiane dal Nord al Sud (Valtellina, Toscana, Lazio, Campania, Puglia, Sicilia).



Descrizione e Caratteristiche

I muri a secco sono realizzati a mano o con l'ausilio di mezzi meccanici leggeri. Il pietrame, prelevato in loco, viene debitamente sgrossato e lavorato per conferirgli una forma il più possibile poliedrica in modo da consentire la massima superficie d'appoggio ed il miglior incastro possibile, quindi sistemato a mano sul piano di posa. I vuoti sono riempiti da pietre più piccole. Le dimensioni delle pietre impiegate sono strettamente legate alle caratteristiche geologico-strutturali delle rocce affioranti, in genere quelle impiegate per opere di una certa importanza hanno dimensioni maggiori e forma più regolare, mentre quelle impiegate per i muri a secco dei terrazzamenti agricoli hanno forma e dimensioni più irregolari. In genere il muro ha una sezione trapezoidale mentre la fondazione presenta una base rettangolare o trapezia in leggera contropendenza, con il paramento verticale posto a monte o a valle dell'opera, in funzione dei casi e delle necessità. L'altezza di queste opere mediamente non supera i 2 metri, tuttavia in casi particolari, utilizzando mezzi meccanici è possibile realizzare muri di sostegno o scogliere in pietrame fino ad altezza di 4 - 5 metri. Queste strutture hanno un maggiore spessore rispetto ai muri con malta e necessitano di periodiche manutenzioni. Tuttavia essi offrono notevoli vantaggi nei riguardi della stabilizzazione del terreno che sostengono, in quanto, la loro permeabilità consente un buon drenaggio del terreno a tergo ed una diminuzione della spinta della terra e delle sovrappressioni idrauliche. A questo si aggiungono la semplicità di costruzione e la perfetta integrazione estetico-paesaggistica nell'ambiente rurale o urbano.

Terrazzamenti con muri a secco in pietra calcarea nel versante meridionale di Locorotondo (Ba). La città di Locorotondo è uno dei caratteristici centri che dominano l'ampia depressione carsica della Valle d'Itria, nella Murgia meridionale. Questo territorio è caratterizzato oltre che dai Trulli anche da estesi terrazzamenti con muri a secco che hanno modellato la superficie dei versanti calcarei. Queste opere rappresentano il frutto del duro lavoro fatto dai contadini per consentire di coltivare le aride pendici calcaree, ricoperte da un ridotto spessore di terreno vegetale. La tecnica di costruzione dei muretti a secco è simile a quella usata in altre zone d'Italia: la base è composta da due file parallele di grosse pietre, sulle quali si appoggeranno le altre, cercando di lasciare il minor spazio vuoto tra l'una e l'altra; gli interstizi sono riempiti con frammenti di pietra più piccoli. Raggiunta l'altezza stabilita, la copertura finale è fatta con pietre di grosse dimensioni poste di taglio.



Aspetti ambientali

I muri in pietrame a secco hanno un impatto estetico sull'ambiente estremamente contenuto. Le tecniche costruttive, l'utilizzo della pietra locale come materiale da costruzione, la facilità di rinverdimento, spontaneo o ottenuto con tecniche di ingegneria naturalistica, permettono un buon inserimento delle opere nel contesto naturale in cui sono realizzate.

Un mirabile esempio di perfetta integrazione tra natura e intervento umano è rappresentato dai terrazzamenti con muri a secco, realizzati sia per fini agricoli che di difesa del suolo in ambienti collinari e montani in Italia ed in altre parti del mondo.

Si può dire che queste opere rappresentano un vero "capolavoro di ingegneria ambientale" e vanno quindi preservate e valorizzate.

L'abbandono della sistemazione "a terrazze" dei versanti acclivi e la mancata manutenzione dei muri a secco rappresentano un serio pericolo per la stabilità di numerosi versanti terrazzati, oltre che per l'integrità stessa del paesaggio rurale (come accade ad esempio in Valtellina, Cinque Terre, Costiera Amalfitana).

Applicazioni

I muri in pietrame a secco sono molto usati nelle costruzioni di infrastrutture di vario tipo, nelle zone dove oltre all'azione di sostegno dell'opera è necessario garantire la salvaguardia dell'ambiente dal punto di vista estetico-paesaggistico.

I muri in pietrame a secco, trovano la loro applicazione più diffusa in:

- interventi di consolidamento e di difesa dall'erosione di versanti instabili mediante terrazzamenti e gradonatura;
- interventi di difesa delle sponde dall'erosione fluviale (scogliere);
- sistemazioni dei versanti "a terrazze" per il contenimento del terreno a scopi agricoli;
- costruzioni di infrastrutture di vario tipo.



Tipici terrazzamenti con muri a secco realizzati per la coltivazione di ulivi in Puglia. I pendii sono modellati con una serie di ripiani sostenuti dai muri a secco in pietra locale, disposti parallelamente alle curve di livello. Ai ripiani è conferita una pendenza longitudinale in modo da consentire il deflusso delle acque meteoriche verso gli impluvi naturali. In molti casi ai ripiani è data anche una contropendenza per limitare i processi di erosione superficiale ed aumentare l'infiltrazione delle acque piovane.

Generalità

Muri in calcestruzzo, pietrame e/o in mattoni

I muri in calcestruzzo, pietrame e/o in mattoni sono opere di sostegno rigide che agiscono a gravità, utilizzati per sostenere terreno o altro materiale con altezze inferiori a 4 - 5 m.

I muri in mattoni, costruiti con argilla cotta al sole o in fornace, sono fra le opere più antiche realizzate dall'uomo nelle zone dove scarseggiavano i materiali da costruzioni più pregiati di natura lapidea. La realizzazione di muri in mattoni o argilla sono tipiche di opere civili "povere" osservabili ancora oggi nei principali siti archeologici.

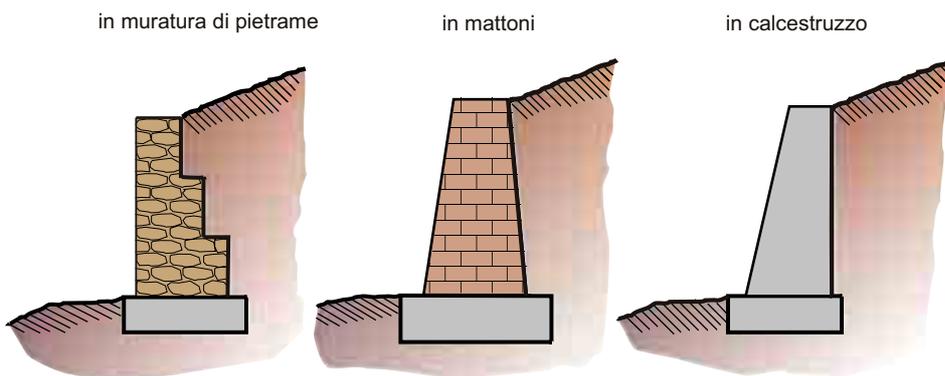
I muri in pietrame con malta idraulica (o muri in muratura) sono costruiti utilizzando pietrame locale di varie dimensioni e forme, legato da malta idraulica. Essi rappresentano l'evoluzione tecnologica delle primitive tecniche di costruzione delle mura a secco. Le caratteristiche di resistenza e di facilità di realizzazione hanno permesso una considerevole diffusione nelle diverse epoche storiche.

A partire dall'800, l'introduzione di nuove tecnologie e del calcestruzzo ha favorito il diffondersi dell'impiego di muri in calcestruzzo come opere di sostegno per la realizzazione di opere d'ingegneria civile.

Esempi di tipi di muri di sostegno a gravità.

sinistra: in muratura di pietrame con malta idraulica;
centro: in mattoni con malta idraulica;
destra: in calcestruzzo gettato in opera.

Sono opere di sostegno rigide che agiscono principalmente col proprio peso, opponendosi alle spinte del terreno sul muro.



Muro di sostegno realizzato in pietrame sbizzato a mano con malta idraulica.



Descrizione e Caratteristiche

Queste strutture possono essere realizzate in calcestruzzo gettato in opera, in blocchi di cemento prefabbricati montati a secco e perfettamente incastrati tra loro o in mattoni con malta idraulica. Sono strutture massicce e pesanti, molto resistenti, che agiscono prevalentemente "a gravità", opponendosi col proprio peso alle sollecitazioni cui sono sottoposte.

Il muro è costituito da due elementi principali:

- a) una fondazione completamente interrata realizzata in calcestruzzo;
- b) una struttura in elevazione ad essa collegata costituita da un paramento esterno ed uno interno.

La sezione è in genere trapezoidale e la base deve avere una larghezza adeguata alla spinta da sostenere. Il paramento esterno, può essere rivestito in vario modo nei muri in calcestruzzo o essere composto da elementi prefabbricati costruiti con cementi colorati e trattati in modo da ottenere particolari effetti estetici. L'altezza di questo tipo di struttura non supera i 2 - 3 m.

Il loro dimensionamento, la scelta del tipo di fondazione o di sottofondazione da adottare, è fatto sulla base delle verifiche delle condizioni di stabilità interna ed esterna del complesso "struttura - terreno di fondazione - terrapieno o scarpata", condotte secondo gli usuali metodi di calcolo adottati per le opere di sostegno a gravità. Nelle zone sismiche le verifiche di stabilità tengono conto anche delle sollecitazioni indotte dal sisma di progetto sulla struttura.

Trattandosi di strutture molto pesanti, è necessario che la base della fondazione sia impostata su terreni stabili e di buona capacità portante. In caso contrario, prima di procedere all'esecuzione dell'opera, occorre eseguire interventi di miglioramento delle caratteristiche fisico - meccaniche del terreno in sito, mediante costipamento meccanico, asportazione e sostituzione parziale del terreno con altro di idonee qualità.

Particolarmente importante per la stabilità dell'opera è la realizzazione, e manutenzione periodica, di un corretto ed efficace sistema di drenaggio alle spalle dello stesso, in modo da limitare o impedire l'insorgere di pericolose sovrappressioni idrauliche e il conseguente aumento delle spinte dei terreni da sostenere.

Particolare di un muro di sostegno in pietrame con malta idraulica. L'opera è realizzata utilizzando la pietra naturale locale, costituita da affioramenti di roccia calcarea e da tufi litoidi vulcanici, tenuta insieme da malta idraulica. La superficie a vista è rifinita con frammenti di tegole e piccole scaglie di roccia. L'insieme fornisce una dimensione estetica al manufatto.



Aspetti ambientali

I muri di sostegno realizzati in calcestruzzo, per le modalità d'esecuzione e per le caratteristiche del materiale, presentano un forte impatto estetico-paesaggistico. La riduzione dell'impatto ed il ripristino naturale dell'area può essere ottenuto facendo ricorso a varie tecniche quali: rivestimento del paramento esterno con pietra naturale, particolari trattamenti e colorazioni del calcestruzzo, rinverdimento delle strutture. Le tipologie in mattoni o in pietra naturale, al contrario, hanno un minore impatto visivo, e un buon inserimento architettonico-paesaggistico specie in ambienti urbani.

Applicazioni

Queste strutture sono quasi sempre definitive, e sono impiegate come opere di sostegno e per la realizzazione di infrastrutture civili ed industriali e, meno frequentemente, per interventi di sistemazione e difesa del suolo dai dissesti quali:

- elementi di contenimento e di sostegno nelle opere di sistemazione dei pendii in frana, regimazione idraulica e ricostituzione della copertura vegetale;
- protezione delle sponde fluviali dall'erosione ed arginature e regimazione dei corsi d'acqua torrentizi
- muri di sostegno, di sottoscarpa e di controripa nella costruzione di varie infrastrutture stradali e ferroviarie; marittime o idrauliche.
- realizzazione di barriere paramassi e/o paravalanghe in aree montane.

Muro di sostegno con funzioni di bastione di difesa.

Il muro è costruito in conglomerato a scaglie di tufo con malta idraulica pozzolanica ed è rivestito con mattoni.



Generalità

I muri in cemento armato hanno trovato un largo impiego negli ultimi anni nella realizzazione di opere di ingegneria e negli interventi di stabilizzazione dei versanti. Il materiale e le moderne tecniche di costruzione impiegate consentono di realizzare opere di sostegno di grande altezza, superiori ai 5 - 6 m, riducendo in modo considerevole i tempi di realizzazione dell'opera e l'area interessata dai lavori.

Descrizione e Caratteristiche

I muri in cemento armato sono strutture a limitato spessore molto resistenti che agiscono a "semigravità". La resistenza interna alla trazione viene garantita dalle armature mentre la stabilità al ribaltamento viene garantita, oltre che dal peso dell'opera, anche dal contributo del peso del terreno che grava sulla base a mensola.

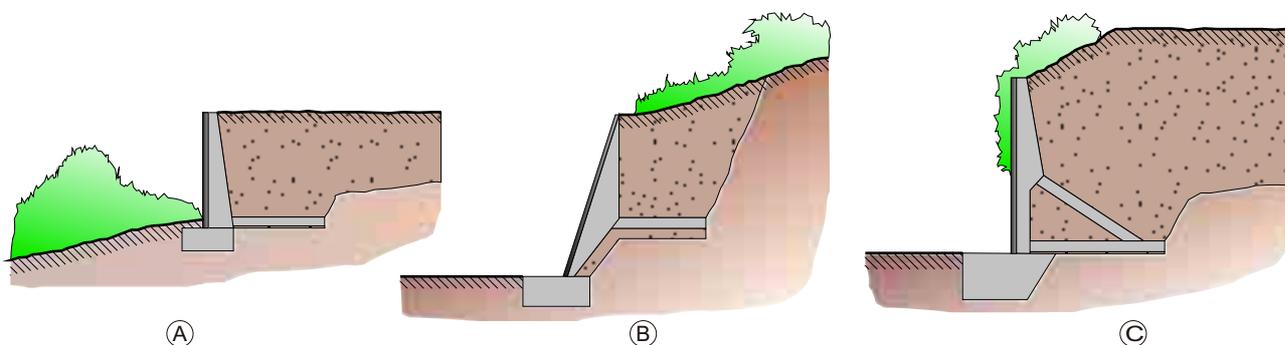
I muri in cemento armato sono realizzati in cemento gettato in opera o con elementi prefabbricati.

In genere, il muro è composto da due elementi principali: una struttura in elevazione (muro verticale) ed una fondazione completamente interrata con vincolo di incastro.

L'altezza del muro verticale può arrivare fino ai 5 - 6 metri. Per altezze maggiori, dovendo limitare gli spessori, la struttura viene dotata di contrafforti interni e/o esterni (muri a mensola e contrafforte), oppure di tiranti d'ancoraggio sul muro verticale (muri ancorati con tiranti).

La costruzione dei muri in cemento armato è fatta con l'ausilio di mezzi meccanici (gru, secchioni, autobetoniere, pompe per calcestruzzo, vibratori ecc.). Il loro dimensionamento, la scelta del tipo di fondazione o di altre soluzioni speciali di sottofondazioni da adottare, è funzione delle verifiche delle condizioni di stabilità interna ed esterna del complesso "struttura - terreno di fondazione - terrapieno o scarpata". Tali verifiche sono eseguite secondo gli usuali metodi di calcolo adottati per le opere di sostegno. Nelle zone sismiche le verifiche di stabilità comprendono anche le sollecitazioni indotte dal sisma di progetto sulla struttura.

Particolarmente importante per la stabilità dell'opera è la realizzazione e la manutenzione di un sistema di drenaggio alle spalle dello stesso, in modo da limitare o impedire l'insorgere di pericolose sovrappressioni idrauliche e l'aumento delle spinte della terra.



Muri in prefabbricati in c.a.;

A) muro incastrato alla fondazione;

B) muro inclinato con base intermedia;

C) muro con tirante ancorato alla base del terrapieno.

Nei tre casi sulla base del muro il peso del terrapieno contribuisce alla resistenza al ribaltamento.

Aspetti ambientali

I muri di sostegno realizzati in cemento armato hanno un forte impatto sull'ambiente anche se sono realizzate con moderne tecniche costruttive che limitano l'entità degli scavi e degli altri lavori necessari per la loro installazione. Nelle aree di particolare pregio ecologico e naturalistico-paesaggistico si ricorre a tecniche ed accorgimenti per mitigare l'impatto ambientale dell'opera e favorire il ripristino naturale dell'area quali: rivestimento del paramento esterno con pietra naturale, trattamenti e colorazioni del calcestruzzo per creare effetti tipo ad esempio "pietra viva" con aspetto simile ai muri in pietrame a secco o con leganti, rinverdimento delle strutture con piante rampicanti e/o mascheramento con ricostruzione della copertura vegetale, rifiniture della facciata in calcestruzzo per migliorare l'aspetto estetico dell'opera in ambiente urbano o suburbano.

Applicazioni

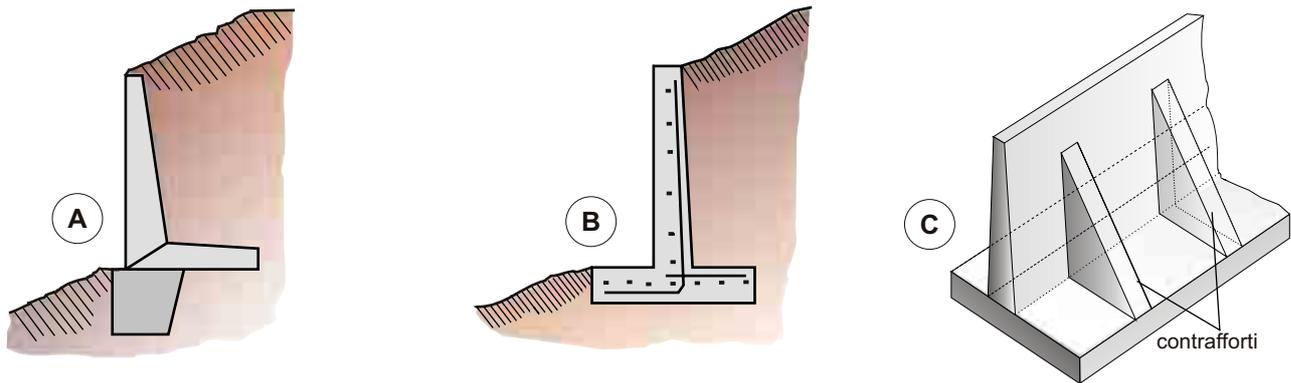
I muri in cemento armato sono impiegati per stabilizzare o sostenere terreno o altro materiale con altezze superiori ai 3 metri.

Queste tipologie sono impiegate come opere di sostegno e di contenimento per realizzazioni di infrastrutture civili ed industriali e, meno frequentemente, per interventi di sistemazione e difesa del suolo dai dissesti e dall'erosione quali:

- elementi di contenimento e di sostegno nelle opere di sistemazione di pendii in frana, regimazione idrica e ricostituzione della copertura vegetale;
- opere di protezione delle sponde fluviali dall'erosione ed arginature nell'ambito degli interventi di stabilizzazione delle sponde dei corsi d'acqua; realizzazione di briglie per la regimazione dei corsi d'acqua torrentizi;
- muri di sostegno, di sottoscarpa e di controripa nella costruzione di infrastrutture stradali e ferroviarie, marittime o idrauliche.
- realizzazione di barriere paramassi e/o paravalanghe in aree montane.

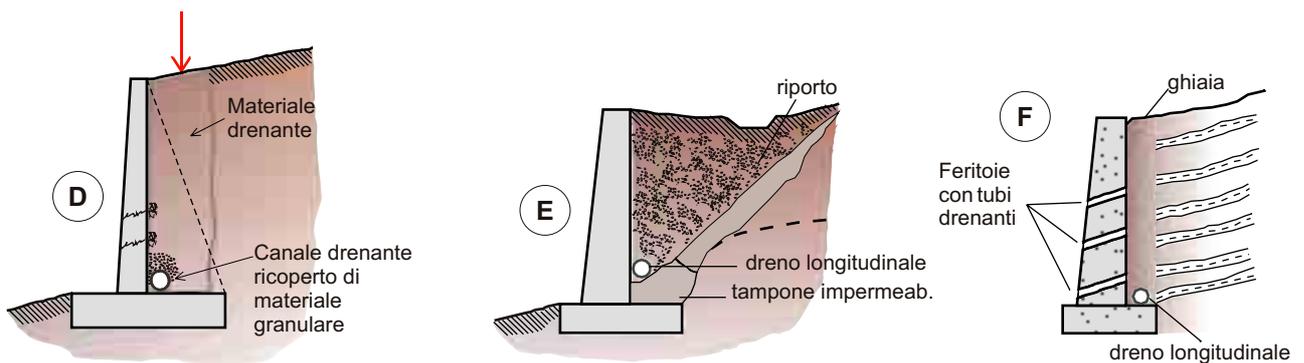
Muro di sostegno in c.a. per il contenimento di una scarpata a difesa di una strada soprastante e protezione della sponda dall'erosione del corso d'acqua. Il muro è stato realizzato mediante getto in opera mentre il paramento è posticcio in pietrame sbizzato a mano.





Tipi di muri di sostegno realizzati con calcestruzzo armato gettato in opera o con elementi prefabbricati in cemento armato.

- A) Muro ad elementi prefabbricati in cemento armato.
- B) Muro a mensola in cemento armato gettato in opera.
- C) Muro in cemento armato gettato in opera con contrafforti interni.



Sistemi di drenaggio impiegati nei muri di sostegno in cemento armato:

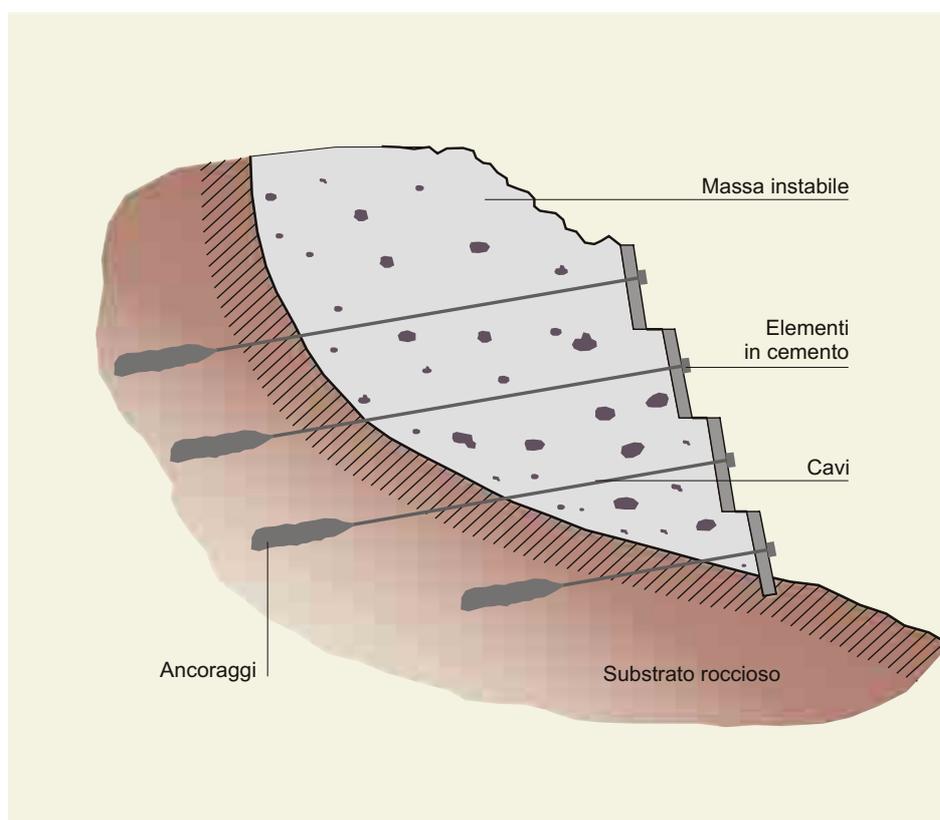
- D) Riempimento con riporto di materiale granulare drenante (pietrisco, ghiaia e sabbia pulita), feritoie con tubi drenanti, tubo drenante longitudinale, coperto con materiale granulare, posato lungo la base del muro.
- E) Formazione di uno strato inclinato di materiale granulare drenante posto a diretto contatto col terreno in posto ed appoggiato su un tampone impermeabile, dreno longitudinale coperto con materiale granulare lungo la base, riempimento con riporto di materiale impermeabile e formazione di canalette per la regimazione e l'allontanamento delle acque meteoriche dal ciglio.
- F) Realizzazione di un setto di materiale granulare drenante a contatto con la parete interna del muro, feritoie con tubi drenanti e dreno longitudinale lungo la base del muro.

Il materiale drenante deve essere scelto in funzione della granulometria della terra della scarpata o del terrapieno, con caratteristiche granulometriche tali da non intasare i fori dei tubi drenanti e garantire un'efficace azione drenante del terreno naturale a tergo della struttura di sostegno.

Stabilizzazione di una scarpata in frana mediante la realizzazione di un muro in cemento armato ancorato con tiranti. Il nuovo muro è stato sovrapposto a quello vecchio e rivestito in pietra.



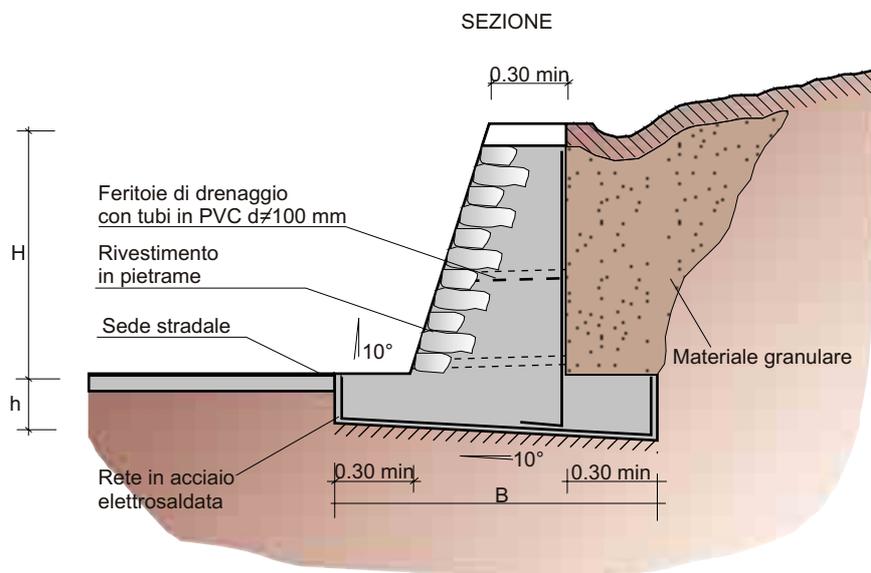
Stabilizzazione di una scarpata mediante delle piastre in cemento armato ancorate con tiranti nella parte stabile dell'ammasso roccioso.



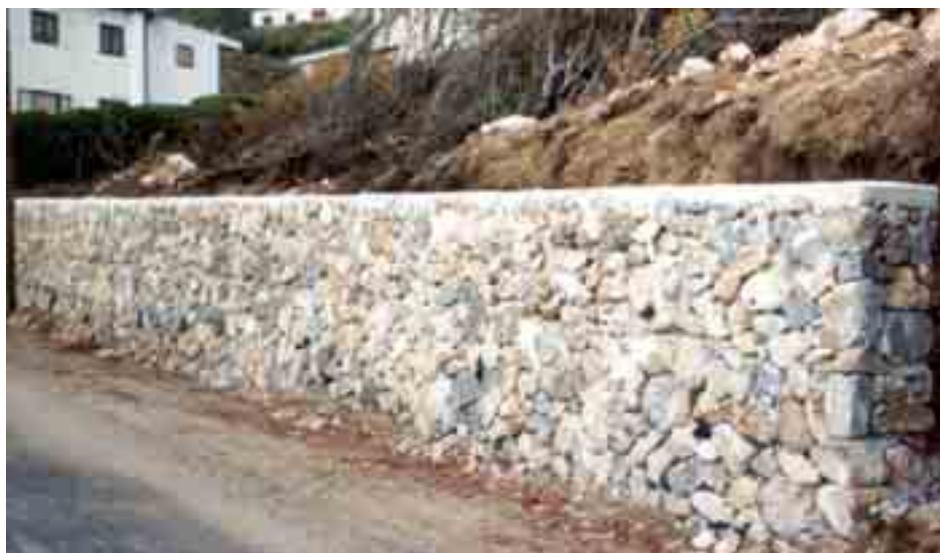
Muro di sostegno di rilevati stradali realizzati con elementi prefabbricati in c.a. La facciata del muro è stata opportunamente trattata e rifinita in modo da ottenere particolari aspetti estetici riducendo l'impatto visivo e favorire l'inserimento dell'opera nel contesto paesaggistico ed estetico delle aree urbane e suburbane.



Muro di sostegno in c.a. in cui il paramento esterno in pietra sbazzata viene utilizzato come cassera di contenimento per il getto in c.l.s.



Muretto di sostegno in c.a. per il contenimento di una scarpata in frana a difesa di una strada. Il muro è stato realizzato mediante un paramento in pietrame sbazzato messo in opera in loco prima del getto di calcestruzzo.



Generalità

I muri cellulari a gabbia o “Cribb Walls” sono delle opere di sostegno speciali formate da una maglia rettangolare di elementi prefabbricati, in conglomerato cementizio armato e vibrato o in legname opportunamente trattato con prodotti protettivi. Le strutture così formate sono riempite da materiale granulare incoerente.

Questa struttura rappresenta la riscoperta in chiave moderna dei tradizionali muri di sostegno realizzati mediante maglie tridimensionali di tronchi riempite con pietrame, diffuse nelle vallate alpine.

Questa tecnica, i cui primi brevetti sono stati depositati negli Stati Uniti D'America agli inizi degli anni '60, è stata ampiamente utilizzata in numerose opere nel mondo.

Descrizione e Caratteristiche

I muri cellulari sono delle strutture resistenti ed allo stesso tempo molto flessibili, in grado di contrapporsi con efficacia ad assestamenti e/o cedimenti del piano di posa o del terreno a tergo, dovuti a fenomeni erosivi o a fenomeni franosi.

La struttura modulare e la forma degli elementi conferiscono all'opera una notevole capacità di adattamento geometrico alle diverse conformazioni plano-altimetriche del terreno, specie in territori collino-montani o in interventi di sistemazione in alveo e difese di sponda, consentendo la realizzazione di interventi anche di ridotte dimensioni, in zone di difficile accesso e in tratti curvilinei con raggi di curvatura molto ristretti. L'altezza di tali strutture, variabile a seconda delle necessità, in genere non supera i 4-5 metri.

