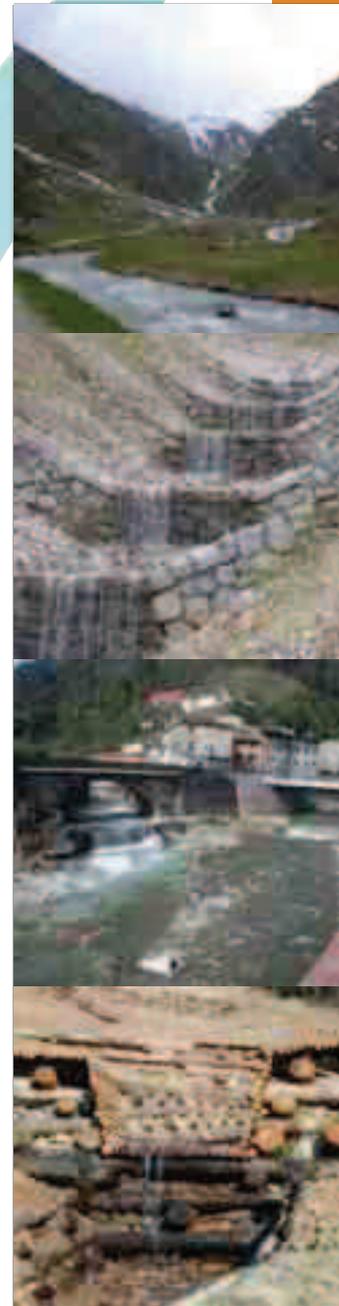




APAT

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

Atlante delle opere di sistemazione fluviale



MANUALI E LINEE GUIDA

27/2003



APAT

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

Atlante delle opere di sistemazione fluviale

Manuali e linee guida

Dipartimento Difesa del Suolo

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

Indice

Presentazione
Premessa

Cap. 1

1.0 CAPITOLO INTRODUTTIVO	1
1.1 Bacino idrografico	2
1.2 Ambiente fluviale	4
1.3 Il rischio idraulico	5
1.4 Criteri di intervento a protezione delle zone antropizzate	7
1.5 Interventi sui corsi d'acqua	9
<i>Interventi strutturali, Interventi non strutturali</i>	
1.6 Interventi strutturali di sistemazione e correzione dei corsi d'acqua	11
1.7 L'ingegneria naturalistica	12
1.8 Classificazione degli interventi idraulici	13

Cap. 2

2.0 OPERE PER L'AUMENTO DELLA PORTATA CONVOGLIABILE	22
2.1 Argini	24

Cap. 3

3.0 OPERE PER LA RIDUZIONE DELLA PORTATA	31
3.1 Serbatoi di piena	33
3.2 Casse di espansione	37
<i>Casse in linea, Casse in derivazione</i>	
3.3 Laghetti collinari	44
3.4 Canali scolmatori	46

Cap. 4

4.0 OPERE DI REGIMAZIONE DELLA FALDA	48
4.1 Canali di bonifica	49

Cap. 5

5.0 OPERE DI CONTROLLO DEL TRASPORTO SOLIDO	52
5.1 Sistemazioni con briglie di trattenuta	54
5.2 Piazze di deposito	60
5.3 Cunettoni	62

Cap. 6

6.0 OPERE DI DIFESA DALL'EROSIONE	65
6.1 Sistemazioni a gradinata	67
<i>Briglie di consolidamento, Soglie</i>	
6.2 Repellenti	88
6.3 Opere spondali di sostegno	96
<i>Murature: pietrame a secco; cls, pietrame e mattoni, muri cellulari, terre rinforzate, gabbionate. Palificata viva spondale</i>	
6.4 Rivestimenti	118
<i>Rivestimenti con materiali inerti, materiali Combinati, materiali vivi</i>	
6.5 Presidi al piede	151

Cap. 7

7.0 OPERE DI DIFESA DALLE COLATE DI DETRITO E DI FANGO	159
7.1 Strutture di intercettazione	163
<i>Strutture aperte, Strutture chiuse</i>	
7.2 Strutture di diversione	169

Bibliografia 171

Generalità

L'uomo fin dai primordi è costretto a convivere con gli eventi naturali legati all'azione dell'acqua sulla terra ferma: esondazioni, divagazione degli alvei, erosione, frane e colate detritiche. Da sempre ovunque sul pianeta l'uomo interviene sul territorio per porre sotto controllo questo elemento prezioso e pericoloso al tempo stesso: al fine di difendersi, di rendere disponibili nuove terre e per sfruttarlo (uso a fini energetici, agricoli, potabili).

A partire dal XIX secolo, questa convivenza si è modificata significativamente per due ragioni: da un lato la pressione antropica in certe aree del pianeta è cresciuta a dismisura e dall'altro la capacità di intervento, anche in forma diffusa, da parte dell'uomo si è notevolmente potenziata. Le conseguenze di questi cambiamenti possono sintetizzarsi sotto due aspetti fondamentali: l'occupazione di aree pianeggianti sempre più vaste in competizione con i corsi d'acqua che le hanno create ed il conseguente moltiplicarsi di interventi incisivi in grado di alterare fortemente la dinamica dei processi naturali.

Questi fenomeni, sono stati particolarmente accentuati nel nostro Paese a causa dell'orografia accidentata e dell'elevata densità di popolazione.

La competizione tra uomo e fiume, nell'occupazione del territorio, è causa di gravi danni sia per l'uomo che per la natura: negli ultimi 50 anni, in particolare, le perdite in termini di vite umane e di danaro sono state elevatissime. Tutto ciò è dovuto al fatto che spesso l'occupazione del territorio è avvenuta senza la coscienza dei fenomeni che vi si svolgevano ed anche quando si è intervenuti non è stata colta la scala a cui potevano avvenire certi processi. A ciò si aggiunga che spesso interventi realizzati in un punto hanno finito con lo spostare o creare ex novo il problema altrove. I danni non si sono limitati ad interessare l'uomo, ma hanno riguardato anche l'ambiente: gli ecosistemi naturali sono stati profondamente alterati sia dalla crescente presenza umana che dagli interventi strutturali realizzati a protezione di tale presenza. Le conseguenze sono state la modificazione del paesaggio, la scomparsa di habitat e la diminuzione della biodiversità.

Questo atlante raccoglie le tipologie di opere che vengono utilizzate per la sistemazione idraulica in pianura e nei bacini montani, descrivendone la funzione e l'efficienza sia idraulica che ambientale. Questo capitolo introduttivo consentirà di comprendere la necessità di progettare tali interventi, soprattutto quelli di prevenzione, alla scala di bacino idrografico a causa dell'interdipendenza dei numerosi processi che vi si svolgono.

Figura 1.0.1: Alluvione del 1951 in provincia di Parma. Il fiume Po, dopo aver sommerso l'ampia golena, allagò le zone abitate a causa della rottura dell'argine maestro.



Generalità

Il termine bacino idrografico, o bacino imbrifero, indica la porzione di superficie terrestre, limitata dalla linea di displuvio o spartiacque, entro la quale si raccolgono e defluiscono le acque derivanti dalle precipitazioni liquide (pioggia), dallo scioglimento delle nevi, da eventuali sorgenti.

Le acque defluiscono in superficie attraverso la rete di drenaggio oppure in sotterraneo (falda freatica o artesiani) fino a giungere alla sezione di chiusura. Il bacino idrografico non solo è considerato come unità geomorfologica, ma viene assunto come territorio di riferimento in numerosi ambiti applicativi. In particolare, il "bacino" è l'unità spaziale più comune per lo studio degli impatti dell'utilizzazione del suolo sulla qualità e quantità dell'acqua. Il termine "bacino" compare inoltre nella denominazione di organizzazioni ed enti governativi di pianificazione e controllo.

La legge 183/89 sulla difesa del suolo definisce (art. 1, comma 3) il bacino idrografico come:

il territorio dal quale le acque pluviali o di fusione delle nevi e dei ghiacciai, defluendo in superficie, si raccolgono in un determinato corso d'acqua direttamente o a mezzo di affluenti, nonché il territorio che può essere allagato dalle acque del medesimo corso d'acqua, ivi compresi i suoi rami terminali con le foci in mare ed il litorale marittimo prospiciente; qualora un territorio possa essere allagato dalle acque di più corsi d'acqua, esso si intende ricadente nel bacino idrografico il cui bacino imbrifero montano ha la superficie maggiore.

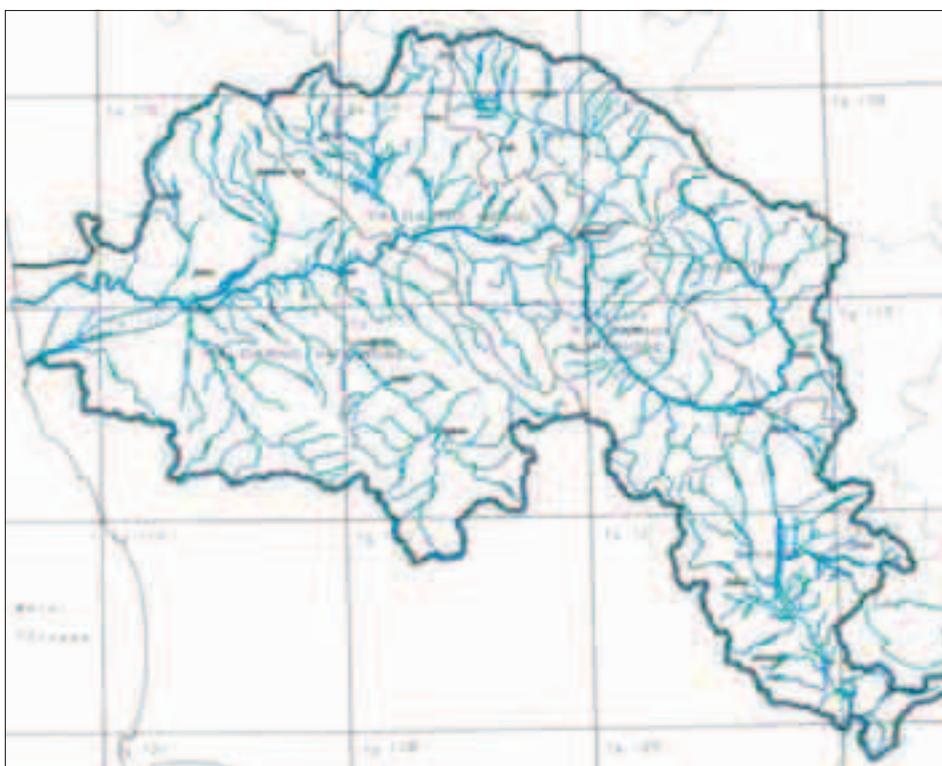


Figura 1.1.1: Il bacino del fiume Arno, come definito per gli effetti della legge 183/89, comprende, oltre al bacino idrografico in senso stretto, anche, nella parte terminale, la zona compresa tra lo Scolmatore, a Sud, ed il Fiume Morto, a Nord, inclusa l'area di bonifica di Coltano-Stagno ed il bacino del torrente Tora, che oggi confluisce nello Scolmatore.

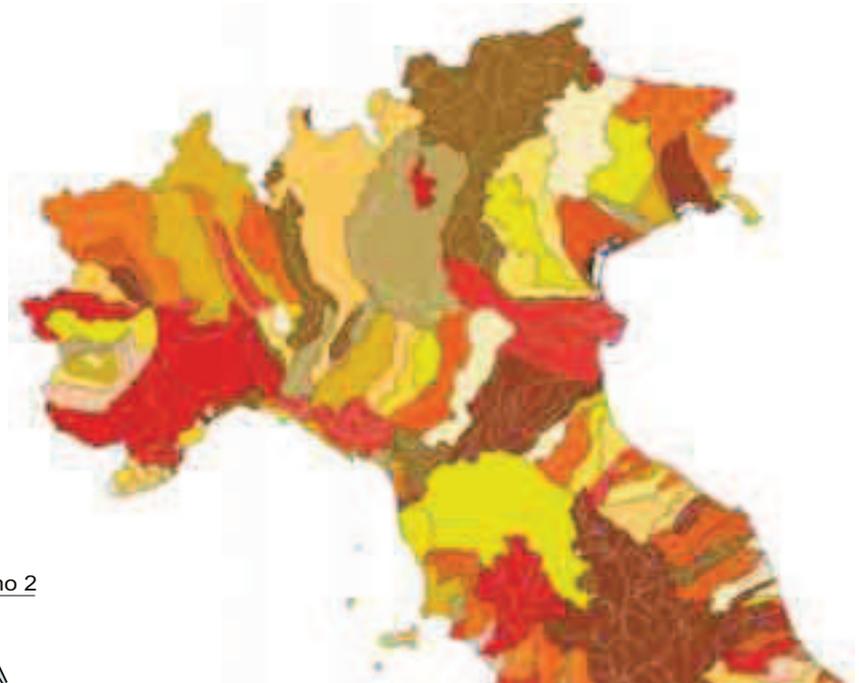
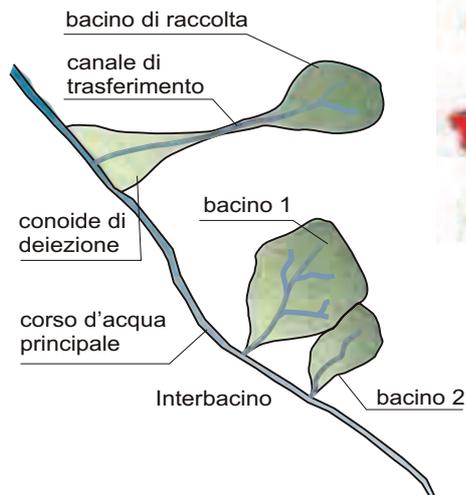
Il territorio del bacino interessa la Regione Toscana (98,4%) e la Regione Umbria (1,6%) con le provincie di Arezzo, Firenze, Pistoia, Pisa e, marginalmente, Siena, Lucca, Livorno e Perugia.

La suddivisione di bacino idrografico in sottobacini mette in evidenza la presenza di aree intermedie definite come interbacini, spesso prive di rete di drenaggio completamente sviluppata.

Un bacino idrografico presenta, dal punto di vista morfologico, tre zone, in genere facilmente distinguibili :

- Il bacino di raccolta come produttore di sedimenti e di deflusso. Si identifica con la parte del sistema situata alle quote più elevate, altrimenti denominata “zona di testata” (upland o headwater).
- Il canale di trasferimento in cui avviene il deflusso dei sedimenti.
- I conoidi alluvionali, oppure le zone deltizie in cui il deflusso viene recapitato al recipiente (mare, lago o altro corso d'acqua). Vi si verifica principalmente deposizione dei materiali trasportati.

Figura 1.1.2: Zone caratteristiche di un bacino ed interbacini. Nella figura a destra schema dei principali bacini imbriferi del centro-nord Italia.



Tale schematizzazione si applica in particolare ai corsi d'acqua montani e collinari con superfici fino a qualche chilometro quadrato. Nei bacini idrografici di grandi dimensioni è possibile distinguere diverse unità idrografiche affluenti in un corso d'acqua principale, separate da zone di versante (interbacini) direttamente contribuenti all'asta principale, in genere mediante una rete breve e poco sviluppata oppure del tutto assente.

Gli interventi particolarmente diretti ai bacini “minori”, intesi come parte integrante del bacino di raccolta, ossia del sistema produttore di deflusso e di materiali solidi, sono le sistemazioni idraulico-forestali.

Si definisce infine “piccolo bacino”, il corso d'acqua in cui non si verificano apprezzabili fenomeni di invaso dei deflussi e le modalità del deflusso osservabili alla sezione di chiusura sono direttamente dipendenti dalle caratteristiche degli afflussi sul bacino.

Il deflusso viene convogliato alla sezione di chiusura attraverso la rete di drenaggio costituita dal sistema di canali, ramificati ad albero, di dimensioni variabili secondo fattori climatici e geologici.

Generalità

A causa della densa distribuzione dei centri abitati, delle attività economiche e delle infrastrutture, in pianura ma soprattutto in ambiente montano e pedemontano, sono ricorrenti gli interventi di protezione di centri abitati, delle infrastrutture viarie o di isolati centri produttivi a difesa sia dalle piene dei grandi fiumi sia dai processi torrentizi (piene, colate di detrito, erosioni, inghiainamenti, etc.). La tipologia delle strutture si è modificata nel tempo in funzione dell'evoluzione dei materiali da costruzione, dei mezzi e del grado di approfondimento della conoscenza dei processi naturali in atto.

I sistemi di intervento per la riduzione del rischio idraulico sono classificabili entro due categorie:

- **interventi strutturali**
- **interventi non-strutturali**

Quando è necessario difendere delle aree a rischio si debbono esaminare le possibili soluzioni appartenenti ad entrambe le categorie valutandone l'efficienza in termini di costi/benefici e di impatto ambientale.

