

### Generalità

**S**ono opere che svolgono la funzione di stabilizzare le sponde dei corsi d'acqua sia rispetto a fenomeni di instabilità gravitativa sia nei confronti dell'azione idrodinamica della corrente.

In passato si è fatto uso di un numero limitato di tipologie di opere di sostegno spondali, senza porre attenzione alle conseguenze sul piano ambientale. Oggi si tende a diversificare le tecniche d'intervento, usando quando possibile le tecniche naturalistiche e meno il cemento, cercando inoltre di progettare l'opera con qualità formali che tengano conto dell'ambiente in cui sono inserite.

Le opere di sostegno spondali consentono di fissare la geometria delle sponde in tutte quelle situazioni in cui non è possibile adottare una pendenza naturale: una applicazione frequente dei muri di sponda è quella nell'attraversamento di centri abitati o in prossimità di infrastrutture stradali e ferroviarie. Altre applicazioni sono quelle in abbinamento a strutture quali ad esempio spalle di ponti e briglie.

In tutte queste situazioni è necessario garantire una determinata ampiezza della sezione di deflusso avendo a disposizione uno spazio limitato, ma il ricorso ai muri di sponda può avvenire anche quando la stabilità delle sponde viene a mancare per cause geotecniche legate alla natura dei terreni, alla filtrazione o alle condizioni di sollecitazione.

**Figura 6.3.1:** Sistemazione lungo un tratto del fiume Biferno. Le opere spondali sono realizzate in gabbioni (strutture flessibili, permeabili e colonizzabili dalla vegetazione), massi ciclopici e cemento armato con cassaforma a perdere rivestita in pietrame (strutture rigide ed impermeabili), mentre per fissare le quote di fondo sono state realizzate delle soglie.



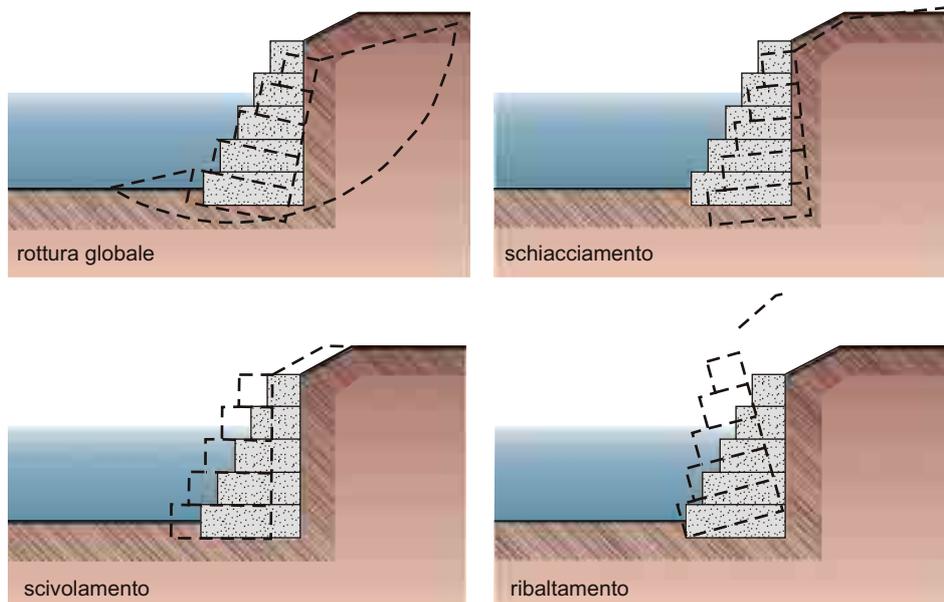
Le opere di sostegno spondali possono essere realizzate con vari tipi di materiali ed essere di conseguenza flessibili o rigide, permeabili o impermeabili all'acqua ed alla vegetazione. L'influenza di queste opere sul regime della corrente è limitata alla modifica della scabrezza dell'alveo, ed assume rilevanza quando il rapporto  $H/B$  ( $H$ = tirante idrico,  $B$ =larghezza dell'alveo) è al di sotto di 15 (Paris, 1994). Queste strutture debbono sempre essere progettate eseguendo verifiche statiche di moto rigido e valutando gli effetti idrodinamici della corrente in termini di tensioni di trascinamento.

La stabilità di questo tipo di strutture può essere anche seriamente compromessa a causa dei fenomeni di scalzamento determinati dall'erosione dell'alveo ad opera della corrente. Questi processi possono essere accentuati localmente dalla variazione di scabrezza dovuta all'opera di difesa stessa, pertanto il posizionamento del piano di fondazione deve essere effettuato con molta attenzione e spesso in maniera conservativa data l'incertezza che presenta la valutazione delle profondità di escavazione della corrente.

**Figura 6.3.2:** Instabilità di un muro di sponda secondo diversi meccanismi possibili.

La progettazione di un muro richiede la verifiche di moto rigido secondo questi cinematismi, oltre alla verifica di possibili rotture interne.

La previsione più difficile riguarda però la profondità di scalzamento da parte della corrente, per il calcolo della quale non esistono metodi veramente attendibili.



**Figura 6.3.3:** Erosione che ha intaccato la fondazione di un muro di sponda in pietrame e malta causandone la rottura.