Il paramento esterno può essere, in funzione delle necessità, verticale o con scarpa inclinata.

La tipologia del paramento esterno può essere modificata, per minimizzare l'impatto ambientale e migliorare l'aspetto estetico, inserendo delle apposite vaschette (fioriere) riempite di terreno vegetale, in modo da favorire l'attecchimento della vegetazione nella struttura. In questi casi occorre scegliere bene le specie vegetali da innestare e provvedere spesso ad adeguati sistemi di irrigazione per far fronte ai periodi secchi.

I muri cellulari sono delle opere di sostegno che, oltre ad avere un buon comportamento statico ed una notevole flessibilità, grazie alla modularità e alle caratteristiche tipologiche degli elementi della struttura, in cemento armato o legno, presentano un limitato impatto ambientale ed un buon inserimento nel paesaggio circostante.



Dal punto di vista statico i muri cellulari agiscono come i muri a gravità, opponendosi col proprio peso alle sollecitazioni cui sono sottoposti.

Nel caso di terreni di fondazione sufficientemente stabili e dotati di discrete capacità portanti, i muri cellulari non necessitano di fondazioni profonde o di particolari opere di sottofondazione. In caso contrario si può procedere ad una adeguata preparazione e stabilizzazione del piano di posa, mediante operazioni di miglioramento delle caratteristiche tecniche dei terreni in situ (compattazione del piano di posa, asportazione, miscelazione e/o sostituzione del materiale in posto con altro di idonee qualità, realizzazione di una soletta di calcestruzzo ecc.). In presenza di terreni poco consistenti, eterogenei e particolarmente cedevoli, con spessore elevato (maggiori di 3-4 metri), può essere necessario ricorrere a fondazioni speciali come ad esempio un basamento in calcestruzzo armato fondato su micropali.

Aspetti ambientali

Le modalità costruttive ed i tipi di materiali impiegati per la costruzione dei muri cellulari riducono notevolmente gli effetti negativi che tali opere di ingegneria (molto efficaci dal punto di vista tecnico) possono avere sull'ambiente in cui sono inserite.

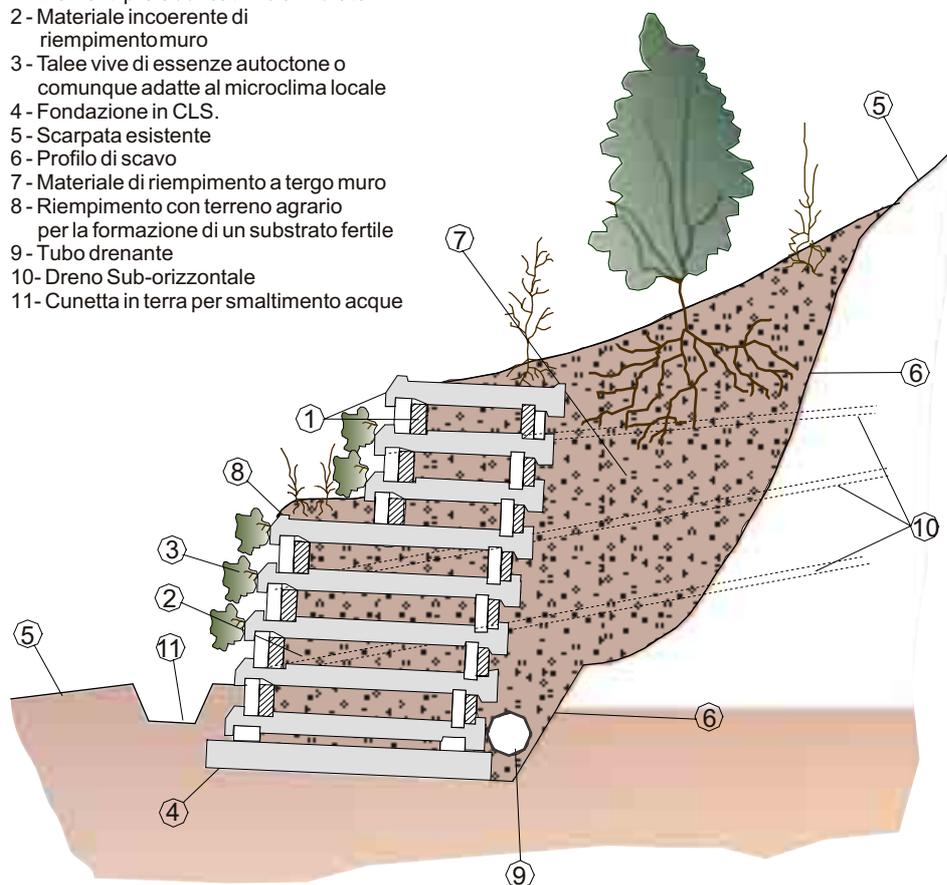
I muri con elementi prefabbricati in legno sono quelli che meglio si inseriscono nel contesto estetico paesaggistico degli ambienti montani boscosi.

I muri cellulari formati da elementi prefabbricati in calcestruzzo armato hanno un maggior impatto visivo, mitigato in parte dalla possibilità di rinverdimento del paramento esterno con vegetazione, spontanea o innestata artificialmente, e dall'utilizzo di elementi con forme e colorazioni che si integrano meglio dal punto di vista architettonico-paesaggistico nell'ambiente urbano o naturale.

Sezione tipica di un muro cellulare costituito da elementi prefabbricati in c.a. Gli elementi prefabbricati sono costituiti da travi ad incastro. La struttura a "gabbia" o "celle" si ottiene sovrapponendo in modo alternato ed ortogonale gli elementi stessi in modo da ottenere una griglia tridimensionale. La struttura così ottenuta è riempita con materiale di riporto, preferibilmente costituito da terreni a comportamento granulare con buone capacità drenanti, disponibile in loco o proveniente da cave di prestito. Il materiale deve avere una frazione di fino limoso - argilloso pari almeno al 10%-25% per consentire lo sviluppo della vegetazione naturale o artificiale ed il rinverdimento del paramento esterno, e deve essere ben addensato con idonei mezzi meccanici per ottenere una buona esecuzione ed efficacia dell'opera di sostegno. Il paramento frontale può presentare un andamento lineare continuo oppure delle gradonature al disopra del quale è posto del terreno vegetale per favorire lo sviluppo della copertura vegetale ed ottenere un migliore inserimento ambientale dell'opera. L'inserimento di dreni sub-orizzontali nel terreno e nella struttura assicura un migliore drenaggio delle acque di falda.

LEGENDA

- 1 - Elementi prefabbricati in c.a. vibrato
- 2 - Materiale incoerente di riempimento muro
- 3 - Talle vive di essenze autoctone o comunque adatte al microclima locale
- 4 - Fondazione in CLS.
- 5 - Scarpata esistente
- 6 - Profilo di scavo
- 7 - Materiale di riempimento a tergo muro
- 8 - Riempimento con terreno agrario per la formazione di un substrato fertile
- 9 - Tubo drenante
- 10 - Dreno Sub-orizzontale
- 11 - Cunetta in terra per smaltimento acque



Applicazioni

I muri cellulari per le loro caratteristiche di resistenza, adattabilità e flessibilità, stabilità, capacità drenante, facilità e rapidità di esecuzione, impatto ambientale contenuto e buon inserimento nel paesaggio, sono impiegati come opere di sostegno e di contenimento per infrastrutture e per interventi di sistemazione e difesa del suolo dai dissesti e dall'erosione quali:

- opere di pronto intervento per il ripristino in tempi brevi della viabilità o altre infrastrutture interrotte;
- opere di contenimento e di sostegno nell'ambito degli interventi per la sistemazione e la stabilizzazione di pendii in frana, regimazione idrica e ricostituzione della copertura vegetale;
- opere di protezione delle sponde fluviali dall'erosione ed arginature nell'ambito degli interventi di stabilizzazione delle sponde dei corsi d'acqua;
- realizzazione di briglie per la regimazione dei corsi d'acqua torrentizi e la sistemazione idrogeologica dei versanti dissestati;
- muri di sostegno, di sottoscarpa e di controripa nella costruzione delle infrastrutture stradali e ferroviarie ;
- realizzazione di barriere antirumore a protezione di abitati per le ottime caratteristiche fonoassorbenti del materiale di riempimento della struttura;
- realizzazione di barriere paramassi (valli) e/o paravalanghe nell'ambito degli interventi per la protezione dalla caduta massi o da valanghe di abitazioni o infrastrutture di vario tipo in aree montane.

Muro cellulare in legno realizzato per il consolidamento di una scarpata instabile in ambiente montano.



Fasi di realizzazione di muri cellulari per il sostegno e consolidamento di versanti in frana. I muri cellulari sono strutture flessibili, molto versatili ed adattabili alle varie conformazioni morfologiche del terreno, anche quelle più difficili come nei versanti acclivi montani od in alveo. Le operazioni di montaggio, assemblaggio, riempimento e compattazione sono molto rapide, e sono realizzate con mezzi meccanici, e l'impiego di un limitato numero di operatori.



I muri cellulari per le loro caratteristiche di facilità e rapidità di esecuzione e per la flessibilità della struttura sono spesso impiegati come opere di sostegno e di contenimento a carattere provvisorio per il ripristino, in tempi brevi, della viabilità interrotta da fenomeni franosi, o per strade di accesso provvisorie a servizio dei cantieri per il consolidamento di versanti in frana. Una volta terminata questa loro funzione, gli elementi prefabbricati possono essere smontati e rimossi per essere riutilizzati in altri interventi.



Impiego di muri cellulari come opere di protezione delle sponde dall'erosione fluviale nell'ambito degli interventi per la sistemazione idrogeologica dei versanti dissestati. In questi casi il paramento esterno è formato da elementi antiurto particolarmente rinforzati.



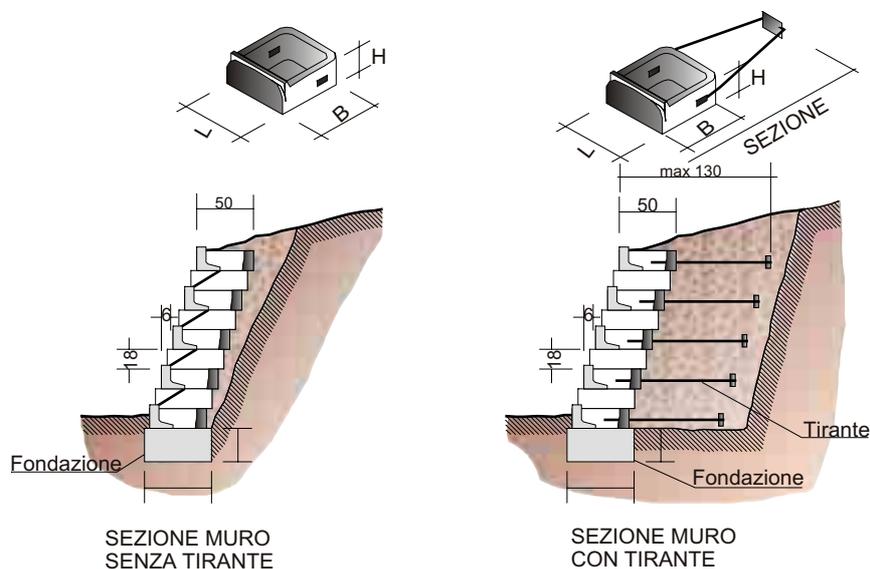
Consolidamento e ripristino ambientale di un versante prospiciente un centro abitato. Il versante è stato stabilizzato mediante la realizzazione di una serie di terrazzamenti sostenuti da muri cellulari, aventi la funzione di contenimento e di drenaggio del terreno a monte. Per migliorare l'efficienza dell'azione drenante delle acque di falda, sono stati inseriti nel terreno attraverso la struttura del paramento frontale dei tubi drenanti. Nella foto è visibile la vegetazione erbosa ed arbustiva, che ricopre il versante, sistemato a gradonate, e parte dei paramenti esterni, riducendo l'impatto ambientale della struttura in calcestruzzo e consentendo un buon ripristino ambientale.



Impiego di muri cellulari rinverditici come opere di rivestimento e di sostegno di scarpate artificiali o naturali. La tipologia mostrata in figura è formata da elementi prefabbricati in cemento armato di forma prismatica rettangolare, disposti a file alternate in modo da lasciare degli spazi vuoti, che vengono riempiti da terreno di riporto. La vegetazione spontanea o artificialmente innestata contribuisce insieme all'aspetto estetico del paramento e all'inserimento architettonico paesaggistico. Per altezze fino a 2/3 m queste strutture non necessitano di elementi di rinforzo, assolvendo bene la funzione di rivestimento e sostegno. Per muri con altezze maggiori di 3 metri è necessario applicare dei tiranti di rinforzo, ancorati nel terrapieno compattato.



Per piccole scarpate esistono manufatti leggeri (Industria prefabbricati italiani) che consentono di costruire una parete di sostegno rinverdibile. In caso di necessità e per altezze superiori a 2-3 metri, gli elementi possono essere dotati di corti tiranti.



Generalità

Consolidamento di una scarpata stradale in frana in Alta Valtellina (Sondrio) mediante la costruzione di un'opera di sostegno realizzata in Terra Rinforzata rinverdirente. Sul paramento esterno è stesa una biostuoia per la ritenzione del materiale fino necessario per il successivo inerbimento della struttura con idrosemina.

Negli ultimi anni le tecniche di rinforzo delle terre hanno avuto un largo sviluppo nella realizzazione di strutture in grado di assolvere sia le funzioni di opere di sostegno e di contenimento sia di rispondere alle esigenze della salvaguardia ambientale e del corretto inserimento paesaggistico-ambientale dell'opera.

La tecnologia delle terre rinforzate rappresenta la ripresa ed il perfezionamento, in chiave moderna, di un sistema di miglioramento delle caratteristiche del terreno che ha origini antichissime.

Sembra infatti che i primi esempi di applicazione di questo sistema di costruzione, di cui si hanno testimonianze archeologiche, risalgano a circa tremila anni dal presente, quando i Babilonesi utilizzarono letti di rami di palma con funzioni di rinforzo nei terreni di fondazione, particolarmente compressibili, degli "Ziggurat".

Numerose altre testimonianze dell'impiego di materiali di vario tipo (come giunchi, bambù, pelli di animali, legname) come elementi di rinforzo per la realizzazione di opere in materiali sciolti, si ritrovano nell'antichità presso i cinesi, i giapponesi e i romani.

In tempi recenti sono state messe a punto e perfezionate nuove tecniche del rinforzo delle terre.

Infatti il moderno concetto di terreno rinforzato è sorto in Francia nel 1963 da un'idea di Henry Vidal, che ha messo a punto e brevettato un sistema di costruzione di terra rinforzata denominato "Terra armata".

Negli anni settanta, per questa applicazione, hanno cominciato a diffondersi i geosintetici ed altre tecnologie, oggi ampiamente sperimentate in tutto il mondo, che offrono prestazioni molto interessanti sotto vari aspetti: tecnici, economici ed ambientali.



Tutti questi sistemi si basano sul principio di migliorare le caratteristiche meccaniche del terreno conferendogli resistenza a trazione. I terreni sono caratterizzati da una resistenza a compressione significativa, che dipende dalle loro caratteristiche intrinseche ed dalla loro storia tensionale, ma non possiedono resistenza a trazione.

Mediante l'inserimento nei terreni di elementi dotati di resistenza a trazione se questi sono in grado di interagire con il mezzo in cui sono immersi, il risultato è un sistema composito dotato di caratteristiche meccaniche superiori rispetto a quelle del solo terreno.

E' molto importante considerare che l'efficienza dei rinforzi dipende in maniera essenziale non solo dalla resistenza che possono mobilitare all'interno del sistema, ma anche dalle deformazioni necessarie a fornire tale contributo: se le deformazioni non sono compatibili con la funzionalità della struttura i materiali in questione non sono utilizzabili come rinforzi.

I materiali oggi disponibili sul mercato sono numerosi, con caratteristiche meccaniche e di durabilità che possono essere anche molto diverse. Poiché nella normativa italiana i riferimenti ai criteri di progettazione di queste opere sono piuttosto generici (si prescrivono verifiche di stabilità interna che prendano in considerazione i rinforzi e verifiche di stabilità come opera di sostegno) è opportuno ricordare che la progettazione corretta di questo tipo di strutture non potrà prescindere dalle seguenti considerazioni:

- Definire la resistenza del rinforzo considerando gli effetti del danneggiamento, aggressione fisico-chimica-biologica, effetti degli allungamenti dovuti a deformazioni viscosi (creep). La resistenza andrà scelta in relazione alla vita di progetto dell'opera;
- Definire quali saranno le caratteristiche di interazione del geosintetico sia in relazione all'estrazione dal terreno che allo scivolamento di questo sul rinforzo (per geogriglie e geotessuti);
- Definire le caratteristiche di resistenza al taglio e di compressibilità del terreno che si dovrà usare per la costruzione dell'opera. Questo normalmente comporta l'individuazione della granulometria e delle modalità di addensamento del terreno (umidità ed energia di compattazione);
- Definire il tipo di paramento e nel caso di terre rinforzate rinverdibili prevedere sempre un inerbimento adeguato e quando possibile (se non vi sono interferenze con altre strutture) imporre l'inserimento di piante arbustive nella struttura;
- Condurre verifiche di stabilità interna e d'insieme struttura-terreno adiacente. Nel caso di opere con paramento subverticale (inclinazione sull'orizzontale compresa tra 70° e 60°) eseguire anche le verifiche richieste per le opere di sostegno a gravità: scivolamento sulla base, ribaltamento e schiacciamento.

L'applicazione di questi criteri nella progettazione consentirà di realizzare strutture sicure sotto il profilo ingegneristico ed in grado di inserirsi in maniera ottimale nell'ambiente e nel paesaggio.

Fase di realizzazione di un rilevato paramassi in terre rinforzate con geosintetici in ambiente montano.



Descrizione e Caratteristiche

Le tipologie di materiali che vengono usate per il rinforzo dei terreni sono:

Rinforzi metallici

- inestensibili quali strisce d'acciaio nervate e barre d'acciaio zincate
- estensibili quali reti a doppia torsione in trafilato d'acciaio protetto con galvan e plastica.

Rinforzi geosintetici

- tessuti in polipropilene
- geogriglie estruse in HDPE o polipropilene
- geogriglie a nastri in poliestere protette con LDPE
- geogriglie tessute in poliestere protette con PVC o EVA

L'opera viene realizzata stendendo e compattando il terreno in strati orizzontali spessi 25-30 cm. A quote definite dal progetto vengono posti i rinforzi, secondo lunghezze che dipenderanno dal dimensionamento della struttura.

La stabilità locale a breve termine (durante la compattazione) e lungo termine in corrispondenza del paramento esterno, potrà essere garantita in vari modi:

- Paramento verticale costituito da piastre in calcestruzzo armato o blocchetti di calcestruzzo prefabbricati
- Paramento verticale costituito da scatolare in rete metallica a doppia torsione riempito di pietrame ed in continuità con il rinforzo di ancoraggio.
- Paramento inclinato rinverdibile realizzato risvoltando il rinforzo e mediante un cassero di contenimento ed irrigidimento in rete metallica a elettrosaldatura, dotato di elemento antiersivo costituito da biostuoia o geostuoia.
- Paramento inclinato realizzato risvoltando il rinforzo ed associando un elemento antiersivo. Durante la compattazione si userà un cassero mobile per impedire il franamento del terreno o se l'inclinazione del paramento è bassa si potrà compattare la scarpata con la benna dell'escavatore e risvoltare.

Le strutture realizzate con le tecniche costruttive della "terra armata tipo "muri modulari verdi", utilizzano per il rivestimento del paramento esterno elementi prefabbricati a forma di fioriere.

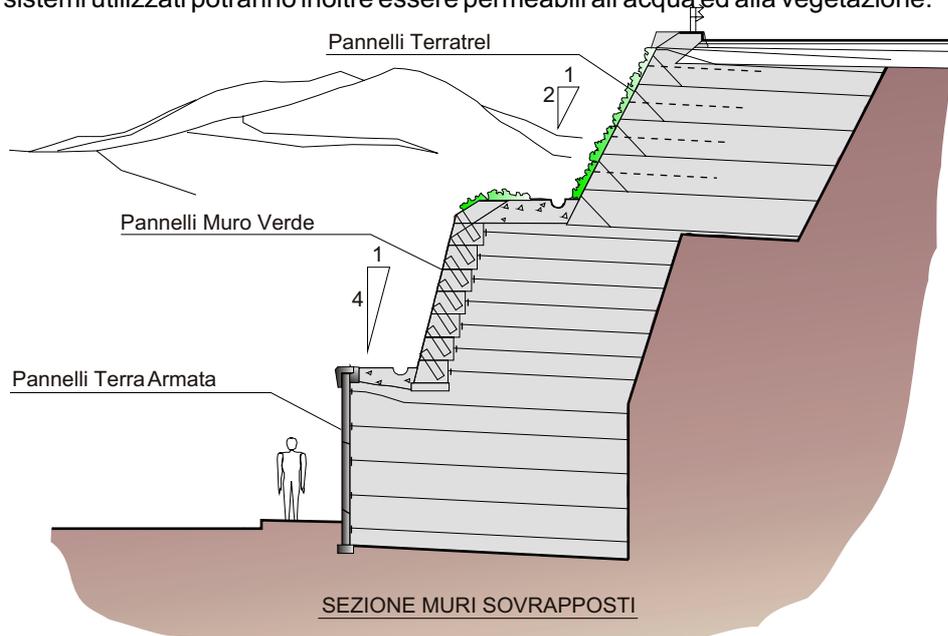
I "Muri Terratel", realizzati con una tecnologia che si ispira al principio delle terre armate utilizzando come elemento di rinforzo i geosintetici, hanno la duplice funzione di conferire alla struttura la necessaria stabilità statica ed al tempo stesso di formare il paramento frontale.

Nella "terra armata" il paramento esterno può essere verticale o variamente inclinato.

L'inclinazione del paramento esterno è in genere verticale nelle strutture rivestite con pannelli prefabbricati in calcestruzzo armato, molto usati come opere di sostegno nella costruzione di infrastrutture stradali e ferroviarie o in zone aride prive di vegetazione.

Le altre tipologie con paramento rinverdito possono avere inclinazioni variabili. Questo tipo di struttura è maggiormente impiegato negli interventi extraurbani o su versanti acclivi. In questi casi il tipo di vegetazione e di inerbimenti deve essere attentamente scelto in funzione delle caratteristiche locali della vegetazione e del clima.

Le opere che si potranno realizzare con i sistemi descritti sopra saranno tutte caratterizzate da estrema flessibilità e quindi particolarmente adatte alle applicazioni di stabilizzazione dei versanti. Le terre rinforzate a seconda dei sistemi utilizzati potranno inoltre essere permeabili all'acqua ed alla vegetazione.



Aspetti ambientali

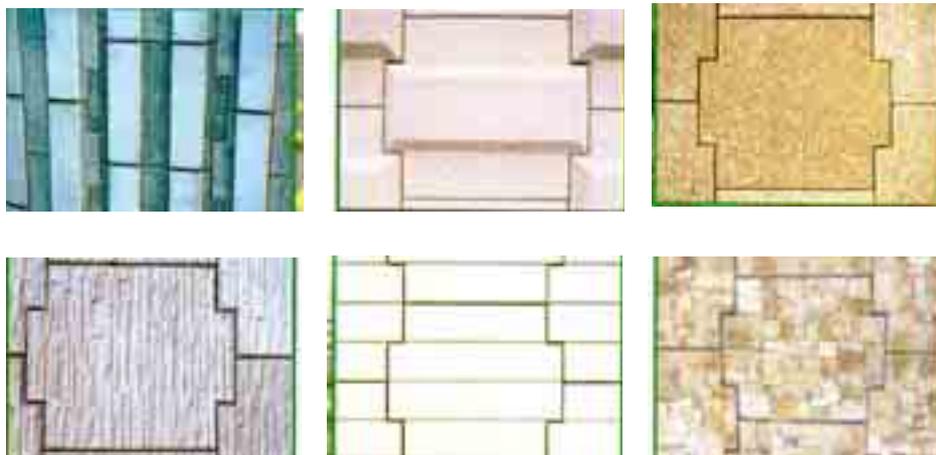
Le opere di sostegno in terre rinforzate rispondono bene all'esigenza, sempre più sentita, di coniugare l'efficacia tecnico-funzionale con la necessità di mitigare il più possibile l'impatto sull'ambiente circostante sia dal punto di vista estetico paesaggistico che da quello ambientale.

Le numerose varianti costruttive delle strutture in terre rinforzate consentono infatti di ottenere un facile inserimento tecnico-architettonico nel contesto del paesaggio naturale o urbano, minimizzando l'impatto ambientale dell'opera.

Le strutture con paramento rinverdito assolvono bene queste funzioni soprattutto negli ambienti naturali ricchi di vegetazione.

La grande varietà di materiali a disposizione consente di scegliere la soluzione più idonea per ogni contesto sia naturale che antropizzato: calcestruzzo colorato, pietra a vista, pietrame, copertura erbacea o arbustiva permettono di inserire l'opera in un contesto urbano così come in un paesaggio boscoso o caratterizzato da affioramenti rocciosi.

Esempi di finitura superficiale dei pannelli in "Terra Armata"

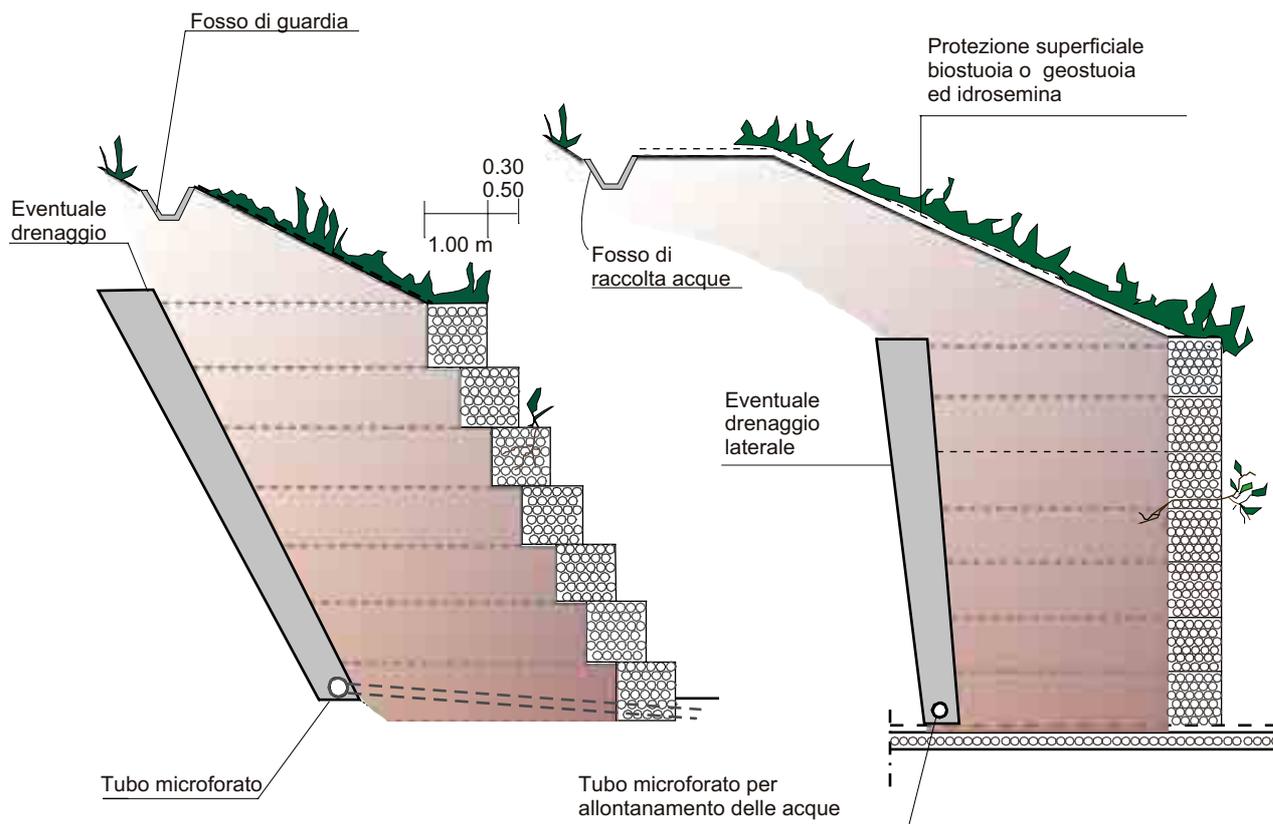


Sezione tipica delle opere di sostegno della autostrada A40, Francia.

Il versante era ricoperto da uno strato detritico in equilibrio non ottimale, tale da non rendere possibili scavi anche di modeste entità. L'autostrada è stata quindi progettata con carreggiate a livelli sfalsati per adattarsi al profilo trasversale del terreno. Per lo stesso motivo le carreggiate seguono le curve di livello del versante, anche se questo comporterà una riduzione del limite di velocità del traffico veicolare.

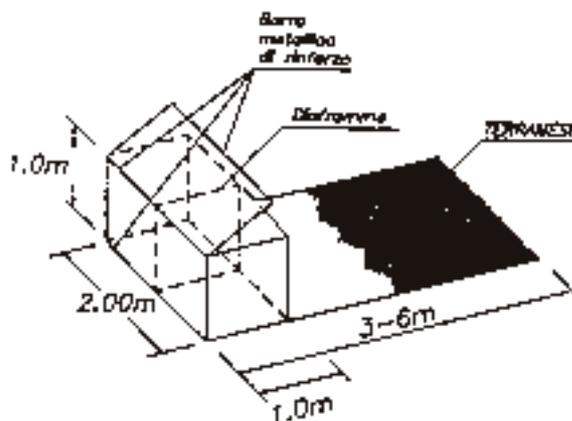
L'opera è stabilizzata da una serie di tiranti ancorati nello strato roccioso.



