

## Opere di sostegno

### Generalità

**L**e 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

### 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).

Terrazzamento con mura megalitiche realizzato dagli antichi Inca a sostegno della fortezza di Sacsayhuaman, presso Cuzco, Perù. I resti di alcune mura ciclopiche "a secco" si rinvengono in numerose aree archeologiche, come ad esempio le mura pelasgiche degli Ernici ad Alatri presso Frosinone.



## **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.

Antichi terrazzamenti agricoli realizzati con muri in pietra a secco dagli Incas presso Pisac, Perù.



## 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.

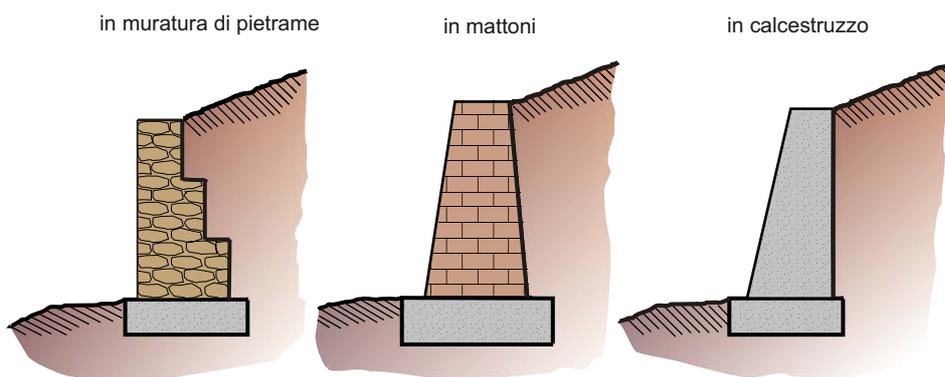
Esempi di tipi di muri di sostegno a gravità.

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**

**Q**ueste 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.

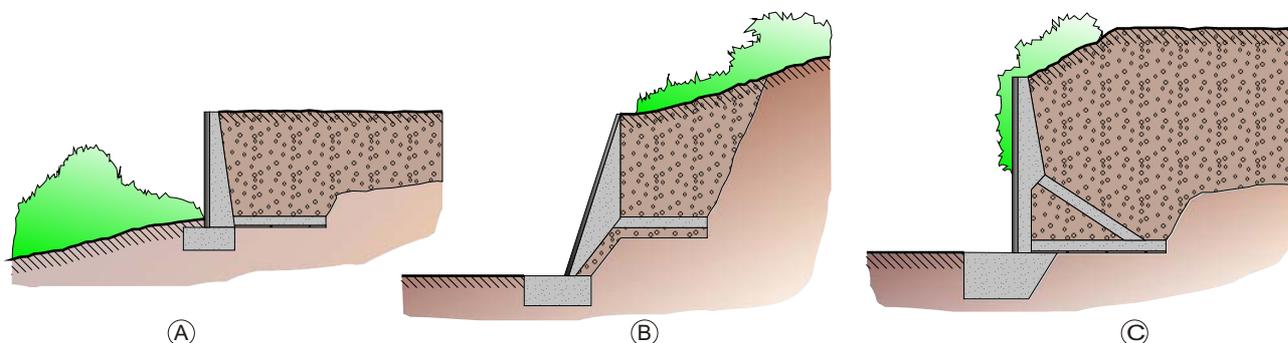
I muri in cemento armato sono realizzati in cemento gettato in opera o con elementi prefabbricati.

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, vibrator 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

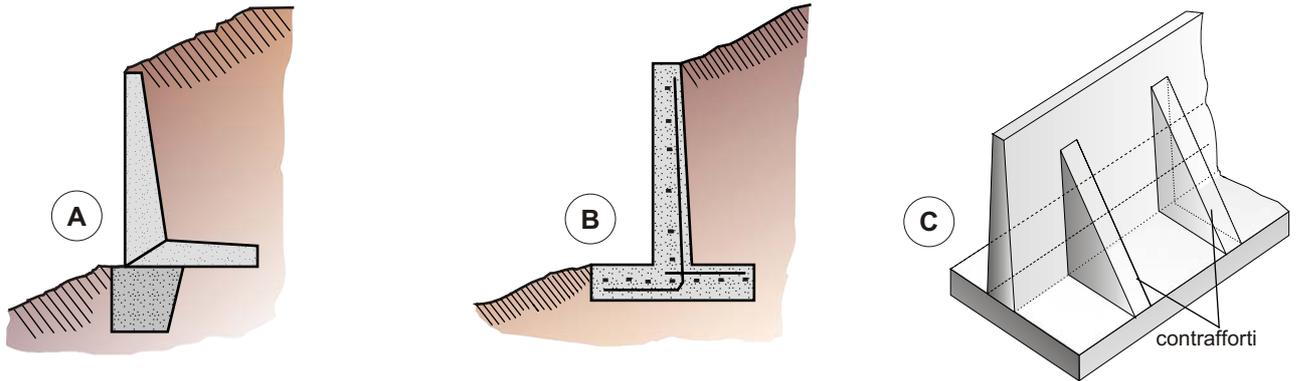
I muri in cemento armato sono impiegati per stabilizzare o sostenere terreno o altro materiale con altezze superiori ai 3 metri.

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.

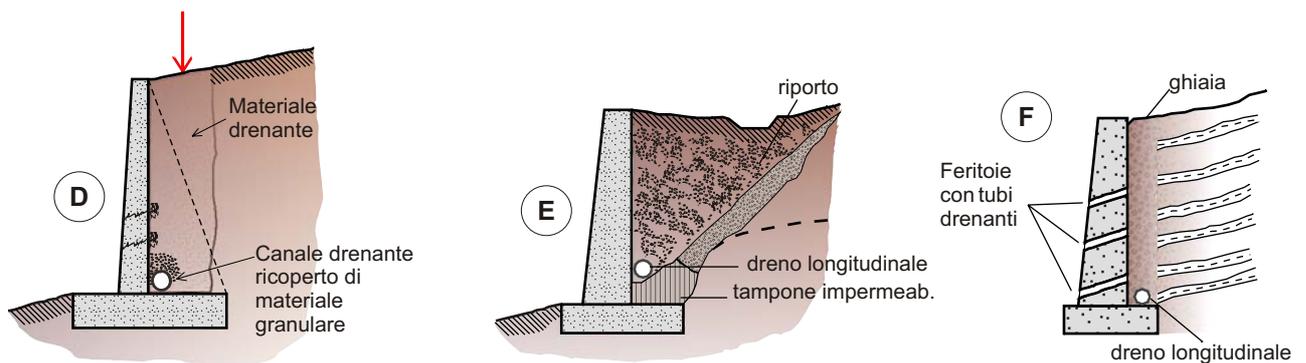
Muro di sostegno in c.a. per il contenimento di una scarpata a difesa di una strada soprastante e protezione della sponda dall'erosione del corso d'acqua. Il muro è stato realizzato mediante getto in opera mentre il paramento è posticcio in pietrame sbizzato a mano.