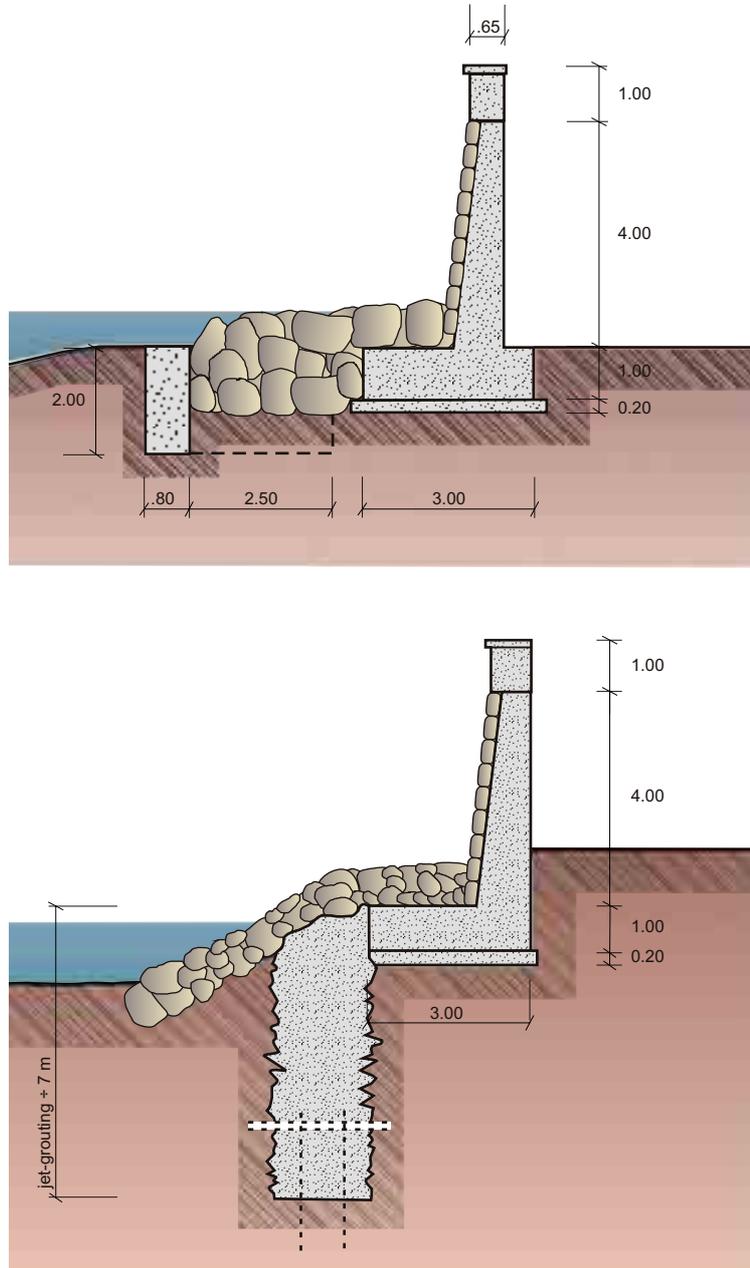
La scogliera posta lungo la sponda ha resistito all'impeto della corrente, ma a causa dell'evento eccezionale è stata coperta dall'acqua che è riuscita a raggiungere il muro sovrastante, la cui fondazione non era sufficientemente approfondita (Friuli, settembre 2003).



Il pericolo di erosione e di scalzamento può essere contrastato anche con protezioni al piede mediante un taglione o con colonne accostate di jet-grouting.

Poiché i muri di sponda sono soggetti all'azione delle forze di trascinamento dovute alla corrente, all'abrasione dovuta al trasporto solido ed all'impatto dei materiali più grossolani sia al fondo che fluitati, è necessario scegliere accuratamente la tipologia di muro prevedendo eventualmente rivestimenti protettivi adeguati.

**Figura 6.3.4:** Dettaglio costruttivo relativo alla protezione di muri di sponda lungo il fiume Isarco. Lo scalzamento è prevenuto mediante un piccolo taglione o mediante jet-grouting. Si osservi che oltre alla protezione in profondità, si è impiegato un rivestimento in blocchi esteso alla zona del muro soggetta all'azione del trasporto solido.



## Descrizione e Caratteristiche

### Murature in pietrame a secco

I muri in pietrame sono opere che hanno origini antichissime, l'uomo ha da sempre utilizzato la pietra naturale, dove questa era facilmente reperibile in loco. 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 sul piano di posa a mano o con mezzi meccanici. 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 piccole strutture hanno forma e dimensioni più irregolari.

**Figura 6.3.5:** Sistemazione spondale con muratura di massi ciclopici. I blocchi calcarei di grandi dimensioni sono squadri per facilitarne la sistemazione e vengono movimentati con gli escavatori idraulici. Quando il materiale che costituisce la sponda ha una granulometria fine è opportuno interporre tra questo ed il muro un geotessile con funzione di filtro. Fiume Biferno (Molise).



**Figura 6.3.6:** La costruzione di una muratura a secco, oltre all'aspetto funzionale può avere una valenza estetica.



In genere il muro ha una sezione trapezoidale mentre la fondazione è 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 altezze 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. Questa caratteristica rende però necessario l'accorgimento di separare il terreno della sponda dal muro, mediante un filtro, generalmente in geotessile, per evitare fenomeni di sifonamento.

Ai vantaggi di carattere geotecnico, si aggiungono la semplicità di costruzione e la perfetta integrazione estetico-paesaggistica nell'ambiente rurale o urbano.

I muri in pietrame a secco hanno un impatto estetico sull'ambiente più contenuto rispetto alle opere in calcestruzzo. 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.