La protezione delle zone antropizzate deve però realizzarsi anche attraverso la rimozione di tutte quelle anomalie che costituiscono fattori aggravanti degli effetti delle piene. Pertanto una efficace prevenzione dovrebbe prendere in considerazione i seguenti aspetti:

- l'inadeguatezza diffusa delle opere di difesa sul reticolo idrografico principale e minore;
- la carenza di manutenzione sulle opere e sugli alvei che ha portato alla riduzione delle sezioni di piena dei corsi d'acqua per la occupazione progressiva delle aree golenali e la creazione di ostacoli al deflusso;
- la riduzione delle aree di espansione per la laminazione delle piene;
- l'aumento della concentrazione dei deflussi in ragione della progressiva canalizzazione delle acque e della impermeabilizzazione delle superfici (riduzione dei tempi di corrivazione);
- la presenza di abitati, insediamenti produttivi e infrastrutture in aree a rischio, senza un adeguamento degli stessi alle condizioni di rischio reali;
- l'insufficiente estensione della rete di monitoraggio idrologico e delle funzioni di preannuncio di piena, soprattutto con riferimento agli affluenti ed alla parte alta dei grandi fiumi;
- l'insufficiente dimensionamento di numerose opere (soprattutto ponti, viadotti e rilevati stradali e ferroviari) di attraversamento dei corsi d'acqua e delle aree esondabili e carenza della manutenzione ordinaria e straordinaria delle opere stesse, in rapporto alle parti esposte alle sollecitazioni dovute alle interazioni con le acque di piena;
- le situazioni locali di erosione e di abbassamento di fondo negli alvei di numerosi corsi d'acqua con conseguente incremento dei fenomeni di scalzamento sulle fondazioni dei ponti e dei viadotti.

L'entità dei danni a carico dello Stato in Italia è stato valutato dell'ordine decine di migliaia di milioni di euro spesi in un quarantennio a partire dal 1951; in conclusione, le attività di prevenzione e di mitigazione del rischio sono destinate ad assumere una importanza crescente con l'incremento delle attività e del valore dei beni presenti sul territorio.

La difesa idraulica ed idrogeologica debbono avvenire alla scala del bacino idrografico, attraverso un'attività di pianificazione che parta dal presupposto che il bacino idrografico è come un ecosistema i cui problemi vanno risolti operando su tutti i processi che interagiscono al suo interno senza limitarsi a contrastarne i singoli effetti.

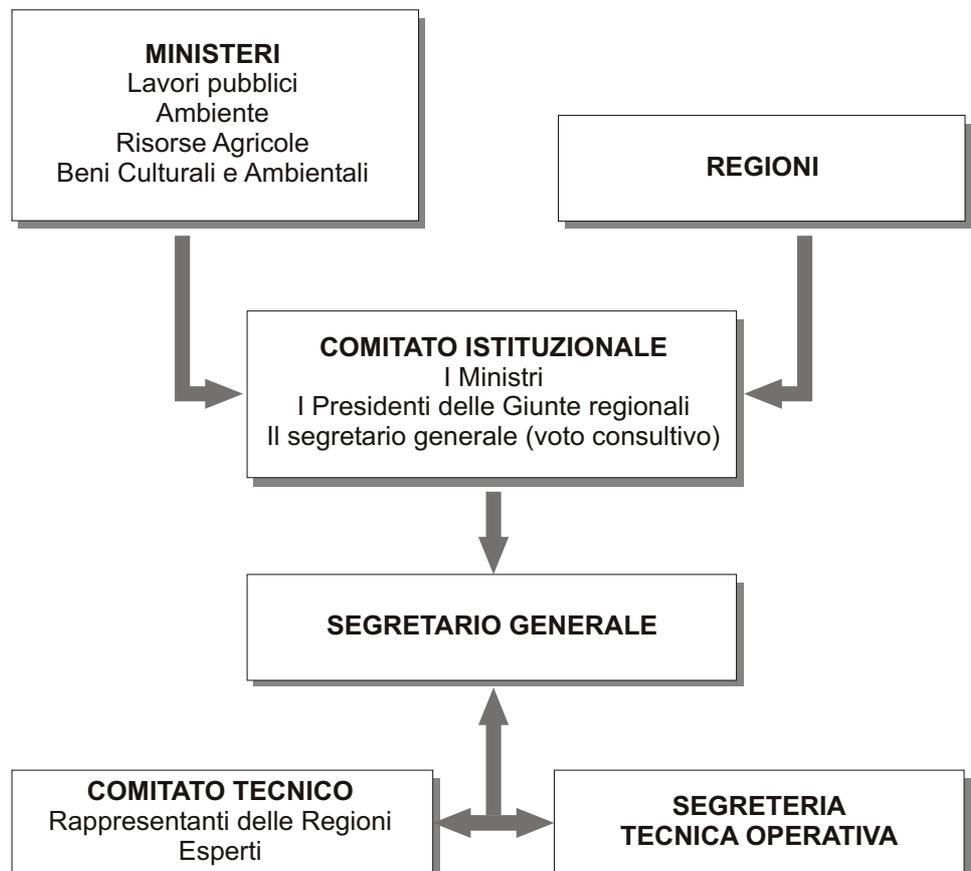
A tal fine la legge (183/89) individua con chiarezza anche i soggetti attuatori: l'intero territorio nazionale è ripartito in Autorità di bacino distinguendo tra bacini di rilievo nazionale (in numero di 11), interregionale (18) e regionale.

L'Autorità di Bacino è stata preposta ai bacini idrografici di rilievo nazionale ed è strutturata nei seguenti organi:

- Il comitato istituzionale;
- Il segretario generale;
- Il comitato tecnico e la segreteria tecnico-operativa.

Per mezzo delle Autorità di bacino si deve arrivare alla definizione dei cosiddetti **"Piani di Bacino"**: gli strumenti che consentiranno di pianificare su vasta scala la conservazione, la difesa, la valorizzazione del suolo ed il corretto utilizzo delle acque, sulla base delle caratteristiche fisiche ed ambientali del territorio esistente.

Figura 1.4.1: Diagramma funzionale relativo all'iter attuativo dei piani di bacino.



Generalità

Come è stato indicato in precedenza gli interventi sui corsi d'acqua possono essere distinti in due grandi categorie (KOCKELMAN 1977): Interventi strutturali e interventi non-strutturali.

Interventi strutturali

Si tratta di opere e interventi di manutenzione essenzialmente dedicati alla protezione degli insediamenti esistenti, generalmente costosi e complessi.

- **azioni strutturali sulla rete idrografica**
 - invasi di regolazione
 - scolmatori
 - arginature
 - protezioni spondali
 - opere trasversali
 - miglioramento delle condizioni di deflusso degli alvei
- **azioni strutturali sui versanti**
 - opere di stabilizzazione dei pendii
 - difesa attiva contro le valanghe
 - controllo dell'erosione superficiale

Figura 1.5.1: Serie di interventi strutturali di sistemazione. Riprofilatura dell'alveo, rivestimento delle sponde con biostuie e rete metallica a doppia torsione, pennelli e presidi al piede in gabbioni. (Fiume Aso, Comuni di Pedaso e Altidona)

Gli interventi di miglioramento delle condizioni di deflusso negli alvei naturali consistono nella manutenzione volta a conservare la stabilità delle sponde, a provvedere al mantenimento della sezione di progetto, alla rimozione degli ostacoli eventualmente creatisi sia per cause naturali (eccessiva crescita della vegetazione), sia antropiche (costruzioni o interventi abusivi).



Interventi non-strutturali

Si tratta essenzialmente di interventi che non interessano direttamente la rete idrografica quali provvedimenti legislativi dedicati alla prevenzione per insediamenti futuri o già esistenti.

a) provvedimenti che modificano l'assetto urbanistico esistente

- trasferimento o conversione degli attuali insediamenti
- acquisizione delle aree da parte dell'ente pubblico
- ristrutturazione urbana
- demolizione delle strutture giudicate non sicure
- dichiarazione di non conformità per edifici o funzioni preesistenti in zone dichiarate pericolose
- conversione delle attività presenti in aree a rischio
- ricostruzione delle infrastrutture pubbliche

b) provvedimenti di carattere legislativo miranti a dissuadere dall'edificare nelle aree a rischio

- dissuasione per nuovi insediamenti
- informazione da parte degli enti pubblici
- segnalazioni di allarme
- segnalazione dei fatti dannosi verificatisi nel passato
- diversificazione della tassazione in modo che eventuali lavori di protezione siano in parte sostenuti dai proprietari protetti
- politica finanziaria orientata a limitare la concessione di mutui fondiari agli edifici da edificarsi in aree considerate inondabili
- obbligatorietà dell'assicurazione al fine di poter ottenere finanziamenti in caso di danno. Nel caso di danno certo (edifici siti in zone inondabili), il premio assicurativo assume il carattere di tassazione.

c) attività legislativa preventiva che agisca attraverso la proibizione della costruzione e la regolamentazione delle modalità di costruzione laddove ciò sia ritenuto possibile.

- pianificazione dell'uso delle zone inondabili (piane alluvionali, coni di deiezione):
- ordinanze dell'amministrazione locale per limitare gli usi del suolo in funzione della probabilità dell'allagamento. Tali interventi si basano sui risultati di processi più o meno complessi di zonazione ossia di individuazione delle aree esposte agli effetti dannosi delle esondazioni di determinata gravità e frequenza;
- regolamenti urbanistici speciali nelle zone inondabili per limitare le costruzioni, i riporti di terreno, le tipologie strutturali;
- impedimenti alla lottizzazione delle proprietà fondiarie;
- appositi regolamenti nell'ambito delle disposizioni in materia di discariche;
- appositi regolamenti edilizi che definiscano particolari costruttivi nel posizionamento degli impianti elettrici, dei materiali e delle luci libere per i tombini.

Nell'ambito degli interventi non-strutturali devono essere inclusi i sistemi di allarme e di preannuncio, gestiti da Enti pubblici o da privati, (il complesso sistema di azioni, che va dalla previsione del fenomeno all'allarme, costituisce settore tipico della Protezione Civile).

Generalità

Gli interventi sui corsi d'acqua (interventi strutturali) si articolano nei seguenti settori (PUGLISI, 1993, modificato):

- difesa delle pianure e relativi insediamenti dalle inondazioni fluviali;
- difesa di città vallive e costiere da allagamenti e alluvionamenti causati dalle piene dei torrenti tributari;
- consolidamento degli alvei e stabilizzazione dei versanti a difesa di centri abitati, insediamenti produttivi e infrastrutture lineari;
- difesa degli invasi dai materiali solidi trasportati (insidia solida).

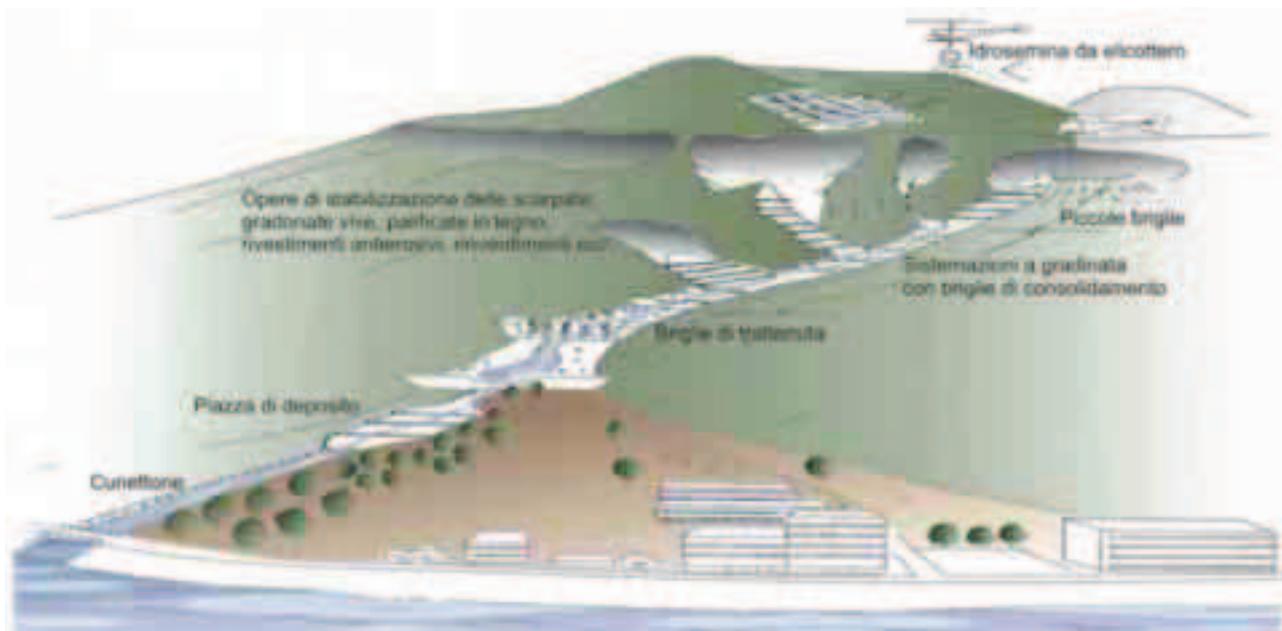
Esigenze locali possono richiedere l'intervento per raggiungere obiettivi settoriali quali:

- salvaguardia di terreni in pianura contro l'arretramento delle sponde di alvei a debole pendenza e sezione ad U;
- regimazione della falda;
- rilascio in alveo di portate di magra sufficienti al mantenimento della fauna ittica;
- difesa dalle colate detritiche;
- mitigazione dell'impatto ambientale.

Le attività sopra elencate possono essere realizzate con le seguenti tipologie di interventi:

- regimazione: ossia l'apportare modifiche al regime delle portate che possono defluire lungo il corso d'acqua;
- sistemazione: ovvero la modificazione o consolidamento dell'alveo per raggiungere un assetto piano-altimetrico stabile;
- rinaturalizzazione: la ricostituzione degli habitat propri del corso d'acqua, agendo sul piano morfologico, sulla caratteristiche di alveo e sponde e sulle tipologie vegetazionali presenti;
- costruzione di opere di difesa passiva: sistemi di difesa in grado di arrestare o deviare le colate detritiche secondo varie modalità.

Figura 1.6.1: Rappresentazione schematica delle opere di difesa di un centro abitato con particolare riferimento alla protezione dalle colate detritiche secondo la tecnica giapponese (da HBJLS, 1985) riportato da Seminara e Tubino (modificato).



Generalità

Volendo dare una definizione, si può dire che “l'ingegneria naturalistica è una disciplina tecnico-scientifica che studia le modalità di utilizzo, come materiali da costruzione, di piante viventi, di parti di piante o addirittura di biocenosi vegetali, spesso in unione con materiali non viventi, come pietrame, terra, legname, acciaio” (Schiechl).

Si tenta di valorizzare l'effetto stabilizzante che alcune specie vegetali sono in grado di esercitare sul suolo. Così, ad esempio, una specie dotata di apparato radicale ben sviluppato può assolvere funzioni di consolidamento del terreno, contribuendo contemporaneamente ad un miglioramento del drenaggio; una specie a chioma ampia può contribuire alla riduzione dell'effetto della pioggia battente su suoli facilmente erodibili se nudi; cespugli ben radicati e con ramificazione buona possono essere abbinati ad opere di difesa spondale come elementi protettivi e nel contempo con funzione di rallentamento della corrente.

L'adozione di queste tipologie consente un migliore inserimento degli interventi riducendone l'impatto naturalistico ed estetico-paesaggistico. Inoltre il carattere fortemente interdisciplinare della materia consente di fornire risposte ad ampio spettro e con effetto multifunzionale.



Figura 1.7.1: Complesso intervento di sistemazione e consolidamento dei versanti di un torrente montano in forte erosione. L'intervento ha previsto il ricorso a varie tecniche d'ingegneria naturalistica: rimodellamento del pendio, realizzazione di viminate, rivestimento del fondo dell'impluvio con tondame e costruzione di briglie in legname e pietrame, rivestimento con teli di biotessili ed inerbimenti.

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

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

A seconda del modo e del tipo di costruzione, possono assumere importanza primaria gli effetti riportati di seguito (da Schiechl-Stern, modificata):

Tecnico: Protezione dell'area della sponda da erosione superficiale, causata dalla corrente, dalle precipitazioni, dal vento e dal gelo. Aumento di stabilità delle sponde per la creazione di un sistema fibrorinforzato terreno-radice e per l'effetto drenante delle piante.

Ecologico: Bilanciamento degli estremi di temperatura e di umidità nello strato aereo vicino al terreno e con ciò creazione di condizioni favorevoli allo sviluppo della vegetazione. Miglioramento del bilancio idrico del terreno (drenaggio o immagazzinamento) tramite l'intercettazione, l'evaporazione, l'evapotraspirazione e la capacità di immagazzinamento. Preparazione del terreno e formazione di humus a seguito della caduta e della decomposizione dei resti vegetali. Con ciò in sintesi, ovvero miglioramento della flora e della fauna del terreno e del contenuto di sostanza trofica. Creazione di macro e micro ambienti naturali divenuti ormai rari, nuovi biotopi per animali e piante, possibilità di affermazione di cenosi autoctone;

Economico: Diminuzione delle spese di costruzione e di manutenzione;

Estetico-Paesaggistico: Inserimento delle costruzioni e delle opere nel paesaggio. Recupero delle aree paesaggisticamente degradate

I principi e le tecniche dell'ingegneria naturalistica possono essere applicate lungo i corsi d'acqua, nelle zone umide e sui versanti adiacenti ai corsi d'acqua con le seguenti finalità:

- Corsi d'acqua: gli interventi possono riguardare il consolidamento delle sponde, con relativo rinverdimento; azioni per limitare il trasporto solido o per rallentare la corrente; costruzione di briglie e pennelli; creazione di rampe di risalita per agevolare la presenza dell'ittiofauna.
- Zone umide: realizzazione di ambienti idonei alla sosta ed alla riproduzione degli animali.
- Versanti: consolidamento ed inerbimento di pendici, sistemazione di frane.

