



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

Informazioni legali

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

APAT - Agenzia per la Protezione dell'Ambiente e per i Servizi Tecnici
Via Vitaliano Brancati, 48 - 00144 Roma
www.apat.it

Dipartimento Difesa del Suolo

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

© APAT, Manuali e Linee guida 27/2003 ISBN 88-448-0118-3

Riproduzione autorizzata citando la fonte

Elaborazione Grafica

APAT

Grafica Copertina: Franco Iozzoli, Paolo Orlandi

Coordinamento tipografico

APAT

Stampa ..
I.G.E.R srl- Viale C.T. Odescalchi, 67/A- 00147 Roma

Roma giugno 2004

Autori

Coordinatore: Domenico Ligato

Consulenti:

Prof. Ing. Virgilio Anselmo, Dott. Geol. Massimo Comedini, NATAMS.

Collaboratori:

Luca Guerrieri, Fabio Pascarella

Valeria Sassanelli per i disegni tecnici

Si ringrazia l'autorità di bacino del fiume Arno per le immagini tratte dalla collana dei "Quaderni"

Si ringrazia l'Assessorato per l'ambiente della Regione Lazio - Dipartimento Ambiente e Protezione Civile che, con la pubblicazione del "Manuale di Ingegneria Naturalistica applicabile al settore idraulico", ha fornito utili e significativi elementi per la redazione del presente volume.

Ideazione e supervisione: Leonello Serva - Direttore Dipartimento Difesa del Suolo

Si ringraziano per il supporto tecnico e le immagini fornite:

Alessandro Trigila, Benedetto Porfidia, Domenico Berti, Elisa Brustia, Enrico Guarneri, Eutizio Vittori, Fiorenzo Fumanti, Giorgio Vizzini, Lorenzo Pistocchi, Luca Ferrelli, Maurizio Guerra, Roberto Pompili, Stefania Silvestri, William Rovinelli.

I disegni sono stati realizzati in parte sulla base delle indicazioni degli Autori e in parte sono stati estrapolati e ridisegnati dai volumi citati in bibliografia; le immagini fotografiche, se non espressamente citato in didascalia, sono state fornite dagli autori.

Presentazione

Con questo “Atlante delle opere di sistemazione fluviale” l'Agenzia per la Protezione dell'Ambiente e per i Servizi Tecnici arricchisce la trattazione dei temi inerenti la difesa del suolo nella collana dedicata ai manuali e alle linee guida.

La linea editoriale, prosegue quella iniziata con l'“Atlante delle opere di difesa dei versanti”, pubblicato nel maggio 2001 e ristampato in una seconda edizione nel dicembre 2003 (ad oggi ne sono state diffuse circa 4000 copie, richieste da professionisti, università ed enti di livello nazionale e locale). Anche questo documento, infatti, è stato costruito con lo scopo di raggiungere sia il decisore politico che il singolo cittadino/professionista affinché possa facilmente conoscere, con ampio utilizzo di disegni e fotografie, l'intera gamma delle opere possibili per la sistemazione fluviale, tenendo conto delle funzioni cui esse sono preposte e del loro impatto paesaggistico.

Nell'atlante, sono riunite le une accanto alle altre le tecniche tradizionali dell'ingegneria geotecnica e le tecniche dell'ingegneria naturalistica con l'intento di superare la contrapposizione che spesso distingue queste due discipline, favorendo una progettazione che tenga conto della loro complementarità e fornisca una soluzione razionale dei problemi connessi al rischio idraulico e, più in generale, idro-geologico.

Mi piace, infine, sottolineare che questo atlante è tra le prime pubblicazioni edita dal Dipartimento Difesa del Suolo il quale raggruppa in sé le professionalità provenienti dall'ex Servizio Geologico Nazionale e dall'Unità Interdipartimentale Rischio Idrogeologico dell'ex ANPA, testimoniando, pertanto, una prima sintesi delle esperienze maturate nelle due strutture di provenienza.

Giorgio Cesari
Direttore APAT

Premessa

La pubblicazione dell'Atlante delle opere di sistemazione fluviale parte dalle esperienze maturate dal Dipartimento della difesa del suolo nel campo dei rischi naturali. In particolare si è preso spunto dall'attività di monitoraggio sugli interventi strutturali urgenti per la riduzione del rischio geologico-idraulico, finanziati dal D.L. 180/98 e dalle norme successive ad esso collegate. Quest'esperienza ha, infatti, offerto la possibilità di osservare, nelle diverse fasi di progettazione e realizzazione, più di mille opere realizzate sull'intero territorio nazionale.

L'Atlante delle opere di sistemazione fluviale intende fornire una casistica ragionata delle opere esistenti per la sistemazione delle aste fluviali seguendo l'impostazione che, credo, ha decretato il successo del precedente Atlante delle opere di difesa dei versanti: anche questa volta ci si rivolge ad un ampio spettro di lettori senza sposare decisamente né il taglio tecnico né quello divulgativo così come la trattazione delle opere non discerne tra tecniche d'ingegneria tradizionale e naturalistica.

L'atlante si presenta con una prima parte introduttiva, che consente anche ai meno esperti di accostarsi alle cause del dissesto geologico-idraulico nel nostro Paese. Il capitolo, infatti, tratta dei fenomeni naturali e dei criteri d'intervento per la difesa idraulica, puntando ad evidenziare la necessità di progettare le sistemazioni idrauliche alla scala di bacino idrografico. Questo tipo d'approccio rispecchia quello della normativa vigente in questo settore, alla quale ci si richiama per completare il panorama delle problematiche della difesa idraulica del territorio.

La seconda parte del libro è costituita dal catalogo delle opere nel quale sono descritte le singole tipologie di intervento con le loro caratteristiche e funzionalità, facendo riferimento a schemi e fotografie riprese su tutto il territorio italiano. Il catalogo si snoda attraverso i vari tipi di sistemazione seguendo una classificazione di carattere funzionale delle opere, i cui criteri sono illustrati nei paragrafi che precedono questa parte del libro. Tra le opere trattate sono state incluse anche quelle per la difesa dalle colate di fango e di detrito, la cui natura, a detta di alcuni, sarebbe più propriamente ascrivibile a quella dei fenomeni gravitativi di versante. Il loro inserimento nell'atlante è dovuto allo stretto legame, più volte rilevato su tutto il territorio nazionale, che sussiste tra questi fenomeni ed i corsi d'acqua in occasione degli eventi alluvionali.

Leonello Serva
Capo Dipartimento Difesa del Suolo

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 sottterraneo (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.

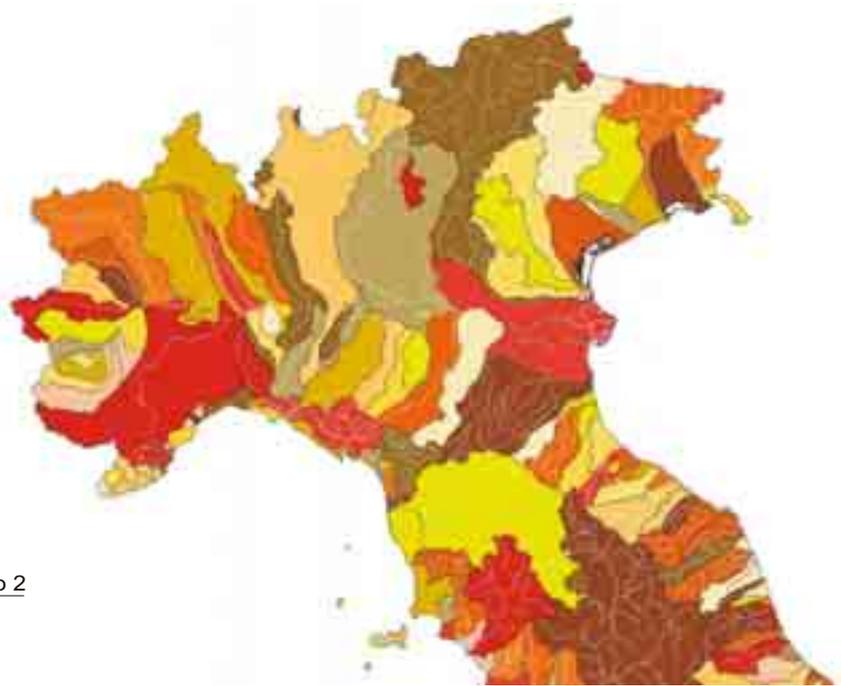
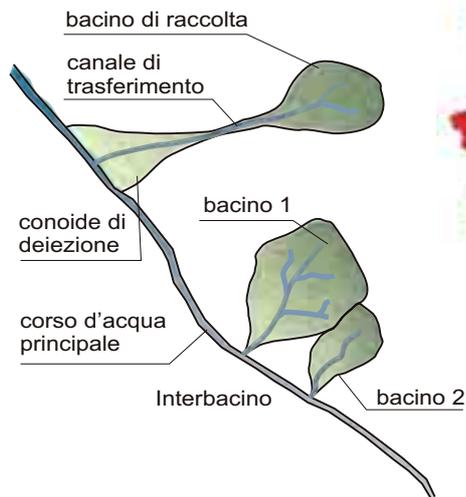
Il territorio del bacino interessa la Regione Toscana (98,4%) e la Regione Umbria (1,6%) con le provincie di Arezzo, Firenze, Pistoia, Pisa e, marginalmente, Siena, Lucca, Livorno e Perugia.

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

Se in passato i corsi d'acqua erano considerati una risorsa importante soprattutto in termini di sfruttamento che se ne può fare (acqua potabile, acqua per irrigare, pesca, energia), in tempi più recenti si sta affermando sempre più l'importanza dei fiumi come risorsa di alto valore ecologico e paesaggistico.

I fiumi sono caratterizzati da una elevata quantità di habitat che offrono possibilità di vita a pesci, mammiferi, uccelli, invertebrati e vegetazione. Le variazioni che presso un fiume avvengono in senso longitudinale, laterale, verticale e lungo la linea temporale, danno vita ad un ecosistema estremamente vario e ricco di transizioni (ecotoni). Sono i cambiamenti che avvengono nella velocità e profondità dell'acqua, nelle caratteristiche granulometriche del fondo, nella tipologia di vegetazione delle sponde e delle aree golenali, che creano una successione e sovrapposizione di svariati habitat e nicchie ecologiche da cui dipende la biodiversità. Questa ricchezza non ha solamente un valore di carattere naturalistico ma anche una estrema importanza in relazione alle capacità omeostatiche (capacità di mantenere o recuperare il proprio equilibrio in seguito ad un disturbo) dei corsi d'acqua, quali ad esempio la capacità autodepurativa biologica delle acque e la protezione dall'erosione.

Gli interventi di sistemazione di corsi d'acqua possono avere effetti devastanti su questa varietà di habitat: rettificare, cementificare, semplificare le sezioni trasversali, creare degli ostacoli trasversali che interrompono la continuità longitudinale, ridurre la portata, sono azioni che possono avere effetti estremamente dannosi. Come si può facilmente comprendere i danni derivano dal tipo di materiale utilizzato ma anche e soprattutto dagli sconvolgimenti plano altimetrici apportati al corso d'acqua. Non possiamo considerare sufficiente, ad esempio, garantire semplicemente la crescita di vegetazione in seguito alla sistemazione dell'alveo, se a questa si accompagna la cancellazione di quei tratti morfologici da cui dipende l'alternarsi di habitat e microhabitat che rendono il fiume un complesso organismo vivente.

I corsi d'acqua offrono anche un'altra importante opportunità: la realizzazione e/o il mantenimento di corridoi ecologici. La conservazione dell'ambiente è passata dalla creazione e tutela di isole ecologiche alla realizzazione di reti all'interno delle quali sono consentiti flussi di materia, di energia e di patrimoni genetici. I fiumi e la fascia di territorio a cavallo di essi, se mantengono la loro naturalità, si prestano in maniera ottimale allo scopo descritto sopra.

Le riflessioni sugli effetti di molti anni di azioni indiscriminate sull'ambiente fluviale e l'affermazione di un approccio scientifico sempre più rigoroso alle tematiche ecologiche hanno condotto ad importanti cambiamenti di mentalità e sensibilità nella progettazione delle sistemazioni fluviali quali:

- l'affermarsi di un approccio multidisciplinare che permette di tenere conto della complessità strutturale e funzionale del corso d'acqua;
- studi a livello di bacino per tener conto delle relazioni di interdipendenza tra gli ambienti che lo compongono;
- diminuzione dell'impatto ambientale delle opere per mezzo di nuovi materiali, materiali tradizionali usati secondo nuovi criteri e tecniche di ingegneria naturalistica.

Tutto quanto detto sopra non implica che vengano dimenticate le esigenze legate al rischio idraulico, bensì vengono affrontate tenendo conto anche di quelle dell'ambiente. Questa mentalità, non si è ancora completamente affermata, ma molti passi avanti sono stati fatti, anche grazie al contributo di una legislazione statale e regionale attente a questi problemi, che in taluni casi arrivano ad imporre l'uso di tecniche quali l'ingegneria naturalistica a meno che non vi siano condizioni che ne impediscano l'applicazione.

Generalità

Le forme di intervento per la mitigazione del rischio idraulico sono molteplici, ma qualsiasi scelta deriva da uno studio in cui la principale caratteristica da determinare è la sezione necessaria per il deflusso delle piene di assegnata **frequenza** e le conseguenti aree inondabili.

Ai fini della definizione del **rischio** (vedi definizione in basso) diventa necessario stabilire l'arco temporale entro cui si decide di accettare il verificarsi di un evento di entità uguale o superiore a quello in oggetto. Tale arco temporale può essere la vita prevista per un'opera o un intervento. Il grado di esposizione di un edificio o di un'area a fenomeni naturali quali gli allagamenti, le frane, le valanghe (e così via fino alle eruzioni vulcaniche ed ai terremoti) dovrebbe essere ben presente alle autorità locali responsabili della pianificazione e condizionare le forme dell'utilizzazione del suolo e la tipologia stessa delle opere.



Figura 1.3.1: Evento alluvionale del 4 Novembre 1966. Firenze: L'Arno nel centro cittadino. (Italfoto Gieffe).

Il **rischio** cui è esposto un bene dovrebbe essere calcolabile mediante procedure oggettive (ciò non significa affatto esatte né definitive) e almeno dal punto di vista lessicale sono state proposte alcune definizioni di base che permettono di distinguere:

pericolosità (H) : traduce il termine *hazard* o *natural hazard* ed indica la probabilità che si verifichi entro un assegnato intervallo di tempo ed entro una area assegnata un fenomeno potenzialmente dannoso. Pertanto, il termine *rischio idraulico*, indicante la probabilità che in un periodo di n anni, si presenti un evento uguale o superiore all'evento stimato con tempo di ritorno T data dalla relazione (KITE, 1988)

$$R = 1 - (1 - 1/T)^n$$

assume un significato simile e più limitato di *pericolosità*. Anche il termine francese *risque* dovrebbe assumere lo stesso significato. È curioso notare come il termine inglese *hazard* provenga dall'italiano, nel cui ambito mantiene tuttora il significato di fatto aleatorio, ma principalmente legato alle azioni umane (*gioco d'azzardo, azzardarsi a fare o dire qualcosa*).

vulnerabilità (V) : indica il grado delle perdite arretrate ad un bene o ad una pluralità di beni (esposti a rischio) a seguito del verificarsi di un fenomeno naturale di assegnata entità. Si esprime con riferimento ad una scala di valori compresa fra 0 (nessun danno) e 1 (perdita totale).

rischio specifico (Rs) : indica l'entità del danno atteso a seguito di un particolare fenomeno naturale. Si esprime con il prodotto **Rs = H x V**

elemento o bene a rischio (E) : indica la popolazione, le proprietà, le attività economiche, inclusi i servizi pubblici che si trovano esposti al pericolo di un evento naturale in una determinata area.

rischio totale (Rt) : indica il numero atteso di morti, feriti, danni alle proprietà o interruzione di attività economiche a seguito di un evento naturale ed è perciò dato dal prodotto **Rt = Rs x E = E x H x V**

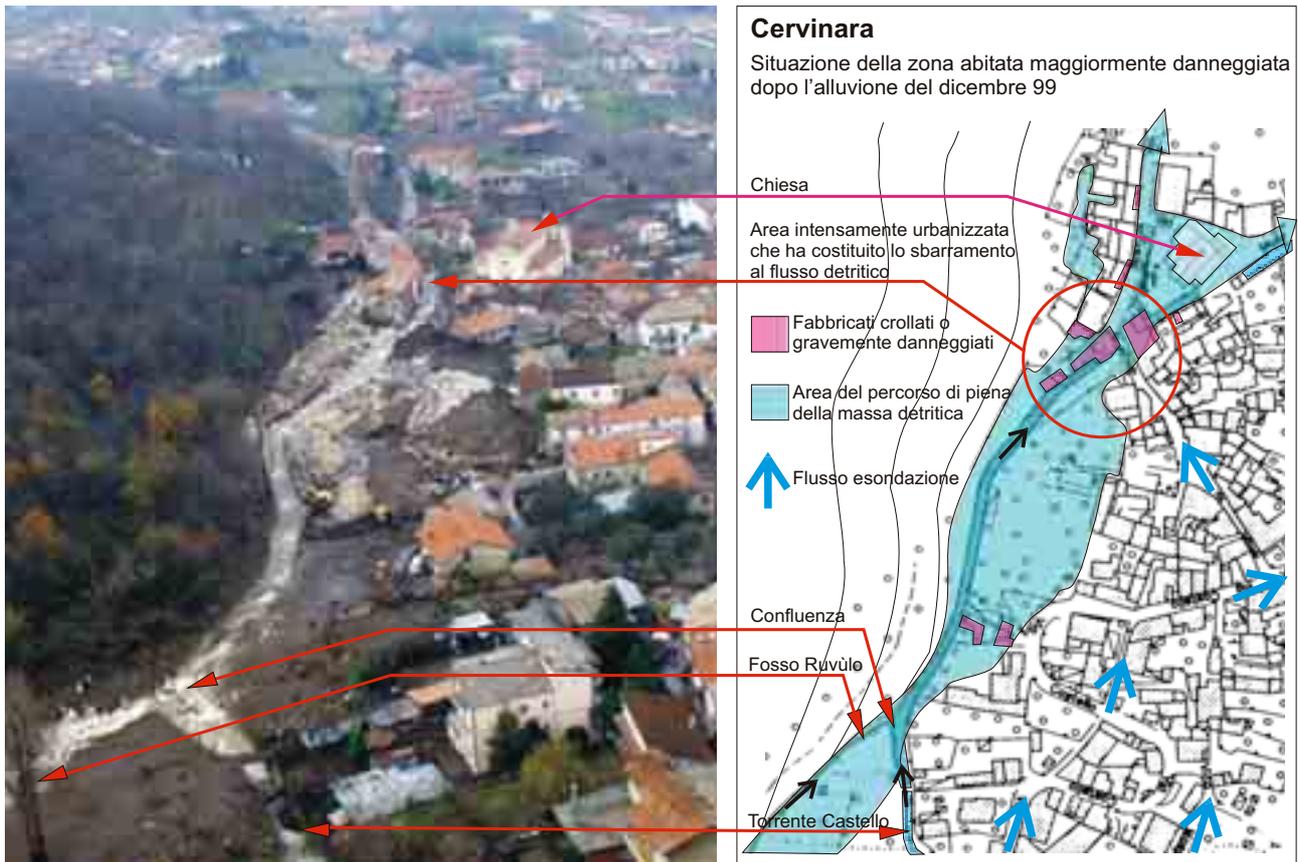


Figura 1.3.2: Cervinara (AV). Veduta aerea e planimetria delle frazioni di Castello e Ioffredo due giorni dopo l'evento alluvionale del dicembre 1999; con le frecce sono indicati i percorsi idraulici delle onde di piena del T. Castello (a sinistra) e del fosso Ruvùlo (a destra), nell'area di confluenza dei due flussi si sono verificati i danni maggiori. La massa detritico-fangosa derivata dalle coperture detritiche e piroclastiche della zona Vesuviana ha trovato ostacolo nella intensa urbanizzazione della frazione. Questo tipo di urbanizzazione è molto frequente nei comuni pedemontani del nostro paese.



Figura 1.3.3: Friuli (alluvione agosto 2003). Veduta della frazione di Pietratagliata in Comune di Pontebba. Disastrose conseguenze dovute alla violenta erosione del fondo e della sponda in sinistra idrografica del fiume Fella.

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.

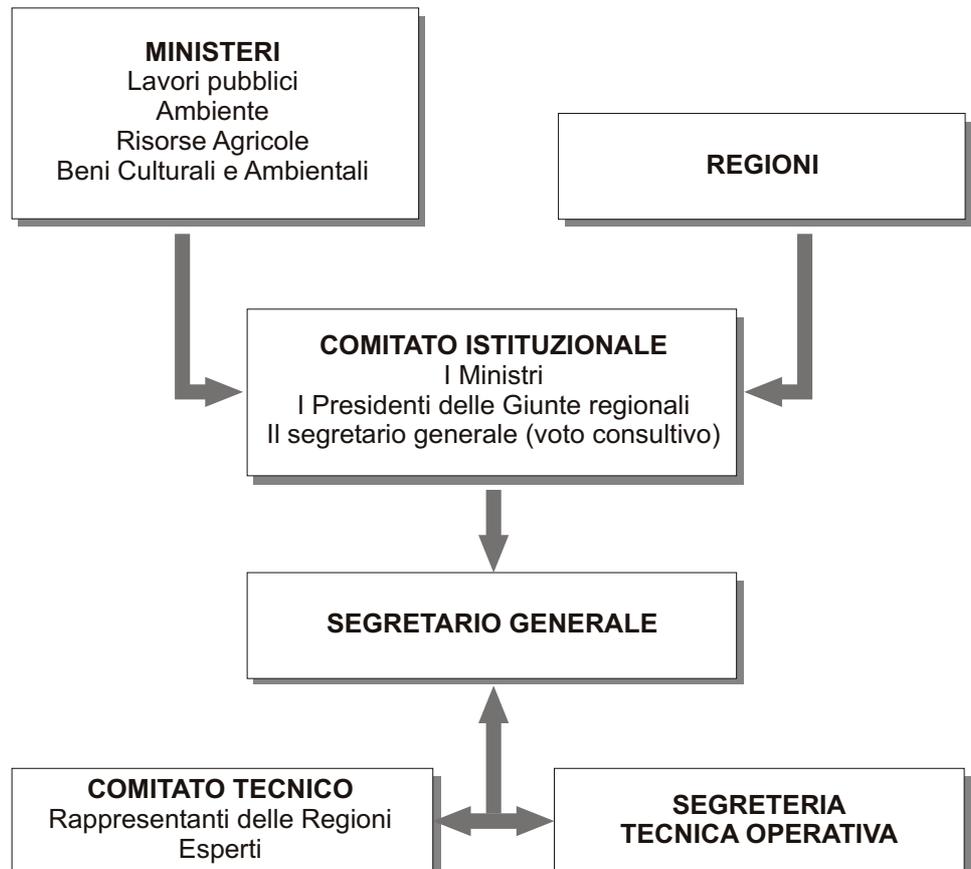
A tal fine la legge (183/89) individua con chiarezza anche i soggetti attuatori: l'intero territorio nazionale è ripartito in Autorità di bacino distinguendo tra bacini di rilievo nazionale (in numero di 11), interregionale (18) e regionale.

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, con 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 vimate, 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.

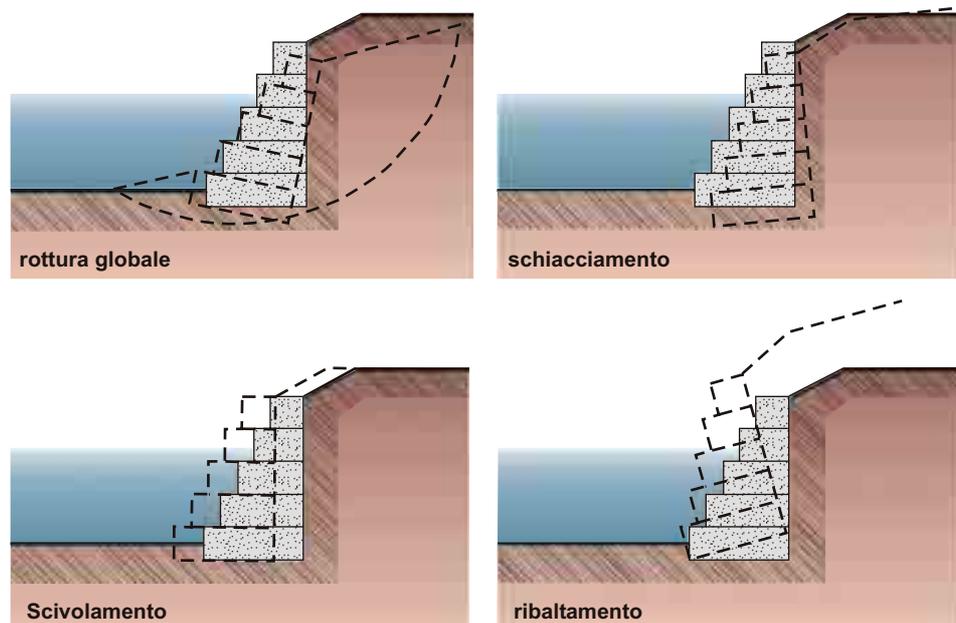


Figura 1.8.3: Tipologie di instabilità per moto rigido dei muri di sponda

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.

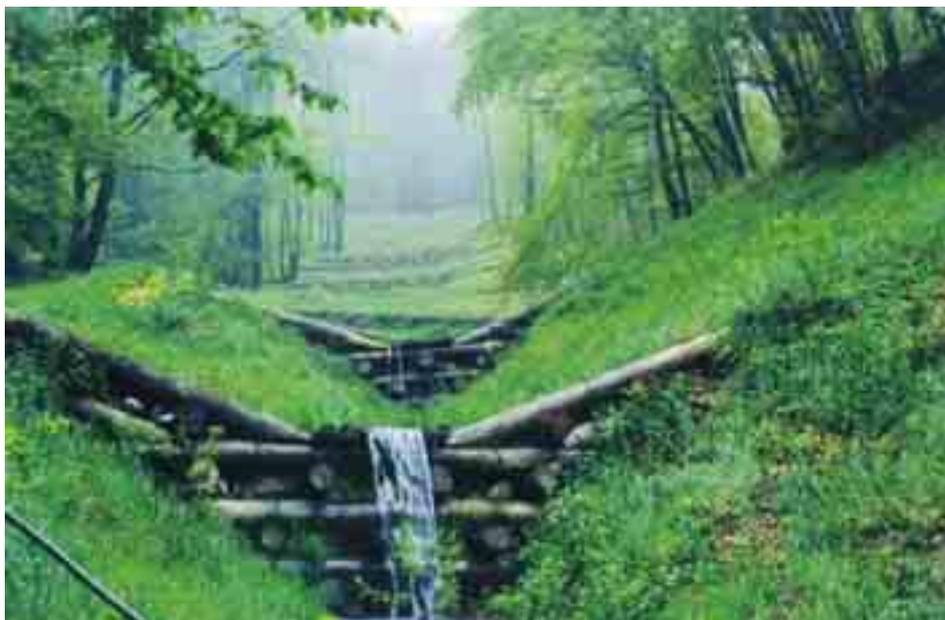


Figura 1.8.9: Gradinata di briglie in c.a. rivestite in pietra.



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**

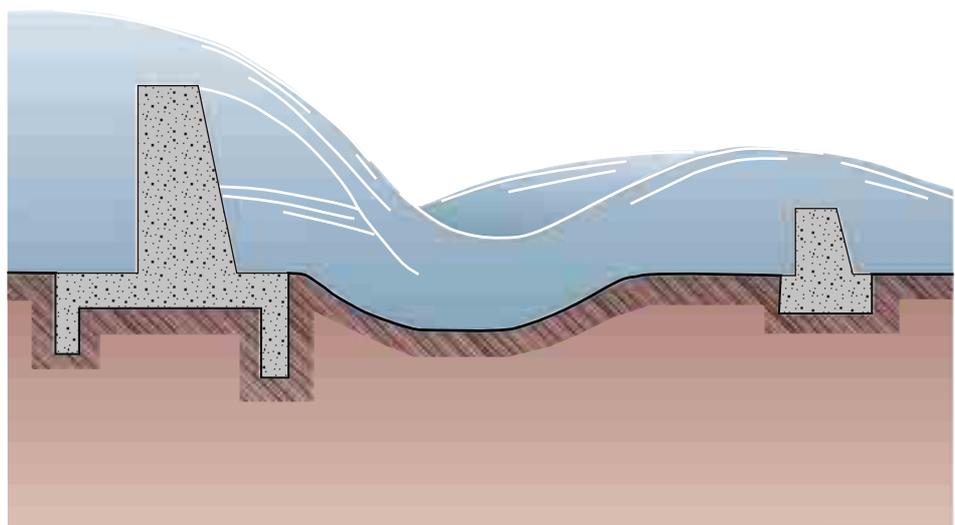
Per evitare la formazione del gorgo al piede della briglia, in molti casi, sono state costruite platee di grandi massi per una lunghezza tale da contenere comunque la lama stramazante. Il manufatto risulta di difficile conservazione pertanto risulta preferibile costruire la controbriglia con relativo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

Le opere per l'aumento della portata convogliabile sono costituite da:

- Argini;
- Drizzagni.

Il provvedimento ricorrente da secoli contro le inondazioni consiste nella costruzione di argini, o nella sopraelevazione di quelli esistenti, fino ad ottenere una sezione capace di convogliare la portata di progetto.

In altri casi, e specialmente in altri tempi, si è fatto ricorso all'apertura di drizzagni, ossia tratti di alveo scavati con andamento rettilineo, mediante i quali si ottiene un aumento di pendenza e quindi una maggior velocità della corrente.

La sezione può essere aumentata anche mediante l'abbassamento del fondo, con l'asportazione periodica (svasi) dei materiali del fondo. Si tratta di una operazione delicata che può comportare erosioni regressive con danni alle opere di attraversamento e la riduzione del materiale trasportato a valle con conseguente erosione delle spiagge. La tendenza attuale prevede di non alterare l'andamento del corso d'acqua, ripristinando quando possibile l'andamento sinuoso originario in modo da non alterare l'ecosistema acquatico e le cenosi riparali.



Figura 2.0.1: Argine del Po con banca, sottobanca e piè di banca



Figura 2.0.2: Rettificazione di un tratto del fiume Adda nell'attraversamento della città di Sondrio

La costruzione delle arginature a difesa dei centri abitati iniziò in tempi antichissimi: pare siano stati gli Etruschi a realizzare i primi argini sulle due rive alle foci del Po, opere proseguite dai Romani lungo l'alveo. Le arginature del Po vennero avviate verso la loro estensione attuale intorno al 1500. È importante ricordare anche l'operato dei Veneziani per proteggere la Laguna e i suoi abitati attraverso interventi di deviazione o nuovo inalveamento di grandi fiumi tra i quali, nel 1600, la deviazione del Po a Porto Viro. Nei secoli sono stati realizzati continui lavori di rialzo e ringrosso delle arginature a difesa dei centri abitati per motivi legati da una parte al ripetersi di piene e rotte disastrose, dall'altra all'espandersi delle zone antropizzate. Ma proprio l'interazione fra queste due entità in continua crescita, argini e centri abitati, ha continuato a creare problemi di mutua sicurezza. A partire dal 1500, con editti, notificazioni e ordinanze, furono introdotti i primi criteri per la salvaguardia della integrità e sicurezza delle arginature nei confronti degli interventi ed insediamenti antropici.

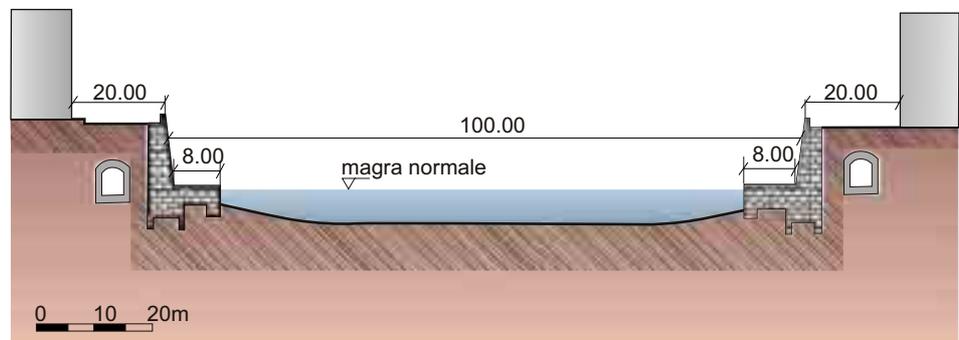


Figura 2.0.3: Nella figura viene illustrato il progetto del 1875 di R. Carnevari, con le modifiche di seguito apportate dei grandi muraglioni di contenimento delle sponde del Tevere nell'attraversamento della città di Roma, eseguiti a partire dal 1876.

Generalità

Gli argini sono costituiti da rilevati artificiali in terra con funzione di tenuta d'acqua, di altezza generalmente inferiore ai 10/12 m, che si realizzano specialmente nel bacino inferiore di corsi d'acqua, allo scopo di contenere le acque di piena, e preservare da inondazioni le aree poste lateralmente. Esistono due tipologie di argini: longitudinali e trasversali; i primi corrono continui lungo le sponde, mentre i secondi sono disposti a coppie gli uni di fronte agli altri normalmente alla corrente, e si innestano con una estremità al terreno sommersionabile, e con l'altra si estendono simmetricamente verso l'alveo.

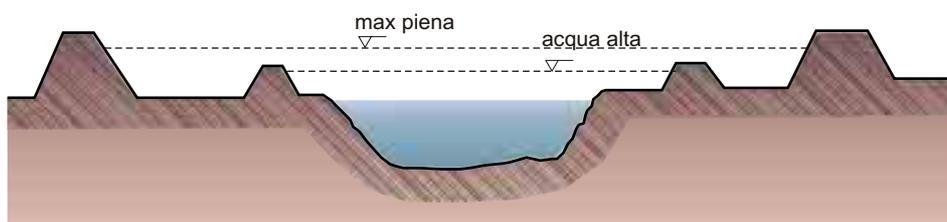
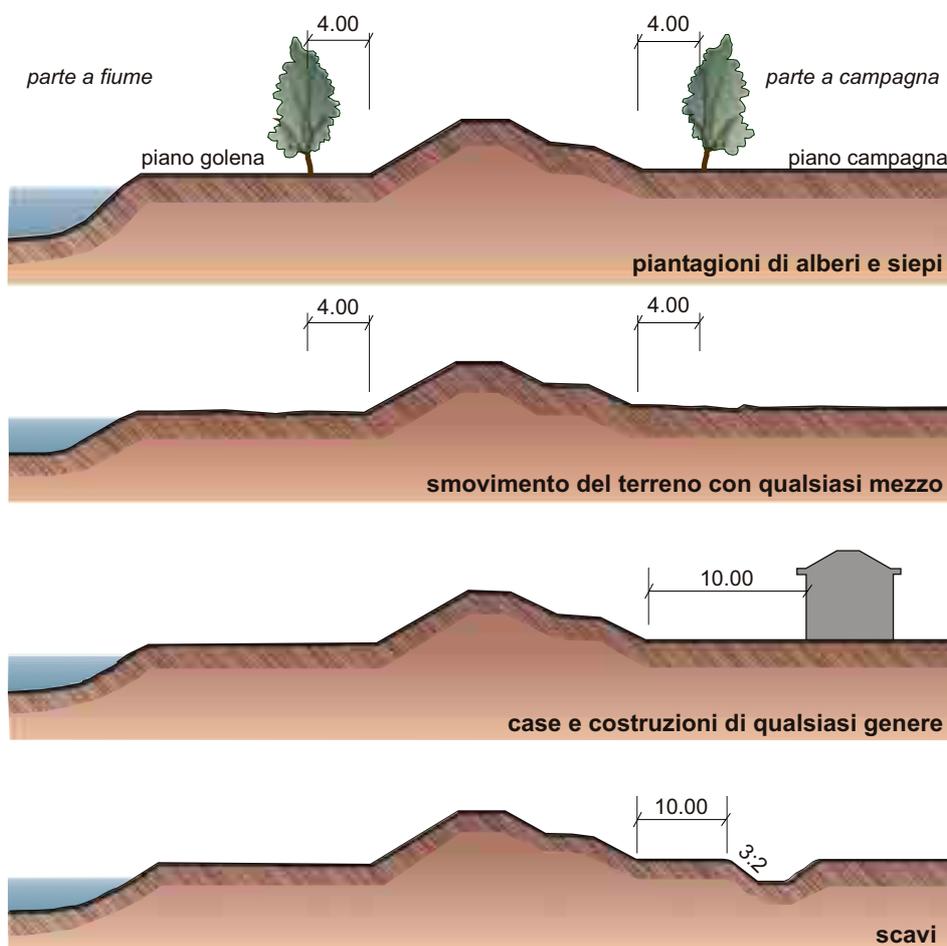


Figura 2.4: La figura rappresenta la sezione trasversale di un corso d'acqua con argini longitudinali maestri, ed argini di golena; con questo assetto il fiume viene ad avere un letto di magra, un letto fra gli argini di golena per le acque alte, ed uno molto più ampio fra gli argini maestri, corrispondenti alla sezione occorrente per il deflusso alle massime piene.

Figura 2.1.1: Distanze minime dalle arginature fluviali. D.M. 25/27/1924 n.523.

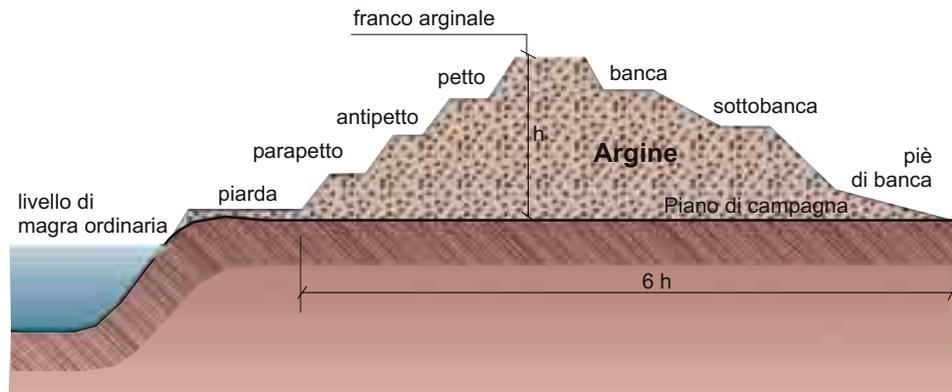


Argini longitudinali

Essi hanno la funzione di impedire ogni comunicazione fra l'alveo e il territorio laterale, ed obbligano la corrente in piena a passare per una sezione convenientemente limitata. Gli argini longitudinali si dicono in froldo, se sono costruiti in diretta continuazione delle sponde del corso d'acqua, generalmente però nei corsi d'acqua importanti e soggetti a notevoli piene, gli argini longitudinali sorgono a distanza dalle sponde, in modo da lasciare alle acque di piena un certo letto di espansione; il terreno compreso fra gli argini e le sponde prende il nome di golena.

Non è raro il caso che il terreno di golena sia del tutto o in parte soggetto a coltivazione o altre attività pertanto può essere necessario proteggerlo dalle piene che non siano massime mediante arginelli minori, detti argini sommergibili di golena.

Figura 2.1.2: Gli argini maestri di grandi corsi d'acqua sovente presentano una sezione più complessa di quella trapezia ordinaria, così come illustrato in figura. Inoltre talora l'argine funziona anche da strada, ed allora è sistemato in sommità secondo il profilo ordinario di strada carrabile in rilevato.



Per determinare la distanza fra gli argini maestri longitudinali e la loro altezza, occorre conoscere la portata delle massime piene.

La sezione trasversale degli argini è generalmente trapezia; per gli argini maestri, la larghezza in sommità generalmente non è inferiore a 2 m sino ad una larghezza di fiume di m. 40 ed aumentando poi, sino ad un certo limite, di cm. 4 per ogni metro di maggiore larghezza.

Gli argini maestri di grandi corsi d'acqua generalmente presentano una sezione più complessa di quella trapezia ordinaria; essi vengono rinforzati sia verso fiume che verso campagna. Le dimensioni trasversali che così vengono ad avere questi argini sono superiori a quelle che risulterebbero dai calcoli basati sull'equilibrio statico del terrapieno assoggettato alla spinta dell'acqua; tali sezioni rinforzate si adottano per allontanare il pericolo derivante dalla filtrazione dell'acqua attraverso la massa del terrapieno o nel suolo sottostante, e per evitare franamenti dell'argine, anche in caso di parziali erosioni prodotte da una eccessiva velocità della corrente.

Argini trasversali

Questi argini si dicono anche ortogonali, perché nei tratti d'alveo rettilinei vengono disposti a coppie in direzione circa normale alla corrente. La corrente obbligata a passare fra le teste delle successive coppie di argini viene centralizzata, e nei periodi di piena le acque alte stendendosi come in altrettanti bacini nelle zone comprese fra ciascuna coppia di argini e la successiva, danno luogo ad abbondanti depositi e si ha di conseguenza un graduale sovrizzo della golena rispetto all'alveo

Descrizione e Caratteristiche

Gli argini vengono realizzati con terreno compattato aventi caratteristiche fisiche e meccaniche adeguate a renderlo stabile e a trattenere e contenere l'acqua; la tipologia di tali materiali condizionerà la forma della sezione arginale.

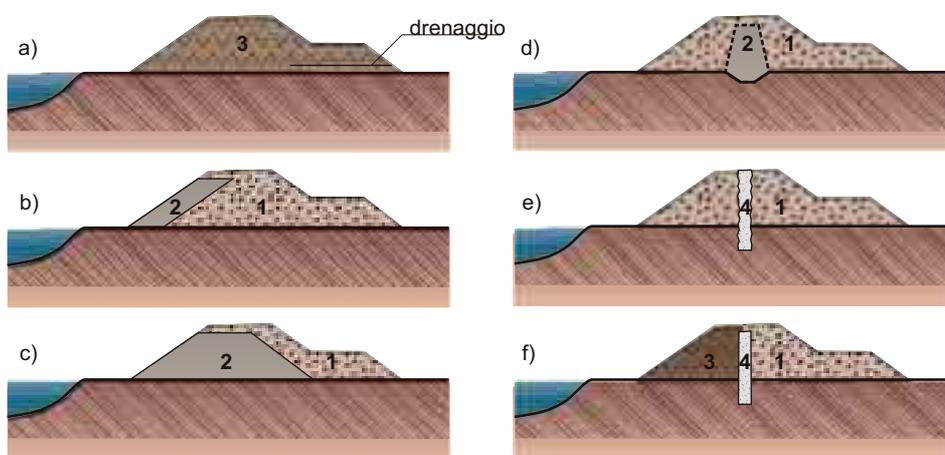
Si utilizzano generalmente materiali a bassa permeabilità di natura argillosa e limosa, in grado di assicurare la stabilità del complesso argine-terreno di fondazione e nel contempo da adattarsi ai cedimenti del terreno di fondazione.

E' importante che nella costruzione dell'argine si eviti la creazione di superfici di discontinuità tra il nuovo manufatto ed il terreno di fondazione o un argine già esistente; a tal fine si prevedono scotichi, solcature, gradonature. Il terreno normalmente viene posto in opera a strati dello spessore dell'ordine di 30-35 cm e successivamente compattato.

Generalmente però per ragioni economiche la costruzione degli argini si usano i terreni presenti in golenza od in alveo. La limitata disponibilità di terreni a bassa permeabilità può richiedere di adottare sezioni analoghe a quelle delle dighe in terra zonate, ma la realizzazione di tali sezioni risulta complessa e di difficile gestione.

Figura 2.1-3: Sezioni arginali a zone con permeabilità diversa, atte a garantire funzioni di drenaggio e di impermeabilizzazione. Questa tecnica consente di minimizzare la quantità di materiali con determinate caratteristiche idrauliche, il cui reperimento in certi casi può costituire un costo elevato. (Colleselli, 1998, rid.)

- 1) materiale molto permeabile
- 2) materiale impermeabile
- 3) materiale permeabile
- 4) setto impermeabile



Si adottano, nella pratica sezioni, formate con materiali omogenei con filtri e drenaggi verso campagna o sezioni formate da sole due zone, mettendo in opera il materiale meno permeabile e meno erodibile verso fiume e quello più permeabile e più stabile verso campagna.

Figura 2.1.4: Quando necessario, soprattutto nel caso di argini esistenti, si può assicurare l'impermeabilità del rilevato arginale mediante geosintetici usati sia in superficie che all'interno dell'argine stesso come un diaframma verticale.



Gli argini di grandi dimensioni hanno pendenza più dolce verso campagna, per l'esigenza di contenere la linea di filtrazione, al fine di garantire la stabilità del rilevato stesso e per la necessità di contrastare il pericolo di perdita di consistenza del terreno a campagna e di sifonamento attraverso il terreno di fondazione. Questo ultimo fenomeno è dovuto all'incremento della pressione dell'acqua nel terreno di fondazione. L'acqua infatti oltre che attraverso l'argine filtra anche nel terreno di fondazione e l'incremento di pressione che ne deriva è in grado di sollevare il terreno oltre l'argine (fontanazzi) ed innescare un fenomeno di erosione che arretra verso il fiume causando anche il collasso dell'argine.

Figura 2.1.5: Fenomeno del sifonamento oltre il piede di un argine. L'acqua che filtra dal fiume verso l'esterno, solleva ed erode il terreno oltre il piede dell'argine, dove viene a mancare il peso stabilizzante del terreno del rilevato. Nella prima fase il terreno oltre l'argine si fluidifica e l'acqua affiora abbondantemente, erodendo il terreno. Nella seconda fase, l'erosione è arretrata ormai verso il fiume creando un vero e proprio canale e provocando il collasso dell'argine a causa dell'asportazione di terreno al di sotto di esso.