**Figura 6.3.7:** sistemazione spondale con muratura di massi di grosse dimensioni sovrastati da muro di sostegno eseguito con palificata a parete doppia in legname. E' evidente l'ottimo livello di integrazione con l'ambiente circostante e in abbinamento con l'opera in legname. L'utilizzo di due diverse tecniche in questo caso ha consentito di ottimizzare l'inserimento mantenendo la funzionalità tecnica, grazie all'uso di una struttura più resistente all'azione della corrente nella parte più esposta.



## Descrizione e Caratteristiche

### 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 e vengono utilizzate per sostenere terreno o altro materiale con altezze generalmente 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.

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 caratterizzata 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 4-5 m.

**Figura 6.3.8:** Muro in blocchi di roccia squadri cementati con malta idraulica.

Il trasporto solido di grosse dimensioni ha richiesto l'impiego di pietrame ricavato da rocce dure (igneo) per evitare il danneggiamento dell'opera a causa di rotture o dell'abrasione.



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.

La struttura dei muri in calcestruzzo è molto rigida e mal si adatta a cedimenti o scalzamenti localizzati del terreno di fondazione

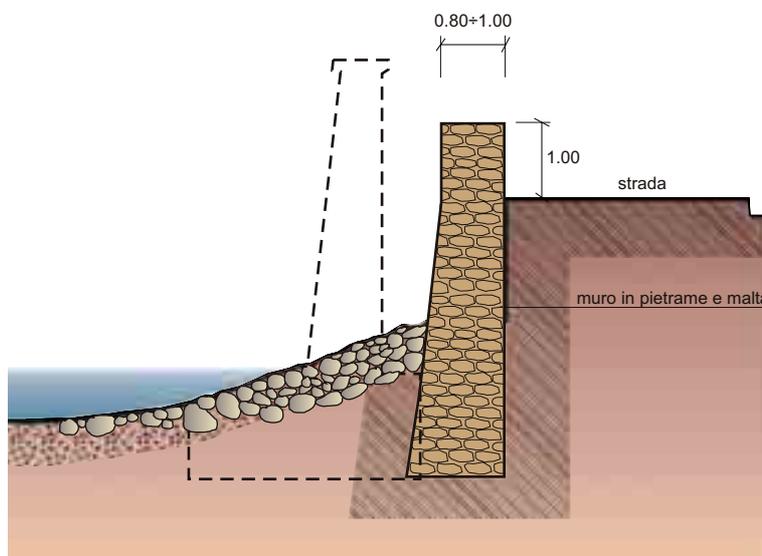
Trattandosi di strutture molto pesanti, è necessario che la base della fondazione sia impostata su terreni stabili e di buona capacità portante. In caso contrario, prima di procedere all'esecuzione dell'opera, occorre eseguire interventi di miglioramento delle caratteristiche fisico - meccaniche del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

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.

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. 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.

L'impatto ambientale di questo tipo di muri rimane però alto sotto il profilo naturalistico: le strutture non sono permeabili alle piante né danno modo a vertebrati ed invertebrati di ricavare habitat adatti al loro insediamento.

**Figura 6.3.9:** Lo schema mostra il corretto posizionamento del muro, la cui fondazione va approfondita per sottrarla agli effetti dello scalzamento da parte della corrente.



## Muri in cemento armato

I muri in cemento armato hanno trovato un largo impiego negli ultimi anni nella realizzazione di opere di ingegneria, negli interventi di stabilizzazione dei versanti e nelle sistemazioni fluviali. 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.

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.

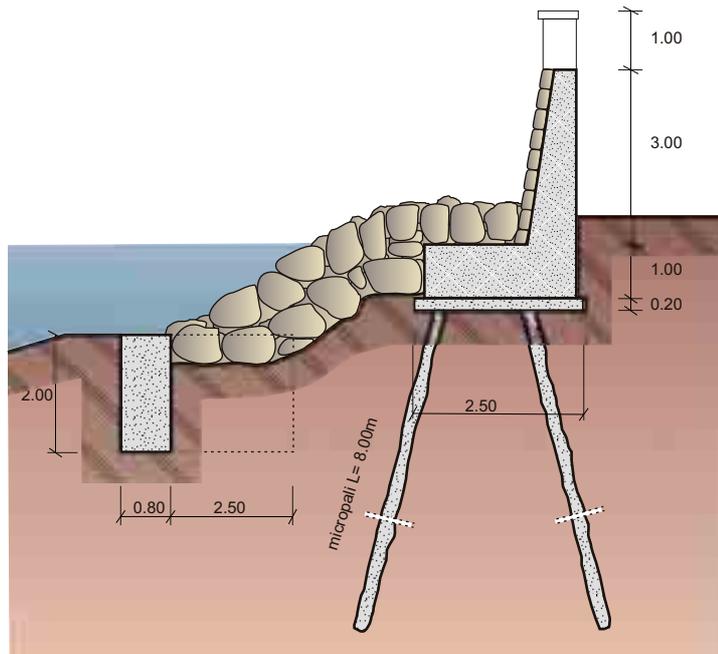
L'altezza del muro verticale può arrivare fino ai 5 - 6 metri. Per altezze maggiori, dovendo limitare gli spessori, la struttura viene dotata di contrafforti interni e/o esterni (muri a mensola e contrafforte), oppure di tiranti d'ancoraggio sul muro verticale (muri ancorati con tiranti).

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.

**Figura 6.3.10:** Opera di sostegno spondale realizzata in cemento armato con cassaforma a perdere rivestita in pietrame. Il tubo in PVC materializza la feritoia per il drenaggio.