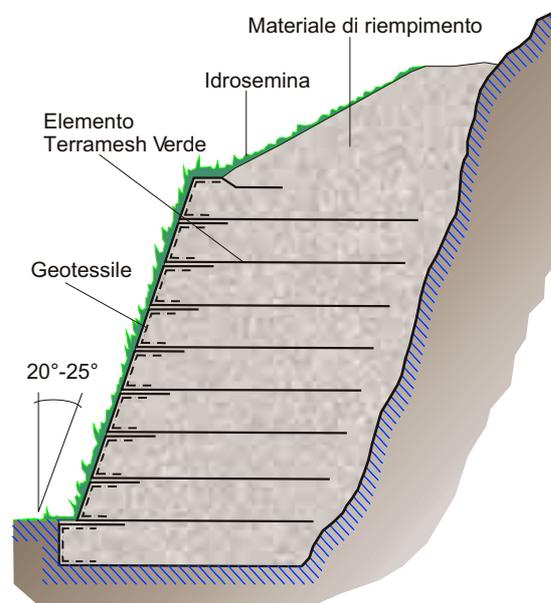


Muri di sostegno realizzati col sistema "Terramesh": alla funzione di muro di sostegno a gravità viene accoppiata quella di rinforzo del terreno a tergo. Il paramento in gabbioni può essere a gradonata esterna o verticale. Queste strutture hanno una buona capacità drenante, tuttavia in alcuni casi per migliorare il drenaggio del terreno, si posiziona uno strato di materiale drenante tra il terreno naturale e quello del terrapieno. Alla base di questo è posto un tubo microforato per l'allontanamento delle acque. Fossi di guardia e/o rivestimenti con vegetazione o inerbimento artificiale mediante geostuoie ed idrosemina assicurano la protezione della scarpata dall'erosione delle acque meteoriche.

Schema costruttivo tipo di un elemento Terramesh verde rinforzato in rete metallica a doppia torsione zincata o plastificata. La struttura in gabbioni riempiti da ciottoli o pietrame forma il paramento esterno.



Consolidamento di una pendice sottostante all'abitato di S. Mango sul Calore (Avellino) con una struttura in 'Terramesh.' verde. L'intervento ha comportato una preventiva sistemazione dell'asta torrentizia al piede della pendice, mediante salti di fondo e rivestimenti in gabbioni. L'uso di bancate in 'Terramesh.' verde ha permesso la realizzazione dello strato esterno in suolo rinforzato necessario per la stabilità, consentendo di mantenere l'andamento preesistente del terreno, caratterizzato da una pendenza media di 45°. Una biostuoia è stata utilizzata per la ritenzione della frazione fine dei terreni sul paramento esterno. L'intervento complessivo ha previsto un'alternanza di zone consolidate con in terra rinforzata e di opere di sola protezione superficiale tramite graticciate.



Applicazioni

Le caratteristiche di resistenza e di facilità di esecuzione nonché l'impatto ambientale contenuto hanno consentito un diffuso utilizzo di questa tecnica in interventi quali:

- ripristino in tempi brevi della viabilità o altre infrastrutture interrotte;
- contenimento e sostegno nelle opere per la sistemazione e la stabilizzazione di pendii in frana, regimazione idrica e ricostituzione della copertura vegetale;
- protezione delle sponde fluviali dall'erosione ed arginature realizzazione di briglie per la regimazione dei corsi d'acqua torrentizi e sistemazione idrogeologica dei versanti dissestati;
- muri di sostegno, di sottoscampa e di controripa nella costruzione di varie infrastrutture stradali e ferroviarie ;
- realizzazione di barriere antirumore a protezione di abitati per le ottime caratteristiche fonoassorbenti del materiale di riempimento della struttura e del paramento esterno;
- realizzazione di barriere paramassi (valli) e/o paravalanghe in aree montane.

La figura mostra in primo piano sul lato destro la costruzione di un alto muro in Terra Armata a sostegno della scarpata in roccia molto frantumata, preventivamente gradonata.



Esempi di finitura superficiale di pannelli in "terra ramata" con un motivo che tende a fondersi con le pareti calcaree dei versanti adiacenti.

Chiodatura del terreno (Soil nailing)

Generalità

Il principio base della chiodatura coniuga i sistemi di stabilizzazione dei fronti di scavo dei tunnels mediante l'uso di chiodi infissi nella roccia o terreno e di rivestimento esterno in spritz beton, con la tecnologia standard della "terra armata".

Descrizione e Caratteristiche

La tecnica della chiodatura del terreno è abbastanza recente ed, al momento, non sono state messe a punto delle procedure standardizzate per il dimensionamento statico, soprattutto per quanto riguarda il numero, la lunghezza e lo spessore minimo delle barre.

Analogamente a quanto accade nelle terre armate con armature metalliche, anche in questo caso la resistenza e la stabilità del blocco rinforzato è data dalle forze di attrito e di adesione che si sviluppano dall'interazione terreno - elemento di rinforzo.

Questa tecnica può inoltre prevedere l'utilizzo di tubi perforati per facilitare il drenaggio ed il consolidamento dei terreni in situ.

La chiodatura dinamica del terreno rappresenta una procedura rapida di costruzione di opere di sostegno in terra rinforzata e di stabilizzazione di pendii instabili e risulta molto più economica di altri sistemi di rinforzo delle terre.

La versatilità e la maneggevolezza dei macchinari impiegati permette di eseguire interventi su qualsiasi tipo di terreno, anche in spazi molto limitati e su pendii acclivi.

Le operazioni di chiodatura dinamica del suolo non alterano la struttura del terreno, inoltre il rivestimento con geotessili permette un rapido ricoprimento a verde della struttura naturale o artificiale, consentendo un buon inserimento ambientale dell'opera.

La chiodatura dinamica prevede l'inserimento nel terreno di chiodi, con lunghezza variabile tra 2 e 6 metri, senza iniezioni di cemento. I chiodi vengono inseriti molto rapidamente utilizzando un apparecchio ad aria compressa, con una cadenza di circa 15 chiodi/ora.

La testa del chiodo è fissata al rivestimento esterno della scarpata che può essere costituito da geosintetici (geotessili o geogriglie) o, in alcuni casi, da rete metallica elettrosaldata rivestita con calcestruzzo proiettato (spritz beton).

È una tecnica utile per stabilizzare scarpate in luogo di muri di sostegno.



La tecnologia della chiodatura dinamica del terreno viene utilizzata soprattutto negli interventi di stabilizzazione e consolidamento di pendii instabili o di scarpate artificiali.

In funzione della natura del suolo e della pendenza della scarpata si può rifinire la superficie esterna dell'area chiodata in vari modi. Nel caso della foto il rivestimento è costituito da un geotessile rinverdito.



Generalità

Le gabbionate sono strutture di sostegno modulari formate da elementi a forma di parallelepipedo in rete a doppia torsione tessuta con trafilato di acciaio riempite con pietrame.

Questo tipo di struttura è nata in Italia ed ha avuto ampia diffusione, soprattutto come opera di sostegno e drenaggio, negli interventi di consolidazione e sistemazione di versanti instabili e in altri settori dell'ingegneria civile.

Descrizione e Caratteristiche

La struttura modulare, a forma di parallelepipedo, è realizzata con tecniche costruttive semplici e rapide.

Le reti metalliche sono costituite in filo di acciaio protetto con zincatura forte o con lega di zinco-alluminio (galvan) ricoperto da una guaina in PVC per aumentare la resistenza alla corrosione.

Per il riempimento dei gabbioni possono essere utilizzati i materiali lapidei e disponibili in loco o nelle vicinanze, purché abbiano caratteristiche granulometriche e peso specifico tali da soddisfare le esigenze progettuali e garantire l'efficienza dell'opera. I materiali più comunemente usati sono costituiti da materiale detritico di grossa pezzatura, alluvionale o di cava (ciottoli, pietrame). Il pietrame deve essere non gelivo, non friabile e di buona durezza. Le gabbionate devono essere riempite con cura utilizzando pezzature di pietrame diversificate in modo da minimizzare la presenza di vuoti.

Dal punto di vista statico le gabbionate agiscono come un muro a gravità, opponendosi col proprio peso alle sollecitazioni cui sono sottoposte. Il loro dimensionamento e le verifiche di stabilità interna ed esterna sono pertanto eseguiti secondo gli usuali metodi di calcolo adottati per le opere di sostegno a gravità (Coulomb, Rankine, metodo dell'equilibrio limite).

Le gabbionate sono delle strutture permeabili, resistenti ed allo stesso tempo molto flessibili in grado di resistere, senza gravi deformazioni dei singoli elementi, ad assestamenti e/o cedimenti del piano di posa o del terreno a tergo dovuti a fenomeni erosivi o a fenomeni franosi, o a scosse sismiche.

La struttura modulare e la forma degli elementi conferiscono all'opera una notevole capacità di adattamento alle diverse conformazioni plano-altimetriche del terreno, specie in territori collino-montani o in interventi di sistemazione in alveo e difese di sponda, consentendo la realizzazione di opere anche di ridotte dimensioni ed in zone di difficile accesso.

Impiego di gabbionate come opere di sostegno e drenaggio nella costruzione di strade.

I muri in gabbioni metallici sono un'opera di sostegno a gravità, che in genere non necessitano di accurate opere di fondazione trattandosi di strutture deformabili. La base della fondazione è variamente inclinata in funzione delle necessità. In sezione i muri possono essere a gradoni esterni o a gradoni interni.

Per le opere di sostegno con altezza superiore a 5 - 6 metri è preferibile usare strutture con gradoni esterni che garantiscono una maggiore stabilità statica.



Aspetti ambientali

Le gabbionate sono una valida soluzione per la realizzazione di opere di sostegno in diversi contesti, da quello urbano a quello fluviale e collinare montano, dove occorre tener conto sia delle esigenze tecniche per le quali l'opera è stata costruita, sia della necessità di avere un buon inserimento ambientale. Le tecniche costruttive, i materiali, le caratteristiche tecniche e meccaniche intrinseche della struttura, la facilità di inerbimenti e di sviluppo della vegetazione erbacea ed arbustiva consentono di mitigare l'impatto ambientale e gli effetti negativi di natura estetica sul paesaggio circostante, favorendo, al tempo stesso, il ripristino naturale e/o la formazione di ecosistemi locali.

Applicazioni

Le gabbionate sono impiegate come opere di sostegno e di contenimento in interventi quali:

- pronto intervento per il ripristino in tempi brevi della viabilità o altre infrastrutture interrotte;
- sistemazione e stabilizzazione di pendii in frana, regimazione idrica superficiale e ricostituzione della copertura vegetale;
- protezione delle sponde fluviali dall'erosione ed arginature, realizzazione di briglie per la regimazione dei corsi d'acqua torrentizi;
- muri di sostegno, di sottoscarpa e di controripa nella costruzione di varie infrastrutture stradali e ferroviarie;
- barriere paramassi (valli) e/o paravalanghe.

Schema costruttivo tipo di una struttura di una gabbionata.

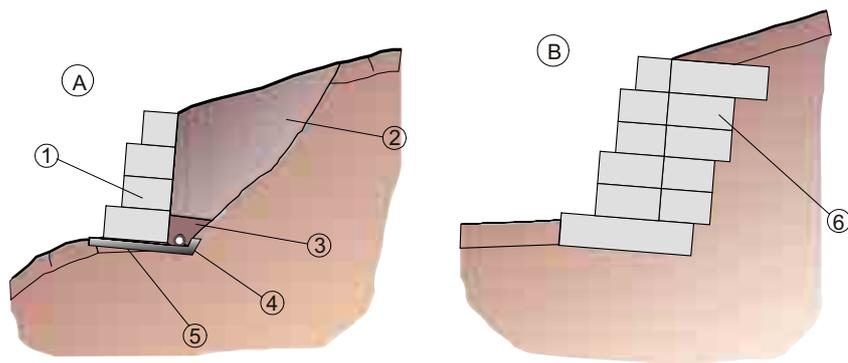
Le reti sono costituite da filo d'acciaio zincato a maglie strette di forma esagonale. Il materiale di riempimento, ciottoli o pietrame, è disposto in strati ed in maniera tale da avere il minor numero di vuoti. Preparato il piano di appoggio con la posa di eventuale materiale granulare, i gabbioni vengono disposti in file parallele, con il lato più lungo parallelo alla sezione dell'opera, in modo da avere una maggiore stabilità e resistenza nei riguardi della spinta della terra e degli sforzi di taglio.



Fase di assemblaggio di un materasso in rete a doppia torsione per la sistemazione di un tratto fluviale.



- 1 Muro in gabbioni
- 2 Riempimento a tergo
- 3 Vespaio drenante
- 4 Tubo drenante
- 5 Soletta di fondazione
- 6 Sperone drenante



Drenaggio dei terreni a tergo di una struttura di sostegno in gabbioni. I gabbioni sono molto permeabili e garantiscono un ottimo drenaggio del terreno. Negli interventi di sistemazione e stabilizzazione di versanti in frana (A), per migliorare l'azione drenante alla base del muro viene posizionata uno strato di materiale drenante (vespaio) ed una soletta in calcestruzzo, sagomata in modo tale da raccogliere ed allontanare le acque di falda anche con l'aiuto tubi drenanti. I gabbioni possono anche essere usati come speroni drenanti (B) associati a strutture di sostegno anche esse realizzate con gabbionature.

Intervento di ricostituzione di un versante prospiciente un torrente. Al piede della scarpata è stata realizzata una gabbionatura a gradoni con il duplice effetto di costituire una base stabile al terrapieno in terra rinforzata e di fornire la difesa all'erosione nel caso di piene. Nella foto sotto, lo stesso terrapieno alcuni mesi dopo il rinverdimento eseguita con idrosemina.



Gabbionata rinverdita realizzata come muro di contenimento. Per ottenere un miglior inserimento ambientale e favorire la rinaturalizzazione dei siti, nella struttura dei gabbioni viene inserita terra, ramaglie vive e talee di piante adatte al clima e al luogo.



Sistemazione superficiale e consolidamento di un versante in frana mediante terrazzamenti con muri di sostegno e drenaggio in gabbioni.

Questa soluzione è particolarmente indicata negli interventi di sistemazione e consolidamento di aree franose in zone montane. I gabbioni, riempiti con l'abbondante materiale detritico, resistono bene a eventuali assestamenti o deformazioni del terreno per le loro caratteristiche intrinseche di flessibilità e permeabilità.

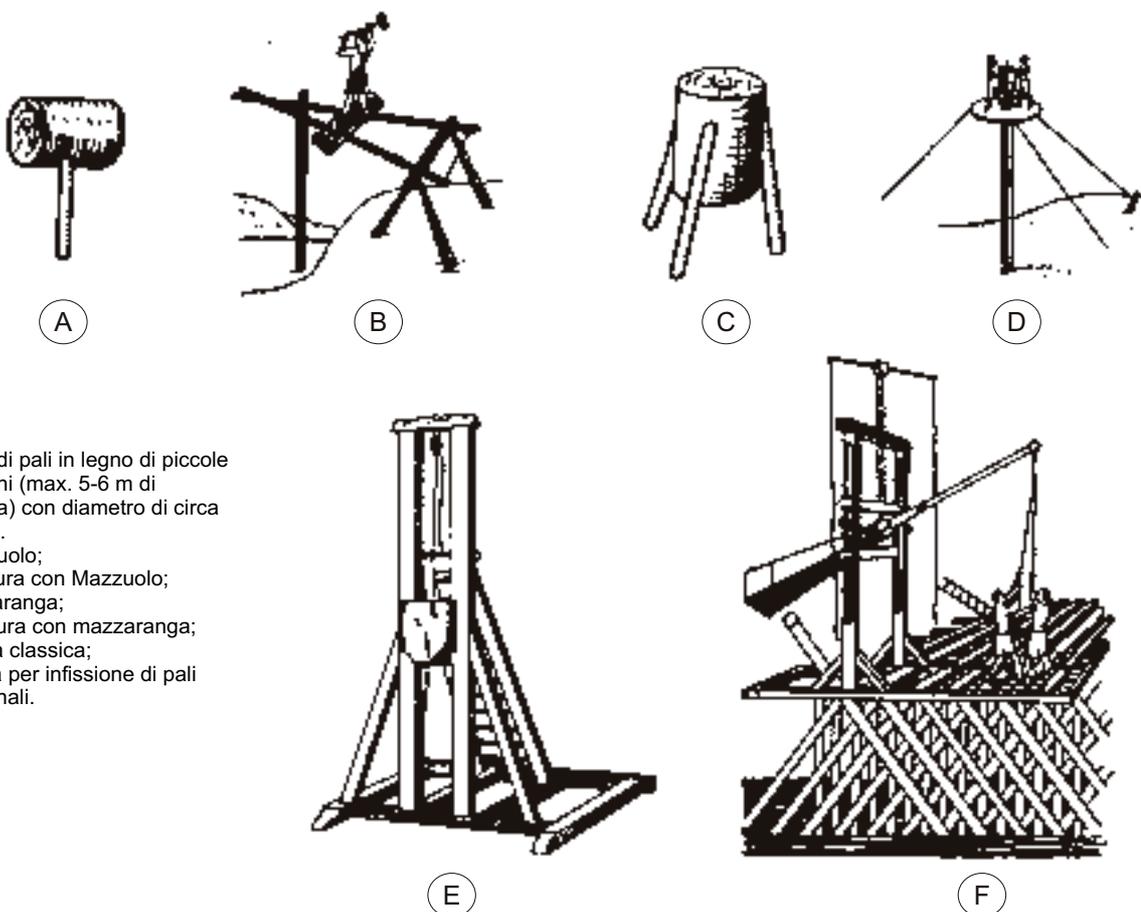


Generalità

I pali sono strutture lunghe, cilindriche o prismatiche, utilizzate in terreni di scarsa capacità portante, per migliorare lo stato di addensamento e la capacità portante di questo (pali di costipamento) o per trasferire il carico superficiale in profondità ad uno strato più resistente (pali portanti).

L'uso di pali come opere di fondazione di strutture o di miglioramento delle caratteristiche meccaniche del terreno, ha radici molto antiche nel tempo (nella Bibbia si ha notizia dell'uso di pali di costipamento e supporto di strutture di vario tipo dell'antica Babilonia). In Europa, in epoche più recenti, l'uso dei pali è ben documentato nei resti delle fondazioni delle costruzioni dell'antica Roma, e nel medioevo, in numerosi edifici di Venezia e di molte città olandesi.

Nella maggior parte dei casi i pali erano di legno ed erano infissi nel terreno manualmente o con l'ausilio di rudimentali attrezzature quali mazzuolo, mazzaranga, capra a tiranti. La rivoluzione industriale e l'invenzione (Nasmyth 1845) della prima attrezzatura meccanica a vapore d'infissione dei pali diede un forte impulso allo sviluppo ed alla innovazione tecnologica di queste opere. Successivamente l'impiego di altri materiali, come il metallo (1890) o il calcestruzzo armato, ha permesso di mettere a punto tecnologie d'esecuzione dei pali sempre più avanzate ed in grado di risolvere i maggiori problemi che si incontrano nella costruzione di opere di ingegneria civile ed in molti altri settori, tra i quali quelli della stabilizzazione dei versanti o del consolidamento di edifici storici.



Battitura di pali in legno di piccole dimensioni (max. 5-6 m di lunghezza) con diametro di circa 10-15 cm.

(A) Mazzuolo;

(B) Battitura con Mazzuolo;

(C) Mazzaranga;

(D) Battitura con mazzaranga;

(E) Capra classica;

(F) Capra per infissione di pali diagonali.

Descrizione e Caratteristiche

In funzione dei materiali impiegati e del metodo di messa in opera si hanno i diversi tipi di pali così come descritti nel seguito.

I pali infissi sono spinti nel terreno, utilizzando speciali attrezzature senza asportazione del terreno.

I pali trivellati, sono realizzati mediante asportazione del terreno e successivo getto di conglomerato cementizio. La formazione del foro può essere realizzata mediante attrezzature a rotazione, a rotopercussione, o mediante attrezzature equipaggiate con benna. La stabilità delle pareti del foro può essere garantita con l'utilizzo di fluidi stabilizzanti a base bentonitica o con rivestimento metallico provvisorio. Completato lo scavo si procede alla messa in opera della gabbia di armatura ed al getto del calcestruzzo.

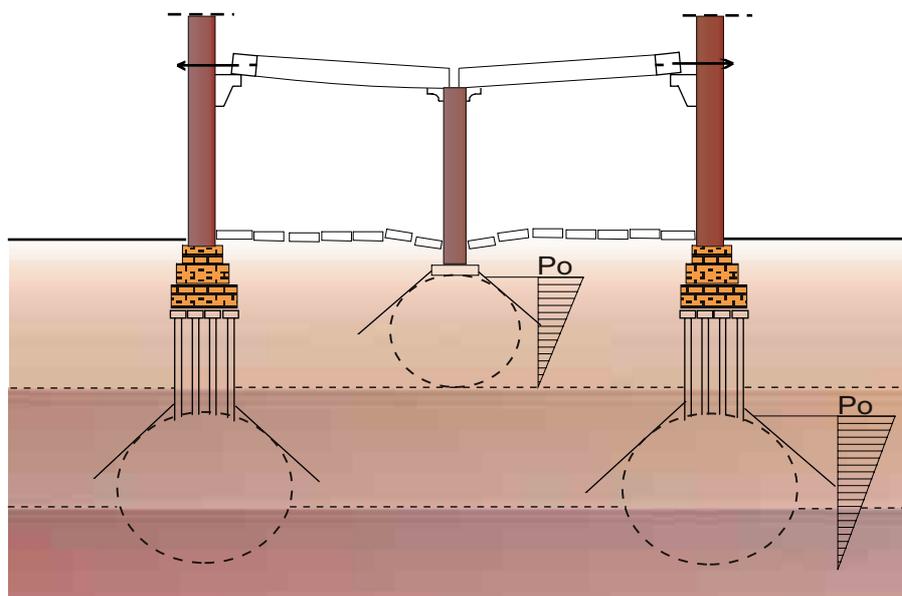
I micropali sono dei pali di piccolo diametro (100-300 mm) realizzati con tecniche "non distruttive" senza scavi di alcun tipo, mediante la perforazione del terreno con speciali attrezzature. All'interno dei fori sono installati dei tubi armatura nei quali si inietta malta cementizia additivata a pressione controllata. In funzione del tipo di armatura e delle modalità d'iniezione i micropali si distinguono in "micropali valvolati" e "micropali radice" (brevettati dall'impresa Fondedile di Napoli nel 1952).

In base al principio di funzionamento i pali si distinguono in:

- pali resistenti per effetto di punta: quando sono innestati per una certa profondità in uno strato resistente (terreni molto addensati, roccia);
- pali resistenti per attrito laterale (pali sospesi): quando non raggiunge uno strato resistente.
- pali resistenti sia per attrito laterale sia di punta: quando il palo attraversa uno strato di terreno sciolto nella parte superiore, trasferendo il carico ad uno più resistente in profondità.

La scelta del tipo di palo più adatto, in rapporto alla situazione locale, dipende dalle caratteristiche del complesso struttura-terreno e dai risultati delle indagini geologiche, geognostiche e delle prove di laboratorio eseguite sui campioni di terreno prelevati in sito.

Impiego di fondazioni su pali nell'antica Venezia. I muri perimetrali, in fregio ai canali, sono fondati su pali di legno infissi negli strati più consistenti. I muri e/o i pilastri interni poggiano invece su fondazioni superficiali. Col tempo le condizioni di carico e le diverse caratteristiche meccaniche dei terreni di fondazione hanno causato dei cedimenti differenziali, difficilmente sopportabili dalle costruzioni.



Aspetti ambientali

I pali sono delle strutture indispensabili per risolvere alcuni problemi di ingegneria legati alle scadenti caratteristiche fisiche e meccaniche dei terreni, tuttavia la loro esecuzione può comportare ripercussioni negative sull'ambiente circostante, determinate per esempio dalle tecniche di esecuzione e dall'immissione di fluidi nel sottosuolo con rischi di possibili inquinamenti della falda, di fenomeni di subsidenza, di vibrazioni e rumori molesti.

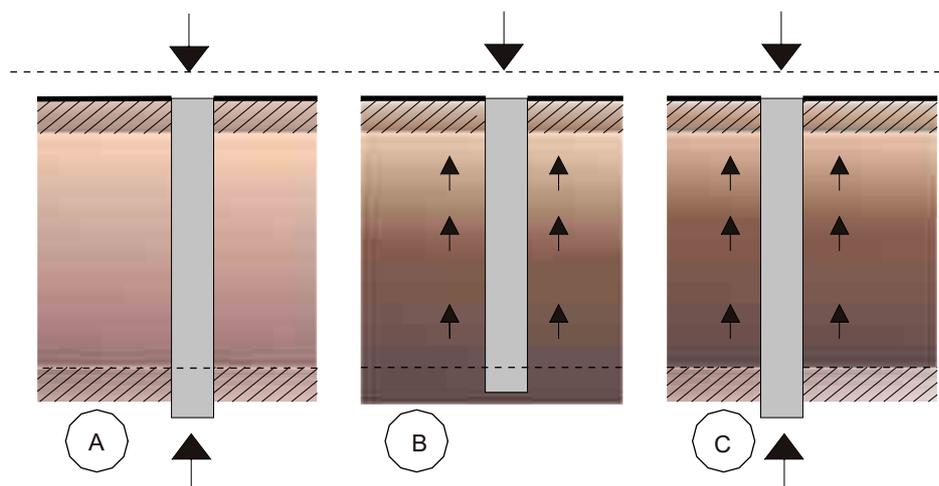
Applicazioni

I pali sono impiegati nelle opere di fondazione, di sostegno, di contenimento e drenaggio profondo per molteplici realizzazioni di infrastrutture civili ed industriali e per interventi quali:

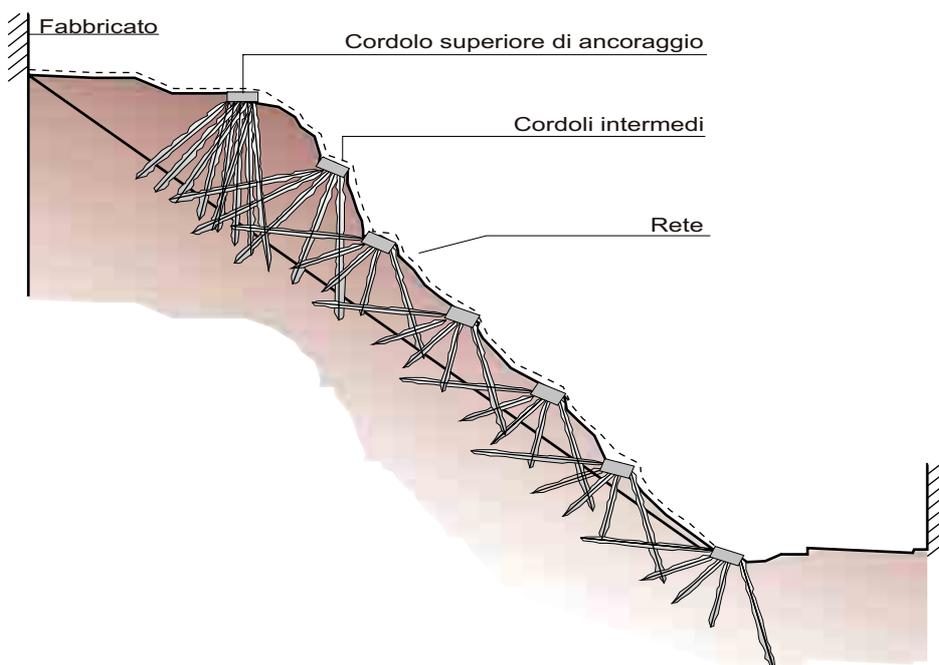
- sistemazione e stabilizzazione di scarpate naturali ed artificiali e di pendii in frana (paratie di pali di grande diametro o di micropali accostati e/o cassoni accostati, reticoli di pali radice).
- protezione delle sponde fluviali dall'erosione ed arginature, realizzazione di briglie per la regimazione dei corsi d'acqua torrentizi;
- realizzazione di muri di sostegno, di sottoscarpa e di controripa nella costruzione di infrastrutture stradali e ferroviarie, marittime o idrauliche;
- drenaggio profondo mediante l'uso di paratie drenanti profonde, costruite a pali secanti;
- miglioramento delle caratteristiche meccaniche dei terreni sciolti (pali di costipamento).

Tipi di pali di fondazione:

- A) pali portanti per resistenza di punta;
- B) pali portanti per attrito;
- C) pali portanti sia per attrito laterale sia per resistenza di punta



Intervento di consolidamento di una scarpata mediante pali radice. L'intervento prevede l'esecuzione di gruppi di fori armati e iniettati con malte cementizie, disposti su varie file e collegati tra loro da cordoli metallici. Il risultato è la costruzione di un traliccio resistente che conferisce al terreno una maggiore stabilità. La parete è in genere rivestita da reti metalliche o anche con calcestruzzo spruzzato.





Lavori d'adeguamento alla terza corsia autostradale dell'A1 nel tratto Orte -Fiano Romano, presso Nazzano Torrita Tiberina. Paratia di pali trivellati accostati, di grande diametro, collegati in testa con una trave cordolo in calcestruzzo, ed ancorata nel terreno con tiranti lunghi circa 70 m ed oltre. Questa tipologia d'opera di sostegno, realizzata per permettere la costruzione di una nuova galleria artificiale, consente da un lato di sostenere e consolidare l'alta parete in terreni sabbioso-limosi ed argillosi e dall'altro di operare in condizioni di sicurezza, rendendo minimi gli sbancamenti e senza alterare troppo la morfologia del luogo.

Particolare della paratia di micropali multiancorata. L'interasse tra i micropali è molto ridotto (meno di 30 cm). L'armatura è costituita da tubi metallici che sono progressivamente infilati nel foro e giuntati mediante manicotti filettati. Raggiunta la profondità stabilita, attraverso il tubo s'inietta la miscela di malta cementizia, avvolgendo completamente il tubo ed intasando il foro fino al riuffimento in superficie. I micropali sono collegati in superficie tramite travi in acciaio ed ancorati con tiranti. La stabilizzazione della parete è completata successivamente dalla realizzazione di un muro di contenimento in cemento armato gettato in opera e/o in elementi prefabbricati con rivestimento in pietra.