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:

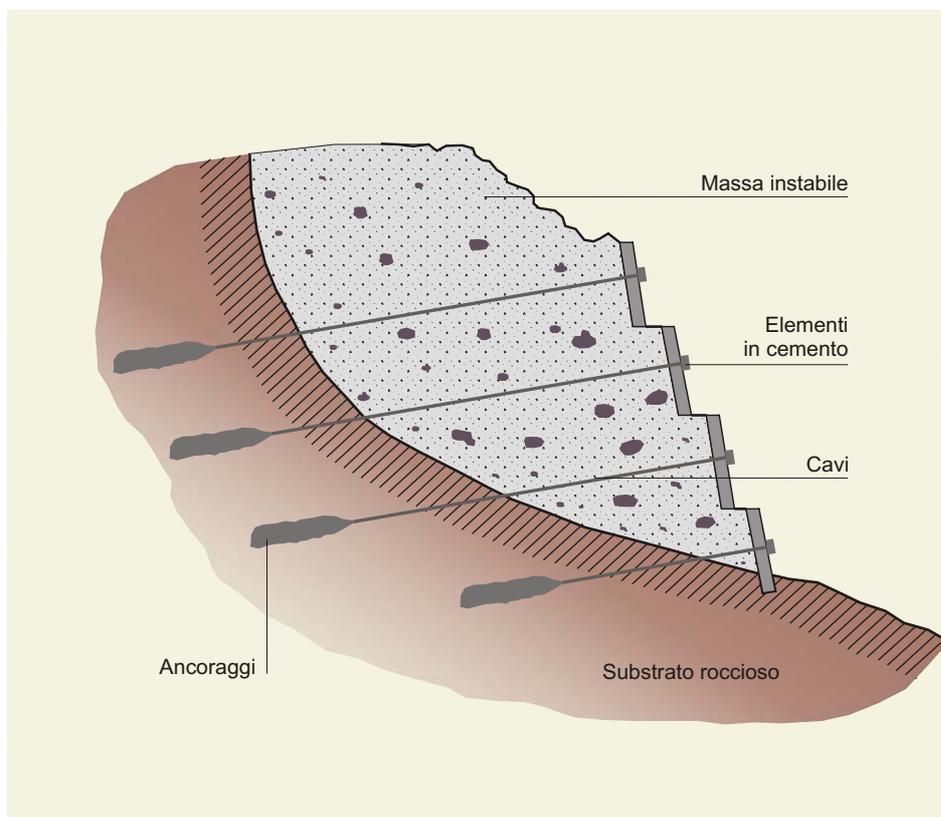
- D) Riempimento con riporto di materiale granulare drenante (pietrisco, ghiaia e sabbia pulita), feritoie con tubi drenanti, tubo drenante longitudinale, coperto con materiale granulare, posato lungo la base del muro.
- E) Formazione di uno strato inclinato di materiale granulare drenante posto a diretto 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.



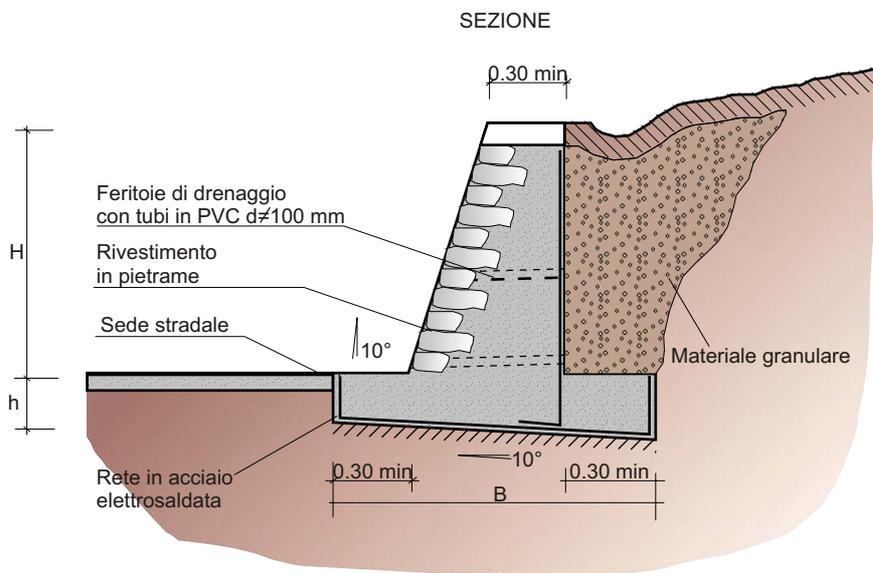
Stabilizzazione di una scarpata mediante delle piastre in cemento armato ancorate con tiranti nella parte stabile dell'ammasso roccioso.



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 casseratura 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 pietra sbazzata 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

**L**e 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.

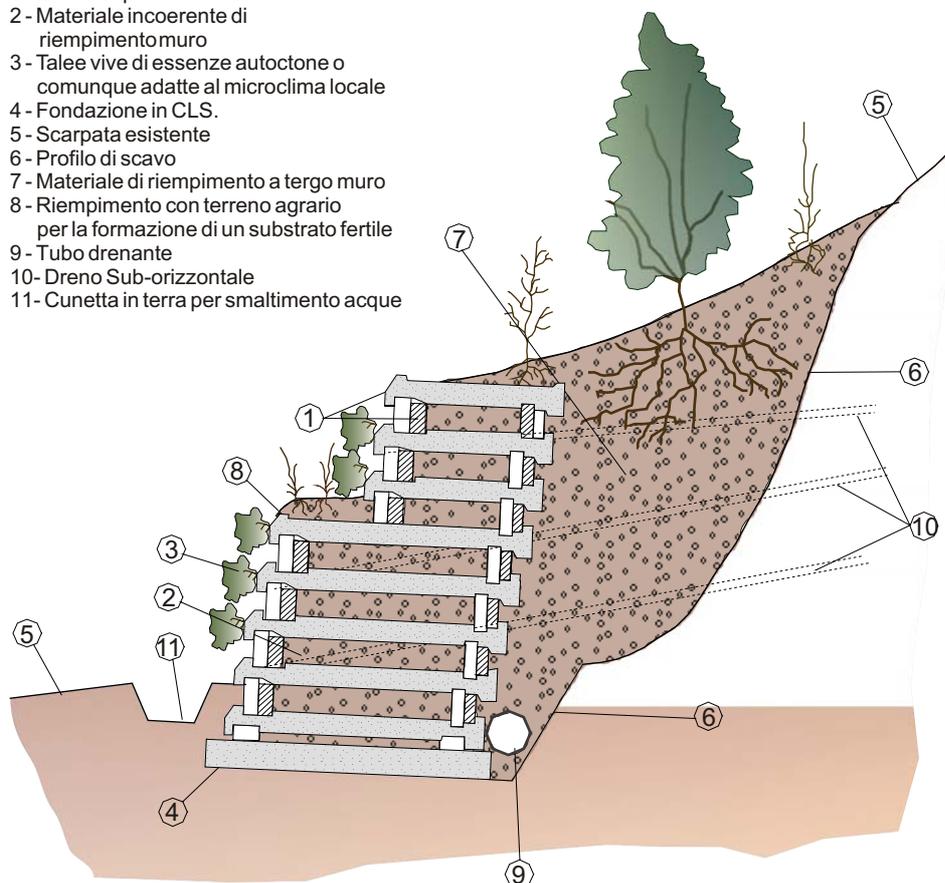
I muri con elementi prefabbricati in legno sono quelli che meglio si inseriscono nel contesto estetico paesaggistico degli ambienti montani boscosi.