**Figura 6.3.11:** L'impiego di micropali consente intervenire con opere di sottofondazione anche strutture che hanno manifestato problemi di stabilità dopo la costruzione. L'inclinazione dei micropali oltre alle componenti verticali delle forze agenti in fondazione consente di assorbire quelle di taglio dovute alla spinta del terreno.



**Figura 6.3.12:** Muro in cemento armato prefabbricato, con rivestimento in pietra a vista. Si distinguono i singoli elementi prefabbricati accostati che costituiscono il muro (Quindici AV).



## Descrizione e Caratteristiche

### Muri cellulari

I muri cellulari a gabbia o “Cribb Walls” sono delle opere di sostegno speciali formate da un sistema reticolare tridimensionale 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.

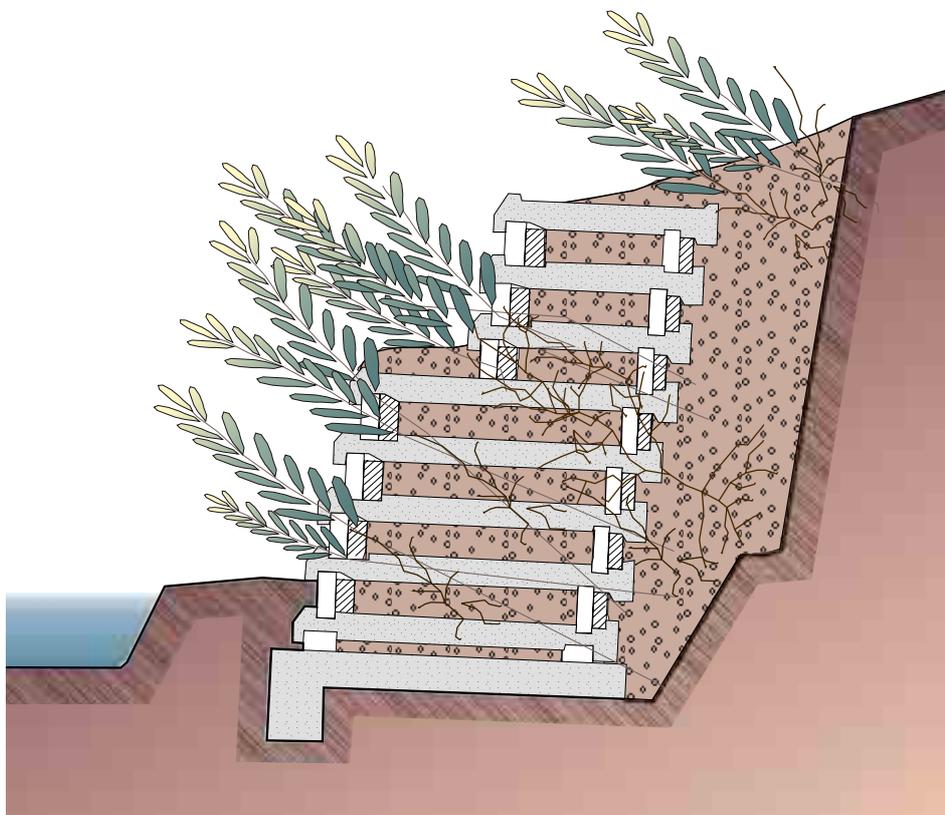
Questa struttura rappresenta la riscoperta in chiave moderna dei tradizionali muri di sostegno realizzati mediante strutture tridimensionali di tronchi riempite con pietrame, diffuse nelle vallate alpine.

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.

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.

**Figura 6.3.15:** Sezione tipica di un muro cellulare con elementi strutturali in calcestruzzo. La struttura va convenientemente colonizzata con talee di salice, che devono, al meglio, essere inserite durante la costruzione e attraversare completamente la struttura. In tal modo non solo si minimizza l'impatto visivo, ma si migliora l'inserimento ambientale favorendo la formazione di habitat per pesci ed altri animali.



---

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.).

Nelle applicazioni spondali è necessario tenere conto degli effetti dell'azione della corrente che può provocare lo svuotamento delle strutture; per evitare questo fenomeno è necessario adottare un materiale di riempimento di pezzatura idonea ad evitare la mobilizzazione, o riempire con terreno e combinare le strutture con materiale vivo che radicando e sviluppando le proprie parti aeree esercitino una funzione di protezione e consolidamento.

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 utilizzo di elementi con forme e colorazioni che si integrano meglio dal punto di vista architettonico-paesaggistico nell'ambiente urbano o naturale.

**Figura 6.3.16:** Un muro cellulare in calcestruzzo abbinato a talee di salice, ripreso dopo tre anni dalla costruzione. L'opera è stata costruita dopo l'evento alluvionale del 1994 a protezione delle sponde del Rio S. Grato nel Comune di S. Stefano Belbo (CN). Il miglioramento dell'inserimento ambientale sia sotto il profilo estetico che naturalistico è evidente.