Figura 1.7.2: Opere di sistemazione e regimazione idraulica del bacino del Fosso Solcaccio in Frazione Vinchiana, Comune di Lucca.



Generalità

Gli interventi sui corsi d'acqua possono essere classificati secondo un criterio funzionale (funzione svolta dall'opera) riferito a due diversi livelli:

- interventi di regimazione e sistemazione fluviale dedicati ai corsi d'acqua principali;
- interventi di regimazione, di correzione dell'alveo e di stabilizzazione dei versanti (sistemazioni idraulico-forestali) dedicati ai torrenti ed ai bacini montani o collinari.

Lo stesso tipo di opera (ad esempio una briglia o un muro di sponda) può trovare applicazione nelle sistemazioni ai due diversi livelli ed a seconda dei casi potrà svolgere funzioni differenti (briglia di consolidamento e briglia di trattenuta) o la medesima funzione; per svolgere funzioni diverse lo stesso tipo di opere generalmente presentano caratteristiche geometriche e costruttive differenti e costituiscono delle varianti delle tipologie fondamentali.

E' importante riferire di volta in volta il livello di intervento cui è applicabile un certo tipo di opera per evitare che si possa pensare di trasportare la stessa tipologia da un livello all'altro con conseguenze spesso dannose: i regimi idraulici ed idrodinamici diversi che caratterizzano i due livelli sopra definiti, richiedono approcci metodologici, e di conseguenza tipologie di opere differenti.

Gli interventi di mitigazione dell'impatto ambientale o di rinaturalizzazione realizzati con tecniche di ingegneria naturalistica trovano applicazione ad entrambi i suddetti livelli e possono essere utilizzati in abbinamento alle tecniche tradizionali o da soli.

Generalità sulle opere

Un torrente può essere variamente costituito in diverse parti elementari: il bacino tributario e l'asta principale in un caso; ancora il bacino, il canale di scarico e il cono di deiezione in un altro.

Le parti elementari svolgono diverse funzioni: la raccolta delle acque e la produzione, per erosione o dissesti, del materiale lapideo; l'adduzione e il trasporto; e, nel secondo caso, il deposito del materiale stesso.

Il bacino può avere varia forma: partendo all'origine da una sorta di anfiteatro, può svilupparsi lungo la valle con l'asta principale alimentata dai versanti; oppure limitarsi alla prima parte e, con un tratto relativamente breve il canale di scarico, espandersi in un piano a minore pendenza nel cono di deiezione.

Lo sbocco può avvenire in un corso d'acqua di maggiore importanza, che possa assicurare il trasporto del materiale a valle, in un lago o in mare (un significativo esempio: le fiumare nel meridione d'Italia). Le opere di sistemazione di un torrente possono riguardare quindi il bacino tributario, l'asta e il cono di deiezione.

Gli interventi sull'asta si prefiggono la sua stabilizzazione e quella delle sue sponde; gli interventi nel bacino mirano a ridurre i fenomeni erosivi, specie quelli localizzati; le opere di sistemazione del cono di deiezione si propongono infine di far defluire verso valle il materiale che proviene da monte evitando significativi depositi ed erosioni.

Gli interventi nel bacino sono principalmente: seminagione di essenze adeguate, opere di drenaggio, soglie, piccole briglie, muri di sostegno.

La stabilizzazione dell'asta si attua con:

- soglie di fondo che fissano la sezione dell'alveo;
- briglie che, introducendo salti di fondo, diminuiscono per tratti la pendenza e quindi la capacità erosiva della corrente, e stabilizzano allo stesso tempo le sponde con la creazione di un riparto al piede;
- i muri di sponda, le scogliere longitudinali ed eventualmente i pennelli evitano l'erosione delle sponde;
- i cunettoni: canali a forte pendenza con sezione ristretta e rivestita, relativamente profondi sono impiegati per evitare l'erosione del fondo e delle sponde, ma anche per assicurare velocità elevate e quindi, con portate modeste, il trasporto di materiali.

La stabilizzazione del cono di deiezione, assegnando appropriate caratteristiche all'alveo, dà modo di fare defluire il materiale solido verso valle senza depositi significativi.

Figura 1.8.1: Stabilizzazione di un'asta torrentizia mediante una serie di piccole briglie e bacini di dissipazione in ambiente alpino (Valtellina, SO).



Figura 1.8.2: Consolidamento di un versante sottostante all'abitato di S. Mango sul Calore (Avellino). L'intervento ha comportato la stabilizzazione dell'asta torrentizia al piede della pendice, mediante salti di fondo e rivestimenti in gabbioni, mentre per garantire la stabilità del versante, si è fatto uso di terre rinforzate in 'Terramesh' in alternanza con opere di sola protezione superficiale tramite graticciate.



Strutture di base

Per strutture di base si intendono, qui, quelle strutture che vengono utilizzate in maniera ricorrente in vari tipi di sistemazioni. Queste ultime raramente si realizzano con un unico tipo di opera, ma risultano da una combinazione di strutture alcune delle quali possono, per la frequenza con cui sono impiegate, essere considerate delle strutture di “base”. Queste verranno di seguito descritte sia per quanto riguarda le loro caratteristiche che per quanto concerne i principi di progettazione e nel seguito del testo, quando verranno descritte all'interno di un determinato tipo di sistemazione, si rimanderà a questa sezione per qualsiasi approfondimento riguardo ad esse. Le strutture di base sono:

- muri di sponda;
- briglie e opere accessorie;
- rivestimenti.

Muri di sponda:

Si tratta di opere di sostegno a gravità o semigravità che si utilizzano addossandole alla sponda da difendere quando questa è soggetta ad instabilità gravitativa. Possono essere realizzati con vari tipi di materiali ed essere di conseguenza flessibili o rigidi, 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 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 della massima profondità di erosione potenziale della corrente.

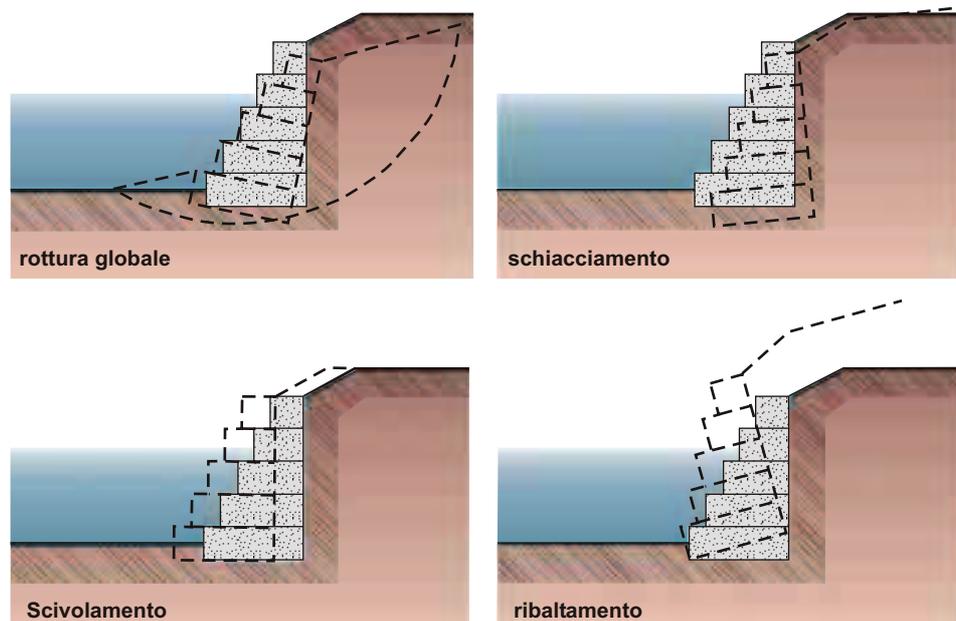


Figura 1.8.3: Tipologie di instabilità per moto rigido dei muri di sponda

Briglie:

Si tratta di opere a parete grossa, trasversali rispetto all'asse del corso d'acqua che ne modificano l'assetto altimetrico con conseguenze sul regime della corrente. Molto opportunamente BENINI (1990) definisce :

briglia: l'opera trasversale impiegata per la correzione dei torrenti, di altezza inferiore a 15 m

traversa: lo sbarramento di modesta altezza sul fondo utilizzato per la derivazione di acqua ad usi idropotabili, agricoli o industriali ;

diga: le opere trasversali di altezza tale da creare un invaso a scopo di accumulazione per usi idroelettrici, agricoli o idropotabili. Esistono dighe aventi scopo multiplo (idropotabile ed idroelettrico; irriguo e riduzione delle piene; etc.). Le dighe sono considerate tali se hanno altezza superiore a 15 m o determinano un invaso superiore a un milione di m³ e rientrano nell'ambito della materia disciplinata dalla L. 1.11.1959 n. 1363 e successive modificazioni (D.M. 24.3.1982; D.L. 8.8.94, n. 507 convertito nella L. 21.10.1994, n. 584 recepita dalla Regione Piemonte con la L.R. 11.4.1995, n.58).

Figura 1.8.4: Traversa di Spilamberto (MO).



Figura 1.8.5: Esempio di diga in terra . Val Senales (Trentino-Alto Adige).



Le briglie possono avere un effetto rilevante sulle condizioni sia a monte che a valle del tratto in cui vengono realizzate, pertanto richiedono valutazioni molto attente sia per le conseguenze idrauliche che ambientali che possono determinare.

Questo tipo di opere può venire realizzato con forma e materiali differenti ma tutte le tipologie debbono essere progettate seguendo alcuni criteri comuni. Pertanto si dovranno eseguire:

- verifiche idrauliche ed idrodinamiche: verifica del corretto deflusso delle portate, verifica dell'assenza di erosione e scalzamento a valle, verifica di assenza di sifonamento;
- verifiche statiche: verifiche di moto rigido come opera di sostegno, considerando varie condizioni di carico che consentano di tenere conto anche di eventi quali l'impatto di colate detritiche.

La struttura delle briglie può essere realizzata secondo varie tipologie: per forma, per modo di resistere e per materiali. Si possono così avere: briglie a gravità e ad arco; di conglomerato di cemento semplice o armato e di muratura di pietrame, di gabbioni, in terra.

La struttura delle briglie dipende anche dalla forma e dal tipo dei materiali trasportati (pietrame e massi, ma anche alberi o tronchi). Si distingueranno allora: le classiche briglie chiuse oppure aperte, selettive e filtranti, briglie frangicolata e per la trattenuta del materiale galleggiante.

Figura 1.8.6: Sistema di briglie in legno e di briglia a fessura con piazza di deposito retrostante; Le sponde sono state protette con un rivestimento di biostuoie e rete metallica a doppia torsione. Si può osservare la piazza di deposito completamente riempita di materiale alluvionale, (alluvione Friuli del 29 agosto 2003, Ugovizza).



Figura 1.8.7: Briglia frangicolata.



Una maggiore attenzione è riservata oggi rispetto al passato alla sistemazione dei corsi d'acqua impiegando le cosiddette tecniche di ingegneria naturalistica, le quali trovano nella costruzione delle briglie e nella sistemazione delle sponde interessanti applicazioni. Tali tecniche utilizzano come materiali da costruzione piante viventi (o loro parti), spesso in unione con altri materiali, quali legname, pietrame, acciaio, ecc.

Si tratta, per la verità, per lo più di riedizioni di modi di costruire antichi, in passato adottati in quanto gli unici praticabili ma successivamente abbandonati per far posto alle nuove tecniche e ai nuovi materiali.

Figura 1.8.8: Briglie in legno.

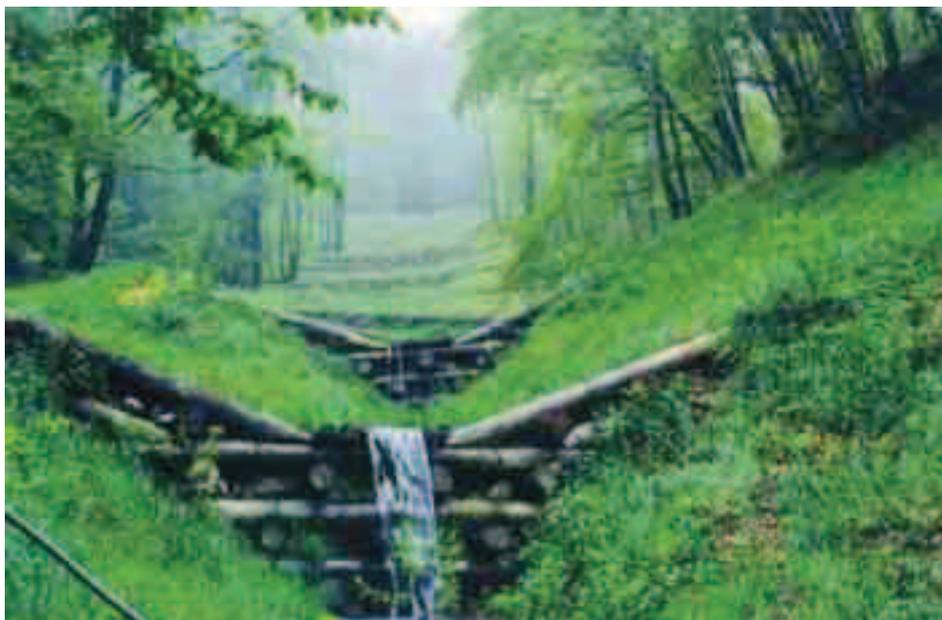


Figura 1.8.9: Gradinata di briglie in c.a. rivestite in pietra.



Opere accessorie

Per garantire la funzionalità e la stabilità delle briglie spesso si rende necessaria la costruzione di opere accessorie. BENINI (1990) richiama l'attenzione sul fatto che la maggior parte dei dissesti delle briglie non sono causati da dimensioni troppo esigue, bensì o da aggiramento dell'opera ai fianchi (per ammorsamento troppo esiguo o per scoscendimento delle sponde), oppure per asportazione del terreno sotto la fondazione per un'eccessiva profondità del gorgo provocato dall'acqua tracimante.

Elementi fondamentali tra le opere accessorie sono:

- **muri d'ala**

I muri d'ala possono venire costruiti a monte o a valle della briglia. A monte (muri di accompagnamento) devono avere andamento convergente ed essere collegati con il paramento della briglia in modo da impedire l'erosione della sponda nei pressi della briglia. A valle, hanno lo scopo di evitare lo scalzamento delle sponde. Questi manufatti sono calcolati come muri di sostegno e devono essere muniti di feritoie.

- **platea**

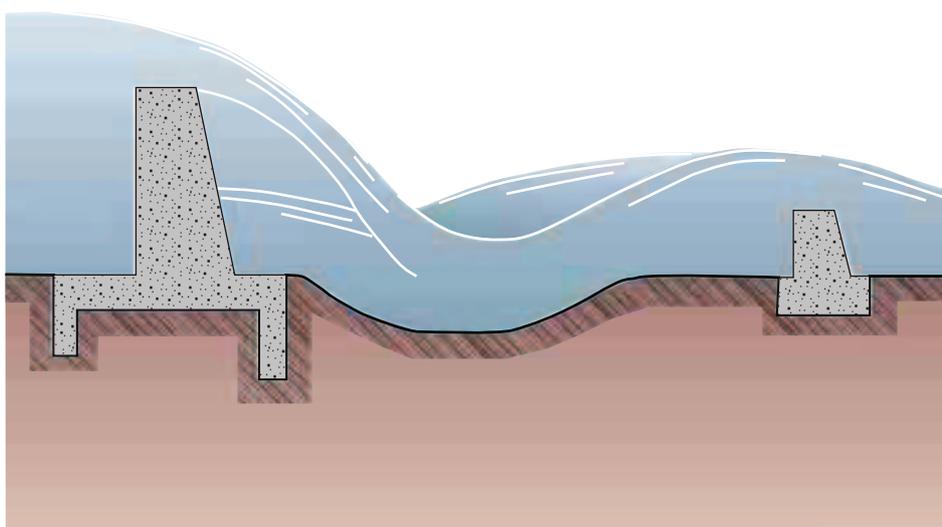
Per evitare la formazione del gorgo al piede della briglia, in molti casi, sono state costruite platee di grandi massi per una lunghezza tale da contenere comunque la lama stramazante. Il manufatto risulta di difficile conservazione pertanto risulta preferibile costruire la controbriglia con relativo bacino di calma.

- **controbriglia e bacino di dissipazione**

La controbriglia è una briglia di modesta altezza sull'alveo costruita poco a valle di una briglia di rilevante altezza allo scopo di creare, al piede di essa, un cuscinio d'acqua in grado di attutire l'impatto della lama stramazante al fine di salvaguardare la stabilità della fondazione.

La controbriglia è dotata di una gaveta delle stesse dimensioni della gaveta della briglia. Altezza della controbriglia e distanza dalla briglia sono determinate sulla base di un calcolo fondato sul principio che il dispositivo deve contenere la vena d'acqua stramazante dalla briglia e permetterne la diffusione in modo che la corrente si trasformi da veloce a lenta superando la gaveta della controbriglia.