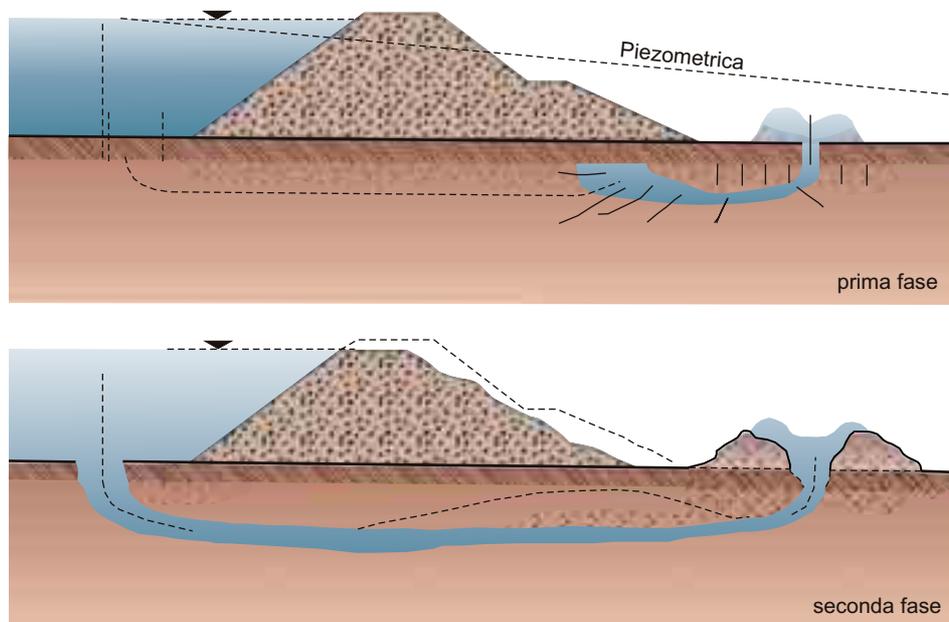


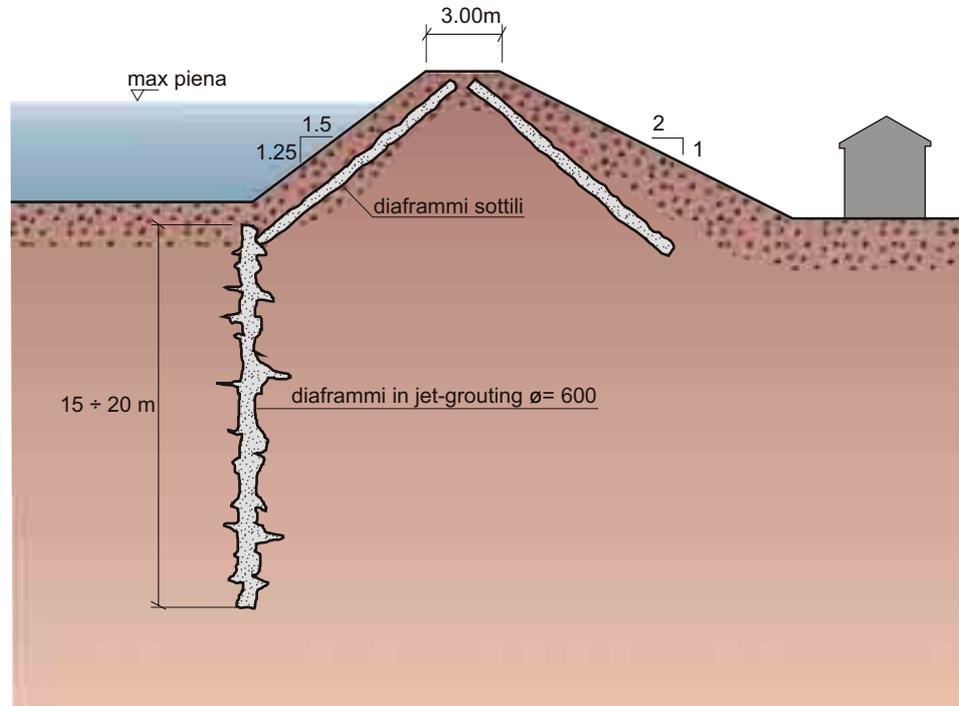
Figura 2.1.6: Fontanazzo formatosi a causa del sifonamento lungo gli argini del fiume Oglio in comune di Marcaria (alluvione ottobre 2000). Per diminuire il carico idraulico tra il fiume e l'area soggetta al sifonamento (differenza tra le rispettive quote dell'acqua) si usano sacchetti di sabbia per creare un piccolo bacino. La conseguenza è una diminuzione della velocità media di filtrazione dell'acqua ed una diminuzione della sua capacità di erosione subsuperficiale.



La rotta di un argine è un evento che può avere conseguenze catastrofiche e può avvenire in vari modi, tra i quali il meccanismo principale (60-70 % dei casi) è quello del sormonto.

Il sifonamento attraverso l'argine invece rappresenta circa il 20% delle rotture; queste rotture si prevengono rafforzando l'argine od impedendo la filtrazione dell'acqua attraverso e sotto l'argine con diaframmi in argilla o calcestruzzo e palancole.

Figura 2.1.7: I diaframmi oltre che al piede degli argini possono essere utilizzati per impermeabilizzare il corpo stesso del rilevato e rafforzarlo; un esempio di questa applicazione è riportato nella figura che si riferisce ad un intervento lungo il Tagliamento, dove per la realizzazione è stata impiegata la tecnica del Jet-grouting



In assenza di spazio per un adeguato sviluppo laterale degli argini inoltre può essere necessario ricorrere a muri di contenimento.

Un tipico esempio è rappresentato dalla difesa, con un muro di sostegno ed un diaframma dell'argine di protezione dell'abitato di Ariano Polesine. A seguito dei vistosi fenomeni di sifonamento verificatisi nel centro abitato durante la piena del 1994 è stato progettato un nuovo diaframma a fiume di maggiore lunghezza rispetto a quello costruito negli anni '60, tale da intercettare gli strati limosi ed argillosi profondi.

Figura 2.1.8: La scarsità di spazio disponibile nei centri abitati può rendere necessario l'impiego di muri di sponda per diminuire l'ingombro degli argini. In tal caso però si possono innescare fenomeni di sifonamento degli argini. Per evitare che ciò accada si può ricorrere all'impiego di diaframmi che, se opportunamente dimensionati, costringono l'acqua che filtra sotto l'argine a percorrere distanze maggiori prima di riaffiorare oltre il piede del rilevato. La dissipazione di energia che ne consegue, impedisce l'innescare di fenomeni di sifonamento.

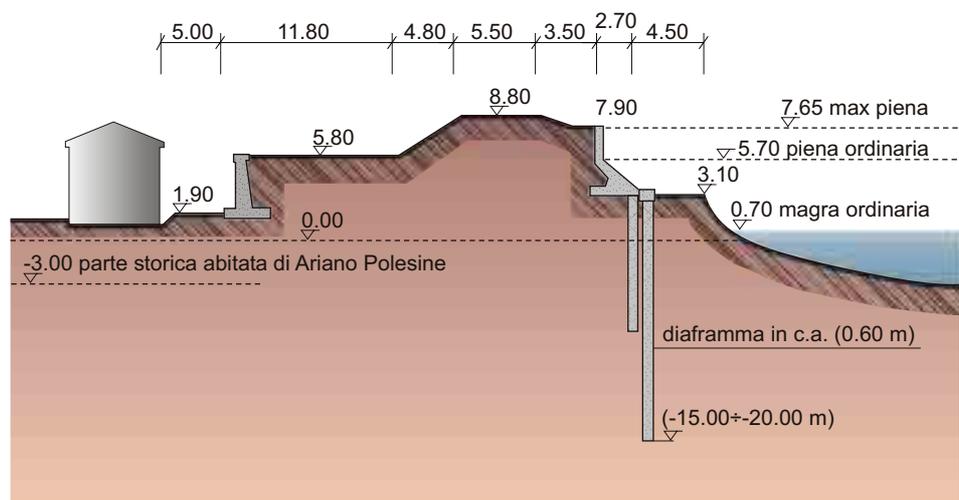
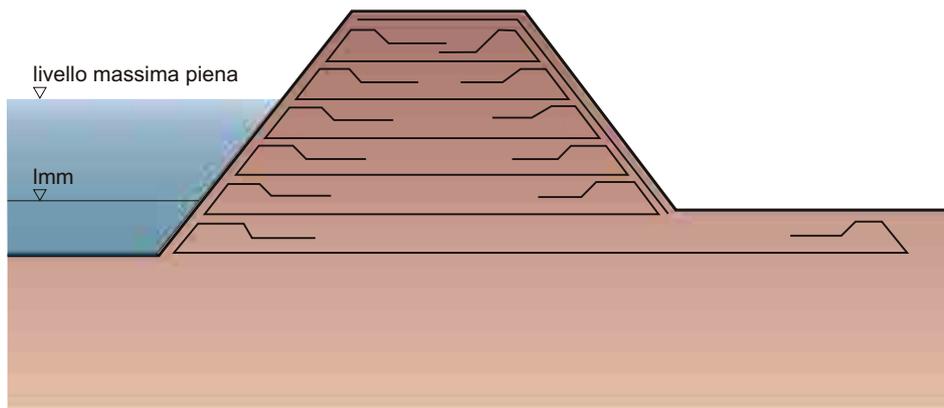
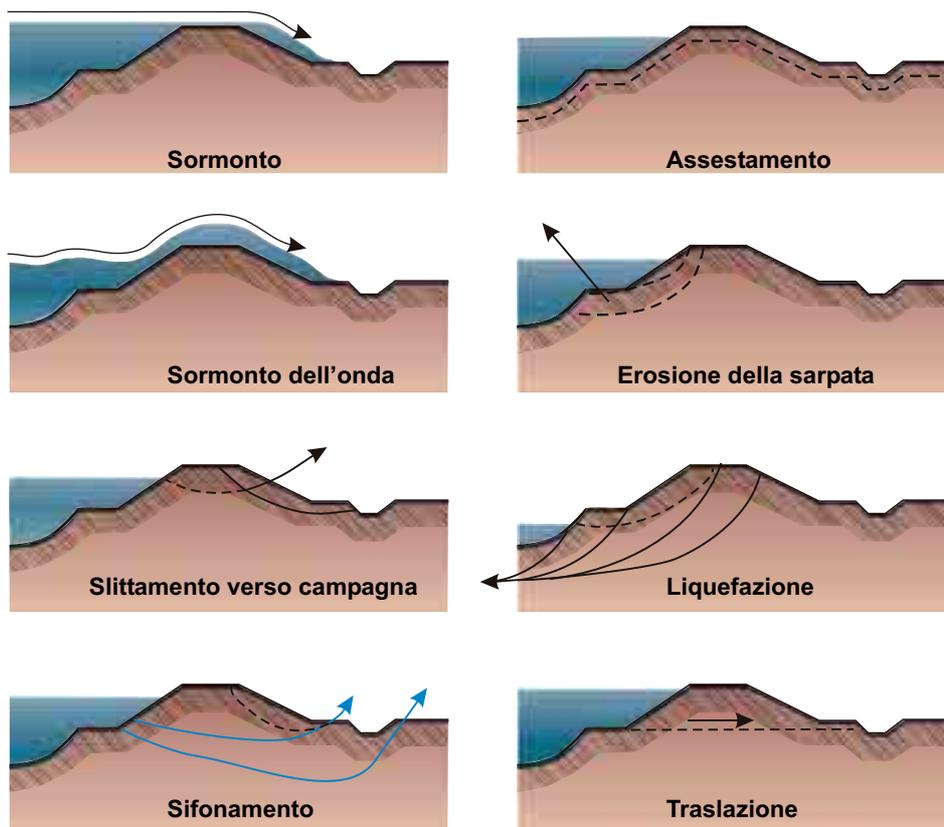


Figura 2.1.9: La diminuzione di ingombro degli argini si può conseguire anche aumentando la pendenza delle scarpate per mezzo della tecnica del rinforzo dei terreni: l'aggiunta di rinforzi plastici o metallici opportunamente dimensionati può consentire di realizzare inclinazioni di 60-70°. L'uso di questa tecnica richiede però l'impermeabilizzazione dell'argine per impedire fenomeni di filtrazione che verrebbero accentuati dalla presenza di discontinuità all'interno del terreno.



La rottura degli argini può avvenire anche per scorrimento sulla base dovuto a scarso immorsamento o perdita di consistenza del terreno di fondazione o del rilevato stesso causata dall'imbibizione. Infine può accadere che l'argine sia intaccato dall'erosione; questo può riguardare soprattutto per gli argini in frodo; in tali casi è opportuno intervenire realizzando dei rivestimenti protettivi con tecniche diverse a seconda della velocità della corrente..

Figura 2.1.10: Meccanismi di rottura degli argini.



L'arginamento di un fiume produce effetti significativi sia sul tratto direttamente interessato che in quelli a valle di esso. Nel tratto arginato la portata, ora completamente contenuta della sezione, è causa di velocità di corrente più elevata con conseguente minor deposito e maggiore escavazione. Al contrario nei tronchi inferiori la capacità di trasporto del fiume rimane immutata e l'eccesso di trasporto solido proveniente da monte tende a depositarsi. Sempre a valle inoltre cambierà il regime delle piene, aumentando la velocità con cui vi giungono

Figura 2.1.11: Rottura artificiale controllata per abbassare il livello della piena dell'argine di golena del fiume Po nel comune di Serravalle-Libiola in provincia di Mantova (alluvione ottobre 2000).



Figura 2.1.12: Rottura dell'argine dell'Arno in località "Roffia", ad ovest di Empoli. La rottura dell'argine, durante l'evento alluvionale del 20-21 ottobre 1992, laminò l'onda di piena abbassando il livello dell'acqua del fiume, a valle, di oltre un metro e mezzo.



Generalità

La difesa di un'area esposta all'esonazione di un corso d'acqua può attuarsi in due modi:

1. aumentando la capacità di portata dell'alveo;
2. diminuendo la portata di piena che, con determinato tempo di ritorno, transita nel tratto esposto.

Nelle aree fortemente urbanizzate o utilizzate, è difficile riscontrare le condizioni che consentano la possibilità di aumentare la capacità di convogliamento dell'alveo. La soluzione, in questi casi, consiste nella costruzione di opere per la riduzione della portata.

Le portate d'acqua che defluiscono in un fiume possono costituire una risorsa importante, ma al tempo stesso, se eccessive, possono procurare gravi danni. Le opere per lo sfruttamento delle risorse idriche generalmente influiscono sul regime delle portate e possono diventare un importante strumento di regolazione. Allo stesso modo le opere di riduzione delle portate, se opportunamente progettate, possono divenire un'occasione di sfruttamento delle risorse idriche, ad esempio a scopo idroelettrico o irriguo.

Se la distribuzione delle portate nel tempo, è tale che i volumi da regolare sono piccoli rispetto al flusso naturale, la derivazione può comportare modifiche ed interventi limitati. In altri casi invece l'entità dei volumi da regimare a scopo di sfruttamento o di difesa è talmente elevata da richiedere l'inserimento di adeguate capacità che siano in grado di intercettare e modulare secondo le necessità la successione delle portate.

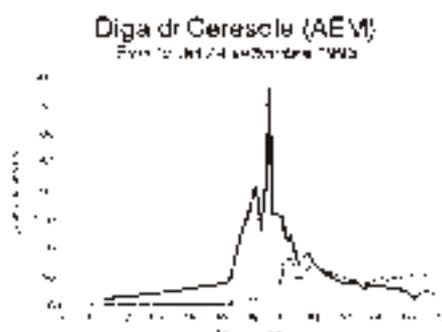
Figura 3.0.1: Costruzione di una cassa di espansione sul fiume Secchia. Si può vedere lo sbarramento ed in primo piano l'arginatura della cassa di espansione con l'imbocco dello scaricatore. Si tratta di opere complesse e di grandi dimensioni che determinano un impatto significativo sul territorio



Date le caratteristiche di un territorio come quello italiano, l'impiego di opere per la riduzione delle portate è particolarmente utile poiché è spesso improponibile intervenire con sistemi che aumentino la portata convogliabile a causa dell'impatto che determinano ed a causa dell'elevata antropizzazione del territorio.

La laminazione di una piena consiste nell'invasare temporaneamente in adatta capacità una parte del volume dell'onda di piena, per restituirla successivamente. In questa maniera l'idrogramma di piena viene modificato opportunamente e la portata al colmo viene resa compatibile con le sezioni di deflusso a valle.

Figura 3.0.2: Andamento delle portate affluite all'invaso della diga di Ceresole (linea continua) e di quelle rilasciate (linea a tratti) a valle della diga nel corso della piena del 24 settembre 1993. Si rileva chiaramente la riduzione di portata a valle della diga, determinata dall'invaso di una quota rilevante delle portate in particolare di quella di picco. La diga in questo caso ha funzionato da serbatoio di piena



La riduzione delle portate può ottenersi con:

- **serbatoi di piena**
- **casce di espansione**
- **diversivi e scolmatori**

Serbatoi di piena, nella parte medio alta dei bacini, e casce di espansione, nella parte medio bassa, sono veri e propri invasi posti sull'asta principale o su un suo affluente. Le due tipologie di opere trovano applicazione in condizioni geologiche e topografiche molto diverse. In particolare nella parte medio bassa dei bacini la morfologia generalmente non offre invasi naturali facilmente sbarrabili per creare la capacità necessaria ed allora si deve creare l'invaso mediante arginature.

Figura 3.0.3: Scolmatore del fiume Adige, posto all'altezza di Mori. Collega, in galleria, il fiume con il lago di Garda e permette di derivare una parte delle portate nel bacino in caso di piene che superino valori ritenuti critici. In questo caso le acque vengono immesse in un cosiddetto "recipiente" e non vengono restituite al corso d'acqua d'origine.



Generalità

L'impiego di serbatoi per l'attenuazione delle piene risale al secolo XVIII in varie regioni francesi. Verso la metà del XVIII secolo, nel bacino della Loira fu costruito un serbatoio che ne sbarrava un affluente; altro esempio noto è quello della diga con scarico aperto di Pinay, sulla Loira, eseguita nel 1711 e successivamente riparata e rialzata. Nel 1849 fu costruito sul torrente Furens uno sbarramento per creare un serbatoio della capacità di circa 200.000 mc che ne immagazzinasse le piene, per evitare l'inondazione della città di Saint Etienne. Il serbatoio in questo caso venne utilizzato anche per approvvigionare la città di acqua potabile. Questi sistemi, a quei tempi, risultavano però di difficile impiego per i costi elevati e per le difficoltà di una gestione che evitasse conseguenze pericolose nei tratti a valle.

Una tipologia particolare di serbatoi di piena ad uso multiplo già usati anticamente sono i laghetti collinari, impiegati in agricoltura, di cui si tratterà in un altro capitolo. I principi che regolano il processo di laminazione delle piene che si applicano ai serbatoi ed alle casse d'espansione sono sostanzialmente gli stessi. Le differenze sussistono invece sotto il profilo tecnico con risvolti importanti di carattere economico e gestionale.

I serbatoi di piena si possono considerare i progenitori delle casse d'espansione anche se in effetti le golene dei grandi fiumi hanno da sempre svolto la funzione di invasare cospicue quantità di acqua in occasione degli eventi di piena.

Figura 3.1.1: Serbatoio di piena di Vinchiana (LU). Vista da valle



Figura 3.1.2: Serbatoio di piena di Vinchiana (LU), foto aerea.



Figura 3.1.3: Serbatoio di piena di Vinchiana (LU). A sinistra, vista dell'uscita della galleria di deviazione del torrente per le normali portate, in alto lo sfioratore di troppo pieno dell'invaso. A destra vista dell'invaso da monte.

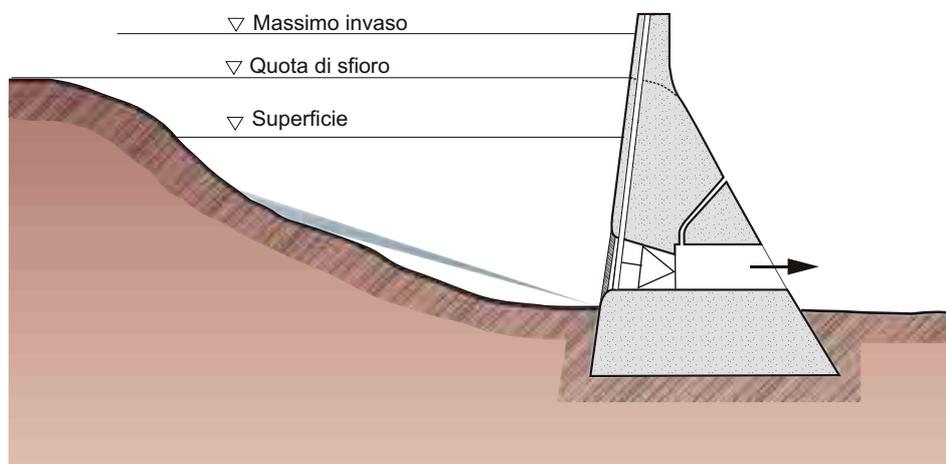
Descrizione e Caratteristiche

Si tratta di opere generalmente molto impegnative sia sotto il profilo tecnico che economico ed in considerazione del fatto che vengono utilizzate completamente con tempi di ritorno lunghi (anche più di 100 anni), sono opere per le quali è conveniente un impiego multiplo oltre alla difesa idraulica (irrigazione, approvvigionamento idrico o produzione di energia).

L'ubicazione di serbatoio di piena va scelta attraverso un compromesso tra diverse esigenze:

1. condizioni geologiche e topografiche atte alla creazione dell'invaso
2. massimizzazione dell'efficacia regolatrice derivante dall'estensione del bacino tributario
3. impatto ambientale
4. impatto socio-economico

Figura 3.1.4: Sezione schematica di un serbatoio di piena. Lo sbarramento è costituito da una diga in calcestruzzo dotata di uno scarico al fondo non presidiato, per la restituzione dell'acqua a valle secondo le esigenze ed in base al valore delle portate di piena.



La progettazione del serbatoio, sotto il profilo idraulico, passa attraverso la definizione dell'idrogramma di piena di progetto: ossia la variazione della portata nel tempo durante la piena. La modulazione della piena secondo le specifiche esigenze si otterrà dalla combinazione di un adeguato volume invasato e di opportuni sistemi di rilascio delle portate. L'invaso si creerà mediante una diga in calcestruzzo od in terra, di altezza adeguata e sarà dotata di una o più scarichi al fondo (luci) per restituire al corso d'acqua le portate fino ai valori massimi tollerabili a valle. Lo sbarramento sarà inoltre dotato di uno scaricatore di superficie per poter garantire il deflusso delle acque qualora per una qualche ragione la capacità dell'invaso venisse esaurita o venisse a mancare la funzionalità dello scarico di fondo.

Lo scarico di fondo dei serbatoi ad esclusivo uso di piena può essere realizzato in due modi:

- scarico presidiato da paratoie: consente di regolare secondo le esigenze la portata restituita;
- luci fisse a scarico libero, meno sofisticate ma più affidabili.

I serbatoi ad uso multiplo dovranno forzatamente essere dotati di scarico di fondo del primo tipo, al fine di consentire lo stoccaggio dell'acqua anche per altre finalità.

Figura 3.1.5: Schemi di scarico di fondo.

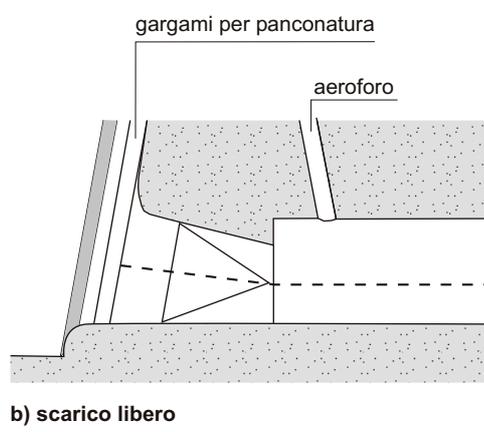
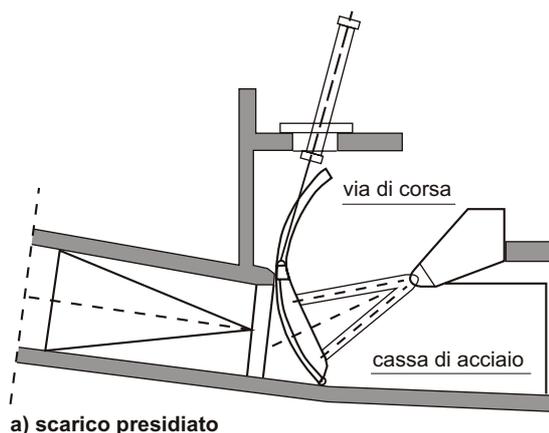


Figura 3.1.6: Vista da monte dello scaricatore di superficie e di fondo della diga del Liscione sul fiume Biferno (Guardialfiera, CB). Si osservino i dispositivi per la dissipazione dell'energia della corrente al fondo dello scivolo.



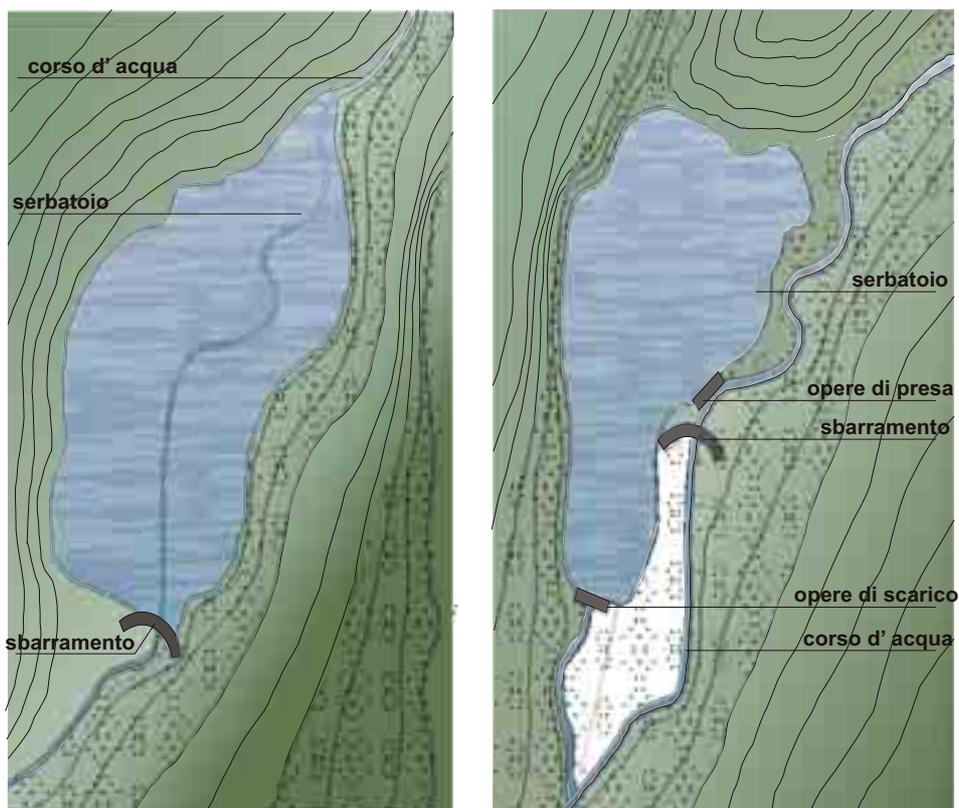
Generalità

Come si è detto, le casse di espansione consentono di gestire un volume d'acqua che di norma è tenuto libero così da ridurre la portata al colmo. Il volume invasato viene restituito quando le condizioni idrometriche del corso d'acqua non siano più pericolose.

La posizione più naturale per questi serbatoi è all'interno dello stesso alveo del fiume, approfittando magari di una configurazione morfologica favorevole, costituita da una strettoia preceduta a monte da un allargamento della valle. Si crea uno sbarramento che determina un rigurgito che consente di riempire l'invaso in occasione di piene ed al tempo stesso è dotato di organi che permettono il deflusso delle acque in condizioni normali.

Una seconda configurazione possibile consiste in un serbatoio posizionato fuori dall'alveo del fiume, accanto ad esso, in una cosiddetta cassa di espansione "in derivazione"; in questa situazione, l'ingresso dell'acqua nel serbatoio è controllato da un'opera di presa e lo scarico avviene attraverso un'opera apposita, che in generale è diversa da quella di presa. In alcuni casi lo scarico delle acque avviene in un corso d'acqua diverso da quello dal quale vengono derivate.

Figura 3.2.1: Le due possibili posizioni di un serbatoio di laminazione, rispetto al corso d'acqua. A sinistra la posizione in linea e a destra quella in derivazione. Per quest'ultima, l'opera di scarico può comunicare anche con un corso d'acqua diverso. (Adami, 1998, rid.)



Tra le due soluzioni generalmente la meno onerosa risulta la prima: vi sono minori costi legati all'occupazione di spazio ed al vincolo idraulico imposto ai terreni; inoltre non è necessario realizzare opere di derivazione e di restituzione molto complesse.

Figura 3.2.2: Cassa di espansione in linea sul fiume Secchia, vista da valle dello sfioratore di piena e delle aperture per il regolare deflusso.



Figura 3.2.3: Cassa espansione torrente Chiani (PG). Vista dello scaricatore di fondo e di superficie



Figura 3.2.4: Cassa espansione torrente Chiani (PG). Vista del manufatto di imbocco



Sotto il profilo dell'impatto ambientale tra serbatoi di piena e casse d'espansione sono da preferirsi queste ultime per il minor impatto che hanno sul territorio e per le oasi che vi si possono creare, specie per le casse a cavallo del corso d'acqua e quindi sovente parzialmente invase dalle acque.

La trattenuta di volumi d'acqua anche modesti consente infatti la creazione di un ambiente umido utilizzabile dall'avifauna; può anche essere consentito lo sviluppo di vegetazione che, almeno nella parte più frequentemente allagata, possa sopravvivere a periodiche sommersioni.

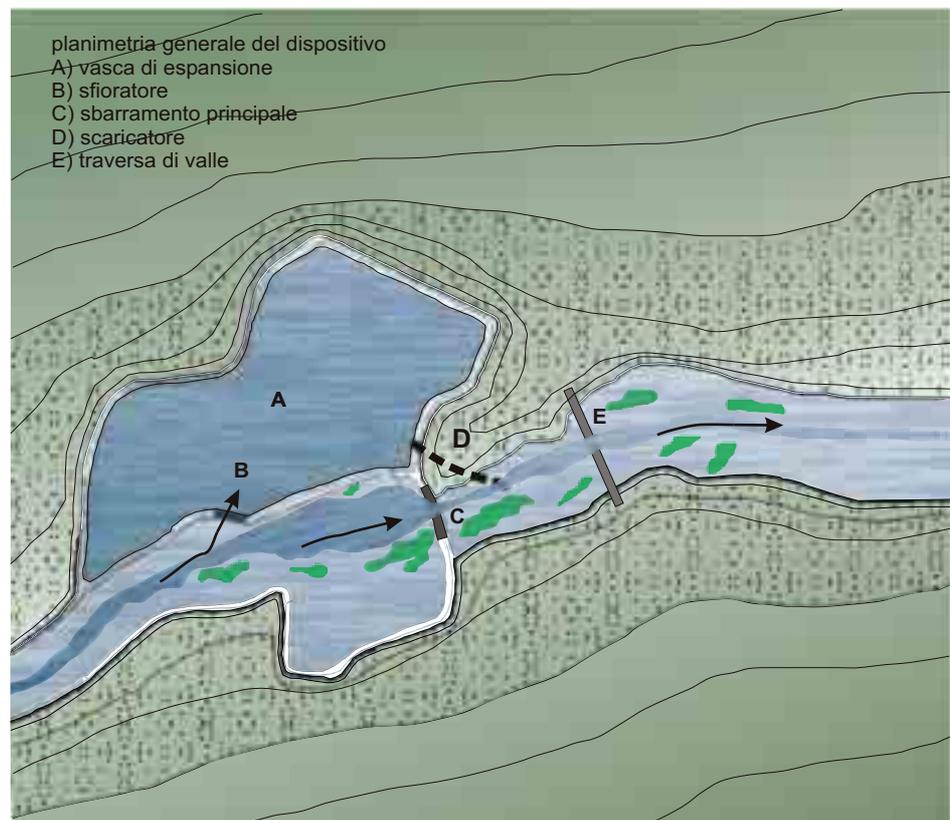
Le casse di espansione oltre alla laminazione delle piene si prestano anche ad altre applicazioni; grazie alla possibilità di rimodulare le portate, sfruttando gli eccessi di acqua dei periodi piovosi, è possibile:

- incrementare le portate irrigue
- incrementare il deflusso minimo
- possono essere rimodulate le portate naturali che siano state sfasate a monte per la presenza di impianti idroelettrici od industriali.
- con alcuni provvedimenti le casse possono favorire, in presenza di condizioni idrogeologiche favorevoli, la ricarica delle falde.

Le acque di piena sono generalmente caratterizzate da un notevole contenuto di materiale in sospensione, il quale, per il rallentamento subito dalla corrente, si deposita sul fondo delle casse di espansione. Questo fenomeno nel tempo può ridurre la capacità d'invaso e influire negativamente sull'alimentazione delle falde acquifere. Per queste ragioni è importante prevedere la manutenzione periodica di queste opere.

Nella valle o a lato di un corso d'acqua aree opportunamente sistemate ed arginate, possono consentire l'invaso temporaneo di volumi d'acqua anche rilevanti in rapporto al volume della piena. Poiché l'altezza utilizzabile per l'invaso è generalmente di pochi metri, la superficie da riservare all'invaso può essere assai estesa. E' quindi necessario che l'area non ospiti insediamenti di importanti e che il valore dei terreni non sia troppo elevato qualora non appartenga al demanio.

Figura 3.2.5: Cassa di espansione in derivazione lungo il Fiume Secchia. Sono indicate tutte le opere che costituiscono il sistema per la derivazione e lo stoccaggio temporaneo delle portate in eccesso. In questo caso il livello dell'acqua viene sostenuto con uno sbarramento per consentire di far funzionare lo sfioratore. A valle inoltre è posta una traversa per controllare eventuali fenomeni erosivi.



Descrizione e Caratteristiche

Casse in linea

Le casse disposte nella valle del corso d'acqua rappresentano la soluzione più semplice: non è necessaria un'opera di imbocco né di derivazione ed è sufficiente un unico manufatto all'uscita. L'opera di sbocco, dotata di sfioratore di superficie, è realizzata con una traversa posta nella sezione di chiusura. Si possono adottare traverse mobili, dotate di paratoie, o fisse caratterizzate dalla presenza di luci di fondo per il deflusso delle portate compatibili con le sezioni a valle.

Un'altra soluzione consiste nel costruire una traversa, moderatamente sporgente, delimitata lateralmente da ali immerse nelle sponde: in tal modo si crea a monte, con un modesto invaso, una zona umida. Anche questa opera sarà munita di scarico per l'esaurimento dell'invaso e per consentire il deflusso verso valle dei sedimenti.

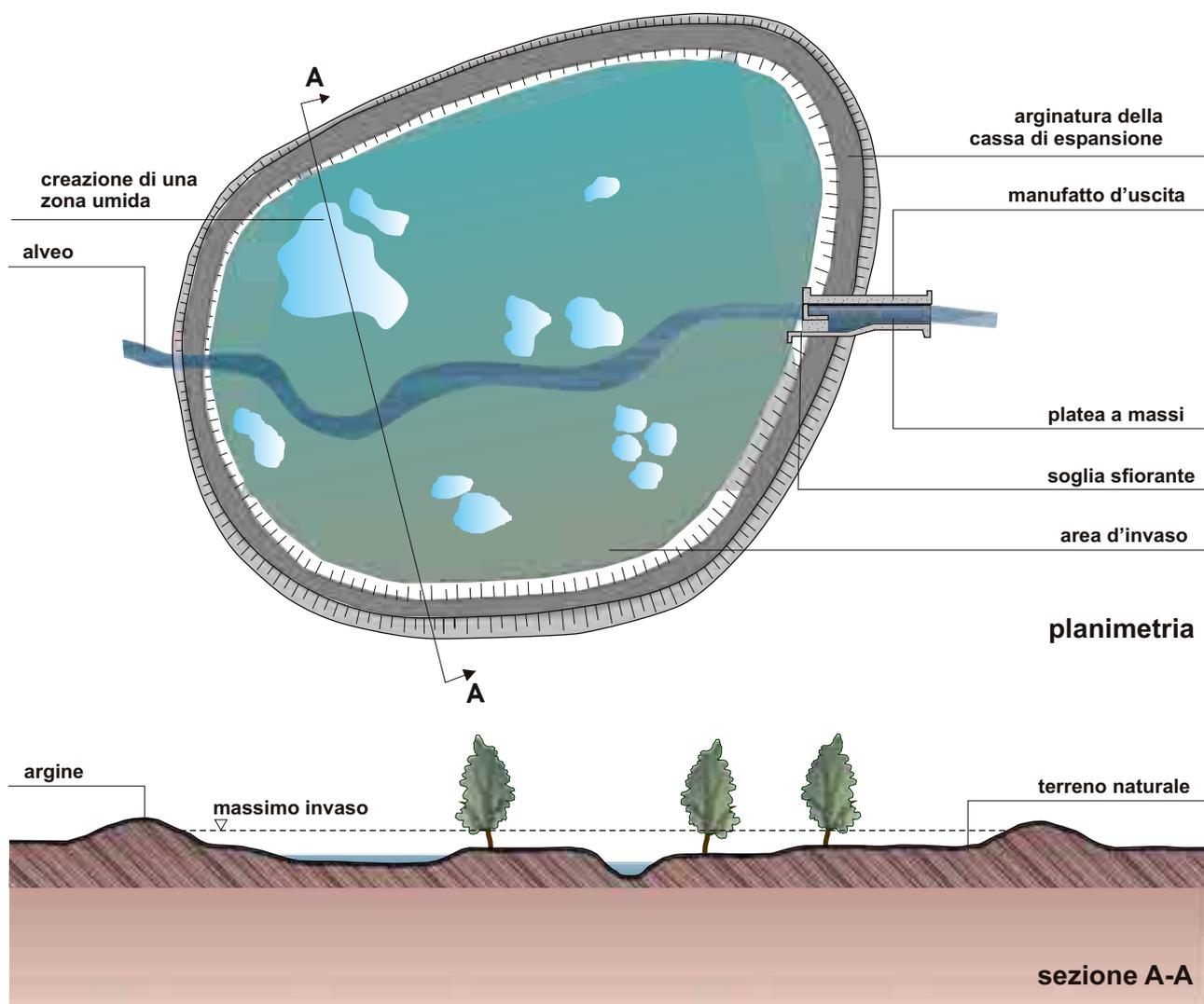


Figura 3.2.6: Cassa di espansione in linea. Un opportuno modellamento della cassa consente di favorire il ristagno dell'acqua creando una zona umida che diventa un'occasione interessante di valorizzazione ambientale di questo dispositivo di moderazione delle piene. La cassa è dotata di un manufatto di uscita dotato di soglia sfiorante che restituisce l'acqua a valle dissipandone l'energia per mezzo di una platea di massi

Per creare l'invaso in cui accogliere l'acqua rigurgitata dalla traversa o dalla soglia, si costruiscono delle arginature in terra, secondo le modalità simili a quelle descritte per gli argini fluviali. A differenza di questi ultimi, le strutture usate nelle casse di espansione benchè siano soggette a condizioni meno gravose per il tempo in cui i serbatoi rimangono invasi vanno comunque protette rispetto a fenomeni erosivi.

Generalmente si ricorre a dei rivestimenti in materiali sciolti o flessibili (materassi e/o gabbioni).

Infine è opportuno instaurare una copertura erbacea stabile per evitare fenomeni di disseccamento che favoriscano l'infiltrazione localizzata ed i fenomeni di sifonamento. A tale scopo si possono utilizzare sistemi di inerbimento per mezzo di idrosemina, geostuoie tridimensionali rinforzate e non e, se necessario, predisporre sistemi di irrigazione. In zone distanti dall'alveo del corso d'acqua, l'aridità può infatti divenire un fattore limitante lo sviluppo della vegetazione.

Figura 3.2.7: Rivestimento con scogliera in blocchi di roccia dell'argine di una cassa di espansione. Il rivestimento è stato consolidato e rinaturalizzato per mezzo dell'inserimento di talee di salice.

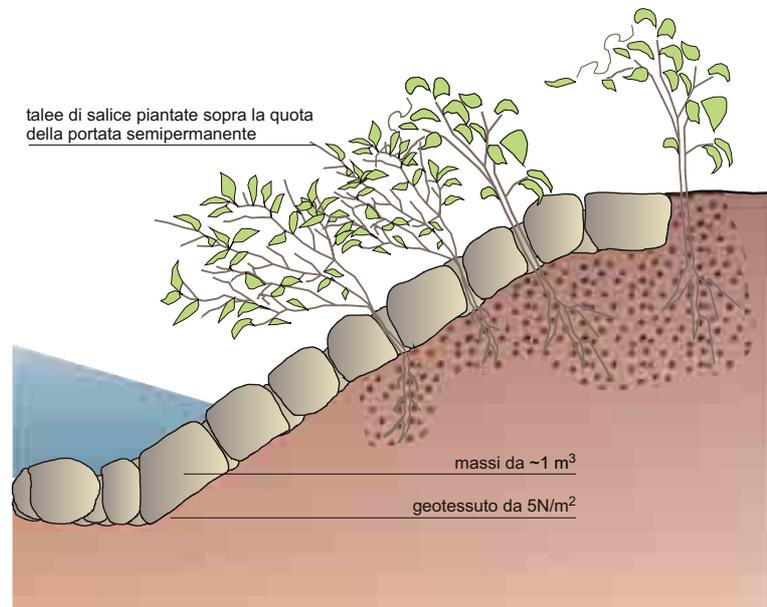


Figura 3.2.8: Veduta aerea di una piccola cassa di espansione in linea che svolge anche la funzione di piazza di deposito. Favorendo il ristagno dell'acqua in alcune porzioni del bacino, l'opera è divenuta anche l'occasione per creare una piccola zona umida. (Rio Inferno, Termeno, BZ)



Descrizione e Caratteristiche

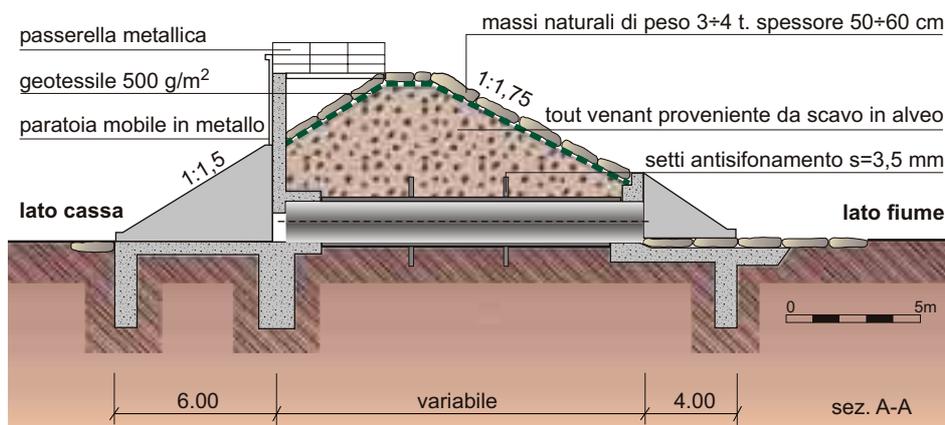
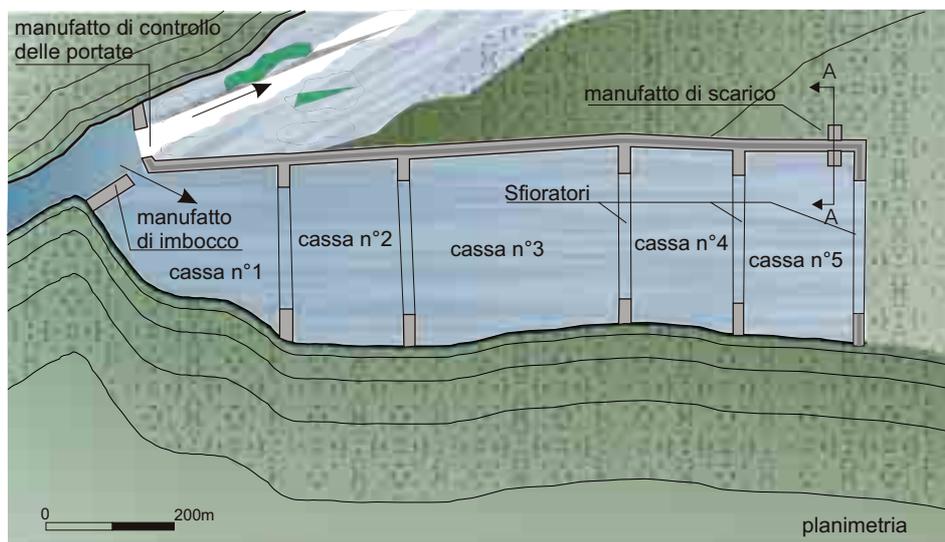
Casse in derivazione

Nelle casse in derivazione, come si è detto, l'invaso viene individuato a lato del corso d'acqua, delimitandolo con degli argini. Allo scopo di derivare nei tronchi a valle la portata eccedente quella tollerabile, si ricorre ad un organo di derivazione fisso, dotato di uno sfioratore opportunamente protetto. E' molto importante posizionare l'opera di imbocco alla quota corretta, in relazione agli eventi di piena, per garantire la piena efficacia dell'opera di difesa.