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 - Talee 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.



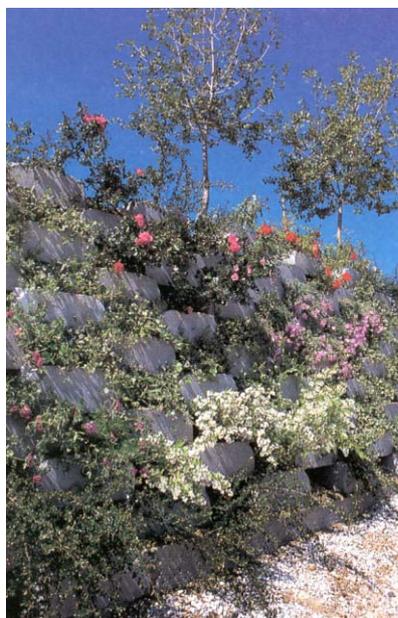
Impiego di muri cellulari come opere di protezione delle sponde dall'erosione fluviale nell'ambito degli interventi per la sistemazione idrogeologica dei versanti dissestati. In questi casi il paramento esterno è formato da elementi antiurto particolarmente rinforzati.



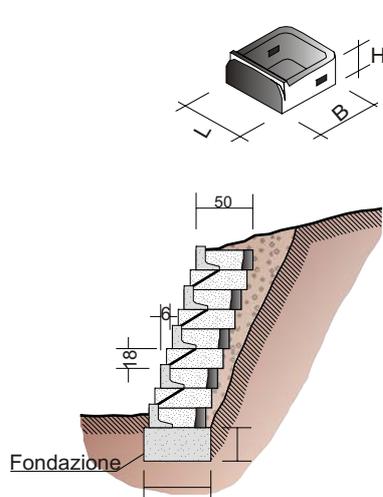
Consolidamento e ripristino ambientale di un versante prospiciente un centro abitato. Il versante è stato stabilizzato mediante la realizzazione di una serie di terrazzamenti sostenuti da muri cellulari, aventi la funzione di contenimento e di drenaggio del terreno a monte. Per migliorare l'efficienza 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.



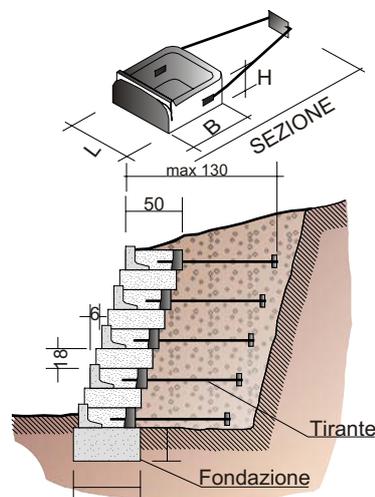
Impiego di muri cellulari rinverditici come opere di rivestimento e di sostegno di scarpate artificiali o naturali. La tipologia mostrata in figura è formata da elementi prefabbricati in cemento armato in forma prismatica rettangolare, disposti a file alternate in modo da lasciare degli spazi vuoti, 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 compatto.



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



SEZIONE MURO  
SENZA TIRANTE



SEZIONE MURO  
CON TIRANTE

### 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.

**N**egli 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 galvanne 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 protetto 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.

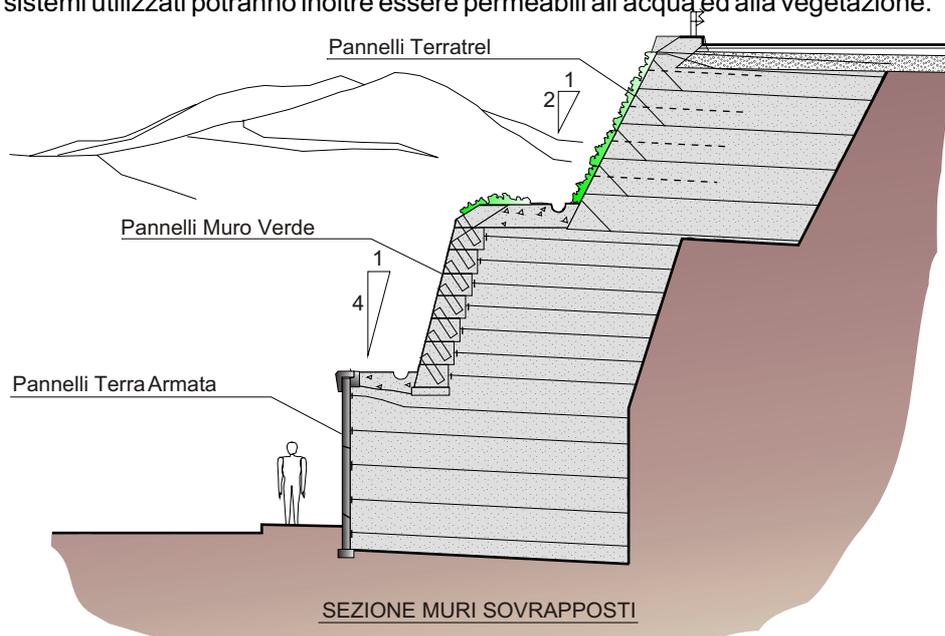
I "Muri Terrarel", realizzati con una tecnologia che si ispira al principio delle terre armate utilizzando come elemento di rinforzo i geosintetici, hanno la duplice funzione di conferire alla struttura la necessaria stabilità statica ed al tempo stesso di formare il paramento frontale.

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

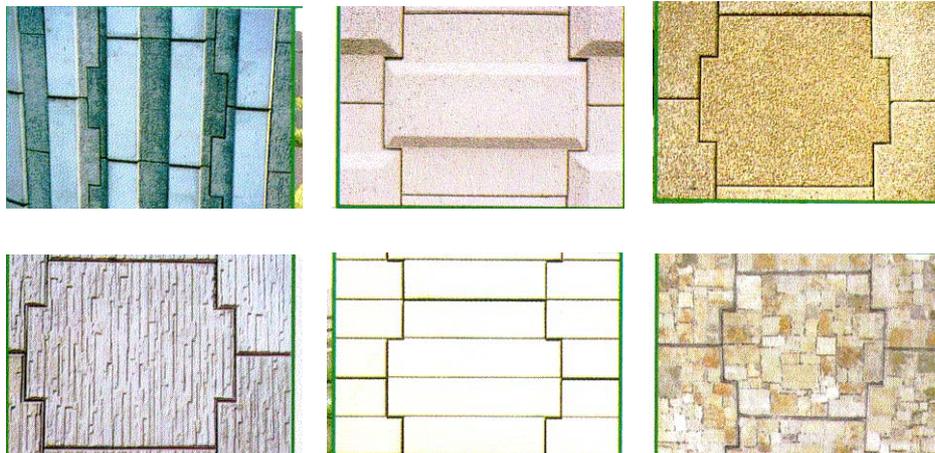
**L**e opere di sostegno in terre rinforzate rispondono bene all'esigenza, sempre più sentita, di coniugare l'efficacia tecnico-funzionale con la necessità di mitigare il più possibile l'impatto sull'ambiente circostante sia dal punto di vista estetico paesaggistico che da quello ambientale.