Generalità

L'applicazione di tiranti, bulloni e chiodi di ancoraggio nell'ammasso roccioso, sono alcuni dei moderni sistemi maggiormente usati in Italia e negli altri paesi esteri per la stabilizzazione dei fronti di scavo o di scarpate e pendii instabili. Questi sistemi sono definiti "attivi" in quanto migliorano sensibilmente le caratteristiche geomeccaniche dell'ammasso roccioso, aumentando le forze di resistenza al taglio (coesione).

Descrizione e Caratteristiche

In funzione della tipologia e dell'azione esercitata, gli elementi metallici di rinforzo sono chiamati rispettivamente chiodi, bulloni e tiranti di ancoraggio.

I "chiodi" sono ancoraggi costituiti da aste metalliche (o di vetroresina, fibre di carbonio o altro materiale) integralmente connesse al terreno e sollecitate in fase d'esercizio prevalentemente a taglio (nel qual caso l'intervento è chiamato "chiodatura"). La connessione al terreno può essere fatta con cementazione mediante miscele cementizie o chimiche o mediante mezzi meccanici. I "bulloni" sono aste metalliche con diametro > 25 mm e lunghezze fino a 12 m. Le aste ed i bulloni metallici sono inseriti nei fori di sonda, praticati nella roccia, o direttamente infissi nel terreno mediante idonee attrezzature.

L'ancoraggio alla base può essere meccanico, realizzato mediante dispositivi di espansione che entrano in funzione durante la fase di avvitamento del dado (bullone ad espansione), oppure mediante cementazione con boiacca di cemento o resine dell'intercapedine foro-bullone che può interessare un tratto della estremità inferiore o l'intera lunghezza del foro (bulloni cementati).

I chiodi ed i bulloni sono fissati sulla superficie esterna, in genere, mediante piastra di ripartizione e dispositivo di bloccaggio (dado).

I tiranti di ancoraggio sono elementi di rinforzo sollecitati in esercizio da sforzi di trazione e capaci di trasmettere forze resistenti all'ammasso roccioso o terreno in cui sono inseriti.

Un tirante tipico d'ancoraggio è costituito da una "testa" munita di piastra di ripartizione e sistema di bloccaggio, collegati ad una "parte libera", che comprende la porzione tensionabile e la guaina di rivestimento, ed una "fondazione", dotata di armatura.

L'ancoraggio della fondazione nella roccia intatta e stabile può realizzarsi mediante un dispositivo ad ancoraggio meccanico o per cementazione. La testa del tirante è di solito cementata ad una struttura di sostegno quale: muri diaframmi o pali.

I tiranti d'ancoraggio possono essere:

- pretesi (o attivi) quando gli stessi elementi sono sollecitati in esercizio da sforzi di trazione impressi all'atto dell'esecuzione;
- non pretesi (o passivi) quando gli elementi di rinforzo sono sollecitati a trazione, che si mobilita in seguito all'instaurarsi di movimenti e deformazioni dell'ammasso;
- parzialmente pretesi quando viene impressa in loro all'atto dell'installazione una tensione minore di quella d'esercizio.

L'inserimento ed il bloccaggio di un'asta o tondino metallico nell'ammasso roccioso o nel terreno, fornisce un notevole incremento delle forze resistenti e della stabilità dello stesso, rendendolo autoportante.

Aspetti ambientali

L'impatto ambientale dei sistemi di ancoraggio è generalmente contenuto, a causa delle caratteristiche intrinseche di questo tipo di opere che si sviluppano all'interno dei corpi rocciosi o dei terreni. L'impatto della parte esterna può essere facilmente minimizzato attraverso l'adozione degli stessi accorgimenti usati per i muri.

Applicazioni

Gli ancoraggi con chiodi, bulloni e tiranti sono largamente utilizzati nella stabilizzazione e rinforzo di infrastrutture (quali muri di sostegno, diaframmi, palancole, banchine portuali ecc.) o di pendii o scarpate in roccia o in terreni sciolti.

Questa tecnica è spesso associata ad altri interventi di miglioramento delle caratteristiche geomeccaniche negli interventi di stabilizzazione di scarpate naturali o artificiali, costituite da ammassi rocciosi fratturati e stratificati interessati da frane di scivolamento, ribaltamento o da distacco di grossi massi.

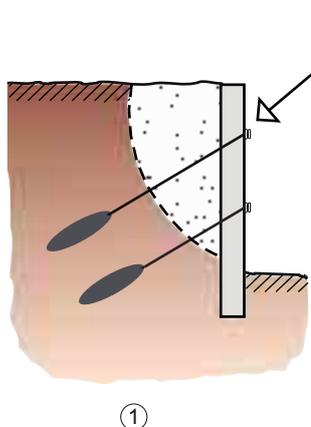
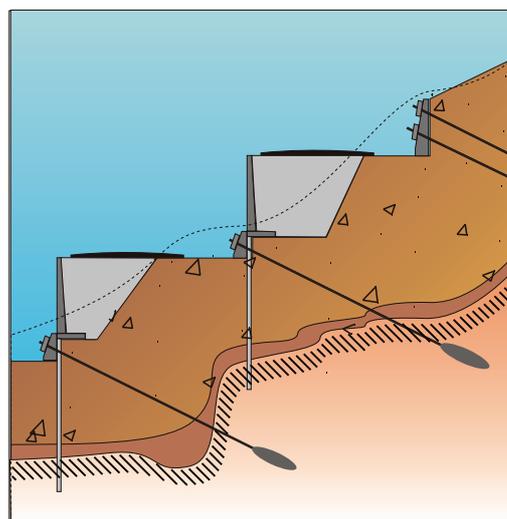
Al contrario l'uso della chiodatura o dei tiranti è meno indicata per gli interventi che riguardano la stabilizzazione di pendii in terreni sciolti a comportamento prevalentemente coesivo. Il suo utilizzo e la sua riuscita nel tempo richiedono trattamenti, soluzioni particolari e studi più accurati.

Sezione tipica delle opere di sostegno della autostrada A40, Francia.

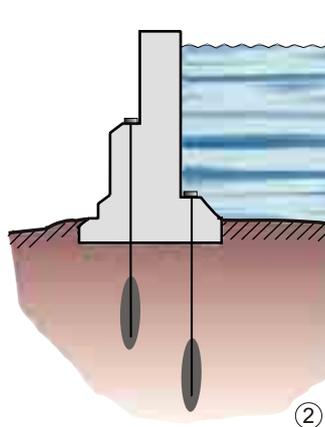
In questo caso il versante era ricoperto da uno strato detritico in equilibrio non ottimale tale da non rendere possibile scavi anche di modeste entità. L'autostrada è stata quindi progettata con carreggiate a livelli sfalsati per adattarsi al profilo trasversale del terreno, per lo stesso motivo le carreggiate seguono le curve di livello del versante, anche se questo comporterà una riduzione del limite di velocità del traffico veicolare.

L'opera è stabilizzata da una serie di tiranti ancorati nello strato roccioso.

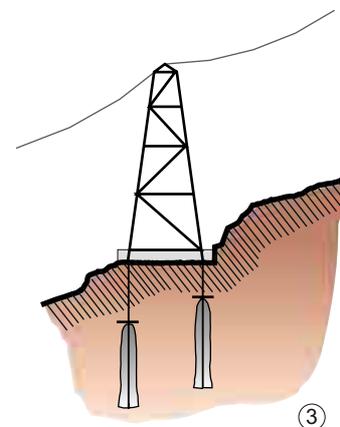
Nel suo complesso questa opera di elevato valore tecnologico risulta ben inserita nell'ambiente circostante grazie ai sia all'adattamento altimetrico con i terrazzamenti che planimetrico con la sinuosità del tracciato.



①



②



③

Esempi di rinforzo di strutture con ancoraggi. (1). Strutture di sostegno. (2) Ancoraggi di dighe. (3). Ancoraggi di tralicci.

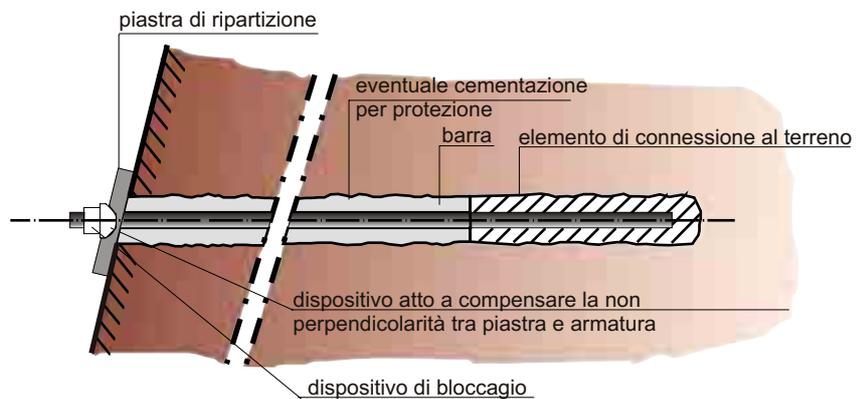
Impiego dei tiranti d'ancoraggio per il consolidamento e sostegno di un vecchio muro in pietra disassata. I tiranti sono raccordati ad una trave metallica.



Consolidamento dei muri di sostegno all'imbocco di una galleria. L'intervento è stato realizzato con tiranti d'ancoraggio pretesi. In primo piano è mostrata la fase di installazione degli ancoraggi mediante speciali attrezzature meccaniche.



Esempio tipico di ancoraggio con cementazione del bulbo e possibilità di tesare il tirante agendo sul bullone autocentrante su piastra di ripartizione.



Generalità

Il rivestimento con calcestruzzo proiettato “spritz beton” è un metodo assai impiegato in associazione con altre strutture di rinforzo (quali tiranti, bulloni, chiodi o reti), negli interventi di stabilizzazione e consolidamento di pareti rocciose instabili connesse alla costruzione d'opere civili (strade, ferrovie, gallerie, scavi per edifici, ecc.).

Descrizione e Caratteristiche

Il calcestruzzo proiettato è costituito da una miscela tipica di cemento, inerti (con diametro massimo < di 25 mm) e acqua, con l'aggiunta di additivo accelerante (intorno al 5%) se è richiesta una resistenza iniziale elevata per la presa. La “gunita” ha la stessa composizione della miscela del calcestruzzo proiettato dal quale si differenzia solo per il diametro massimo degli inerti (< 5 mm). Il calcestruzzo è rinforzato da rete saldata fissata alla parete da rivestire.

Le ricerche e le innovazioni tecnologiche sviluppate di recente nel campo hanno permesso di ottenere un sistema di rivestimento e sostegno più resistente e flessibile. Infatti con l'aggiunta di micro-silice e di fibre d'acciaio (mediamente lunghe 20-38 mm e con diametro equivalente di 0,5 mm) alla miscela cemento inerti si ottengono due importanti risultati: la micro-silice riduce il rimbalzo del materiale spruzzato, consentendo di ottenere una migliore qualità del rivestimento della roccia penetrando nei vuoti e sigillandoli, mentre le fibre rinforzate incrementano la resistenza e le caratteristiche di deformabilità del rivestimento evitando l'utilizzo della rete saldata.

Il calcestruzzo proiettato (detto gunita), spruzzato ad alta pressione sulla parete mediante speciali attrezzature, garantisce una presa rapida sulla parete e presenta una flessibilità che gli consente di adattarsi alle deformazioni dell'ammasso roccioso senza fratturarsi.

Applicazione provvisoria di “spritz beton” su una parete terrosa in frana in attesa che venga ricostruito il muro di sostegno già crollato. Il calcestruzzo proiettato è rinforzato con rete elettrosaldata e chiodi.



Aspetti ambientali

Il rivestimento di pareti e di scarpate rocciose con “spritz beton” rappresenta un sistema efficace che comporta tuttavia un forte impatto visivo nel contesto dell'ambiente, naturale o urbano, circostante. I rivestimenti con vegetazione di tipo rampicante o di altro tipo contribuiscono a mimetizzare l'intervento favorendo un migliore inserimento ambientale dell'opera.

Applicazioni

Questo sistema è molto usato, in associazione ad altri interventi di miglioramento delle caratteristiche geomeccaniche, negli interventi di stabilizzazione di scarpate naturali o artificiali, costituite da ammassi rocciosi fratturati e stratificati.

Rivestimento con “spritz beton” rinforzato con rete elettrosaldata delle pareti della rampa di imbocco della galleria per la metropolitana di Milano.



Attrezzatura per la messa in opera dello “spritz beton”



Difesa Massi

Generalità

Il distacco e la caduta di masse rocciose da pareti e versanti costituisce uno dei maggiori rischi geologici al quale sono esposti persone ed infrastrutture di vario tipo, presenti in ambienti rupestri e montani.

La progettazione delle opere di difesa presuppone una serie d'indagini preventive ed accurate per l'accertamento dei principali aspetti geologici, geomeccanici, geomorfologici ed idrogeologici, oltre che ambientali (clima, vegetazione).

Le opere di difesa dalla caduta massi sono comunemente distinte in due principali categorie: "opere di difesa attiva" ed "opere di difesa passiva".

Si definiscono "attive" le opere che hanno la funzione di prevenire, impedire o ridurre il distacco, la caduta e il rotolamento delle masse rocciose.

Sono chiamate "passive" le opere che agiscono rallentando, deviando, ostacolando la caduta, il rotolamento e il movimento di masse detritiche.

In alcuni casi particolari, per evitare lo spostamento dell'opera da proteggere in luoghi più sicuri, si possono anche realizzare gallerie artificiali paramassi.

Le opere di difesa attiva comprendono:

- interventi che migliorano la resistenza meccanica dell'ammasso roccioso per mezzo dell'applicazione di forze resistenti quali ad esempio: tiranti, chiodi, bulloni, legature, iniezioni di consolidamento, travi o muri, rivestimenti con rete metallica e calcestruzzo proiettato;
- interventi che riducono i processi di degradazione fisica e di erosione superficiale sull'ammasso roccioso, costituiti da opere di rivestimento e protezione dall'erosione quali: reti metalliche addossate, reticolo di funi metalliche, rivestimenti con reti metalliche e tasche vegetative e/o con geosintetici;
- interventi che modificano la circolazione idrica superficiale e sotterranea quali: opere di regimazione ed intercettazione delle acque meteoriche e correnti superficiali, sigillature ed intasature delle fratture beanti con iniezioni di malta cementizia o di resine, drenaggi dell'ammasso roccioso con dreni suborizzontali o con opere di drenaggio di grande diametro, quali le gallerie drenanti.

Le opere di difesa passiva comprendono:

- reti paramassi;
- interventi di risagomatura dei versanti con formazioni di berme di rallentamento, valli (trincee) e rilevati paramassi;
- realizzazione di barriere ed ostacoli artificiali resistenti, più o meno rigidi e/o deformabili, quali: muri in calcestruzzo, muri in terre rinforzate, muri cellulari, muri in gabbioni, scogliere in grossi massi, gallerie artificiali paramassi.

Nelle pagine che seguono sono elencate le principali tipologie di opere di difesa massi, sia attive che passive, più frequentemente impiegate negli interventi di sistemazione e stabilizzazione delle pareti e dei versanti rocciosi instabili classificate in:

- barriere;
- reti;
- valli e rilevati;
- gallerie artificiali.

Generalità

Barriere paramassi a reti ad elevato assorbimento di energia disposti su più filari a protezione delle abitazioni dalla caduta di grossi massi e di detrito dalle pareti rocciose sovrastanti. L'esempio si riferisce al centro abitato di Pale (PG) nell'Appennino Umbro Marchigiano presso Colfiorito. Il distacco di grossi blocchi e massi dalle pareti rocciose, verificatosi durante i recenti eventi sismici ed il considerevole stato di pericolo per le persone ed abitazioni, ha reso necessario l'installazione di queste opere di difesa passiva.

Le barriere paramassi sono delle strutture di difesa passiva, realizzate in genere lungo la base di versanti in roccia instabili e/o in canali, dimensionate ed ubicate in modo tale da arrestare blocchi e massi anche di grosse dimensioni e materiale detritico mobilizzato. In funzione del loro comportamento fisico, dei materiali e delle modalità costruttive si possono distinguere due tipi principali di strutture: barriere paramassi rigide e barriere paramassi elastiche.



Descrizione e Caratteristiche

Barriere paramassi rigide: sono strutture poco deformabili, pesanti e di grandi dimensioni, capaci di opporsi con notevoli forze resistenti agli impatti. Il loro dimensionamento tiene conto in fase di progettazione della sollecitazione dinamica indotta dall'impatto di un "masso di progetto". Generalmente sono realizzate in calcestruzzo armato, con o senza contrafforti, opportunamente ancorati al terreno stabile con micropali o tiranti di ancoraggio. Al disopra dei muri, nei punti più critici, spesso è installata una barriera elastica formata da pannelli di elementi metallici o da reti metalliche.

In particolari situazioni ambientali, soprattutto quando sono richieste strutture resistenti e deformabili su pendii ripidi, si adottano muri in gabbioni metallici. I gabbioni forniscono un ostacolo deformabile con assorbimento dell'impatto in parte elastico in parte rigido, inoltre hanno il grande vantaggio di poter sfruttare l'abbondanza dei detriti di versante per il loro riempimento e sono facilmente riparabili in caso di danneggiamenti.

Barriere paramassi elastiche: sono strutture deformabili, leggere con elementi altamente resistenti, formati da materiali di alta qualità e durata. La leggerezza della struttura, la semplicità, la rapidità di installazione e di manutenzione, consentono di eseguire l'intervento anche in zone montuose di difficile accessibilità.

La struttura è progettata e dimensionata in modo tale da poter intercettare, rallentare o arrestare la caduta di massi isolati o di detrito. Spesso queste barriere sono associate ad altri sistemi di difesa passiva, quali ad esempio muri in c.a., valli e rilevati paramassi.

In funzione delle tipologie costruttive e dei materiali impiegati, le barriere elastiche possono presentare varie configurazioni quali:

- barriere formate da reti flessibili installate su strutture di sostegno rigide tipo muri in c.a. o di altro tipo.
- barriere formate da pannelli di reti flessibili d'acciaio, con sostegni (ritti) ed elementi di rinforzo (tiranti d'ancoraggio) infissi direttamente nel terreno o sulla sommità di terrapieni o di strutture di sostegno di vario tipo (ad esempio muri in gabbioni), ed installati secondo lo schema tradizionale "a sacco".

Le barriere paramassi elastiche sono essenzialmente formate da singoli pannelli in rete estensibile ad alto assorbimento d'energia in funi d'acciaio galvanizzato ad alta resistenza, disposte in maniera da formare maglie di varia forma. I pannelli, collegati tra loro da funi di cucitura d'acciaio, sono posti in opera perpendicolarmente al pendio, sostenuti da piedritti (ritti) metallici, con interasse di qualche metro, tiranti di monte e controventi di valle in cavi di acciaio ad alta resistenza. Gli elementi di sostegno e di rinforzo (piedritti, cerniere dei piedritti, tiranti) sono ancorati e fissati nella roccia o nel materiale detritico mediante barre d'acciaio ad aderenza migliorata cementate o in micropali di lunghezza adeguata.

La progettazione in assenza di una normativa specifica nel settore, è effettuata sia sulla base delle indagini geologico-strutturali dell'area e dell'analisi cinematica del processo di caduta e rotolamento dei massi (simulazione di caduta, rimbalzo, rotolamento e arresto di massi o di detrito mobilitato, eseguito al computer su modelli teorici o su dati reali rilevati da prove in sito), sia sull'analisi dell'energia cinetica posseduta dal masso di progetto in caduta o rotolamento, trasformata, con l'impatto sulla rete estensibile, in lavoro di deformazione degli elementi della struttura.

Barriera paramassi elastica ad alto assorbimento di energia, di tipo tradizionale. L'altezza della barriera si aggira in genere intorno ai 3-4 m. I pannelli di rete d'acciaio, a maglia circolare, sono collegati tra loro da funi d'acciaio e sostenuti da ritti metallici, ancorati nel terreno mediante tiranti di fondazione e tiranti di monte e di valle fissati nel terreno con dissipatori di energia.



Aspetti ambientali

Le barriere paramassi elastiche hanno un impatto ambientale molto contenuto, dovuto alle tecniche di installazione, che non richiedono grandi scavi, sbancamenti o impiego di mezzi pesanti ed ingombranti. La verniciatura della struttura con colori simili a quella della vegetazione, del terreno o della roccia affiorante in sito, permette di ottenere un migliore inserimento ambientale nelle zone dove è di primaria importanza la salvaguardia del paesaggio naturale.

Le **barriere paramassi rigide**, rispetto alle precedenti, hanno un impatto ambientale maggiore dovuto alle caratteristiche della tipologia costruttiva ed ai materiali impiegati. Il rivestimento delle strutture con vegetazione o con altri accorgimenti particolari, mitiga in parte il forte impatto estetico paesaggistico sull'ambiente naturale circostante.

Nel corso delle fasi di progettazione e realizzazione devono essere previste misure per il corretto inserimento ambientale e per minimizzare l'impatto sul territorio. Ad esempio le barriere paramassi, con notevole sviluppo, possono essere segmentate e sfalsate, per consentire il passaggio della fauna selvatica, così come la loro localizzazione può tenere conto della presenza di specie vegetali rilevanti. Particolare attenzione può essere posta nella progettazione e realizzazione delle piste di accesso per la messa in opera delle barriere utilizzando adeguate misure di cautela riguardo la stabilità dei pendii e la salvaguardia del patrimonio faunistico e floreale.

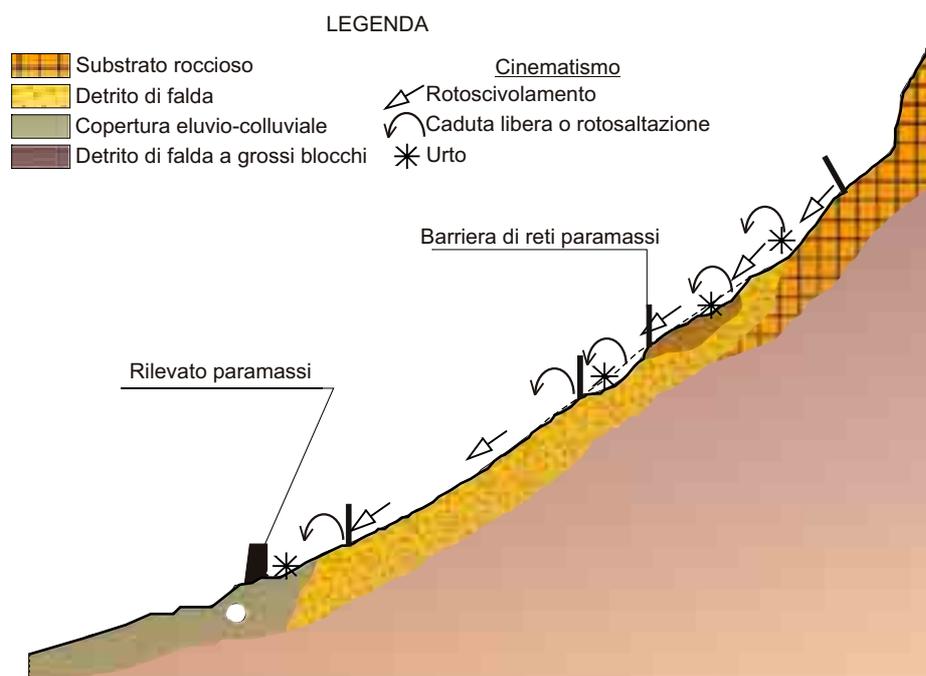
Barriera paramassi elastica.
Particolare dei pannelli di rete in funi metalliche a maglie tonde, dei supporti tubolari e delle funi in acciaio che trasmettono gli sforzi ai dispositivi di frenaggio e di dissipazione d'energia.



Applicazioni

Le barriere elastiche sono impiegate nelle zone interessate da caduta di massi o movimenti di detrito, di non grosse proporzioni, per frenare ed intercettare il più possibile il materiale mobilitato, in modo che le eventuali altre strutture difensive, poste più a valle, possano resistere meglio all'impatto dei massi che riescono a superare la barriera.

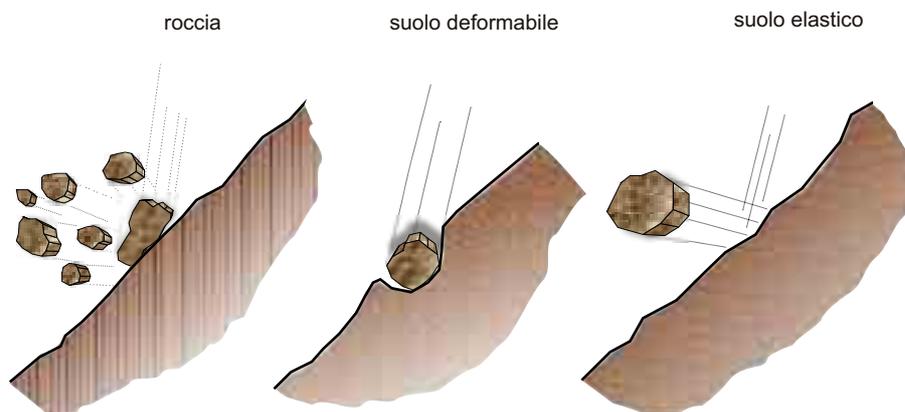
Le barriere paramassi rigide, unitamente ad altri sistemi difensivi (barriere elastiche, valli e rilevati paramassi), si usano nelle zone dove il rischio di movimenti di masse rocciose e/o di flussi detritici di grosse proporzioni richiede una maggiore resistenza.



La simulazione del processo di caduta massi e del comportamento delle barriere difensive, eseguita con modelli teorici, rappresenta uno dei sistemi più usati per il dimensionamento preliminare, la scelta e l'ubicazione corretta delle strutture difensive.

L'indagine geologico-strutturale costituisce uno dei passi più importanti per perimetrare le aree più esposte al rischio di caduta massi e/o di flussi detritici ed i principali tipi di cinematismi del materiale mobilitato. Questi dati sono necessari per una corretta definizione dell'ubicazione e delle caratteristiche delle strutture da adottare.

Influenza delle caratteristiche litologiche del pendio sulle traiettorie e sul movimento dei massi caduti.





Barriera paramassi rigida, costituita da un muro in calcestruzzo armato, realizzata a protezione della sede stradale dalla caduta di grossi massi e detrito che si distaccano dalla parete in roccia calcarea fratturata. Al disopra del muro è stata installata una rete metallica per intercettare i frammenti o massi più piccoli che riescono a superare la struttura. La parete di roccia fratturata è stata rivestita con reti metalliche, mentre nel punto dove il rischio di frane o distacco di grossi blocchi di roccia è maggiore, è stata realizzata una galleria artificiale paramassi. L'impatto paesaggistico di questo intervento è marcato anche per la mancanza di interventi di minimizzazione.



Opere di difesa passiva dalla caduta massi a protezione della sede stradale. Le pareti subverticali formate da roccia calcarea molto fratturata, sono state rivestite con reti metalliche, previa operazione di pulizia e disaggio di massi pericolanti. Alla base del versante è stata realizzata una barriera paramassi rigida, costituita da un muro in c.a., sormontato nei tratti più critici da una barriera paramassi deformabile, formata da pannelli metallici prefabbricati. Anche in questo caso l'impatto paesaggistico è marcato anche per la mancanza di interventi di minimizzazione.

Barriere paramassi elastiche realizzate con pannelli in acciaio a maglie esagonali: in ambiente tipico dell'Appennino centrale a protezione della sede stradale (sopra) e in ambiente tipico di una vallata alpina (sotto). In quest'ultimo caso la rete è stata posizionata sulla sommità della parete di un vallo paramassi che ha il compito di intercettare e contenere il flusso di materiale detritico che proviene dal versante in frana visibile sullo sfondo. Questo tipo di struttura è meno resistente agli urti rispetto a quella tirantata ad alto assorbimento di energia. La funzione principale è quella di intercettare o deviare in apposite strutture di accumulo, frammenti o massi isolati di roccia di piccole dimensioni. La barriera ha un'altezza di circa 3 m, ed è formata da ritti metallici, con interasse di 4-5 m impiantati in plinti di cemento armato. Tra i ritti è messo in opera un pannello di funi d'acciaio. L'impatto paesaggistico è minimizzato dalla verniciatura a verde delle strutture.



Generalità

Le reti paramassi sono strutture di tipo elastico utilizzate per il rivestimento di pareti rocciose interessate da fenomeni di crollo, caduta di massi e detrito con dimensioni massime degli elementi di circa 60-100 cm.

Descrizione e Caratteristiche

Le reti paramassi sono formate da fili di acciaio rivestito con zinco o con lega di zinco-alluminio tessuti in modo da formare una struttura a doppia torsione con maglie esagonali. Le reti possono inoltre essere armate o rinforzate mediante funi d'armatura verticali e/o oblique in acciaio.

Le dimensioni delle maglie sono codificate dalla normativa europea. I diametri di filo usati per queste applicazioni sono 2.7 e 3.0 mm.

La struttura è posizionata a diretto contatto della parete rocciosa da stabilizzare e fissata ad essa mediante un sistema di ancoraggi meccanici realizzati in vari modi a secondo delle situazioni, con barre cementate, bulloni, tasselli ad espansione.

Prima della posa in opera della rete si provvede ad operazioni di sistemazione, pulizia ed eventuale rimodellamento del versante roccioso.

La crescita della vegetazione, che può essere spontanea o sviluppata artificialmente mediante idrosemina o altre tecniche di rinverdimento, contribuisce ulteriormente al consolidamento della pendice.

Da curare con attenzione sono gli ancoraggi in testa ed al piede, in particolare questi ultimi dovranno consentire lo svuotamento per la manutenzione della rete.

Aspetti ambientali

I rivestimenti delle scarpate rocciose con reti metalliche comportano un impatto sul paesaggio apprezzabile, specie immediatamente dopo la loro installazione. Questi effetti sono, comunque, ampiamente compensati dal miglioramento delle condizioni ambientali locali che l'impiego di queste strutture consente di ottenere. Infatti la struttura delle rete, la capacità di non alterare i normali processi di filtrazione delle acque, rallentando al tempo stesso la velocità delle acque di ruscellamento, e l'azione di contenimento e di stabilizzazione della pendice, creano condizioni favorevoli alla rapida crescita ed allo sviluppo della vegetazione consentendo di ottenere un ripristino naturale dell'area d'intervento.