Questo tipo di casse di espansione spesso sono caratterizzate da tiranti idrici piuttosto bassi e se il terreno è in pendenza può essere conveniente utilizzare più vasche poste in serie. In questi casi tra vasca e vasca è prevista una luce di fondo e una soglia sfiorante. La luce di fondo ha la duplice funzione di permettere lo svuotamento della vasca a monte durante la fase calante dell'onda di piena e quella di preparare la vasca di valle, parzialmente invasata quando inizia lo sfioro, per facilitare la dissipazione dell'energia della portata sfiorante.

Con questo sistema si riesce anche a differenziare il rischio di allagamento nelle varie zone: in aree sfruttate con coltivazioni ad esempio può essere importante poter concentrare la maggior frequenza di allagamento in zone poco pregiate

Figura 3.2.9: Cassa di espansione in derivazione suddivisa in vasche poste in serie separate da soglie sfioranti. Il condotto di scarico, visibile in sezione, è posto nell'ultima vasca e consente di restituire le acque al fiume nei tempi desiderati grazie all'impiego di una paratoia. Il punto in cui avviene lo scarico deve essere sempre adeguatamente protetto dall'erosione; in questo caso, come di frequente avviene, si sono impiegati massi di rivestimento con adeguate dimensioni. (Da Deppo, 1998, rid.)



L'alimentazione delle casse in derivazione può effettuarsi con uno sfioratore eventualmente dotato di organi mobili.

Il convogliamento delle acque di piena in eccesso verso l'invaso si può agevolare ricorrendo ad un'opera, posta un pò più a valle rispetto alla derivazione, in grado di sostenere il livello dell'acqua. A tale scopo spesso si utilizza una traversa a soglia fissa con luci di fondo dimensionate per la massima portata tollerata a valle.

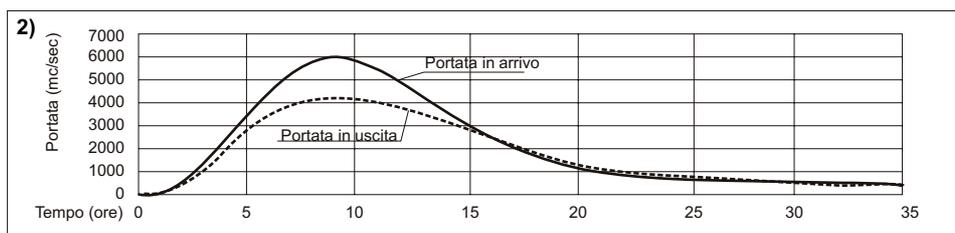
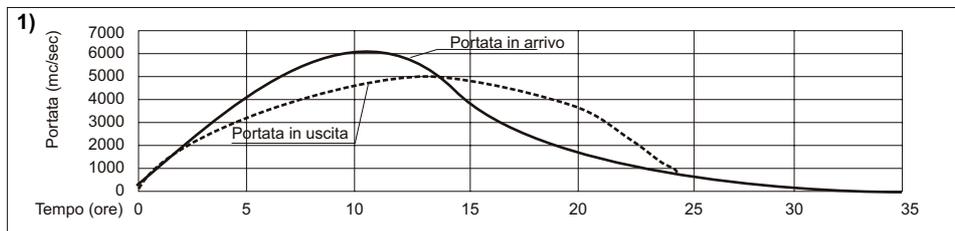
La cassa di espansione restituirà al fiume il volume invasato mediante uno scarico di fondo presidiato da una paratoia azionata quando nel corso d'acqua la portata scende sotto il valore critico. Nel caso la capacità d'invaso della cassa si esaurisse, entra in funzione uno scarico superficiale a soglia fissa o in parte presidiato da paratoie automatiche. Nel caso di più vasche in serie, lo schema sopra descritto si ripete per ogni cassa.

Figura 3.2.10: Sfiatore sull'argine sinistro del Secchia. Quando il livello del fiume raggiunge la soglia, una parte della portata si scarica nella cassa di espansione sulla sinistra della foto.



Figura 3.2.11:

1) La variazione della forma di un'onda di piena per effetto di un serbatoio di laminazione in linea.
2) La variazione della forma di un'onda di piena per effetto di un serbatoio in derivazione controllato da uno sfioratore.

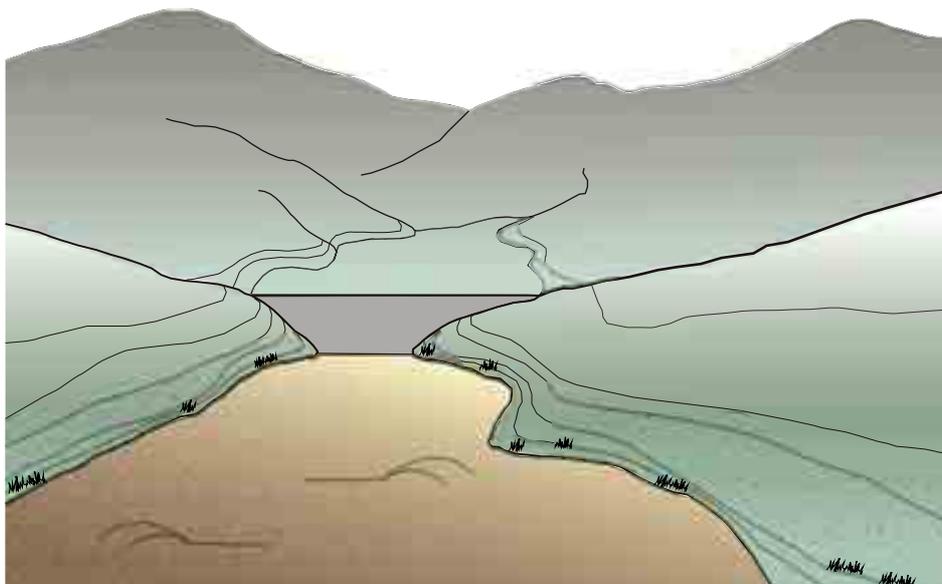


Generalità

I laghetti collinari, come indicato in precedenza, possono essere considerati un tipo particolare di serbatoi di piena ad uso multiplo. Questo tipo di opere sfrutta la morfologia collinare all'interno della quale sono individuati molteplici sistemi di bacini imbriferi: un impluvio sbarrato da una piccola diga (una diga in terra, come vedremo) trasforma parte di un letto torrentizio in un laghetto artificiale, il quale può avere, a seconda dei casi le capacità d'invaso più varie.

«E' molto antico il tentativo di raccogliere una riserva d'acqua in un bacino artificialmente costituito, per utilizzarla a scopo irriguo o domestico nei periodi siccitosi. Sono stati trovati in Libia sbarramenti di pietrame che si fanno risalire all'epoca romana o preromana. Del resto, l'Italia Meridionale ancor oggi presenta i ruderi, oltre che dei maestosi acquedotti romani, di grandi serbatoi e sbarramenti per la raccolta delle acque: basta ricordare i resti di sbarramenti nella piana di Paestum, in Campania, che erano destinati alla raccolta delle acque delle sorgenti di Capodifiume. In Piemonte, nel secolo scorso (1835), veniva costruito uno sbarramento per formare un serbatoio idrico capace di servire un comprensorio di 300 ettari, nella zona di Pralormo. Tra la fine del secolo XIX e l'inizio del XX, nelle province di Piacenza e di Modena, venivano realizzati numerosi invasi artificiali a scopo irriguo. Nel 1887, nel comune di Gazzola (Piacenza) nel podere di Ca' Soprana, vediamo costruito il primo "serbatoio a corona" d'Italia. La prima pubblicazione di carattere divulgativo sull'argomento è un opuscolo sui "serbatoi a corona", pubblicato appunto a Piacenza nel 1907 ad opera della Federazione Italiana dei Consorzi Agrari. Ma la diffusa realizzazione dei laghetti artificiali per la raccolta di acque, da impiegare a scopo irriguo, si è verificata soltanto nel periodo successivo alla seconda guerra mondiale, quando l'industria poté mettere a disposizione mezzi meccanici potenti, capaci di costruire in modo economico le dighe in terra battuta».

Figura 3.3.1: Schema di laghetto collinare.



Questo tipo di opere trova i luoghi di applicazione ideali in ambiente appenninico. In queste zone la morfologia offre innumerevoli possibilità di collocazione degli invasi e presenta le condizioni idrogeologiche ideali in quanto generalmente i terreni che costituiscono i rilievi sono caratterizzati da permeabilità molto basse.

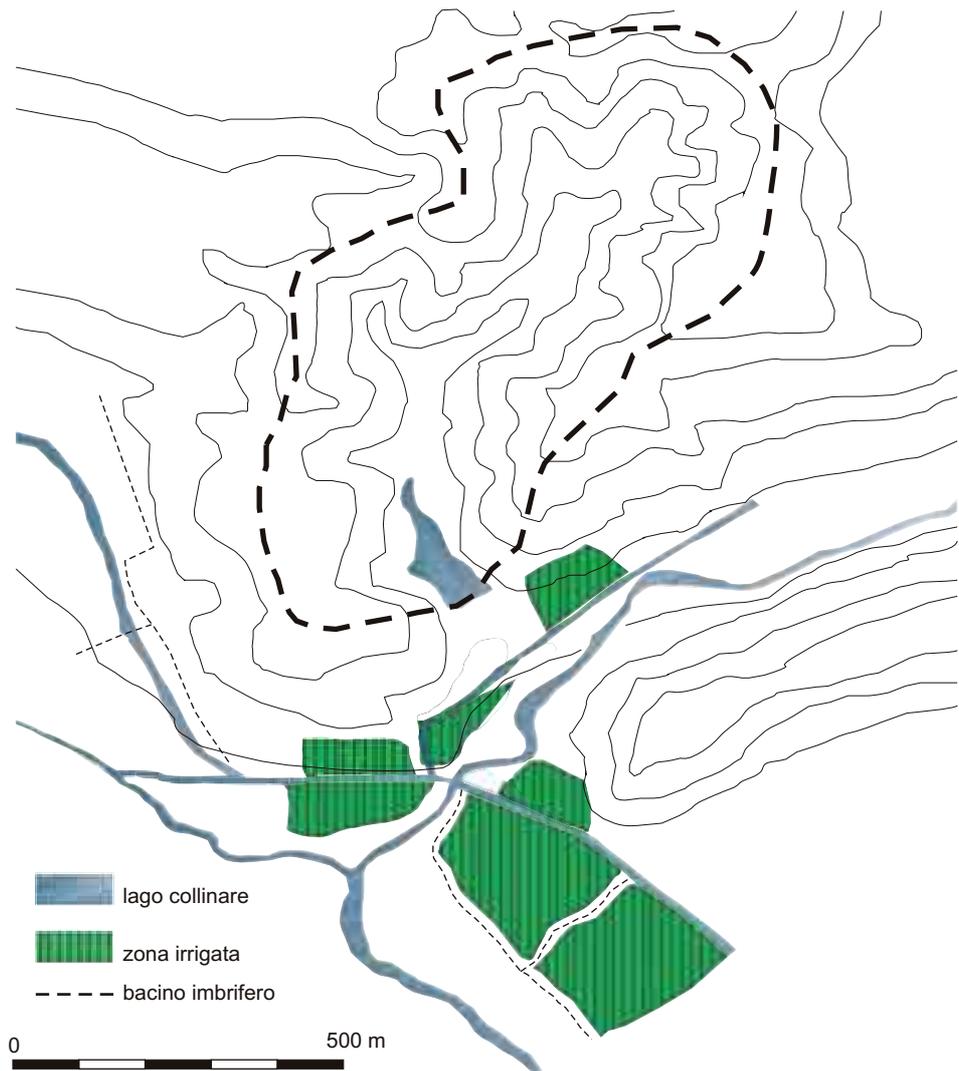
L'invaso naturale viene sbarrato con una diga in terra compattata dotata di un'opera di sfioro a soglia fissa, che smaltisce i volumi d'acqua eccedenti la capacità d'invaso per evitare che la tracimazione dell'acqua al di là della cresta possa causare l'erosione e la distruzione dell'opera. La diga è poi dotata, naturalmente, di un'opera di presa, che preleva l'acqua dal bacino per gli ulteriori utilizzi che se ne possono fare.

Poiché le zone collinari sono spesso caratterizzate da diffusi fenomeni di instabilità a causa delle caratteristiche geotecniche dei terreni, è necessario uno studio geologico e geomorfologico attento dell'area destinata ad accogliere l'invaso. Inoltre si deve possibilmente individuare una zona caratterizzata da una strozzatura dove posizionare lo sbarramento, così da rendere più economico possibile il rapporto terra/acqua, e cioè il rapporto tra il volume della diga e la capacità d'invaso.

Nel caso di uso irriguo inoltre la zona d'invaso deve essere poi ubicata in situazione prevalente rispetto al terreno che dovrà essere irrigato, onde evitare o limitare il pompaggio che renderebbe costosa la gestione della irrigazione.

Infine in ambiente appenninico è importante che la superficie del bacino imbrifero sia ricoperta di vegetazione in modo da ridurre al massimo l'erodibilità e la franosità anche al fine di contenere i trasporti solidi operati dalle acque, che porterebbero rapidamente ad un interrimento del lago.

Figura 3.3.2: Lo schema mostra il posizionamento di un bacino collinare nell'ambito di un bacino imbrifero. Il bacino è a scopo irriguo e viene indicata la zona irrigata a valle del laghetto. Sistemi di questi piccoli bacini, opportunamente posizionati, possono essere utili nella laminazione delle piene. Rispetto ad altre soluzioni hanno un basso impatto sul territorio e costi di costruzione e gestione più contenuti. In ambiente appenninico inoltre, data l'instabilità dei versanti e le scadenti caratteristiche geotecniche dei terreni possono rappresentare l'unica alternativa a serbatoi di maggiori dimensioni.



Generalità

I diversivi e gli scolmatori sono manufatti che sottraggono una parte della portata di piena ad un corso d'acqua avviandola verso un altro recipiente o restituendola più a valle nel medesimo corso d'acqua.

I termini diversivo e scolmatore generalmente vengono usati indifferentemente anche se a volte vengono fatte delle distinzioni secondo criteri non però condivisi da tutti.

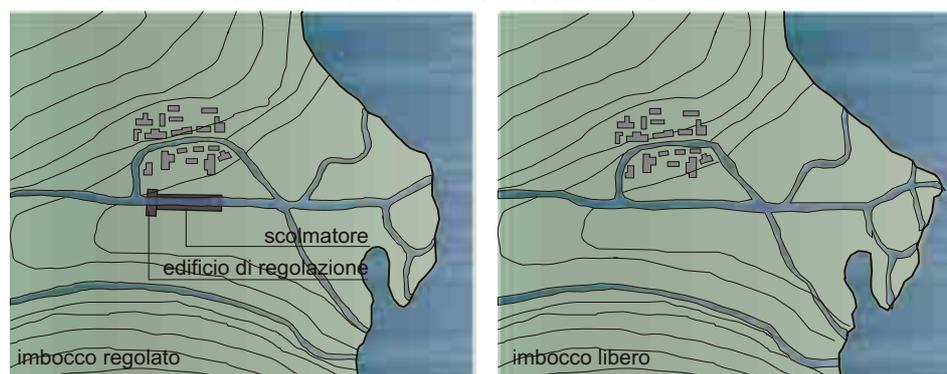
I canali scolmatori vengono più frequentemente usati nelle parti medio-basse del bacino e sono opere tecnicamente meno impegnative delle casse di espansione. A differenza di queste ultime, le modifiche sul regime delle portate possono però provocare problemi di sovralluvionamento a valle della derivazione a causa della diminuzione della velocità dell'acqua con conseguenti rischi di esondazione nelle aree che si devono proteggere.

scolmatore o diversivo con scarico in un recipiente

Figura 3.4.1: Nella figura sono riportati gli schemi possibili per gli scolmatori.



scolmatore o diversivo con restituzione allo stesso alveo



Descrizione e Caratteristiche

Gli scolmatori hanno generalmente all'imbocco una soglia fissa, talvolta regolata con paratoie. La soglia fissa assicura la massima affidabilità di funzionamento ma quella presidiata permette una migliore regolazione della ripartizione delle portate. E' interessante notare come l'utilizzo di uno scolmatore con l'imbocco regolato consenta di regolare piene con portata anche maggiore rispetto alla somma di quella derivabile e di quella massima tollerata a valle.

Se lo scolmatore viene attivato con un congruo anticipo rispetto al passaggio dell'onda di piena è infatti possibile tenere a disposizione a valle, tra la derivazione e la sezione più critica, un volume d'invaso che comincerà ad essere occupato solo quando lo scolmatore non sarà più in grado di incrementare la propria portata derivata.



Figura 3.4.2: Opera di presa dello scolmatore sull'Arno a Pontedera, due giorni dopo l'evento alluvionale dell'8 Ottobre 1993.



Figura 3.4.3: Foto aerea dello scolmatore sull'Arno a Pontedera.

Generalità

L'attività umana o semplicemente la presenza di insediamenti comportano, in genere, consumi di acqua che generalmente deriva da pozzi. Le acque sotterranee sono la principale fonte di approvvigionamento per usi idropotabili e devono essere adeguatamente difese sia qualitativamente dagli inquinamenti, sia quantitativamente favorendo l'infiltrazione nel sottosuolo (garanzia di deflussi di magra nei corsi d'acqua, campi di infiltrazione). Al contrario, in certe zone di pianura a debole pendenza o con difficoltà di drenaggio, la falda deve essere depressa mediante canali di bonifica che recapitano in vasche da cui impianti di idrovore provvedono al sollevamento per l'immissione nei corsi d'acqua naturali.

Figura 4.0.1: Veduta aerea della bonifica di Pordello del 1949.



Figura 4.0.1: Sistemazione della sponda di un canale di bonifica (1939).



Generalità

Col nome generico di bonifica si indica il complesso di quei lavori che si eseguono allo scopo di rendere coltivabili e salubri vaste aree altrimenti improduttive e malsane a causa di scarso drenaggio e conseguente ristagno delle acque. Ci sono due modi per eseguire le bonifiche:

- per prosciugamento;
- per colmata

La bonifica si fa per prosciugamento, quando si raccolgono le acque di cui il terreno è imbevuto o coperto, e si recapitano entro un alveo naturale (fiume, laguna, mare) cui si dà il nome di "recipiente" o "ricevente".

La bonifica si fa per colmata quando, per mezzo dei depositi alluvionali di acque limose deviate da un corso d'acqua naturale, si rialza la superficie del suolo depresso e paludoso, in modo da rendere possibile il drenaggio e la sistemazione.

I canali dei sistemi di bonifica si estendono su aree molto vaste e, a causa della morfologia pianeggiante delle zone in cui si sviluppano, il loro tracciato deve essere accuratamente studiato in relazione alle relative condizioni di pendenza, ed al punto di sbocco dei singoli canali nei canali maggiori, e del collettore principale nell'alveo ricevente.

Figura 4.1.1: Canale del sistema di bonifica di Mantova.



Bonifica per prosciugamento

Questa si compie essenzialmente costruendo una rete di canali di scolo, che seguono le linee più depresse del terreno, e man mano confluiscono, sino a recapitare le acque in un collettore principale, che le allontana dalla zona bonificata, e le scarica nel recipiente. La rete presenta quindi procedendo dal basso verso l'alto:

- il canale primario (collettore principale od emissario) che corre lungo la linea più bassa della zona da bonificare;
- i canali secondari che, dalle singole superfici in cui la zona suddetta è suddivisa, conducono le acque al canale primario;
- i canali terziari, che si scaricano nei secondari, o talvolta anche direttamente nel collettore principale e verso monte si dividono man mano in canaletti minori, sino alle ultime ramificazioni, costituite da semplici fossetti a fior di terra, o da condotti o tubi sotterranei di drenaggio.

Figura 4.1.2: Un canale secondario di un sistema di bonifica.

E' possibile intravedere l'immissione di un canale terziario sulla sinistra della foto. Si tratta del sistema di bonifica del consorzio Polesine-Adige-Canal Bianco in Provincia di Rovigo. Un area dove sono presenti vasti appezzamenti agricoli con coltivazioni che vanno dal mais agli ortaggi.



La pendenza dei canali di scolo segue possibilmente quella naturale del terreno, e diminuisce, col crescere della portata, dai colatori minori ai canali secondari ed al collettore principale. I valori caratteristici di pendenza variano tra 1 per 1000 e 0,05 per 1000 a seconda dell'ordine dei canali; le velocità medie corrispondenti alla portata massima sono rispettivamente variabili da 0,60 a 0,20 m/s.

Il fondo di ciascun canale deve essere fissato, in relazione alla pendenza ed alla quota del punto di scarico, in modo che il livello massimo dell'acqua sia inferiore al piano campagna almeno di m. 0,40 per i prati, e di m. 0,70 per i terreni a coltura, tenuto conto anche dell'abbassamento cui sono soggette nel tempo le terre prosciugate (il costipamento normale in terreni solidi non torbosi è di m. 0,30-0,50).

La geometria dei canali di scolo generalmente è caratterizzata da una sezione trapezia con larghezza di fondo piuttosto piccola in confronto all'altezza, e scarpe a dolce inclinazione; in tal modo il canale funziona bene sia per scarse quantità d'acqua, quando nei periodi asciutti serve come semplice prosciugatore dei terreni, sia per grandi masse d'acqua quando deve scaricare le acque superficiali del bacino colante, in periodi eccezionalmente piovosi.

Quando il livello dell'acqua del collettore risulta nel punto di sbocco superiore a quello delle acque ordinarie, od almeno a quelle di magra, del ricevente, ma inferiore al pelo delle acque in piena od anche semplicemente abbondanti, in alcuni periodi l'immissione è possibile, ed in altri no. È allora necessario munire lo sbocco di una chiavica, le cui luci devono rimanere chiuse finché si ha prevalenza di altezza delle acque del ricevente rispetto a quelle del collettore.

Le chiaviche di scolo sono costituite da un breve tratto di canale che attraversa l'arginatura del ricevente, ed è terminato da un edificio a paratoie; a paratoie alzate la chiavica permette il deflusso durante il periodo in cui il pelo d'acqua nel ricevente è abbastanza basso, ed a paratoie chiuse essa impedisce il rigurgito nelle campagne delle acque del ricevente stesso.

Se il pelo delle acque nel punto di sbocco del collettore è sempre inferiore a quello delle acque del ricevente, lo scolo non può più aver luogo per semplice azione di gravità, ed è necessario che le acque, condotte in prossimità dell'alveo ricevente, vengano sollevate e poi versate in questo mediante turbine idrovore. Il canale collettore fa allora capo ad una vasca di arrivo.

Figura 4.1.3: Canale terziario di un sistema di bonifica. Caratterizzato dalla tipica sezione trapezoidale e fondo stretto, è stato fotografato in un momento di magra, in cui la funzione che svolge è quella di prosciugamento dei terreni circostanti coltivati a mais.



Descrizione e Caratteristiche

Bonifica per colmata

Per questo sistema di bonifica occorrono i canali di colmata, che portano le acque torbide dal fiume a riversarsi sulla zona da bonificare, ed i canali di scarico i quali raccolgono le acque dopo che abbiano depositato i materiali in sospensione e le riconducono all'alveo da cui furono tolte, od in altro ricevente. La zona da bonificarsi, detta bacino o cassa di colmata, deve essere delimitata con arginature sufficienti a contenere la maggior altezza d'acqua che vi si voglia immettere durante i periodi di piena del fiume. Se il bacino è molto ampio conviene dividerlo in parecchi scomparti da riempirsi in fasi successive del lavoro, e la divisione si ottiene mediante argini interni che servono pure come vie di comunicazione; si bonificano prima i terreni più vicini al fiume da cui si deriva l'acqua, e poi quelli più lontani.

La presa delle acque dal fiume si fa con apposito edificio a paratoie; la velocità dell'acqua nel canale derivatore deve essere sufficiente a garantire che non si verifichino interrimenti prima di giungere sulla zona da bonificare.

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.**

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 5.0.1: 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.



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

Nella seconda metà del secolo scorso si è sviluppata la tecnica di costruire briglie dotate di ampie aperture aventi la funzione di lasciare passare solo il materiale più fine trattenendo il materiale grossolano.

Queste strutture oggi prendono il nome di briglie aperte, mentre in passato venivano anche indicate come briglie selettive o filtranti.

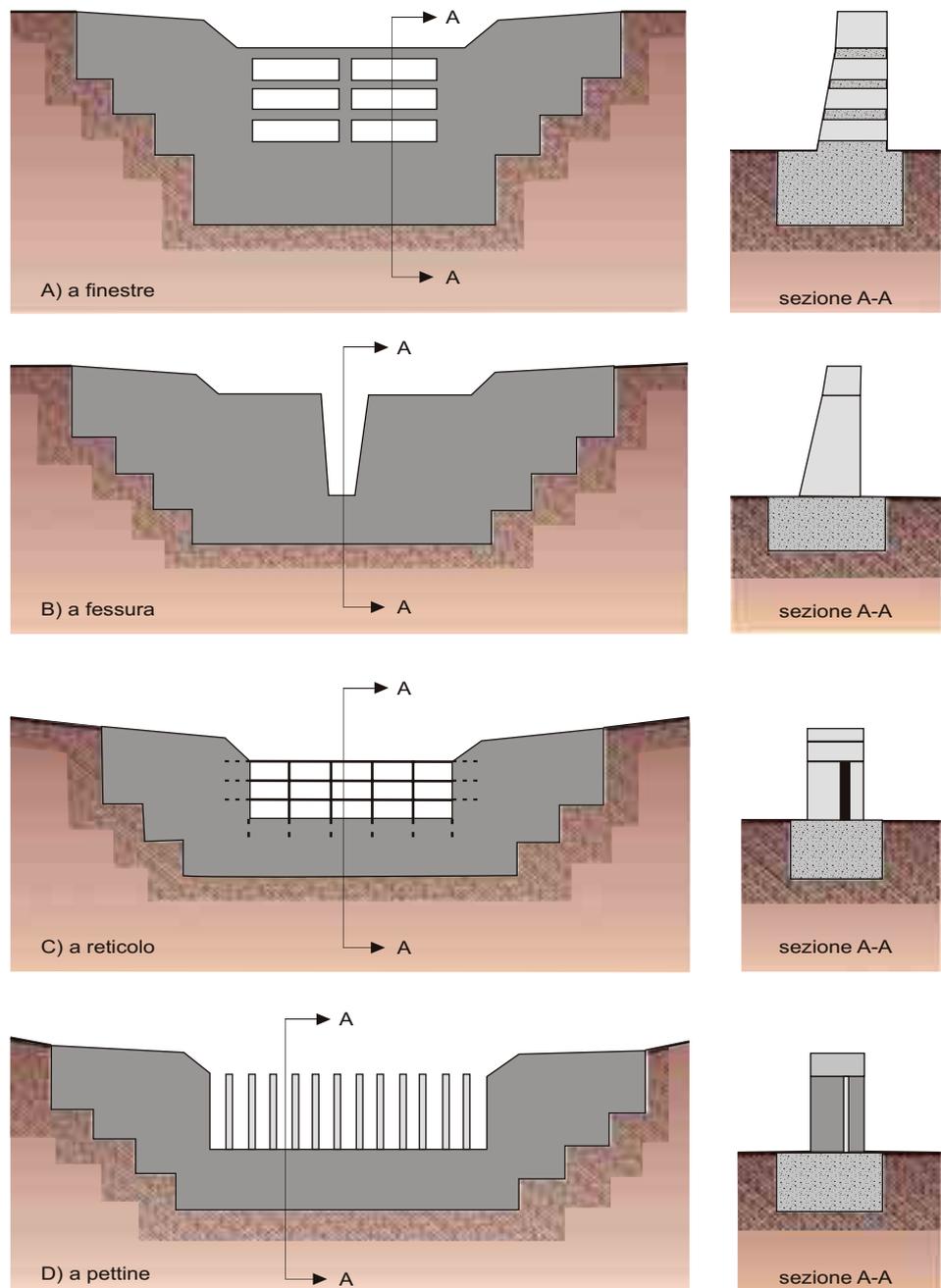
Si distinguono due categorie di briglie aperte: quelle studiate per trattenere il trasporto solido di fondo e quelle impiegate per intercettare anche il materiale flottante.

Figura 5.1.1: Tipologie di briglie aperte:

- a) a finestre
- b) a fessura
- c) a reticolo
- d) a pettine

Hanno la caratteristica di lasciare passare l'acqua trattenendo i sedimenti in carico alla corrente ed il materiale flottante. Le diverse tipologie si adattano a differenti caratteristiche del regime dei corsi d'acqua e del tipo di trasporto solido.

Se ben progettate le briglie per il trattenimento dei sedimenti, vengono ripulite dal materiale più fine dalla corrente stessa nei periodi di morbida.



Briglie per il trattenimento del trasporto di fondo

Ne esistono due tipi: a “fessura” e a “finestre”.

Queste strutture lasciano transitare senza apprezzabile disturbo le portate ordinarie, mentre in occasione delle piene provocano un rigurgito che, rallentando l'acqua, causa la deposizione del materiale di medie grandi dimensioni in carico alla corrente.

Una volta esauritasi la piena, la corrente di morbida asporta il materiale di dimensioni medie e lo ridistribuisce a valle. Questo fenomeno garantisce una efficienza più prolungata delle opere e non altera eccessivamente il bilancio dei materiali trasportati dal corso d'acqua.

Briglie per il trattenimento del materiale flottante

Le cosiddette briglie a “reticolo” ed a “pettine”, hanno il compito di intercettare il materiale galleggiante oltre al trasporto solido di fondo.

Queste briglie consentono di intercettare quei materiali, tronchi e ceppaie che creano così tanti problemi in occasione delle piene in corrispondenza dei ponti e tombini.

A differenza delle opere descritte precedentemente, queste necessitano di una manutenzione immediata, al termine di ogni evento, in quanto vengono completamente ostruite dal materiale intercettato.

Figura 5.1.2: Briglia a fessura.



Figura 5.1.3: Briglia a pettine occlusa dal materiale trasportato.



Descrizione e Caratteristiche

Briglie aperte a finestre (BENINI, 1990)

Sono briglie (vedi strutture di base) il cui corpo è caratterizzato dalla presenza di una serie di aperture rettangolari che hanno il compito di lasciar passare a valle i materiali fini e di trattenere quelli più grossolani. La dimensione della finestra deve essere dell'ordine di grandezza di 1.5-2 volte le dimensioni del materiale più grande da trattenere. Le piene con ingente trasporto solido non devono transitare attraverso le finestre, ma il livello dell'acqua deve innalzarsi sopra la soglia della gaveta. A monte si forma un rigurgito ed il conseguente rallentamento provoca la deposizione del materiale solido.

Nella fase di morbida, il deflusso dovrebbe provvedere al trasporto a valle del materiale solido di minori dimensioni. Nella realtà si assiste spesso al totale intasamento delle luci delle finestre, anche a causa del materiale vegetale

Le dimensioni delle finestre possono aumentare fino ad avere un reticolo di travi di acciaio o calcestruzzo e la briglia viene appunto denominata a "reticolo". In questo caso le dimensioni delle aperture sono tali che il materiale di trasporto solido lapideo passa liberamente nella parte bassa, mentre nella parte alta viene intrappolato il materiale legnoso fluitato. In realtà con il procedere dell'accumulo di tronchi e rami, si crea un ostacolo al deflusso che comporta un rigurgito ed una deposizione della frazione più grossolana del materiale lapideo.

Figura 5.1.4: Esempio di briglia aperta a finestre orizzontali, adatta a trattenere anche materiale di medie dimensioni.



Figura 5.1.5: Briglia aperta a finestre. Il volume disponibile a tergo dell'opera per il trattenimento del trasporto solido è parzialmente riempito e richiederebbe un intervento di manutenzione per ripristinare completamente la funzionalità della briglia. (Valmalenco, SO)



Descrizione e Caratteristiche

Briglie aperte a fessura (BENINI, 1990)

Si tratta di strutture con scopi analoghi a quelli delle briglie a finestre, ma che risultano più efficienti. Sono briglie caratterizzate da una apertura centrale di forma trapezoidale quasi rettangolare. La fessura deve essere dimensionata in maniera opportuna affinché sia soddisfatto un compromesso tra il trattenimento della massima quantità possibile di materiale solido durante la piena e il maggiore svuotamento possibile durante la fase calante della piena.

Per motivi statici le briglie a fessura, che spesso raggiungono altezze rilevanti per consentire l'accumulo di grandi volumi di materiale a monte, sono frequentemente realizzate con la tipologia a contrafforti, ove la trave orizzontale aggiunge stabilità alle due pareti della briglia essendo lo spessore contenuto in 0:60 m con altezza massima di 9 m circa.

La necessità di fermare materiali di grandi dimensioni e di lasciar defluire a valle i materiali trasportati dalle piene ordinarie può indurre ad aumentare le aperture in numero e dimensioni fino ad eliminare del tutto la parete piena, eventualmente sostituita da robusti profilati o tubi di acciaio rimovibili nel caso si debba consentire l'accesso di mezzi meccanici da valle.

Nei casi in cui si prevede l'accesso di mezzi meccanici a tergo della briglia attraverso la fessura, questa dovrà avere una larghezza della base non inferiore a 2.5 m



Figura 5.1.6: Briglia a fessura con contrafforti e traverse. La fessura è dotata di tubolari amovibili di sbarramento e la sua larghezza è definita in modo da permettere l'accesso a mezzi meccanici per lo sgombero dei materiali eventualmente accumulati a tergo (Rio Champeyron, Comune di Oulx, TO).



Figura 5.1.7: Briglia a fessura. La fessura è stata dotata di profilati d'acciaio che non fanno filtrare neanche il materiale di dimensioni medio piccole. Si osserva il rivestimento con scogliera del tratto d'alveo immediatamente a valle della briglia, per evitare l'erosione della corrente.



Figura 5.1.8: Briglia a fessura rettangolare con barre trasversali in profilato di acciaio smontabili da valle per permettere l'asporto del materiale solido in accumulo.

Si osservi il paramento di valle rivestito in pietrame locale per migliorare l'impatto visivo della struttura. Sulla sinistra della foto inoltre si può vedere un muro d'ala con funzione di protezione della sponda a valle della briglia. (Comune di Lucca)

Descrizione e Caratteristiche

Briglie a pettine (BENINI, 1990; DEYMIER et al., 1995)

In questo tipo di opere il corpo della briglia è completamente scomparso e viene sostituito da elementi tubolari o putrelle in acciaio, verticali, incastrati nella fondazione in calcestruzzo.

Sono utilizzate con lo scopo principale di trattenere materiale vegetale di grandi dimensioni e devono ovviamente essere mantenute pulite, pena il decadimento della funzionalità.

I singoli elementi di queste strutture possono essere soggetti a momenti flettenti molto elevati, considerando che la briglia si può riempire completamente e che mancano elementi orizzontali in grado di assorbire parte della spinta.

Per tale ragione questo tipo di struttura è poco adatto nel caso in cui si preveda che possano essere interessate dall'impatto di colate detritiche.

Figura 5.1.12: Negli schemi sono mostrate alcune tipologie di briglie a pettine. Le putrelle verticali possono essere immorsate alla base nel calcestruzzo o possono essere fissate a due putrelle trasversali. In questo tipo di opere i punti più sollecitati, che vanno dimensionati con attenzione, sono le zone di immersione delle putrelle nel calcestruzzo.

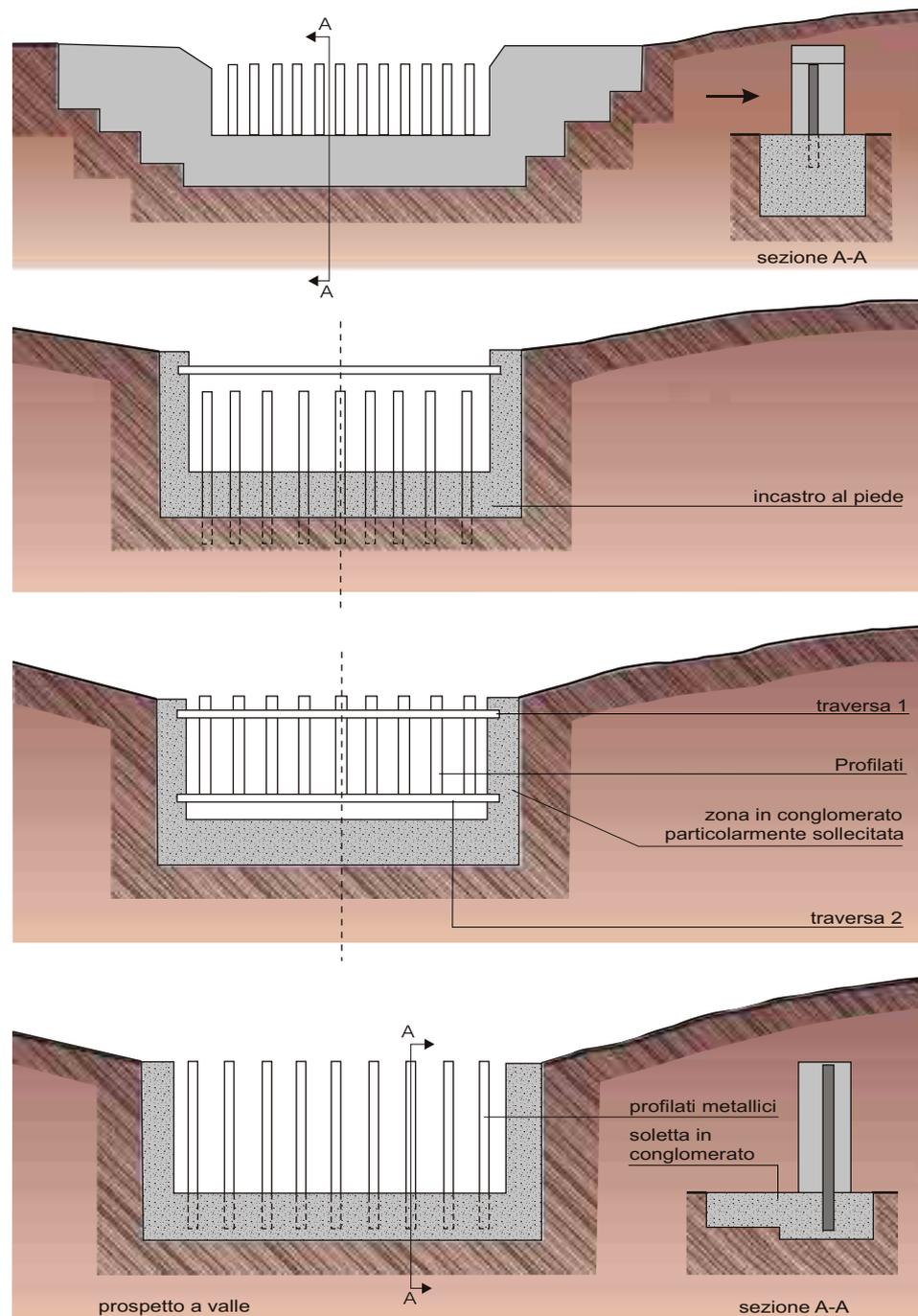


Figura 5.1.9: Briglia a fessura con controbriglia. Fiume Plima (Val Martello BZ).



Figura 5.1.10: La foto mostra il comportamento di una piccola briglia a pettine in occasione di una piena. Il materiale legnoso si accumula a ridosso delle putrelle e l'acqua passa oltre. Se la briglia però viene completamente occlusa l'acqua è costretta ad aggirare l'opera con il rischio di scalzamento o di esondazione. Quando è possibile, in opere di piccole dimensioni, si può intervenire ad asportare il legname per mezzo di escavatori operando dall'alto.



Figura 5.1.11: Le briglie a pettine sono impiegate soprattutto nei torrenti, dove il trasporto solido flottante può essere abbondante a causa delle caratteristiche dei bacini montani. In certe situazioni però le briglie a pettine possono venire impiegate anche nei grandi fiumi di pianura. E' questo il caso in cui sia necessario proteggere delle opere quali ad esempio le casse di espansione o i ponti. (Briglia a monte di una cassa di espansione lungo il Secchia)



Generalità

Questo dispositivo si presta ad arrestare il movimento verso valle dei materiali solidi, lapidei e vegetali, trasportati anche sotto forma di colate detritiche o fangose. Si tratta di aree a bassa pendenza ricavate in tratti in cui la sezione del corso d'acqua si allarga: la diminuzione di velocità della corrente provoca il deposito del materiale trasportato o l'arresto delle colate detritiche. Se non è disponibile una varice naturale è possibile ricavare il bacino di accumulo del materiale solido scavando o realizzando degli argini di contenimento.

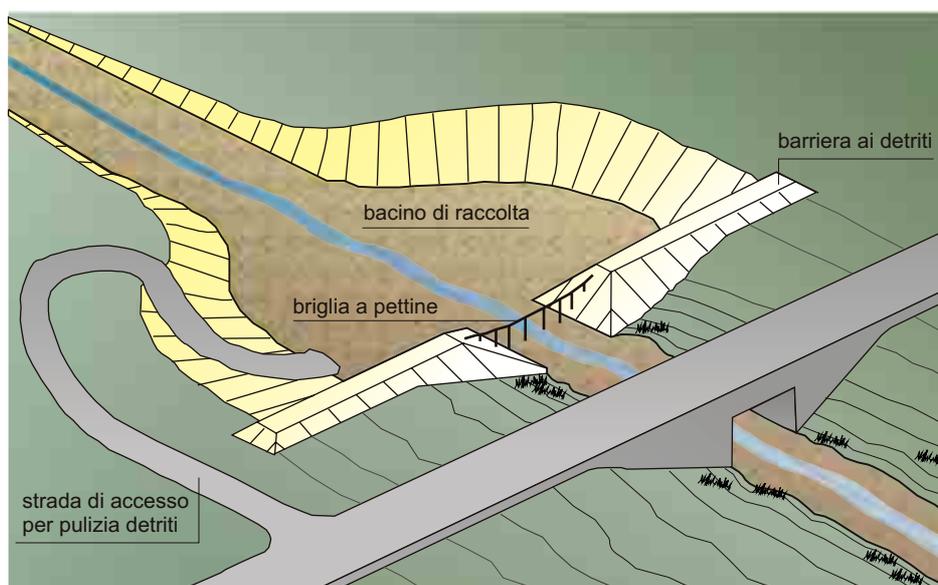


Figura 5.2.1: Schema di piazza di deposito realizzata in scavo.



Figura 5.2.2: Piazza di deposito con creazione di una zona umida. Rio Anteselva (BZ)

A valle della piazza di deposito si pone una struttura trasversale con funzione di trattenuta: una briglia a fessura o a pettine; la configurazione così realizzata consente il passaggio dell'acqua e dei sedimenti più fini in condizioni di deflusso normali, mentre impedisce il transito dei materiali più grossolani e delle colate in occasione degli eventi estremi.

Il mantenimento dell'efficienza di queste opere dipende strettamente dalla manutenzione: devono essere periodicamente svuotate, preferibilmente dopo ogni evento grave, altrimenti riempiendosi dei sedimenti perdono di capacità d'invaso, vengono scavalcate e possono causare anche delle esondazioni. A monte della piazza di deposito si può realizzare una briglia che svolga la duplice funzione di rallentare ed indirizzare la corrente o la colata prima dell'immissione all'interno del bacino, in tal modo si riduce l'erosione e si riduce il rischio di by-pass dell'opera.

Per ridurre ulteriormente la velocità della corrente e favorirne l'espansione all'interno della piazza di deposito, si possono realizzare delle briglie o dei setti in terra compattata con una fessura al centro che lasci defluire l'acqua in condizioni normali.

Figura 5.2.3: Briglia a fessura con barre trasversali posizionata in maniera da costituire uno sbarramento e creare a monte della stessa una ampia piazza di deposito per l'accumulo del detrito. Si osservi il paramento di valle rivestito in pietrame locale per migliorare l'impatto visivo della struttura.

La briglia aperta e gli eventuali argini che possono essere soggetti ad impatto da parte delle colate dovranno essere dimensionati tenendo conto degli effetti dinamici dovuti alla spinta della massa di materiale in rapido movimento e dovranno avere forma ed altezza tali da impedirne lo scavalcamiento. Il bacino della piazza di deposito invece dovrà avere un volume d'invaso sufficiente ad invasare il quantitativo di materiale solido mobilizzabile in occasione almeno di un singolo evento con adeguato tempo di ritorno e dovrà essere dotato di una strada di accesso per i mezzi che devono eseguire le manutenzioni periodiche.



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).