Figura 1.8.10: Il disegno mostra la configurazione ed il funzionamento del sistema briglia-contr briglia bacino di dissipazione. Il posizionamento di una controbriglia a valle della briglia, consente di individuare un bacino che riempiendosi d'acqua crea le condizioni per l'assorbimento dell'energia della vena d'acqua impattante oltre il piede della briglia. Questo accorgimento permette di controllare i fenomeni di escavazione dovuti all'impatto dell'acqua contenendoli entro valori di progetto determinabili per mezzo di relazioni matematiche semiempiriche. Qualora il bacino di dissipazione non dovesse essere sufficiente si dovrà prevedere un rivestimento protettivo del fondo del bacino di dissipazione su cui si possono esercitare importanti sottospinte.



Rivestimenti

Sono strutture per la protezione dall'erosione senza alcuna funzione di sostegno. Caratterizzate dall'aver uno spessore trascurabile rispetto alle altre due dimensioni possono essere permeabili o impermeabili, rigide, flessibili o realizzate con materiali sciolti. Queste opere richiedono una progettazione attenta alle condizioni idrodinamiche che possono determinare sollecitazioni eccessive sulla struttura e processi di escavazione in grado di causare scalzamento o aggiramento delle opere. I rivestimenti vengono utilizzati sia sulle sponde che sul fondo degli alvei ed hanno un'influenza sul regime della corrente che è essenzialmente legata alla variazione della scabrezza in funzione del materiale di cui sono costituiti. Dal punto di vista ambientale possono avere un impatto significativo per le modifiche che possono apportare alla permeabilità all'acqua ed alla vegetazione e per le modifiche che apportano agli habitat sia acquatici che terrestri; miglioramenti sotto questo profilo si possono ottenere combinando materiali inerti e materiali vivi secondo le tecniche dell'ingegneria naturalistica.

Figura 1.8.11: Posa del rivestimento di un alveo con materassi in rete metallica a doppia torsione riempiti in pietrame.



Figura 1.8.12: Fase di posa di geostuoia tridimensionale rinverdibile a difesa di una sponda.



Generalità

Il controllo del trasporto solido è un problema che si presenta principalmente nei corsi d'acqua di montagna; questi generalmente sono alimentati da bacini caratterizzati da un rilievo geologicamente giovane, in evoluzione, e quindi interessato dalla presenza più o meno diffusa di fenomeni erosivi. I corsi d'acqua di montagna vengono distinti generalmente in:

- **torrenti di erosione;**
- **torrenti di trasporto.**

Figura 5.0.1: Un esempio di torrente in scavo. L'alveo è inciso profondamente nel detrito e sulle sponde ripide sono evidenti e segni di instabilità. Oltre al materiale lapideo, nell'alveo si possono vedere delle piante. In occasione di eventi alluvionali sono le piante il materiale che può creare i maggiori problemi accumulandosi in corrispondenza delle opere d'arte e impedendo il deflusso delle acque.

I primi hanno capacità di trasporto maggiore rispetto al tasso di alimentazione di materiale eroso proveniente dal bacino e pertanto saturano la capacità di trasporto residua con materiale eroso lungo l'alveo; i secondi, invece, si limitano a trasportare il materiale eroso proveniente dalla superficie del bacino senza avere la capacità di prenderne in carico dal fondo e dalle sponde dell'alveo. In certi casi, localmente, il volume di trasporto solido in eccesso viene depositato lungo l'alveo e può essere causa di esondazione o di ostacolo al deflusso delle acque. In quest'ultimo caso le conseguenze possono essere pericolose per la stabilità delle sponde e dei versanti che possono venire scalzati dalla corrente costretta a deviare rispetto al corso naturale.

L'eccesso di trasporto solido inoltre può dar luogo ad accumuli negli alvei di materiale che può successivamente mobilizzarsi in forma di colate detritiche caratterizzate da elevata capacità distruttiva.



Figura 5.0.2: Esondazione dovuta ad eccesso di trasporto solido e sovralluvionamento in zona di conoide. Il deposito del trasporto solido in corrispondenza della rottura di pendenza presso lo sbocco a valle del torrente, dà luogo all'innalzamento del fondo e conseguente esondazione. Oltre a questo fenomeno, spesso in queste condizioni, si riversano a valle le colate di fango o di detrito che si innescano nelle parti alte dei bacini, con conseguenze che possono essere devastanti. (Vallescura , BG)



Le soluzioni a problemi di eccesso di trasporto solido possono essere di due tipi:

- interventi di tipo attivo: vengono realizzati direttamente sui versanti combinando quelli di carattere intensivo con quelli estensivi (stabilizzazione di frane e controllo dell'erosione);
- interventi di tipo passivo: si effettuano lungo il corso d'acqua allo scopo di intercettare il materiale trasportato prima che possa venire depositato in maniera incontrollata causando danni.

Gli interventi di tipo passivo sono costituiti dalle cosiddette briglie di "trattenuta" e dalle piazze di deposito.

- **Le briglie di trattenuta**, sono opere trasversali che intercettano il trasporto solido ed il materiale flottante in maniera pianificata ed in luoghi dove periodicamente sia possibile asportare i sedimenti.
- **Le piazze di deposito**, spesso posizionate sulla conoide o prima di essa, hanno il compito di provocare la deposizione preferenziale del materiale in aree sufficientemente vaste e pianeggianti, lontane dai punti sensibili.

Entrambi i sistemi descritti sopra, presuppongono che sia programmata un'attenta manutenzione poiché tali opere riempiendosi di depositi alluvionali divengono inefficaci ed anzi possono risultare pericolose.



Figura 5.0.3: Briglia di trattenuta a finestre. La struttura massiccia e di grandi dimensioni è stata quasi completamente riempita a tergo dai sedimenti depositi dalla corrente. E' necessario procedere alla manutenzione per ripristinare a pieno la funzionalità dell'opera.



Figura 5.0.4: Piazza di deposito con briglia a fessura per il trattenimento dei sedimenti. L'opera deve essere abbastanza grande da contenere i sedimenti che possono deporsi almeno nell'arco di un evento importante. Per mantenerne la funzionalità sono molto importanti le manutenzioni periodiche e successivamente ad eventi estremi.

Generalità

Si tratta di un'opera utilizzata nella sistemazione dei torrenti; può essere impiegata sia nei torrenti di trasporto che in quelli in scavo, ma principalmente trova applicazione nel primo caso e nei settori di conoide.

Col termine cunettone, si indica un alveo artificiale sufficientemente regolare, protetto con pietrame legato con malta o altro materiale che non venga eroso dalla corrente.

La protezione impedisce l'erosione dell'alveo ed al tempo stesso diminuisce la scabrezza causando un aumento della velocità della corrente che impedisce la deposizione di sedimenti. In tal modo la diminuzione di scabrezza può compensare gli effetti dovuti alla diminuzione di pendenza.

Questo tipo di sistemazione ha un impatto piuttosto pesante sia dal punto di vista ambientale (cementazione di fondo e sponde), che idraulico (riduzione del tempo di corrvazione) per tali ragioni deve essere riservata ai tratti ove sia strettamente necessaria, e cioè:

- nell'attraversamento dei centri abitati;
- in corrispondenza del cono di deiezione.

Le tipologie di cunettone comunemente usate sono le seguenti:

- di forma trapezia, con fondo e sponde di calcestruzzo rivestite di pietrame duro;
- a pareti verticali, con fondo rivestito in cemento e pietrame e con sponde sostenute da muri di sponda;
- formato con grossi sassi disposti a secco, caratterizzato da impatto visivo gradevole in montano;
- con sponde in lastre di calcestruzzo prefabbricato; solo se il trasporto solido è limitato o di granulometria non troppo grossolana, in quanto il calcestruzzo è facilmente erodibile.

Figura 5.3.1: Esempio di cunettone realizzato con sponde in calcestruzzo e fondo in pietrame squadrato, con l'asse maggiore in verticale, annegato in una fondazione di calcestruzzo magro. L'utilizzo di muri di sponda consente di massimizzare la sezione di deflusso e la sezione completamente rivestita diminuisce la scabrezza. Il manufatto con queste caratteristiche consente di evitare l'esondazione nel tratto finale del torrente, dove la diminuzione di pendenza può causare il deposito del trasporto solido e l'innalzamento del fondo. (CEMAGREF, 1983).

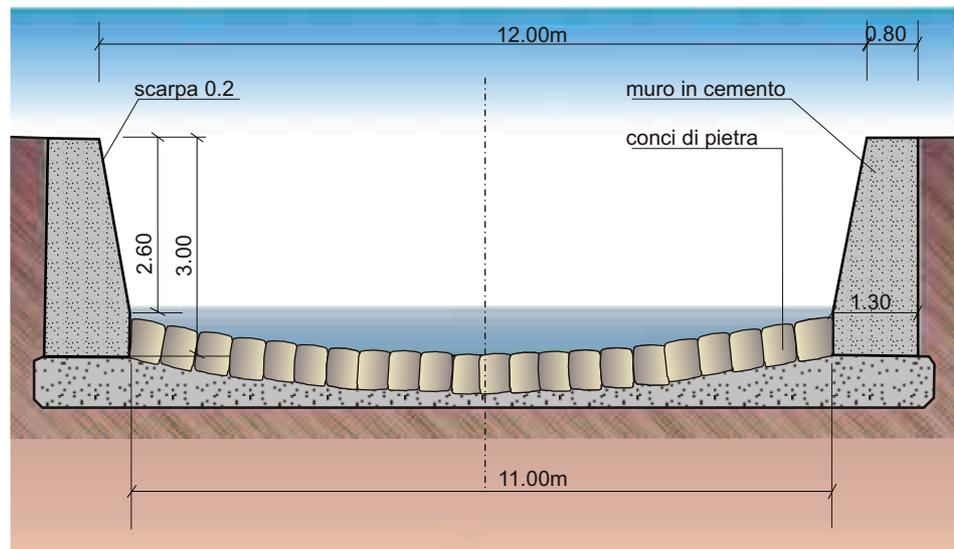


Figura 5.3.2: Nello schema a fianco è raffigurato un cunettone con muri di sponda e fondo in calcestruzzo rivestiti in pietrame. Il pietrame oltre a migliorare l'impatto visivo dell'opera ha la funzione di proteggere il calcestruzzo dall'abrasione e dagli urti dovuti al materiale, anche di grosse dimensioni, in carico alla corrente.

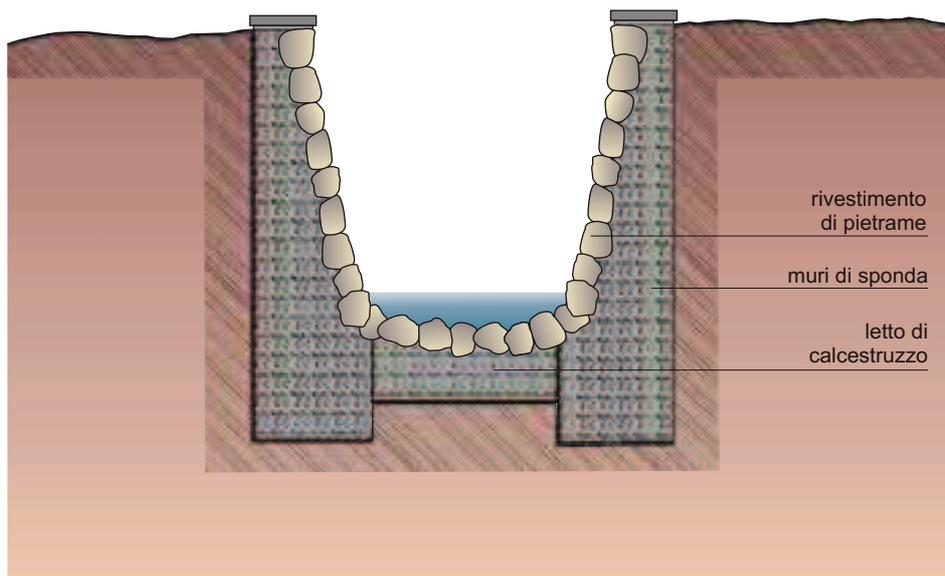


Figura 5.3.3: La foto riprende un cunettone in pietrame, a sezione trapezoidale, realizzato in prossimità di un attraversamento di una strada, in corrispondenza di un tributario del fiume principale.



L'utilizzo di questo tipo di opera è controindicato in abbinamento con la vegetazione, in quanto è necessario mantenere basse le scabrezze, cosa resa difficile dalla presenza di piante.

La cunetta deve essere dimensionata in funzione della portata di progetto, escludendo, in linea di massima, che la stessa sia interessata da lave torrentizie. Tale eventualità porterebbe facilmente all'intasamento della sezione con conseguente esondazione laterale, secondo uno schema purtroppo osservato in numerose occasioni.

Si richiede pertanto l'approntamento di opere di riduzione del trasporto solido (briglie aperte o piazze di deposito) e dei materiali vegetali di grandi dimensioni (briglie a pettine) ubicate in condizioni adeguate (generalmente all'apice del conoide di deiezione, con adeguate strade di accesso per lo svuotamento).

Il cunettone deve adattarsi alla topografia del conoide, pertanto risulta sempre a forte pendenza. Onde contenere la velocità dell'acqua a valori accettabili (4-5 m/s e comunque inferiore sempre a 8 m/s) si rendono quasi sempre necessari salti di fondo in modo da ridurre la pendenza dei tratti di cunettone compresi fra un tronco e l'altro. I salti, creando con l'aerazione della vena un miscuglio acqua-aria, oltre a diminuire la velocità della corrente riducono le azioni di impatto.

Particolare attenzione deve essere riservata alla realizzazione della confluenza del corso d'acqua sistemato nel corso d'acqua principale. Per evitare che il materiale trasportato durante una piena isolata del corso d'acqua tributario si depositi nell'alveo del corso d'acqua recipiente, eventualmente sbarrandolo, si devono evitare le confluenze ad angolo retto. Risulta opportuno operare in modo che l'angolo compreso fra l'asse del tributario e l'asse del corso d'acqua principale sia dell'ordine di 20°-30°.

Figura 5.3.4: Cunettone a sezione trapezia, rivestito in pietrame. Il torrente, che in questo tratto passa all'interno di un abitato, è costretto ad una brusca variazione di direzione e subisce una riduzione di sezione in corrispondenza del ponticello che si vede nella foto successiva. In occasione dell'evento alluvionale verificatosi in Friuli nel settembre 2003, l'eccesso di portata e il transito di colate detritiche hanno causato l'esondazione in questo punto critico. Nella foto successiva è mostrato il ponte con i segni dei danni prodotti dai detriti che lo hanno investito.



Cap. 6 Opere di difesa dall'erosione

Generalità

Le opere di difesa dall'erosione in un tratto di un corso d'acqua si rendono necessarie in tutti quei casi in cui la velocità della corrente sia sufficientemente elevata da riuscire ad asportare materiale dal fondo e dalle sponde e la capacità di trasporto non sia già saturata dai sedimenti in carico alla corrente.

In questi casi l'approccio alla difesa dall'erosione può essere di due tipi diversi:

- diminuzione della velocità della corrente: sistemazioni a gradinata e briglie di consolidamento, repellenti;
- protezione meccanica delle sponde e del fondo con materiali artificiali o naturali, con la possibilità di combinare materiali vivi ed inerti: muri di sponda, rivestimenti e presidi al piede.

Figura 6.0.1: Erosione lungo la sponda esterna di un'ansa fluviale. L'aumento della capacità erosiva è dovuto alla forza centrifuga cui è soggetta l'acqua in corrispondenza della curva. Il filone della corrente si sposta verso la sponda esterna dove, oltre all'arretramento della stessa, provoca un approfondimento dell'alveo.

Si osservi al contrario la tendenza al deposito che si manifesta presso la sponda interna. (Arno fra Poppi e Bibbiena Novembre 1992).

Nella progettazione di questi interventi è importante considerare che le condizioni di equilibrio delle sponde generalmente sono diverse da quelle del fondo, pertanto possono richiedere soluzioni differenziate. Una corretta progettazione richiede sempre verifiche della stabilità delle protezioni attraverso la stima delle azioni di trascinamento dovute alla corrente; queste verifiche però in alcuni casi sono piuttosto complesse in quanto non sempre sono di facile modellazione le azioni idrodinamiche dovute a particolari configurazioni degli alvei.



La protezione dall'erosione di un tratto di un corso d'acqua può avere un impatto molto pesante nei tronchi a valle: la diminuzione di sedimenti in carico alla corrente ne aumenta la capacità di trasporto e tratti a valle, precedentemente stabili, possono divenire soggetti a fenomeni erosivi. Pertanto le modifiche apportate con opere di difesa quali briglie e difese di sponda devono essere limitate alla protezione di quelle aree il cui dissesto darebbe luogo alla mobilitazione di masse di materiale non controllabile a valle o innescare dinamiche di versante pericolose.

Figura 6.0.2: Cedimento del terreno dovuto all'erosione intorno ai pozzi di fondazione della pila di ponte.

L'erosione accentuata può essere dovuta all'aumento di velocità ed alle turbolenze dell'acqua prodotte dalla presenza delle pile o dalle mutate condizioni di trasporto solido del fiume. La costruzione di difese dall'erosione a monte potrebbe avere ridotto il trasporto solido ed aumentato la capacità



Figura 6.0.3: Palancole in metallo a difesa dell'Isola Tiberina nel centro di Roma.