Reti metalliche per la protezione della sede stradale. Questa struttura è largamente usata negli attraversamenti stradali e ferroviari di zone caratterizzate dalla presenza di ripide pareti rocciose fratturate o, talora, intensamente tettonizzate. Il contenimento della roccia fratturata e del materiale detritico trattenuto dalle reti favorisce, lo sviluppo spontaneo della vegetazione. Questa contribuisce a stabilizzare ulteriormente la pendice rocciosa ed, al tempo stesso, consente di minimizzare l'impatto sul paesaggio ed il graduale ripristino ambientale del versante. In alcuni casi per favorire il rinverdimento delle scarpate si ricorre a tecniche di bioingegneria.



Applicazioni

I rivestimenti delle pareti rocciose con reti metalliche e/o funi di rinforzo sono usati in tutti quei casi in cui per varie ragioni non sia possibile o conveniente impiegare barriere paramassi.

Possono svolgere due tipi di azioni:

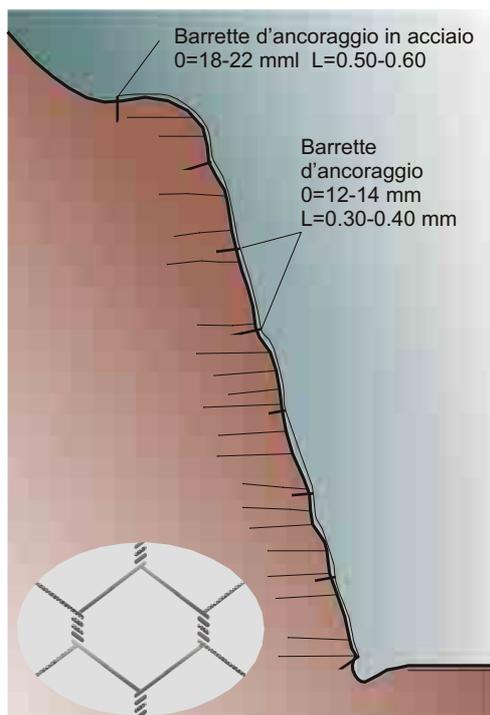
- 1) Impedire il distacco dei blocchi di roccia.
- 2) Guidare la caduta dei blocchi, impedendo rimbalzi pericolosi.

Rivestimento di una parete rocciosa fratturata, con reti metalliche a doppia torsione a maglie esagonali, armate e rinforzate con reticolo in funi d'acciaio. L'intervento è stato realizzato per la protezione della sede stradale in un tratto a mezzacosta interessato da fenomeni di caduta massi.



Particolare della rete metallica a maglia esagonale e delle funi d'acciaio di rinforzo.





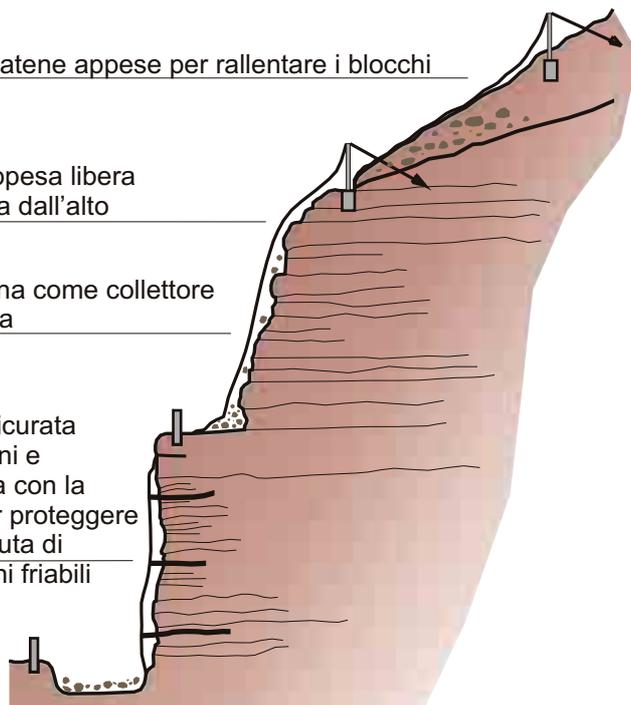
Reti e catene appese per rallentare i blocchi

Reti appesa libera sospesa dall'alto

Banchina come collettore di roccia

Reti assicurata con bulloni e spruzzata con la malta per proteggere dalla caduta di formazioni friabili

(A)



Schema costruttivo tipo di rivestimento di una parete rocciosa con rete metallica: (A) sezioni tipo di stabilizzazione di una parete rocciosa con rete metallica, (B) fasi della stesa e del fissaggio della rete, eseguita da personale altamente specializzato. Dopo la stesa la rete viene ancorata nella roccia mediante ancoraggi meccanici posizionati sulla sommità della scarpata (ancoraggi di sostegno), al piede della scarpata (ancoraggio di contenimento) ed in posizione intermedia sulla parete, con interassi variabili in funzione dello stato di fratturazione della roccia (ancoraggi di contenimento intermedi).

Questo tipo di struttura difensiva è largamente usata negli attraversamenti stradali e ferroviari di zone montuose, caratterizzate spesso dalla presenza di ripide pareti rocciose fratturate o, talora, intensamente tettonizzate.

Il contenimento della roccia fratturata ed il materiale detritico trattenuto dalle reti favorisce lo sviluppo spontaneo della vegetazione che contribuisce a stabilizzare ulteriormente la pendice rocciosa e a minimizzare l'impatto paesaggistico favorendo il graduale ripristino ambientale del versante. Per favorire il rinverdimento delle scarpate si può ricorrere a tecniche di bioingegneria.

(B)



Generalità

Ivalli e i rilevati paramassi sono interventi di difesa passiva realizzati in genere alla base di versanti rocciosi instabili soggetti a fenomeni di crollo e/o ribaltamento, distacco di massi, blocchi e colate di detrito di grosse proporzioni. A seconda delle caratteristiche morfologiche del versante, della necessità e dei vincoli, geometrici o di altro tipo, esistenti in sito, l'intervento può essere costituito dal solo "vallo" o da un sistema difensivo composto da un vallo e un rilevato paramassi".

Descrizione e Caratteristiche

Il rilevato è costituito da un terrapieno a sezione trapezia realizzato con materiale grossolano, incoerente, proveniente dallo scavo del vallo o reperibile in zona. Il sistema può essere, come detto, completato da uno scavo sagomato (vallo), posto immediatamente a monte dello stesso. Il vallo, il cui fondo è ricoperto da uno strato di materiale sciolto assorbente, assolve la duplice funzione di smorzare l'energia cinetica dei massi e dei blocchi prima che questi raggiungano le pareti del rilevato, e di raccogliere il materiale detritico intercettato.

La tipologia di queste strutture difensive varia a secondo della geometria, del materiale e delle tecniche costruttive con le quali sono realizzate. In via esemplificativa si possono avere terrapieni in materiale grossolano incoerente sostenuto sul lato di valle da muri o in alternativa rilevati realizzati con terre rinforzate che consentono di poter avere un paramento interno, sul lato monte, con un'inclinazione quasi verticale, che garantisce una azione più efficace nel bloccaggio dei massi.

Questo tipo di strutture difensive possono avere uno sviluppo lineare notevole (anche di centinaia di metri) costituendo un ostacolo al libero deflusso delle acque correnti superficiali. Pertanto, è necessario provvedere alla realizzazione di un adeguato sistema di drenaggio e allontanamento delle acque superficiali provenienti dal settore a monte del versante.

Vallo paramassi per la protezione di una sede stradale. La parete del vallo, sul lato valle, è sostenuta da un muro cellulare. Il materiale impiegato per la costruzione della struttura è quello proveniente dallo scavo del vallo retrostante.



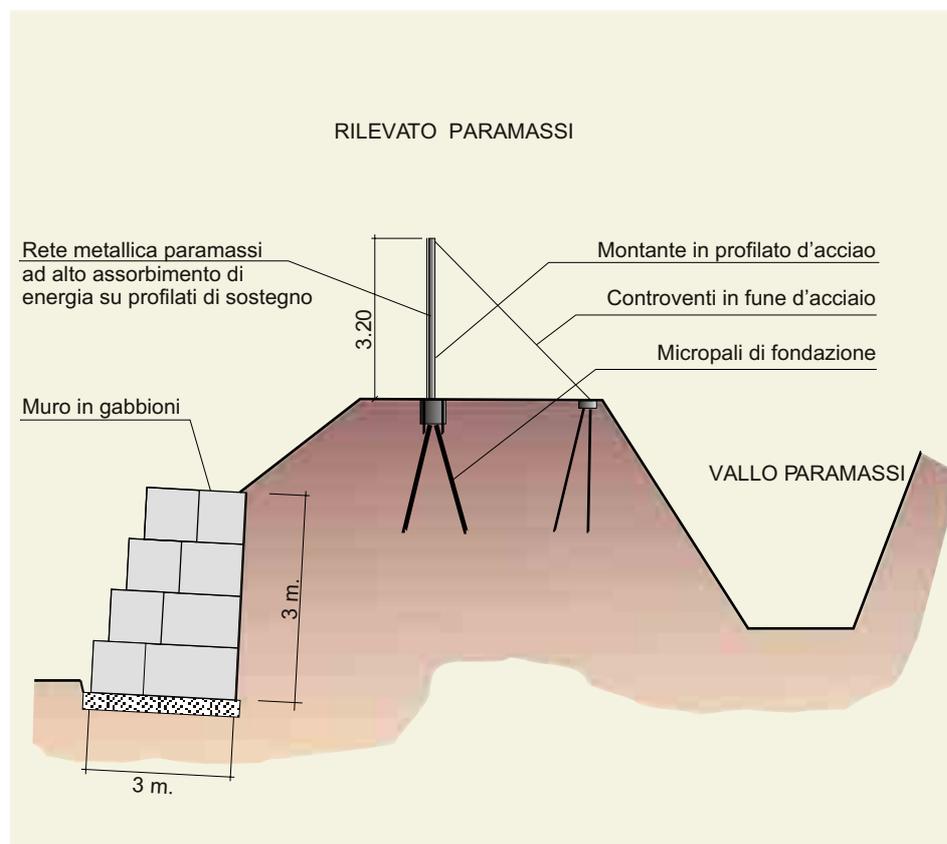
Il “vallo paramassi” è realizzato mediante lo scavo di un cunettone opportunamente sagomato in funzione della morfologia e della pendenza della scarpata a monte dell'intervento. Sul fondo dello scavo è steso uno strato di materiale granulare sciolto (sabbia e/o ghiaia) o di materiale detritico proveniente dallo scavo, dello spessore di circa 40-100 cm. Lo strato di materiale granulare sciolto ha la funzione di assorbire e smorzare il più possibile l'energia cinetica dei massi o blocchi distaccatisi dalla parete rocciosa a monte e/o rotolati lungo il versante.

La geometria dello scavo deve essere progettata in maniera tale da garantire sia l'intercettazione sia il contenimento e l'accumulo del materiale. In alcuni casi, le pareti del vallo sul lato valle sono sostenute da muri di sostegno con paramento inclinato (muri cellulari, muri in terra rinforzata), mentre la parete sul lato monte, più direttamente soggetta agli urti, spesso è protetta da strutture resistenti e deformabili quali ad esempio muri in gabbioni metallici con paramento verticale e a gradoni interni, di grande efficacia per l'arresto dei massi.

Sulla sommità del rilevato è spesso installata una barriera elastica paramassi (rete metallica) la cui funzione è quella di intercettare frammenti rocciosi o piccoli massi che potrebbero superare la struttura difensiva sia a causa di processi di frantumazione lungo il versante, sia per fenomeni di impatto “masso su masso” (frantumazione e proiezione di frammenti nella zona a tergo della struttura). Nel caso in cui le condizioni logistiche locali non permettano di effettuare uno scavo di larghezza adeguata si può installare una barriera paramassi di tipo elastico o si protegge il settore a valle dello scavo con gabbioni metallici sormontati da rete metallica (“scavi sagomati protetti”).

Come per le altre strutture di difesa passiva dalla caduta massi, anche in questo caso il dimensionamento, la geometria, il tipo e l'ubicazione sono progettate sulla base dei risultati di accurate indagini geologico-strutturali preliminari e di simulazioni al computer su modelli, volte a definire i volumi, le traiettorie, le condizioni d'impatto (velocità e inclinazione) e le modalità di movimento dei blocchi rocciosi (caduta libera, rimbalzo, rotolamento, colamento ecc.).

Sezione tipo di “vallo e rilevato paramassi”. La geometria e le dimensioni dell'opera (pendenza delle pareti, profondità e larghezza del fondo scavo) sono variabili in funzione delle diverse situazioni morfologiche, geologico-strutturali e dei vincoli di vario tipo esistenti in loco. Il fondo dello scavo è rivestito da un letto di materiale granulare sciolto assorbente di spessore inferiore al metro. La parete dello scavo sagomato sul lato valle può essere sostenuta da muri di sostegno di vario tipo. Nei casi più critici sulla sommità del vallo è installata una barriera elastica paramassi, costituita in genere da rete metallica opportunamente ancorata a profilati di sostegno.



Aspetti ambientali

Questi sistemi di protezione dalla caduta di massi e/o da flussi di materiale detritico o fangoso hanno un buon inserimento nel contesto naturale e paesaggistico dell'ambiente montano o rupestre dove, in genere, sono più frequentemente realizzati. Le specifiche tipologie costruttive ed il tipo di materiali impiegati permettono di ottenere un rapido inerbimento delle strutture

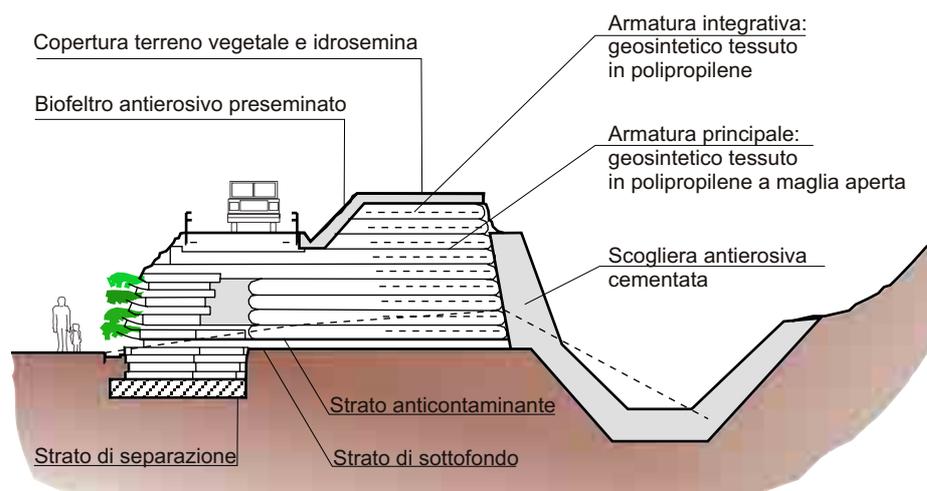
Applicazioni

Ivalli ed i rilevati sono delle opere di difesa passiva dalla caduta massi o di flussi di detrito mobilitato ampiamente utilizzati nelle zone montane per la protezione di infrastrutture viarie e ferroviarie e/o di nuclei abitativi o industriali.



Intervento di difesa dalla caduta massi eseguito al piede di una ripida scarpata rocciosa. L'opera è costituita da uno scavo sagomato (vallo) e da un rilevato paramassi, sormontato da una barriera elastica in rete metallica, realizzato con la tecnica delle terra rinforzata. Questa tecnica consente di ottenere una struttura resistente, con pareti interne quasi verticali, molto efficaci nel bloccare i massi caduti o rotolati dalla scarpata. Il rinverdimento naturale o artificiale (ad esempio mediante idrosemina) della struttura consente di minimizzare l'impatto negativo sull'ambiente.





Intervento di protezione costituito da un rilevato in terra rinforzata con geosintetici e canalizzazione antierosiva dell'asta torrentizia, eseguito al piede di un importante fenomeno gravitativo complesso noto come frana del Cassas", che interessa l'autostrada A32 Torino-Bardonecchia.

L'opera svolge la duplice funzione di difesa passiva contro i massi ed i detriti e di regimazione e contenimento del l'eventuale trasporto solido di massa lungo l'asta torrentizia che corre a monte del rilevato.

Lavori per la realizzazione di un sistema di difesa passiva dalla caduta massi per la protezione della sottostante linea ferroviaria, eseguito lungo il versante al piede di una ripida scarpata rocciosa. L'opera è costituita da uno scavo sagomato (vallo) e da un rilevato paramassi, sormontato da una barriera elastica in rete metallica ad alto assorbimento d'energia. Il vallo, largo 10 m e lungo 220 m, ha la funzione di smorzare ed attutire gli urti dei grossi massi distaccatisi dalle pareti rocciose. A tale scopo il fondo dello scavo è ricoperto da un materasso di terreno granulare soffice.



Generalità

Le gallerie artificiali sono opere utilizzate nelle zone dove non sono realizzabili altre forme di protezione più economiche, soprattutto dove è necessario proteggere infrastrutture viarie o ferroviarie di particolare importanza.

Descrizione e Caratteristiche

Le gallerie artificiali sono generalmente realizzate in calcestruzzo armato gettato in opera o in elementi prefabbricati in calcestruzzo ad alta resistenza. Il lato valle della struttura è aperto ed è formato dai pilastri di sostegno della volta, mentre sul lato monte a contatto con la parete viene realizzato un muro di controripa. L'imbocco è quasi sempre protetto da una barriera paramassi rigida costituita da un muro in calcestruzzo armato, sormontato da reti metalliche. Molto spesso sulla copertura della galleria è posto uno strato di materiale detritico che, oltre a favorire lo sviluppo della vegetazione spontanea, ha la funzione di assorbire gli impatti di grossi blocchi e massi, caduti o rotolati giù dalle scarpate, che potrebbero causare gravi danni alla struttura della volta. Nelle zone dove questo rischio è più elevato, la galleria è completata dalla realizzazione, sul versante a monte, di barriere elastiche paramassi.

Le gallerie artificiali risolvono quasi del tutto il problema della protezione dalla caduta massi delle sedi e degli imbocchi delle gallerie stradali o ferroviarie, a questa caratteristica di estrema garanzia si aggiunge anche il vantaggio di non richiedere frequenti interventi di manutenzione.

Galleria artificiale a protezione della sede stradale. La struttura è stata realizzata secondo lo schema classico di costruzione, che prevede la costruzione di un muro di controripa in cemento armato sul lato monte, volta formata da travi in cemento armato prefabbricato accostate, pilastri di sostegno in cemento armato sul lato aperto di valle. Nella foto è possibile osservare lo strato di materiale detritico posto sulla volta e sul lato monte sia per assorbire ed attutire l'impatto dei blocchi di grosse dimensioni che possono distaccarsi dalla ripida parete calcarea, sia per mitigare il marcato impatto paesaggistico con lo sviluppo di vegetazione spontanea.



Aspetti ambientali

Questi sistemi difensivi sono molto efficaci dal punto di vista tecnico-funzionale, ma hanno un forte impatto paesaggistico sull'ambiente naturale circostante per le loro caratteristiche strutturali e costruttive. Per mitigare questi effetti negativi, nelle realizzazioni più recenti, si cerca di migliorare l'aspetto architettonico ed il loro inserimento nel contesto paesaggistico con strutture più armoniche, favorendo contemporaneamente lo sviluppo della copertura vegetale, in modo tale da mascherare il più possibile la vista e ricostituire una continuità con l'ambiente naturale circostante.

Applicazioni

Le gallerie artificiali sono impiegate soprattutto come opere di difesa dal rischio di frane e caduta massi su strade, ferrovie, imbocchi di gallerie stradali e/o ferroviarie in aree montane.

Galleria artificiale realizzata a protezione della sede stradale in un tratto a mezzacosta soggetto a frane di crollo e colate di detrito: (sotto) vista panoramica, (sopra) particolare della struttura sul lato valle

Questo tipo di struttura difensiva è largamente usata negli attraversamenti stradali e ferroviari di zone montuose, caratterizzate spesso dalla presenza di ripide pareti rocciose fratturate o, talora, intensamente tettonizzate.



Drenaggi

Generalità

Gli interventi di drenaggio hanno lo scopo di allontanare e di raccogliere le acque superficiali e sotterranee in corrispondenza di pendii instabili o di terreni di fondazione da bonificare e consolidare, in modo da diminuire le pressioni interstiziali e conseguentemente le spinte del terreno.

In termini più generali i drenaggi comprendono anche gli interventi diretti ad esercitare un'azione regolatrice delle acque correnti superficiali non incanalate e di quelle stagnanti in depressioni.

Negli interventi di sistemazione e consolidamento dei versanti in frana e nelle realizzazione delle opere di ingegneria civile sono utilizzati vari metodi e strumenti per il drenaggio, applicati sia per un effetto temporaneo che per un azione drenante permanente.

Gli interventi di drenaggio si possono suddividere in due gruppi principali:

- opere di drenaggio di tipo superficiale;
- opere di drenaggio di tipo profondo.

I drenaggi di tipo superficiale, comprendenti le opere di regimazione e drenaggio delle acque superficiali e di sistemazione del pendio di primo intervento, sono quelli di più rapida e facile installazione e manutenzione, ma sono anche quelli che più facilmente si danneggiano e necessitano di manutenzione continua.

I drenaggi profondi, che in genere hanno un carattere definitivo, necessitano di opere e di attrezzature più complesse per la loro installazione e sono più costosi. A fronte di questi svantaggi assicurano però una maggiore efficacia nella stabilizzazione di versanti in frana.

In considerazione del fatto che è spesso difficile valutare l'efficacia di un sistema di drenaggio in fase di progettazione, è prassi consolidata valutare gli effetti del sistema attraverso piezometri che fanno parte integrante del sistema stesso e sono installati contemporaneamente ad esso. La loro lettura periodica consente di valutare i riflessi del sistema di drenaggio sulle acque sotterranee e, in base a questi, ottimizzare il loro funzionamento.

I tipi di opere di drenaggio superficiali e profondi più comunemente usati sono rappresentati da :

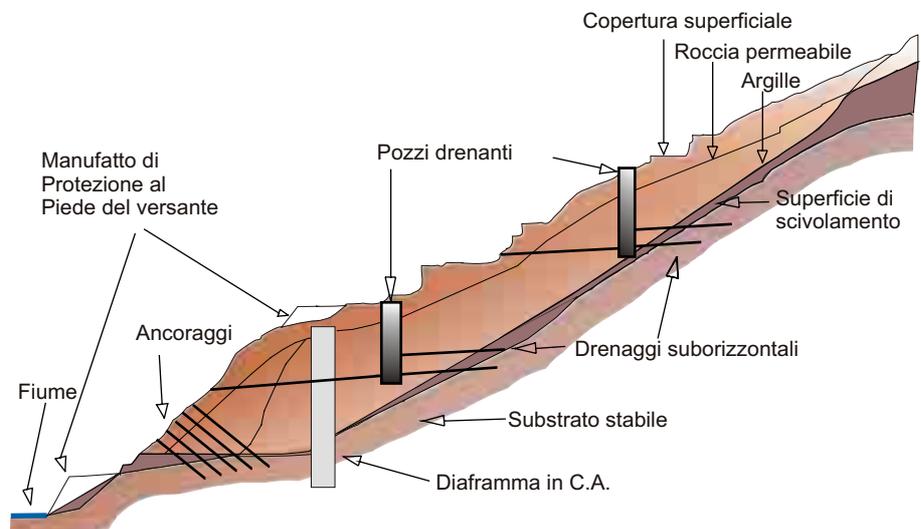
-Opere di drenaggio superficiali.

- Cuneo drenanti.
- Dreni suborizzontali
- Trincee drenanti.

-Speroni drenanti.

- Paratie drenanti.
- Pozzi drenanti.
- Gallerie drenanti.

Sistemazione e consolidamento di un versante in frana mediante la realizzazione di opere di drenaggio superficiali e profonde.



Generalità

Le opere di drenaggio superficiali sono interventi eseguiti immediatamente dopo il verificarsi di un evento franoso per la regimazione ed il drenaggio delle acque superficiali e per la sistemazione del pendio instabile. In genere i drenaggi superficiali comprendono: canalette superficiali, fossi di guardia, dreni intercettori, riprofilatura dei versanti per eliminare le depressioni presenti, sigillatura ed impermeabilizzazione delle fessure beanti.

Descrizione e Caratteristiche

Canalette superficiali: sono fra le opere di drenaggio più frequentemente utilizzate negli interventi di sistemazione di aree dissestate con l'obiettivo di captare e allontanare le acque superficiali, non solo quelle provenienti dalle precipitazioni o dalle emergenze idriche ma anche quelle stagnanti entro eventuali depressioni.

La disposizione delle canalette superficiali, realizzate sia all'interno che all'esterno dell'area dissestata, può essere trasversale o longitudinale rispetto al pendio.

In funzione delle modalità costruttive e del materiale di costruzione si possono avere vari tipi di canalette quali quelli descritti nel seguito.

Canalette in terra: sono realizzate eseguendo uno scavo a sezione trapezoidale e possono essere presidiate o non presidiate. In genere le opere di presidio sono necessarie laddove la pendenza è elevata e le caratteristiche del terreno non garantiscono la funzionalità delle stesse (erosione, interrimento ecc.).

Canalette in legname e pietrame: a sezione trapezoidale, sono realizzate con un intelaiatura di pali di legname idoneo e rivestendo il fondo con uno strato di pietrame posto a mano, di circa 20 cm di spessore. Anche per questo tipo di opera è necessario eseguire adeguate opere di presidio.

Canalette prefabbricate in calcestruzzo: sono costituite da elementi (embrici), a forma di trapezio e di ampiezza variabile in modo che l'elemento di monte si incastrino, con la parte più stretta, in quello di valle con una piccola sovrapposizione. Gli elementi della canaletta sono posizionati all'interno di uno scavo avente la stessa forma e debitamente costipato per evitare cedimenti. Le canalette rivestite con elementi prefabbricati in calcestruzzo sono impiegate nei casi in cui la pendenza superi il 10% a causa della loro stabilità rispetto ad eventuali movimenti del corpo di frana.

Canalette con rivestimento rigido in calcestruzzo: di forma e sezione simile alle precedenti, sono usate se la pendenza dell'opera è minore del 10%.

Canalette prefabbricate in lamiera: sono generalmente costituite da elementi di forma semicircolare in acciaio ondulato nervato, di spessore minimo di 2 mm, e devono essere ben incassate nel terreno. Data la tendenza, con il tempo, a scollarsi dal terreno incassante, è preferibile disporre le canalette secondo la linea della massima pendenza.

Rivestimenti per canalette superficiali in pietrame sbizzato e in calcestruzzo.

Il rivestimento degli scavi sagomati con elementi prefabbricati in calcestruzzo a pianta trapezoidale, è indicato per pendenze del pendio > del 10%, per pendenze inferiori al 10% si può impiegare un rivestimento in calcestruzzo rigido.



Fossi di guardia: sono realizzanti eseguendo scavi con sezione ad U o trapezoidale, immediatamente a monte della nicchia di distacco in modo da intercettare le acque correnti superficiali lungo il versante ed allontanarle dall'area instabile. Lo scavo ha, in genere, un rivestimento rigido in calcestruzzo.

Dreni intercettori: sono realizzati immediatamente a monte della nicchia di distacco ed a valle del fosso di guardia. I dreni sono realizzati eseguendo uno scavo, spinto in profondità fino ad intercettare l'eventuale superficie piezometrica della falda, e parzialmente riempite da materiale drenante. Il corpo drenante è costituito in genere da ghiaia pulita separata dalle pareti e dal fondo dello scavo da tessuto non tessuto. La raccolta e l'allontanamento delle acque dal dreno è garantito da un tubo fessurato in PVC.

Opere di consolidamento di una scarpata stradale interessata da frane di tipo superficiale. Il pendio è stato rimodellato e stabilizzato mediante la realizzazione di opere di drenaggio superficiali, costituite da canalette, rivestite in calcestruzzo, che convogliano le acque intercettate nel sistema drenante principale, costituito da una canaletta rivestita in pietrame. L'intervento è stato completato con opere di rivestimento del pendio di tipo antierosivo (georeti in fibre vegetali biodegradabili ed inerbimento) e con la costruzione di una scogliera in pietrame alla base del versante per la protezione dall'erosione fluviale.

Riprofilatura del versante: questi interventi consistono in movimenti di terra aventi lo scopo di eliminare le depressioni o le altre forme presenti nel versante in frana che sono sede di ristagno d'acqua e, più in generale, favorire il drenaggio delle acque di precipitazione. Le acque intercettate sono allontanate dall'area dissestata e convogliate negli impluvi naturali mediante canalette.

Sigillatura ed impermeabilizzazione delle fessure beanti : le fessure beanti, presenti soprattutto nella parte alta dell'area in frana, sono una delle più importanti vie di infiltrazione delle acque meteoriche superficiali in profondità. Il materiale utilizzato per la sigillatura e l'impermeabilizzazione è preferibilmente costituito da argilla, adeguatamente costipata.

Anche in questo caso occorre completare il sistema con un adeguato drenaggio superficiale per intercettare le acque provenienti da monte che potrebbero essere convogliate verso le fratture.



Aspetti ambientali

I sistemi di drenaggio superficiali hanno un impatto ambientale abbastanza contenuto, assolvendo bene il compito di garantire la necessaria efficacia tecnico-funzionale dell'intervento con la necessità del recupero e del ripristino naturale dell'area degradata. Con la loro azione stabilizzante queste opere favoriscono l'attecchimento e la crescita della vegetazione ed il ripristino degli ecosistemi danneggiati.

Le canalette in "terra", in "legno" o rivestite con "pietrame" sono da preferirsi negli interventi in ambienti naturali collinari e montani.

Applicazioni

Gli interventi di drenaggio superficiale sono opere che possono essere realizzate immediatamente dopo il verificarsi di un evento franoso unitamente ad altri interventi di regimazione e di sistemazione superficiale dei pendii. Il loro utilizzo è frequente anche nella sistemazione e consolidamento di versanti in dissesto insieme ad altre opere a carattere definitivo.

Nell'esecuzione dei drenaggi è di fondamentale importanza assicurarsi che tutti gli scarichi delle canalizzazioni siano condotti sino al più vicino fosso o impluvio, fuori dal versante in frana, e che in corrispondenza dei punti di scarico non inneschino processi erosivi.