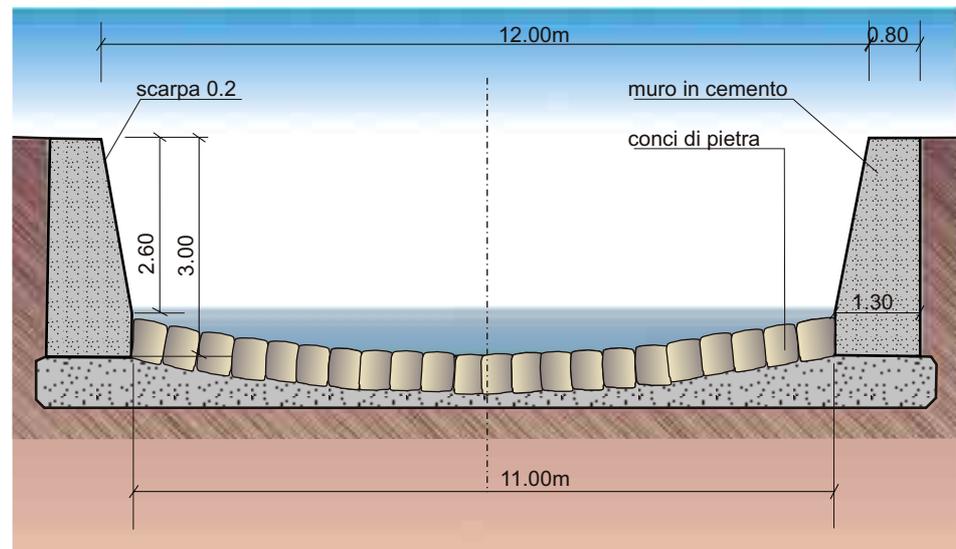


Figura 5.3.2: Nello schema a fianco è raffigurato un cunettone con muri di sponda e fondo in calcestruzzo rivestiti in pietrame. Il pietrame oltre a migliorare l'impatto visivo dell'opera ha la funzione di proteggere il calcestruzzo dall'abrasione e dagli urti dovuti al materiale, anche di grosse dimensioni,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

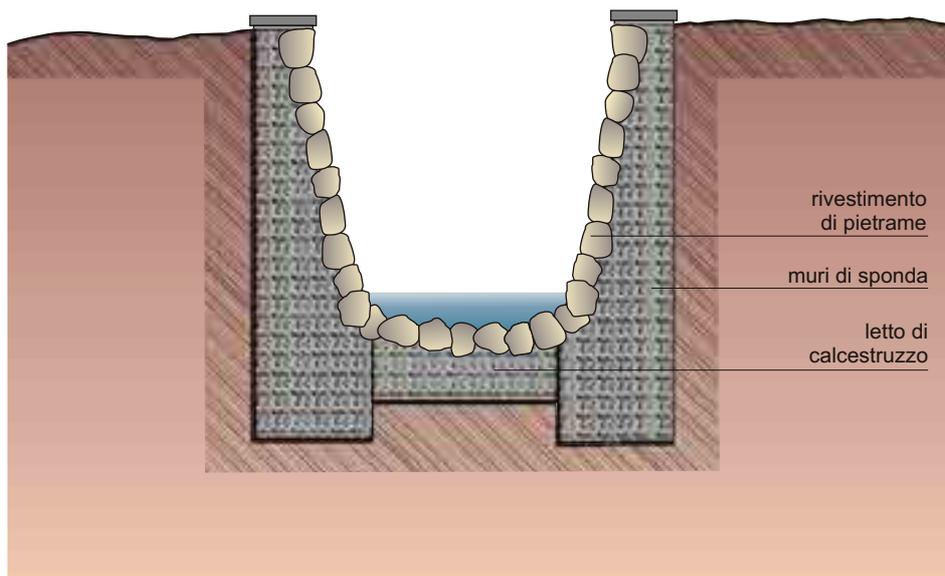


Figura 5.3.3: La foto riprende un cunettone in pietrame, a sezione trapezoidale, realizzato in prossimità di un attraversamento di una strada, in corrispondenza di un tributario del fiume principale.



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.



La pendenza di correzione dei torrenti

L'esistenza di grandi variabilità tra un anno e l'altro dei processi idrologici, a scala di bacino, ed idraulici, alla scala del tronco d'alveo, ha portato ad introdurre il termine più realistico di pendenza di correzione, al posto di quello di pendenza di compensazione, riconducendone la determinazione all'ipotesi di Shields

$$\frac{\tau_c}{(\gamma_s - \gamma)D} = \text{cost} \quad (1)$$

in cui:

- τ_c (N/m²) = azione di trascinamento della corrente sul fondo in grado di produrre erosione
- γ e γ_s (N/m³) = peso volumico dell'acqua e del materiale solido
- D (m) = dimensione caratteristica del materiale in condizioni di moto incipiente.

Si definisce pendenza di correzione la pendenza di un alveo in corrispondenza della quale il fondo dell'alveo medesimo si trova in condizioni di moto incipiente.

In tali condizioni valgono le seguenti relazioni:

$$\tau = \gamma \cdot R \cdot i_c = \tau_c \quad (2)$$

$$Q = C \cdot A \cdot \sqrt{R \cdot i_c} \quad (3)$$

dove γ è il peso specifico dell'acqua, R è il raggio idraulico, A è la sezione trasversale bagnata, C il coefficiente di scabrezza di Chezy, i_c è la pendenza di correzione e τ_c è la tensione di trascinamento per cui l'alveo si trova in condizioni di moto incipiente.

Il calcolo della pendenza di correzione richiede che si formulino delle ipotesi sul valore della portata, questa dovrà essere significativa ai fini della modellazione dell'alveo e pertanto viene definita come "portata formativa".

Per la valutazione della portata formativa, sono state proposte numerose opzioni; viene solitamente assunta corrispondente con la portata dominante, o con la portata di modellamento dell'alveo, o con la portata massima annuale di tempo di ritorno di 2-3 anni.

Una volta calcolata la portata formativa è possibile risolvere per tentativi le equazioni (2) e (3) e ricavare la pendenza di correzione i_c .

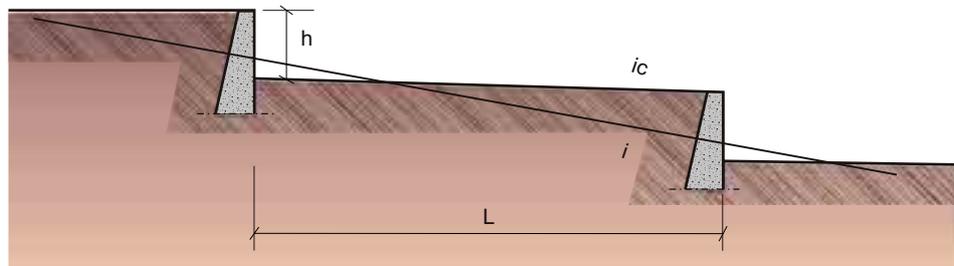
Una volta ricavato questo dato si può procedere alla progettazione dell'intervento di correzione: le opere trasversali vengono dimensionate e distanziate in modo da modificare la pendenza dell'alveo coerentemente con il valore i_c .

Per il calcolo dell'altezza delle opere trasversali e della loro distanza si utilizzano le seguenti espressioni

$$iL = h + i_c L$$
$$h = (i - i_c)L$$

In alternativa si può ricorrere alle numerose formule empiriche esistenti in letteratura.

Figura 6.1.5: Nel disegno sono indicati i parametri geometrici fondamentali utilizzati per il dimensionamento della sistemazione a gradinata: h =altezza fuori terra dell'opera trasversale, L = distanza tra le opere, i_c = pendenza di correzione, i = pendenza naturale dell'alveo.



Le opere trasversali possono essere posizionate:

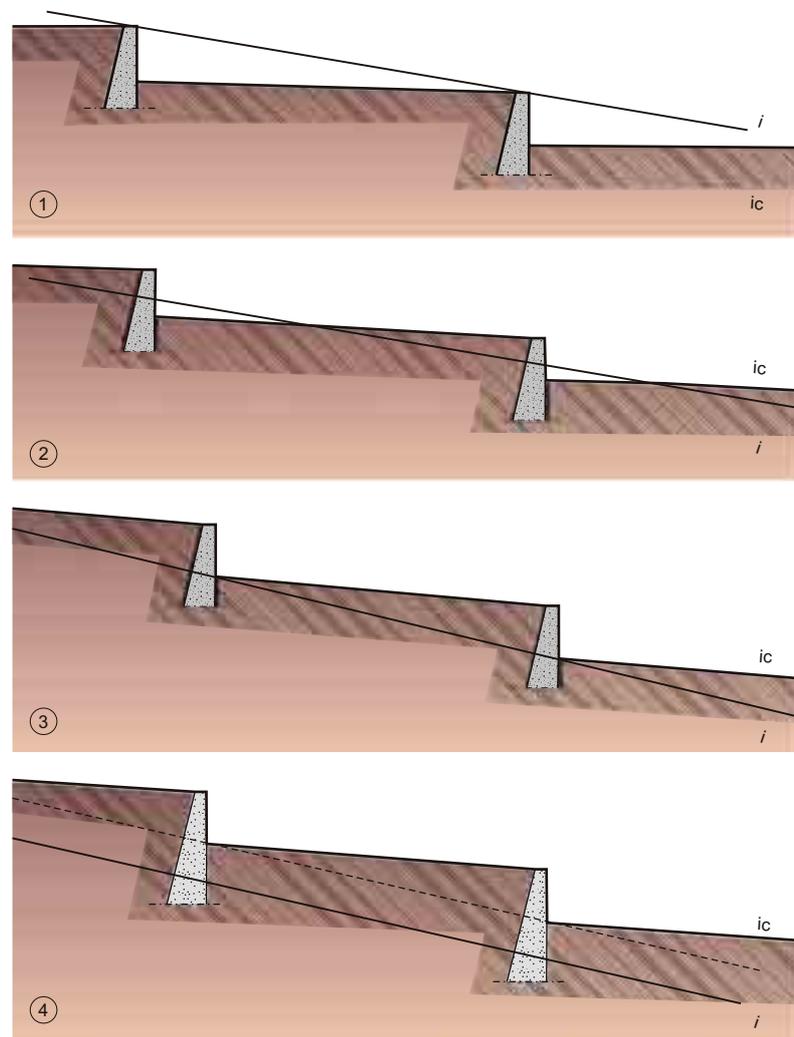
- 1) tutte immerse nell'alveo attuale (soglie di fondo);
- 2) parzialmente sollevate rispetto all'alveo attuale;
- 3) tutte sollevate rispetto all'alveo attuale;
- 4) su nuovo riporto.

La decisione dipende dalla situazione in cui si trova l'alveo rispetto alle sponde, ad esempio se occorre favorire un rialzamento generale dell'alveo, ecc.

Questo tipo di sistemazioni richiede interventi di manutenzione costante per evitare che il collasso di una o più briglie, degradatesi possa portare all'improvviso svuotamento dei materiali accumulatisi con conseguenze anche gravi.

In alternativa alle sistemazioni a gradinata, qualora esista un problema di instabilità localizzata dei versanti, la costruzione di una o due sole strutture permette di creare un sostegno al piede sufficiente per stabilizzare la porzione instabile del versante.

Figura 6.1.6: Le opere trasversali in una sistemazione a gradinata possono essere posizionate in diversi modi rispetto alla quota dell'alveo prima della sistemazione. A seconda della scelta vi saranno effetti diversi in termine di erosione dell'alveo prima di pervenire ad un equilibrio, con conseguenze sulla stabilità delle sponde che vanno attentamente valutate.



Generalità

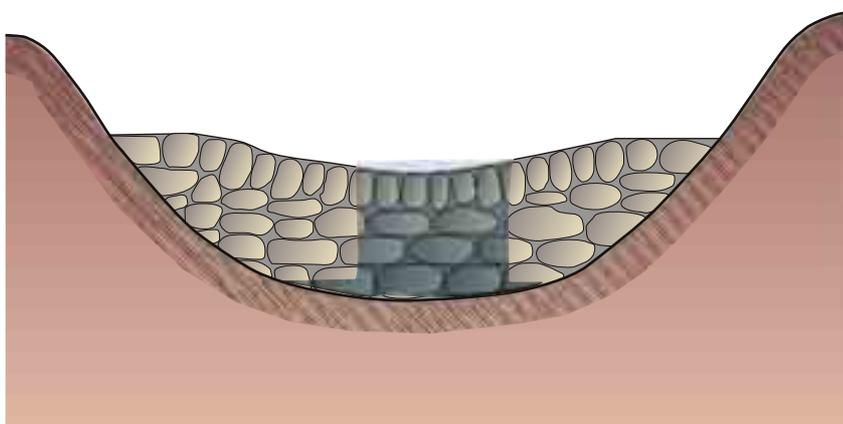
Briglie di consolidamento

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

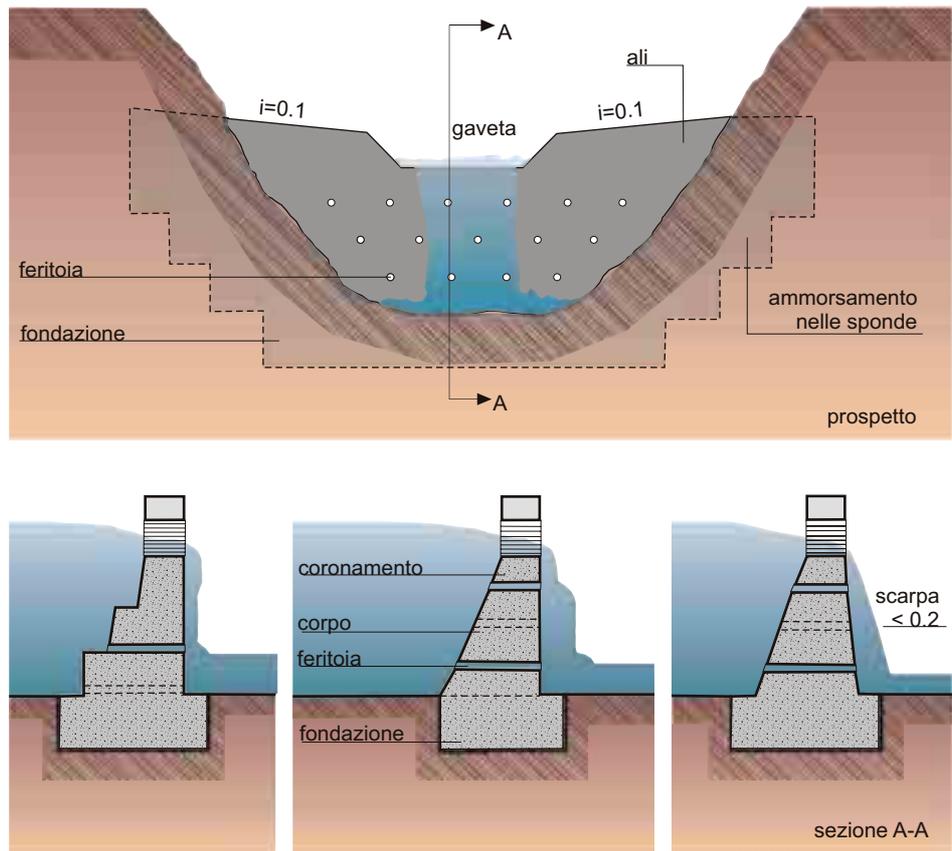
Nella figura seguente (ridisegnato da Benini, 1990) sono riportati prospetto e sezione di una tipica briglia a gravità ad andamento rettilineo. Con riferimento alla figura gli elementi caratteristici di una briglia a gravità rettilinea sono:

- 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.

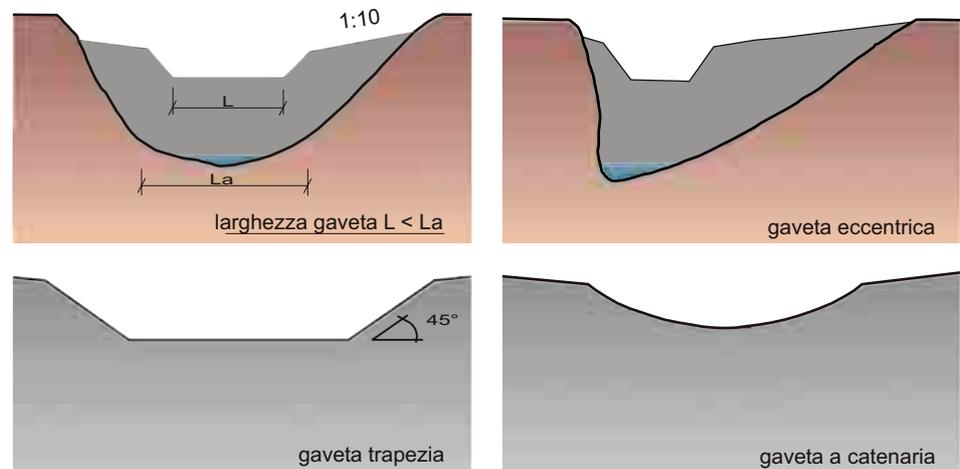
Si osservino inoltre i fori passanti che consentono la dissipazione delle pressioni neutre che altrimenti agirebbero a tergo della struttura.



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 mezzzeria 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).

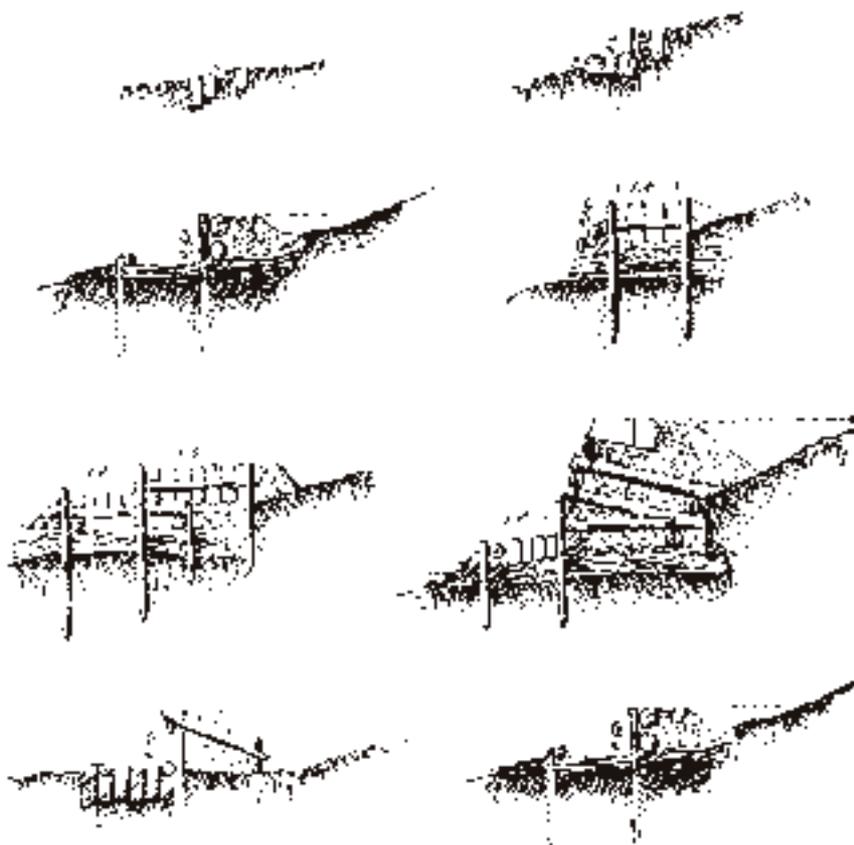


Descrizione e Caratteristiche

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).



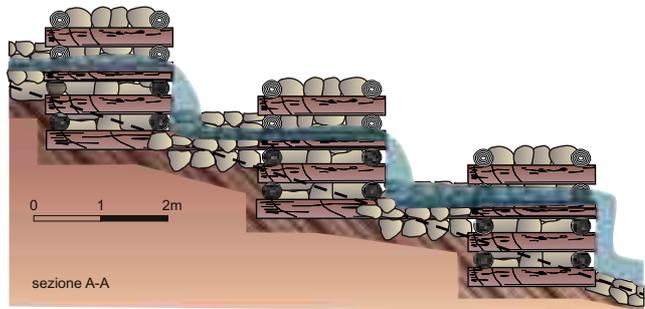
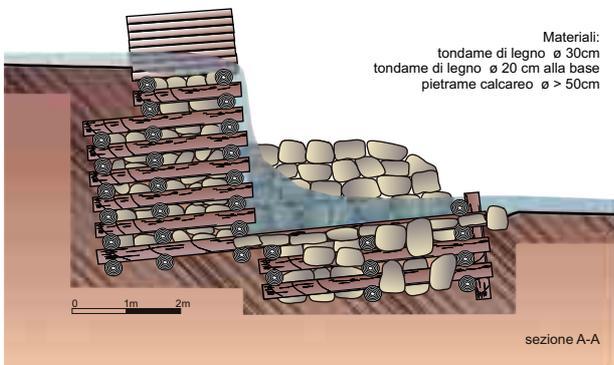
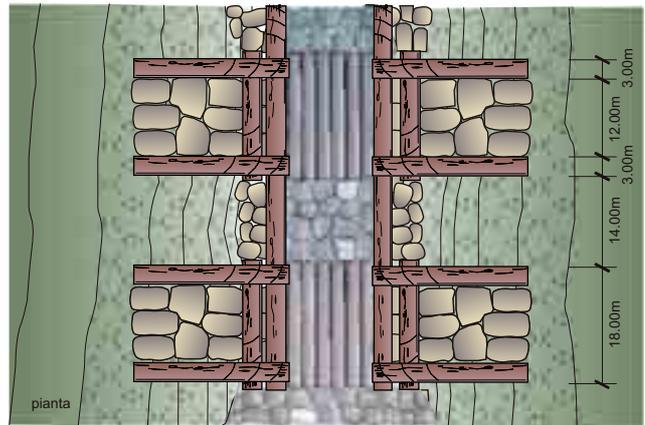
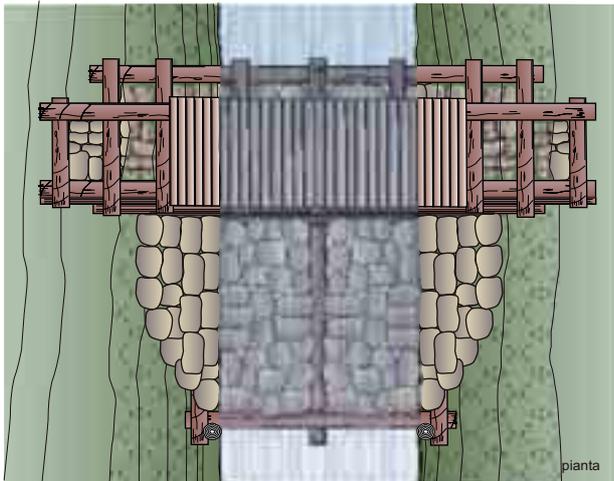
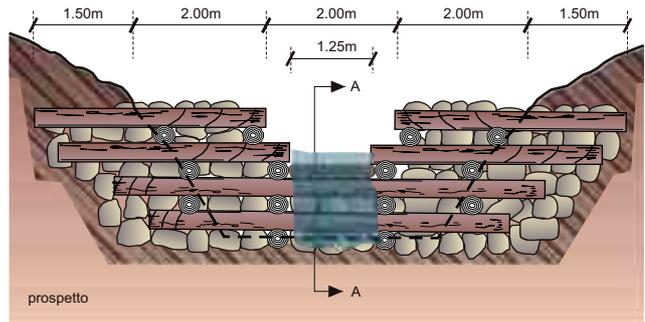
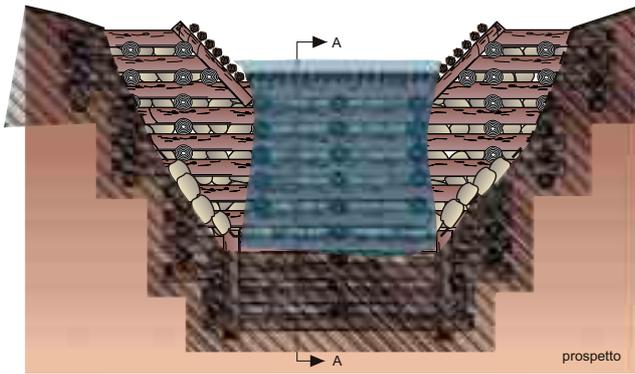


Figura 6.1.15: Schemi che mostrano le diverse viste di una briglia in legname e pietrame. La gaveta è rivestita con piccoli tondame di legno che possono venire sostituiti una volta usurati. Il piede è protetto dallo scalzamento con un cassone in legno riempito e rivestito di pietrame.

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.

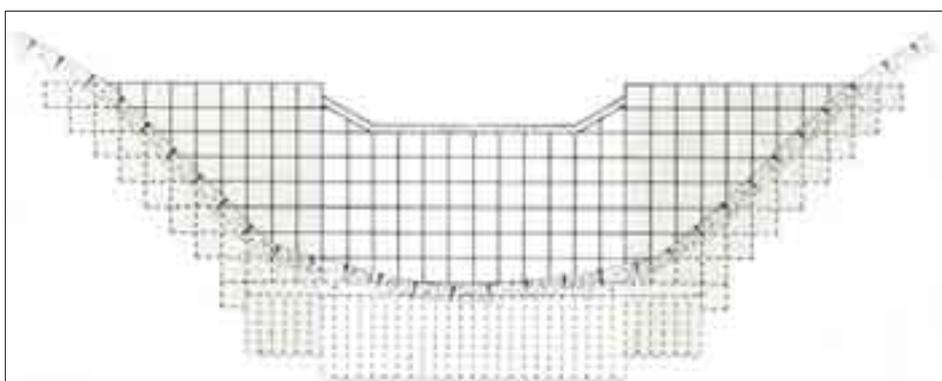
Figura 6.1.19: Schema di una briglia in gabbioni dotata di controbriglia e vasca di dissipazione rivestita con gabbioni di spessore 0.50 m.



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 cuscino 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

Briglie ad arco

Le briglie ad arco a gravità trovano applicazione in caso di alveo stretto ed inciso fra pareti rocciose alle quali la struttura ad arco trasferisce la spinta. Con sponde in roccia compatta e rapporto tra larghezza al coronamento ed altezza $< 3-4$, sono convenienti le briglie ad arco.

Queste strutture in calcestruzzo generalmente sono caratterizzate da un angolo al centro di circa 120° , che può ridursi a 85° per gli anelli più bassi.

La sezione della briglia è trapezia con spessore del coronamento stimato come per le briglie a gravità rettilinee.

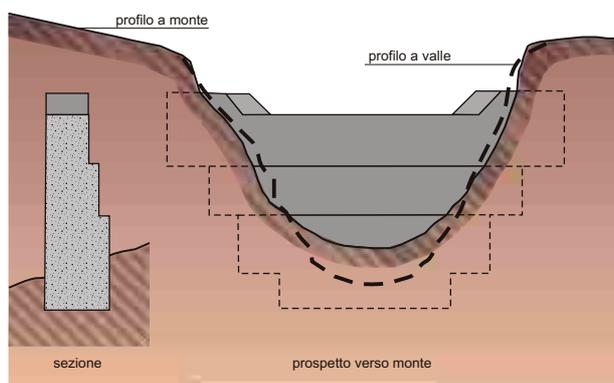


Figura 6.1.23: Viste schematiche di una briglia ad arco. La struttura è costituita da anelli sovrapposti con angolo al centro che diminuisce verso il basso per adattare la struttura alla morfologia dell'alveo in roccia.

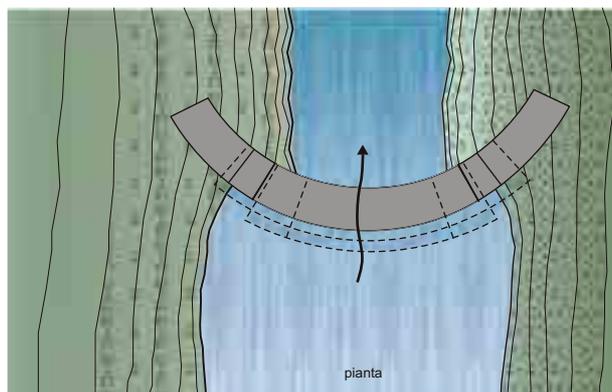


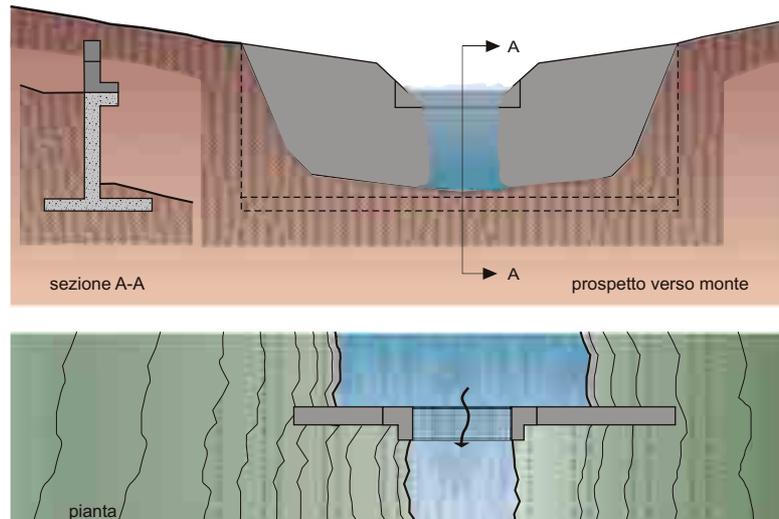
Figura 6.1.24: Briglia ad arco in c.a. rivestita in pietra. Torrente Lamone in comune di Marradi (FI).

Descrizione e Caratteristiche

Strutture auto stabili

Le strutture auto stabili (DEYMIER et al., 1995) sono opere in calcestruzzo armato che in virtù della mensola in fondazione sfruttano il peso del terreno a tergo come contributo alla stabilità. Costituiscono il tipo più conveniente di briglia di correzione in sistemazioni a gradinata per altezze variabili da 3 a 8 m, tenendo conto della convenienza di utilizzare strutture a gravità per le altezze inferiori e tipologie a contrafforti per le altezze superiori. La struttura è utilizzabile anche in caso di terreni di fondazione con scadenti caratteristiche meccaniche, potendo disporre nella fondazione di una armatura adatta a sopportare cedimenti differenziali. Se l'alveo è stretto e l'ammorsamento nelle sponde può essere affidabile, si può ricorrere alla tipologia detta "a piastra".

Figura 6.1.25: Viste schematiche di una briglia autostabile. Questa briglia in cemento armato è caratterizzata dagli stessi elementi geometrici di una briglia a gravità in corrispondenza del coronamento. Il corpo invece è più sottile, essendo la struttura in cemento armato e la stabilità è garantita dalla presenza della mensola posteriore. Si osservi la sagoma della gaveta aggettante a valle per evitare sgocciolamenti sul paramento di valle e per allontanare la caduta dei massi dalla fondazione.

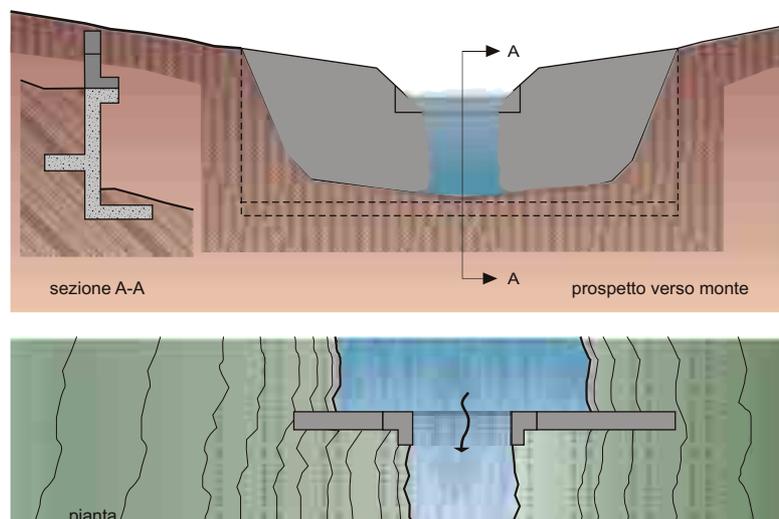


Descrizione e Caratteristiche

Strutture con stabilizzatore posteriore

Le strutture con stabilizzatore posteriore (DEYMIER et al., 1995) sono una tipologia derivata da quella detta "autostabile" interessante nei casi di intervento su versanti instabili perché presenta un ridotto volume della fondazione; grazie alla presenza di uno stabilizzatore che intercetta il cuneo attivo è infatti possibile ridurre significativamente la spinta del terreno a tergo; questa tipologia di briglia consente inoltre di minimizzare lo spessore della parete verticale in quanto si verifica una riduzione del momento all'incastro nella fondazione.

Figura 6.1.26: Briglia in cemento armato dotata di uno stabilizzatore posteriore per contrastare la spinta del terreno. (DEYMIER et al., 1995).



Descrizione e Caratteristiche

Briglie a contrafforti

Le briglie a contrafforti (DEYMIER et al., 1995) sono una tipologia che permette di raggiungere altezze elevate (> 10m). Si hanno strutture con contrafforti a monte o a valle, strutture piene (briglie di consolidamento) o aperte (briglie di controllo delle piazze di deposito). Utilizzando le caratteristiche di resistenza dei materiali, si possono ottenere sensibili riduzioni dello spessore della parete verticale e della fondazione. Si considera che la struttura a contrafforti sia più conveniente di quella autostabile per altezze superiori a 5-6 m, ma richiede, specialmente per altezze di 8-10 m, tempi di realizzazione più lunghi e cantieri più complessi. La struttura aperta con contrafforti a valle è considerata ideale per il controllo delle piazze di deposito permettendo di raggiungere altezze rilevanti e quindi di accumulare ingenti quantità di materiali pur consentendo, attraverso l'apertura, il deflusso della corrente senza raggiungere rilevanti altezze d'acqua.

In questo tipo di opere possono nascere problemi di ingombro nei confronti della lama d'acqua stramazzone dalla gaveta e la necessità di mascheramento per motivi ambientali.

Figura 6.1.27: Le briglie di altezza elevata possono venire realizzate convenientemente secondo la tipologia a contrafforti. La stabilità dell'opera è garantita dalla presenza della mensola e la resistenza interna è ottenuta per mezzo dei contrafforti. Questi ultimi possono essere posteriori od anteriori; la seconda configurazione sarà da preferirsi nel caso di sollecitazioni molto elevate.

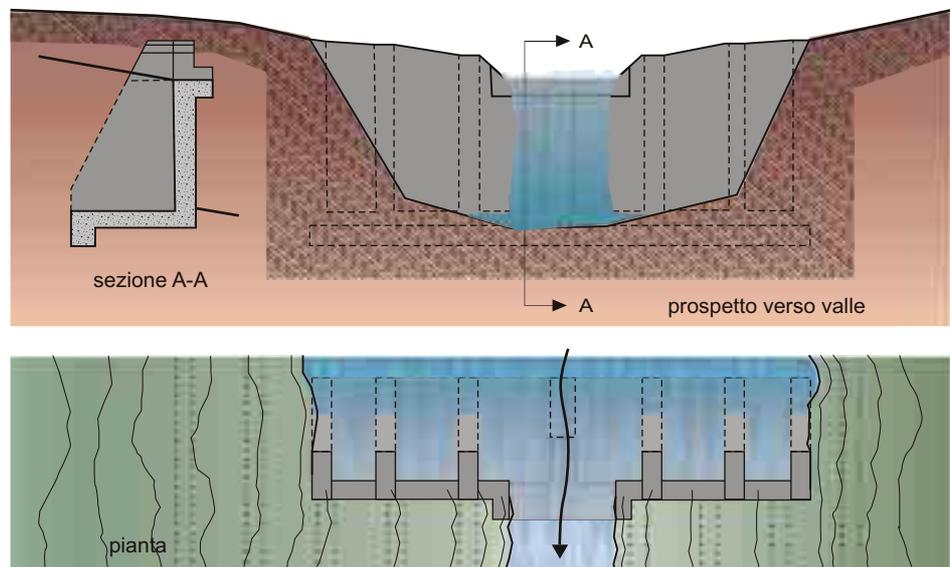


Figura 6.1.28: Esempio di briglia a contrafforti a monte con apertura sbarrata da profilati in acciaio adatta al controllo delle piazze di deposito. I profilati possono essere rimovibili per facilitare lo svuotamento. (T. Champegron, Oulx, TO).

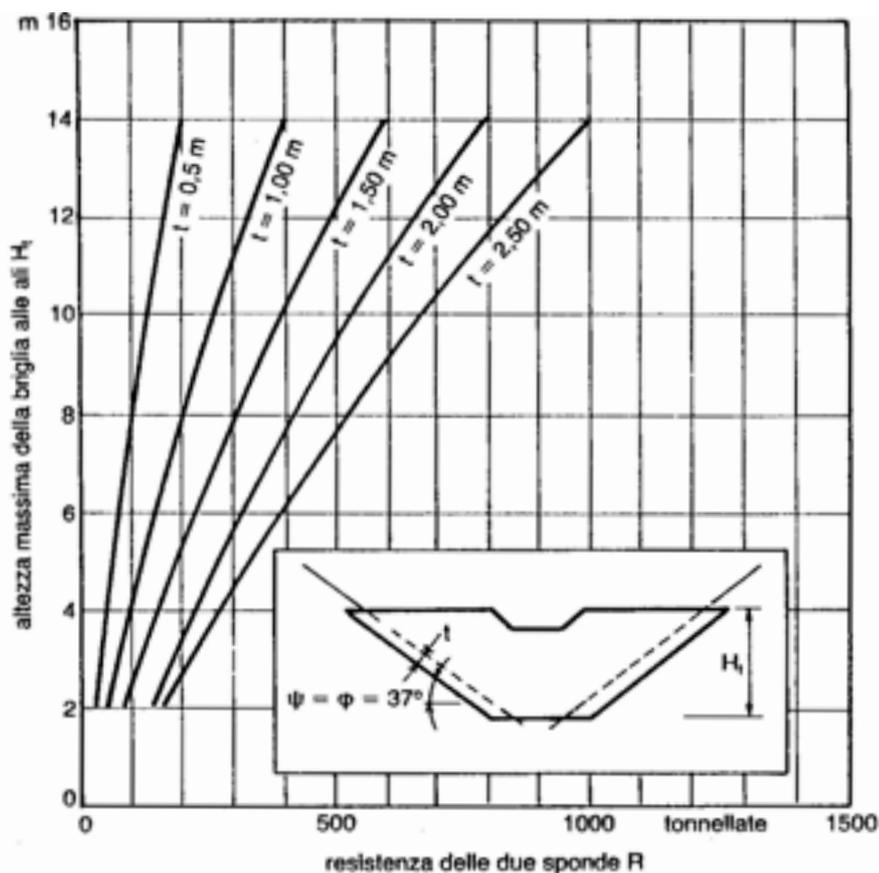


Descrizione e Caratteristiche

Strutture a piastra

Le strutture a piastra (DEYMIER et al., 1995) sono una semplice parete monolitica in calcestruzzo armato (in pratica il solo corpo della briglia senza fondazione) che si regge contando sull'apporto delle sponde. Pertanto è necessaria attenzione per il dimensionamento della gaveta e il funzionamento delle feritoie in quanto la corrente non deve assolutamente entrare in contatto con il versante e la spinta dell'acqua, a regime, deve essere annullata. Con queste precauzioni, la tipologia si rivela economicamente vantaggiosa nei siti con alveo stretto (meno di 8-10 m alla base) e incassati in terreni consistenti: la resistenza passiva che può offrire il terreno in cui si immorsano le spalle dell'opera è il parametro fondamentale per garantire la stabilità dell'opera. La stabilità interna può essere verificata sulla base di uno schema consistente in travi orizzontali appoggiate agli estremi oppure secondo lo schema a piastra.

Figura 6.1.29: Il diagramma consente di definire la resistenza passiva offerta dal terreno in cui si immorsano le ali di una briglia a piastra. La forza stabilizzante dipenderà dalla geometria della briglia e dall'angolo di resistenza al taglio del terreno. (Lichtenhan C.)



Descrizione e Caratteristiche

Briglie in terra

Sono opere di uso antico e particolarmente adatte alla soluzione dei problemi di sistemazione nei torrenti collinari dove, essendo l'alveo scavato in materiali fini e argillosi non si può realizzare un contatto corretto fra un'opera in calcestruzzo e il terreno di fondazione (a meno di costosi interventi di consolidamento e impermeabilizzazione). Vale quindi, come segnala BENINI (1990), il "criterio costruttivo generale che consiglia una sufficiente analogia costituzionale tra l'opera ed il terreno di fondazione". Le briglie in terra risultano particolarmente adatte in queste situazioni grazie ai contenuti valori di pressione che esercitano in fondazione e per la loro capacità di adattarsi ai cedimenti del terreno.

La costruzione di una briglia in terra viene preceduta dall'asportazione del terreno superficiale fino ad arrivare ad uno strato privo di residui vegetali e comunque non meno di 0.50 m di terreno. L'opera viene dimensionata tenendo conto di dover dare al paramento di valle una inclinazione dell'ordine di 1:2 e di 2:3 a quello di monte. La larghezza al coronamento deve essere tale da permettere il transito di mezzi meccanici. La costruzione avviene distendendo strati di terreno di circa 20-30 cm di spessore compattati utilizzando speciali rulli. La granulometria del materiale deve essere controllata per garantire la corretta percentuale di sabbia.

Figura 6.1.30: Tipologia di briglia in terra messa a punto dal Consorzio di bonifica della Val d'Era presso Volterra caratterizzata dallo scivolo centrale rivestito con lastre in calcestruzzo e delimitato da arginelli (da PUGLISI & TRISORIO-LIUZZI, 1992).

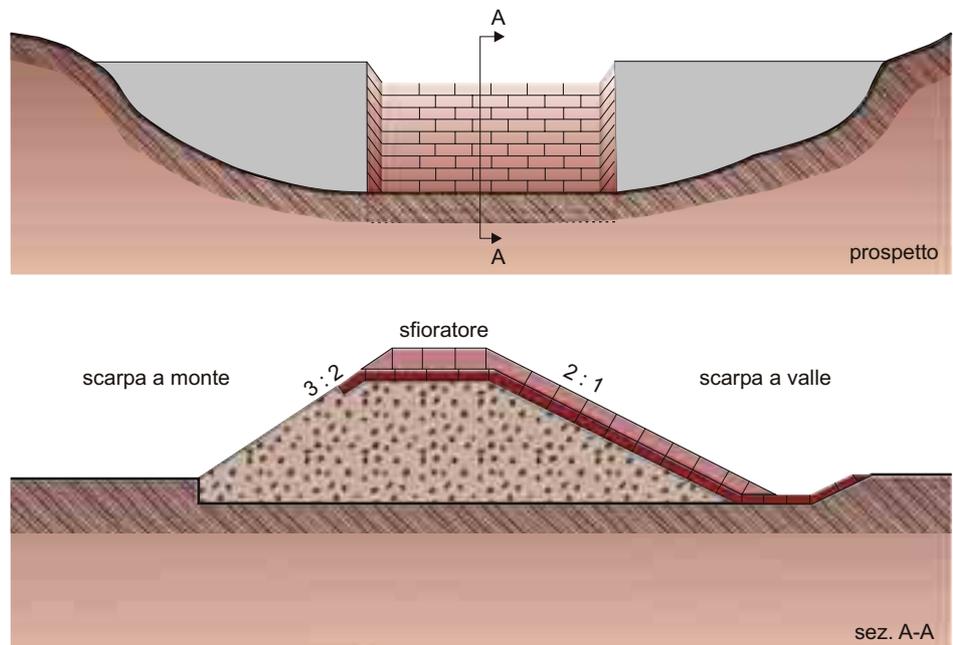


Figura 6.1.31: Esempio di briglia in terra con sfioratore in calcestruzzo. La foto in basso ripresa in un tempo successivo rispetto alla foto sopra, mostra il rialzo effettuato in seguito al riempimento della struttura inferiore. (da Puglisi & Trisorio-Liuzzi, 1992).

Le briglie in terra non possono essere tracimate, perciò devono essere dotate di uno sfioratore sufficiente allo smaltimento della portata di piena, calcolata con ampio margine di sicurezza. Lo sfioratore di tali briglie è costituito da uno scivolo posto al centro della struttura, realizzato disponendo lastre di calcestruzzo prefabbricate, gabbioni in rete metallica a doppia torsione riempiti con pietrame, oppure inserendo una vera e propria struttura in calcestruzzo con muri d'ala e controbriglia. Le briglie in terra si prestano ad essere sopraelevate nel tempo allorché si realizza il completo interrimento del bacino a monte.

Un'altra soluzione adottata per la costruzione di piccole briglie in terra, in tempi recenti, è quella del rinforzo dei terreni. Vengono utilizzati i terreni reperiti in posto, migliorandone le caratteristiche meccaniche grazie all'impiego di rinforzi di vario genere: rete metallica a doppia torsione galvanizzata e plasticata o geosintetici. Anche in questo caso è importante la protezione dall'erosione, che si potrà attuare per mezzo di gabbioni e materassi in rete metallica a doppia torsione, posti sulla gavetta, sul paramento ed al piede. Con questo sistema si ottengono delle strutture molto deformabili, ideali per le applicazioni su terreni argillosi, inoltre è possibile utilizzare il terreno locale adeguatamente compattato rinverdendo completamente la struttura qualora si utilizzi per la protezione dall'erosione un geocomposito tridimensionale posto sul paramento ai lati della gaveta.

Figura 6.1.32: La foto mostra una piccola briglia in terra rinforzata completamente rinverdita costruita su un calanco; la struttura è stata realizzata col terreno stesso del calanco e rinforzata con elementi in rete metallica a doppia torsione a maglie esagonali rivestiti in materiale plastico. Sullo sfondo si vede una briglia in legname e pietrame (calanchi di Canossa)



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.

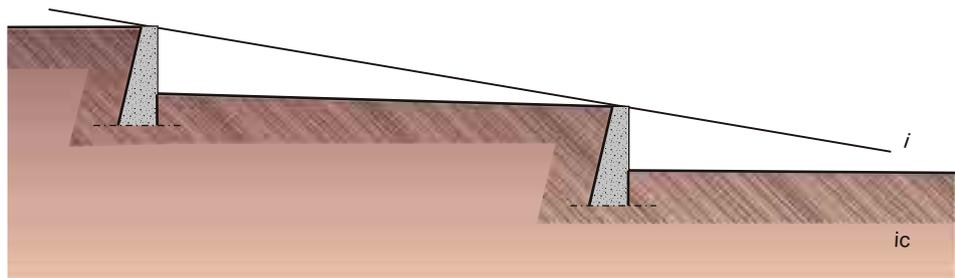


Figura 6.1.34: Piccole soglie in legname e pietrame, utilizzate per fissare la quota di fondo di corsi d'acqua minori. Si può realizzare solo in condizioni in cui sia possibile infiggere i pali di legno nel terreno.