Le palancole fanno da protezione e cassaforma a un setto in c.a. In questo modo è possibile sistemare una sponda instabile o modificare la geometria dell'alveo qualora le pendenze naturali della sponda non consentano di avere una sezione di deflusso sufficientemente ampia.



Generalità

La sistemazione a gradinata si attua allorché si intende correggere il profilo longitudinale di un torrente allo scopo di ridurre la pendenza mediante opere trasversali:

- briglie di consolidamento
- soglie

Scopo delle opere trasversali è la creazione di punti fissi lungo il profilo dell'alveo a cui, pertanto, viene data una configurazione pressoché definitiva.

L'ipotesi alla base degli interventi sistematori del secolo scorso era la tendenza naturale verso un profilo di equilibrio corrispondente ad una situazione in cui avviene il compenso fra erosione e deposito di materiale, ossia la quantità di materiale asportato eguaglia la quantità di materiale che proviene da monte. La pendenza che caratterizza il tronco d'alveo in tali condizioni fu identificata con il nome di pendenza di compensazione e risultava variabile in funzione della portata e delle dimensioni del materiale presente in alveo.

Una migliore comprensione dei processi, ha posto in evidenza, a seguito di fenomeni quali la corazzatura dell'alveo, l'instaurarsi di una pendenza di equilibrio intesa come pendenza limite per cui la corrente, in condizioni normali, non erode il letto.

L'effetto della correzione della pendenza con opere trasversali è quello di far raggiungere all'alveo una situazione di equilibrio con maggiore rapidità rispetto a quanto avverrebbe naturalmente. Nel caso delle briglie, questa nuova configurazione di equilibrio viene raggiunta col progressivo riempimento della capacità di invaso formatosi a monte, mentre nel caso delle soglie di fondo, la modifica della pendenza del fondo in genere di più limitata entità si ottiene per effetto dell'erosione che si determina a valle di esse.

Figura 6.1.1: Sistemazione a gradinata a monte di una briglia a finestre. Le briglie a gravità in calcestruzzo hanno il paramento rivestito in pietrame (Valtellina).



Figura 6.1.2: Sistemazione a gradinata con briglie in cemento armato, realizzata sull'accumulo detritico della frana della "Val Pola" in Valtellina (SO).

Il sistema è stato realizzato per impedire l'erosione dell'accumulo in caso di tracimazione delle acque innalzatesi dietro lo sbarramento naturale. L'alveo artificiale scavato nel detrito è stato rivestito in blocchi di roccia.



Figura 6.1.3: Val Pola (SO). Immediatamente valle del sistema briglie della foto precedente, è stata realizzata una protezione con prismi di cemento armato su pali, per impedire lo scavo da parte della corrente.



Figura 6.1.4: Sistemazione a gradinata in gabbioni e materassi. Lavori complementari sulla autostrada Messina - Palermo.



Generalità

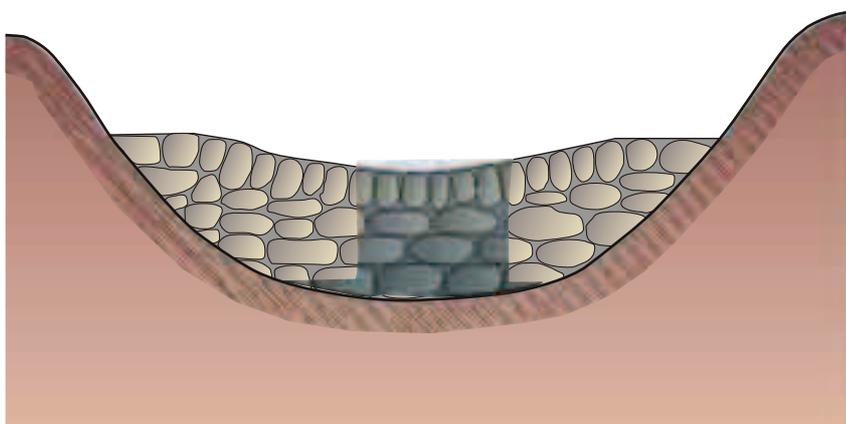
Briglie di consolidamento

Le briglie di consolidamento sono opere trasversali al torrente, sporgenti dall'alveo nel quale sono fondate (vedi capitolo strutture di base).

Subito dopo la costruzione dell'opera, ha inizio il riempimento di materiale solido della capacità formatasi a monte di essa, Le briglie di consolidamento possono avere dimensioni differenti a seconda delle caratteristiche morfologiche dell'alveo: nelle aste secondarie strette e ripide, le briglie sono generalmente più piccole e ravvicinate, mentre nel fondovalle principale assumono dimensioni maggiori.

Esistono varie tipologie di briglie in uso, che vengono adottate a seconda delle condizioni morfologiche, delle dimensioni che debbono assumere e dei materiali a disposizione.

Figura 6.1.7: Esempio di briglia in pietra con gaveta a catenaria. Sono opere particolarmente adatte ad interventi su torrenti in cui sia reperibile materiale adatto in loco. Si inseriscono bene nel contesto del paesaggio montano. (Benini, 1995, rid.)



Generalità

Briglie a gravità

Si tratta di briglie che resistono alla spinta a tergo del terreno e dell'acqua solo in virtù del peso proprio.

Il profilo trasversale di una briglia a gravità è di solito trapezio, (o a gradoni verso monte). Una vecchia norma legislativa (D.M. 20/8/1912) prescrive il paramento a valle verticale, è però ammissibile, e conveniente, una piccola scarpa a valle <0,2%. Sono strutture che possono venire realizzate con calcestruzzo, pietra con malta, gabbioni in rete metallica a doppia torsione riempiti di pietra e legname abbinato a pietra.

Descrizione e Caratteristiche

Briglie a gravità in calcestruzzo

Nella figura seguente (ridisegnato da Benini, 1990) sono riportati prospetto e sezione di una tipica briglia a gravità ad andamento rettilineo.

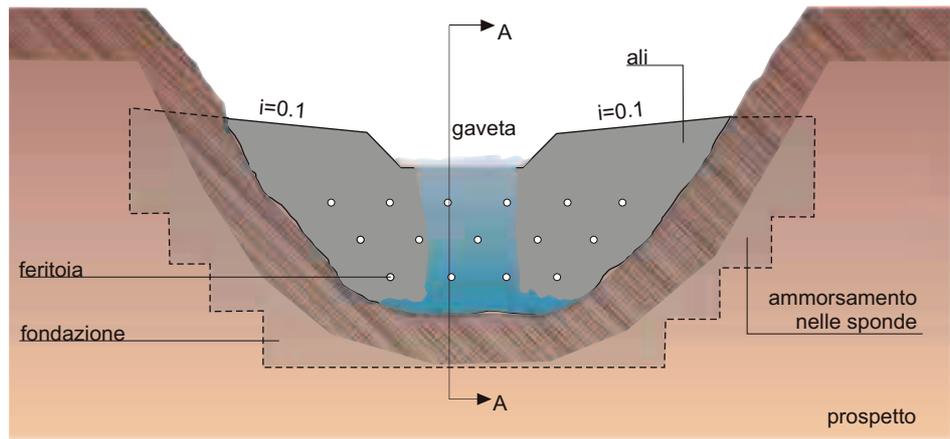
Con riferimento alla figura gli elementi caratteristici di una briglia a gravità rettilinea sono:

- la gaveta;
- le ali;
- il coronamento;
- il corpo.

Figura 6.1.8: Prospetto e sezioni di una briglia a gravità in cui si possono osservare gli elementi geometrici caratteristici di questo tipo di opera: gaveta, ali, coronamento.

Le viste in sezione mostrano alternative diverse per la conformazione del corpo della briglia: col paramento di valle verticale o subverticale, col paramento di monte gradonato o inclinato per aumentare la stabilità dell'opera.

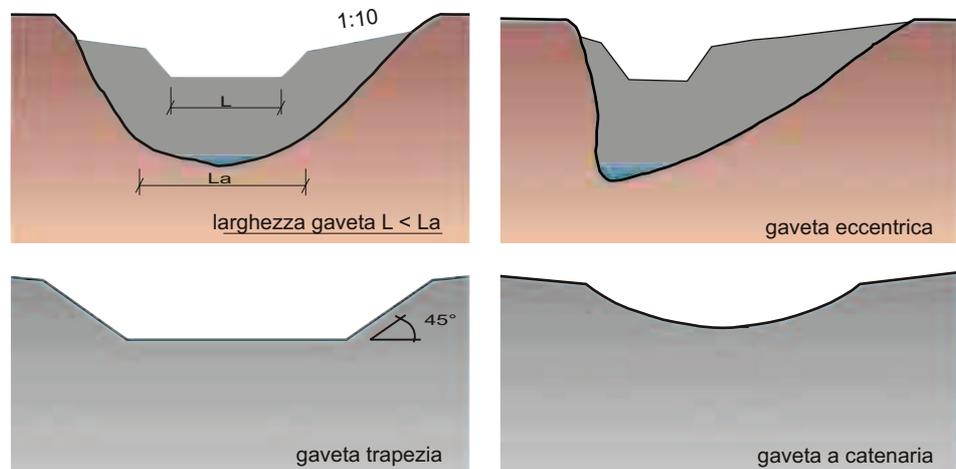
Si osservino inoltre i fori passanti che consentono la dissipazione delle pressioni neutre che altrimenti agirebbero a tergo della struttura.



La gaveta rappresenta una depressione del coronamento della briglia avente il compito di allontanare la corrente dalle sponde, mantenendola lungo l'alveo attivo. Per tale scopo, la larghezza della gaveta deve essere non superiore a quella dell'alveo solitamente occupato dalla corrente, in modo che la vena stramazzante dalla briglia non intacchi il piede delle sponde provocandone il franamento (e quindi l'annullamento dell'immorsamento della briglia). Eventualmente si provvede ad inserire la gaveta in posizione eccentrica rispetto alla mezzeria della briglia.

La gaveta ha forma trapezia (con lati inclinati di 45° sull'orizzontale) oppure a catenaria ed è raccordata alle sponde dalle ali della briglia, il cui coronamento è costruito con una inclinazione di 1:10 allo scopo di mantenere la corrente, per quanto possibile, lontana dalle sponde anche nel caso in cui la gaveta risulti insufficiente al convogliamento della portata (per esempio, perché parzialmente ostruita da grossi massi).

Figura 6.1.9: Gli schemi accanto mostrano tipologie di gaveta diverse per geometria e posizione. La gaveta ha la funzione importante di dirigere il filone della corrente evitando che questa possa intaccare le sponde e provocare l'aggiramento dell'opera. La gaveta deve essere mantenuta sempre sgombra dal materiale di trasporto solido pena la perdita di efficienza dell'opera.



Il coronamento ha uno spessore che generalmente viene stabilito mediante formule empiriche che fanno riferimento ad esempio all'altezza della briglia o alle dimensioni caratteristiche del materiale in condizioni di moto incipiente dopo la correzione (per $i=i_c$).

Per quanto riguarda la fondazione, si può ritenere che essa debba avere una profondità superiore a quella del gorgo che la lama stramazzone provocherà nell'alveo a valle. Esistono varie formule empiriche che vengono utilizzate per stimare questo parametro, ad esempio Benini (1990) suggerisce di fare variare tale profondità (Z_f) fra 0.3 e 0.5 volte l'altezza totale ($Z + h$), mentre Puglisi propone profondità dell'ordine di $0.2 (Z + h)$.

La sporgenza della fondazione a valle ed a monte del corpo della briglia deve rispondere alla necessità di migliorare la stabilità al ribaltamento limitando la sporgenza a valle sia per non avere danni dai massi che possono precipitare dalla gaveta, sia per non avere fessurazioni dello sporto a causa di una parziale ripartizione degli sforzi; Puglisi propone uno sporto di valle pari a $b_v = 0.33 Z_f$ e quello di monte pari a $b_m = 0.67 Z_f$.

Per quanto concerne i criteri di dimensionamento del corpo della briglia si può fare riferimento al capitolo introduttivo sulle strutture di base in cui sono indicate le verifiche che vengono fatte per la progettazione di queste opere.

Come descritto nell'introduzione il paramento di monte di una briglia è sollecitato dalla spinta attiva del terreno in analogia con un muro di sostegno. Se si permette all'acqua di saturare il terreno a ridosso della struttura, su di questa agirà anche la spinta idrostatica. Le condizioni di esercizio sarebbero in tal caso molto gravose e pertanto si dispongono attraverso il corpo della briglia due o più serie di feritoie passanti aventi lo scopo di portare la pressione atmosferica sul paramento di monte scaricando, in tal modo, la pressione idrostatica. Spesso, dalle aperture si osserva colare acqua; tali colature, nel tempo, si affievoliscono lasciando intuire che il terreno a monte si è intasato ed è esclusa la presenza di acqua in grado di generare la spinta idrostatica sul paramento. In tali condizioni di regime, la configurazione di carico in esame risulta meno gravosa di quella iniziale.

Figura 6.1.10: Briglia a gravità in calcestruzzo con paramento rivestito in pietrame.



Le briglie sono soggette all'effetto delle sottospinte idrauliche a causa di moti di filtrazione dell'acqua nel terreno di fondazione della struttura.

L'effetto della sottospinta può essere sensibilmente ridotto od eliminato, secondo la tendenza verificata nelle realizzazioni più recenti, mediante l'inclusione nella fondazione di pozzetti riempiti di ghiaia che mettono in comunicazione il terreno sul fondo della fondazione con condotti sboccanti all'atmosfera sul paramento a valle dell'opera.

Una condizione di sollecitazione particolare è dovuta all'impatto di colate di detrito; il caso dovrebbe essere considerato poco frequente se si attua la precauzione di riportare materiale dell'alveo a tergo della struttura appena completata la costruzione.

Sulla base di valutazioni teoriche e sperimentali, si ritiene che l'azione dinamica di una colata detritica contro un ostacolo sia equivalente ad una forza statica dell'ordine da 7 a 10 volte la spinta idrostatica. Si tratta di azioni non contrastabili con la normale tipologia strutturale delle briglie a gravità. Si richiede pertanto il ricorso a strutture in calcestruzzo armato che permettono l'intervento dell'azione resistente dovuta alla spinta passiva del terreno in corrispondenza dell'ammorsamento nelle sponde. Si deve inoltre spesso ricorrere all'impiego di tiranti di ancoraggio.

Figura 6.1.11: Briglia a gravità in gabbioni per intercettazione colate detritiche. Il normale flusso dell'acqua passa attraverso l'apertura alla base della briglia mentre il corpo del manufatto ceo lo sbarramento al detrito durante la colata. La gradonatura verso valle della briglia fornisce la resistenza al ribaltamento nella fase di spinta della colata detritica.



Figura 6.1.12: Sistemazione di un torrente con briglie in gabbioni in ambiente calanchivo (Petràlia PA).

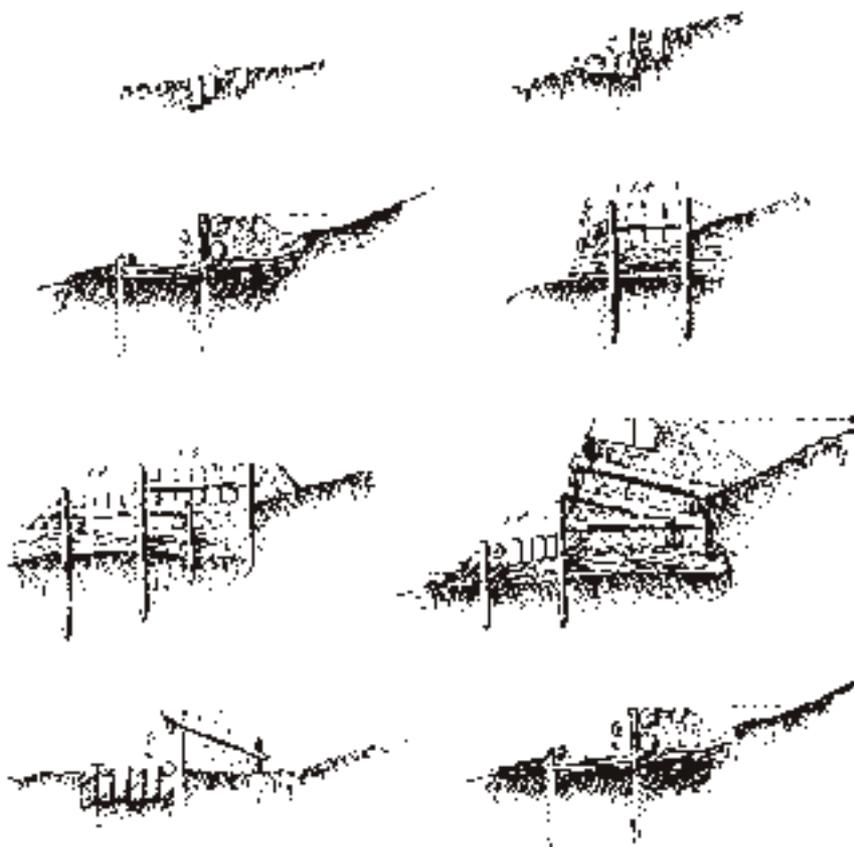


Descrizione e Caratteristiche

Briglie in legname e pietrame

Si tratta di una tipologia di briglie che si realizzavano in passato, quando si utilizzavano principalmente materiali naturali reperibili sul posto, e che di recente sono state riscoperte nell'ambito dell'ingegneria naturalistica.