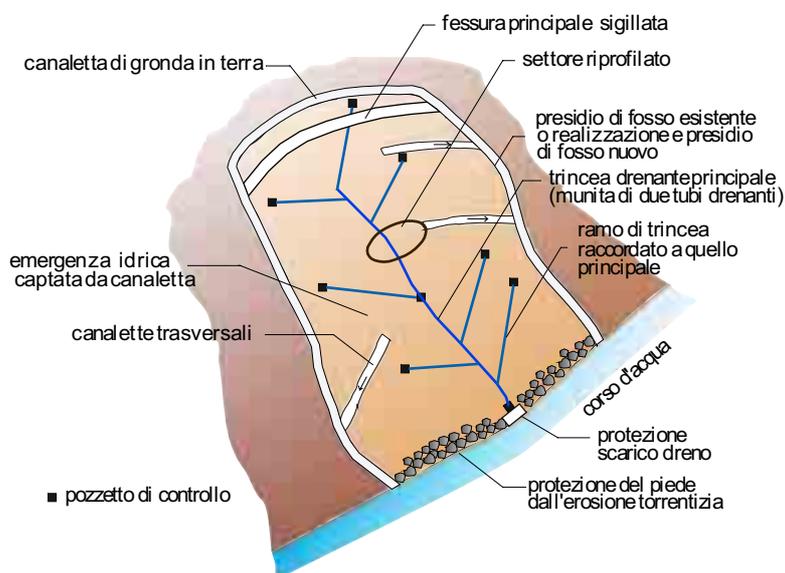
Come ovvio la manutenzione riveste inoltre un ruolo determinante nella funzionalità di questi sistemi.

Consolidamento di un versante in frana con realizzazione di un sistema di drenaggio superficiale per la regimazione e l'allontanamento delle acque superficiali dal corpo di frana, costituito da canalette con rivestimento in calcestruzzo rigido ed in elementi di calcestruzzo prefabbricato. Al piede del versante è visibile un muro di sostegno in gabbioni metallici particolarmente indicato in questo tipo di situazione. La struttura infatti, oltre al contenimento del terreno in frana, esercita anche un'efficace azione drenante sui terreni a tergo.



Opere provvisorie di drenaggio superficiale per la stabilizzazione di un pendio in frana.

Le canalette trasversali allontanano le acque stagnanti entro le depressioni o le emergenze idriche presenti, convogliandole nei fossi di scolo al di fuori del corpo di frana. I fossi di guardia, con rivestimento in calcestruzzo rigido o in lamiera, intercettano le acque provenienti da monte. La sigillatura delle principali fessure aperte e la realizzazioni di dreni intercettori, ubicati a monte della nicchia di distacco ed a valle del fosso di guardia, completano il sistema di drenaggio provvisorio.



Opere di consolidamento di versante in frana, sottostante un viadotto autostradale. Il versante è stato rimodellato e stabilizzato con la realizzazione di opere di drenaggio superficiali, costituite da canalette, rivestite con elementi prefabbricati in calcestruzzo, e con opere di sistemazione idraulico-forestali.



Intervento di consolidamento, drenaggio e regimazione idraulica dei versanti in dissesto circostanti un fosso in approfondimento con tecniche di ingegneria naturalistica. L'intervento è consistito nel rimodellamento dei versanti dissestati, rivestimenti antiersivi con georeti ed inerbimenti, realizzazione lungo i versanti di opere di sostegno e stabilizzanti rappresentati da palizzate in legname e viminate, opere di drenaggio e di regimazione idraulica quali canalette rivestite in legname, rivestimento dell'alveo con tondame in legno di castagno e costruzione di briglie in legname e pietrame.

Generalità

Il "cuneo filtrante" è un intervento di stabilizzazione dei versanti le cui caratteristiche principali sono la facile realizzazione e l'economicità.

Descrizione e Caratteristiche

Il cuneo filtrante è una struttura che non ha nessuna funzione statica. L'elevata permeabilità del materiale drenante insieme allo sviluppo degli apparati radicali delle piante esercitano un'efficace azione drenante favorendo il consolidamento del versante attraverso l'eliminazione delle acque in eccesso.

L'intervento è realizzato alla base del pendio o della scarpata da stabilizzare, preferibilmente previa sistemazione mediante terrazzamenti con muri a secco e/o rivestimenti di scogliera in pietrame. Il materiale drenante (pietrisco o ghiaia) è disposto con la stessa pendenza del versante. Alla base dello scavo è posto un tubo drenante in grado di allontanare le acque della falda e quelle meteoriche di infiltrazione.

Nel corpo della struttura, così realizzato, sono messe a dimora in strati talee di salice o rami vivi in modo che le radici si innestino nel terreno in posto.

Aspetti ambientali

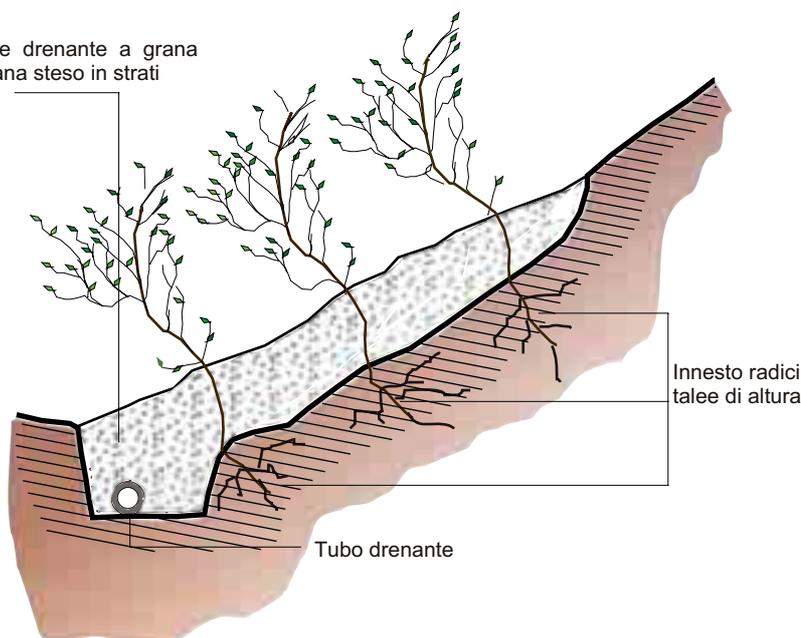
L'opera si inserisce perfettamente nell'ambiente naturale collinare e montano nel quale trova maggiore applicazione. Gli inerbimenti e lo sviluppo della vegetazione, naturale o innestata, contribuiscono sia a migliorare l'efficacia tecnico-funzionale dell'intervento sia al ripristino naturale dell'area.

Applicazioni

Il cuneo drenante è un'opera che trova largo impiego negli interventi di sistemazione e consolidazione dei versanti collinari e montani in dissesto.

Realizzazione di un cuneo drenante. Dopo aver effettuato la riprofilatura del pendio, il materiale di riempimento, ciottoli, pietrisco o ghiaia, è disposto in strati con la stessa pendenza del versante. Sul fondo dello scavo è posato un tubo drenante. L'opera è completata con l'innesto di specie vegetali (es. talee di salice) il cui apparato radicale si svilupperà nel substrato, contribuendo alla stabilità del copro drenante.

Materiale drenante a grana grossolana steso in strati



Generalità

I dreni sono costituiti da tubazioni fessurate in PVC, inseriti in fori suborizzontali o leggermente inclinati verso l'alto, eseguiti mediante macchine idrauliche potenti e molto versatili.

Le prime applicazioni di dreni sub-orizzontali furono sperimentate nel compartimento Autostrade della California (USA), dove successivamente sono state effettuate numerose applicazioni di questa tecnica.

I dreni orizzontali sono spesso associati all'installazione di altri tipi di sistema di drenaggio sia profondo che superficiale.

Descrizione e Caratteristiche

I tubi drenanti sono costituiti in genere da tubi in PVC microfessurati con diametro 50 - 80 mm posizionati entro fori di adeguato diametro ed inclinati verso l'alto di 5° - 15°. I tubi sono in genere rivestiti con geotessili per evitare l'intasamento da parte di sedimenti a granulometria fine. Le profondità massime che possono essere raggiunte dai tubi drenanti sono dell'ordine di 50 - 60 m.

I tubi drenanti possono rappresentare il solo sistema di drenaggio profondo del terreno oppure, molto più frequentemente, possono essere abbinati ad altre opere, come pozzi verticali di grande diametro o gallerie drenanti. In tal caso i tubi possono essere disposti a raggiera su uno o più ordini, oppure paralleli tra loro. Il dimensionamento, il numero, la disposizione e la profondità dei tubi drenanti deve essere fatto sulla base di un accurata indagine geologica ed idrogeologica finalizzata ad acquisire i parametri idrogeologici del terreno necessari per una corretta progettazione del sistema drenante volto all'abbattimento della falda. È prassi consolidata installare nell'area di influenza dei dreni alcuni piezometri per monitorare gli effetti del sistema sulla falda ed eventualmente apportare modifiche per ottimizzarne il funzionamento.

I tubi drenanti possono essere di vario tipo: rigidi o flessibili, in ferro, in PVC o in

Stabilizzazione di una scarpata in frana mediante l'installazione di tubi drenanti in PVC. Si può osservare l'operazione preliminare di perforazione dei fori mediante macchine perforatrici idrauliche. La maneggevolezza e la versatilità unita alla potenza di queste macchine, consente la realizzazione di questo sistema drenante nelle più svariate situazioni ambientali



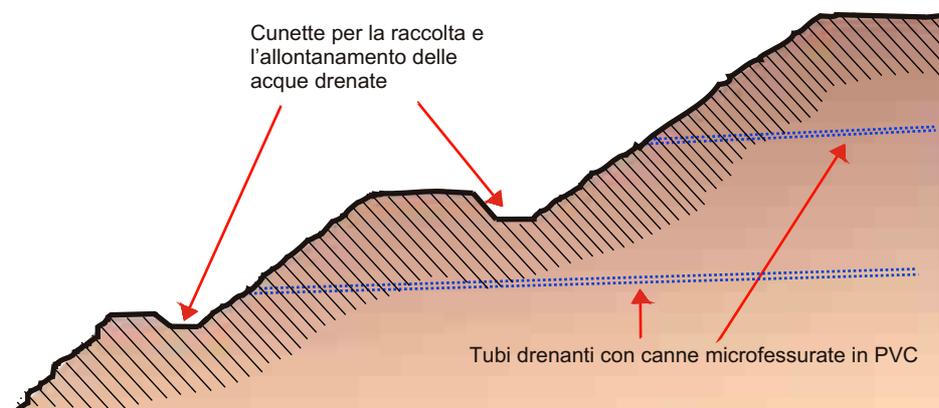
Aspetti ambientali

Questi sistemi drenanti hanno un impatto ambientale contenuto dal punto di vista estetico-paesaggistico dovuto al fatto che la loro installazione avviene al di sotto del piano campagna. Tuttavia la loro esecuzione, se non accuratamente progettata e monitorata, può provocare ripercussioni negative sull'equilibrio delle acque sotterranee e degli acquiferi coinvolti.

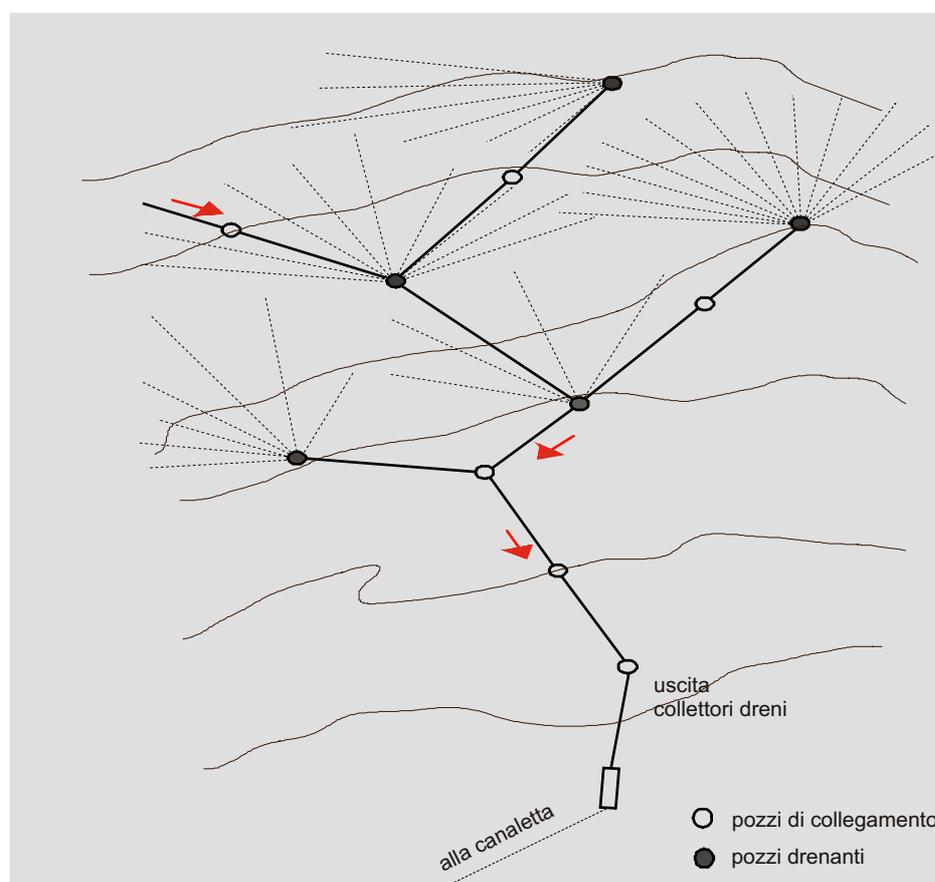
Applicazioni

I tubi drenanti suborizzontali sono impiegati con efficacia, fondamentalmente negli interventi di consolidamento di frane di scorrimento rotazionale, in corrispondenza delle scarpate di coronamento, e/o di colamenti con superfici di scorrimento poco profonde o in tutti quei casi nei quali l'inclinazione del versante sia piuttosto elevata.

Sistema di drenaggio profondo realizzato con una rete di dreni suborizzontali nell'ambito degli interventi di consolidamento di una scarpata in frana.



Sistema drenante profondo costituito da pozzi verticali di grande diametro, abbinati a dreni suborizzontali disposti a raggiera, posti su tre livelli. La lunghezza dei dreni è di circa 40 - 50 m. I pozzi sono interconnessi tra loro per consentire lo scarico delle acque drenate per gravità.



Generalità

Le trincee drenanti sono delle strutture allungate disposte in genere parallelamente alla linea di massima pendenza del versante, con profondità limitate, possono raggiungere i 4-6 m, e larghezze di poco inferiori o superiori al metro (0.80 - 1.20).

L'impiego di questo sistema di drenaggio è stato, ed è tuttora, molto diffuso, avendo notizie del suo utilizzo fin dall'antichità. Cunicoli, trincee riempite con materiale drenante, misto talora a fascine, sono state realizzate sia dai Romani sia, in epoche più antiche, dai Babilonesi, Egiziani, Greci ed Etruschi. In epoca più recente l'aspetto innovativo di questa tecnica è rappresentato soprattutto dalla possibilità di raggiungere profondità di drenaggio maggiori, anche fino a 10 - 12 m, senza dover ricorrere a scavi di cunicoli e gallerie, dalla rapidità di esecuzione e dal perfezionamento delle tecniche costruttive, volte a garantire l'efficienza e la durata nel tempo dell'azione drenante e consolidante di queste strutture.

Descrizione e Caratteristiche

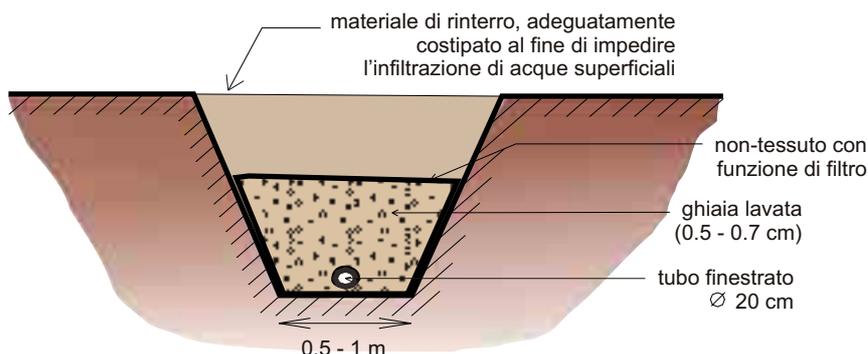
Le modalità di esecuzione delle trincee drenanti sono diverse in funzione della profondità e delle diverse situazioni litologiche ed idrogeologiche locali. Le trincee devono essere scavate con attenzione, a piccoli tratti, procedendo da valle verso monte in modo che, anche se costruite parzialmente, esse possano esercitare la loro azione drenante già in fase di costruzione. Il fondo dello scavo può avere una pendenza uniforme in caso di versanti poco inclinati (10° - 15°), mentre nel caso di pendii maggiormente inclinati o di trincee molto estese in lunghezza, si procede alla gradonatura del fondo scavo. Sul fondo della trincea può essere installata una canaletta in calcestruzzo sopra la quale è posto un tubo (PVC, PE, metallico o in cemento).

Al disopra della canaletta e del tubo di raccolta è posto il corpo drenante: questo può essere formato da un filtro in terreno naturale, o in alternativa da geotessili.

Nel primo caso il materiale drenante è costituito da ghiaia e sabbia pulita, con scarso fango (non maggiore del 3% in peso) ricoperto da uno strato sommitale di terreno vegetale, con spessore di circa 0.5 m. Nel secondo caso il corpo drenante è formato da uno strato di ghiaia (5 - 20 mm) pulita, completamente avvolto con un telo di tessuto non tessuto posto a contatto col terreno da drenare. Al disopra di questo il riempimento della trincea è completato da uno strato di sabbia e dallo strato sommitale di terreno vegetale.

Queste opere sono un efficace sistema di drenaggio profondo delle acque di infiltrazione e di quelle della falda. L'abbattimento della quota piezometrica della falda e la diminuzione del contenuto d'acqua nel terreno consentono di ottenere una sensibile riduzione delle pressioni interstiziali ed un aumento della coesione, migliorando le condizioni di stabilità del pendio

Sezione trasversale tipo di una trincea drenante realizzata con l'uso di un geotessile. L'uso del geotessile consente, in questo caso, di ridurre notevolmente i tempi di realizzazione della trincea a parità di efficacia.



Aspetti ambientali

La realizzazione di questi sistemi di drenaggio ha un maggior impatto sull'ambiente, in particolare sulle acque sotterranee, rispetto ai sistemi di drenaggio di tipo più superficiale. In ogni caso l'inserimento di queste opere nel paesaggio è buono in considerazione del fatto che, a lavori completati, lo strato di riempimento sommitale può essere costituito da terreno vegetale o da pietrame.

Applicazioni

Le trincee drenanti sono impiegate con efficacia fondamentale negli interventi di consolidamento di frane, di scorrimento rotazionale o di colamenti con superfici di scorrimento poco profonde.

Stabilizzazione di un versante in frana mediante trincee drenanti, disposte con un interasse di 6 metri. In primo piano si osserva la canaletta rivestita con elementi in calcestruzzo che convoglia lo scarico dei dreni al di fuori dell'area.

La progettazione, e la realizzazione di tali opere devono essere fatte con estrema attenzione a causa delle conseguenze negative che le trincee possono avere sul precario equilibrio di un versante in frana. Particolare attenzione va posta nel controllare e mantenere efficienti gli scarichi delle acque a valle del tubo di scarico del dreno. La parte terminale del tubo di scarico deve essere protetto, verso il fosso recettore, mediante gabbioni o muri.



Generalità

Gli speroni drenanti rappresentano un tipologia di opera la cui realizzazione è caratterizzata da un notevole impegno tecnico ed economico. Queste strutture sono utilizzate per il consolidamento di pendii in frana quando, sia per la profondità del piano di scorrimento sia per le caratteristiche litologiche e giaciture del terreno, è necessario abbinare all'azione drenante anche un'azione resistente nei confronti delle spinte dei terreni in movimento, in modo da poter costituire un sistema autoconsolidante senza ricorrere ad altre opere di sostegno.

Descrizione e Caratteristiche

Gli speroni drenanti sono realizzati con scavi a sezione ristretta, eventualmente sostenuti da armature provvisorie, utilizzando macchine scavatrici e/o perforatrici in grado di raggiungere profondità anche superiori ai 7 m. Lo scavo è completato con la posa sul fondo di una cunetta in calcetruzzo gradonata.

Nella configurazione standard la struttura è formata da un drenaggio longitudinale a sezione variabile che interseca la superficie di scorrimento e si scarica su di una struttura resistente che ne costituisce la base. L'elemento portante dello sperone può essere costituito, alternativamente, da:

- muratura di pietrame a secco disposta in strati inclinati a reggipoggio di circa 30°, con strato di ghiaia e sabbia posto nella parte inferiore intorno al tubo di raccolta delle acque;
- gabbionate rivestite con strato di sabbia o protette con geotessile (feltri in tessuto non tessuto).
- setto centrale in calcestruzzo poroso e parti laterali in materiale drenante sabbioso - ghiaioso, con o senza la protezione di geotessile.

Queste strutture sono spesso associate ad altre strutture di sostegno, quali i muri o i pozzi sottomurati.

Gli speroni sono disposti secondo la direzione di massima pendenza del versante. L'interasse tra l'uno e l'altro dipende dall'altezza dell'elemento stesso, dall'ampiezza dell'arco di frana, dalla lunghezza del drenaggio longitudinale e dalla profondità del piano di scorrimento.

Aspetti ambientali

Gli speroni drenanti hanno un marcato impatto estetico paesaggistico sull'ambiente naturale circostante, mitigato in parte dalla vegetazione che col tempo tende a mascherare le opere

Applicazioni

Gli speroni drenanti sono impiegati con efficacia negli interventi di consolidamento di frane tipo scorrimento rotazionale o colamenti con superfici di scorrimento poco profonde.

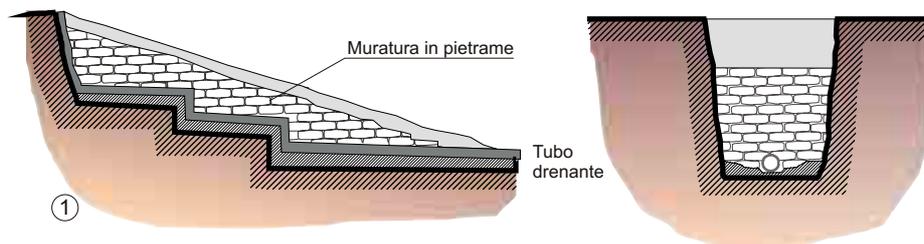
La loro progettazione ed esecuzione devono essere curate con attenzione. In caso contrario infatti le opere possono avere conseguenze negative sul precario equilibrio di un versante in frana. Particolare attenzione va posta nel mantenere efficienti gli scarichi delle acque provenienti dal drenaggio longitudinale che potrebbero inficiare l'intera efficienza dell'opera.

SEZIONE LONGITUDINALE

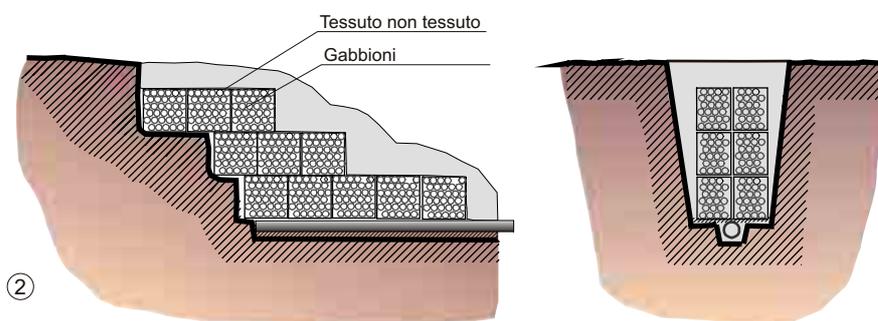
SEZIONE TRASVERSALE

Esempi di sezioni tipo di speroni drenanti e portanti:

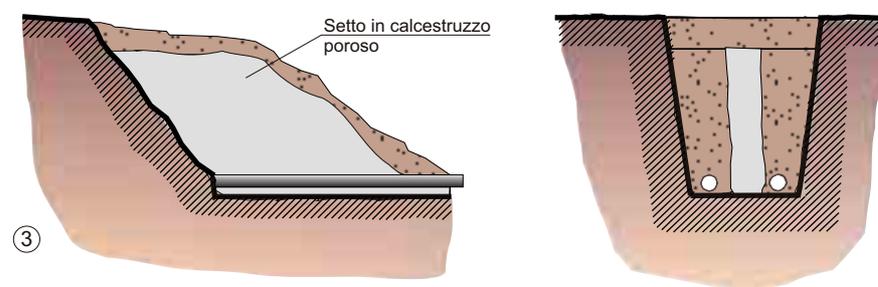
1) Sperone in muratura di pietrame a secco: il materiale è disposto in strati, con inclinazione a reggipoggio, ed è saturato con sabbia pulita e ghiaietto o pietrisco. Al fondo dello scavo gradonato, si costruisce la canaletta di raccolta delle acque in cls o si posa il tubo drenante.



2) Sperone in gabbioni: i gabbioni vengono rivestiti con tessuto non tessuto e lo scavo riempito di sabbia e pietrisco. Al fondo è posato il tubo drenante di raccolta.



3) Sperone con setto centrale in calcestruzzo poroso: il setto in calcestruzzo poroso è realizzato al centro dello scavo, le pareti possono essere rivestite con geotessile tessuto non tessuto e, sul fondo viene posato il tubo drenante, si procede al riempimento della struttura con materiale drenante (sabbia e ghiaia).



Generalità

Le paratie drenanti costituiscono un sistema caratterizzato da una tecnologia innovativa che permette di raggiungere profondità di drenaggio superiori ai 30 m.

Descrizione e Caratteristiche

Le paratie drenanti possono spingersi fino a profondità di circa 30 m, con spessore variabile da 60 a 120 cm.

In funzione delle modalità di esecuzione dello scavo e del tipo di sostegno adottato si possono avere:

- paratie a pali secanti, idonee per suoli che consentono lo scavo del singolo palo senza sostegno per il tempo necessario all'inserimento del tubo "gobbo" ed al suo riempimento con materiale drenante.
- Paratie a pannelli, realizzate con scavo in miscela bentonitica in terreni che necessitano di sostegno per permettere l'inserimento delle casseforme di forma rettangolare ed il loro riempimento con materiale drenante. Questo tipo di paratie viene anche fatto eseguendo lo scavo mediante getto d'acqua ad altissima pressione e lo spurgo del terreno scavato con aria compressa, il tutto entro cassaforma rettangolare infissa progressivamente nel terreno. Quest'ultima tecnica consente di avere sia il necessario sostegno delle pareti dello scavo, sia una più facile messa in opera del materiale drenante e dei geotessili.

Anche in questo caso valgono le considerazioni già espresse nelle precedenti categorie di opere drenanti, riguardo la loro progettazione, esecuzione e manutenzione, che se non curate potrebbero inficiare l'efficienza dell'intero sistema di drenaggio.

Aspetti ambientali

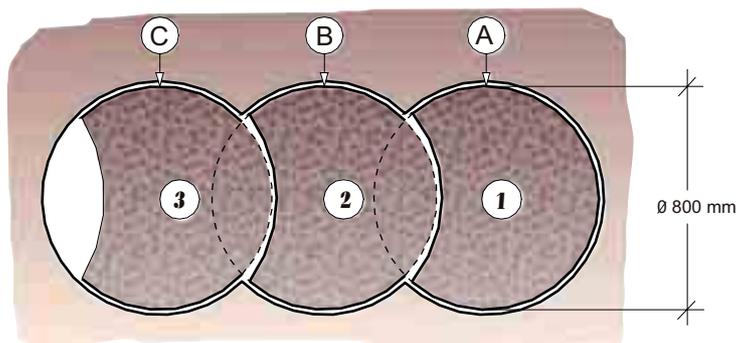
L'esecuzione di queste opere genera un marcato impatto sull'ambiente circostante, dovuto alle tecniche di esecuzione ed all'immissione di fluidi e miscele cementizie nel sottosuolo, con rischi di inquinamento della falda, di fenomeni di subsidenza, e creazione di vibrazioni e rumori molesti.

Applicazioni

Le paratie drenanti, allo stesso modo delle trincee drenanti, sono impiegate con efficacia negli interventi di consolidamento di frane tipo scorrimento rotazionale o colamenti con superfici di scorrimento poco profonde.

Modalità esecutive delle trincee drenanti a pali secanti:

- FASE 1 Scavo del palo ①
 2 Posa in opera del tubo gobbo (A)
 3 Riempimento con materiale drenante del palo ①
 4 Scavo del palo ②
 5 Posa in opera del tubo gobbo (B)
 6 Riempimento con materiale drenante del palo ②
 7 Estrazione del tubo gobbo (A)
 8 Scavo del palo ③
 9 Posa in opera del tubo gobbo (C)
 10 Riempimento con materiale drenante del palo ③



Generalità

I pozzi drenanti di medio e grande diametro sono opere di drenaggio profondo, utilizzati in corrispondenza di aree di cui non è noto, con sufficiente approssimazione, l'andamento delle linee di flusso delle acque sotterranee o in cui è presente una situazione litostratigrafica eterogenea, caratterizzata da alternanze di orizzonti a differente permeabilità e idrogeologia complessa.

Descrizione e Caratteristiche

La realizzazione di queste opere comporta l'uso di attrezzature moderne e di tecniche di perforazione comunemente impiegate per lo scavo dei pozzi d'acqua. I pozzi possono essere realizzati isolatamente oppure accostati tra loro in modo da formare una paratia drenante. In questo caso è necessario riempire il foro solo con materiale drenante e lo scarico delle acque avviene per gravità.

Le moderne tecnologie impiegate nell'esecuzione dei drenaggi profondi, hanno consentito l'introduzione di un tipo di intervento composito, costituito da pozzi verticali drenanti, accessibili anche in via permanente, collegati tra loro da fori per lo scarico delle acque per gravità, muniti di dreni suborizzontali eseguiti a raggiera dall'interno dei pozzi, disposti su due o più livelli. Questa soluzione permette di allargare notevolmente l'area d'influenza del sistema drenante.