## Terre rinforzate

**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.

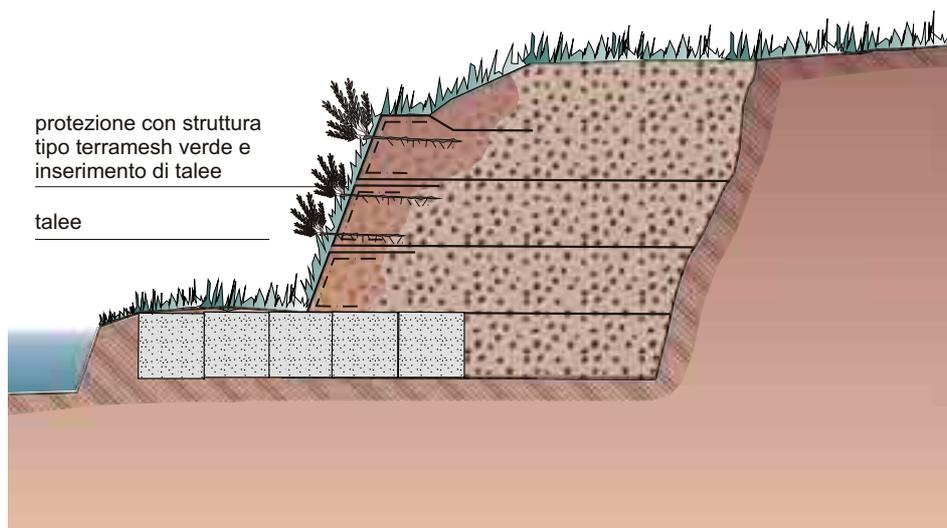
La tecnologia delle terre rinforzate rappresenta la ripresa ed il perfezionamento, in chiave moderna, di un sistema di miglioramento delle caratteristiche del terreno che ha origini antichissime. Sembra che i primi esempi di applicazione di questo sistema di costruzione, di cui si hanno testimonianze 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. 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.

**Figura 6.3.17:** Schema di una terra rinforzata con elementi in rete metallica a doppia torsione zincati e plasticati. Si osservi l'inserimento di talee di salice ed il gabbione in rete metallica in fondazione per impedire lo scalzamento dell'opera.



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 e 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.

**Figura 6.3.18:** La possibilità di rinverdire le terre rinforzate usando specie erbacee ed arbustive, offre indubbi vantaggi sotto il profilo ambientale. Nella foto a fianco si può osservare la messa a dimora di talee in una terra rinforzata con elementi in rete metallica a doppia torsione plasticata, con paramento protetto con biostuoia. In fondazione la protezione antierosiva è assicurata da una piccola scogliera.



**Figura 6.3.19:** Intervento di ricostituzione di un versante prospiciente il fiume Reno. Al piede della scarpata è stata realizzata una terra rinforzata con paramento riempito in pietrame a gradoni con il duplice effetto di costituire una base stabile al terrapieno in terra rinforzata verde e di fornire la difesa all'erosione nel caso di piene.



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, l'aggressione fisico-chimica-biologica, gli 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.

**Figura 6.3.20:** Fase iniziale di costruzione di una struttura in terra rinforzata. Si osserva come il primo strato della struttura venga posato sulla fondazione in gabbioni con funzione antiersiva.



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 galfan 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 elettrosaldata, dotato di elemento antierosivo costituito da biostuoia o geostuoia;
- Paramento inclinato realizzato risvoltando il rinforzo ed associando un elemento antierosivo. 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.

**Figura 6.3.21:** Costruzione di una terra rinforzata lungo un fiume. La vegetazione svolgerà una importante funzione di consolidamento e protezione superficiale. Per una buona riuscita degli interventi è necessario mettere a dimora astoni di salice durante la costruzione, spingendoli il più possibile all'interno della struttura, possibilmente fino a raggiungere il terreno a tergo dell'opera. Fiume Reno presso Casalecchio (BO).



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 delle sponde in frana. Le terre rinforzate a seconda dei sistemi utilizzati potranno inoltre essere permeabili all'acqua ed alla vegetazione.

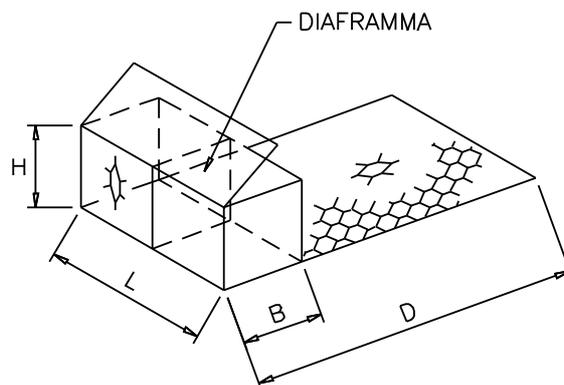
Le numerose varianti costruttive delle strutture in terre rinforzate consentono infatti di ottenere un facile inserimento tecnico-architettonico nel contesto del paesaggio naturale o urbano, minimizzando l'impatto ambientale dell'opera.

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.

Le caratteristiche di resistenza e di facilità di esecuzione nonché l'impatto ambientale contenuto hanno consentito il crescente utilizzo di questa tecnologia; nelle applicazioni fluviali in particolare risulta molto utile la possibilità di mantenere inalterata la permeabilità delle sponde e di utilizzare paramenti in grado di resistere alle forze di trascinamento dovute corrente

**Figura 6.3.22:** Esempio di una tipologia possibile di paramento di terra rinforzata: si tratta di uno scatolare di rete metallica a doppia torsione unito senza soluzione di continuità al rinforzo posteriore. Può venire riempito di pietrame ed essere al di sotto del livello dell'acqua in una difesa spondale



**Figura 6.3.23:** Terra rinforzata realizzata lungo una sponda di un piccolo torrente in ambiente alpino. Il paramento è rivestito con geostuoia tridimensionale in polipropilene e può venire rinverdito con una idrosemina a spessore



**Figura 6.3.24:** La terra rinforzata illustrata nella foto precedente, ripresa da un altro punto di vista dopo il rinverdimento

## Descrizione e Caratteristiche

### Gabbionate

**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 in tutto il mondo, inizialmente soprattutto nel campo delle sistemazioni fluviali. La struttura modulare viene 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 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 ciottolame di origine alluvionale o pietrame di cava. Il pietrame deve essere non gelivo, non friabile e di adeguata durezza.