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"

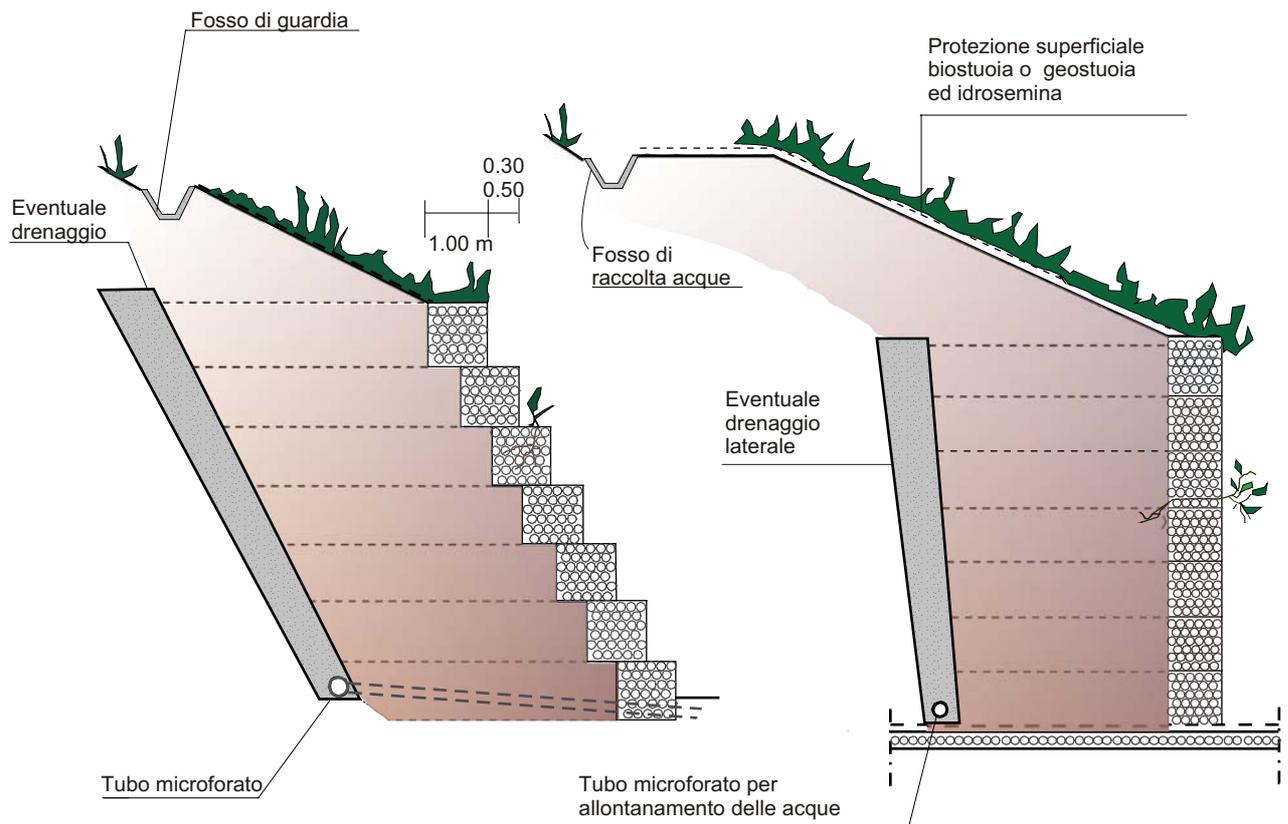


Sezione tipica delle opere di sostegno della autostrada A40, Francia.

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.

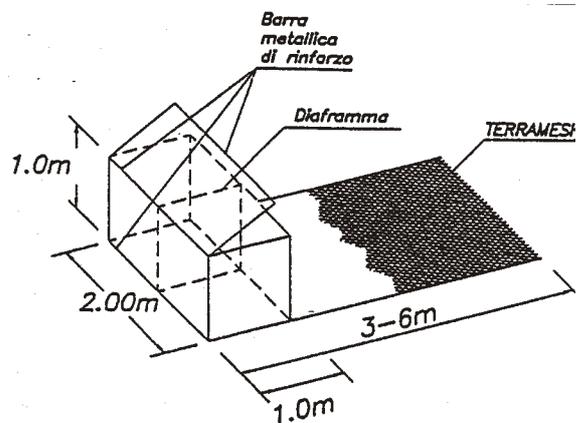
L'opera è stabilizzata da una serie di tiranti ancorati nello strato roccioso.



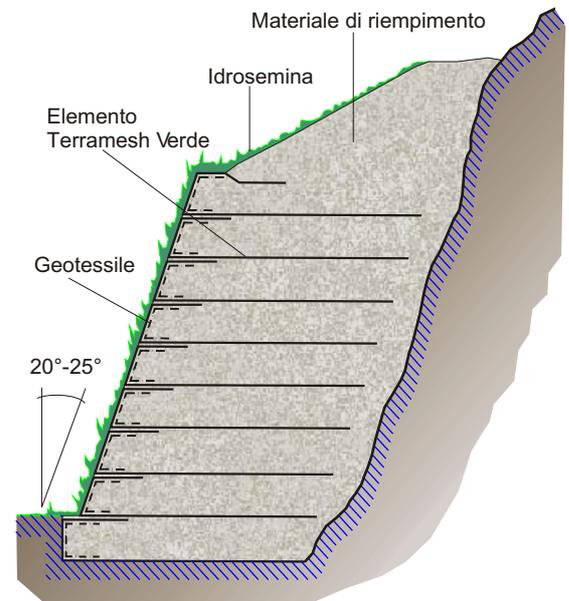


Muri di sostegno realizzati col sistema "Terramesh": alla funzione di muro di sostegno a gravità viene accoppiata quella di rinforzo del terreno a tergo. Il paramento in gabbioni può essere a gradonata esterna o verticale. Queste strutture hanno una buona capacità drenante, tuttavia in alcuni casi per 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.