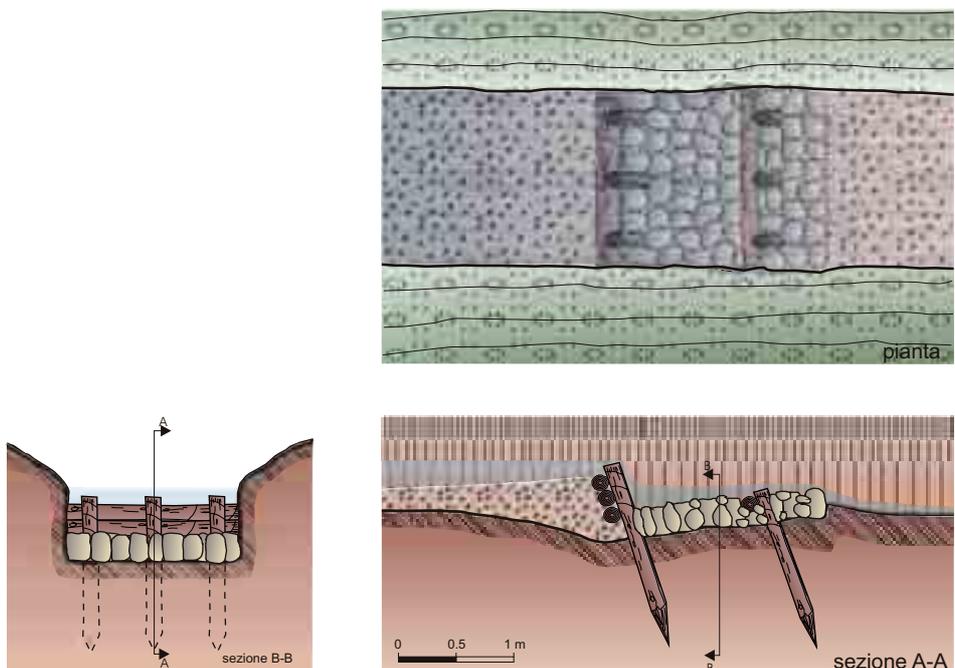


Figura 6.1.35: Sistemazione a gradinata con soglie di fondo nella conoide di un torrente. Il sistema muri di sponda più soglie, impedisce la divagazione laterale del torrente e l'approfondimento del fondo per erosione.



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

I repellenti o pennelli hanno la funzione di favorire la sedimentazione del materiale a ridosso della sponda e mantenere la corrente al centro della sezione. Sono strutture trasversali all'asse del corso d'acqua che, adeguatamente immerse nella sponda, si protendono verso il centro dell'alveo interferendo con la corrente.

L'origine del termine pennello sembra essere tipicamente padana secondo quanto Petrolini (1998) riferisce: «La parola pennello, nella sua accezione più tipicamente padana, quella di «cordonatura di massi disposti lungo le sponde del fiume o ad esso trasversali, usati a riparo della sponda» è già documentata nel latino medievale veronese (a. 1450), poi in italiano dal Grandi (a. 1742) e dal Lecchi (a. 1776).

I pennelli che possono essere realizzati in pietrame da scogliera, in gabbioni, in opere miste di sasso e vegetali, sono delle strutture prismatiche poste trasversalmente alla sponda con l'asse maggiore inclinato nella direzione della corrente, ortogonale alla sponda o inclinato controcorrente.

Queste opere vengono impiegate nei corsi d'acqua nei quali è necessario deviare il flusso della corrente o modificare la sezione dell'alveo al fine di:

- allontanare la corrente da sponde in erosione;
- stabilizzare la morfologia fluviale evitando divagazioni;
- rendere stabili le zone di confluenza dei corsi d'acqua.

I pennelli producono una riduzione della velocità dell'acqua ed un rimescolamento che consentono la deposizione di materiale solido; per tale ragione un'altra applicazione diffusa consiste nella ricostruzione di linee di sponda di fiumi e ruscelli.

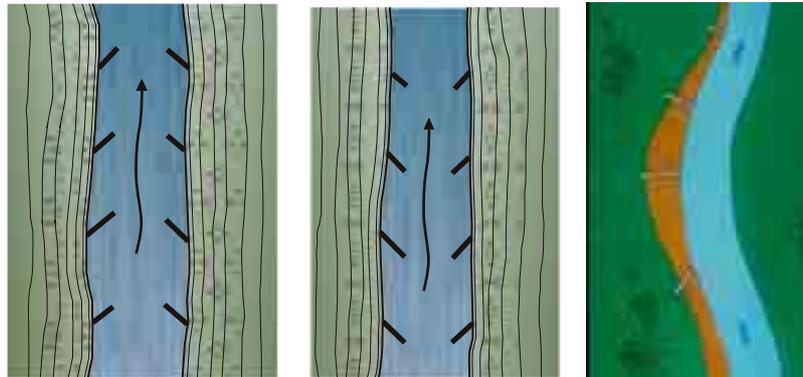
Un esempio tipico di tale applicazione è quello in corrispondenza delle cosiddette "lunate", le ricorrenti erosioni a forma di falce di luna, come quelle riprodotte nella fotografia aerea del tratto di Sangone a Rivalta di Torino dopo la piena dell'ottobre 2000.

Figura 6.2.1: Le "lunate", erosioni a forma di falce di luna, in una fotografia aerea del tratto di Sangone a Rivalta di Torino dopo la piena dell'ottobre 2000. La corrente proviene dall'alto verso il basso della fotografia e si vede chiaramente l'erosione prima della sponda destra, poi della sinistra con la tipica forma a falce di luna. Si osservino anche, le tracce di precedenti erosioni di sponda, ricolonizzate dalla vegetazione, di cui quella in sponda sinistra (sulla destra della foto) di nuovo a chiara forma di lunata. Sulla sponda destra (a sinistra della foto) la profonda erosione, ormai colonizzata da vegetazione d'alto fusto, aperta nella piena del settembre 1981.



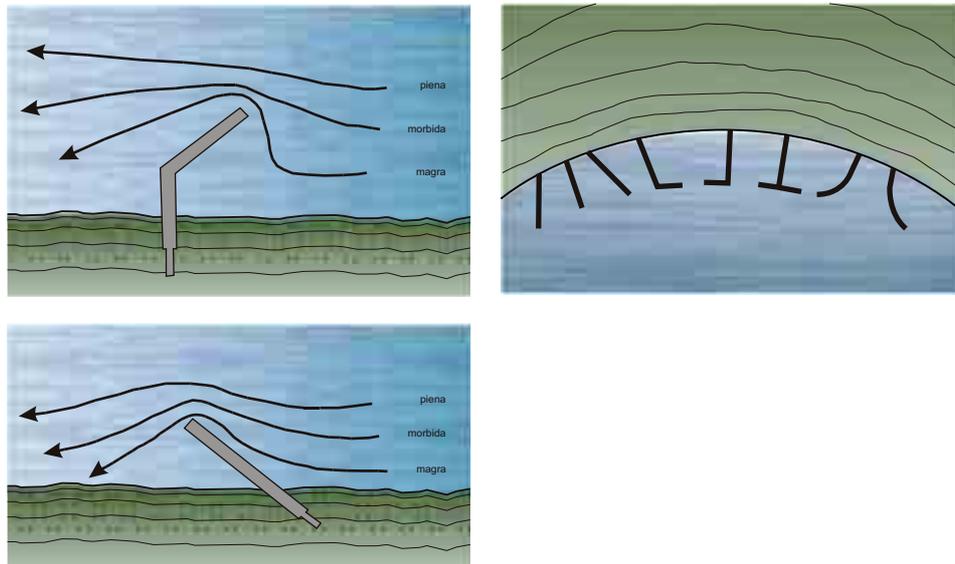
La costruzione di queste strutture deve essere, per quanto possibile, realizzata su entrambe le sponde per evitare dissimmetrie nella corrente con danni alla sponda non protetta eccetto nei casi ove la costruzione di uno o più pennelli ha lo scopo di favorire il deposito di materiali per richiudere una erosione di sponda.

Figura 6.2.2: Schema di disposizione di pennelli su entrambe le sponde (da Jaeggi, 1994). Le teste dei pennelli (ossia la parte più avanzata) invece devono essere allineate lungo una linea immaginaria regolare, pertanto i pennelli possono risultare tutti della stessa lunghezza, nel caso di sponde rettilinee. Avranno invece lunghezze diverse nel caso di sponde irregolari o di lunate conseguenti all'erosione.



I pennelli possono avere forme diverse a seconda delle esigenze: rettilinei, ad L, con la testa a T, con la parte terminale curvilinea (a forma di mazza da hockey).

Figura 6.2.3: I pennelli possono avere forme diverse a seconda delle esigenze. La forma e l'angolatura rispetto alla sponda influenza le linee di flusso della corrente e di conseguenza le modalità della deposizione.



La forma dei repellenti influenza le modalità di deposizione del materiale solido e la distribuzione ed entità dell'erosione in prossimità dell'opera. La scelta della sagoma dei repellenti dipende anche dalle dimensioni caratteristiche del trasporto solido: nei fiumi ampi e caratterizzati da trasporto solido fine, si preferiscono i pennelli del tipo ad hockey, mentre nei corsi d'acqua con trasporto solido grossolano, sono più adatti pennelli rettilinei, corti ed inclinati nel senso della corrente.

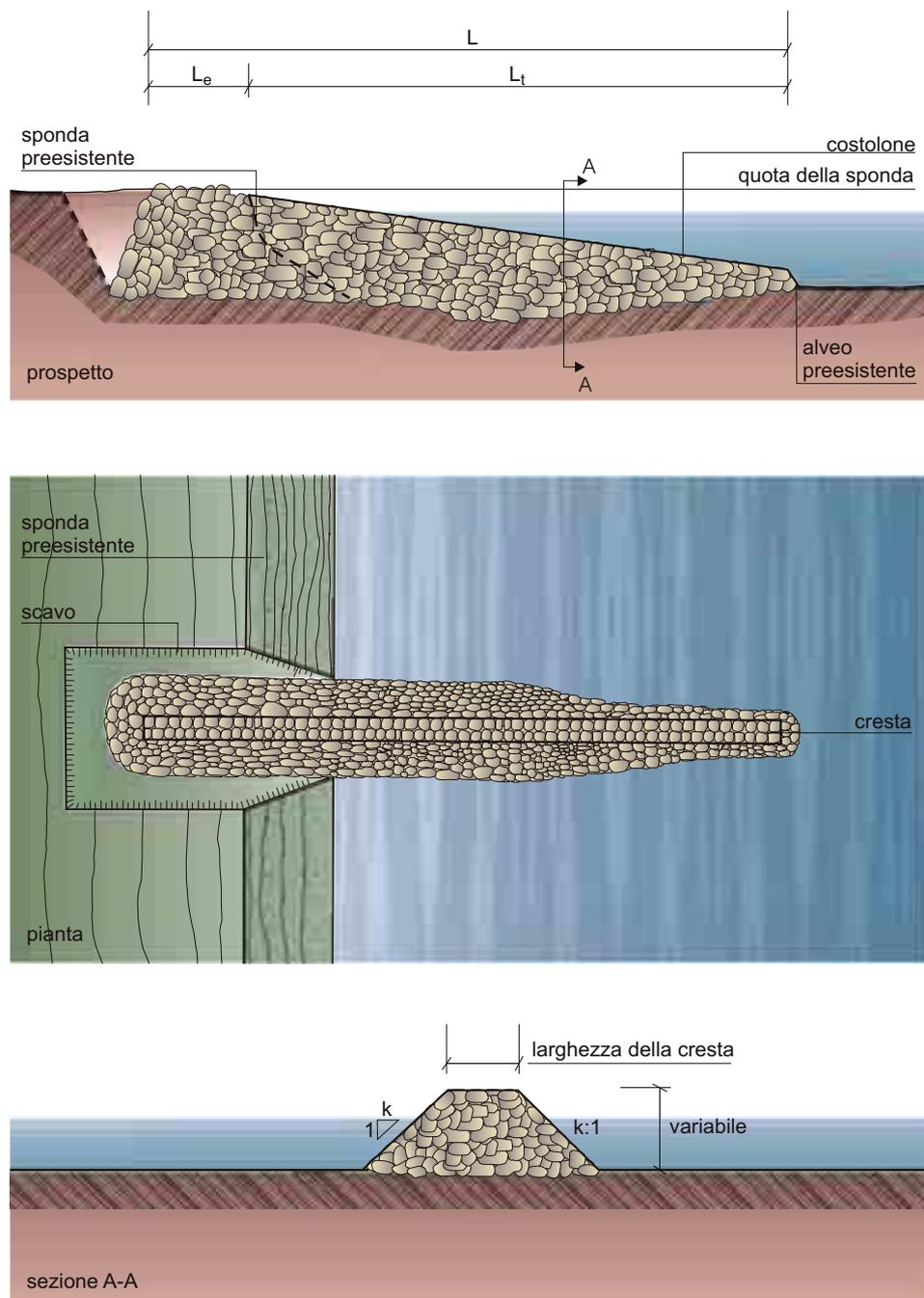
I repellenti causano la formazione delle turbolenze e delle correnti trasversali che, se le opere non sono correttamente dimensionate e posizionate, possono provocare erosioni intense in testa e alla radice delle strutture, nonché sulla sponda opposta.

Per evitare i suddetti problemi e controllarne gli effetti sono necessari un corretto immersione dell'opera nella sponda ed una lunghezza in alveo funzione delle caratteristiche della corrente e della sezione di deflusso.

Le teste dei pennelli (ossia la parte più avanzata) invece devono essere allineate lungo una linea immaginaria regolare, pertanto i pennelli possono risultare tutti della stessa lunghezza, nel caso di sponde rettilinee, oppure avere lunghezze diverse nel caso di sponde irregolari o di lunate conseguenti all'erosione.

La struttura del repellente ha una forma sostanzialmente prismatica, digradante dalla radice alla testa; la quota della radice viene posta al di sopra della quota del pelo libero della portata "dominante" per evitare fenomeni di aggiramento, mentre la quota della testa è posta poco al di sopra del livello di magra per far sì che in occasione delle piene l'interferenza con la corrente non sia eccessiva e di conseguenza non si producano fenomeni erosivi pericolosi. Il dorso del repellente pertanto è di solito inclinato verso la corrente (pendenza tipiche, 0.1 o 0.25). Risulta opportuno che la testa del repellente resti comunque alta circa 0,5 m sul fondo del corso d'acqua.

Figura 6.2.4: Esempio di sistemazione a repellenti circa ortogonali alla corrente realizzata lungo il Rio Ram a Tubre (Alto Adige) dall'Azienda Speciale per la Regolazione dei Corsi d'Acqua e la Difesa del Suolo. Per evitare problemi di aggiramento e scalzamento dei repellenti è necessario rispettare alcune regole nel loro dimensionamento: a sporgenza L_t del repellente dalla linea di sponda generalmente deve rientrare nei limiti $Y < L_t < T/4$ (essendo Y la profondità media della corrente corrispondente alla portata formativa e T la larghezza media della sezione). I pennelli inoltre devono essere opportunamente immorsati nella sponda per una lunghezza L_e raccomandata pari a $L_t/4$ (radice).



La spaziatura fra repellente e repellente deve essere tale da contenere gli effetti dell'espansione teorica della corrente oltre la testa del repellente di monte. Tale espansione avviene entro un angolo 9° - 14° a partire dalla testa del repellente di monte, pertanto la distanza fra i pennelli allineati lungo una sponda rettilinea è dell'ordine di grandezza di $5 \cdot L_t$ (ma può scendere a vantaggio della sicurezza anche a $2.5 L_t$); in curva, la distanza si abbrevia sempre a $2.5 \div 4 \cdot L_t$.

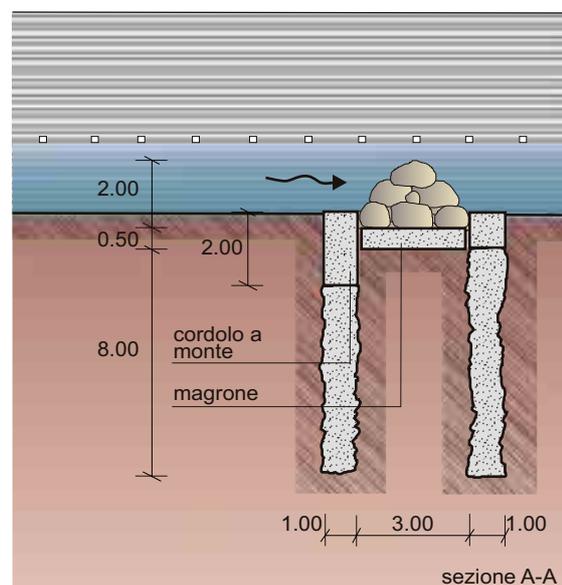
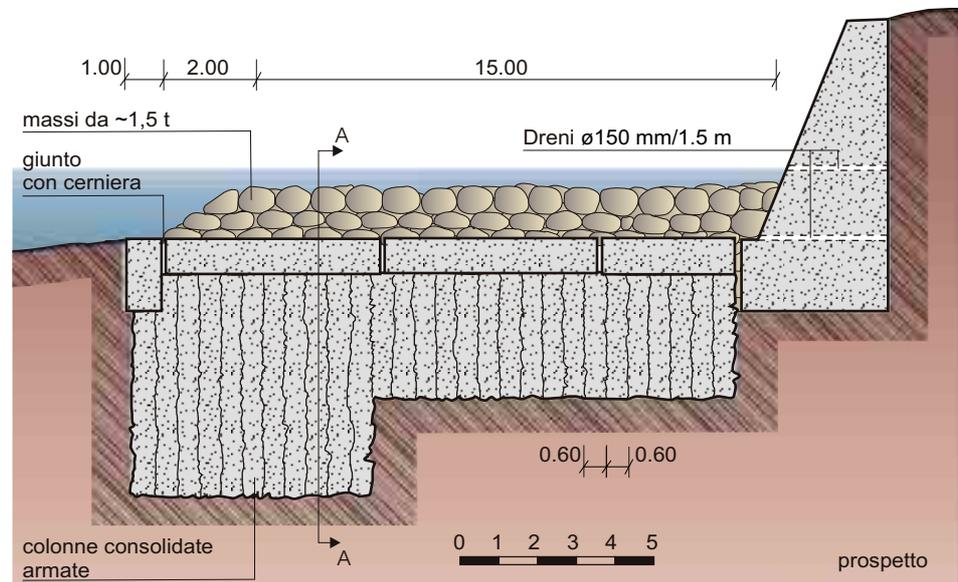
L'inconveniente più grave che può interessare un repellente è l'erosione localizzata alla testa dello stesso. La profondità dell'erosione può essere stimata con alcune relazioni matematiche che devono pertanto essere utilizzate con estrema attenzione in attesa di conferme sperimentali attendibili. Generalmente esse derivano da esperienze e osservazioni in alvei con sedimenti a granulometria fine e non se ne conosce l'applicabilità in alvei con materiali grossolani.

A seconda delle tipologie di pennello si ricorrerà a soluzioni diverse per sottrarre l'opera allo scalzamento ove necessario si potrà anche ricorrere a consolidamenti realizzati ad esempio con colonne di jet grouting.

I pennelli dal punto di vista ambientale offrono vari vantaggi soprattutto se realizzati con sistemi combinati o permeabili alla vegetazione. La presenza di queste strutture consente di creare zone caratterizzate da differenti valori di energia della corrente; in tal modo è possibile creare habitat con caratteristiche diverse e favorire lo sviluppo della biodiversità.

Figura 6.2.5: Esempio di sistemazione a repellenti in un corso d'acqua con problemi di erosione sia delle sponde che del fondo.

In questo caso il pennello composto di grossi massi in pietrame è stato sistemato su una fondazione in c.a. ancorata a sua volta su colonne consolidate (jet-grouting).



Repellenti in blocchi

Si tratta di strutture realizzate in blocchi di roccia, tetrapodi o cubi di calcestruzzo. Sono opere molto deformabili che si possono adattare molto bene ai cedimenti conseguenti a fenomeni di escavazione. Economici, da realizzare anche in presenza d'acqua, possono essere soggetti ad erosione se il materiale utilizzato non è di pezzatura idonea; per evitare che ciò accada la progettazione dovrà seguire gli stessi criteri delle scogliere (vedi relativo capitolo), scegliendo le dimensioni dei blocchi in funzione della forza di trascinamento esercitata dalla corrente.

Qualora fosse necessario incrementare la resistenza della struttura è possibile vincolare i blocchi con funi d'acciaio.

Particolare attenzione andrà posta inoltre alla prevenzione di fenomeni di scalzamento: oltre a seguire regole geometriche descritte in precedenza, si dovrà provvedere ad approfondire la fondazione al di sotto della massima profondità di escavazione prevedibile.

Figura 6.2.6: Immagine di una sistemazione a pennelli in pietrame, ortogonali alla corrente realizzata sul Rio Ram a Tubre dall'Azienda Speciale per la Regolazione dei Corsi d'Acqua e la Difesa del Suolo. E' scelta una soluzione adatta ad un corso d'acqua con trasporto grossolano adottando repellenti corti e ravvicinati.



Descrizione e Caratteristiche

Repellenti in gabbioni

I repellenti costruiti con gabbioni, sono strutture flessibili adatte ad applicazioni in corsi d'acqua privi di trasporto solido troppo grossolano. I gabbioni si prestano molto bene alla costruzione di questo tipo di opere: grazie ai vari tipi di moduli disponibili ed alla possibilità di sagomare gli elementi con facilità è possibile ottenere le strutture della geometria voluta.

Generalmente oltre ai gabbioni si utilizzano dei materassi ponendoli in fondazione; in tal modo si realizza una platea molto flessibile, più espansa in corrispondenza della testa, che ha l'importante funzione di impedire che lo scalzamento possa pregiudicare la stabilità della struttura. La platea di materassi si flette verso il basso a mano a mano che l'erosione procede, impedendo che possa avvicinarsi troppo al terreno di fondazione del repellente.

Questo tipo di struttura, come le altre in gabbioni, offre il vantaggio di una facile colonizzazione da parte della vegetazione in seguito all'intasamento dei sedimenti; in particolare risulta molto vantaggiosa nella ricostruzione delle sponde erose, dove viene completamente inclusa nei sedimenti e colonizzata alla stessa stregua del terreno in cui è immersa.

Figura 6.2.7: Repellente in gabbioni in rete metallica a doppia torsione a maglie esagonali, dotato di platea realizzata con materassi. L'ampia platea impedisce che l'erosione dovuta al disturbo idrodinamico in corrispondenza della testa del repellente possa provocare una pericolosa escavazione. I materassi anche in caso di scalzamento, si flettono verso il basso e proteggono il terreno da ulteriore erosione. Si osservi la sagoma del repellente, caratterizzata da altezza variabile da una estremità all'altra.

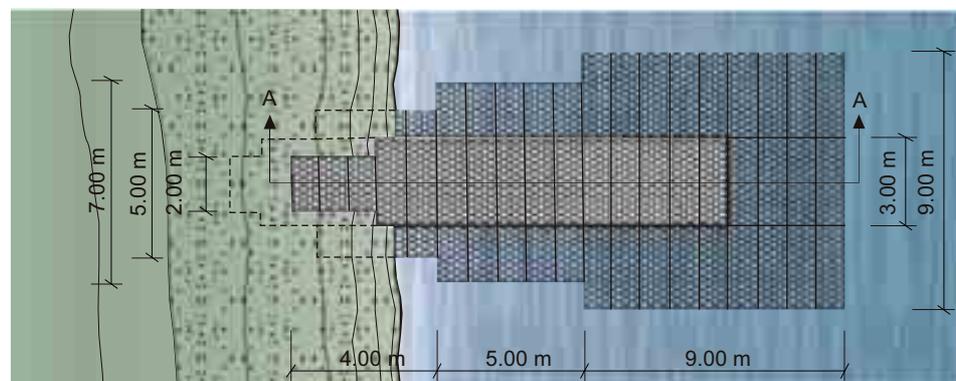
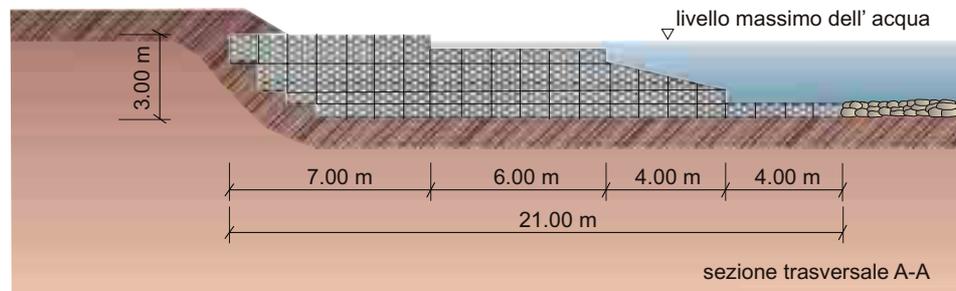


Figura 6.2.8: Esempi di pennelli in gabbioni.



Descrizione e Caratteristiche

Repellenti vivi

Sono costruiti in legname, pietrame e materiale vivo (fascine, ramaglia). Sono strutture utilizzate in corsi d'acqua ad energia non troppo elevata, che diventano parte integrante della sponda, in continuità anche con la vegetazione della sponda stessa. I pennelli realizzati con questa tecnica divengono in breve tempo punti di rifugio per la fauna sia acquatica che terrestre.

La disposizione dei pennelli sarà diversa a seconda degli effetti che si vogliono ottenere: per il restringimento di sezione i repellenti andranno posizionati contrapposti sulle due sponde, per l'effetto meandreggiante i repellenti andranno posizionati sfalsati, con una distanza che rispetti la cadenza naturale del meandreggio.

La tipologia era molto utilizzata un tempo. Con riferimento al Fiume Po a monte di Torino, Demorra (1883) riferisce la presenza di “due letti ben distinti. Cioè il letto delle piene e il letto ordinario; questo è incassato nelle alluvioni depositate nel letto delle piene. L'altezza delle sponde del letto ordinario varia fra due e tre metri, quella delle sponde che limitano le piene varia da quattro a sei metri. [...] Come sono divisi i due letti, [...] così dovremmo trovare due qualità di difesa. Per conservare le sponde al letto ordinario si fa uso di palafitte, a cui si dà nel territorio di Casalgrasso, specialmente, la forma di Pennelletti. Questi son della lunghezza di otto metri, e il loro complesso forma un addentellato di sega. Lo spazio fra i pali vien riempito da ramaglie, salsiccioni, fascine, ghiaia e blocchi, talvolta il riempimento si fa con blocchi soltanto. Questo sistema ultimo di riempimento non dà i buoni risultati del primo”.

La citazione ci ricorda come l'ingegneria naturalistica fosse un insieme di tecniche di largo uso nella pratica delle sistemazioni fluviali e montane le cui origini si perdono nel tempo. La stessa citazione dimostra anche che l'impiego di materiali vivi non dipende da esigenze estetiche, ma ha un obiettivo funzionale e strutturale.

Figura 6.2.9: Repellente vivo realizzato con legname, tout-venant e fascine. Il nucleo di materiale arido è contenuto dai pali di legno e dalle fascine vive. In caso di trasporto solido grossolano il repellente può essere protetto mediante una scogliera posta alla base. A seconda delle altezze che si debbono raggiungere si può utilizzare un'unica struttura o sovrapporre due ordini di pennelli.

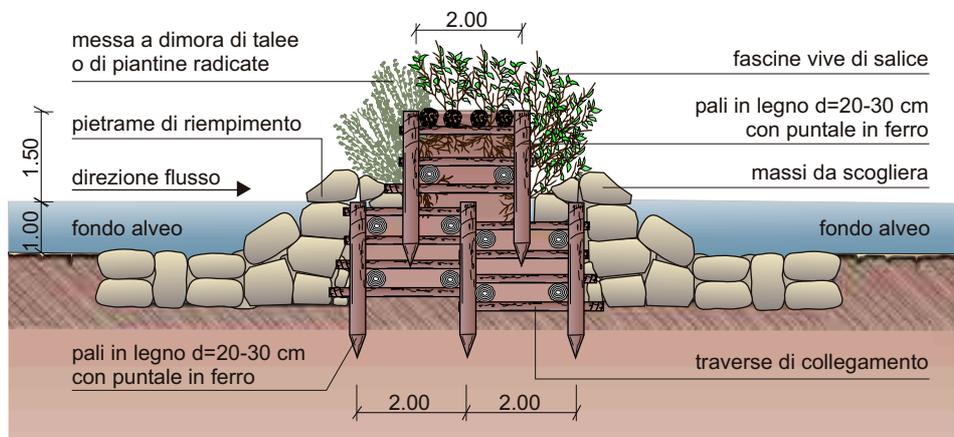


Figura 6.2.10: L'immagine ritrae un repellente vivo, realizzato con pali di legno e fascine vive di salice.

Nel giro di un anno i salici hanno ricacciato e la struttura viene consolidata ed inserita ambientalmente.

Il materiale di riempimento non deve essere di dimensioni troppo piccole per impedire che possa venire asportato dalla corrente. D'altro canto il riempimento non dovrà essere troppo grossolano per consentire lo sviluppo delle piante. In certi casi un compromesso tra le due esigenze si può ottenere differenziando granulometricamente il materiale più esterno da quello del nucleo.



Descrizione e Caratteristiche

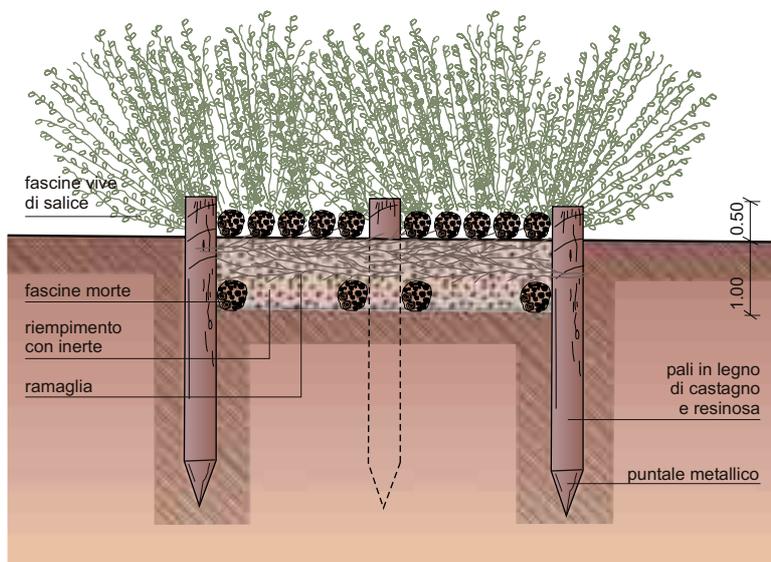
Repellente di ramaglia a strati

Si tratta di un repellente di ramaglia a strati costituito da un corpo di strati di fascine o di ramaglia alternati con tout-venant ghiaioso in genere prelevato dall'alveo.

Gli strati sono contenuti e protetti da file di pali di dimensione e passo funzione del tipo di fondo e del livello dell'acqua.

Nel caso di ricostruzione della linea spondale le punte dei rami dovranno terminare in corrispondenza della linea di sponda progettata. Il piede della costruzione a strati verrà ulteriormente consolidato con pietrame nel tratto di oscillazione del livello dell'acqua.

Figura 6.2.11: Schema di un repellente di ramaglia.



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.

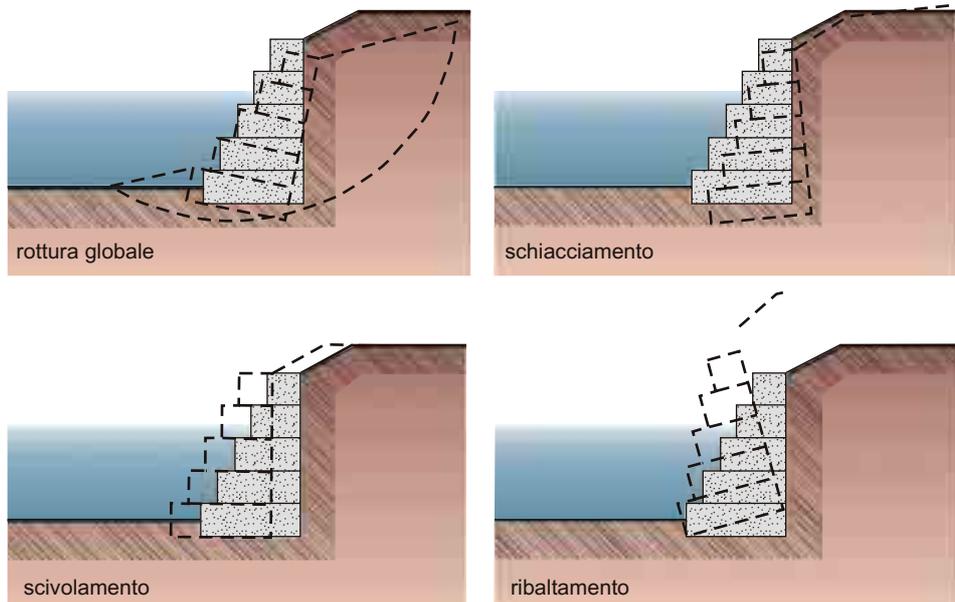


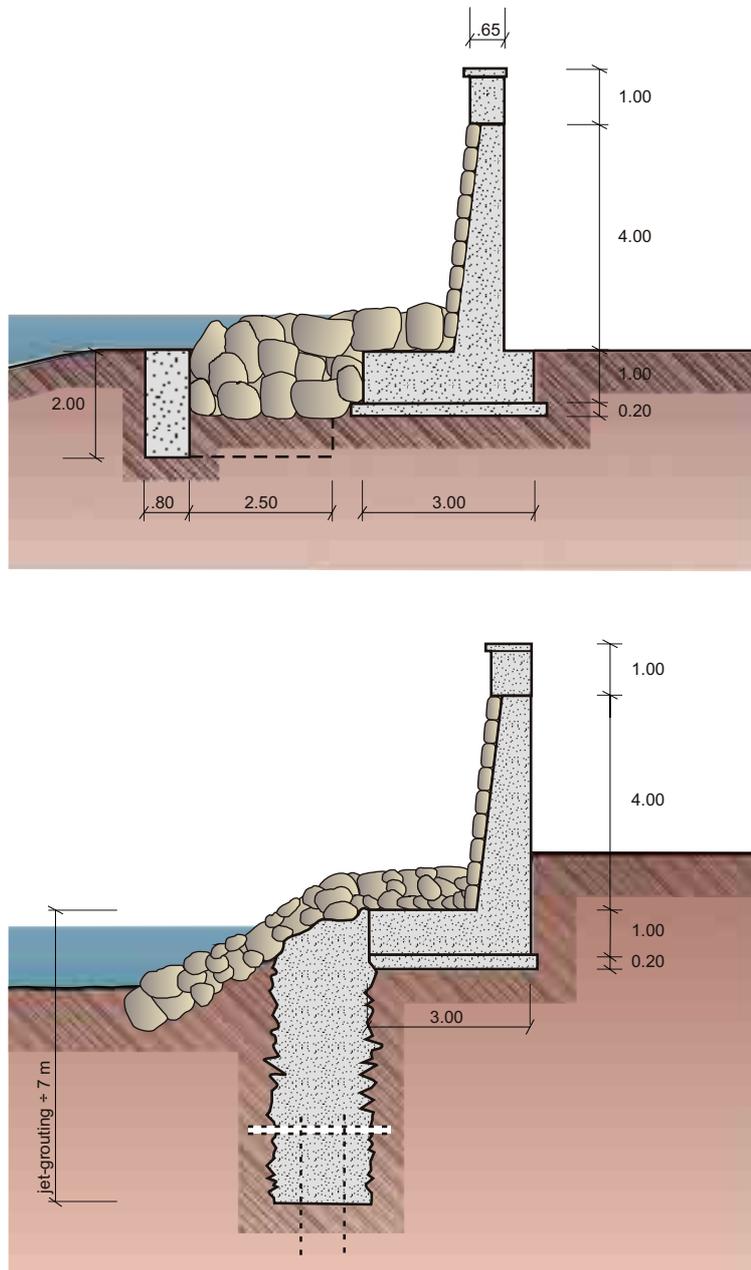
Figura 6.3.3: Erosione che ha intaccato la fondazione di un muro di sponda in pietrame e malta causandone la rottura. La scogliera posta lungo la sponda ha resistito all'impeto della corrente, ma a causa dell'evento eccezionale è stata coperta dall'acqua che è riuscita a raggiungere il muro sovrastante,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

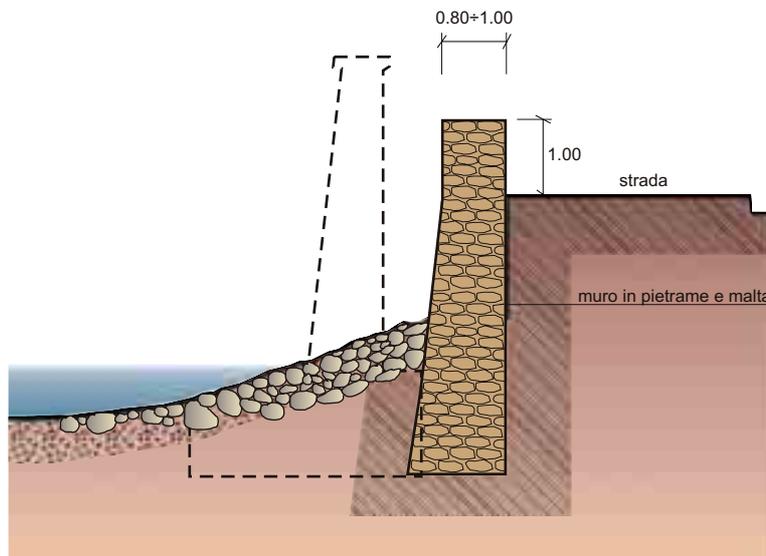
Trattandosi di strutture molto pesanti, è necessario che la base della fondazione sia impostata su terreni stabili e di buona capacità portante. In caso contrario, prima di procedere all'esecuzione dell'opera, occorre eseguire interventi di miglioramento delle caratteristiche fisico - meccaniche del 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, vibratori ecc.). Il loro dimensionamento, la scelta del tipo di fondazione o di altre soluzioni speciali di sottofondazioni da adottare, è funzione delle verifiche delle condizioni di stabilità interna ed esterna del complesso "struttura - terreno di fondazione - terrapieno o scarpata". Tali verifiche sono eseguite secondo gli usuali metodi di calcolo adottati per le opere di sostegno. Nelle zone sismiche le verifiche di stabilità comprendono anche le sollecitazioni indotte dal sisma di progetto sulla struttura.

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.

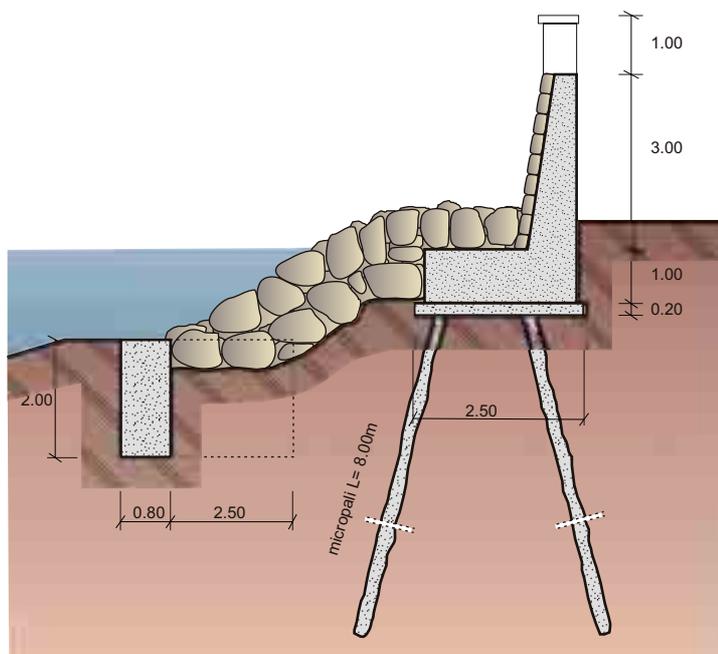


Figura 6.3.12: Muro in cemento armato prefabbricato, con rivestimento in pietra a vista. Si distinguono i singoli elementi prefabbricati accostati che costituiscono il muro (Quindici AV).



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.

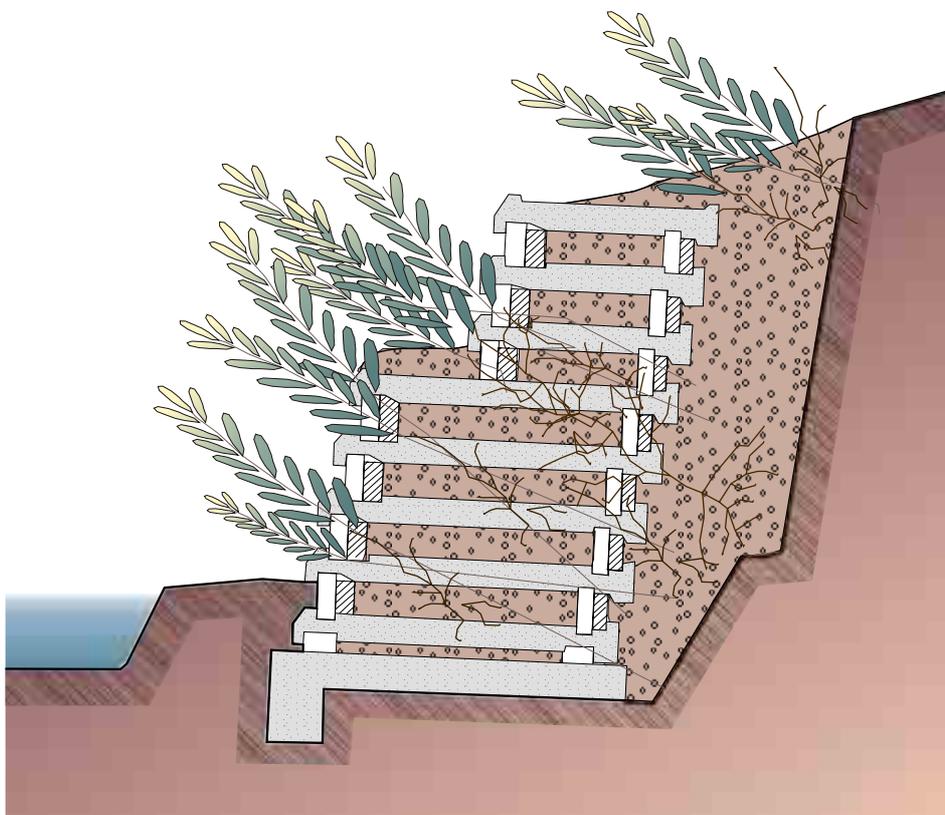
Questa struttura rappresenta la riscoperta in chiave moderna dei tradizionali muri di sostegno realizzati mediante strutture tridimensionali di tronchi riempite con pietrame, diffuse nelle vallate alpine.

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.

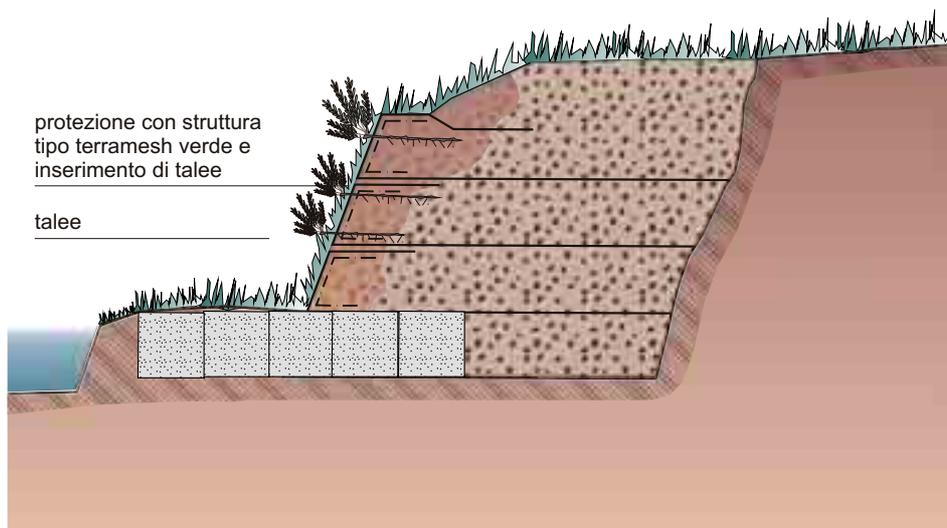
La tecnologia delle terre rinforzate rappresenta la ripresa ed il perfezionamento, in chiave moderna, di un sistema di miglioramento delle caratteristiche del terreno che ha origini antichissime. Sembra che i primi esempi di applicazione di questo sistema di costruzione, di cui si hanno testimonianze 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 a gradoni con il duplice effetto di costituire una base stabile al terrapieno in terra rinforzata verde e di fornire la difesa all'erosione nel caso di piene.