I pozzi possono essere costituiti da una corona esterna di pali trivellati e rivestimento interno delle pareti in calcestruzzo messo in opera entro casseforme in acciaio. In alternativa si possono avere pareti in cemento armato eseguite con elementi di paratia per pozzi.

I pozzi così eseguiti assolvono, oltre alla funzione di drenaggio e di controllo dell'andamento delle falde freatiche, anche un'importante funzione strutturale di sostegno, fondamentale negli interventi di consolidamento e stabilizzazione di pendii in frana che coinvolgono infrastrutture o abitati.

Costruzione di un pozzo drenante di grande diametro, in calcestruzzo armato.

Al centro una macchina perforatrice per la realizzazione dei dreni sub-orizzontali.



Aspetti ambientali

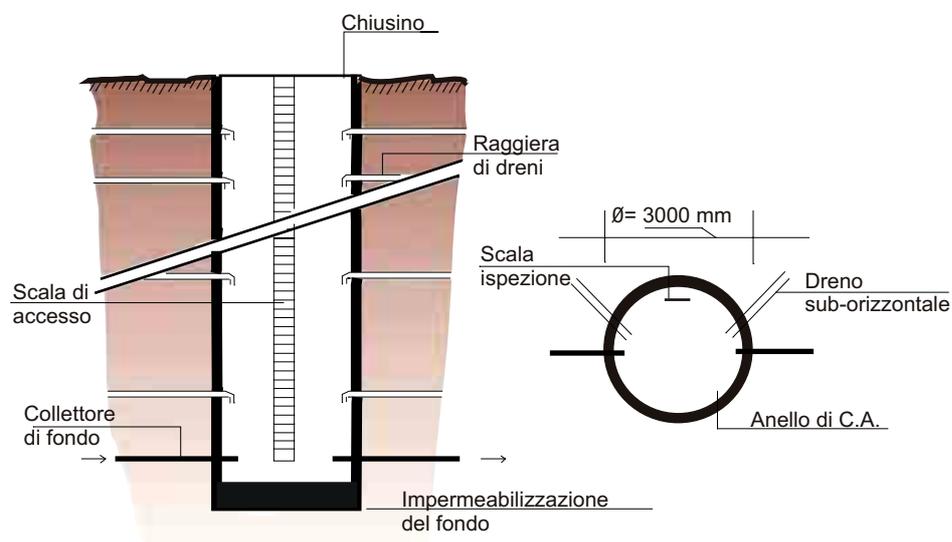
I pozzi drenanti possono avere un marcato impatto ambientale, dovuto sia alle modalità costruttive sia alla possibilità di interferire negativamente, in particolari situazioni idrogeologiche, con la circolazione delle acque di falda o con le sorgenti situate nel raggio d'influenza del sistema drenante.

Applicazioni

I pozzi drenanti di medio e grande diametro, abbinati sovente a dreni sub-orizzontali e gallerie drenanti, sono impiegati con efficacia negli interventi di consolidamento e di stabilizzazione di pendii in frana dove è necessario intercettare le acque sotterranee ed abbattere sensibilmente il livello della falda, riducendo al tempo stesso gli effetti negativi sull'ambiente, per garantire la stabilità di opere importanti o insediamenti abitativi.

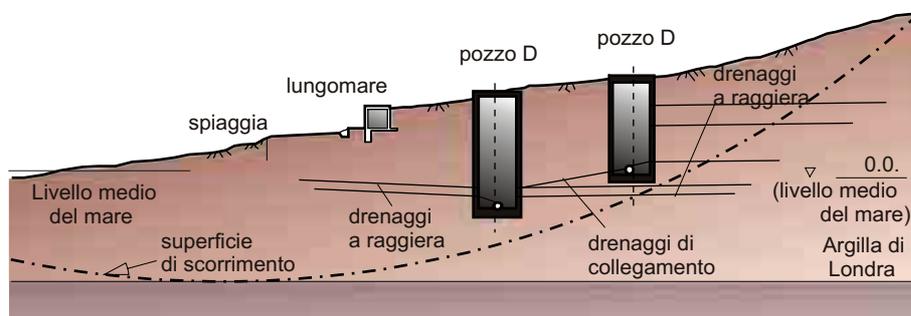
Sezione tipo di pozzo drenante di grande diametro, in calcestruzzo armato, munito di dreni sub-orizzontali a raggiera, posti su più livelli.

Il pozzo è predisposto per l'ispezione periodica finalizzata al controllo dell'efficacia del sistema drenante.



INTERVENTI PER LA STABILIZZAZIONE DEI PENDII

Schema di drenaggio profondo mediante la realizzazione di pozzi di grande diametro, e di drenaggi sub-orizzontali a raggiera disposti su più livelli. Il sistema drenante è stato usato per la stabilizzazione della frana di Beacon Hill, Herne Bay in Inghilterra.



Generalità

Le gallerie drenanti sono opere di drenaggio profondo caratterizzate da costi di realizzazione elevati. Per questo motivo si ricorre ad esse solo in caso di condizioni di vulnerabilità di infrastrutture civili o insediamenti abitativi causate da frane di dimensioni molto estese.

Descrizione e Caratteristiche

Le gallerie di drenaggio interessano i terreni stabili circostanti la massa in frana sono in genere raccordate a pozzi verticali di grande diametro. La sezione è in genere modesta, con dimensioni minime (altezza 1,80-2,00 m e larghezza 1-2 m) tali da consentirne l'ispezione e la manutenzione. Il fondo dello scavo è rivestito da una platea in calcestruzzo mentre le spalle sono in genere in muratura. La base è posta a profondità leggermente maggiore del livello medio delle acque sotterranee mentre la sommità raggiunge ed intercetta il livello stesso. In alcuni casi a partire dalle gallerie si sviluppa una rete di drenaggi suborizzontali per rendere più efficace l'intero sistema. I pozzi e le gallerie drenanti possono essere lasciate vuote o riempite con materiale drenante.

Le gallerie drenanti hanno il grande vantaggio di intercettare ed abbassare notevolmente il livello delle acque nella massa in frana usando quasi esclusivamente la forza di gravità, anche se a volte si rende necessario ricorrere al periodico svuotamento della struttura mediante pompaggio.

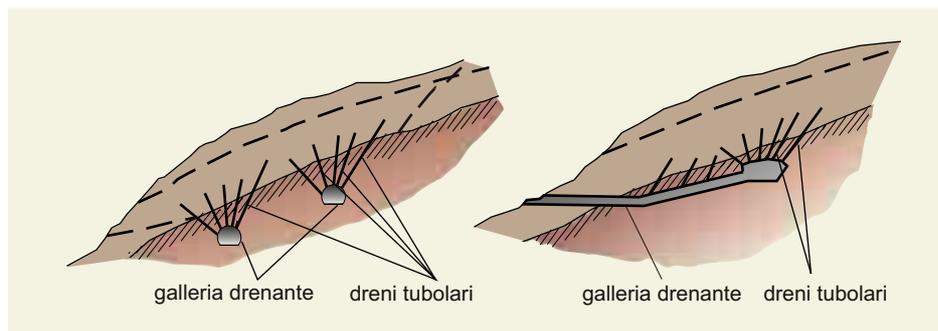
Aspetti ambientali

Questo sistema drenante non comporta un marcato impatto paesaggistico, tuttavia, in particolari situazioni geologico ed idrogeologiche, la loro esecuzione può causare alterazioni delle condizioni idrogeologiche e della stabilità dell'area d'intervento, dovuti a fenomeni di subsidenza, alterazione della portata di pozzi d'acqua, impoverimento o essiccazione di sorgenti situate nell'area d'influenza dei pozzi.

Applicazioni

Le gallerie drenanti, abbinati sovente a dreni suborizzontali e pozzi, sono impiegate con efficacia negli interventi di consolidamento e di stabilizzazione di pendii in frana in particolari situazioni idrogeologiche (zone di faglia o di intensa fatturazione, zone di contatto tra substrato geologico e depositi di copertura ecc.), quando è necessario abbattere sensibilmente il livello della falda, per garantire la stabilità di opere importanti o insediamenti abitativi.

Drenaggio profondo realizzato con galleria drenante e reti di tubi drenanti sub-orizzontali.



Generalità

Le opere speciali comprendono gli interventi volti a migliorare le caratteristiche fisiche e meccaniche dei terreni e delle rocce. I metodi usati per conseguire questo risultato possono essere suddivisi nelle seguenti tipologie:

- iniezione (iniezioni di miscele consolidanti, jet grouting);
- trattamenti termici (congelamento, cottura ad alte temperature);
- trattamenti chimici (infiltrazione di sali per scambio ionico);
- trattamenti elettrici (elettroosmosi).

L'applicazione di questi trattamenti richiede indagini molto approfondite ed uno studio progettuale basato sui risultati di prove pilota eseguite in sito. I costi d'esecuzione sono in genere molto alti, a causa dell'impiego di attrezzature complesse e di personale specializzato. Per tali motivi, l'impiego di questi metodi per la stabilizzazione di pendii instabili è limitato a casi particolari ad interventi di tipo provvisorio.

Rupe di Orvieto (Perugia): consolidamento della parete tufacea interessata da un'estesa fratturazione. Gli interventi di consolidamento hanno previsto la realizzazione di ancoraggi e chiodature nelle pareti mentre le fessure sono state sigillate con iniezioni di miscele cementizie.



Generalità

Le iniezioni rappresentano le tecniche più avanzate per il miglioramento delle caratteristiche fisiche e meccaniche delle terre e delle rocce.

Il trattamento dei terreni può essere effettuato con una grande varietà di tecniche basate sull'iniezione di fluidi stabilizzanti secondo diversi principi fra i quali:

Permeazione o penetrazione

In questo trattamento le portate e le pressioni devono essere regolate in modo tale da evitare o limitare al massimo i fenomeni di *idrofratturazione* (o *claquage*). Le miscele stabilizzanti penetrano entro i pori del terreno o le fessure della roccia senza significative modifiche della struttura del materiale.

Compattazione o spostamento controllato

Questo trattamento consiste nell'iniettare sospensioni molto dense che formano bulbi o lenti compatte, che esercitano sul terreno circostante variazioni di pressione tali da indurre effetti di spostamento e compattazione in funzione della compressibilità e permeabilità del materiale trattato.

Idrofratturazione o spostamento incontrollato

L'iniezione di miscele a pressioni superiori alla resistenza del terreno o roccia, provoca la formazione di un reticolo di fratture (*claquages*), attraverso le quali il materiale iniettato penetra rapidamente nella zona fratturata. Questa tecnica è applicata in terreni addensati o in rocce porose o minutamente fessurate difficilmente penetrabili dalle normali miscele consolidanti.

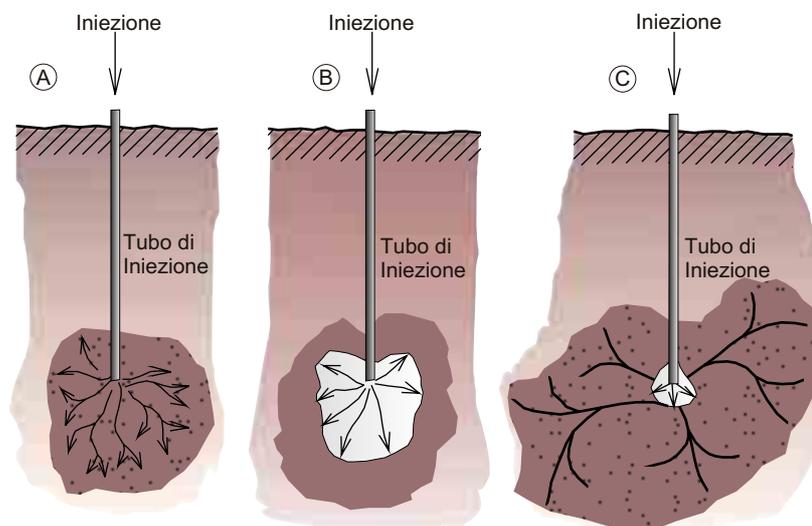
Idroperforazione (jet grouting)

Il sistema è stato sviluppato in Giappone agli inizi degli anni '60, ma è solo a partire dal 1970 che i sistemi jetting hanno avuto un'ampia diffusione nel mondo. La tecnica di idroperforazione si basa sul principio della disgregazione del terreno in posto mediante getti di fluidi ad altissima velocità e sulla miscelazione e/o parziale sostituzione con un fluido consolidante e/o impermeabilizzante, costituito in genere da sospensioni di cemento.

Le tecniche di iniezione sono poco adatte agli interventi di stabilizzazione dei versanti sia per i costi elevati sia per la necessità di disporre di tecnologie specifiche d'intervento. Nel seguito sono trattate le tecniche di "iniezioni di miscele" e il "jet grouting" che hanno trovato applicazione in alcuni interventi di stabilizzazione.

Trattamento con iniezioni:

- A) permeazione o penetrazione;
- B) compattazione o spostamento controllato;
- C) idrofratturazione o spostamento incontrollato.



Iniezioni di miscele

Generalità

Il trattamento di "iniezione" è un moderno procedimento che consiste nell'iniettare nel sottosuolo e/o in strutture portanti di edifici dissestati delle miscele atte a:

- ridurre la permeabilità;
- aumentare la resistenza al taglio;
- diminuire la compressibilità;
- permeare i vuoti del terreno e/o le cavità e fessure delle rocce o di strutture portanti di edifici o altro.

Le prime applicazioni di questo sistema di stabilizzazione ed impermeabilizzazione risalgono a circa 200 anni fa, quando un ingegnere francese, Charles Berignj, nel 1802 consolidò le murature del porto di Dieppe, iniettando con una pompa a pressione, di sua invenzione, una miscela di cemento ed acqua (boiaccia cementizia) nella struttura dissestata. Successivamente, verso la fine del 1800, le iniezioni di miscela di cemento e acqua furono ampiamente impiegate da Naveles (1876) e da Romaux (1882) nell'impermeabilizzazione e consolidamento di terreni ed ammassi rocciosi fratturati in aree minerarie.

Il perfezionamento delle tecniche di iniezione ha dato un ulteriore impulso all'applicazione di questi procedimenti, che sono stati impiegati non solo nei lavori minerari, ma anche nella realizzazione di altre importanti opere di ingegneria civile, come ad esempio dighe, strade, ferrovie e impianti industriali.

L'additivazione delle miscele di cemento-acqua con soluzioni di silicato di sodio e cloruro di calcio, fatta per la prima volta da H. Jonsten nel 1925, e l'introduzione di nuovi tipi di miscele consolidanti chimiche (organiche ed inorganiche) hanno consentito di ampliare il campo di applicazione di questo sistema, limitato prima al consolidamento ed impermeabilizzazione di terreni e rocce di media alta permeabilità, estendendolo anche a quelli caratterizzati da bassa permeabilità. Infine, sempre a partire dal 1925, si sono sviluppate e diffuse le moderne tecniche di stabilizzazione, impermeabilizzazione, costipamento e miglioramento delle capacità portanti dei terreni sciolti dapprima mediante l'esecuzione di "pali di sabbia" (1925) fino ai più recenti sistemi di "vibroflottazione", vibrocompattazione" e di "idroperforazione (Jet Grouting)" ed alle iniezioni di "miscele ternarie aerate".

Particolare di sigillatura in una parete tufacea mediante iniezione di miscele consolidanti.



Descrizione e Caratteristiche

Le miscele iniettate sono fundamentalmente di due tipi: a) "sospensioni", formate da particelle solide di varia natura (terreno, cemento, emulsioni di asfalto o altro) ed acqua; b) "soluzioni", formate da sostanze chimiche (organiche ed inorganiche).

Iniezioni di "sospensioni"

La composizione della sospensione iniettata dipende dalle caratteristiche del mezzo da trattare e in particolare dalla sua permeabilità. Fra i vari tipi di miscela quelli più frequentemente usati includono:

- "boiaccia cementizia", formata da una miscela di cemento ed acqua con eventuale aggiunta di altri componenti (argilla, sabbia fine, pozzolane o additivi di vario tipo quali bentonite per impermeabilizzare);
- miscele ternarie aerate, formate da acqua, cemento, sabbia con aggiunta di additivo aerante, centrifugata in speciali mescolatori, particolarmente indicata per il trattamento di terreni granulari in presenza d'acqua;
- stesso materiale presente in sito, con la formazioni di colonne di materiale granulare compatto ("vibroflottazione"). Quest'ultima tecnica è usata per costipare e migliorare le capacità portanti del terreno, quando questo è formato da terreni incoerenti sabbioso-ghiaiosi sciolti;
- "emulsioni di asfalto".

L'iniezione di "sospensioni" è generalmente usata nei terreni e negli ammassi rocciosi caratterizzati da valori della permeabilità medio-alti, mentre le iniezioni di emulsioni di asfalto sono impiegate per trattare terreni a granulometria più fine, quali sabbie e limi, e rocce con ampiezza delle fessure fino a 10 mm.

Iniezioni di "soluzioni"

I trattamenti con soluzioni chimiche sono usati per la permeazione, il consolidamento e l'impermeabilizzazione dei terreni a grana fine, quali sabbie medio-fine e limi.

I tipi di soluzioni attualmente disponibili per questo tipo di trattamento sono vari. Quelli più comunemente usati comprendono:

- Soluzioni di silicato di sodio e di un reagente, che può essere costituito da cloruro di calcio (metodo Joosten 1925) o da acetato di etile (metodo Soletanche, 1957), iniettati a bassa pressione (10 bar) nel terreno con formazione di un "gel di silice";
- Iniezioni di resine organiche diluite con acqua, caratterizzate da viscosità molto bassa all'atto della iniezione che successivamente polimerizzano per mezzo di un catalizzatore, solidificando in una massa molto resistente ed impermeabile;
- Soluzioni bituminose;
- Sistemi combinati di soluzioni diverse.

L'iniezione delle miscele consolidanti viene fatta attraverso i fori di perforazione, utilizzando apposite attrezzature di perforazione e speciali pompe.

Negli ammassi rocciosi, prima di procedere a questo trattamento, si eseguono le prove "Lugeon" per determinare il valore della permeabilità in sito. Generalmente il trattamento di iniezione è efficace per valori di permeabilità maggiori di 10 Lugeon (1 Lugeon = $1,3 \times 10^{-5}$ cm/s).

Aspetti ambientali

Le tecniche di iniezione in terreni e rocce in molti casi consentono di eseguire delle opere di ingegneria civile o di sistemazione dei versanti instabili, limitando al minimo il danno ambientale in aree molto spesso di elevato pregio paesaggistico e culturale.

Le soluzioni chimiche iniettate possono avere degli effetti negativi indesiderati sull'ambiente, connessi soprattutto alla loro possibile corrosività e tossicità. Per tali motivi recentemente sono state introdotte delle miscele formate da cementi microfini, in grado di penetrare terreni a bassa permeabilità, senza ripercussioni sull'ambiente.

Applicazioni

Il trattamento con iniezioni di miscele consolidanti è largamente utilizzato in numerose opere di ingegneria civile (dighe, strade, ferrovie, gallerie, impianti industriali o edifici civili, ecc.), dove si rende necessario procedere all'impermeabilizzazione, consolidamento e costipamento di terreni di fondazioni e sciolti. Questo trattamento è anche impiegato per il consolidamento di strutture portanti di edifici civili o di infrastrutture dissestati, trova applicazione negli interventi di sistemazione dei versanti, soprattutto in quelli che riguardano la stabilizzazione di pareti rocciose instabili.

Jet Grouting

Generalità

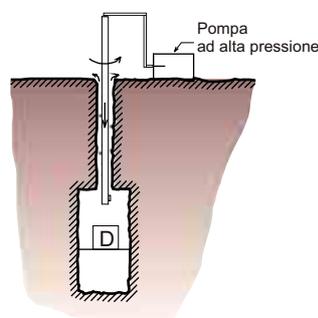
Il trattamento colonnare del terreno con il "jet grouting" rappresenta il più recente sviluppo nella tecnica delle iniezioni e va sempre più diffondendosi, oltre che nelle realizzazioni di opere di ingegneria civile, anche negli interventi di stabilizzazione di pendii instabili.

In Italia questo sistema è stato adottato da alcune ditte che, acquisiti i brevetti giapponesi, hanno a loro volta introdotto delle importanti innovazioni tecnologiche, sviluppando ed ampliando propri sistemi di applicazione.

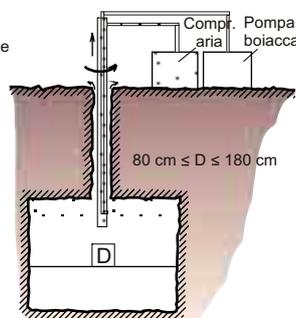
Schemi esecutivi dei tre principali sistemi di trattamento colonnare del terreno (jet grouting):

- A) sistema monofluido;
- B) sistema bifluido;
- C) sistema trifluido.

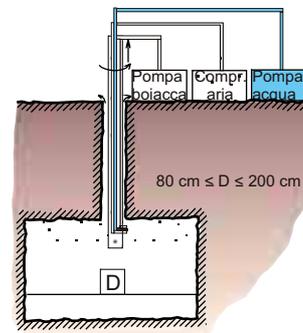
A) SISTEMA MONOFLUIDO



B) SISTEMA BIFLUIDO



C) SISTEMA TRIFLUIDO



Descrizione e Caratteristiche

La tecnica d'idroperforazione o "jet grouting" consente di disgregare il terreno in posto mediante getti di fluidi ad altissima velocità di miscelarlo sostituendolo e sulla miscelazione e/o parziale sostituzione del terreno stesso con un fluido consolidante e/o impermeabilizzante, costituito in genere da sospensioni di cemento.

Questo sistema consente di trattare un'ampia gamma di tipi di terreni, dalle ghiaie alle argille alle rocce tenere, e non comporta problemi d'inquinamento.

I procedimenti esecutivi attualmente in uso, con denominazioni diverse attribuite dalle imprese specializzate, possono essere raggruppati in tre categorie contraddistinte dal numero di fluidi disgreganti e stabilizzanti utilizzati (acqua, aria, miscele cementizie), che comunque comportano due fasi esecutive principali:

- perforazione di un foro, con diametro di circa 40-50 cm, profondità tale da raggiungere e attraversare la parte del terreno da trattare, entro il quale introdurre la colonna di aste d'iniezione;
- "iniezione" mediante uno o più ugelli che lanciano ad altissima velocità i fluidi impiegati.

Sistema monofluido: questo sistema, tutt'ora il più diffuso in Italia, prevede l'utilizzo di un unico fluido quale agente disgregante e stabilizzante, generalmente costituito da una sospensione di cemento, che viene iniettato ad alta pressione attraverso gli ugelli posti al fondo della batteria d'iniezione.

Sistema bifluido: questo sistema, che rappresenta una variante del precedente, prevede la disgregazione e la contemporanea miscelazione del terreno mediante un getto coassiale, ad alta pressione, di aria compressa e di miscela stabilizzante, limitandone in tal modo la dispersione ed aumentandone il potere penetrante ed il raggio d'azione.

Sistema trifluido: in questo sistema l'azione disgregante è riservata a getti coassiali d'acqua ed aria compressa, iniettati ad alta pressione, che provocano una più o meno accentuata rimozione della frazione più fina del terreno, mentre la sospensione cementizia, iniettata contemporaneamente da ugelli sottostanti, ha il ruolo di agente stabilizzante, miscelandosi con il terreno disgregato e parzialmente dilavato dai getti di acqua ed aria compressa.

Questi sistemi possono realizzare colonne di terreno stabilizzato meccanicamente con diametri che variano in funzione delle modalità esecutive e della natura e caratteristiche fisiche e meccaniche dei terreni trattati, generalmente comprese fra 0,30 e 1,50 metri, superando a volte i 2 metri. La profondità del terreno trattato può invece raggiungere e superare anche i 50-60 metri.

Sistema *jet grouting* per la stabilizzazione ed il sostegno dei terreni sabbioso-limosi sciolti di una scarpata stradale in frana. La tecnica del consolidamento dei terreni mediante trattamenti colonnari di *jet grouting* consente in questi casi di garantire la stabilità dei fronti di scavo ed al tempo stesso di ridurre l'ampiezza degli stessi, riducendo l'impatto ambientale.



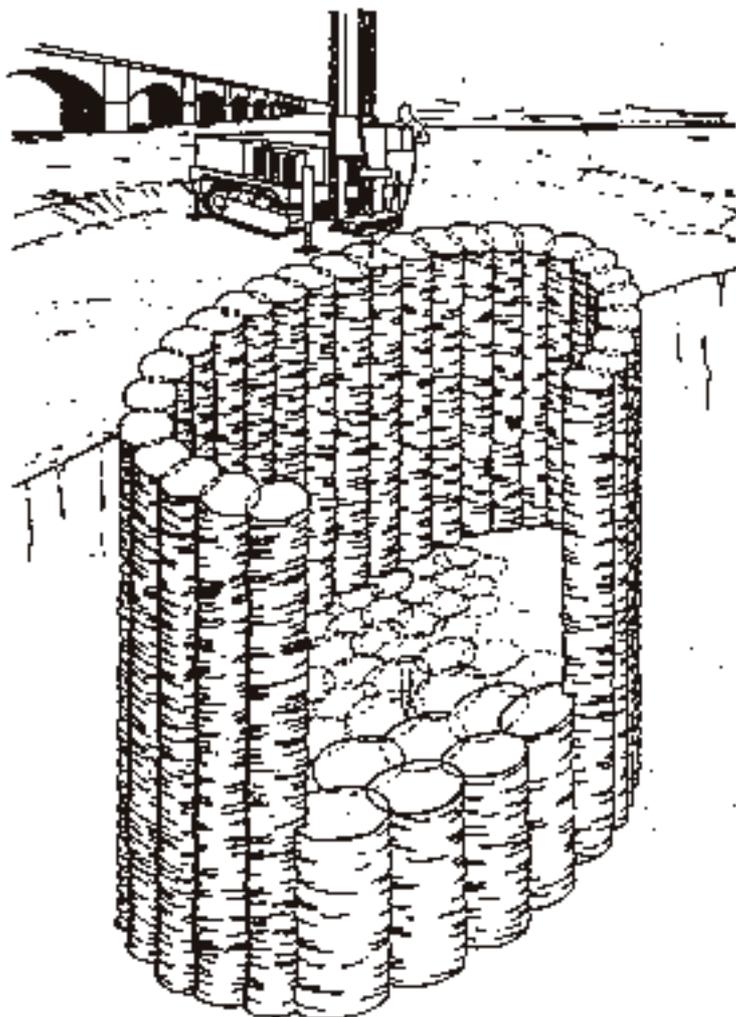
Aspetti ambientali

La stabilizzazione meccanica del terreno con il sistema “jet grouting” ha un impatto ambientale molto ridotto rispetto agli altri sistemi tradizionali di consolidamento o impermeabilizzazione dei terreni per iniezioni di sospensioni o di soluzioni chimiche, dovuto all'utilizzo di fluidi non tossici o inquinanti ed alle tecniche d'esecuzione che non richiedono grossi scavi e attrezzature ingombranti.

Applicazioni

La tecnica del trattamento colonnare con “jet grouting” è largamente utilizzata nelle opere di ingegneria civile (dighe, strade, ferrovie, gallerie, impianti industriali o edifici civili ecc.), quando si rende necessario procedere alla impermeabilizzazione, consolidamento e costipamento di terreni di fondazioni sciolti. Questo trattamento è utilizzato per il consolidamento di strutture portanti di edifici civili o di infrastrutture dissestati, e trova applicazione anche negli interventi di sistemazione dei versanti, soprattutto in quelli che riguardano la stabilizzazione di pendii o scarpate in terreni sciolti instabili.

Realizzazione di pareti provvisorie di contenimento in terreni incoerenti sciolti, o in presenza d'acqua, tramite preconsolidamento con trattamento colonnare “jet grouting”. Questa tecnica permette la successiva esecuzione di fondazioni profonde (ad es. fondazioni a pozzo, protezione di pareti per scavi di gallerie o linee metropolitane), la realizzazione di tamponi di fondo impermeabili anche a grande profondità per l'eliminazione e/o la riduzione della sottospinta idraulica.



Congelamento

Generalità

Il trattamento del terreno mediante congelamento, è un procedimento di stabilizzazione temporaneo molto costoso ed utilizzato per l'esecuzione di scavi o altri interventi di ingegneria civile in terreni a grana fine saturi, quando nessun altro sistema risulta utilizzabile.

La tecnica del congelamento richiede l'impiego di manodopera e tecnici altamente specializzati. Le prime applicazioni di questo metodo furono realizzate in Germania nel 1880 da H. Poetsch per eseguire lo scavo di alcuni pozzi minerari nella Ruhr, in terreni poco consistenti e saturi d'acqua. Successivamente questo sistema è stato ampiamente impiegato per la realizzazione di importanti opere civili in numerose parti del mondo, soprattutto nei lavori di scavo di gallerie: in Francia nel 1908 per un tratto della metropolitana di Parigi, in Svezia nel 1954 nella realizzazione di un tratto di ferrovia in sotterraneo e nel 1936 nella costruzione della metropolitana. Anche in Italia questa tecnica è stata usata nei lavori per la realizzazione di gallerie ferroviarie e stradali o metropolitane, come ad esempio nello scavo di un tratto di galleria della nuova linea ferroviaria Paola Cosenza in terreni limoso-argillosi sotto falda, o per lo scavo di alcuni tratti della metropolitana di Milano.

Descrizione e Caratteristiche

Il congelamento è ottenuto facendo circolare nel terreno un liquido refrigerante costituito da "salamoia" (soluzione acquosa concentrata di sali) raffreddato costantemente da uno scambiatore termico ad azoto liquido. Il liquido viene fatto circolare nel terreno con temperature molto basse (circa -20 30 °C), attraverso apposite tubazioni coassiali, disposte entro fori di perforazione di piccolo diametro (intorno ai 15 cm). Particolare attenzione va posta nell'esecuzione dei fori, onde evitare che zone di terreno rimangano non congelate, creando gravi inconvenienti e pericoli al momento dell'esecuzione degli scavi. Se il terreno da trattare è parzialmente saturo o anche secco, è necessario umidificarlo sia preventivamente sia durante l'operazione di congelamento per ottenere un migliore risultato.