**Figura 6.3.25:** Gabbionate per la stabilizzazione delle sponde di un corso d'acqua in un tratto che corre in fregio ad una strada. I muri sono praticamente verticali, disponendo di più spazio è opportuno gradonare la struttura per migliorarne la stabilità e diminuire l'impatto visivo.



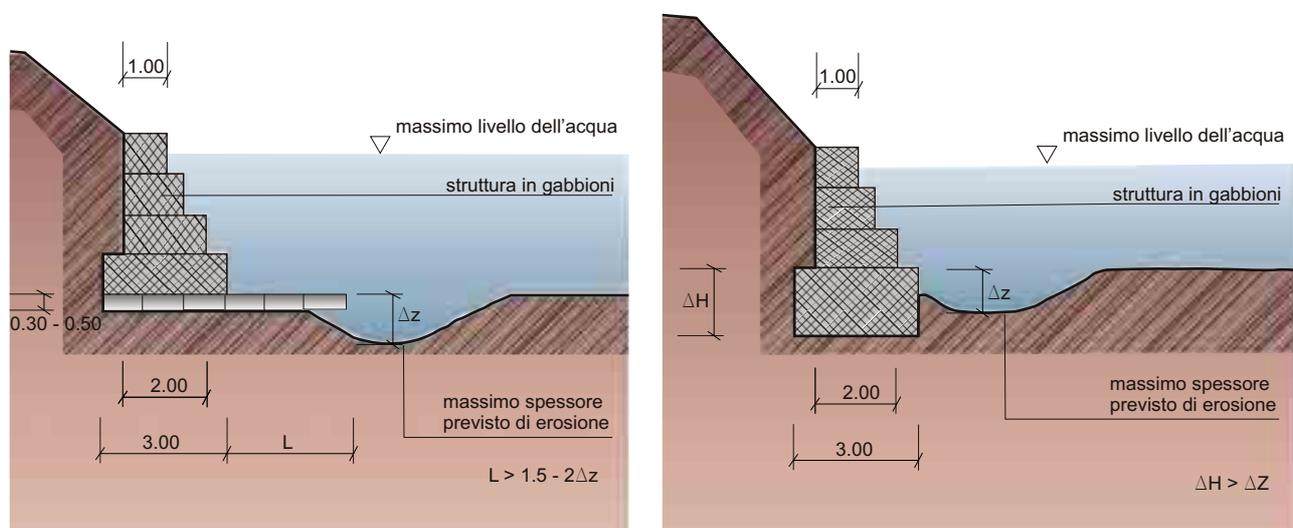
**Figura 6.3.26:** Gabbionata rinverdita. I singoli elementi scatolari hanno lunghezza diversa in modo da gradonare il paramento del muro. Durante la costruzione, nella porzione al di sopra del livello medio dell'acqua, sono state messe a dimora delle talee di salice che consolidano la struttura e consentono una buona rinaturalizzazione delle sponde in tempi relativamente brevi.

Le gabbionate devono essere riempite con cura utilizzando pezzature di pietrame diversificate in modo da minimizzare la presenza di vuoti. Nelle sistemazioni fluviali spesso è possibile reperire il materiale di riempimento eseguendo disalvei nei tratti sovralluvionati, dove i sedimenti potrebbero dare origine a problemi dovuti all'innalzamento del fondo o qualora venissero rimobilizzati.

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.

**Figura 6.3.27:** A sinistra è illustrato il funzionamento di una platea di protezione in materassi alla base di un muro in gabbioni. A destra è rappresentata la soluzione mediante approfondimento della fondazione ad una quota pari a quella prevista di erosione.

In queste strutture lo scalzamento al piede si può prevenire approfondendo opportunamente la fondazione o adottando una platea realizzata con materassi o gabbioni alti 0.50 m, che grazie alla maggiore flessibilità, possono adagiarsi sul fondo adattandosi al mutare della sua geometria in seguito ai fenomeni di escavazione.



**Figura 6.3.28:** Costruzione di un muro in gabbioni in un torrente in Val d'Aosta (Cogne). I gabbioni vengono riempiti con materiale lapideo reperito direttamente in alveo dove è presente in eccesso. La soluzione scelta per la fondazione, a causa del forte trasporto solido, è quella dell'approfondimento del piano di fondazione invece dell'impiego di una platea flessibile.