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

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

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

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



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

Rinforzi metallici

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

Rinforzi geosintetici

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

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

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

- Paramento verticale costituito da piastre in calcestruzzo armato o blocchetti di calcestruzzo prefabbricati;
- Paramento verticale costituito da scatolare in rete metallica a doppia torsione riempito di pietrame ed in continuità con il rinforzo di ancoraggio;
- Paramento inclinato rinverdibile realizzato risvoltando il rinforzo e mediante un cassero di contenimento ed irrigidimento in rete metallica a 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 trascinamento dovute corrente

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

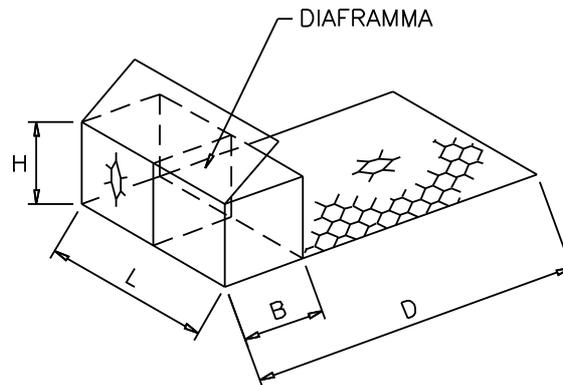


Figura 6.3.23: Terra rinforzata realizzata lungo una sponda di un piccolo torrente in ambiente alpino. Il paramento è rivestito con geostuoia tridimensionale in polipropilene e può venire rinverdito con una idrosemina a spessore



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

Descrizione e Caratteristiche

Gabbionate

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

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

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

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

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

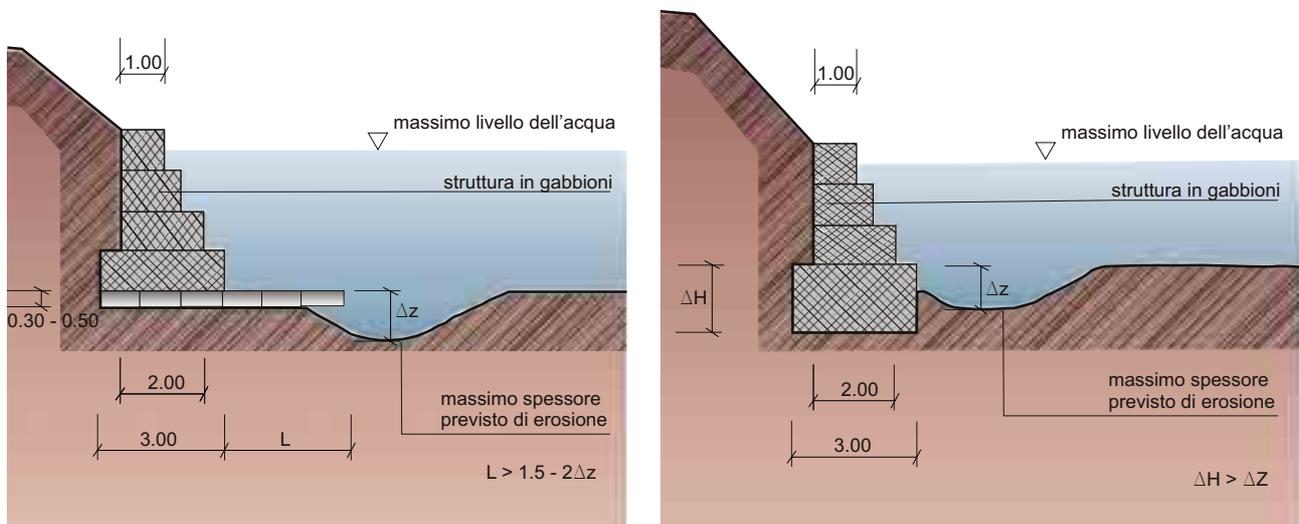


Figura 6.3.28: Costruzione di un muro in gabbioni in un torrente in Val d'Aosta (Cogne). I gabbioni vengono riempiti con materiale lapideo reperito direttamente in alveo dove è presente in eccesso. La soluzione scelta per la fondazione, a causa del forte trasporto solido, è quella dell'approfondimento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



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

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

Le gabbionate sono una valida soluzione per la realizzazione di opere di sostegno in diversi contesti fluviali, da quello urbano a quello naturale, dove occorre tener conto sia delle esigenze tecniche per le quali l'opera è stata costruita, sia della necessità di avere un buon inserimento ambientale.

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

Le tecniche costruttive, i materiali, le caratteristiche tecniche e meccaniche intrinseche della struttura, la facilità con cui vengono colonizzati dalla vegetazione o con cui possono essere a questa combinati artificialmente consentono di mitigare l'impatto ambientale e gli effetti negativi di natura estetica sul paesaggio circostante, favorendo, al tempo stesso, il ripristino naturale e/o la formazione di ecosistemi locali.

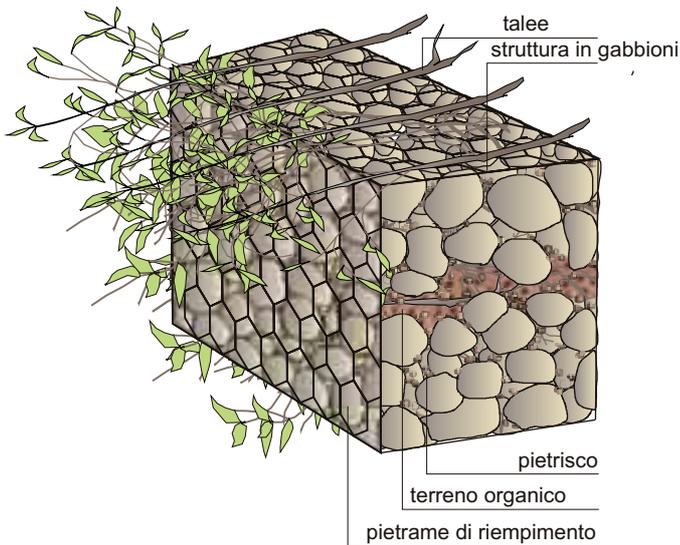


Figura 6.3.30: Muro in gabbioni abbinato a talee durante le successive fasi di rinverdimento. Le foto della gabbionata sono state riprese a distanza di un anno per ciascuna foto, la vegetazione è all'interno della gabbionata e ricopre tutta la struttura.

Descrizione e Caratteristiche

Palificata viva spondale

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.

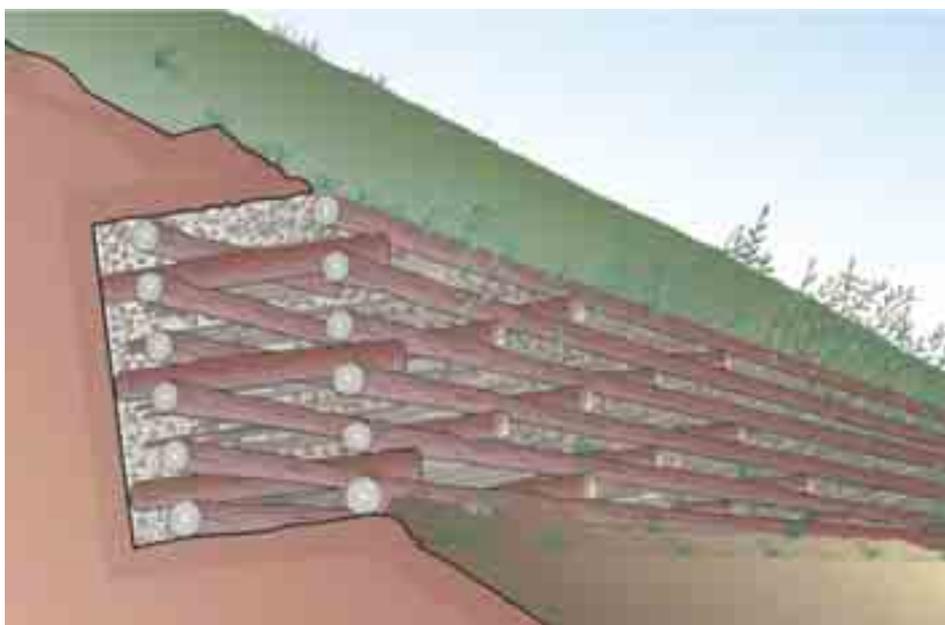


Figura 6.3.32: Una palificata viva riempita con materiale arido e terreno. Nella parte bassa si vedono elementi lapidei più grossolani.

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.

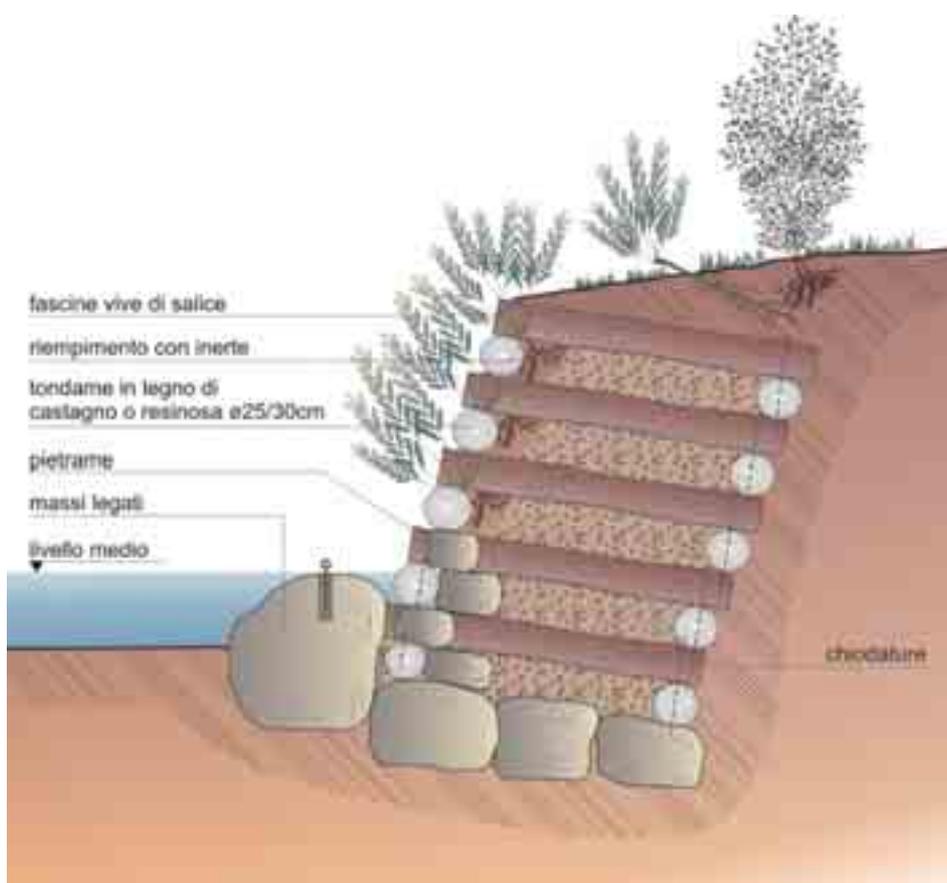


Figura 6.3.35: L'immagine ritrae una briglia e una palificata doppia in legname e pietrame (Castiglion Fibocchi AR).



Generalità

Sono strutture per la protezione dall'erosione che non esercitano 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 in quanto queste, se sottostimate, possono determinare sollecitazioni eccessive sulla struttura, in grado di danneggiarla, e processi di escavazione che possono causarne lo scalzamento o aggiramento.

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 misura che dipende dal 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 i cambiamenti che determinano negli habitat sia acquatici che terrestri.

Si possono ottenere significativi miglioramenti sotto il profilo ambientale combinando materiali inerti e materiali vivi (piante arbustive o piante erbacee) secondo le tecniche dell'ingegneria naturalistica o usando solo materiali vivi.

Quando i rivestimenti sono costituiti in tutto o in parte da materiale organico sono soggetti a degrado e, in tempi più o meno lunghi, scompaiono rilasciando sostanze che aiutano lo sviluppo della vegetazione che li dovrà sostituire nella funzione di protezione. L'abbinamento con materiali vivi è possibile soltanto al di sopra del livello medio dell'acqua, pertanto al di sotto di questo si potranno usare solamente materiali inorganici.

Figura 6.4.1: La corrente esercita uno sforzo di taglio sulle sponde, che è proporzionale all'altezza dell'acqua (y) sul punto considerato al peso specifico dell'acqua (w) ed alla pendenza (s).

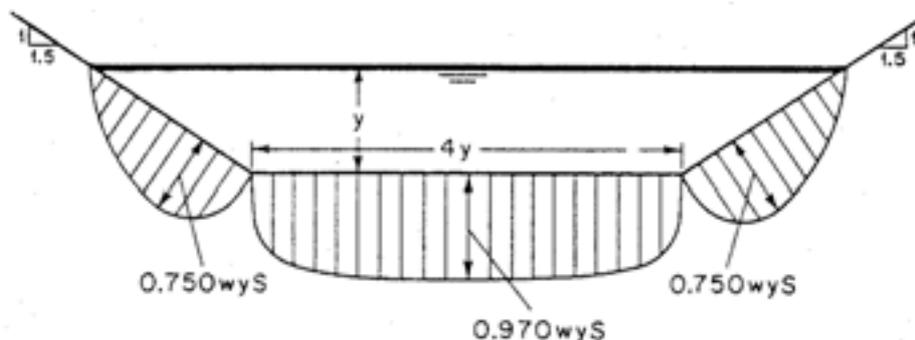
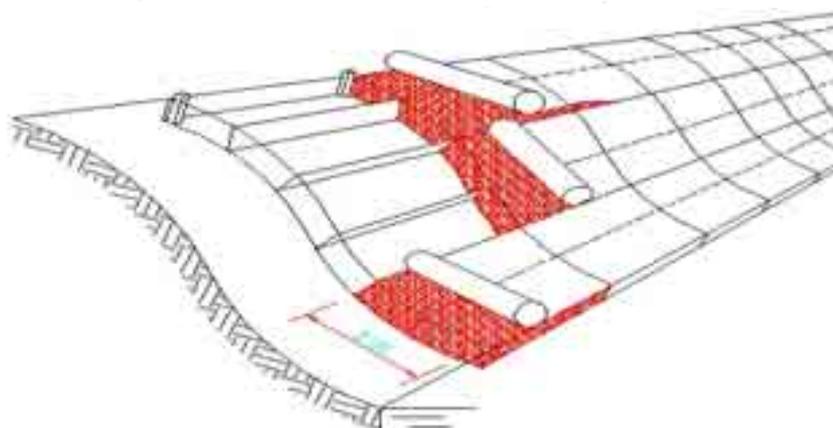


Figura 6.4.2: Rivestimento di una sponda con materassi tipo "Reno". Materassi, in rete a doppia torsione a maglie esagonali. Vengono riempiti con pietrame ed hanno uno spessore massimo di 0.30 m.



Anche per i rivestimenti combinati o con materiali vivi vanno eseguite adeguate verifiche di compatibilità tra tensioni di trascinamento di progetto e tensioni ammissibili. A tal riguardo bisogna considerare che l'esperienza sul comportamento di questo tipo di strutture (con materiali vivi) non è ancora ben sviluppata, sebbene si comincino a trovare in letteratura studi su varie tecniche realizzati sia su opere a fine lavori che a regime (con vegetazione sviluppata).

Ricordiamo che in generale, le opere che comprendono materiali vivi, vanno sempre dimensionate considerando sia condizioni di breve che di lungo termine, ciò sia per tenere conto del diverso contributo stabilizzante, ma anche delle variazioni sensibili di scabrezza dovute allo sviluppo delle parti aeree della vegetazione.

Di seguito si descrivono varie tipologie di rivestimenti secondo una classificazione che, sulla base del tipo di materiali impiegati individua tre diverse categorie di protezioni:

- **rivestimenti con materiali inerti**
- **rivestimenti combinati**
- **rivestimenti con materiali vivi**

Figura 6.4.3: Rivestimento con pietrame sciolto gettato alla rinfusa (gettata rip-rap). Per proteggere il terreno da un eccesso di velocità residua dell'acqua, sotto il rivestimento si pone un filtro in geotessile non tessuto. Il filtro nel caso di grossi blocchi su terreni cedevoli, se adeguatamente resistente, può servire anche per impedire l'affondamento degli elementi lapidei.

- 1- ingrossatura della protezione al piede
- 2- pietrame sciolto
- 3- filtro di pietrame sciolto o di geotessile

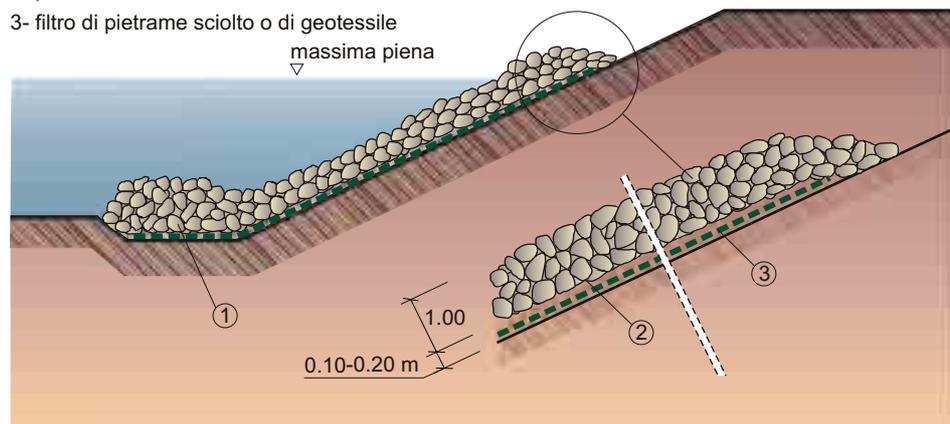


Figura 6.4.4: Rivestimento di fondo di un corso d'acqua, realizzato con pietrame calcareo, squadrate sistemato in maniera regolare.



Figura 6.4.5: Posa di materassi in rete metallica a doppia torsione riempiti di pietrame. Ad ulteriore protezione del terreno della sponda è stato posto un filtro in geotessile non tessuto. Si osservi la chiusura dei materassi che viene effettuata con un unico telo di rete metallica a doppia torsione.

Rivestimenti con materiali inerti

Descrizione e Caratteristiche

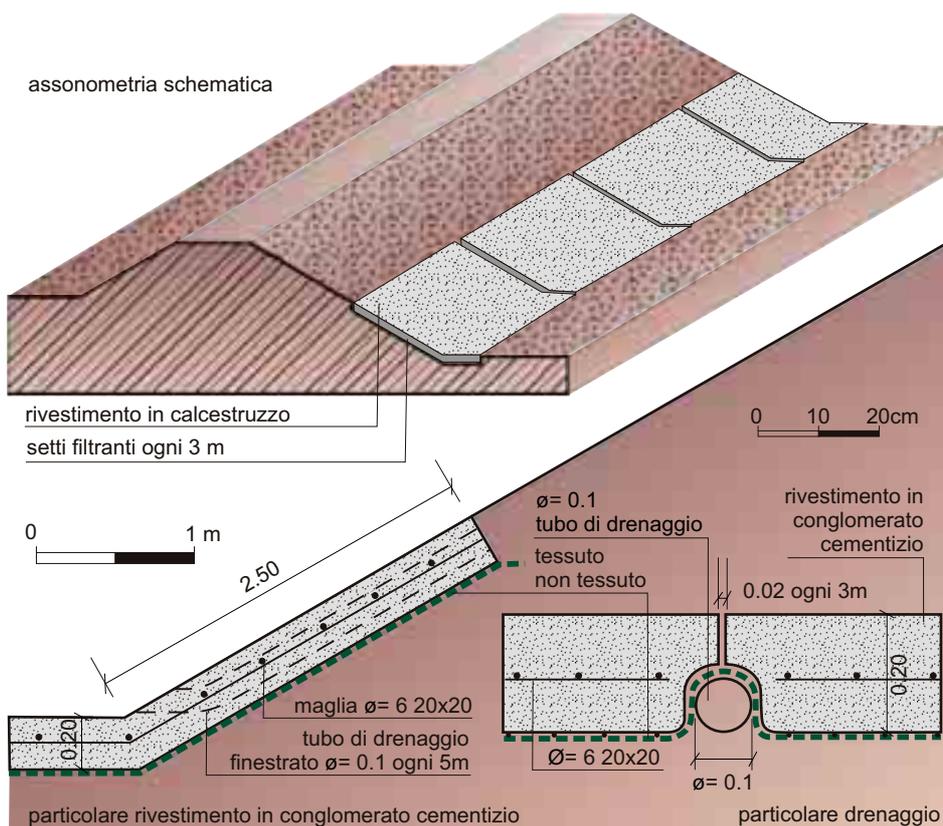
Rivestimenti in calcestruzzo

Si tratta di rivestimenti classificabili come rigidi e realizzati con materiale inerte che, se non si adottano particolari accorgimenti, sono impermeabili. Conseguenza di tali caratteristiche sono:

- scarsa adattabilità a cedimenti del sottofondo;
- interferenza nei rapporti tra corso d'acqua e falde acquifere;
- impedimento alla crescita della vegetazione;
- obliterazione degli habitat naturali;
- pessimo impatto visivo;
- accelerazione della velocità dell'acqua.

I rivestimenti di calcestruzzo possono essere realizzati mediante lastre di calcestruzzo armato gettate in opera oppure prefabbricate, con struttura normale o precompressa. Per rendere più naturale l'aspetto di questi rivestimenti si può annegare nel getto del pietrame.

Figura 6.4.6: Rivestimenti con lastre di calcestruzzo armate con rete metallica elettrosaldata. Poiché si tratta di rivestimenti impermeabili per evitare il danneggiamento a causa di sottopressioni idrauliche, è necessario prevedere dei drenaggi spaziatamente regolari, disposti lungo tutto il rivestimento.



Un'alternativa ai rivestimenti in lastre di calcestruzzo è rappresentata da rivestimenti non continui, realizzati con blocchetti sagomati (0,50.0,50 mq circa), connessi tra loro così da formare una mantellata articolata.

Gli elementi, variamente collegati fra loro con trefoli d'acciaio o funi di materiale sintetico, sono ancorati con barre d'acciaio in sommità, al piede e sui lati. Questo tipo di rivestimento è in grado di tollerare senza danni moderati assestamenti del terreno di posa, assicurando anche, per la presenza dei vuoti, la continuità nel rapporto con la falda.

L'impiego dei rivestimenti rigidi o flessibili richiede la preparazione del terreno di posa: il suo spianamento e un letto di materiale inerte, anche con funzione drenante, è opportuno inoltre associare un geotessile con funzione filtrante per evitare problemi di erosione.

Per migliorare l'impatto ambientale di questi rivestimenti si può sfruttare la presenza delle aperture per far crescere vegetazione erbacea, sopra il livello dell'acqua. Per ottenere buoni risultati è opportuno saturare i vuoti con del terreno vegetale e realizzare un'idrosemina a mulch sulla sponda. In questo caso è opportuno non mettere il filtro a targo del rivestimento.

Qualora le condizioni idrauliche lo consentano è opportuno inserire vegetazione arbustiva all'interno dei vuoti. In questo caso si ottiene un notevole effetto consolidante e la copertura totale del rivestimento.

Figura 6.4.7: I rivestimenti articolati i blocchi di calcestruzzo prefabbricati, offrono i vantaggi di resistenza propri del calcestruzzo ed al tempo stesso la permeabilità ed in parte deformabilità di un rivestimento in materiali sciolti. La resa sotto il profilo estetico è però piuttosto bassa se non si opera in maniera da poter rinverdire il sistema. In figura sono rappresentati due tipi diversi di blocchetti collegati con trefoli d'acciaio

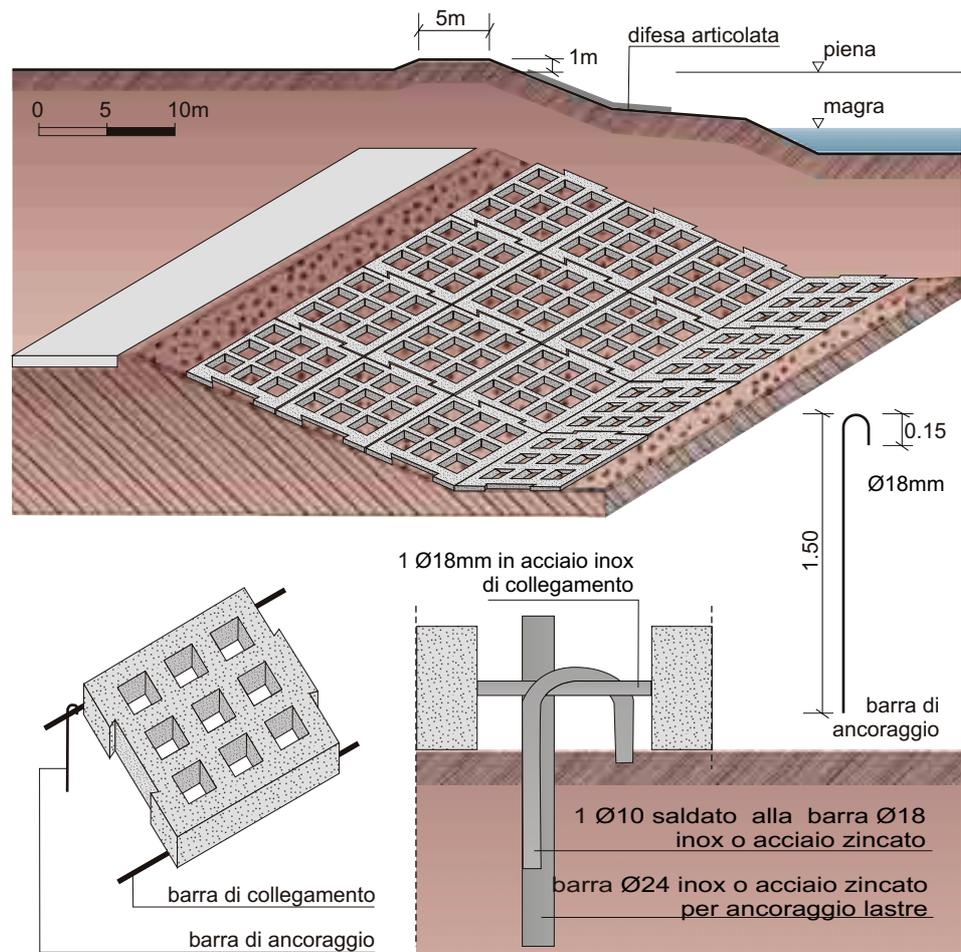


Figura 6.4.8: Esempio di rivestimento in lastre traforate in cemento a protezione di una sponda di un canale.



Descrizione e Caratteristiche

Pietrame sciolto, scogliere e massi vincolati

Si tratta di difese con materiali inerti naturali caratterizzate dall'essere permeabili ed in grado di subire assestamenti senza danni. La differenza tra rivestimenti in pietrame sciolto e scogliere dipende dalle dimensioni del materiale lapideo utilizzato e da una diversa modalità di messa in opera.

Le scogliere sono costituite da massi caratterizzati da grandi dimensioni, che vengono posti in opera singolarmente, mentre le pietre usate per le gettate (rip-rap) sono decisamente più piccole e sono scaricate alla rinfusa.

La scelta delle dimensioni degli elementi che formano i rivestimenti in materiale sciolto deve essere fatta in funzione delle sollecitazioni meccaniche a cui verranno sottoposte in esercizio:

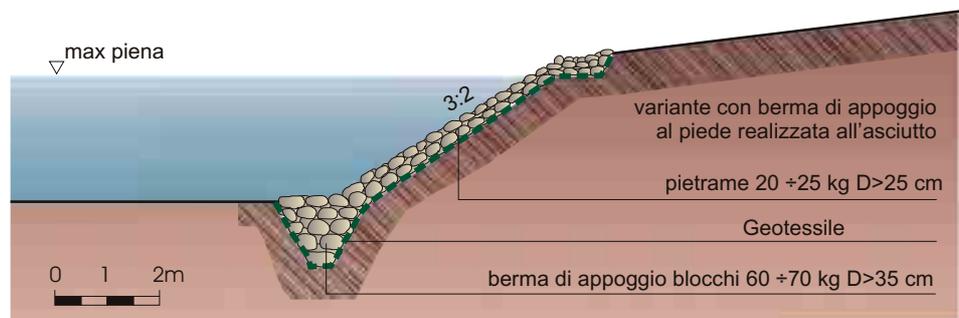
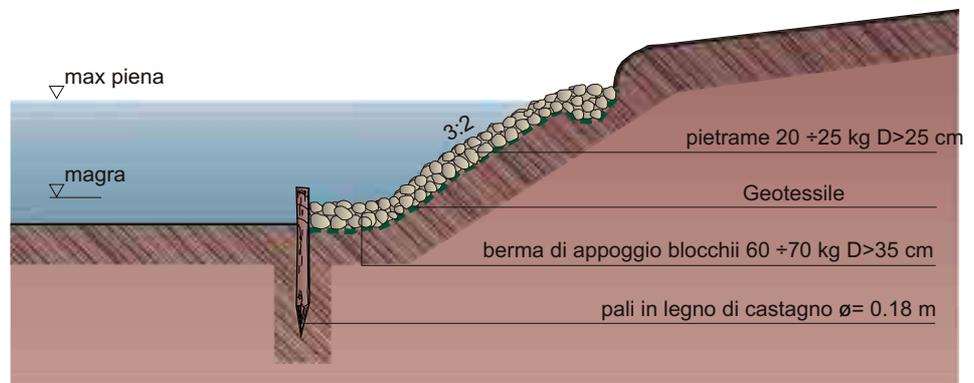
- sforzi di trascinamento dovuti alla corrente
- sottopressioni idrauliche

Le dimensioni degli elementi lapidei saranno maggiori rispetto a quelle che la corrente è in grado di trascinare a valle in occasione di piene caratterizzate da portate di adeguato tempo di ritorno.

I blocchi che si impiegano sono classificati per categoria, senza che esista una specifica normalizzazione:

tout-venant	tra	0	e	100	kg;
massi di prima categoria		100		1000;	
massi di seconda categoria		1000		3000;	
massi di terza categoria		3000		7000;	
massi di quarta categoria		7000		15000.	

Figura 6.4.9: Difesa spondale realizzata con pietrame sciolto. La protezione del piede dall'erosione, è un accorgimento costruttivo importante per garantire l'efficienza della protezione. In questo caso è stato realizzato con due sistemi diversi: pali di legno infissi nel fondo e per mezzo di una berma di appoggio.



I rivestimenti in pietrame possono essere realizzati con pietrame recuperato in alveo, in tal caso si deve evitare che abbia forma eccessivamente arrotondata, il pietrame spigoloso ha una mobilità inferiore e resiste meglio al trascinarsi della corrente.

In alternativa al pietrame naturale di fiume o di cava, si possono anche usare prismi di calcestruzzo, con risultati più scadenti sotto il profilo estetico.

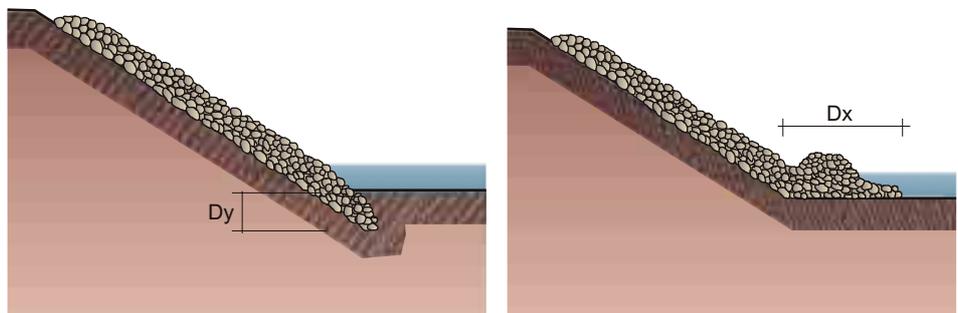
Questo tipo di difese se realizzate correttamente richiedono un notevole dispendio di pietrame e si giustificano solo quando vi sia pietrame di facile ed economica reperibilità. Le regole generali di progettazione di protezioni con pietrame sciolto, prevedono uno spessore minimo di 0,30 m e, in generale, il rapporto tra questo e la dimensione media del pietrame va da 1,5 a 2. Se la costruzione è fatta in presenza d'acqua lo spessore del rivestimento deve essere raddoppiato.

La stabilità al piede può essere garantita sia dall'aumento della profondità del rivestimento (D_y) che dalla sua estensione in senso orizzontale (D_x), in funzione della profondità dell'erosione (D_z) prevista.

Figura 6.4.10: In assenza di blocchi naturali si possono utilizzare prismi di calcestruzzo come nell'esempio lungo il fiume Po mostrato nella foto a fianco



Figura 6.4.11: Lo spessore di una difesa in pietrame sciolto è proporzionale alle dimensioni del materiale che la costituisce generalmente non è inferiore a 0,30 m. Per garantire la stabilità rispetto all'erosione del fondo, il piede può venire adeguatamente approfondito. In alternativa si può realizzare un ringrosso di materiale che, nel caso di erosione, può andare a colmare il vuoto che viene a formarsi.



In alcuni casi, al fine di aumentare la resistenza all'azione di trascinamento esercitata dalla corrente, gli spazi vuoti tra i massi vengono intasati con malta cementizia.

L'adozione di questa soluzione comporta però degli svantaggi in quanto rende il rivestimento simile a quelli in calcestruzzo.

In alcuni casi i massi che formano una scogliera vengono ancorati tra loro con delle funi di acciaio a mezzo di ganci, anch'essi in acciaio, passanti attraverso fori praticati nei massi stessi: questa tecnica fornisce alla struttura una resistenza sicuramente maggiore all'azione di trascinamento esercitata dalla corrente, ma i costi crescono in maniera non trascurabile e l'impiego di questa tecnica non è molto frequente.

Per migliorare l'impatto ambientale delle scogliere si possono inserire materiali vivi usando tecniche diverse. La messa a dimora di talee di specie adeguate o l'inerbimento, previo intasamento con terreno delle fessure.

Figura 6.4.14: Scogliera in massi cementati per aumentarne la stabilità. La cementazione rende l'opera più rigida e meno permeabile.



Figura 6.4.15: Una soluzione che consente di migliorare significativamente la resistenza al trascinamento della scogliera è quella di vincolare i blocchi con funi d'acciaio. Il sistema è allunga significativamente i tempi di realizzazione ed leva i costi dell'opera.



Quando la protezione con scogliere o gettate riguarda una parte a fiume, senza interessare cioè l'arginatura maestra, nella sezione iniziale del rivestimento è necessario immergere adeguatamente il rivestimento stesso nell'ammasso protetto per evitare che possa prodursi un aggiramento della testa. Per rivestimenti di sponda estesi in senso longitudinale, è importante provvedere anche a immorsamenti intermedi.

Infine come per altri rivestimenti anche quelli in materiali sciolti debbono essere posti in opera avendo l'accortezza di realizzare un filtro rovescio o impiegando i geotessili, per evitare fenomeni di erosione.

Figura 6.4.16: Sezione di una scogliera combinata con talee di salice. Le piante vengono messe nella porzione al di sopra del livello medio dell'acqua in quanto non resisterebbero alla sommersione continua.

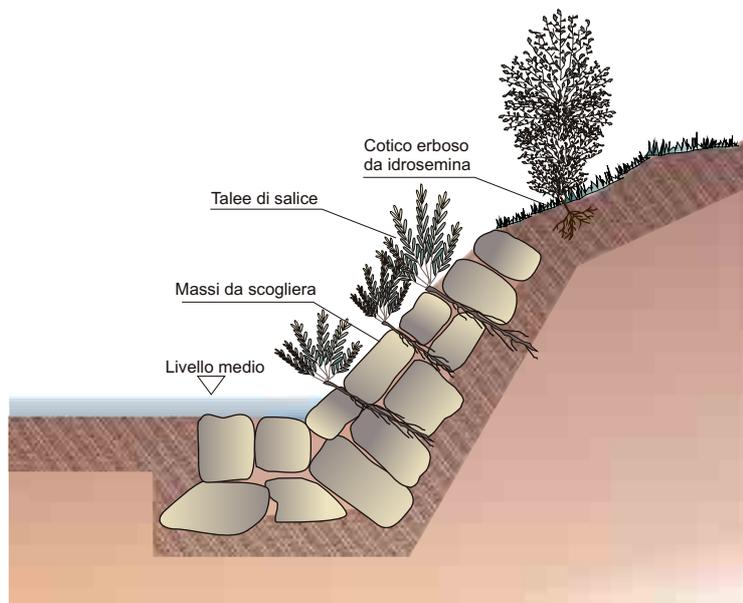


Figura 6.4.17: Scogliera in blocchi calcarei piantata con talee di salice. I salici messi a dimora durante la costruzione hanno attecchito senza problemi e stanno coprendo la scogliera.



Descrizione e Caratteristiche

Materassi in rete metallica a doppia torsione a maglie esagonali

La necessità di una protezione antierosiva caratterizzata da una elevata resistenza alle tensioni di trascinamento, può essere soddisfatta utilizzando degli scatolari in rete metallica a doppia torsione riempiti di pietrame di idonea pezzatura. Di spessore variabile tra 17 e 30 cm i ben noti "materassi in rete metallica" sono materiali studiati da lungo tempo sotto il profilo idraulico, meccanico ed ambientale. Possono essere considerati alla stregua di un rivestimento in pietrame sciolto con la differenza che la stabilità di quest'ultimo risulta incrementata dall'azione di contenimento della rete. Le conseguenze sono che con l'impiego dei materassi, a parità di condizioni idrauliche e geometriche (della sponda), è possibile impiegare pietrame di dimensioni più piccole e per spessori inferiori.

Con questi materiali è possibile realizzare opere in presenza d'acqua con significativi risparmi di pietrame grazie alla possibilità di ottenere spessori certi essendo i materassi prefabbricati all'asciutto.

Figura 6.4.18: Materassi tipo "Reno" in rete metallica a doppia torsione e maglie esagonali. I materassi sono spessi al massimo 0.30 m e sono suddivisi per mezzo di diaframmi per impedire il movimento dei ciottoli sotto l'azione della corrente ed il conseguente insaccamento. I ciottoli di riempimento dovranno avere dimensioni adeguate, sia per non sfuggire dalle maglie sia per resistere senza movimenti eccessivi quando sono sottoposti al trascinamento dell'acqua.

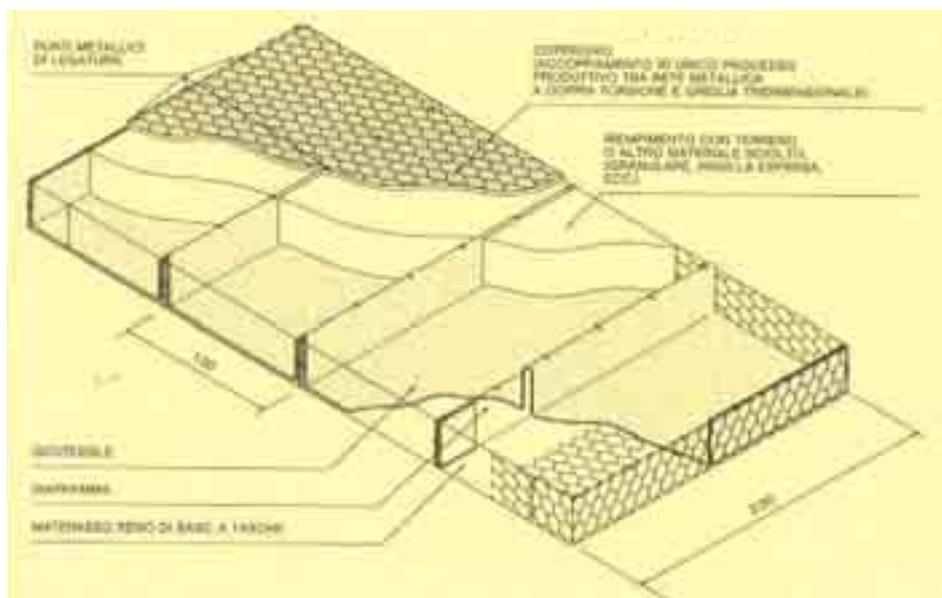
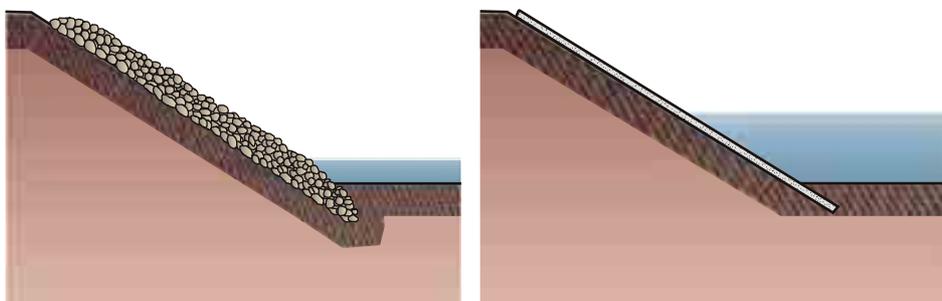


Figura 6.4.19: Confronto di spessore tra materasso e gettata in pietrame. Lo spessore più contenuto dei materassi è reso possibile sia per la maggiore stabilità del pietrame che per la maggiore precisione nell'assicurare una copertura continua del terreno della sponda.



La durabilità di queste opere dipende sia dalla funzione consolidante della vegetazione sia dalle proprietà del filo metallico di cui sono costituiti.

I materassi, così come i gabbioni ed altri materiali, oggi vengono realizzati con un acciaio dotato di una doppia protezione:

Galvanizzazione con lega di Zn-5% di alluminio e terre rare (Galfan)
Plasticatura PVC o PE.

In questo modo è possibile ovviare agli inconvenienti dovuti all'ossidazione ed aggressione chimica non solo in condizioni ambientali normali, ma anche laddove l'inquinamento le abbia peggiorate .

Questi sistemi consentono di realizzare opere con durabilità elevata (da 60 a 120 anni).

Figura 6.4.20: I materassi in rete metallica, possono venire posati facilmente in presenza d'acqua. Vengono assemblati e riempiti all'esterno e successivamente calati in acqua. Grazie alla loro resistenza e flessibilità riescono a sopportare senza danni la movimentazione anche sotto il carico del pietrame di riempimento. Per grossi lavori fluviali si giustifica l'impiego di pontoni mobili. In tal modo si eleva notevolmente la velocità di posa.



Anche per i materassi in rete metallica si presenta il problema della protezione per evitare l'aggiramento da parte della corrente. Il tratto iniziale e finale della materassata possono venire protetti con un setto realizzato con gabbioni, calcestruzzo o con massi legati con malta. Se il rivestimento è molto lungo è opportuno prevedere dei setti intermedi.

Lo spesso ridotto di questi rivestimenti e la facilità con cui vengono intasati dai sedimenti trasportati dalla corrente fanno sì che possano venire facilmente colonizzati dalla vegetazione spontanea come mostrano le foto successive.

Figura 6.4.21: Protezione di una materassata nella tratto iniziale a valle di un ponte. Per evitare l'aggiramento si è impiegata una scogliera in blocchi cementati.



Figura 6.4.22: I materassi vengono facilmente colonizzati dalla vegetazione. La frazione limosa del trasporto solido intasa i vuoti tra i ciottoli e la vegetazione pioniera si instaura nel giro di pochi anni. Nella foto opera spondale in materassi in ambiente appenninico. A distanza di un anno è iniziata la colonizzazione spontanea.



Figura 6.4.23: Lo stesso tratto di fiume ripreso nella foto precedente dopo diversi anni. La vegetazione si è completamente riappropriata delle sponde del corso d'acqua.



Rivestimenti con sistemi combinati

I rivestimenti, generalmente, grazie al loro spessore ridotto offrono ottime opportunità di inserimento ambientale. Sia che si tratti di materiali organici o meno, risulta abbastanza semplice combinarli con la vegetazione e garantire il mantenimento della permeabilità delle sponde. A differenza dei materiali inorganici quelli a base naturale debbono essere necessariamente abbinati a materiali vivi poiché degradandosi non offrono protezione a lungo termine. La vegetazione può essere combinata alla parte inerte del rivestimento in varie forme:

- Talee
- Piante a radice nuda
- Piante in vaso
- Rizomi
- Per seme

Descrizione e Caratteristiche

Materassi rinverditi

I materassi in rete metallica a doppia torsione a maglie esagonali in passato venivano utilizzati esclusivamente per la realizzazione di rivestimenti inerti, lasciandoli alla naturale colonizzazione da parte della vegetazione. Oggi, l'aumento della sensibilità ambientale, ha portato a sviluppare tecniche che consentono di accelerare e guidare i processi di rinaturalizzazione di questo tipo di rivestimento. Gli spessori ridotti di pietrame che si possono realizzare, facilitano fortemente la colonizzazione spontanea da parte della vegetazione, come è stato dimostrato da numerosi lavori effettuati in passato.

A tale scopo si mescola del terreno al pietrame e si impiegano degli elementi antierosivi con funzione temporanea (biostuoie) o permanente (geostuoie tridimensionali); sul substrato così predisposto, le specie vegetali vengono idroseminate per creare una copertura continua di rapida crescita.

Figura 6.4.24: Gli schemi mostrano la tecnica usata per il rinverdimento dei materassi riempiti di pietrame: si intasa abbondantemente con terreno vegetale e per evitare il dilavamento vi si posa sopra un geosintetico antierosivo (biostuoia o geostuoia tridimensionale). Successivamente si realizzerà una idrosemina a mulch, ricca di fibre vegetali e fertilizzanti.

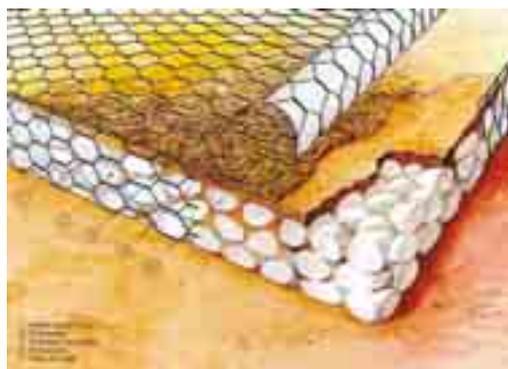


Figura 6.4.25: L'intasamento dei materassi con il terreno viene effettuato con l'escavatore idraulico e parte dalla sommità procedendo verso il basso. Questa operazione va effettuata prima di chiudere il coperchio del materasso in rete metallica.



Figura 6.4.26: La foto accanto e quella sopra mostrano la parte alta di una sponda rivestita in materassi intasati con terreno e rinverditi. Si osservi che nella parte bassa della sponda, dove si prevedono tensioni di trascinamento più elevate, è stata realizzata una scogliera.



Figura 6.4.27: Le foto mostrano un intervento sulla intera sezione di un torrente con materassi.



Generalmente, se le condizioni idrauliche lo consentono, vengono messe a dimora anche talee per realizzare, in tempi più lunghi, una copertura arbustiva dotata di maggiore capacità di protezione meccanica e di più elevato valore ambientale.