Figura 6.1.13: Schemi costruttivi di briglie in legname e pietrame di semplice realizzazione. Si osservi la platea in massi disposti con asse principale verticale per impedire lo scalzamento alla base (da VIAPPIANI, 1923).



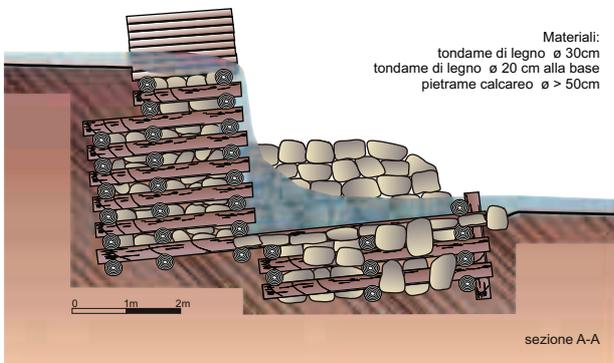
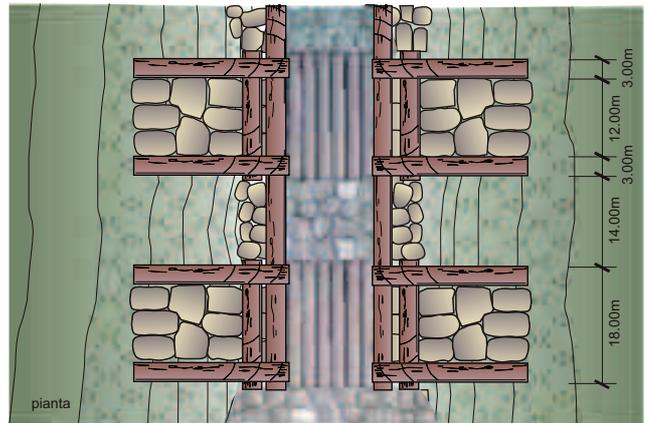
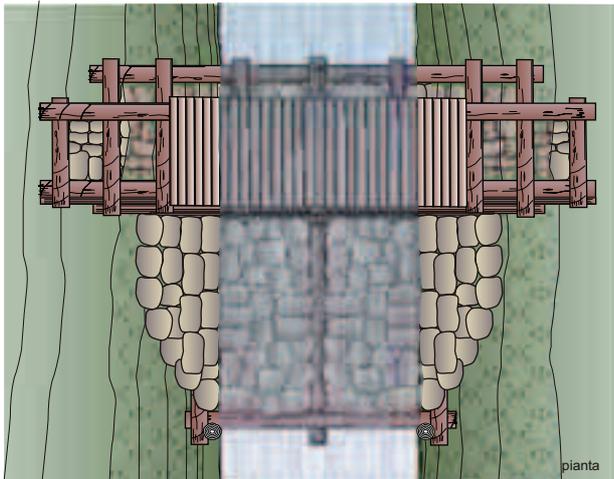
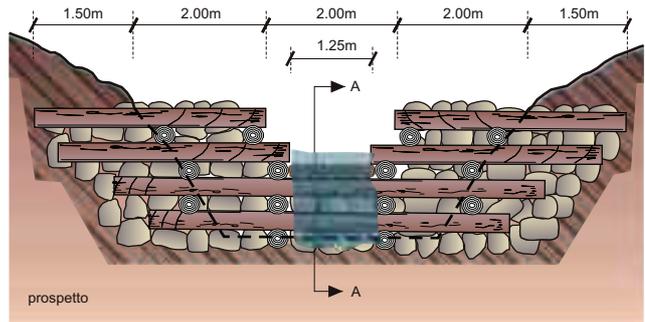
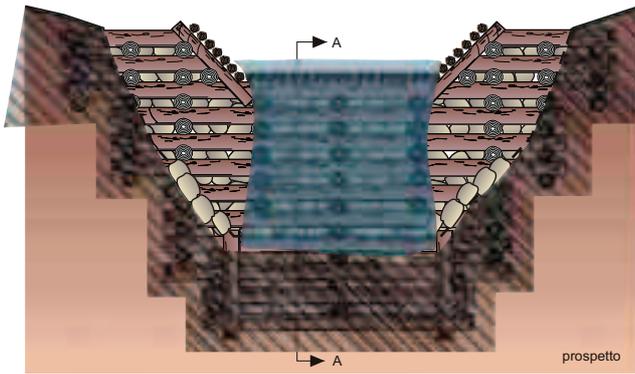
L'altezza di queste opere generalmente non supera 1,50 m dal fondo alveo al piano della gaveta.

I tronchi sono collegati tra loro con chiodi e grappe metalliche in modo che la briglia venga ad assumere la forma di un cassone.

Quanto alle dimensioni da assegnarsi alle briglie di legname, o miste di legname e pietrame, si osserva la consuetudine di ritenere che lo spessore alla base sia circa uguale all'altezza della briglia.

Figura 6.1.14: Briglie in legname e pietrame costruite sulla conoide incisa di un torrente (Friuli).





Materiali:
 tondame di legno \varnothing 30cm
 tondame di legno \varnothing 20 cm alla base
 pietrame calcareo \varnothing > 50cm

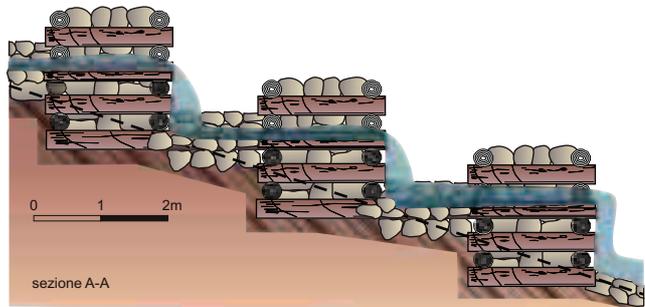


Figura 6.1.15: Schemi che mostrano le diverse viste di una briglia in legname e pietrame. La gaveta è rivestita con piccoli tondame di legno che possono venire sostituiti una volta usurati. Il piede è protetto dallo scalzamento con un cassone in legno riempito e rivestito di pietrame.

Figura 6.1.16: Gradinata di briglie in legname e pietrame collegate per mezzo dei traversi in legno e dotate di rivestimento protettivo in pietrame nel tratto di collegamento

È raccomandabile che la gaveta sia rivestita con tondame (intero o diviso a metà) disposto nel senso della corrente.

La protezione che si realizza a valle della briglia, dove impatta la lama stramazante è generalmente suddivisa in campi delimitati da travi di legname per contenere eventuali dissesti all'interno di un campo e limitare così anche gli interventi di ripristino. La protezione deve, ovviamente, interessare anche le sponde per una adeguata altezza.

La vita di queste opere, con riferimento alla durabilità del legname, può superare i 30 anni, in dipendenza dal tipo di essenza e dal fatto che mantenga un alto grado di umidità abbastanza costantemente. Solitamente è impiegato tondame di larice o castagno con diametro 20-40 cm e pietrame con diametro di 20-40 cm.

Sono state realizzate opere di questo tipo alte anche più di 10 m. Tuttavia è stato dimostrato che gli stati di sollecitazione interna di strutture così grandi non presentano sufficienti livelli di sicurezza soprattutto per quanto concerne gli sforzi di taglio prodotti in corrispondenza delle connessioni. Per tali ragioni ed anche per ridurre i problemi di dissipazione dell'energia a valle, è bene non superare i 2 m circa e piuttosto preferibile diminuire la distanza delle opere della gradinata.

Figura 6.1.17: Sistemazione a gradinata con briglie in legname pietrame, con gaveta rivestita in tondame di piccolo diametro si notino inoltre le talee di salice inserite nelle ali delle briglie. Sulle sponde rimodellate si possono osservare opere di stabilizzazione realizzate con talee di salice (gradonate vive).

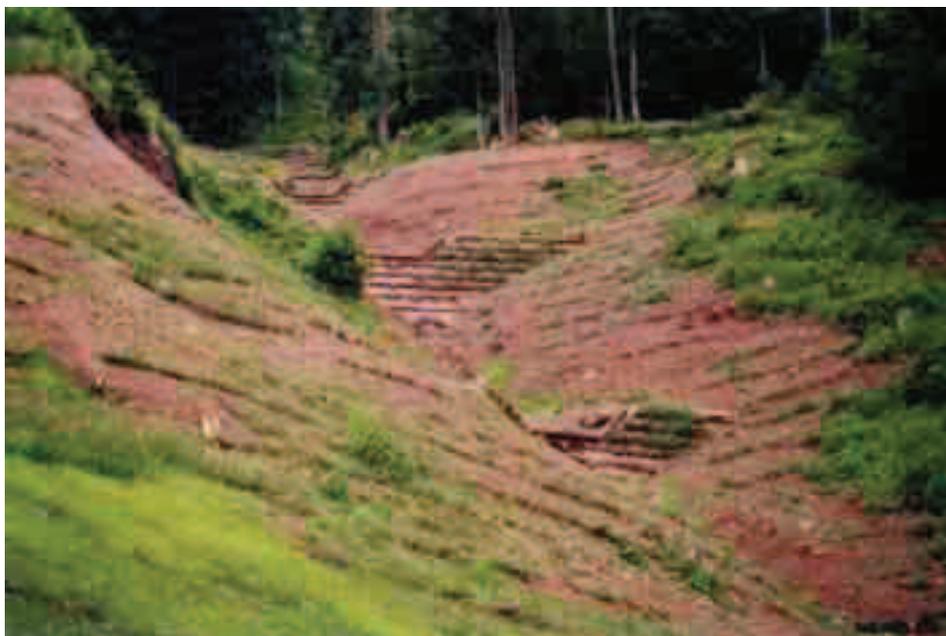


Figura 6.1.18: Particolare della gaveta rivestita con tondame di legno.



Descrizione e Caratteristiche

Briglie in gabbioni

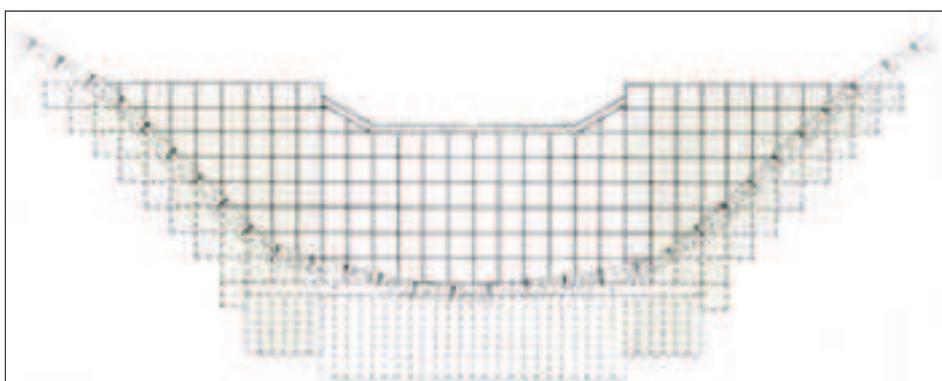
I gabbioni ed i materassi possono essere convenientemente usati per la costruzione di briglie a gravità in tutte quelle situazioni in cui non vi sia un trasporto solido troppo grossolano che possa danneggiare le reti metalliche. Risultano particolarmente convenienti nel caso in cui sia possibile utilizzare del materiale lapideo reperito in loco. Si possono realizzare briglie a gravità che hanno le stesse caratteristiche geometriche di quelle costruite in calcestruzzo: strutture dotate di gaveta, controbriglia, bacino di dissipazione.

Figura 6.1.19: Schema di una briglia in gabbioni dotata di controbriglia e vasca di dissipazione rivestita con gabbioni di spessore 0.50 m.



È necessario prevedere sempre il rivestimento della gaveta con calcestruzzo armato, poiché la rete metallica non resisterebbe a lungo in una posizione in cui è così fortemente sollecitata. Nel bacino di dissipazione invece, grazie all'assorbimento di energia dovuto al cuscinio d'acqua che si forma, è possibile usare rivestimenti in gabbioni di altezza 0.5-1.0 m. Nel caso in cui si prevedano azioni molto intense dovute alla corrente ed al trasporto solido, si può prevedere un rivestimento con massi eventualmente legati con malta.

Figura 6.1.20: Nella foto: briglia in gabbioni a paramento verticale e gaveta rivestita in calcestruzzo. Il paramento ai lati della gaveta, dove non è sottoposto all'azione dell'acqua e del trasporto solido, è gradonato per migliorare la stabilità della struttura. Nel disegno si osserva l'immorsamento delle ali della stessa briglia e le fondazioni su pali per prevenire lo scalzamento



I vantaggi derivanti dall'uso dei gabbioni risiedono soprattutto nell'elevata flessibilità delle strutture che si possono realizzare e nella minore influenza delle spinte dovute all'acqua grazie alla permeabilità elevata degli elementi riempiti con pietrame (anche se a lungo termine non si possono considerare completamente permeabili). Per le ragioni sopra esposte i gabbioni si prestano particolarmente bene per interventi su terreni argillosi quali quelli delle formazioni calanchive.

Figura 6.1.21: Una sistemazione a gradinata con briglie in gabbioni in una incisione in formazioni di tipo calanchivo. Le briglie non sono ancora state riempite a tergo dai sedimenti.



Figura 6.1.22: Sistemazione in gabbioni realizzata nell'ambito delle opere accessorie per l'autostrada Messina-Palermo.



Descrizione e Caratteristiche

Soglie

Come indicato precedentemente le soglie sono, a differenza delle briglie, opere trasversali non sporgenti: con lo scopo primario di fissare nella sezione considerata il fondo dell'alveo circa alla stessa quota dell'alveo naturale.

Le soglie possono essere impiegate sia nelle sistemazioni a gradinate che isolatamente, e trovano applicazione oltre che nelle correzioni dei torrenti nella stabilizzazione del fondo dell'alveo dei fiumi di pianura.

Nel primo caso, diversamente dalle briglie, tra una soglia e l'altra, al succedersi delle piene e delle morbide, l'asportazione del prisma di materiale d'alveo compreso tra due soglie successive provoca una diminuzione di pendenza.

Dal punto di vista del dimensionamento le soglie andranno trattate come delle briglie, poiché nel tempo verranno a trovarsi in condizioni di sollecitazione simile. A differenza di quelle però bisognerà tenere conto degli effetti dell'erosione a valle, che può indurre movimenti nella struttura se questa non è adeguatamente fondata. Inoltre poiché l'equilibrio si raggiunge attraverso l'erosione e non il deposito, si dovrà tenere conto degli eventuali fenomeni di instabilità che questa potrebbe indurre nei versanti presenti tra una soglia e l'altra. Questo tipo di opere possono essere costruite in calcestruzzo o con massi vincolati; l'uso del legname mal si presta per la difficoltà di creare cassoni in scavo nell'alveo e per l'impossibilità in genere di infiggere pali in un alveo in cui sono presenti trovanti.

Figura 6.1.33: Sistemazione a gradinata con soglie. Il terreno tra un'opera e l'altra verrà eroso dal corso d'acqua, fino al raggiungimento della pendenza di correzione.

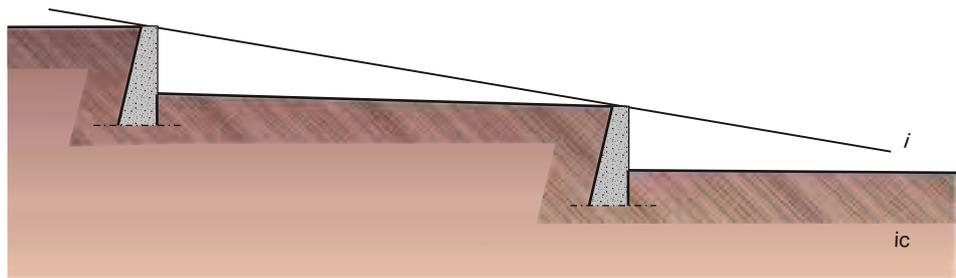


Figura 6.1.34: Piccole soglie in legname e pietrame, utilizzate per fissare la quota di fondo di corsi d'acqua minori. Si può realizzare solo in condizioni in cui sia possibile infiggere i pali di legno nel terreno.