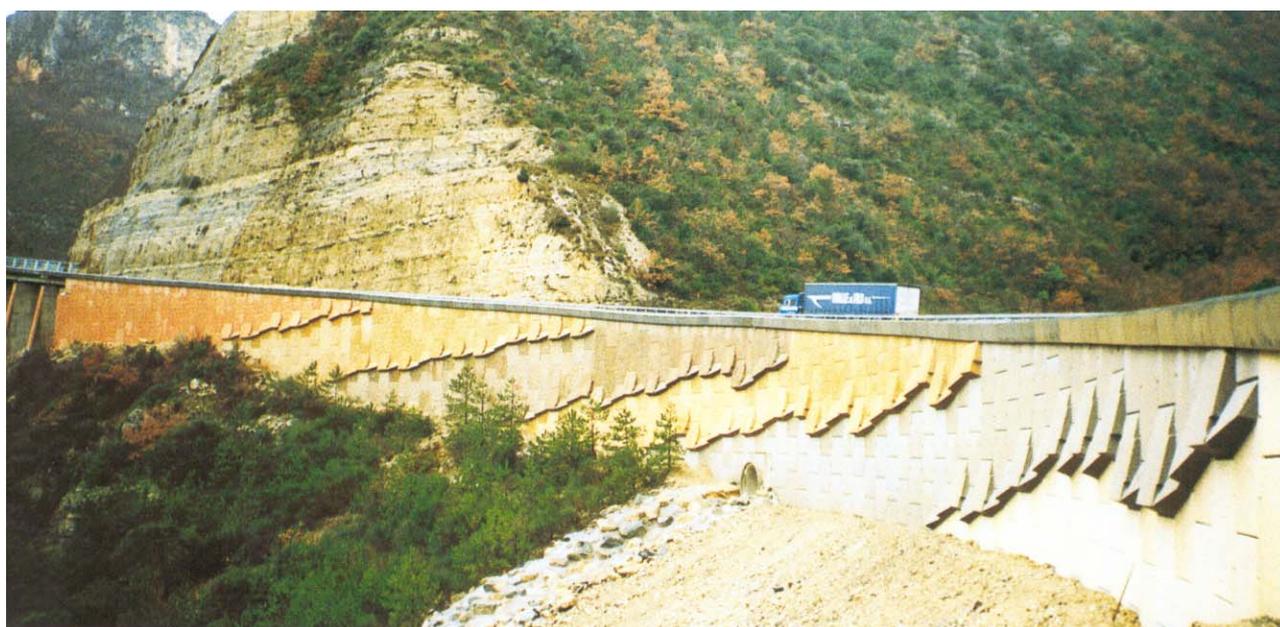


## Applicazioni

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 sottoscarpa 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 fratturata, 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**

**L**e 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**

**L**a 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).

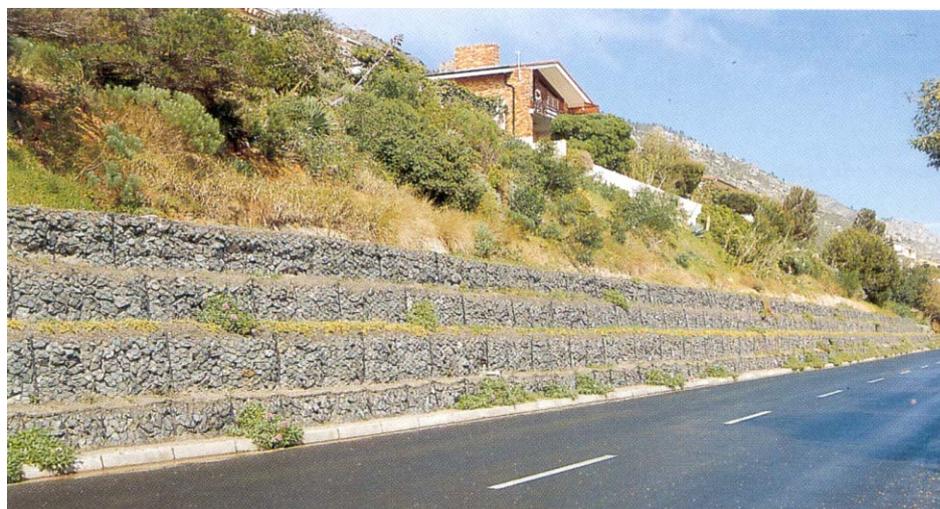
Le gabbionate sono delle strutture permeabili, resistenti ed allo stesso tempo molto flessibili in grado di resistere, senza gravi deformazioni dei singoli elementi, ad assestamenti e/o cedimenti del piano di posa o del terreno a tergo dovuti a fenomeni erosivi o a fenomeni franosi, o a scosse sismiche.

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

**L**e 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.

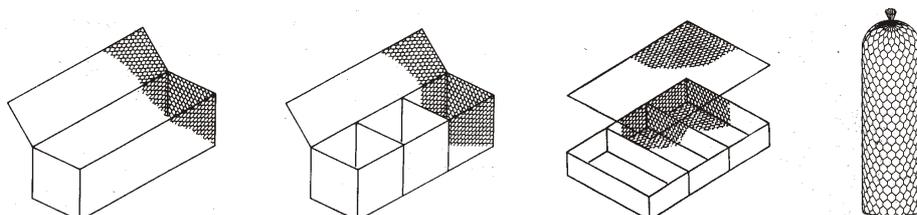
## Applicazioni

**L**e 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.

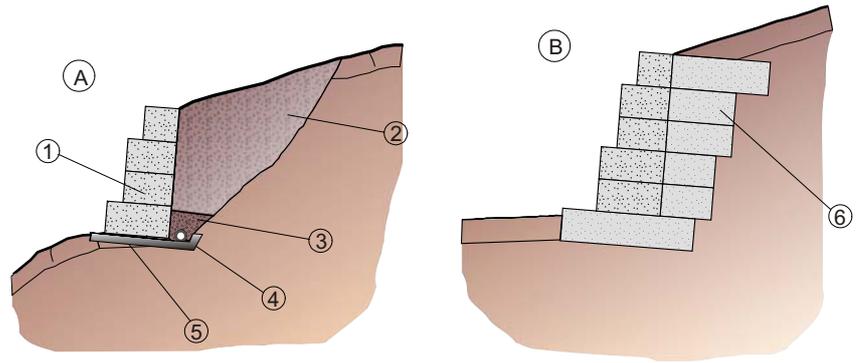
Le reti sono costituite da filo d'acciaio zincato a maglie strette di forma esagonale. Il materiale di riempimento, ciottoli o pietrame, è disposto in strati ed in maniera tale da avere il minor numero di vuoti. Preparato il piano di appoggio con la posa di eventuale materiale granulare, i gabbioni vengono 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.