Figura 6.4.28: Schema che mostra il rivestimento di una sponda con materassi e talee. Le piante vengono messe a dimora dopo la chiusura dei coperchi, mediante infissione, per facilitare l'operazione si può usare una barra di ferro per creare lo spazio tra il pietrame per infilare la talea. Questa tecnica richiede che non si utilizzi il geotessile al di sotto del materasso. Le talee devono penetrare senza impedimenti nel terreno della sponda. In tal modo quando le piante cresceranno si realizzerà una sorta di chiodatura dei materassi e le parti aeree eserciteranno una protezione molto efficace nei confronti della corrente

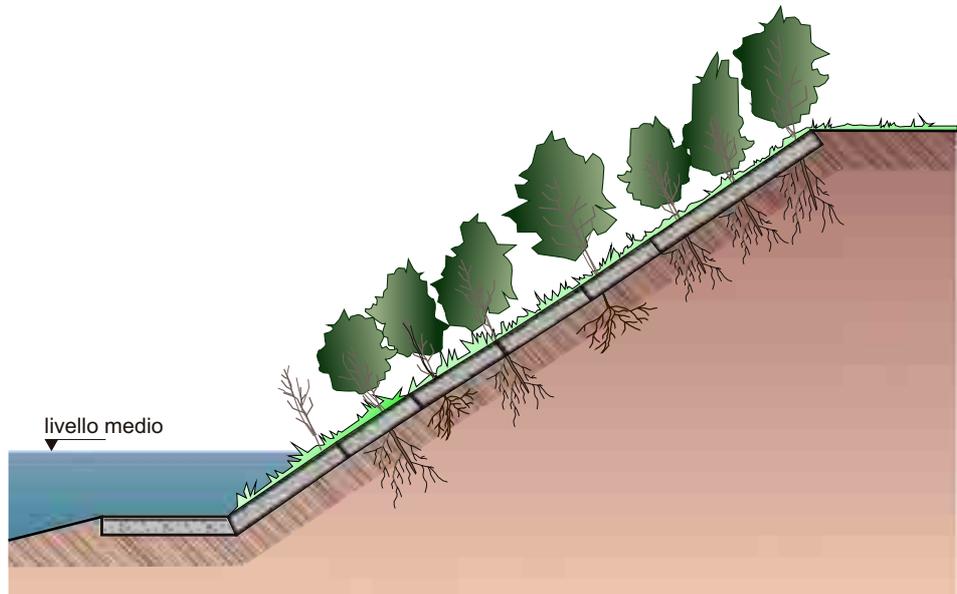


Figura 6.4.29: La foto mostra un rivestimento con materassi e talee della sponda di un corso d'acqua. I materassi sono stati anche intasati con terreno e ineriti. Si osservi che nella parte bassa, dove più di frequente si trova il livello dell'acqua, non sono state messe piante, ma solo il riempimento con pietrame.



Descrizione e Caratteristiche

Inerbimenti con stuoie, reti e biostuoie

Biostuoie

Sono costituite da fibre di natura vegetale tenute assieme da retine poliolefiniche o a loro volta a base organica.

Data la natura biodegradabile e la scarsa resistenza meccanica possono essere usate solo sopra il livello dell'acqua e sono caratterizzate da una resistenza alle tensioni di trascinamento poco significativa, pertanto a breve termine sono vulnerabili in caso di sommersione e sono da considerarsi unicamente una protezione rispetto al ruscellamento ed all'impatto delle gocce di pioggia. Per le applicazioni in campo idraulico sono da preferirsi biostuoie con una elevata durabilità: in fibre di cocco o legno.

Figura 6.4.30: Rivestimento con biostuoia in fibre di legno, di rilevati arginali in terra. La biostuoia impedirà l'erosione superficiale dando modo alla vegetazione erbacea di crescere e proteggere il terreno permanentemente nei confronti delle acque di pioggia e dell'azione della corrente.



Figura 6.4.31: A) Biostuoia in fibre di cocco: le fibre sono intrappolate tra due retine poliolefiniche che hanno la doppia funzione di impedire la dispersione del cocco e di conferire maggiore resistenza meccanica al geosintetico. Generalmente le retine sono fotodegradabili, in modo da scomparire una volta esauritasi la funzione protettiva della biostuoia. B) Georete in fibre di cocco. Un materiale caratterizzato da una elevata curabilità e da una buona resistenza meccanica. C) Georete in agave, ha una resistenza meccanica superiore rispetto al cocco ma possiede una durabilità inferiore.



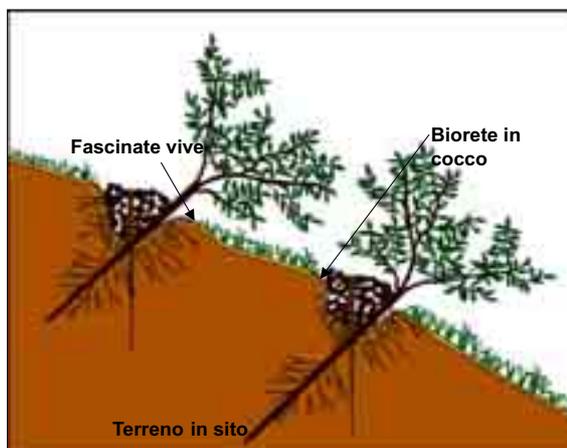
Bioreti e biotessuti

Si tratta di materiali a struttura aperta realizzati con fibre vegetali di varia natura a seconda del tipo di geosintetico: cocco, juta, sisal o altro. Hanno maglie quadrate o rettangolari di dimensioni che vanno da qualche millimetro a qualche centimetro. Anche questi materiali hanno una resistenza alle tensioni di trascinamento limitata seppur superiore ad esempio alle biostuoie (vedi sisal e cocco). Le bioreti in cocco trovano un vasto uso nelle opere idrauliche, in virtù della loro elevata durabilità, laddove sia necessario esercitare una protezione antiersiva leggera in condizioni di basso rischio ad esempio nei recuperi ambientali.

Figura 6.4.32: Rivestimento di sponde di un torrente con geodete in juta. Dopo il rimodellamento delle sponde con mezzi meccanici, è importante provvedere ad una protezione temporanea in attesa che cresca la vegetazione. Nella foto sotto si può apprezzare il risultato a distanza di poco più di un anno. Oltre alla copertura erbacea si è provveduto a mettere a dimora delle specie arbustive realizzando delle palizzate con talee



Figura 6.4.33: Nello schema è rappresentata una combinazione di biorete in cocco con fascinate vive. La fascinata oltre a consentire la messa a dimora di specie arbustive, garantisce anche una protezione meccanica leggera.



Descrizione e Caratteristiche

Rinforzo degli apparati radicali (Turf-reinforcement).

Si tratta di un rivestimento flessibile in cui il materiale inerte viene compenetrato dalle radici delle piante erbacee e ne costituisce il rinforzo permanente. E' di un sistema combinato molto efficace, in grado di incrementare notevolmente la resistenza alle tensioni di trascinamento delle piante erbacee.

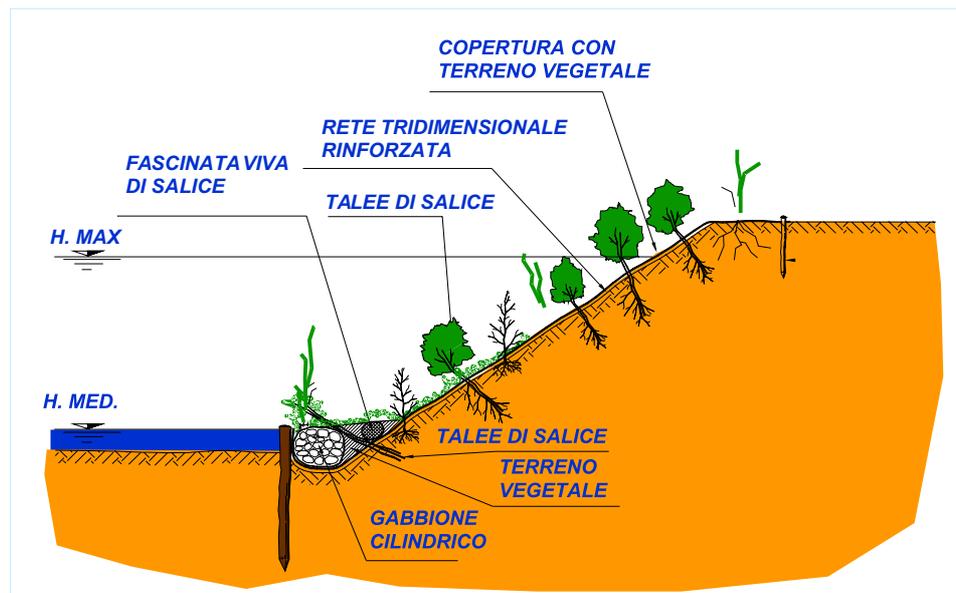
Si ottiene mediante la posa di una geostuoia tridimensionale costituita da filamenti di materiali sintetici (polietilene ad alta densità, poliammide, polipropilene o altro), aggrovigliati in modo da formare uno strato molto deformabile dello spessore di 10-20 mm, caratterizzato da un indice dei vuoti molto elevato (> 90%).

Per migliorare le prestazioni meccaniche di questo materiale, in particolare nelle applicazioni in campo idraulico, la geostuoia viene rinforzata per mezzo di rete metallica a doppia torsione o con una geogriglia. I materiali rinforzati possono venire abbinati anche a chiodature (barre d'acciaio diam. 2.60 cm) realizzate mediante infissione o perforazione a seconda del tipo di terreno della sponda. In tal modo si sfrutta la capacità di contenimento del rinforzo e si migliora anche la stabilità corticale: 1-2 mt di spessore di terreno a seconda della lunghezza dei chiodi.

Figura 6.4.34: A sinistra geostuoia tridimensionale in fibre di polipropilene. A destra georete tridimensionale rinforzata con una rete metallica a doppia torsione a maglie esagonali. Il rinforzo rende più resistente il geosintetico, conferendogli una maggiore capacità di consolidamento superficiale del terreno se abbinato ad idonee chiodature con picchetti lunghi.



Figura 6.4.35: Nello schema è mostrato un tipico intervento di rivestimento della sponda con rete tridimensionale rinforzata e talee. Per migliorare la protezione al piede è stato previsto un presidio realizzato con un gabbione cilindrico in rete metallica a doppia torsione a maglie esagonali.



Il sistema di rivestimento costituito dal materiale combinato con le piante ha una resistenza alle tensioni di trascinamento molto più alta rispetto a quella delle piante da sole. Questo aspetto è stato indagato attraverso dei test ed oggi sono disponibili dei dati di tensione ammissibile che possono essere utilizzati nella progettazione. A tal scopo si usano degli abachi che consentono di determinare le tensioni ammissibili di tali sistemi sia in presenza di vegetazione che non ed in relazione alla durata dell'evento di piena.

Figura 6.4.36: Sponde di una fiumara rivestite con geostuoia tridimensionale rinforzata e rinverdite.



Figura 6.4.37: Resistenza all'azione della corrente di un rivestimento in geostuoia tridimensionale rinforzata: diagramma che correla le tensioni ammissibili con la durata dell'evento di piena

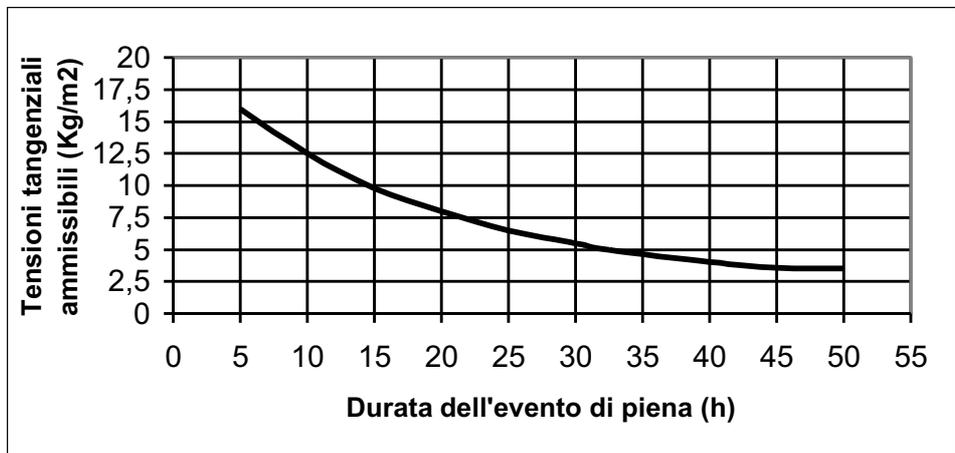


Figura 6.4.38: Protezione di un argine fluviale mediante rivestimento con geostuoia tridimensionale piantumata a caldo. Nella foto successiva si può osservare la prima fase di rinverdimento. Dopo 12 anni dall'intervento la sponda è risultata completamente inerbita e non vi è più traccia della bitumatura. F. Zero (TV)

Descrizione e Caratteristiche

Grata viva

Si tratta di una struttura di rivestimento addossata alla sponda ottenuta mediante la posa di tronchi verticali e orizzontali disposti perpendicolarmente tra loro. I tronchi orizzontali sono sovrapposti a quelli verticali e vengono chiodati ad essi in corrispondenza degli incroci. Questa disposizione di tronchi individua delle camere rettangolari all'interno delle quali vengono poste, in corso d'opera, talee di salici e il tutto viene ricoperto con inerte terroso.

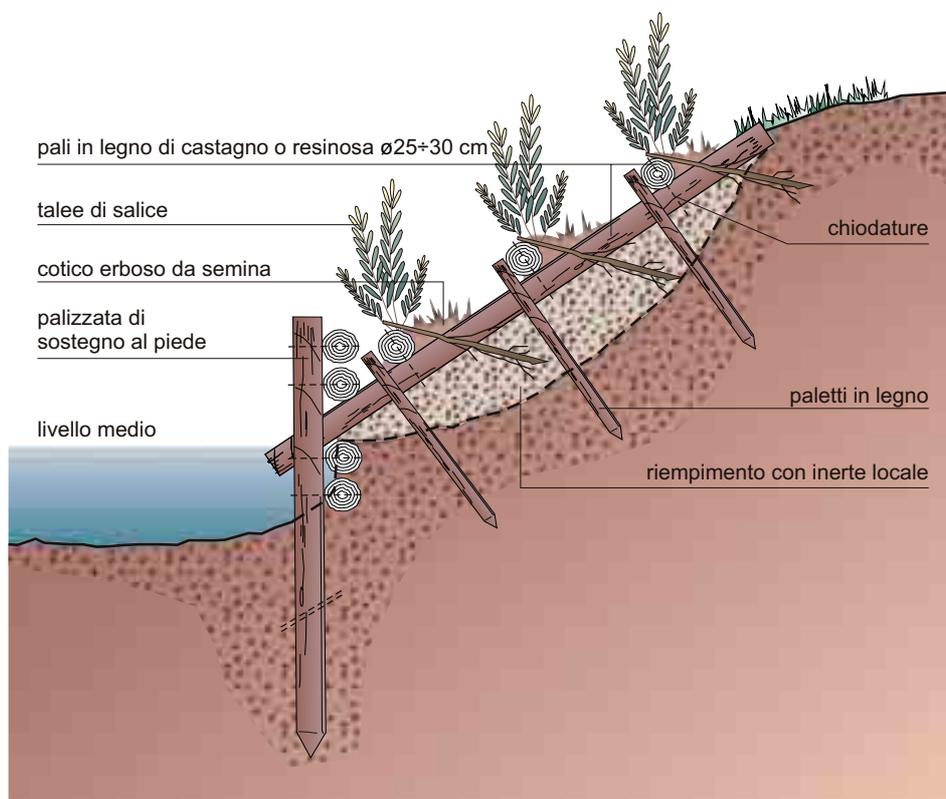
La presenza del tondame consente alla struttura di esercitare una protezione immediata nei confronti della sponda mentre nel tempo le piante si sviluppano e si realizza un vero e proprio consolidamento.

La grata viva, impiegata in genere al di sopra del livello di piena, oltre alla funzione di rivestimento esercita quella di sostegno ed è adatta a scarpate artificiali e parti alte di sponde in erosione con inclinazione fino a 40°-50° che non può essere diminuita.

La messa a dimora di talee e arbusti dovrà avvenire nel periodo di riposo vegetativo

Figura 6.4.39: In caso di erosione di una sponda, anche piuttosto ripida, la grata viva può essere usata per stabilizzare la sponda ed il terreno di riporto necessario al ripristino morfologico.

La struttura è realizzata con tondame sistemato in modo da formare una grata addossata al pendio e solidarizzata ad esso mediante dei picchetti in legno infissi per almeno un metro. All'interno della grata andranno messe a dimora delle talee per consolidare e proteggere in maniera permanente il terreno della sponda.



La struttura a grata si costruisce per mezzo di tondame di castagno o di una resinosa, di $\varnothing = 15 - 25$ cm e lunghezza 2 - 5 m. La struttura viene fondata su un solco di terreno stabile o poggiata su di un tronco longitudinale di base. I tronchi verticali sono distanti 1-2 m e quelli orizzontali, chiodati ai primi sono distanti da 0,40 a 1,00 m a seconda dell'inclinazione del pendio (in genere si lavora su pendenze di $45^\circ - 55^\circ$). Per rendere solidale la struttura al terreno si realizza un fissaggio al substrato mediante picchetti di legno di $\varnothing = 8-10$ cm e lunghezza 1 m; in alternativa, soprattutto su substrati compatti, si possono usare picchetti di ferro, di dimensioni idonee, per sostenere la struttura.

Le camere rimaste tra un tronco e l'altro della grata vengono riempite con inerte terroso alternato a talee e ramaglia viva disposta a strati, appoggiandole ai tronchi orizzontali con eventuale supporto di una griglia metallica per impedire che il terreno scivoli in basso. Le talee devono avere una lunghezza tale da raggiungere il terreno retrostante la grata.

L'intera superficie verrà successivamente seminata e in genere piantata con arbusti autoctoni. Per controllare fenomeni erosivi in grate su forti pendenze, si può proteggere il terreno all'interno delle camere con una biostuoia.

L'altezza massima possibile per le grate vive spondali non supera in genere i 4 - 5 m.

Figura 6.4.40: La grata viva viene generalmente bloccata al piede con una palificata spondale o con una palificata a parete doppia. Una volta posati tutti i pali della struttura, lo spazio vuoto tra la grata e la sponda erosa viene riempito con terreno ed a mano a mano si posano le talee, disposte in ragione di almeno una fila per camera.



Figura 6.4.41: Le talee di salice o di tamericio, sono un elemento costruttivo essenziale della grata viva. Le forti pendenze su cui generalmente si costruiscono tali strutture ed il degrado cui è soggetto il legname, richiedono un consolidamento efficace e di lungo termine. Una volta sviluppatesi le piante, le radici consolideranno il terreno e le parti aeree assorbiranno buona parte dell'energia dell'acqua in occasione di eventi di piena. (Canale c/o Rovigo, loc. Loreo)



Rivestimenti con materiali vivi

Si tratta di rivestimenti realizzati utilizzando come materiale da costruzione solamente o in maniera prevalente piante o parti di esse in grado di radicare e svolgere sia un'azione consolidante che protettiva. Tale ruolo viene svolto dalle piante in due modi: gli apparati radicali legano il terreno e costituiscono un vero e proprio sistema di rinforzo naturale mentre le parti aeree interagiscono con l'acqua assorbendone parte dell'energia deformandosi sotto la sua spinta.

Questi interventi possono comportare l'uso di piante erbacee o piante arbustive; solitamente si evita l'uso di piante arboree in quanto possono assumere dimensioni eccessive e causare problemi sotto il profilo idraulico.

Le piante arbustive sono quelle che esercitano l'azione protettiva più efficace. Se si scelgono delle specie resistenti e flessibili (un esempio classico in ambiente alpino sono i salici), è possibile realizzare rivestimenti con resistenze molto elevate; ad esempio una copertura diffusa al 3° ciclo vegetativo può raggiungere una resistenza di 300 N/mq.

La presenza della vegetazione produce effetti idraulici di cui bisogna tenere conto nella progettazione: la velocità dell'acqua può diminuire significativamente a parità di geometria della sezione di deflusso, in particolare nei piccoli corsi d'acqua. Questo effetto può essere minimizzato con una continua manutenzione che impedisca alle piante di crescere oltre il limite in corrispondenza del quale la rigidità dei fusti impedisce che essi si pieghino al passaggio della corrente.

I rivestimenti con materiali vivi generalmente, a fine costruzione, hanno una efficacia antiersiva molto bassa, per questa ragione si ricorre agli interventi combinati (materiali vivi ed inerti abbinati). Infine giova ricordare che gli interventi con materiali vivi, quando impieghino talee, astoni o piante a radice nuda, vanno sempre realizzati nel periodo di riposo vegetativo.

Figura 6.4.42: Astoni di salice conservati in acqua fredda per prolungarne la possibilità di utilizzo oltre il periodo di riposo vegetativo.

A mano a mano che ci si inoltra nel periodo estivo, nonostante questo sistema di conservazione, la percentuale di attecchimento diminuirà.



Semina a spaglio di specie erbacee

Descrizione e Caratteristiche

Consiste nello spargimento manuale di miscele di sementi sulle sponde da rivegetare, la vegetazione erbacea sviluppandosi esercita un effetto antierosivo superficiale attraverso il reticolo radicale approfondito nel terreno (10-30 cm).

Questa tecnica è adatta per superfici piane o con inclinazioni inferiori a 20° per realizzare rinverdimenti rapidi che, oltre a proteggere dall'azione della corrente, limitino gli effetti dovuti al ruscellamento e l'essiccamento del terreno. Le specie erbacee hanno però un limitato effetto in profondità e la crescita rapida che le caratterizza può ostacolare lo sviluppo di eventuali specie arboree e arbustive.

E' una tecnica inadatta nei casi in cui sia necessaria una funzione protettiva immediata ed inoltre non si addice ai substrati troppo poveri che richiedono apporto di nutrienti, fibra organica, concimanti, ecc. Nei casi di carenze limitate del terreno la semina viene abbinata allo spargimento di concimanti organici e/o inorganici.

La semina deve essere preceduta dalla preparazione del terreno mediante allontanamento del materiale più grossolano e viene eseguita mediante spargimento manuale a spaglio di una miscela di sementi e di eventuali concimanti organici e/o inorganici in quantità e qualità opportunamente individuate.

La composizione della miscela e la quantità di sementi per metro quadro sono stabilite in funzione del contesto ambientale ovvero delle caratteristiche litologiche e geomorfologiche, pedologiche, microclimatiche floristiche e vegetazionali della stazione (in genere sono sufficienti quantità da 30 a 60 g/mq). E' opportuno che la provenienza delle sementi e la germinabilità siano certificate, sia per ottenere risultati migliori, sia per garantire la compatibilità ecologica dell'intervento.

Come per ogni intervento con materiali vivi per una buona riuscita è necessario fare della manutenzione: degli sfalci periodici almeno nel primo anno dopo la semina, alcuni cicli di concimazione e se necessario delle semine di ricalzo.

Descrizione e Caratteristiche

Idrosemina

Per idrosemina si intende il rivestimento della superficie del terreno con una miscela complessa, distribuita per via idraulica per mezzo di una macchina (idrosemnatrice) dotata di botte. La miscela così composta viene sparsa sulla superficie mediante pompe con pressione adeguata, al fine di non danneggiare le sementi stesse.

La miscela deve venire applicata in maniera uniforme, mantenendone la composizione omogenea, a tale scopo l'idrosemnatrice deve essere dotata di un agitatore meccanico interno e di apposite lance per l'applicazione del prodotto. La miscela che viene distribuita sul terreno è costituita da semi, collante, fertilizzanti, ed altre sostanze a seconda della funzione che si richiede al rivestimento.

Differenti condizioni caratterizzanti la sponda e la stazione quali: erodibilità, contenuto in nutrienti e struttura del terreno, pendenza della sponda e clima, richiedono tipologie di idrosemine differenti

A seconda del tipo di componenti presenti nella miscela le idrosemine si distinguono in:

- **idrosemina semplice**
- **idrosemina a mulch a spessore (anche dette potenziate): seme, collante, fertilizzanti, mulch**
- **idrosemina a spessore: seme, collante, fertilizzanti, mulch, torba, paglia**

Dei tipi di idrosemina elencati sopra solo il primo può essere considerato un rivestimento con soli materiali vivi in senso stretto, gli altri infatti prevedono l'associazione delle piante erbacee con materiali inerti che svolgono una funzione di protezione meccanica nelle fasi di germinazione e di radicazione delle piantine.

Come per ogni intervento con materiali vivi per una buona riuscita è necessario fare della manutenzione: degli sfalci periodici almeno nel primo anno dopo la semina, alcuni cicli di concimazione e, se necessario, delle semine di ricalzo.

Al fine di evitare concorrenza tra specie a ciclo vegetativo con differenti velocità è bene limitare l'uso di specie erbacee a rapido accrescimento ed effetto immediato, anche se questo può essere vantaggioso dal punto di vista estetico e funzionale immediato.

Descrizione e Caratteristiche

Idrosemina semplice

Consiste nel rivestimento di superfici mediante lo spargimento con mezzo meccanico di una miscela di sementi, acqua e concime ammendanti e collanti. Lo spargimento avviene mediante l'impiego di una idrosemiatrice, nella quale vengono miscelati i componenti. L'effetto antierosivo di questa idrosemina è simile a quello di una semina a spaglio in più la presenza dei collanti garantisce la protezione delle sementi durante la prima fase della germinazione. La rapida crescita di vegetazione, oltre a fornire una protezione antierosiva, instaura nel breve periodo un ambiente idoneo per la microfauna. E' una idrosemina adatta a superfici caratterizzate da scarsità di humus, mediamente acclivi e aree di notevole sviluppo superficiale.

La composizione della miscela generalmente è la seguente:

- miscela di sementi idonea alle condizioni locali (in genere si prevedono 30-40 g/mq);
- collante in quantità idonea al fissaggio dei semi e alla creazione di una pellicola antierosiva sulla superficie del terreno, senza inibire la crescita e favorendo il trattenimento dell'acqua nel terreno nelle fasi iniziali di sviluppo;
- fertilizzanti;
- acqua in quantità idonea alle diluizioni richieste;
- inoculi.

La provenienza e la germinabilità delle sementi dovranno essere certificate e la loro miscelazione con le altre componenti dell'idrosemina dovrà avvenire in loco, per evitare fenomeni di stratificazione gravitativa dei semi all'interno della cisterna se questa non è dotata di agitatore.

Descrizione e Caratteristiche

Idrosemina con Mulch

E' una idrosemina in cui la miscela è composta da: sementi, acqua e concime ammendanti e collanti e mulch.

Il mulch è una coltre in grado di fornire protezione meccanica e di svolgere un'azione regolatrice nei confronti dell'umidità. I materiali utilizzati a tale scopo sono molti, a volte bizzarri. Tra questi, quelli che oggi hanno la diffusione maggiore sono quelli a base di fibre di legno e di pasta di cellulosa: prodotti a base organica in grado di arricchire i terreni poveri e di assorbire significative quantità di acqua. Le fibre di legno, se di lunghezza opportuna, sono particolarmente efficaci in quanto hanno la capacità di formare una copertura dotata di una certa porosità, grazie alla strutturazione che conferiscono le fibre concatenandosi per mezzo del collante. In tal modo il rivestimento che si ottiene, pur avendo resistenza meccanica, non soffoca il seme assorbendo acqua regola l'umidità isolandolo termicamente sia da temperature troppo basse che da un irraggiamento solare eccessivo.

Questo tipo di idrosemina offre una protezione efficace a breve termine su sponde inclinate fino a 45°, costituite da terreni non troppo poveri in nutrienti.

Descrizione e Caratteristiche

Idrosemina a spessore

Ha caratteristiche simili all'idrosemina a mulch, ma è più ricca di materiale organico e caratterizzata da uno spessore più elevato (1-2 cm).

La miscela usata per realizzare l'idrosemina a spessore ha la stessa composizione di quella con mulch, con l'aggiunta di torba (bionda e bruna). Questo tipo di idrosemina viene messa in opera distribuendo la miscela, con l'idrosemminatrice, in due passaggi distinti: si crea dapprima una base ricca di materia organica usando la torba, il collante, un po' di mulch, fertilizzanti e concimi; al secondo passaggio invece la miscela applicata è molto più ricca di mulch, in modo da riportare uno strato di protezione meccanica sopra il precedente.

Questo tipo di idrosemina è particolarmente adatta per terreni poveri di nutrienti e di materiale organico, con inclinazioni fino a 50-60°. Per le caratteristiche descritte sopra l'idrosemina a spessore viene utilizzata per il rinverdimento di terre rinforzate.

Descrizione e Caratteristiche

Matrice di fibre legate

E' a tutti gli effetti un rivestimento di scarpate fabbricato in opera. Viene realizzato con la tecnica dell'idrosemina, impiegando, al posto del mulch una miscela di fibre di legno lunghe (almeno il 50% devono essere lunghe non meno di 1 cm) ed un collante molto potente. Quest'ultimo viene usato in quantità consistenti (10 % in peso) per assicurare la formazione di legami molto resistenti tra le fibre di legno. Date le quantità di collante utilizzate è necessario che questo sia di natura organica non inquinante ed al tempo stesso non dilavabile dall'acqua.

Il risultato è la formazione di una pellicola continua dotata di resistenza meccanica significativa che riveste il terreno senza lasciare spazi vuoti, ma mantenendosi porosa ed igroscopica.

La capacità di assorbire acqua di queste miscele è molto elevata e questo consente di creare condizioni di umidità ideali per la crescita della vegetazione. Si tratta di un sistema che garantisce protezione su pendenze molto forti ed in grado di resistere anche al dilavamento dovuto alla corrente qualora si alzi il livello dell'acqua lungo la sponda.



Figura 6.4.43: Asperzione della miscela di matrice a fibre legate sulla sponda di un canale. La copertura deve essere completa e ed effettuata con quantità minime di prodotto per mq, al di sotto delle quali non bisogna scendere per ottenere risultati ottimali. L'idrosemminatrice usata per l'applicazione, deve possedere una pompa volumetrica per non rovinare i semi frantumandoli e deve essere dotata di lance idonee allo spargimento omogeneo della miscela. A distanza di qualche mese dall'applicazione, la copertura erbacea si è sviluppata molto bene su tutta la sponda mostrata nella foto precedente.

Descrizione e Caratteristiche

Messa a dimora di talee

Si realizza mediante infissione nel terreno o nelle fessure tra massi di una scogliera di talee legnose e/o ramaglie di specie vegetali con capacità di propagazione vegetativa. Le piante più usate per questa tecnica sono certamente i salici, ma questi non sono adatti a tutti gli ambienti in Italia. In ambiente mediterraneo in alternativa si potranno ad esempio usare il ligustro, l'oleandro e le tamerici, specie quest'ultima resistente a condizioni alterne di forte aridità e presenza di sali nel terreno.

Questa tecnica ha un effetto consolidante che è tanto più marcato quanto maggiore è la profondità cui vengono infisse le talee. Se si usano i salici inoltre si ottiene anche una funzione di drenaggio dovuto ad assorbimento e traspirazione del materiale vivo impiegato.

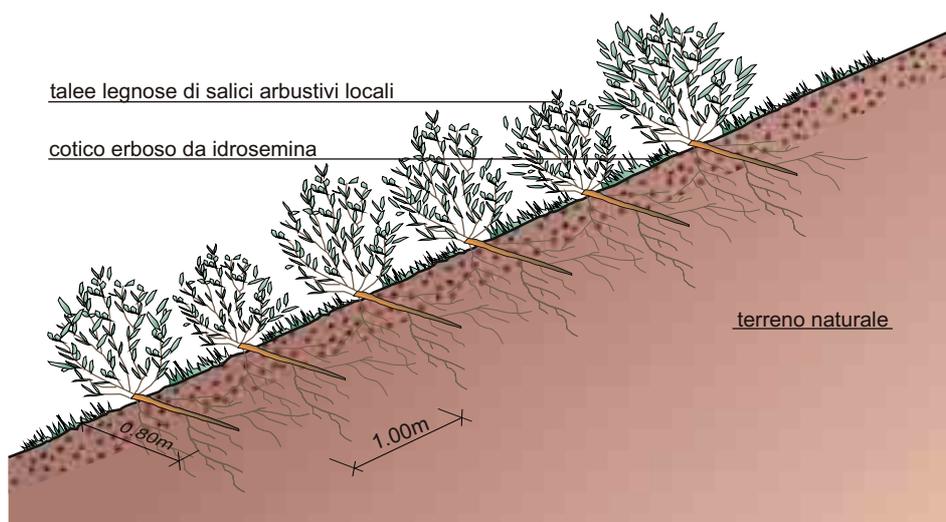
La piantagione di talee viene utilizzata per la rivegetazione e stabilizzazione di superfici spondali di neoformazione svolge una azione inizialmente puntuale e di bassa efficacia ma estesa e coprente dopo lo sviluppo (6 mesi-1/2 anni).

Questa tecnica si addice a sponde a pendenza limitata, sia fluviali che lacustri, su vari tipi di substrato; purché non litoidi e particolarmente serici; non può essere invece applicata in presenza di regimi torrentizi con correnti e trasporto solido particolarmente elevati.

La messa a dimora di talee va eseguita nel periodo di riposo vegetativo e come tutti gli interventi con materiali vivi richiede della manutenzione: saltuarie potature di irrobustimento e sfoltimento per evitare popolamenti monospecifici.

La messa a dimora di talee si effettua impiegando getti non ramificati, di 2 o più anni, $d = 1-5$ cm, $L = 0,50 - 0,80$ m, di piante legnose in genere arbustive con capacità di propagazione legnosa; per le tamerici vengono usate di preferenza le ramaglie in fronda mentre la talea vera e propria ha minori capacità di rigetto. Le talee vengono infisse nel terreno lasciandole sporgere al massimo per un quarto della loro lunghezza e comunque non più di 10-15 cm. La densità di impianto in genere varia tra 2 e 10 talee per mq a seconda delle necessità di consolidamento

Figura 6.4.44: La sezione mostra la disposizione delle piante nella messa a dimora di talee. Il terreno deve consentire l'infissione per almeno 50-80 cm le talee debbono essere inclinate leggermente sull'orizzontale.



Descrizione e Caratteristiche

Piantazione di arbusti

Consiste nella messa a dimora di giovani arbusti autoctoni di produzione vivaistica in zolla o in vasetto. In alternativa si può ricorrere al trapianto a radice nuda, molto usato nelle zone alpine italiane ma poco proponibile nelle regioni centro-meridionali. Generalmente la piante utilizzate sono a comportamento pioniero appartenenti agli stadi corrispondenti della serie dinamica potenziale naturale del sito.

Questa tecnica ha una funzione consolidante: con il tempo si forma un fitto reticolo radicale di protezione dall'erosione; la piantazione di arbusti inoltre contribuisce ad aumentare la biodiversità, grazie anche all'instaurarsi di un ambiente idoneo ad ospitare numerose specie animali.

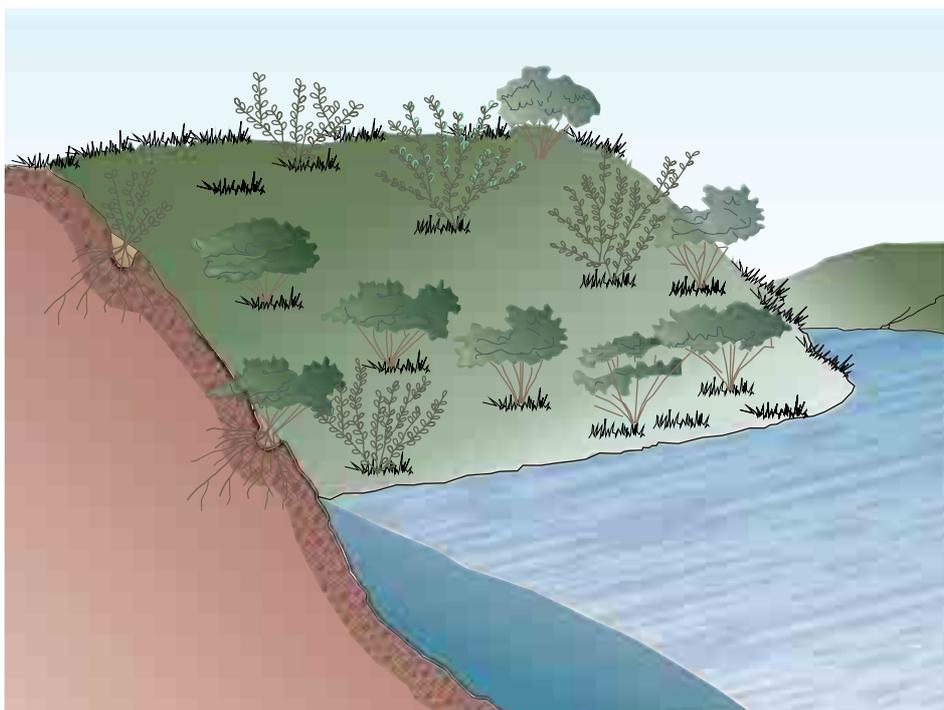
Questa tecnica è adatta a superfici a bassa pendenza con presenza di suolo organico e può essere abbinata alle stuoie, rivestimenti vari, grate e palificate, terre rinforzate ecc. Non è adatta invece ove vi siano eccesso di ombreggiamento e di aridità estiva o prolungati periodi di sommersione.

Le piante, di altezza minima compresa tra 0,30 e 0,80 m e accompagnate da certificazione di origine del seme o materiale da propagazione, vengono poste a dimora in buche di dimensioni prossime a quelle dell'apparato radicale o della zolla avendo cura, se necessario, di apportare terreno vegetale, fibra organica, fertilizzanti ed ammendanti. Le piante possono essere disposte in ragione di 1 esemplare ogni 3-20 mq. Generalmente è necessario provvedere alla pacciamatura con dischi o biofeltri o strato di corteccia di resinose per evitare il soffocamento e la concorrenza derivanti dalle specie erbacee.

Ove necessario inoltre si deve sorreggere la pianta con un palo tutore ed eventualmente provvedere a difenderla mediante reti di protezione faunistica.

Le piante a radice nuda potranno essere trapiantate solo durante il periodo di riposo vegetativo, mentre per quelle in zolla, contenitore o fitocella il trapianto potrà essere effettuato anche in altri periodi tenendo conto delle stagionalità locali e con esclusione dei periodi di estrema aridità estiva o gelo invernale.

Figura 6.4.45: La messa a dimora di arbusti è un valido metodo per ricreare condizioni naturali sulla sponda e consolidarla seppur in tempi più lunghi rispetto a quanto è possibile con i salici. La possibilità di usare piante in vaso od in fitocella consente di intervenire anche nei periodi in cui le piante non sono a riposo vegetativo.



Descrizione e Caratteristiche

Trapianto di rizomi e di cespi

Si tratta di una tecnica utilizzata per la propagazione delle specie di difficile reperimento in commercio e di difficile propagazione per seme, come ad esempio *Phragmites australis* e *Typha* in zone palustri.

Dal selvatico vengono prelevati rizomi e cespi in pezzi di alcuni centimetri. Questi vengono posti a dimora sul terreno e poi ricoperti con uno strato leggero di terreno, onde evitarne il disseccamento.

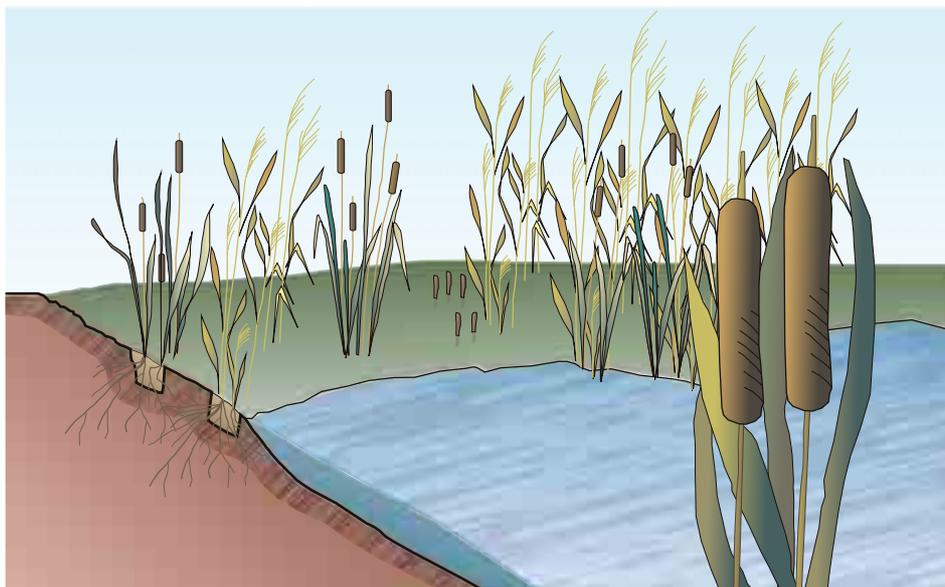
Questa tecnica garantisce una copertura del terreno rapida e più efficace rispetto a quella ottenibile con la semplice semina e consente di introdurre specie rapidamente edificatrici e di difficile reperimento commerciale sfruttando materiale reperibile nei pressi del luogo di intervento.

Il trapianto di rizomi e di cespi è adatto alle sponde fluviali, lacustri e paludi costiere salmastre nonché in ambienti igrofilo e su substrati non drenanti.

Sotto il profilo del consolidamento questa tecnica è meno efficace rispetto all'impiego di piante nate da seme in quanto la radicazione non è altrettanto profonda, ma ha certamente un'ottima valenza ecologica. Svantaggi del trapianto di rizomi e di cespi sono l'elevato consumo di materiale ed lavoro lungo e impegnativo.

Il trapianto va eseguito all'inizio o al termine del periodo di riposo vegetativo in ragione di 3-5 pezzi per mq.

Figura 6.4.46: Trapianto di rizomi e di cespi.



Descrizione e Caratteristiche

Viminata viva spondale

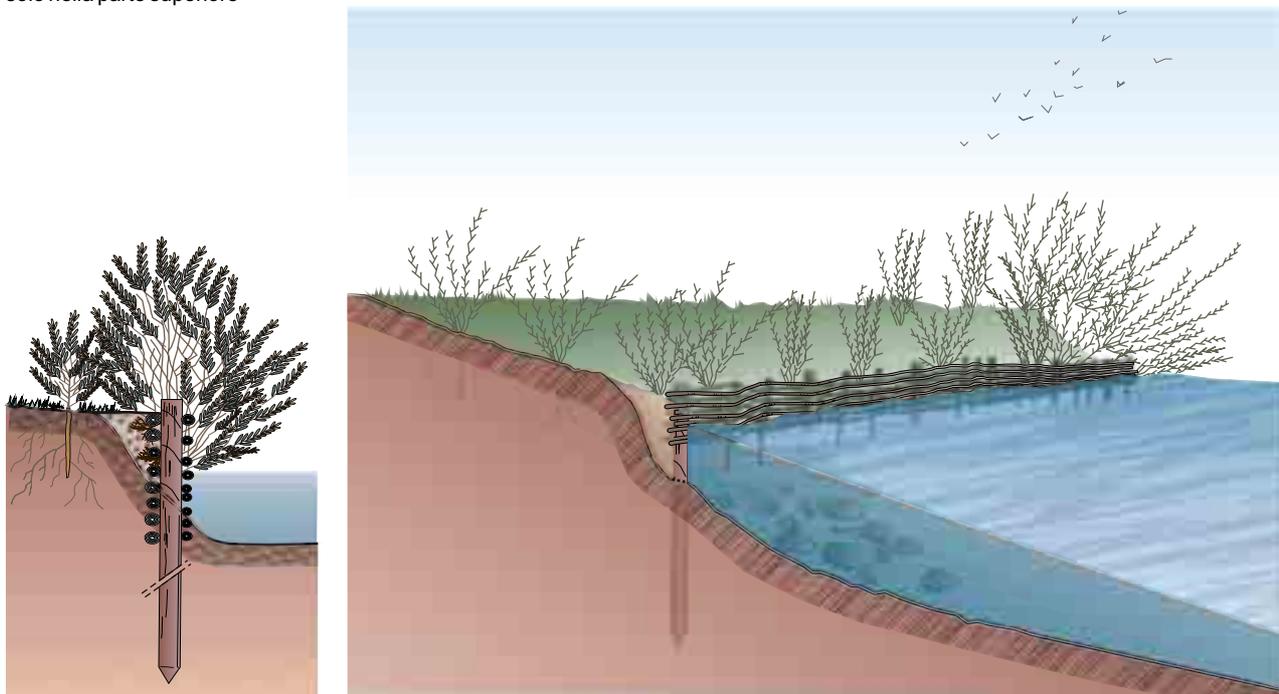
La viminata viva è costituita da un intreccio di verghe, attorno a paletti in legno, di specie legnose, con capacità di propagazione vegetativa, disposte in modo da formare una piccola parete verticale addossata al terreno della sponda, alta fino a 50 cm.

Questa piccola struttura consolida immediatamente gli strati superficiali di terreno spingendo in profondità il proprio effetto quando le verghe emettono radici. Le vimate spondali vengono utilizzate su sponde di piccoli corsi d'acqua per creare dei piccoli terrazzamenti o sostegni spondali di presidio del piede e generalmente sono costituite da una sola fila parallela alla direzione del flusso. La tecnica è applicabile lungo corsi d'acqua con velocità della corrente medio-bassa e trasporto solido ridotto.

La viminata spondale offre il vantaggio di una rapida stabilizzazione di piedi di sponda in erosione e di una notevole adattabilità alla morfologia della scarpata, ma la sua applicabilità è condizionata dal fatto che richiede una notevole mano d'opera e grandi quantità di verghe lunghe ed elastiche da intrecciare; inoltre poiché si usano verghe dotate di capacità di propagazione vegetativa, gli interventi vanno realizzati durante il periodo di riposo vegetativo.