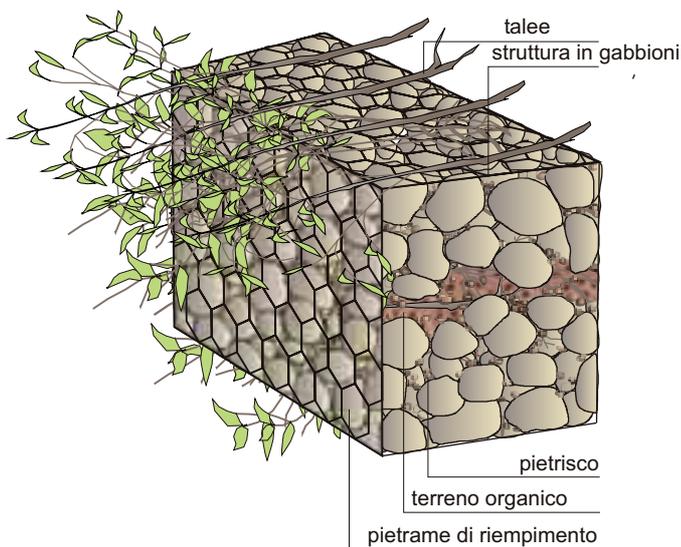
Le gabbionate sono delle strutture permeabili, resistenti ed allo stesso tempo molto flessibili in grado di sopportare senza gravi deformazioni dei singoli elementi, assestamenti e/o cedimenti del piano di posa o del terreno a tergo dovuti.

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

Le gabbionate sono una valida soluzione per la realizzazione di opere di sostegno in diversi contesti fluviali, da quello urbano a quello naturale, 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.

**Figura 6.3.29:** Lo schema accanto mostra la struttura interna di un gabbione, riempito con ciottoli ben assestati e di pezzatura diversa al fine di non lasciare spazi vuoti. Durante la costruzione sono state inserite talee di salice che avranno la possibilità di attecchire e radicare.

Le tecniche costruttive, i materiali, le caratteristiche tecniche e meccaniche intrinseche della struttura, la facilità con cui vengono colonizzati dalla vegetazione o con cui possono essere a questa combinati artificialmente 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.



**Figura 6.3.30:** Muro in gabbioni abbinato a talee durante le successive fasi di rinverdimento. Le foto della gabbionata sono state riprese a distanza di un anno per ciascuna foto, la vegetazione è all'interno della gabbionata e ricopre tutta la struttura.

## Descrizione e Caratteristiche

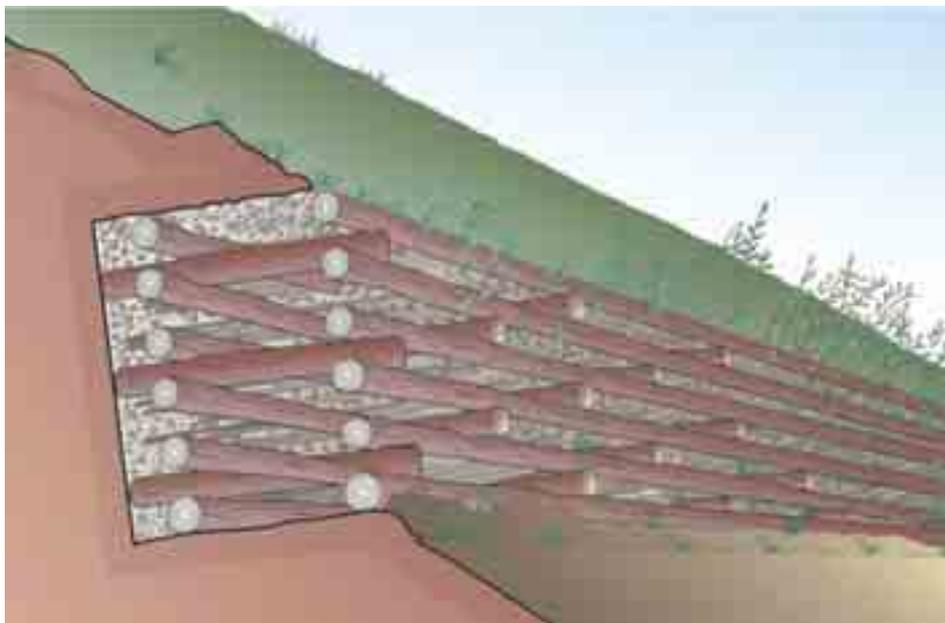
### Palificata viva spondale

**S**i tratta di piccole opere di sostegno a gravità costituite da un 'incastellatura di tronchi disposti in modo da formare cassoni. Le camere interne della struttura vengono riempite con terreno e pietrame (nella parte sotto il livello medio dell'acqua) e vi si inseriscono fascine e talee di salice. Il pietrame e le fascine posti a chiudere le camere della struttura verso l'esterno proteggono la struttura dagli svuotamenti.

Poiché il legno col tempo si deteriora è necessario che le talee e le fascine inserite nella struttura siano vive e radichino in profondità, così da sostituirsi al legname nella funzione di sostegno e consolidamento della scarpata. L'approfondimento delle talee, in ambiente mediterraneo, inoltre è importante per garantire l'attecchimento delle piante che altrimenti soffrirebbero per le condizioni di aridità. Il consolidamento della scarpata è immediato. La struttura a camere sovrapposte funge anche da microhabitat (riparo e tane per piccoli animali e pesci). L'impatto visivo è immediatamente gradevole grazie all'uso di materiali naturali; nel tempo la struttura verrà completamente obliterata dalla vegetazione.

**Figura 6.3.31:** Palificata viva spondale in legname, si possono osservare le due pareti, anteriore e posteriore, costituite dalle due file longitudinali di pali. I salici vengono posti a dimora durante la costruzione della struttura.

Per migliorare la stabilità di queste opere piuttosto leggere, si inclina la base all'indietro di 5 -10°. Quando si prevedono possibili problemi di scalzamento al piede viene realizzata una difesa con una fila di massi posti al piede della palificata, a contatto con l'acqua legati con una fune d'acciaio e fissati con pali di legno o con profilati metallici di lunghezza 2 m, infissi nel terreno.