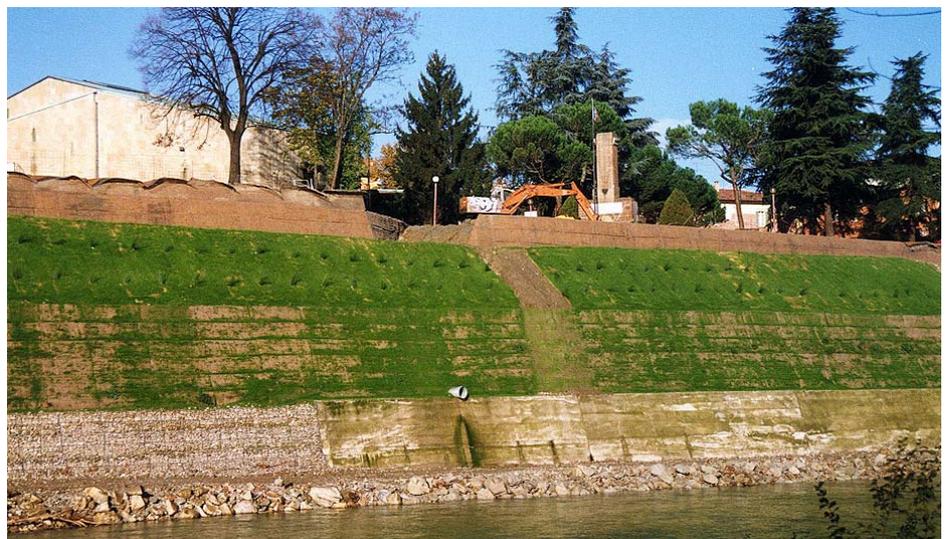
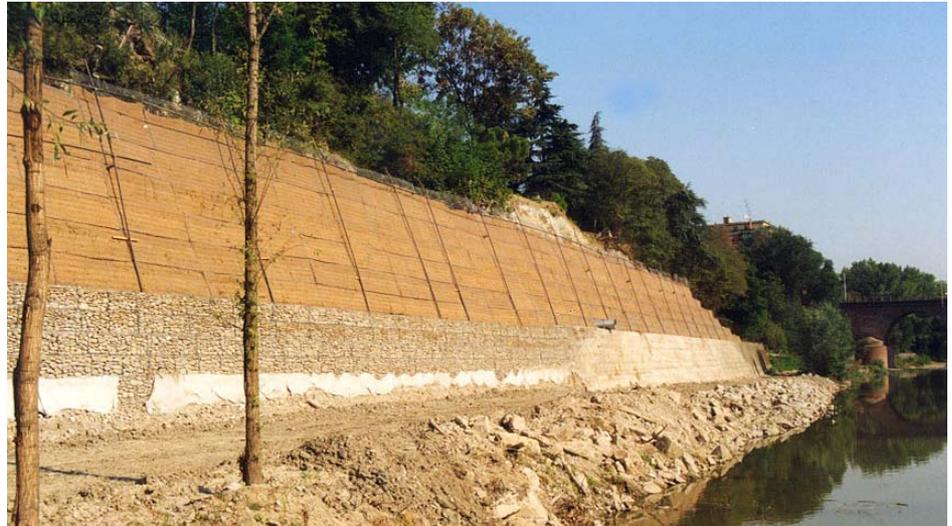


- 1 Muro in gabbioni
- 2 Riempimento a tergo
- 3 Vespaio drenante
- 4 Tubo drenante
- 5 Soletta di fondazione
- 6 Sperone drenante



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 di 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 rinverditata 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.

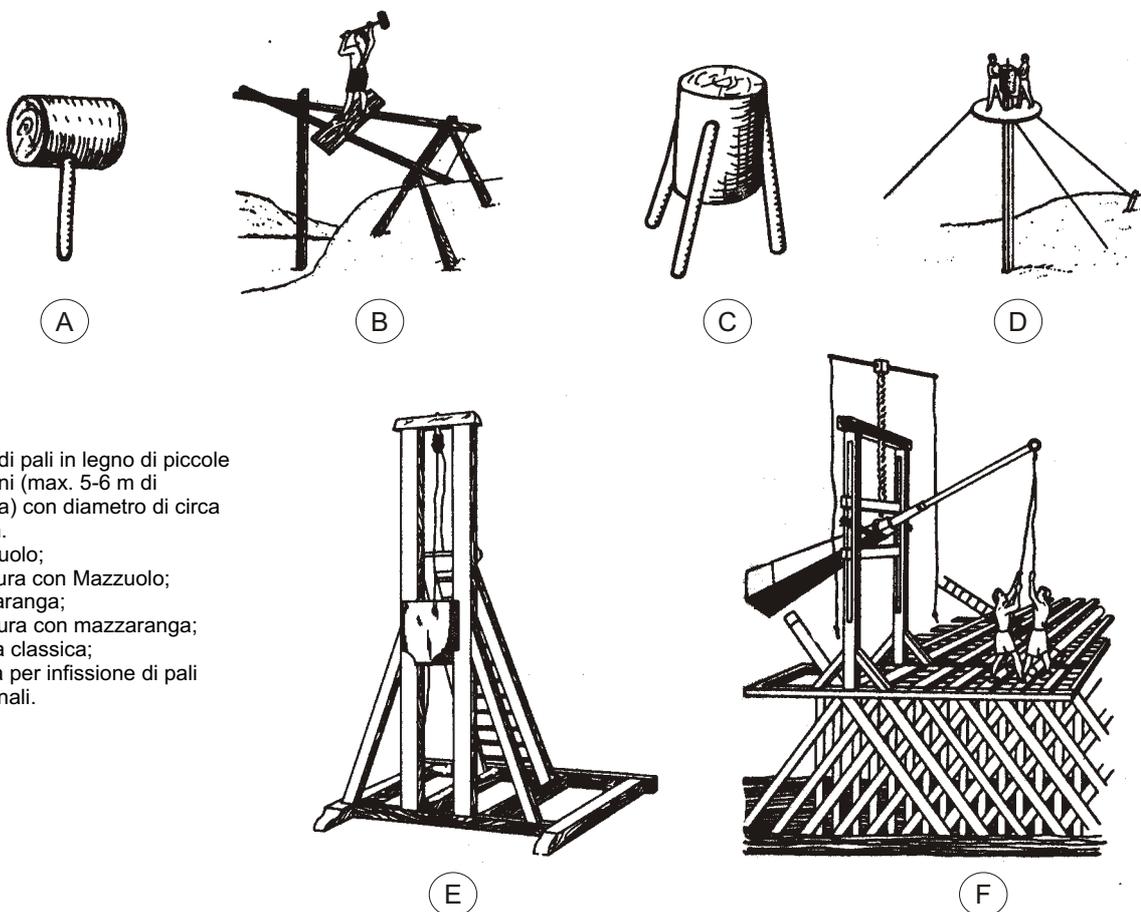


## Generalità

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 rotoperussione, 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.