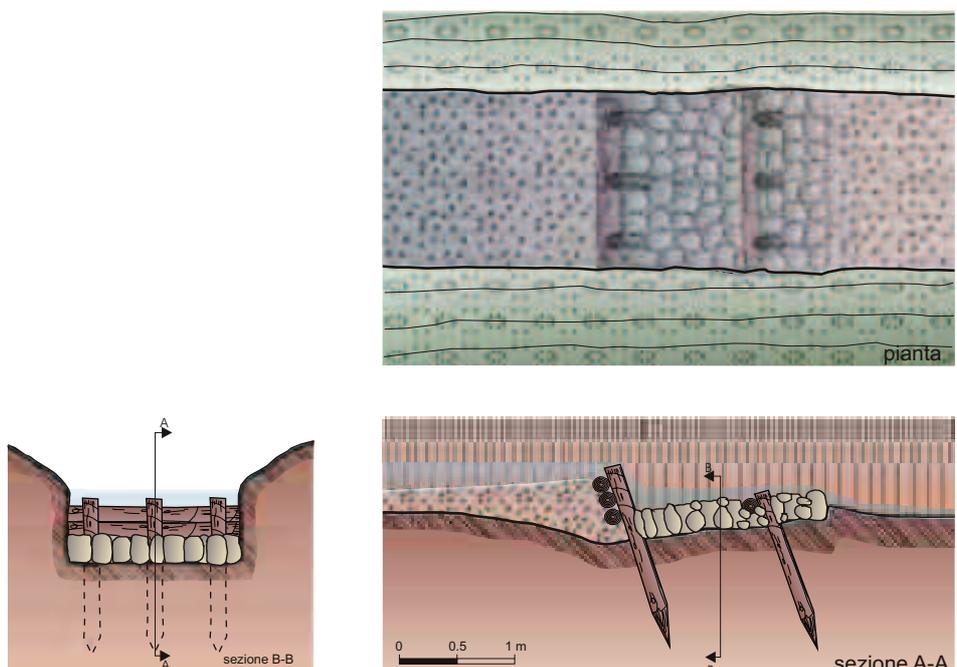


Figura 6.1.35: Sistemazione a gradinata con soglie di fondo nella conoide di un torrente. Il sistema muri di sponda più soglie, impedisce la divagazione laterale del torrente e l'approfondimento del fondo per erosione.



Figura 6.1.36: Le soglie vengono utilizzate anche isolatamente per controllare localmente la quota di fondo di un corso d'acqua. Questo avviene normalmente nei fiumi, presso i ponti, dove è necessario preservare le pile dallo scalzamento dovuto all'aumento di velocità dell'acqua ed all'evoluzione a più grande scala dell'alveo.



Generalità

Sono 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.

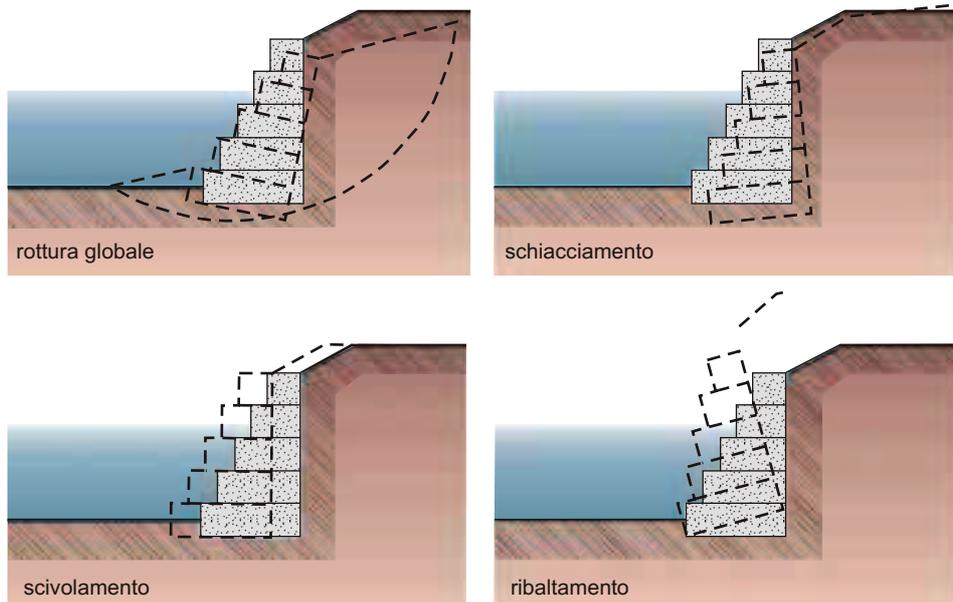


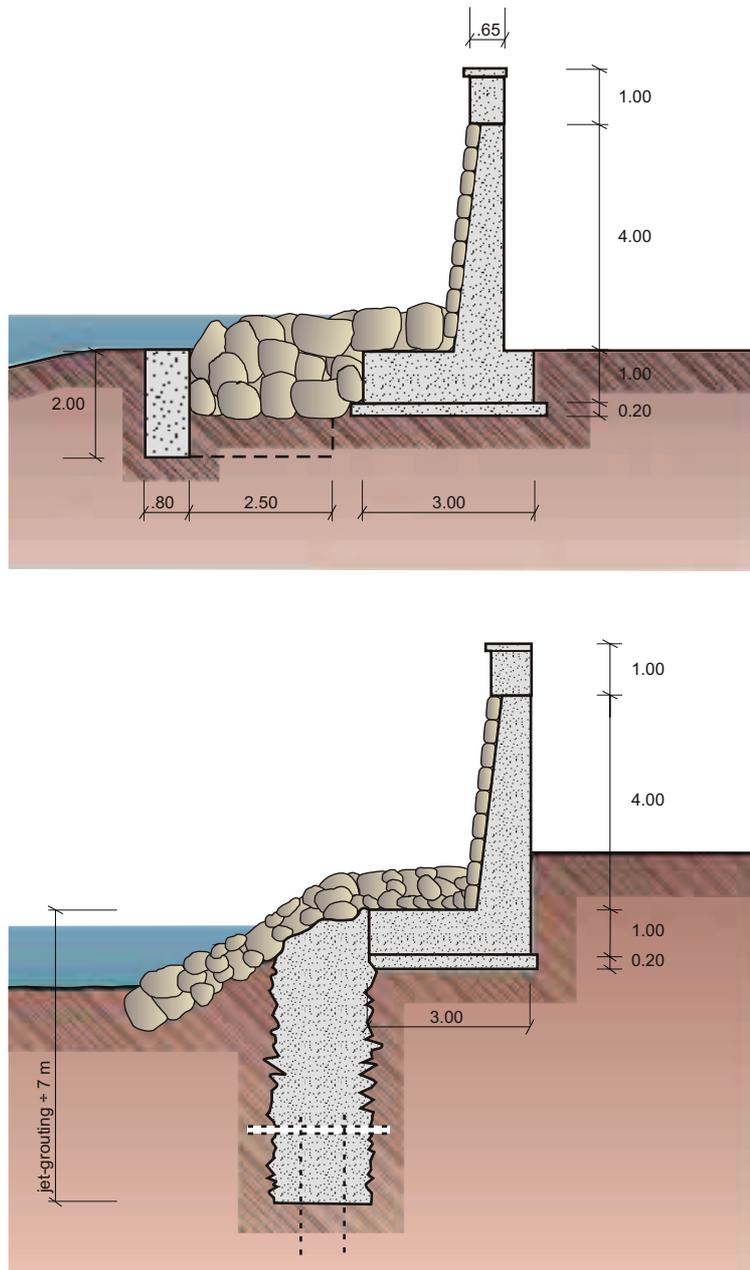
Figura 6.3.3: Erosione che ha intaccato la fondazione di un muro di sponda in pietrame e malta causandone la rottura. La scogliera posta lungo la sponda ha resistito all'impeto della corrente, ma a causa dell'evento eccezionale è stata coperta dall'acqua che è riuscita a raggiungere il muro sovrastante, 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

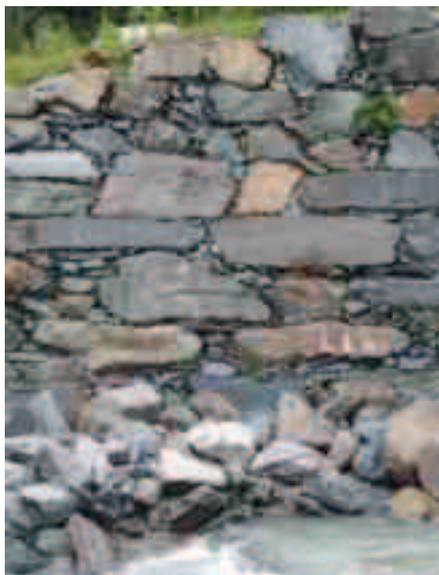
I muri in pietrame sono opere che hanno origini antichissime, l'uomo ha da sempre utilizzato la pietra naturale, dove questa era facilmente reperibile in loco. I muri a secco sono realizzati a mano o con l'ausilio di mezzi meccanici leggeri.

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 squadrati 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.



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 squadrate 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

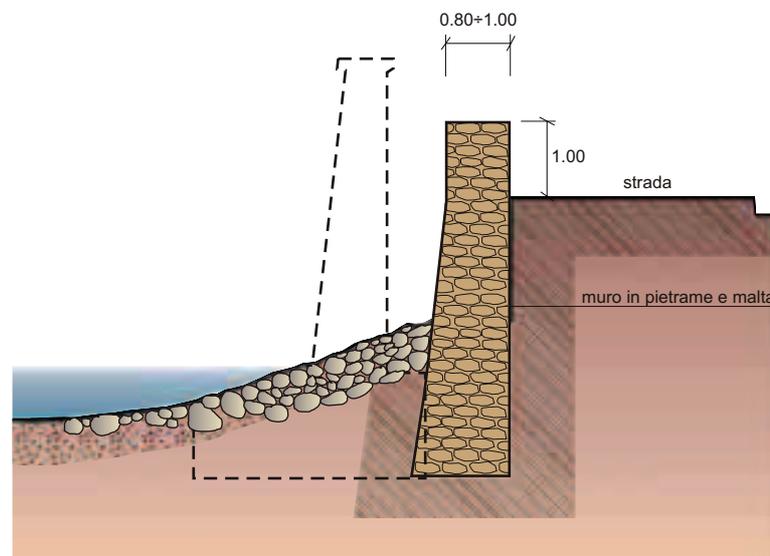
Trattandosi di strutture molto pesanti, è necessario che la base della fondazione sia impostata su terreni stabili e di buona capacità portante. In caso contrario, prima di procedere all'esecuzione dell'opera, occorre eseguire interventi di miglioramento delle caratteristiche fisico - meccaniche del 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.

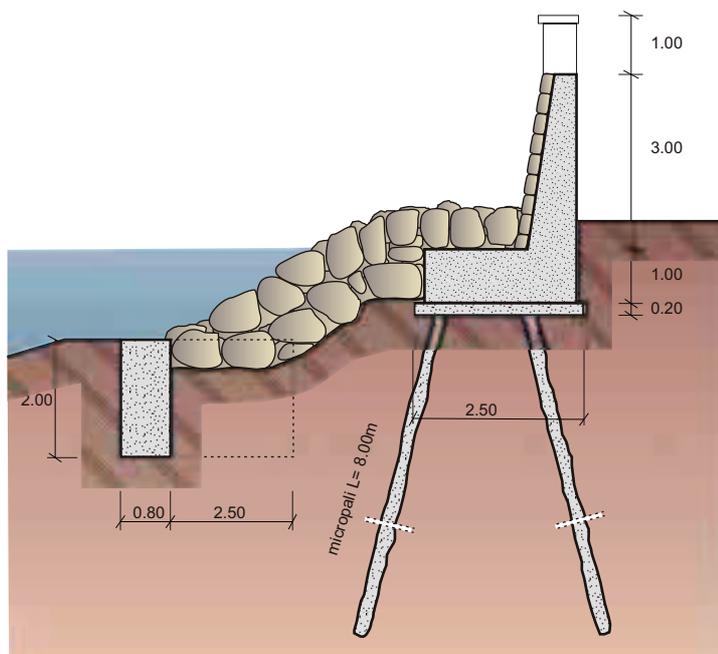


Figura 6.3.12: Muro in cemento armato prefabbricato, con rivestimento in pietra a vista. Si distinguono i singoli elementi prefabbricati accostati che costituiscono il muro (Quindici AV).



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.

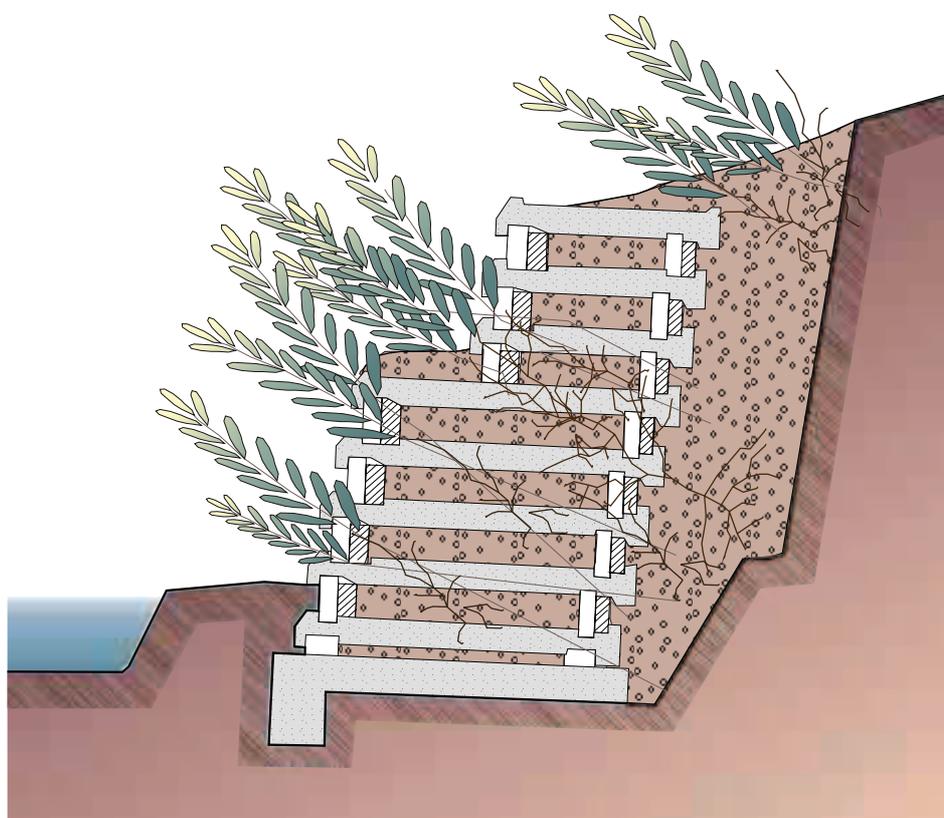
Questa struttura rappresenta la riscoperta in chiave moderna dei tradizionali muri di sostegno realizzati mediante strutture tridimensionali di tronchi riempite con pietrame, diffuse nelle vallate alpine.

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 mobilitazione, 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

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

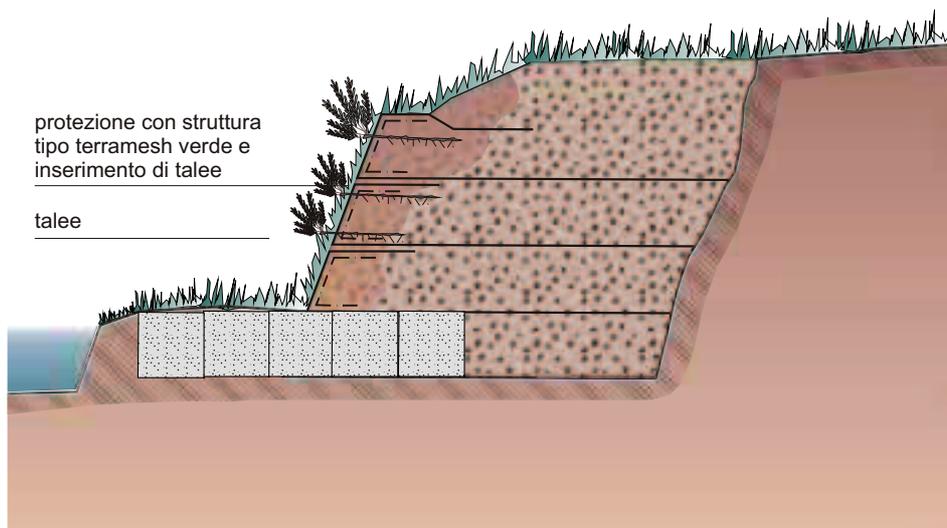
La tecnologia delle terre rinforzate rappresenta la ripresa ed il perfezionamento, in chiave moderna, di un sistema di miglioramento delle caratteristiche del terreno che ha origini antichissime. Sembra che i primi esempi di applicazione di questo sistema di costruzione, di cui si hanno testimonianze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

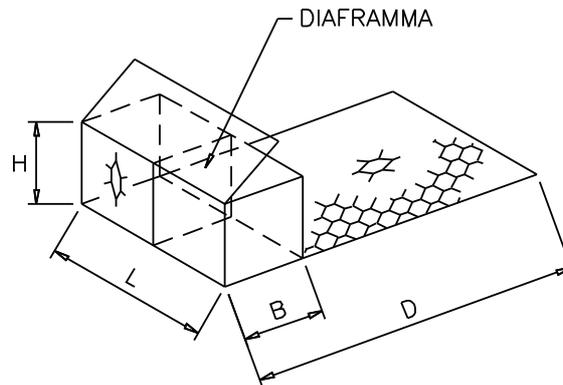


Figura 6.3.23: Terra rinforzata realizzata lungo una sponda di un piccolo torrente in ambiente alpino. Il paramento è rivestito con geostuoia tridimensionale in polipropilene e può venire rinverdito con una idrosemina a spessore



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

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

Questo tipo di struttura è nata in Italia ed ha avuto ampia diffusione 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 rinverdata. 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.