Lo spessore della parte congelata dipende dalla profondità di scavo e dalle spinte sul terreno: in genere per avere una buona impermeabilizzazione e consolidamento dell'area interessata dallo scavo, 1,5-2,00 m di spessore sono sufficienti. Non è necessario congelare il terreno che deve essere scavato, in quanto la parete congelata funge da barriera impermeabilizzante.

La resistenza del terreno ottenuta con questo sistema è funzione delle caratteristiche granulometriche, del grado di umidità e della temperatura raggiunta. In generale i terreni sabbiosi risultano molto più resistenti di quelli limosi o limo-argillosi.

La stabilizzazione del terreno con questo procedimento presenta i seguenti vantaggi:

- formazione di un'efficace barriera al flusso delle acque della falda;
- operazioni non eccessivamente rumorose;

Aspetti ambientali

Questo trattamento del terreno ha un ridotto impatto sull'ambiente circostante, in quanto la sua esecuzione non comporta scavi o perforazioni di grande ampiezza o possibili inquinamenti delle acque sotterranee.

Applicazioni

La tecnica di congelamento risulta efficace per la costruzione di paratie temporanee, impermeabili, necessarie alla realizzazione di scavi in terreni sotto il livello di falda.

Congelamento dei terreni con azoto liquido per procedere all'esecuzione degli scavi in terreni limosi saturi della metropolitana di Parigi.



Particolare dell'impianto di congelamento utilizzato per il consolidamento preliminare dei terreni interessati dallo scavo della metropolitana di Parigi. L'impianto per la produzione del freddo è costituito da:

- Un compressore;
- Un condensatore;
- Uno scambiatore di calore fra il liquido frigorifero e la salamoia circolante nel circuito esterno;
- Una pompa per la circolazione della salamoia;
- Una torre di raffreddamento per la dissipazione del calore creato dal liquido frigorifero nella fase di compressione.

Trattamenti termici con alte temperature

Generalità

Il trattamento termico ad alte temperature di terreni limoso-argillosi, rappresenta un metodo di rara applicazione negli interventi di consolidamento e stabilizzazione dei versanti. L'elevato costo del combustibile necessario ha limitato moltissimo l'uso di questa tecnica, applicata solamente in zone dove questo è disponibile in grande quantità ed a poco prezzo (gas naturali, gas di scarto ottenuti dalla lavorazione di prodotti petroliferi ecc.).

In Europa, un esempio dell'uso del gas naturale per stabilizzare colate di fango sulla costa bulgara del Mar Nero è riportato da Beles e Stanculescu (1968). Il gas era combusto, mediante bruciatori, in apposite buche di grande diametro scavate nelle argille dando luogo alla formazione di colonne di argilla indurita che agiscono all'interno del terreno circostante come elementi di rinforzo e sostegno (in modo analogo ai pali).

Descrizione e Caratteristiche

Le elevate temperature, prodotte dalla combustione, hanno l'effetto di eliminare l'acqua in eccesso contenuta nel terreno, fino alla sua essiccazione, successivamente di "cuocerlo" a temperature maggiori di 100° - 500°. Il trattamento causa un cambiamento duraturo nella struttura dell'argilla che perde le sue caratteristiche di plasticità, compressibilità e capacità di assorbimento dell'acqua, migliorando sensibilmente le sue proprietà fisico-meccaniche.

Questa tecnica risulta molto efficace come sistema di stabilizzazione di movimenti franosi di tipo superficiale, con superficie di scorrimento poco profonda, come ad esempio colate di fango o di argilla, ma è raramente utilizzata per gli alti costi.

Stabilizzazione e miglioramento di terreni di fondazioni e di pendii in frana mediante la moderna tecnologia della "Torcia al Plasma". messa a punto negli USA. Con questo sistema la torcia viene calata entro i fori di sondaggio di piccolo diametro e sollevata gradualmente fino a raggiungere la superficie. L'elevatissima temperatura della fiamma provoca dei rapidi ed irreversibili cambiamenti delle proprietà e dello stato dei terreni, solidificandoli e formando delle colonne di terreno consolidato. Questa moderna tecnologia consente di superare le limitazioni presenti nell'uso dei metodi di trattamenti termici tradizionali che impiegano combustibili naturali.



Particolare della torcia al plasma

Generalità

Questo tipo di trattamento è stato sperimentato ed applicato con successo a partire dagli anni 60 soprattutto nelle regioni circumpolari artiche (Svezia, Norvegia, Canada, Alaska, Siberia), per la stabilizzazione ed il consolidamento di argille "sensitive" (Quick clays), che sono sedimenti argillosi costituiti da materiale di trasporto glaciale, depositatosi in ambiente marino. Queste sedimenti sono costituiti prevalentemente da minerali argillosi (clorite, mica, illite, caolinite) oltre a quarzo e feldspati, hanno una granulometria molto fine, hanno elevata sensibilità e non possiedono proprietà tixotropiche. Terreni con comportamenti geomeccanici e composizione mineralogiche simili caratterizzano diverse formazioni, costituite prevalentemente da termini argillosi e affioranti sia in Appennino (Argille Scagliose Auct., Argille Varicolori Auct., depositi torbiditici, ecc.) che in alcune zone dell'arco alpino, formate da materiale di origine glaciale o proveniente dall'alterazione di rocce magmatiche e metamorfiche. In Italia interventi di stabilizzazione con questo trattamento sono stati realizzati recentemente in alcuni tratti di importanti arterie stradali, interessati da movimenti franosi in terreni argillosi.

Descrizione e Caratteristiche

E' noto che i terreni argillosi, formati in prevalenza da minerali argillosi sono stabili fintanto che la concentrazione dei sali, disciolti entro le soluzioni acquose interstiziali dei pori, sono molto elevate. Qualora la concentrazione degli elettroliti nell'acqua interstiziale si abbassa per apporto di acque dolci di varia origine (meteoriche percolanti e/o di falda circolanti nel sottosuolo), si possono verificare delle modificazioni significative delle caratteristiche chimico-fisiche e microtessiturali, con conseguente diminuzione della resistenza alla deformazione ed aumento della sensibilità al rimaneggiamento, trasformando l'argilla da uno stato coerente ad uno semifluido. L'aggiunta di additivi chimici nel terreno consente di ricostituire l'originaria microstruttura dell'argilla, secondo una disposizione spaziale più stabile, ottenendo in tal modo un miglioramento delle caratteristiche di consistenza e resistenza del terreno.

Tra i vari tipi di sale sperimentati in questo tipo di trattamento, il cloruro di potassio (KCl) è quello che ha dato i migliori risultati ed è quindi più frequentemente impiegato negli interventi di stabilizzazione del terreno.

L'inserimento e la diffusione del sale nel terreno avviene mediante "pali", di circa 10-15 cm di diametro, dello stesso sale, inserito entro le colonne di perforazione in forma granulare allo stato secco. Le perforazioni sono spinte nel terreno in frana fino a raggiungere il substrato stabile e più resistente (fino a 15-20 m). Un altro sistema, di più recente applicazione, consiste nel miscelare il sale all'argilla entro il foro di carotaggio contemporaneamente alle operazioni di scavo.

Il processo di diffusione del sale nel terreno è innescato dalle acque meteoriche e da quelle della falda circolanti nel sottosuolo. Questo processo è molto lento ed occorrono almeno 10-20 mesi perché produca significativi miglioramenti delle proprietà geotecniche e meccaniche del terreno.

La scelta e la progettazione di questo tipo di trattamento devono essere fatte sulla base dei risultati delle indagini in sito e delle analisi in laboratorio eseguite sulle argille, volte a determinare soprattutto la natura mineralogica dei componenti, le loro caratteristiche chimico-fisiche ed i principali parametri geotecnici. Le indagini devono, inoltre, permettere di conoscere con esattezza lo spessore della massa in movimento, la profondità e la morfologia della superficie di scorrimento, la presenza, il tipo e la localizzazione di eventuali falde poco profonde e la superficie da trattare.

Aspetti ambientali

L'impatto estetico paesaggistico di questo tipo di trattamento è contenuto, occorre tuttavia mettere in risalto la possibilità di inquinamento delle acque di falda, dovuta all'immissione dei sali nei fori di perforazione.

Applicazioni

Il trattamento chimico mediante sali è impiegato soprattutto negli interventi di stabilizzazione e consolidamento dei versanti in frana, costituiti da terreni a prevalente comportamento coesivo, contenenti una significativa percentuale di minerali argillosi quali il "complesso caotico" o le "argille varicolori" affioranti in numerose zone del nostro Appennino. Trattandosi di un procedimento costoso l'uso di questa tecnica è limitato principalmente agli interventi di consolidamento di movimenti franosi che interessano opere civili di notevole importanza.

Generalità

L'*elettroosmosi* e l'*elettrosilicatazione* sono due trattamenti elettrici impiegati per il drenaggio ed il consolidamento di terreni saturi, a comportamento coesivo, molto plastici e poco permeabili. Questi metodi si basano rispettivamente sull'effetto polarizzante della corrente elettrica sull'acqua d'imbibizione, che determina il suo passaggio da un polo positivo a quello negativo (elettroosmosi), e sugli scambi ionici che avvengono tra i terreni argillosi e le soluzioni di silicato di sodio, immesse nel terreno, o gli anodi di alluminio, determinando un effetto di solidificazione dei terreni argillosi.

Le prime applicazioni furono sperimentate da Casagrande (1944), in Canada, per un importante intervento di consolidamento di una scarpata in argilla. In precedenza Casagrande, effettuando prove di laboratorio su argille, aveva scoperto per caso che l'applicazione di un potenziale fra due punti di un provino aveva l'effetto di provocare una migrazione dell'acqua contenuta da un polo all'altro, migliorando sensibilmente le caratteristiche di consistenza e di coesione del materiale. In Italia si hanno notizie dell'uso di questa tecnica di drenaggio e consolidazione nei lavori eseguiti dalla società idroelettrica Sarca Molveno, nel 1950, per la realizzazione dell'impianto di S. Massenza (da pubblicazione dello Studio Italiano di Grafica Mineraria di Piacenza). Altre importanti applicazioni di questa tecnica di stabilizzazione sono state fatte, più recentemente, nei lavori di consolidamento di un vasto movimento franoso in atto nella zona di Pariana (Massa), programmato nel 1969 da parte del Ministero dei Lavori Pubblici.

In tutti i casi, l'applicazione di questa tecnica registrò un miglioramento complessivo delle caratteristiche meccaniche dei corpi argillosi trattati.

Descrizione e Caratteristiche

Elettroosmosi

L'elettroosmosi è realizzata installando un certo numero di elettrodi nel terreno da stabilizzare e, quindi, facendo passare una corrente elettrica continua tra loro. L'acqua contenuta nei pori si carica positivamente e si sposta dall'anodo verso il catodo. Il catodo è generalmente formato da un tubo di metallo forato (pozzo catodico), dove l'acqua penetra e può essere successivamente pompata via. L'anodo può essere costituito da qualsiasi tipo di barra metallica. La configurazione tipica di un impianto di stabilizzazione mediante elettroosmosi prevede una profondità media degli anodi di circa 1,5 - 2,0 m nel terreno da stabilizzare, una spaziatura dei pozzi catodici variabile da 5 a 9 m, con profondità che possono raggiungere anche i 20 - 25 m. Questa tecnica di stabilizzazione è molto costosa e richiede una grande quantità di energia elettrica, con consumi variabili da 1 a 10 kW/m² di terreno stabilizzato.

Elettrosilicatazione

Con il termine "elettrosilicatazione" si definisce il processo di scambio ionico che si verifica al passaggio della corrente, utilizzando anodi in alluminio o introducendo soluzioni di silicato di sodio agli anodi. Il passaggio della corrente continua determina il movimento della soluzione chimica dagli anodi verso il catodo, con scambio di ioni Na e K, presenti nei minerali argillosi, con ioni Al e H dell'anodo o della soluzione. Questo processo causa un cambiamento delle caratteristiche fisico-meccaniche delle argille da consolidare, con diminuzione della loro plasticità ed aumento della consistenza e della coesione.

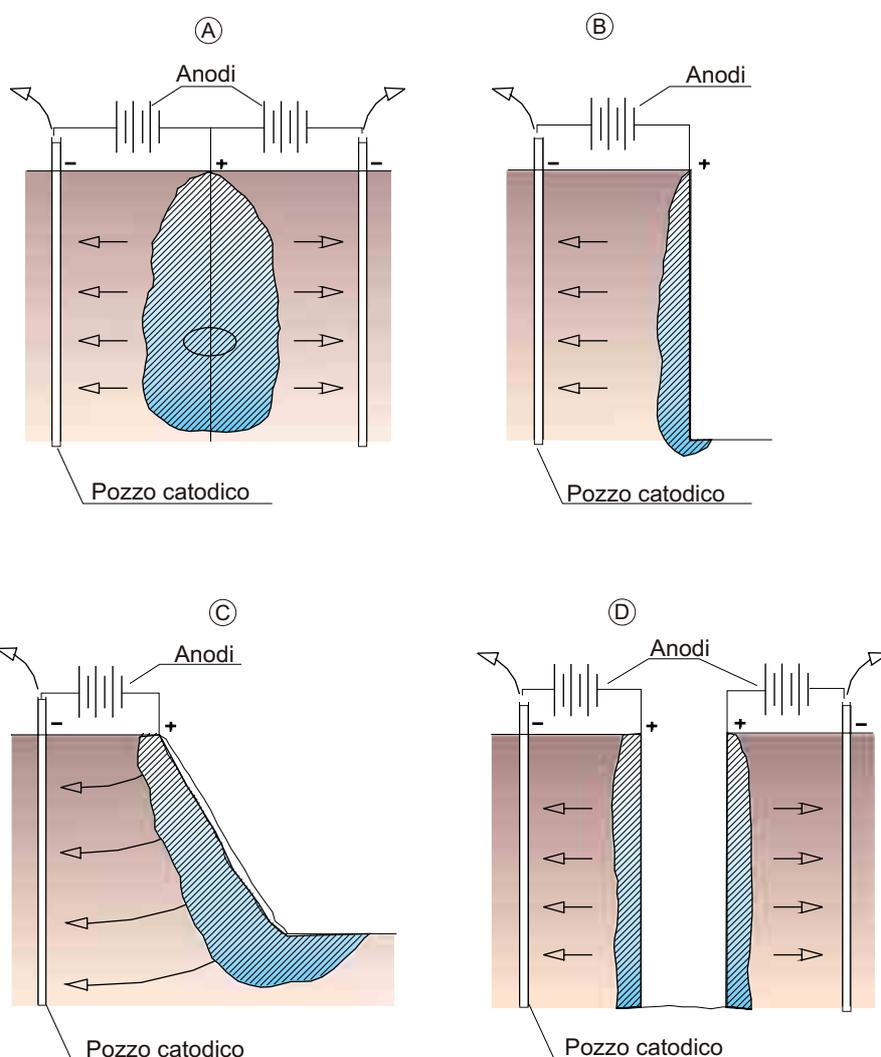
Aspetti ambientali

Queste tecniche hanno un impatto molto contenuto, con scarse ripercussioni sia dal punto di vista paesaggistico che da quello ecologico-naturalistico sull'ambiente circostante, dato che non comportano grossi lavori di scavo, perforazioni o impieghi di attrezzature pesanti, inoltre le soluzioni normalmente impiegate non sono tossiche.

Applicazioni

Le tecniche di elettroosmosi e/o elettrosilicatazione risultano abbastanza efficaci nel drenaggio e nel consolidamento dei terreni limoso-argillosi saturi, contenenti una significativa percentuale di minerali argillosi "attivi" (minerali argillosi rigonfianti, con elevata capacità di scambio ionico e grande superficie specifica) tipo ad esempio Smectite. Tuttavia, l'alto costo ne limita l'uso solo dove esiste la necessità di consolidare aree in frana che interessano opere civili ed industriali di notevole importanza, o per permettere ad esempio l'esecuzione di scavi di gallerie in terreni a comportamento coesivo sede di falde acquifere.

Trattamento elettroosmotico per il drenaggio e la stabilizzazione di terreni limoso-argillosi, le frecce indicano la direzione del flusso d'acqua e l'area a tratteggio obliquo la porzione di terreno stabilizzato. (A) Scavo di tunnels attraverso terreni limoso-argillosi saturi. (B) Drenaggio alla spalle di paratie o di palancole metalliche negli scavi in terreni sotto falda per diminuire le spinte del terreno. (C) Stabilizzazione di scarpate naturali o artificiali in terreni limoso-argillosi poco consistenti. (D) Stabilizzazione del terreno circostante cassoni affondati in terreni poco consistenti.



Bibliografia

- A.G.I., Commissione AGI per la Normativa Geotecnica: "Raccomandazioni sui pali di fondazione". Questioni di Geotecnica n. 3, Roma, giugno 1982.
- AA.VV.: "Ancoraggi nei terreni e nelle rocce. Raccomandazioni". AICAP, maggio 1983.
- AA.VV.: "Manuale tecnico di "Ingegneria Naturalistica". Regione Emilia Romagna, Assessorato all'Ambiente, Regione del Veneto, Assessorato Agricoltura e Foreste, Bologna, 1993.
- AA.VV.: "Repertorio Italiano dei Geosintetici". AGI IGS, Seconda edizione 1998/1999, BE MA Editrice, Milano.
- AA.VV.: "Riassunti delle comunicazioni atti del 8° convegno sul tema: Geosintetici nelle costruzioni di terra, ricerche ed applicazioni". Anno 1° nuova serie: L'Ingegnere e L'architetto, n. 9, Bologna 12/1994.
- AA.VV.: "Riassunti delle comunicazioni atti del convegno Il consolidamento del suolo e delle rocce nelle realizzazioni in sotterraneo". Gallerie e Grandi Opere Sotterranee, n.3. 2° semestre 1990.
- AA.VV.: "Sistemazioni in ambito fluviale". Quaderni di Ingegneria Naturalistica. Il Verde Editoriale., 1995.
- Aquater S.p.A.: "Settori lavori: Civil Works Departement". Brochure documentaria, S. Lorenzo in Campo (PS).
- Associazione Geotecnica Italiana Gruppo di Lavoro sullo "Spritzbeton": "Rapporto sull'impiego del calcestruzzo proiettato in Italia". Ass. Geot. It., dicembre 1975.
- Bernè C. et al.: "Congelamento del terreno ed opere di sostegno per uno scavo sotto falda". Rivista Italiana di Geotecnica, gennaio marzo 1979.
- Bètoconcept Italia: "Una gamma di elementi modulari per muri di sostegno". Brochure varie, Roma.
- Bevilacqua V.: "Su alcune applicazioni dei procedimenti per il miglioramento delle caratteristiche dei terreni". Rivista Italiana di Geotecnica vol. 5, 1971.
- Bianco B.: "Il consolidamento della frana di Fontevigge in Perugia mediante pozzi drenanti. Aspetti tecnico esecutivi". Ass. Geot. It. Atti del XVI Conv. Naz. di Geot. Vol. I., pp. 101, Bologna, 14 16 maggio 1986.
- Casadio M., Elmi C.: "Il manuale del geologo". Pitagora editrice, Bologna 1997.
- Cestelli G.: "Geotecnica e tecnica delle fondazioni". Edit. Hoepli, Milano, 1981.
- Clerici A., Valsecchi F.: "Indicazioni per la redazione degli studi geologico tecnici a supporto della progettazione preliminare di opere di difesa dalla caduta massi". Geologia Tecnica n. 1, Roma, gennaio marzo 2000.
- Collu A.: "Interventi di consolidamento mediante l'impiego di tiranti e micropali". Ass. Geot. It. Atti del XVI Conv. Naz. di Geot. Bologna, 14 16 maggio 1986, Vol. II., p. 217.
- Conversini P., Martini E. et al.: "La rupe di Orvieto e il colle di Todi: due casi di città fragili". Atti del 1° Convegno del gruppo Nazionale di Geologia Applicata "La città fragile in Italia", Naxos in: Geologia Applicata ed Idrogeologia, Vol. XXX., pp.215.- 229, 1995.
- Croce A.: "Miglioramento delle caratteristiche dei terreni; criteri generali di intervento". Rivista Italiana di Geotecnica vol. 5, 1971.
- Del Simone B.: "Consolidamento della frana in località Boscaccio. Comune di Sondalo - Sondrio". Quarry and Construction , febbraio 1992.
- Dogliani A.: "Muri cellulari a gabbia: un sistema ecologico di realizzare opere di sostegno e contenimento delle terre". Quarry and Construction, giugno 1989.
- Falzone S.a.S.: "Brochure varie". Torino.
- Fantini P., Roberti R.: "Risanamento di un pendio in frana P. mediante L'utilizzo di opere di sostegno in terra rinforzata". Quarry and Construction n.10, ottobre 1991.
- Geo Ecostrutture S.r.l.: "Costruiamo muri in armonia con la natura". Brochure varie, Alba (CN), 1999.

Grasso P., Eusebio A. et al.: "*Criteri di studio, analisi e progettazione degli interventi di messa in sicurezza da movimenti gravitativi degli abitati a rischio in vallate alpine*". Atti del 1° Conv. del gruppo Nazionale di Geologia Applicata "La città fragile in Italia", Naxos in: Geologia Applicata ed Idrogeologia, Vol. XXX., pp.197 - 214, 1995.

Greenlab S.r.l.: "Ricerca sull'applicabilità delle tecniche di ingegneria naturalistica sul territorio (INATER)". Trieste

Hoek E., Bray Jw.: "*Rock slope engineering*"- 3rd ed., IMM, Londra.

Hoek E., Wood D., Pelizza S.: "*Armaturo degli scavi in roccia*". Società Italiana Gallerie (SIG) Gallerie e Grandi Opere Sotterranee n. 2 2° sem. 1990.

I.P.I.- Industria Prefabbricati Italiana S.p.A.: "*Griglie Spaziali, Muri cellulari new, Le Montagnole*" Brochure varie, Pesaro.

Italdreni Geotecnologie per l'ambiente: "*Sistemazione versanti e opere idrauliche*". Brochure varie, S.Polo d'Enza (RE).

Koerner Robert M.: "*Construction and geotechnical methods in foundation engineering*". McGraw Hill Company, New York 1985.

L. J., Jr., Circeo, Mayne P. W.: "*In situ thermal stabilization of road and airfield foundation soils using Plasma Arc Technology*". Forth international conference on bearing capacity of roads and airfields Proceedings., july 17 21 1994, Minneapolis, Minnesota (USA), Vol. 2, pp.899 916.

Lancellotta R.: "*Geotecnica*". edit. Zanichelli, Bologna, 1987.

Lizzi F.: "*Practical engineering in structurally complex formations (The in situ reinforced earth)*". Ass. Geot. It. "The Geotechnics of structurally complex Formations". Capri 1977.

Maccaferri S.P.A.: "*Gabions*". Brochure varie, Bologna, 1995 - 1998.

Maccaferri S.P.A.: "*I materiali ecocompatibili*". Brochure documentaria, Bologna, 1998.

Maccaferri S.P.A.: "*Per la salvaguardia e il recupero dell'ambiente*". Brochure documentaria, Bologna, 1994.

Maccaferri S.P.A.: "*Soluzioni per l'ambiente*". Brochure documentaria, Bologna, 1997.

Maccaferri SpA.: "*Analisi prezzi di capitolato per formazione opere in gabbioni, materassi reno, terramesh, geomac, italmacnet*"., 1994.

Matteotti G., De Santis M., Kerisel J.: "*Orientamenti pratici del progetto delle opere di fondazione e di sostegno*". SGEditioni, Padova, febbraio 1991.

Mazzalai P., Vuillermin M.: "*Definizione e protezione delle aree esposte a rischio di caduta massi: un esempio operativo*"- Geologia Tecnica e ambientale n. 3, Roma, luglio settembre 1995.

Meardi G.: "*Fondazioni su pali*". Ed., Clup, Milano, 1983.

Mercogliano F.: "*Le iniezioni per il miglioramento delle caratteristiche dei terreni*". Rivista Italiana di Geotecnica vol. 5, 1971.

Ministero dell'Ambiente: "*Linee guida per capitolati speciali per interventi di ingegneria naturalistica e lavori di opere a verde*". Roma, Settembre 1997.

Mongiovi L., Bosco G.: "*La progettazione delle trincee drenanti per la stabilizzazione dei pendii*". Ass. Geot. It. Atti del XVI Conv. Naz. di Geot. Bologna, 14 16 maggio 1986, Vol. II., pp. 133 139.

Onofri R., Candian C.: "*Indagine sui limiti di massima invasione dei blocchi rocciosi franati durante il sisma del Friuli del 1976.*

Considerazioni sulle opere di difesa." - Regione autonoma del Friuli Venezia Giulia, Università degli Studi di Trieste, 1979.

Paronuzzi P., Artini E.: "*Un nuovo programma in ambiente Windows per la modellazione della caduta massi*". Geologia Tecnica e ambientale n. 1, gennaio marzo 1999.

Paronuzzi P., Coccolo A.: "*Impatto di blocchi contro barriere paramassi sui versanti naturali (Friuli)*". Geologia Tecnica e ambientale n. 4, ottobre dicembre 1994.

Paronuzzi P.: "*Criteri di progettazione dei rilevati paramassi*". Geologia Tecnica, n. 1/1989.

Regione Lazio Assessorato opere e reti di servizi e mobilità Autorità dei bacini regionali: "Relazione tecnica allegato 3: Quaderno delle opere tipo" Roma, 1998.

Regione Liguria Assessorato Edilizia, Energia e difesa del suolo: "Opere e tecniche di ingegneria naturalistica e recupero ambientale" Microart's S.p.A., Recco (Ge).

Regione Lombardia Gruppo di lavoro interassessorile per la definizione di normative tecniche e programmi di formazione professionale in materia d'ingegneria naturalistica direttiva: "Quaderno delle opere tipo di ingegneria naturalistica". 1° supplemento straordinario al n.19 - Bollettino Ufficiale della Regione Lombardia, Milano, maggio 2000.

Regione Lombardia - Staff di coordinamento operativo per la difesa del suolo: "Piano per la difesa del suolo ed il riassetto idrogeologico della Valtellina "Quaderno delle opere tipo". Milano, settembre 1993.

Regione Piemonte assessorato all'ambiente: "Linee Guida per i lavori di sistemazione sui dissesti franosi per scivolamento planare lungo superfici di strato nelle langhe cuneesi". In "Eventi Alluvionali in Piemonte" - Torino, 1998.

Righi P.V., Marchi G., Dondi G.: "Stabilizzazione mediante pozzi drenanti di un movimento franoso nella città di Perugia". Ass. Geot. It. Atti del XVI Conv. Naz. di Geot. Bologna, 14-16 maggio 1986, Vol. II., pp. 167-177.

Rodio S.p.A.: "Tecniche". Brochure varie, Roma.

Sansoni R.: "Cedimenti e consolidamenti di Fondazioni". Ed. Hoepli Milano, 1989.

Sansoni R.: "Pali e fondazioni su pali". IV ed., Hoepli Milano, 1988.

Sauli G., Siben: "Capitolato AIPIN". Voci di capitolato opere di ingegneria naturalistica dell'A.I.P.I.N., 1995.

Sauli G.: "Manuale tecnico di ingegneria naturalistica" in atti del convegno "Giornata di studio sull'applicazione delle tecniche di basso impatto ambientale nella regione Lazio". Roma 10 marzo 2000.

Schiechl H. M., Stern R.: "Bioingegneria forestale, basi, materiali da costruzione vivi, metod". Edizioni Castaldi. Feltre, 1991.

Schiechl H. M., Stern R.: "Ingegneria naturalistica, manuale delle opere in terra", Edizioni Castaldi. Feltre, 1992.

Seic SpA: "Sistemi e tecnologie per l'edilizia, la geotecnica e l'ingegneria ambientale". Brochure varie, Trieste.

Sembenelli P., Gambardella L. et al.. "Impiego del terreno rinforzato in grandi strutture autostradali". Quarry and Construction n.10, ottobre 1991.

SNAM: "Direzione Costruzioni, Interventi di ripristino e stabilizzazione superficiale dei terreni mediante l'impiego di specie legnose e piantagioni varie". 1989.

T.A.I. - Società TerreArmée Internationale: "Les applications industrielles de la Terre armée". Brochure documentaire, 1989.

TAI TerraArmata Italia SpA.: "Muri di contenimento in terra armata". Brochure documentaria, Roma.

TAI Terra Armata Italia SpA.: "Soluzioni per l'inserimento nell'ambiente The reinforced Earth for The environment". Brochure documentaria, Roma.

Tenax SpA Divisione Geosintetici: "Tenax: uomo, tecnologia, ambiente". Brochure varie, Viganò (LC).

Tesio G: "Il calcestruzzo proiettato: produzione e controllo, proposta per una normativa". Società Italiana Gallerie (SIG) Gallerie e Grandi Opere Sotterranee n. 1 1° sem. 1989.

Tornaghi R.: "Controlli e bilanci analitici dei trattamenti colonnari mediante jet grouting". Rivista Italiana di Geotecnica, luglio-settembre 1993.

Tornaghi R.: "Controlli e bilanci analitici dei trattamenti colonnari mediante jet grouting". Rivista Italiana di Geotecnica, luglio-settembre 1993.

Tornaghi R.: "Trattamento colonnare dei terreni mediante gettiniezione (jet grouting)". XVII Convegno nazionale di Geotecnica, Taormina, 26-28 aprile, 1989.

Trevi S.p.A. "Tecnologie". Brochure varie, Cesena.

Valore C., Speciale G.: *"L'efficacia delle gallerie drenanti per il controllo delle pressioni neutre nei pendii"*. Ass. Geot. It. Atti del XVI Conv. Naz. di Geot. Bologna, 14-16 maggio 1986, Vol. II., pp. 203-222.

Van den Borre Francesco: *"Opere di ingegneria naturalistica. Impresa opere a verde e arredo urbano. Architettura del paesaggio. Macchine per idrosemina"*. Brochure varie, Treviso.

Veniale F., Setti M. e Tortelli M.: *"Stabilizzazione e consolidamento di terreni argillosi mediante diffusione di sali"*. Ass. Geot. It. Atti del XVI Convegno Nazionale di Geotecnica Bologna, 14-16 maggio 1986.

Zaven D.: *"Pali e fondazioni su pali"*. Ed., C.E.L.I., Bologna, 1973.

Zeh H.: *"Tecniche di Ingegneria naturalistica"*. Rapporto di studio Nr.4, 1993 - Il Verde Editoriale, Milano, 1997