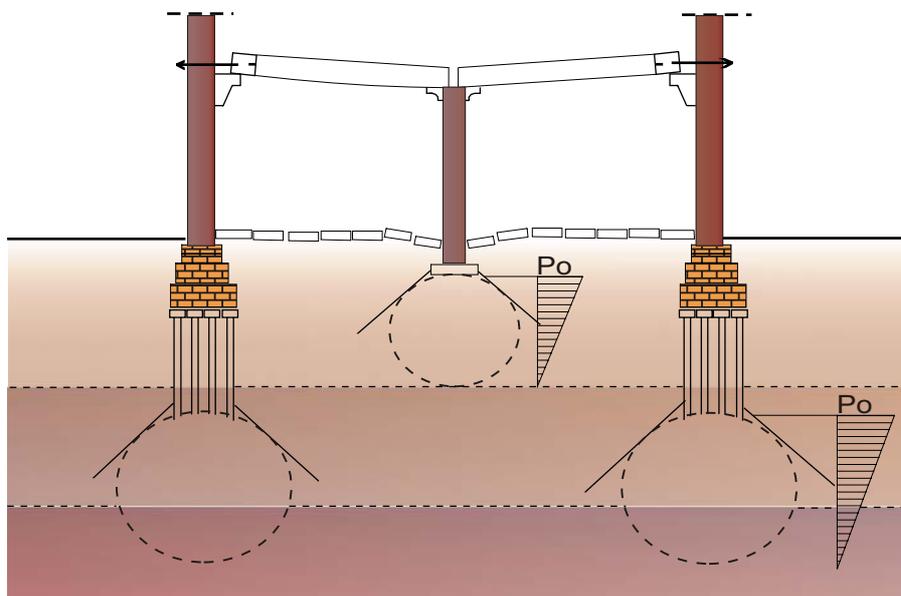
I micropali sono dei pali di piccolo diametro (100-300 mm) realizzati con tecniche "non distruttive" senza scavi di alcun tipo, mediante la perforazione del terreno con speciali attrezzature. All'interno dei fori sono installati dei tubi armatura nei quali si inietta malta cementizia additivata a pressione 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.

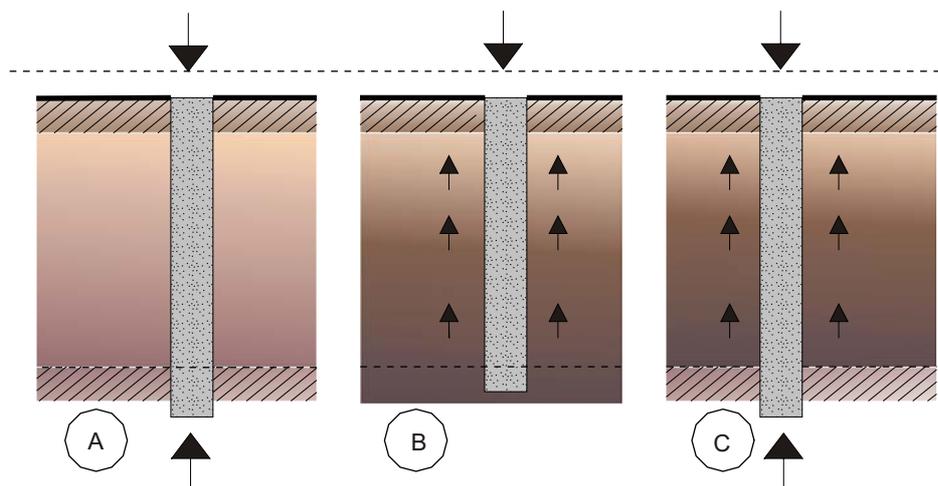
## Applicazioni

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:

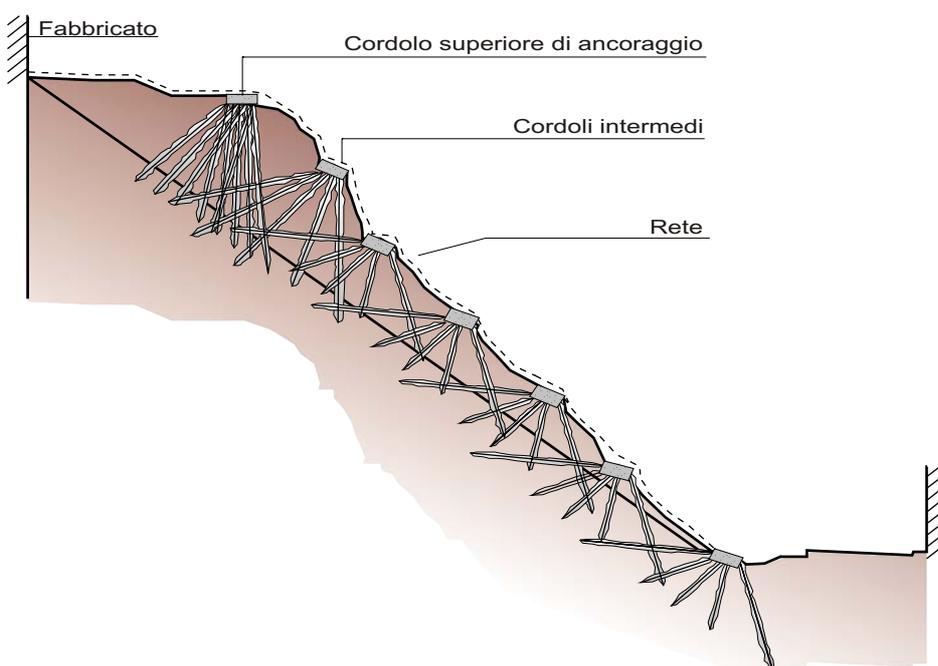
- sistemazione e stabilizzazione di scarpate naturali ed artificiali e di pendii in frana (paratie di pali di grande diametro o di micropali accostati e/o cassoni accostati, reticoli di pali radice).
- protezione delle sponde fluviali dall'erosione ed arginature, realizzazione di briglie per la regimazione dei corsi d'acqua torrentizi;
- realizzazione di muri di sostegno, di sottoscampa 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 rifluimento 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.

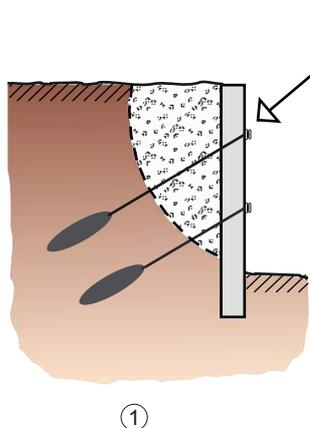
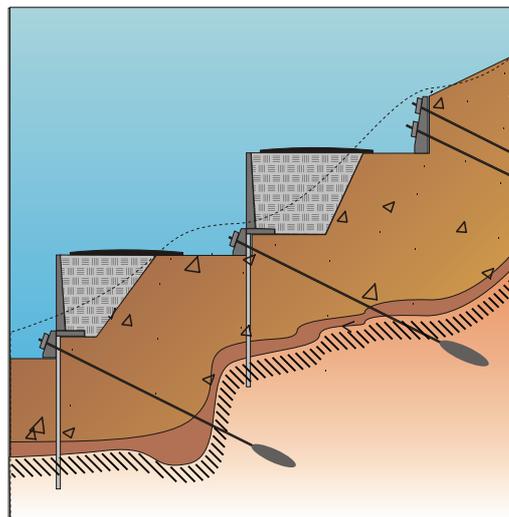
Al contrario l'uso della chiodatura o dei tiranti è meno indicata per gli interventi che riguardano la stabilizzazione di pendii in terreni sciolti a comportamento prevalentemente coesivo. Il suo utilizzo e la sua riuscita nel tempo richiedono trattamenti, soluzioni particolari e studi più accurati.