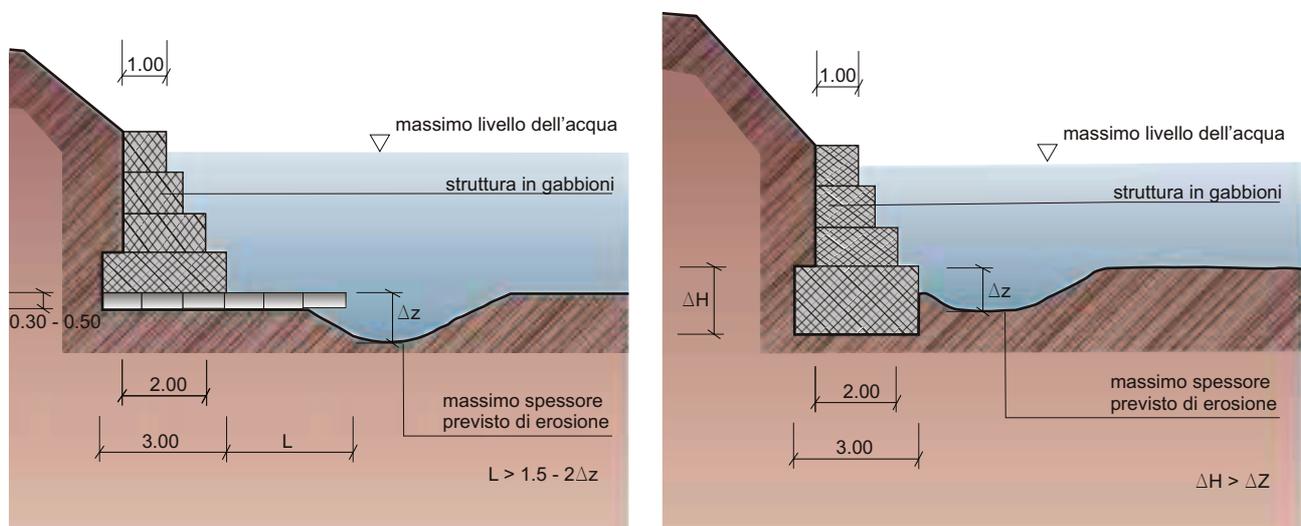
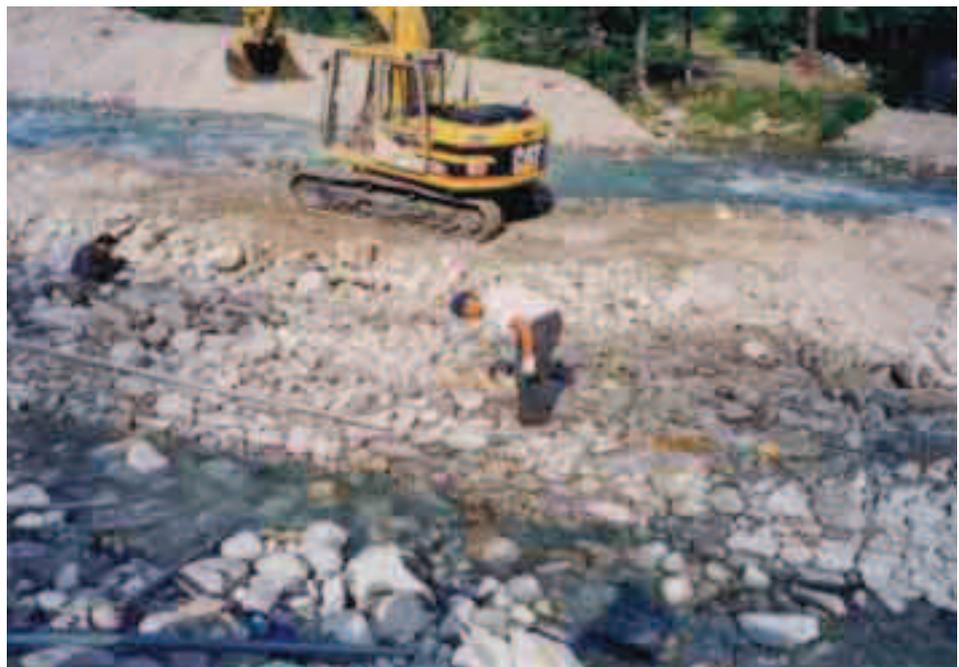


Figura 6.3.28: Costruzione di un muro in gabbioni in un torrente in Val d'Aosta (Cogne). I gabbioni vengono riempiti con materiale lapideo reperito direttamente in alveo dove è presente in eccesso. La soluzione scelta per la fondazione, a causa del forte trasporto solido, è quella dell'approfondimento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

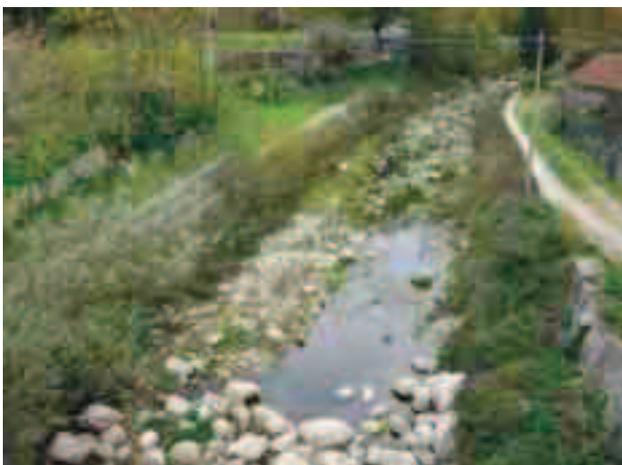
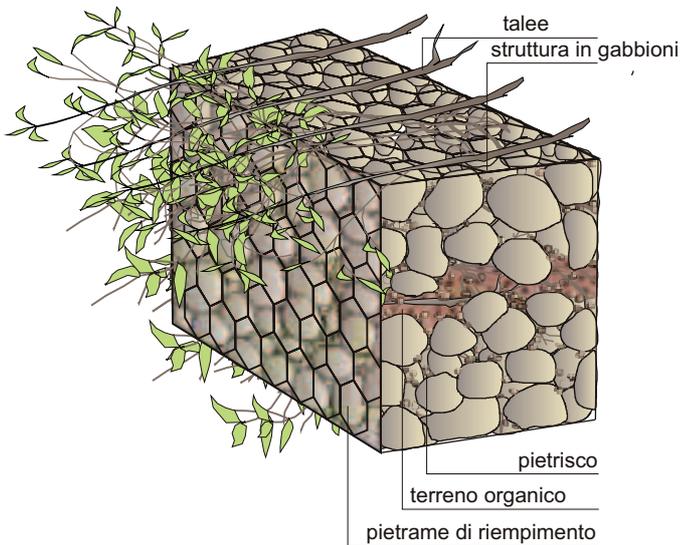


Figura 6.3.30: Muro in gabbioni abbinato a talee durante le successive fasi di rinverdimento. Le foto della gabbionata sono state riprese a distanza di un anno per ciascuna foto, la vegetazione è all'interno della gabbionata e ricopre tutta la struttura.

Descrizione e Caratteristiche

Palificata viva spondale

Si 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.

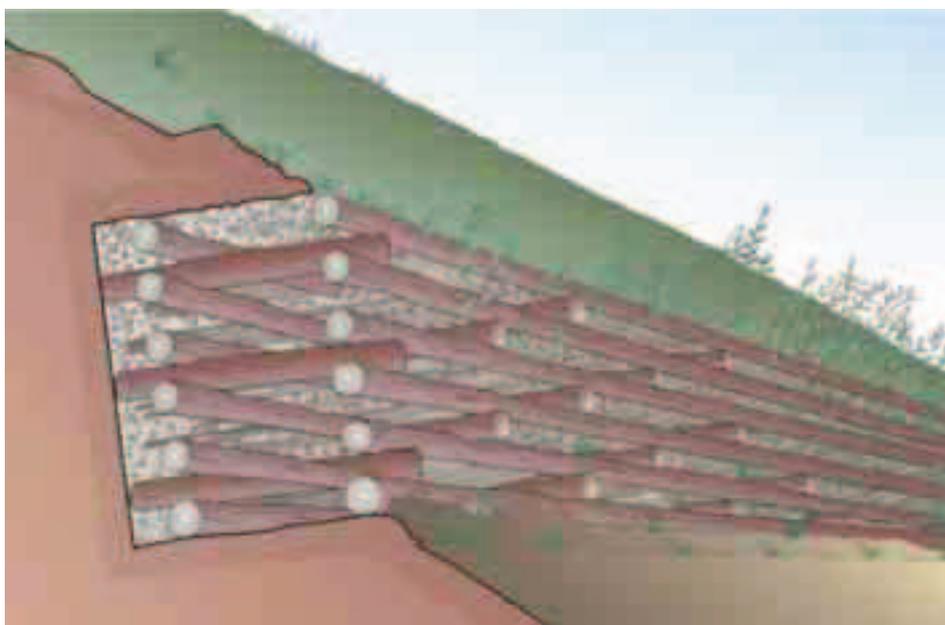


Figura 6.3.32: Una palificata viva riempita con materiale arido e terreno. Nella parte bassa si vedono elementi lapidei più grossolani.

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° 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.

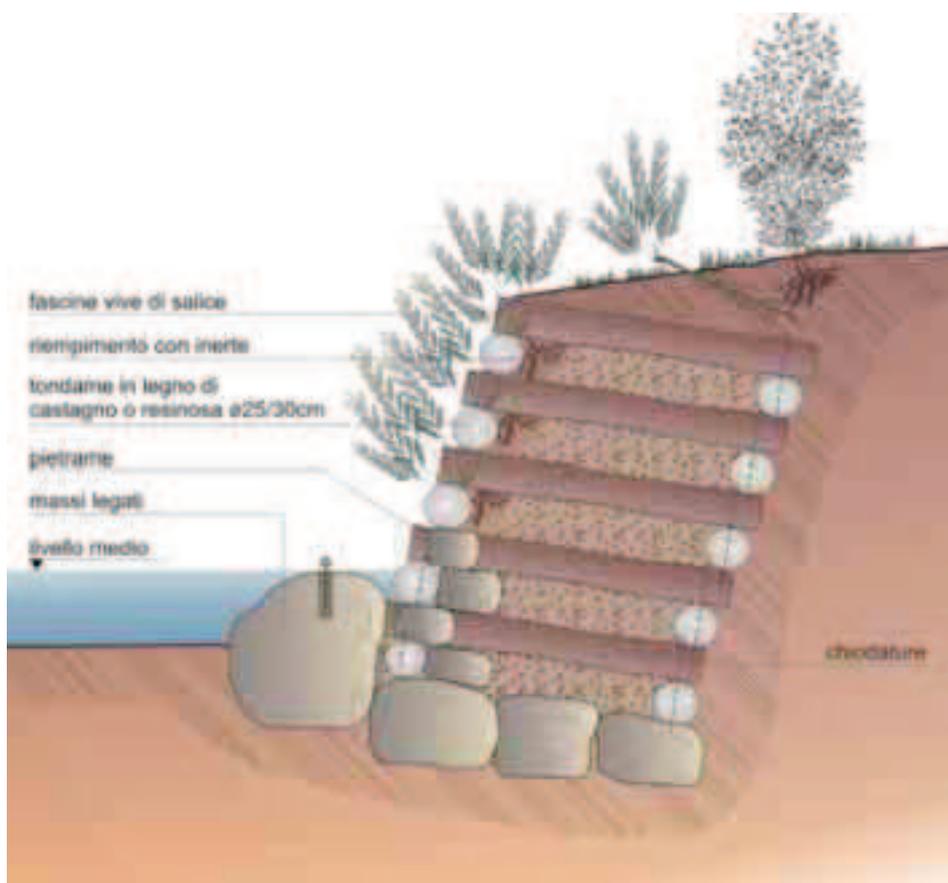


Figura 6.3.35: L'immagine ritrae una briglia e una palificata doppia in legname e pietrame (Castiglion Fibocchi AR).



Generalità

Le caratteristiche geologiche ed orografiche del nostro Paese rendono il nostro territorio particolarmente suscettibile alle colate di detrito di fango. Questi fenomeni estremamente pericolosi consistono in un movimento di massa di miscele di acqua e particelle solide caratterizzate da una elevata densità e da un regime diverso da quello delle correnti d'acqua.

Grazie ai continui scambi energetici tra le particelle solide ed all'effetto fluidificante della fase liquida della miscela queste vere e proprie colate sono in grado di muoversi con velocità che arrivano fino a 20 m/s. I notevoli volumi generalmente coinvolti sono caratterizzati da energie di impatto elevatissime con effetti devastanti in quanto sono in grado di abbattere edifici ed infrastrutture e di sommergere intere fasce di territorio.

Figura 7.0.1: Una colata detritica allo sbocco a valle di un torrente ha devastato una porzione di conoide (Nus, AO). Le colate possono essere molto rapide (fino a 20 m/s), e possono muoversi su pendenze molto basse; per queste ragioni prima di arrestarsi possono percorrere distanze molto elevate.



Figura 7.0.2: Effetti devastanti di una colata detritica. La massa enorme di fango e detrito che si muove rapidamente ha una forza di impatto fino a 60 kN/mc (forza per unità di volume di colata). I blocchi presenti nella colata possono però generare forze impulsive puntuali con intensità fino a 10.000 kN a seconda della rigidità delle opere impattate.



Questi fenomeni sono molto insidiosi per la rapidità con cui evolvono e per la capacità di aumentare di volume auto alimentandosi lungo il percorso. Altro elemento che rende particolarmente pericolose è la loro capacità di muoversi sia all'interno che al di fuori degli alvei dei corsi d'acqua, creandosi addirittura delle arginature, laddove non esistano, all'interno delle quali si muovono per ondate successive.

L'aspetto di una colata varia a seconda della composizione granulometrica del materiale e della concentrazione. Nella letteratura anglosassone si distingue tra:

- mud flow (colate di fango): miscela con prevalenza di particelle fini (ricorrenti, per esempio, in ambiente appenninico oppure in ambiente alpino in presenza di grandi accumuli morenici a granulometria limosa).
- debris flow (colate detritiche): miscela caratterizzata dalla prevalenza di elementi di grosse dimensioni e spesso dalla totale assenza di frazione fine. Talora, la parte fine si allontana dal resto del materiale insieme con l'acqua. Queste colate sono in grado di trasportare massi isolati di grandissime dimensioni in grado di esercitare forze impulsive dagli effetti devastanti anche su strutture in cemento armato. Il fenomeno tipo debris flow è diffuso in Italia sia in ambiente alpino che in ambiente appenninico.

Figura 7.0.3: La foto mostra i cordoni laterali di detrito formati al passaggio della colata. Questa caratteristica rende molto insidiosi questi fenomeni, in quanto le colate, grazie a questo meccanismo, sono in grado di propagarsi anche ove non sia presente un alveo naturale in grado di contenere lateralmente il materiale in movimento. Durante il movimento inoltre, come si osserva nella fotografia, viene asportato materiale dal fondo, con la conseguenza di un continuo aumento di volume della colata.



Figura 7.0.4: Un tipico accumulo di materiale con caratteristiche granulometriche che vanno dalla sabbia al blocco di grandi dimensioni. La messa in movimento di questo materiale in occasione di piogge molto intense potrebbe dar luogo alla formazione di un debris flow.



Esistono diversi meccanismi possibili di innesco delle colate:

- in seguito ad una frana il cui accumulo, arrestatosi nel corso d'acqua, viene interessato dalla corrente liquida conseguente ad una piena e mobilizzato;
- per immissione concentrata di portata entro un alveo i cui sedimenti vengono mobilizzati a causa dell'impatto di una corrente ad elevata velocità;
- per la presenza di una corrente liquida defluente sul deposito (alluvionale o di frana) saturo disposto su una pendenza elevata. L'innesco avviene in concomitanza del superamento della resistenza a taglio lungo un piano interno al deposito in alveo. Tale deposito può essersi formato per lento accumulo di materiali dalle sponde o improvvisamente per frana.

Tutti questi meccanismi di innesco implicano che si verifichino le seguenti condizioni :

- precipitazioni di intensità superiore ad una certa soglia, variabile da regione a regione, in grado di provocare uno dei due processi citati come responsabili della formazione di una lava torrentizia;
- la disponibilità di materiale sciolto su versante o nell'alveo;
- pendenza sufficientemente elevata.

Figura 7.0.5: Il materiale accumulato lungo le aste secondarie molto ripide, può dare luogo all'innesco di colate in occasione di piogge molto intense che siano in grado di saturare rapidamente il materiale accumulato.



La strategia di difesa dalle colate si basa su due categorie di interventi:

- **interventi di tipo attivo:**
impediscono l'innesco delle colate agendo sui fattori predisponenti. A tale scopo vengono impiegate: le briglie di trattenuta, che impediscono il sovralluvionamento degli alvei e consentono l'asportazione del materiale in eccesso che si accumula a ridosso delle opere stesse; le sistemazioni a gradinata che diminuiscono la pendenza dell'alveo; si opera sui versanti per stabilizzarli e diminuire così gli apporti solidi agli alvei;
- **interventi di tipo passivo:**
opere che arrestano o deviano la colata impedendo che possa provocare danni quali piazzole di deposito, strutture di intercettazione, strutture di diversione.



Figura 7.0.6: La foto mostra l'associazione di sistemi di difesa dalle colate detritiche di tipo passivo ed attivo. Il muro di sponda e la palificata a parete doppia, hanno la funzione di proteggere dall'erosione e stabilizzare il versante, limitando l'apporto di materiale solido. La struttura di intercettazione aperta impedisce la propagazione delle colate.