**Figura 6.3.32:** Una palificata viva riempita con materiale arido e terreno. Nella parte bassa si vedono elementi lapidei più grossolani.

I salici nel giro di uno o due anni attecchiscono e si sviluppano fino a coprire completamente l'opera.



Questo tipo di opere è adatto a sponde fluviali soggette ad erosione lungo corsi d'acqua ad energia medio-alta con trasporto solido anche di medie dimensioni; generalmente è sconsigliabile superare i 2-2.5 m di altezza.

Per la costruzione di queste strutture si impiegano tondami di castagno o di resinosa di  $d= 20-30$  cm posti alternativamente in senso longitudinale ed in senso trasversale ( $L= 1,50 +2,00$  m) a formare un castello in legname. I tronchi vengono fissati tra di loro con chiodi in ferro o tondini  $d= 14$  mm; la palificata andrà interrata con una pendenza del 10-15 % verso monte ed il paramento deve avere un'inclinazione di almeno  $60^\circ$  per favorire la crescita delle piante.

I rami e le piante posti all'interno della struttura dovranno sporgere per circa 10 cm dalla palificata ed arrivare nella parte posteriore sino al terreno naturale, in modo che possano attecchire e consolidare tutta la struttura. Affinché le talee possano attecchire è necessario eseguire questo tipo di opere nel periodo di riposo vegetativo.

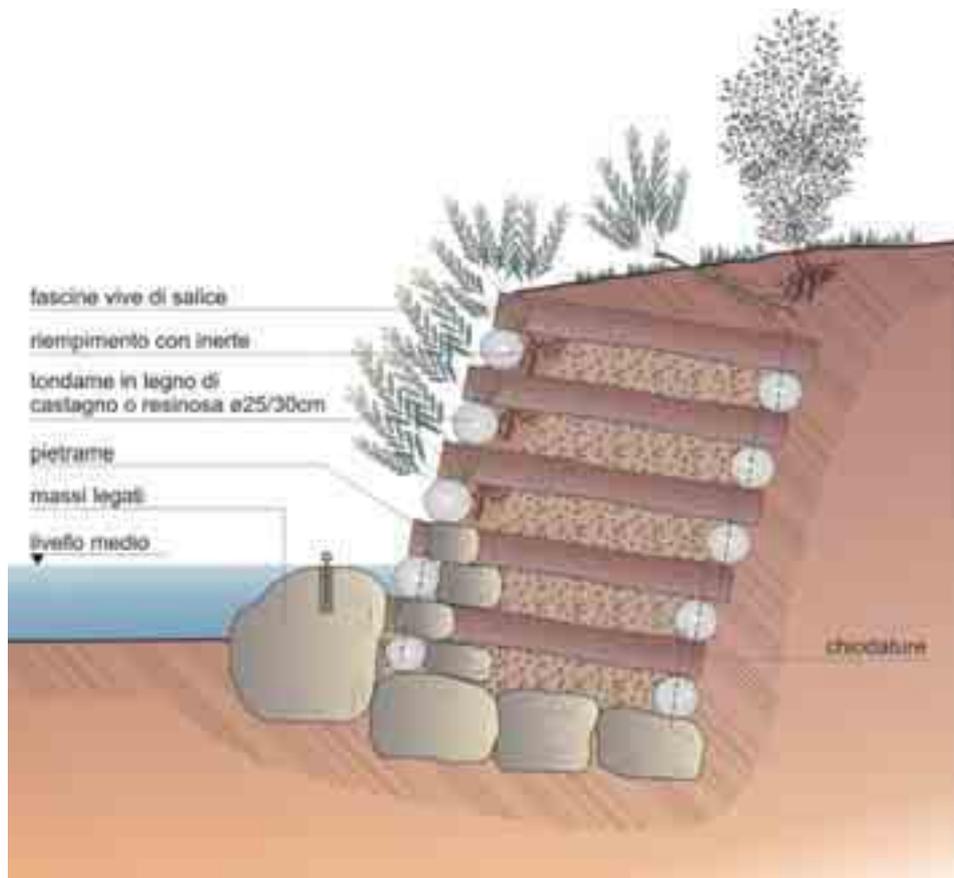
Quando si prevedono possibili problemi di scalzamento al piede viene realizzata una difesa con una fila di massi posti al piede della palificata, a contatto con l'acqua, legati con una fune d'acciaio fissati con barre o profilati metallici di lunghezza di 2 m, infissi nel fondo.

Queste opere sono molto flessibili e non esercitano pressioni elevate sul terreno di fondazione. Sono particolarmente adatte ad interventi in ambiente montano e si adattano anche, morfologie spondali piuttosto irregolari. E' importante valutare con attenzione gli effetti sulla struttura del trasporto solido e la possibilità di svuotamento da parete della corrente nel periodo che precede il pieno sviluppo della vegetazione.

**Figura 6.3.33:** Se i salici non vengono posti nella palificata durante la costruzione, molto difficilmente vi possono essere inseriti successivamente. In assenza delle piante l'opera è morta e se la vegetazione spontanea non la colonizza è destinata a deteriorarsi in un tempo che dipende dal tipo di legno e dalle condizioni ambientali.



**Figura 6.3.34:** La scogliera posta al piede della palificata ed i blocchi in fondazione hanno la funzione di proteggerla dall'azione del trasporto solido più grossolano e dallo scalzamento dovuto all'erosione.



**Figura 6.3.35:** L'immagine ritrae una briglia e una palificata doppia in legname e pietrame (Castiglion Fibocchi AR).