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

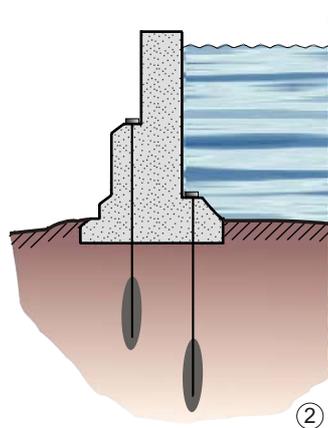
In questo caso il versante era ricoperto da uno strato detritico in equilibrio non ottimale tale da non rendere possibile scavi anche di modeste entità. L'autostrada è stata quindi progettata con carreggiate a livelli sfalsati per adattarsi al profilo trasversale del terreno, per lo stesso motivo le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

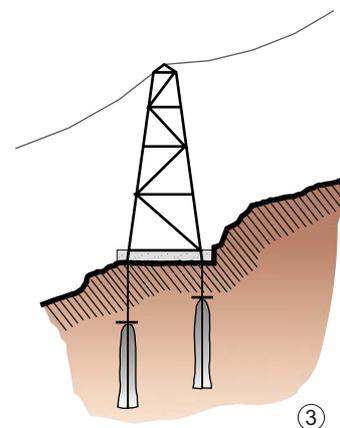
Nel suo complesso questa opera di elevato valore tecnologico risulta ben inserita nell'ambiente circostante grazie ai sia all'adattamento altimetrico con i terrazzamenti che planimetrico con la sinuosità del tracciato.



①



②



③

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

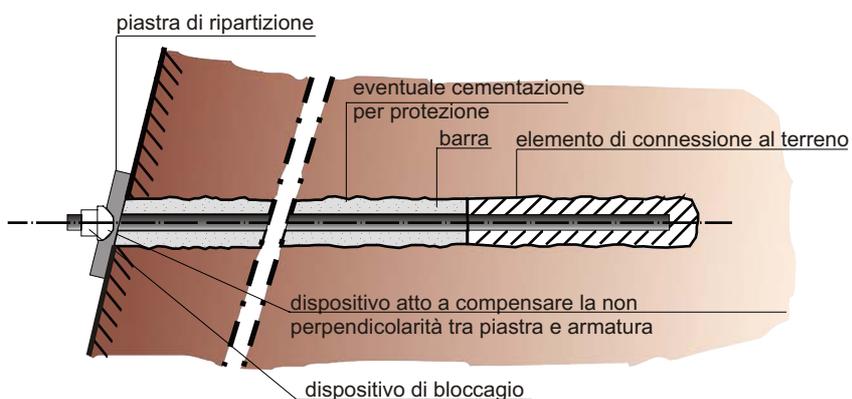
Impiego dei tiranti d'ancoraggio per il consolidamento e sostegno di un vecchio muro in pietra dissetata. I tiranti sono raccordati ad una trave metallica.



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.).

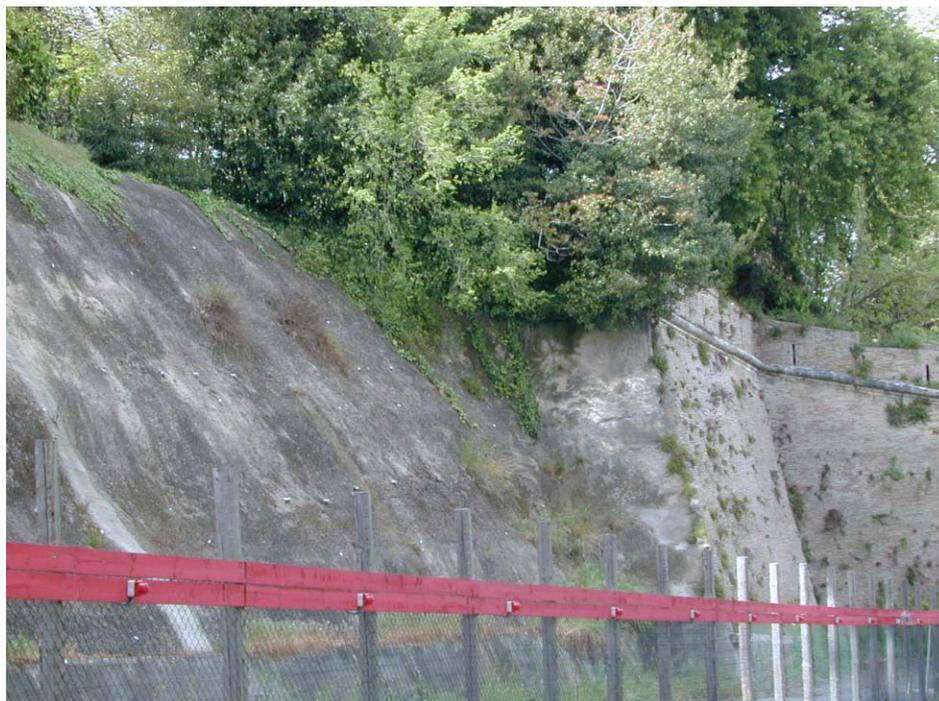
### **Descrizione e Caratteristiche**

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 “gunite” 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 gunite), 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.



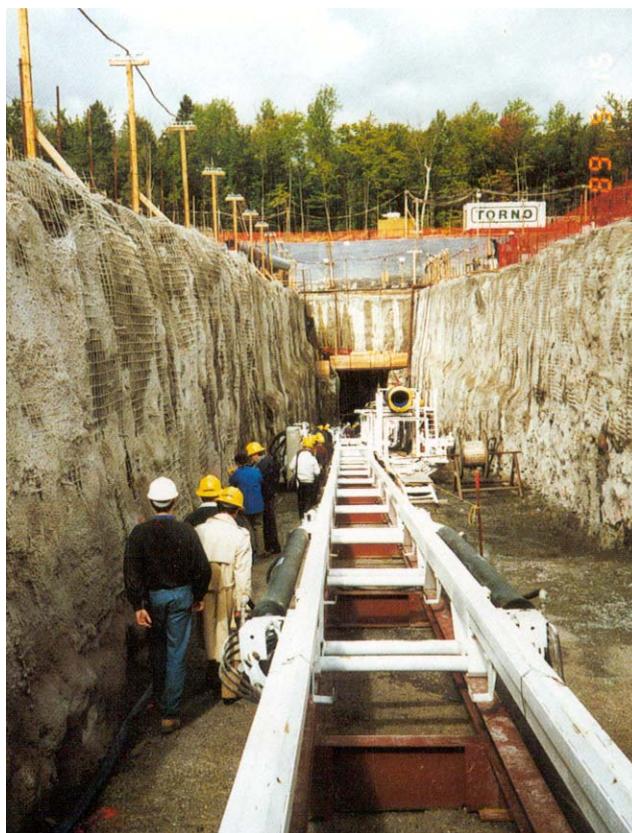
## **Aspetti ambientali**

**I**l 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**

**Q**uesto 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”