La struttura viene realizzata con paletti di legno (resinosa, castagno) di $\varnothing = 8-15$ cm, di lunghezza 100-150 cm infissi verticalmente lungo la sponda per una altezza fuori terra di circa 50 cm, posti alla distanza massima di 1 m uno dall'altro. I paletti vengono collegati tra loro da verghe di salice vivo o altra specie legnosa con capacità di propagazione vegetativa, di almeno 150 cm di lunghezza, intrecciate sui paletti e legate con filo di ferro. Il contatto con il terreno spondale deve essere assicurato in ogni punto per consentire l'attecchimento e radicazione delle piante.

Figura 6.4.47: Lo schema mostra una viminata spondale, usata per proteggere la piccola sponda di un corso d'acqua. Posta parzialmente sotto il livello dell'acqua, la struttura ricaccerà solo nella parte superiore



Descrizione e Caratteristiche

Ribalta viva

E' costituita da strati alterni di fascine vive, disposte longitudinalmente alla sponda, e ramaglia viva di salici, disposta trasversalmente, sopra il livello medio dell'acqua. Al fine di ricostituire una sponda erosa tale modulo va ripetuto fino al riempimento dell'erosione e al raggiungimento dell'altezza desiderata. Si completa a tergo delle fascine con riempimento di inerte. Al di sotto del livello medio dell'acqua si pone materiale morto. Le fascine vengono fissate con paletti di legno e ferro, disposti con orientazione alternata.

Questa tecnica viene usata nei ripristini spondali in corsi d'acqua ad energia media quando non si può migliorare la stabilità della sponda diminuendone la pendenza. La ribalta viva ha un'efficacia immediata poiché la ramaglia esercita una protezione meccanica e rallenta l'acqua diminuendone la capacità erosiva; col tempo la capacità protettiva aumenta grazie alla radicazione delle verghe di salice.

La ribalta viva va impiegata tenendo in considerazione gli effetti che avrà sul regime di flusso delle acque: i salici sviluppandosi causano una diminuzione della sezione idraulica ed inoltre la disposizione delle fascine e gradonate, soprattutto se troppo sporgenti, può produrre turbolenze in grado d'innescare fenomeni erosivi.

Questa tecnica comporta l'uso di grandi quantità di materiali vivi e deve essere realizzata solamente nei periodi di riposo vegetativo.

La ricostruzione spondale si effettua per mezzo di strati alterni di fascine vive di $\varnothing=25-30$ cm e ramaglia viva di Salici, Tamerici o altra specie legnosa con capacità di riproduzione vegetativa. Le fascine vengono collocate lungo la sponda in modo da ridisegnarne l'andamento, si fissano con dei picchetti e vengono poi riempite a tergo con inerti. Sopra la fascina si pone uno strato di ramaglia viva ed il modulo così descritto viene ripetuto fino alla completa ricostruzione della sponda. La ramaglia, eventualmente disposta in obliquo rispetto alla corrente, andrà legata con molti punti di legatura e fissata con piloti in funzione dell'entità delle tensioni di trascinamento della corrente previste. La base della sponda, al di sotto del livello dell'acqua, deve venire protetta con materiali inerti. Pertanto l'operazione di ricostruzione viene preceduta dalla posa di una fascina morta di $\varnothing=60$ cm o di blocchi di scogliera, a seconda delle necessità.

Figura 6.4.48: Disegno schematico di una ribalta viva, il materiale vivo viene impiegato solo al di sopra del livello medio dell'acqua, sia nelle fascine che nella ramaglia.

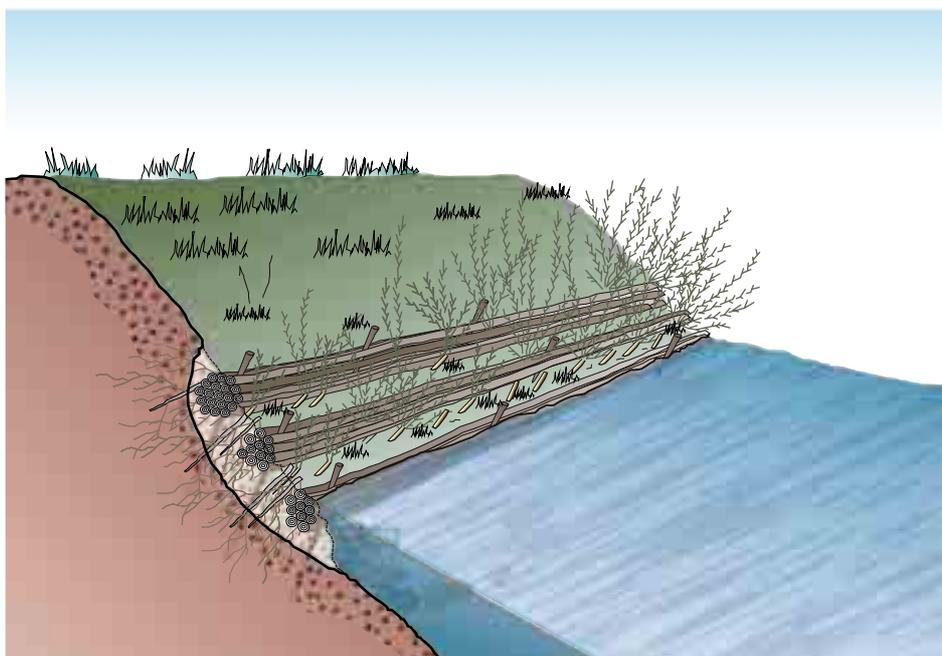


Figura 6.4.49: La ribalta viva nella parte al di sotto del livello medio dell'acqua sarà costituita da materiale inerte. Il presidio del piede può essere reso più efficace mettendo del pietrame dentro la fascina per appesantirla o sostituendo quest'ultima con una piccola scogliera.

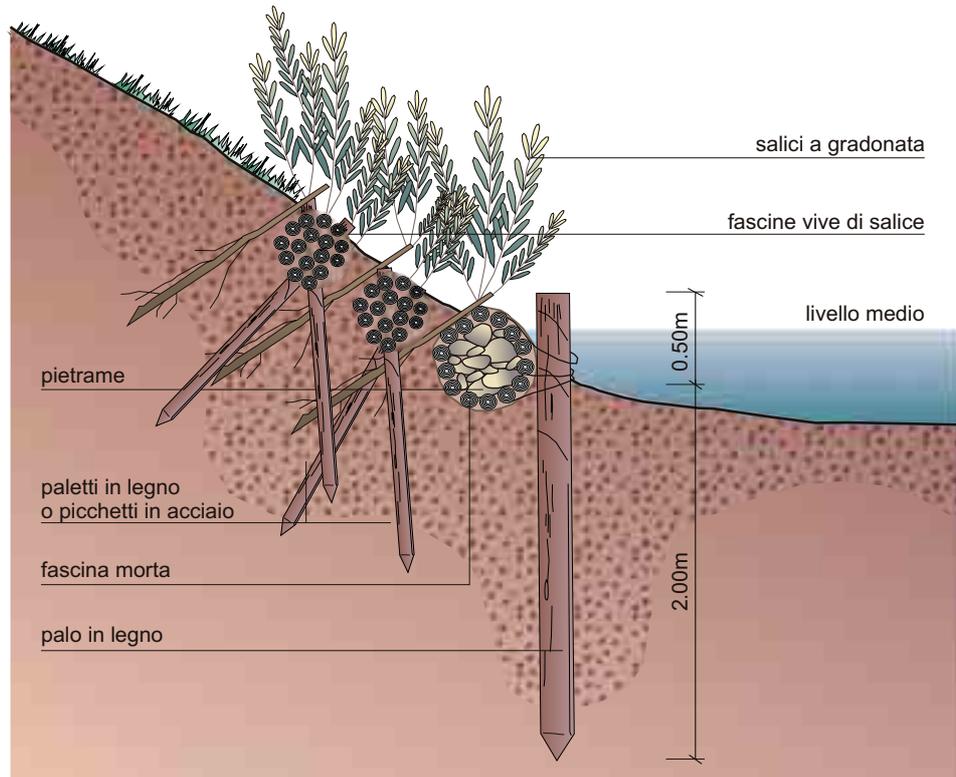


Figura 6.4.50: Costruzione di una ribalta viva: si stanno posando gli elementi trasversali (in questo caso delle talee al posto della ramaglia). Al di sopra verrà posata una ulteriore fascina e poi si completerà con un riempimento con terreno nella parte sommitale dell'opera. Sponda sin. Immissario lago di Lugano.



Descrizione e Caratteristiche

Copertura diffusa con ramaglia viva o con astoni

Questa tecnica consiste nella stesura sulla superficie di una sponda di ramaglia viva di specie vegetali con capacità di propagazione vegetativa (ad es. Salici, Tamerici). La ramaglia viene posta perpendicolarmente alla direzione della corrente ed è fissata al substrato mediante filo di ferro teso tra picchetti e paletti vivi e/o morti. Gli strati di ramaglia, disposti in tal modo coprono la superficie della sponda proteggendola, sin dalla messa in opera, dall'erosione esercitata dalla corrente.

La resistenza alle tensioni tangenziali di questa tecnica, aumenta progressivamente con lo sviluppo delle radici e può arrivare a valori molto elevati, passando dai 50 N/mq di inizio lavori ai 300 N/mq dopo il 3° periodo vegetativo. E' una tecnica adatta a sponde di corsi d'acqua che necessitano di una protezione continua ed elastica, in grado di sviluppare un effetto minimale immediato.

Questa tecnica pur resistendo a tensioni tangenziali elevate non è adatta a corsi d'acqua con velocità della corrente e trasporto solido notevoli.

Figura 6.4.51: Lo schema mostra la disposizione della ramaglia su una sponda. Al piede sono stati posati dei blocchi per proteggere il rivestimento nel punto più critico. Sono ben visibili gli astoni correnti che vengono usati per fissare la ramaglia e mantenerla aderente alla sponda.

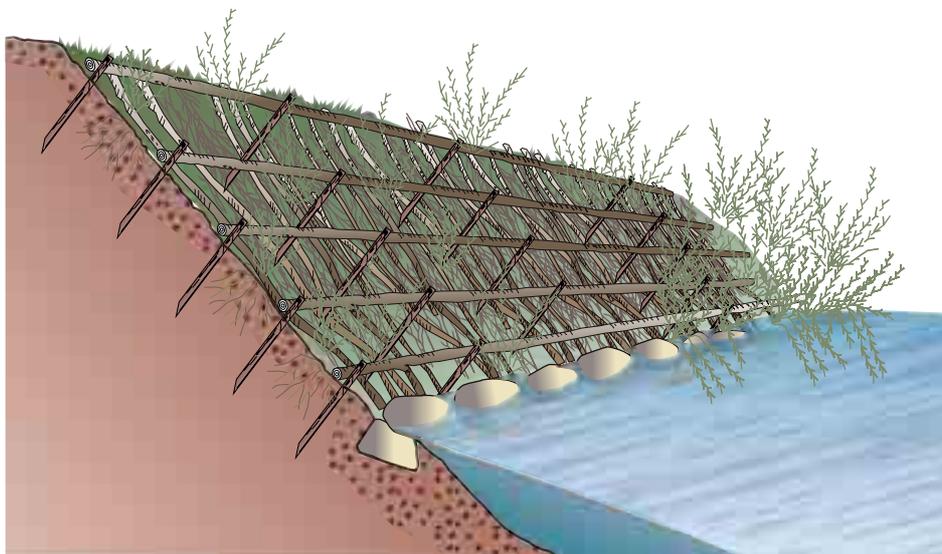


Figura 6.4.52: Realizzazione di una copertura diffusa con astoni di salice. Si osservino i paletti verticali usati per fissare i correnti che verranno posati successivamente sugli astoni.



Descrizione e Caratteristiche

La copertura diffusa comporta un elevato impiego di materiale vivo e richiede tempi lunghi per la posa in opera. Nel tempo è necessaria la manutenzione con tagli di potatura e sfoltimento per evitare una crescita irregolare delle piante.

Una controindicazione di natura ecologica di questa tecnica è la tendenza alla formazione di fitocenosi monospecifiche di salice.

La copertura diffusa viene realizzata rivestendo la sponda, precedentemente rimodellata, per mezzo di ramaglia viva disposta con densità di 20-50 verghe o rami per metro, di lunghezza minima di 150 cm. Le piante vengono disposte perpendicolarmente alla corrente intercalate da paletti di castagno infissi per almeno 60 cm e sporgenti per 20 cm, collocati in file distanti 1 m e con interasse da 1 a 3 m a seconda della pressione idraulica.

La parte inferiore dei rami dovrà essere infissa nel terreno o nel fondo e lo strato inferiore dovrà coprire lo strato superiore con sormonto di almeno 30 cm.

La ramaglia verrà fissata ai paletti tramite filo di ferro o correnti in legno, astoni vivi, fascine vive e ricoperta con un sottile strato di terreno vegetale. La base della sponda verrà poi consolidata con una fascina viva o morta o con una fila di tronchi o con blocchi di pietrame (di dimensioni minime di 0,2 mc) eventualmente collocati in un fosso preventivamente realizzato.

Una variante di questa tecnica è detta copertura diffusa "armata" e consiste nell'uso al piede di blocchi di pietrame che vengono collegati con una fune di acciaio fissata a pali di legno o di ferro, onde consentire una maggior protezione al piede, pur conservando una certa elasticità. Il periodo migliore di esecuzione è il tardo autunno.



Figura 6.4.53: La costruzione della copertura diffusa e terminata, la sponda è coperta in maniera continua dalla ramaglia, che è solidamente fissata alla sponda per mezzo dei correnti ancorati ai paletti verticali. Nel giro di un anno si imposterà una vegetazione fitta ed elastica, dotata di una capacità protettiva molto elevata.

Generalità

I presidi al piede sono opere di altezza limitata, costruite a difesa del piede di sponde di piccoli corsi d'acqua e canali. Queste strutture vengono realizzate in corrispondenza di un punto particolarmente importante per la stabilità della sponda: il piede infatti è il punto in cui si concentrano gli sforzi di taglio nel terreno e la fascia soggetta ai maggiori valori di sforzi tangenziali dovuti alla corrente ed è la zona sommersa e/o soggetta ai cicli di imbibizione e disseccamento. Per tali ragioni spesso i fenomeni di instabilità si originano in corrispondenza del piede e poi si estendono al resto della scarpata; il presidio al piede pertanto è un intervento molto efficace sia breve che a lungo termine, i cui benefici si estendono a tutta la sponda, e per le sue dimensioni contenute comporta un basso impatto ambientale.

I presidi al piede debbono essere realizzati generalmente con sistemi combinati (materiale inerte/materiale vivo) sia per garantire un effetto di protezione immediato sia perché nella parte sommersa la funzione stabilizzante deve essere svolta da materiali inerti ed in grado di garantire una durabilità elevata.

Per tali ragioni normalmente si abbinano pietrame, gabbioni cilindrici in rete metallica a doppia torsione o buzzoni nella parte bassa (materiali inerti durabili) con fascine vive, fascine morte con talee, cilindri di cocco con talee ecc. (materiali vivi o combinati vivo/inerte degradabile). Generalmente a queste opere si abbinano i rivestimenti spondali combinati o vivi a difesa della parte emersa della sponda, in modo da ottenere un sistema integrato di difesa della sponda limitando al massimo l'impatto ambientale delle opere.

Figura 6.5.1: L'immagine mostra una sponda di un canale sperimentale (AIPIN, Consorzio di Bonifica Adige-Polesine Canal Bianco, Officine Maccaferri), con sponde in argilla dove è evidente l'effetto dell'imbibizione sulla sponda non protetta a sinistra della foto. Il piede è soggetto a piccoli scoscendimenti che si propagano verso l'alto.



Figura 6.5.2: Esempio di presidio al piede realizzato mediante la sovrapposizione di cilindri in fibre di cocco a gabbioni cilindrici in rete metallica a doppia torsione riempiti di pietrame. I due elementi lineari addossati alla sponda sono sorretti da pali di legno di castagno infissi profondamente nell'alveo. Al di sopra dei cilindri di cocco sono state poste delle talee di salice e la sponda è stata rivestita con rete metallica a doppia torsione accoppiata con una geostuoia tridimensionale che verrà successivamente rinverditata con una idrosemina aspersore.



Descrizione e Caratteristiche

Fascinata spondale viva di specie legnose

La tecnica consiste nel mettere a dimora fascine vive di specie legnose con capacità di riproduzione vegetativa. Queste vengono poste in un solco, la cui base può essere rivestita da ramaglia e vengono assicurate mediante l'infissione di picchetti di legno per rendere così la struttura più elastica e solidale in caso di piena. Grazie a queste opere si ottiene un effetto stabilizzante immediato della sponda con un'efficacia crescente dal momento in cui le piante emettono le radici.

Sono interventi adatti a corsi d'acqua caratterizzati da media energia della corrente con portate e livello medio relativamente costanti che permetta che la fascina si trovi fuori dall'acqua per almeno tre mesi durante il periodo di vegetazione.

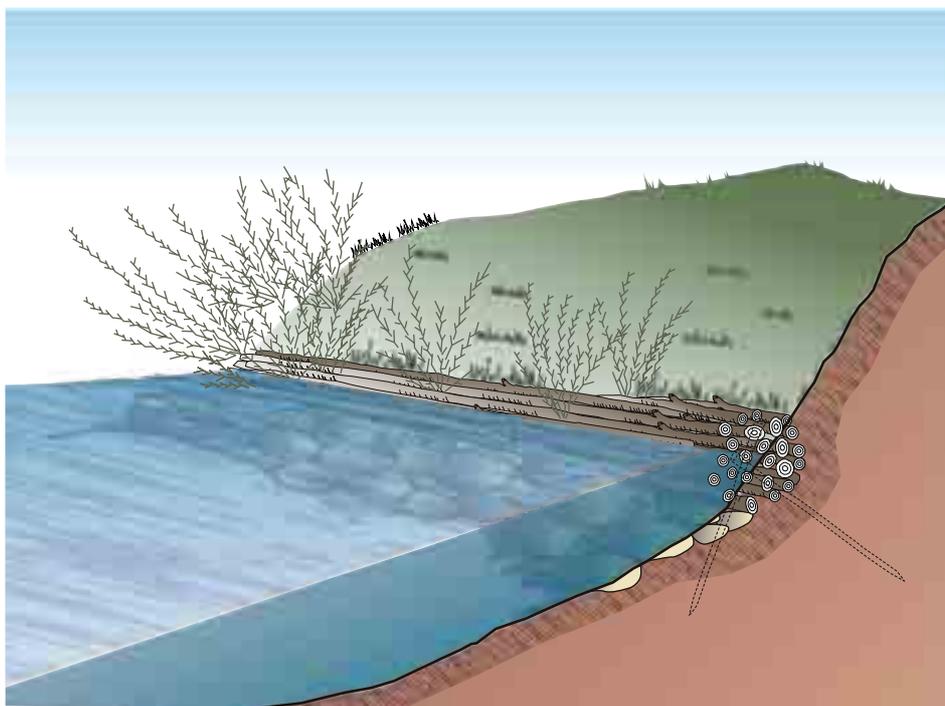
Queste opere richiedono che si preveda lo spazio necessario per il regolare deflusso delle acque in quanto determinano un restringimento dell'alveo. Il restringimento può divenire critico in caso di totale attecchimento delle piante: in tal caso è necessario intervenire con manutenzioni di potatura periodiche.

Le fascine vengono realizzate con rami vivi di specie legnose adatte alla riproduzione vegetativa (salici, tamerici,) mescolati a rami morti di altre specie, hanno un \varnothing variabile da 20 a 50 cm legate con intervalli di 30 cm con filo di ferro cotto di 2-3 mm. Le fascine così predisposte vengono poste in modo da sporgere per $1/2 \div 1/3$, in un solco scavato al piede della sponda, su uno strato di rami che sposteranno per almeno 50 cm da sotto la fascina fuori dall'acqua. Le fascine vengono poi fissate ogni 0,8-1 m con pali di salice vivi o con barre in ferro e vengono rinalzate con terreno per garantire la crescita delle piante.

Nella fascinata in versione "rinforzata", fino all'altezza della portata di magra, l'alveo viene rivestito con massi di varia dimensione a rinforzo basale della parte sommersa.

La messa in opera di questa tecnica può avvenire soltanto durante il periodo di riposo vegetativo.

Figura 6.5.3: La figura mostra una fascinata spondale dotata di una protezione in pietrame che riveste la sponda nella porzione interessata dal livello di magra. Il fissaggio con paletti alla sponda impedirà che possa venire rimossa dalla corrente fino a quando non saranno attecchite le verghe.



Descrizione e Caratteristiche

Palificata spondale con palo verticale frontale

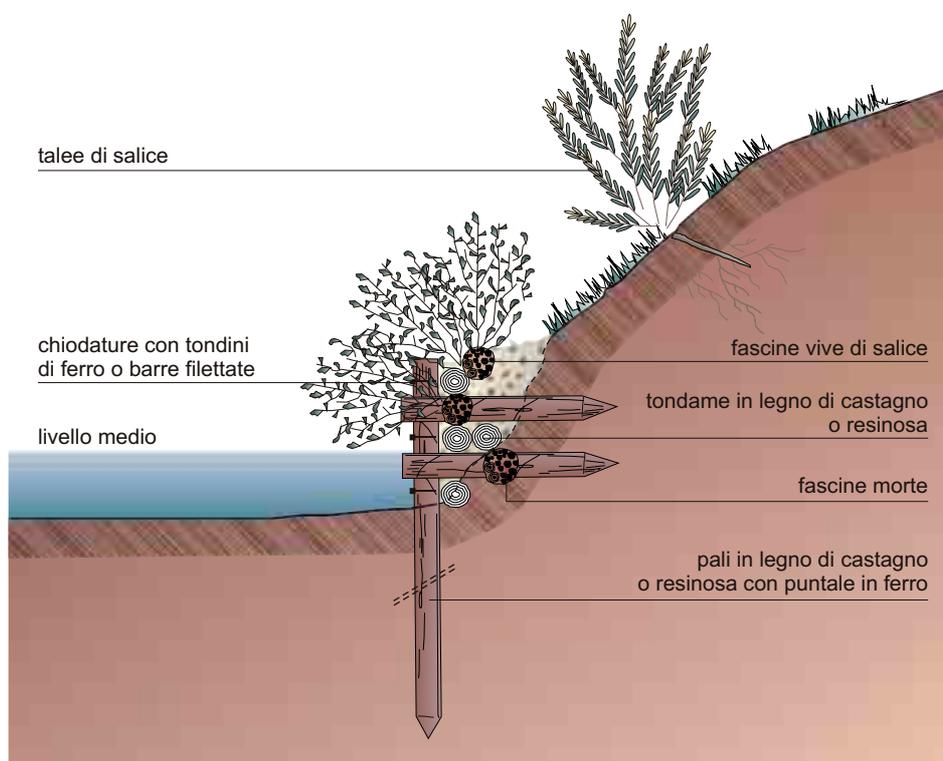
Questo tipo di struttura consiste in un' incastellatura di tronchi a formare camere frontali dietro le quali vengono inserite fascine. I tronchi correnti e quelli trasversali vengono inchiodati su pali frontali verticali infissi nel terreno di fondazione.

L'opera, addossata alla sponda in erosione, viene riempita con terreno sopra il livello medio dell'acqua, mentre al di sotto si pone del pietrame.

La struttura è adatta al presidio al piede di sponde soggette ad erosione laddove sia sufficiente proteggere per una altezza non superiore agli 80-100 cm e sia possibile infiggere i pali nell'alveo, la sponda non deve essere affetta da problemi significativi di instabilità.

L'efficacia dell'opera è immediata e cresce nel tempo grazie alla radicazione delle piante; le palificate spondali inoltre hanno il pregio di consentire la rapida ricostruzione di habitat per microfauna acquatica.

Figura 6.5.4: La palificata di sponda con palo verticale frontale è un valido presidio per il piede di sponde di corsi d'acqua poco profondi. Viene realizzata con tronchi disposti trasversalmente e longitudinalmente rispetto alla sponda che vengono collegati mediante chiodature. Per aumentare la stabilità dell'opera questa viene bloccata verso l'acqua con pali verticali. I materiali vivi vengono messi a dimora sotto forma di fascine di diametro maggiore dei tronchi, poste dall'interno a chiudere gli spazi tra i pali.



La struttura è costituita da tondami di castagno o di resinosa di $\varnothing=20-25$ cm e di 3-5 m di lunghezza, infissi verticalmente per almeno 2/3 e addossati alla sponda stessa, dietro i quali vengono collocati tronchi orizzontali, paralleli alla sponda, alternati ad altri tronchi di minimo 1 m di lunghezza inseriti nella sponda in senso ortogonale ad essa.

I singoli tondami vengono fissati l'uno all'altro con chiodi o barre filettate in tondino $\varnothing=14$ mm. Per impedire lo sviluppo di fenomeni erosivi, gli interstizi tra i tronchi longitudinali vengono riempiti con pietrame o con gabbioni cilindrici sino al livello di magra dell'acqua. Negli interstizi sovrastanti vengono inserite a tergo e rinalzate con inerte terroso, fascine di salice (o tamerici in acque salmastre).

Per aumentare gli effetti sotto il profilo ambientale si possono creare tane per ittiofauna ricavando delle nicchie nella parte sommersa individuate per mezzo di pareti in legname all'interno del riempimento in pietrame.



Figura 6.5.5: Le fascine poste dietro la palificata, debbono impedire l'erosione da parte dell'acqua tra un palo e l'altro, ma debbono essere anche dotate di capacità vegetativa per attecchire e consolidare permanentemente la struttura. Torrente Corno c/o, Varno (UD)



Figura 6.5.6: I salici della palificata hanno attecchito, nel giro di pochi mesi la sponda sarà rivegetata e si creeranno condizioni favorevoli per l'insediamento della fauna sia acquatica che terrestre.

Descrizione e Caratteristiche

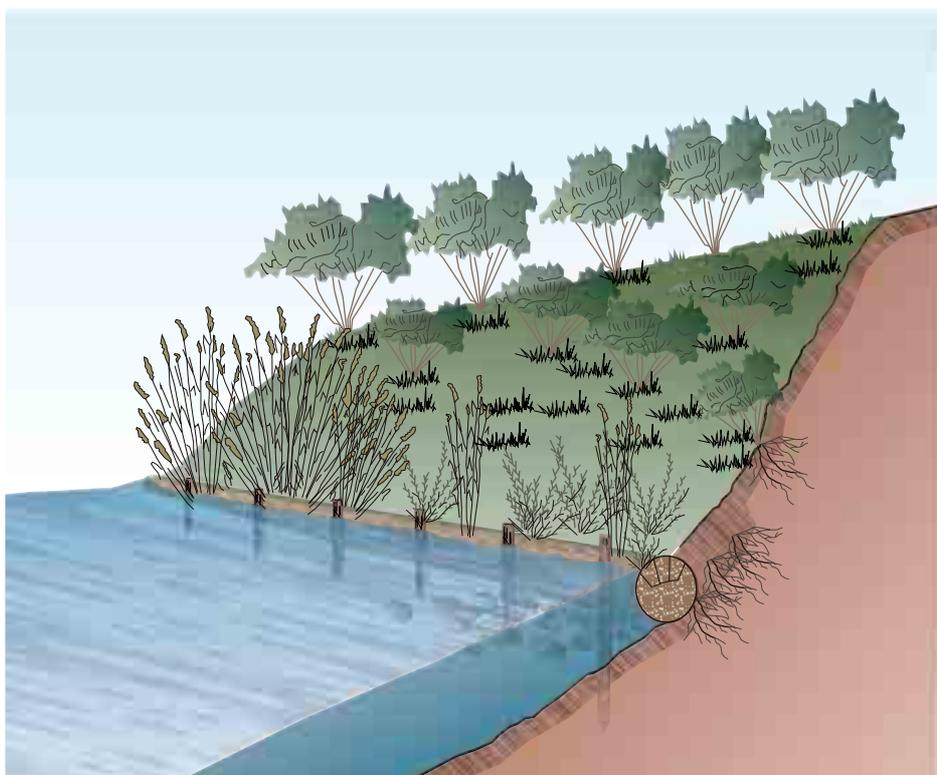
Rullo spondale con zolle (pani) di canne

Si tratta di un cilindro in rete metallica zincata e plasticata o in rete sintetica, foderato con una geostuoia sintetica o un feltro di fibre vegetali, riempito con una miscela di ghiaia e sabbia. Nella parte superiore si mettono a dimora con pani di canne o altre piante igrofile. Per impedire la rimozione da parte della corrente i cilindri vengono ancorati con pali di legno frontali.

Questa tecnica è adatta alla protezione di canali in erosione, corsi d'acqua a bassa pendenza, sponde lacustri, in situazioni caratterizzate da modeste oscillazioni del livello dell'acqua.

Si ottiene un rapido effetto di consolidamento e rinaturalizzazione delle sponde e golene legato al rapido sviluppo del canneto consentendo di creare habitat adatti all'insediamento di avifauna ed ittiofauna.

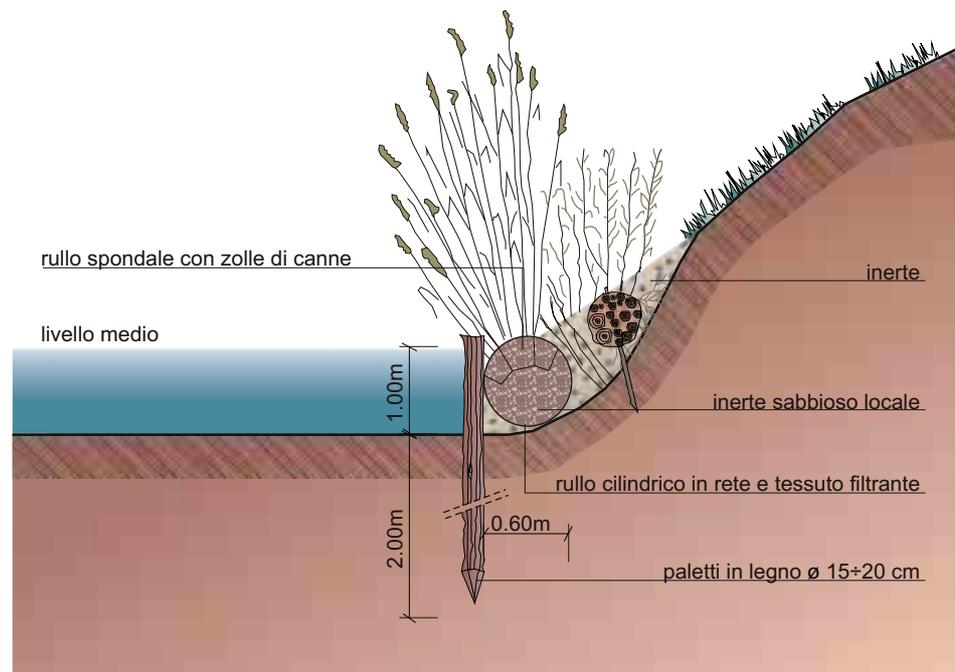
Figura 6.5.7: Lo schema mostra le caratteristiche di un presidio al piede realizzato con la tecnica del rullo con zolle di canne. Si tratta di un rullo fabbricato riempiendo con inerti un telo di rete metallica a doppia torsione a maglie esagonali o in rete sintetica, avvolto a cilindro e foderato con un materiale antierosivo. Il rullo così costituito diventa un elemento per la protezione meccanica del piede della sponda e funge da supporto per l'insediamento di canne o piante igrofile.



La struttura si realizza mediante la formazione di un rullo cilindrico in rete zincata plastificata di maglia minima tipo 8x10 o in georete sintetica, a telo aperto di larghezza minima di 120-160 cm, disposta in un solco predisposto di minimo 40x40 cm. Dalla parte dell'acqua i cilindri vengono sostenuti da pali di legno, dimensionati e distanziati in funzione del substrato e delle sollecitazioni cui sono soggetti. La rete va rivestita internamente con una stuoia o un geotessuto filtrante sintetico o in fibra vegetale e viene poi riempita di tout-venant sabbioso o ghiaioso (granulometria 80-120 mm) per i 2/3 inferiori. Nella restante parte superiore del rullo vengono collocati pani di canne ed altre specie igrofile (Phragmites, Juncus, Typha, Phalaris, Schenoplectus, ecc.). Terminato il riempimento il cilindro si chiude e si lega con filo di ferro. Ad operazione conclusa il rullo sporge per 5-10 cm sul livello medio dell'acqua ed il raccordo con la sponda viene eventualmente realizzato con ramaglie o fascine di salici e tamerici.

La lavorazione deve avvenire durante il periodo di riposo vegetativo, possibilmente in primavera prima della germogliazione.

Figura 6.5.8: Il rullo bloccato dalla parte dell'acqua mediante pali di legno, nel giro di breve tempo è soggetto alla radicazione da parte delle canne. Queste, insieme alle piante sviluppatesi dalle fascine vive poste a tergo, esercitano una efficace protezione della sponda nei confronti di correnti poco veloci ed al contempo creano un ambiente favorevole all'insediamento della fauna. Le canne inoltre apporteranno ulteriori benefici contribuendo alla depurazione delle acque.



Descrizione e Caratteristiche

Rullo spondale in fibra di cocco

Si tratta di una struttura di presidio del piede della sponda realizzata mediante il contenimento e la protezione con cilindri in rete di fibre di cocco o in fibra sintetica, riempiti con fibre di cocco a formare dei rulli di diametri da 30 a 60 cm e lunghezza da 3 a 6 m.

I cilindri, in numero di 1 o 2 sovrapposti, vengono disposti lungo la sponda e ancorati con tondame di legno infisso verticalmente nel terreno. Lo spazio tra i rulli e la sponda viene riempito con fascine vive e del terreno di rinalzo. Il materiale vivo può essere messo a dimora anche sotto forma di talee poste tra un rullo e l'altro.

I rulli in fibre di cocco si prestano anche ad essere piantati con piante igrofile quali: canne e carici. E' una struttura leggera di gradevole inserimento ambientale che si adatta molto bene anche a morfologie spondali anche sinuose. Nel medio periodo la fibra costituente i cilindri si degrada e la protezione e il consolidamento sono assicurati dalle piante cresciute nel frattempo.

Questa tecnica è adatta alla protezione di sponde basse, con energie della corrente molto contenute: canali in erosione, corsi d'acqua a bassa pendenza, sponde di laghi. In particolare risulta utile in caso di ricostruzione di sponde erose con materiale di dragaggio grazie all'azione filtrante esercitata dai cilindri in fibra di cocco. I rulli non risultano adatti all'impiego in acqua salmastra poiché subiscono un calo significativo di curabilità.

L'esecuzione di queste opere, dato l'uso delle fascine di ramaglia viva va realizzata durante il periodo di riposo vegetativo.

Figura 6.5.9: Difesa spondale in rulli di fibra di cocco; viene realizzata addossando i rulli alla sponda e bloccandoli a valle con dei pali. In genere se ne utilizzano due sovrapposti e se necessario nella parte bassa, costantemente sommersa, si può mettere in opera un gabbione cilindrico in rete metallica a doppia torsione a maglie esagonali riempito con pietrame.

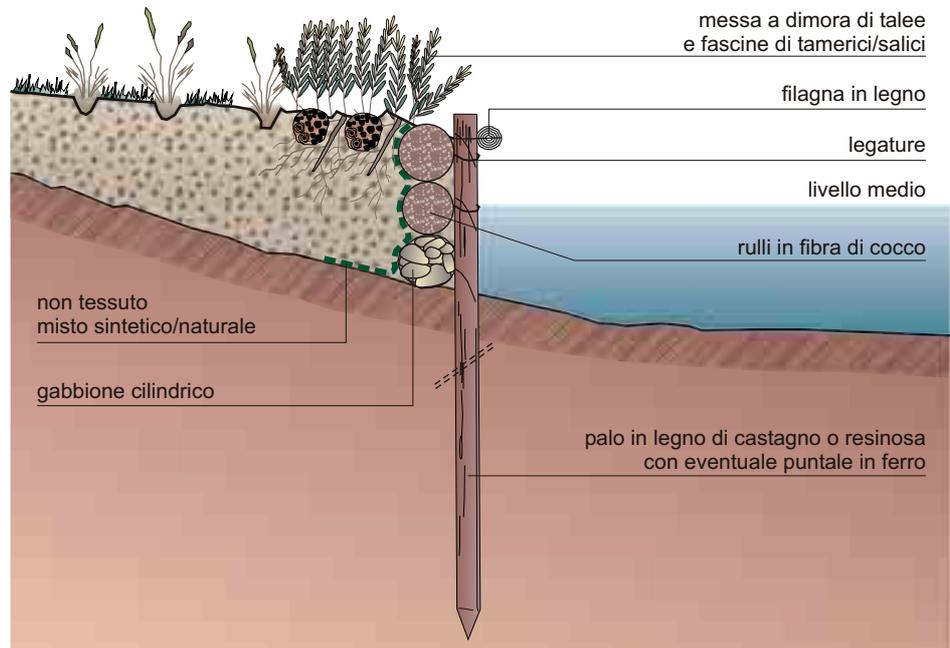


Figura 6.5.10: La foto mostra dei rulli in fibre di cocco avvolti in una rete di contenimento costituita dallo stesso tipo di materiale. La rete esterna, che può essere anche di tipo sintetico, è un elemento importante in quanto da essa dipende la resistenza meccanica dei rulli, le cui fibre non presentano nessun tipo di legame.



I rulli di cocco in genere sono costituiti da una rete in fibra sintetica o biodegradabile in cocco di maglia massima 60 x 80 mm riempiti in fibra di cocco naturale, con fibre di lunghezza 10-16 cm, di diametro da 30 a 60 cm. I rulli così realizzati costituiscono moduli cuciti lunghi da 3 a 6 m che vengono posati, in una o due file, addossati alla sponda e ancorati al substrato fissandoli con filo di ferro a pali in legno disposti ogni 40-100 cm su una fila esterna al rullo; i pali hanno diametro variabile da 10 a 25 cm e lunghezza variabile a seconda del numero di file sovrapposte. Il rullo superiore dovrà sporgere per 5-10 cm sul livello medio dell'acqua ed a tergo della struttura verrà effettuato il riempimento con materiale di dragaggio o altro terreno ed infine si pongono in opera fascine o ramaglie vive di salici o tamerici aventi la funzione di raccordo con la sponda.

In certi casi per migliorare la protezione nella parte inferiore della sponda, sempre immersa, è garantire una funzione di lungo termine, è opportuno mettere in opera un gabbione cilindrico in rete metallica a doppia torsione in filo di ferro protetto con galfan e plasticatura, riempito con pietrame.

La durata dei rulli è molto variabile a seconda della qualità delle fibre e delle condizioni ambientali e nel tempo vengono sostituiti nelle loro funzioni dalle piante che radicano e consolidano la sponda.

La lavorazione potrà avvenire durante il periodo di riposo vegetativo, possibilmente in primavera prima della germogliazione.

Figura 6.5.11: I rulli cilindrici possono essere predisposti piantandovi delle piante igrofile, consentendo di impiantare rapidamente della vegetazione, senza pericolo che possa venire scalzata dall'erosione della corrente.



Figura 6.5.12: Il consolidamento della sponda si otterrà posando delle fascine di salici o di tamerici a tergo dei rulli ed eventualmente, al di sopra del livello dell'acqua, delle talee poste tra un rullo e l'altro.



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.

Generalità

Sono poste lungo il percorso della colata, disposte trasversalmente possono essere di tipo aperto o di tipo chiuso. Le prime sono adatte all'impiego lungo corsi d'acqua veri e propri, dove deve essere garantito il deflusso continuo delle acque e impedito il transito di eventuali colate in occasione di eventi eccezionali. Le strutture di intercettazione di tipo chiuso invece si usano nel caso di aste che normalmente non sono interessate dal deflusso delle acque e che si attivano solo in occasione di eventi meteorologici estremi; si tratta di tributari molto ripidi caratterizzati da tempi di corrivazione brevissimi e da portate molto basse, in cui si accumulano abbondanti detriti quasi in condizioni di equilibrio limite: la saturazione in occasione di piogge intense innesca il movimento incanalato dei depositi.

Questo tipo di opere deve essere in grado di assorbire energie d'impatto molto elevate che sono state valutate a seconda delle velocità variare tra i 20 ed i 60 kN/mc (forza espressa per mc di volume impattante, da distribuire sulla superficie di impatto); oltre alla spinta della massa della colata nel suo insieme si devono considerare forze impulsive puntuali dovute a singoli blocchi, queste possono essere elevatissime pur agendo per tempi molto brevi, e variano in funzione della velocità, delle dimensioni dei blocchi e della rigidità della struttura di intercettazione. Ad esempio un blocco di un mc di volume che impatta ad una velocità di 5 m/s è in grado di esercitare una forza impulsiva fino a di 10.000 kN.

Le opere di intercettazione delle colate possono essere distinte in due tipologie:

- **strutture di intercettazione aperte;**
- **strutture di intercettazione chiuse.**

Figura 7.1.1: Una struttura di intercettazione aperta posta lungo un torrente. L'opera è molto massiccia per poter resistere alle forze elevate esercitate dalle colate ed all'impatto dei singoli blocchi. La struttura è molto aperta per opporsi solamente alle colate detritiche lasciando libero il flusso delle acque anche in condizioni di piena.



Strutture di intercettazione aperte

Sono strutture adatte all'intercettazione di colate detritiche. Si tratta di una sorta di briglie di trattenuta che hanno il compito di arrestare solo la frazione molto grossolana, lasciando che l'acqua e le particelle più fini vengano segregate dalla miscela, in questo modo la colata, perdendo di fluidità, si arresta. A differenza delle briglie di trattenuta poste a valle delle piazze di deposito, possono essere utilizzate anche lungo tratti in pendenza, a patto che a monte rimanga individuata una capacità di'invaso sufficiente a contenere il volume di materiale intercettato.

Spesso si tratta di strutture non convenzionali progettate ad hoc, per situazioni specifiche ma l'esempio più diffuso di questo tipo di opere sono quelle simili a briglie a pettine in cui mancano del tutto o quasi elementi trasversali, ma sono presenti dei rostri verticali in cemento armato opportunamente distanziati.

Figura 7.1.2: Un esempio di una struttura di intercettazione particolare, realizzata dall'Azienda speciale per la sistemazione dei bacini montani della Provincia di Trento sul Rio di Dona. L'opera è collocata all'apice del cono di deiezione e, a valle di essa, la portata è convogliata in un ripido cunettone in pietrame fino ad attraversare il centro abitato. L'intervento fu deciso a seguito del nubifragio del 9 luglio 1989, che portò oltre 15 mila metri cubi di ghiaia sul conoide (tra cui un masso di 50 mc di volume).

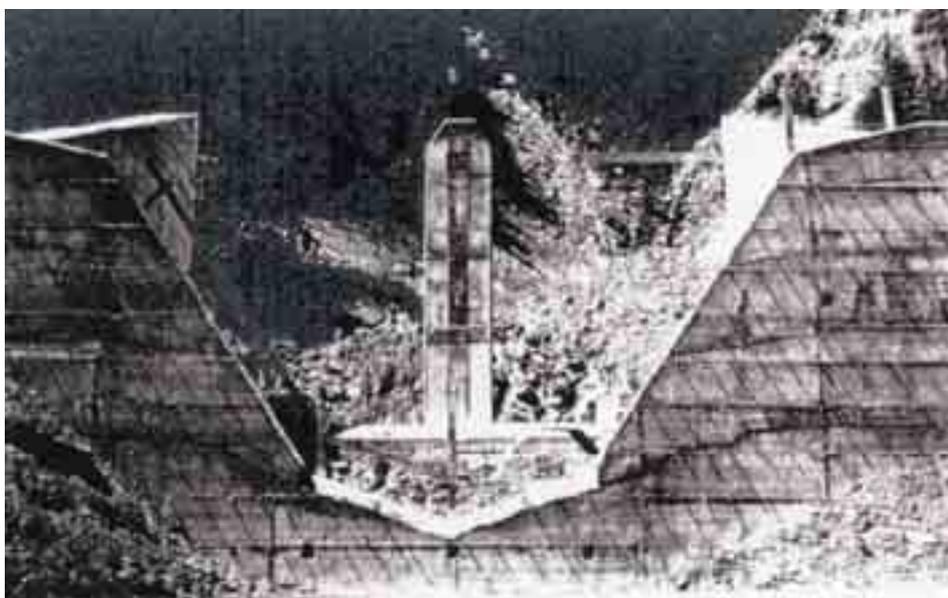


Figura 7.1.3: Struttura di intercettazione costituita da soli rostri in cemento armato verticali. La particolarità di questa struttura è dovuta alla presenza di due ordini perpendicolari di elementi in cemento armato, in grado di offrire protezione su due lati



Qualunque sia la tipologia di queste strutture, si tratta di opere caratterizzate da una estrema robustezza ottenuta facendo uso di cemento armato e protezioni in acciaio nei punti esposti all'impatto. Un'attenzione particolare va dedicata anche alle fondazioni, in quanto le sollecitazioni a cui sono soggette sono molto elevate; per impedire che vengano trascinate via dalla massa impattante, spesso è necessario ancorarle con elementi strutturali operanti in trazione.

Figura 7.1.4: Struttura aperta costituita da soli contrafforti per il contenimento di materiali di grandi dimensioni. La distanza fra i contrafforti è di 2.5 m in grado di ammettere il passaggio di mezzi meccanici per lo sgombero dei materiali accatastati a monte. I contrafforti maggiori sono alti 7 m e, dal punto di vista statico, sono vincolati con un tirante attraversante la base ai fini dell'equilibrio al ribaltamento e la fondazione è ancorata con micropali ai fini della resistenza allo scorrimento (Torrente Piccola Dora in Comune di Cesana, vista da valle).



Figura 7.1.5: La stessa struttura precedente vista da monte. Si osservi il rivestimento in lamiera di acciaio speciale (acciaio T4) per la protezione contro i danni del trasporto solido.



Descrizione e Caratteristiche

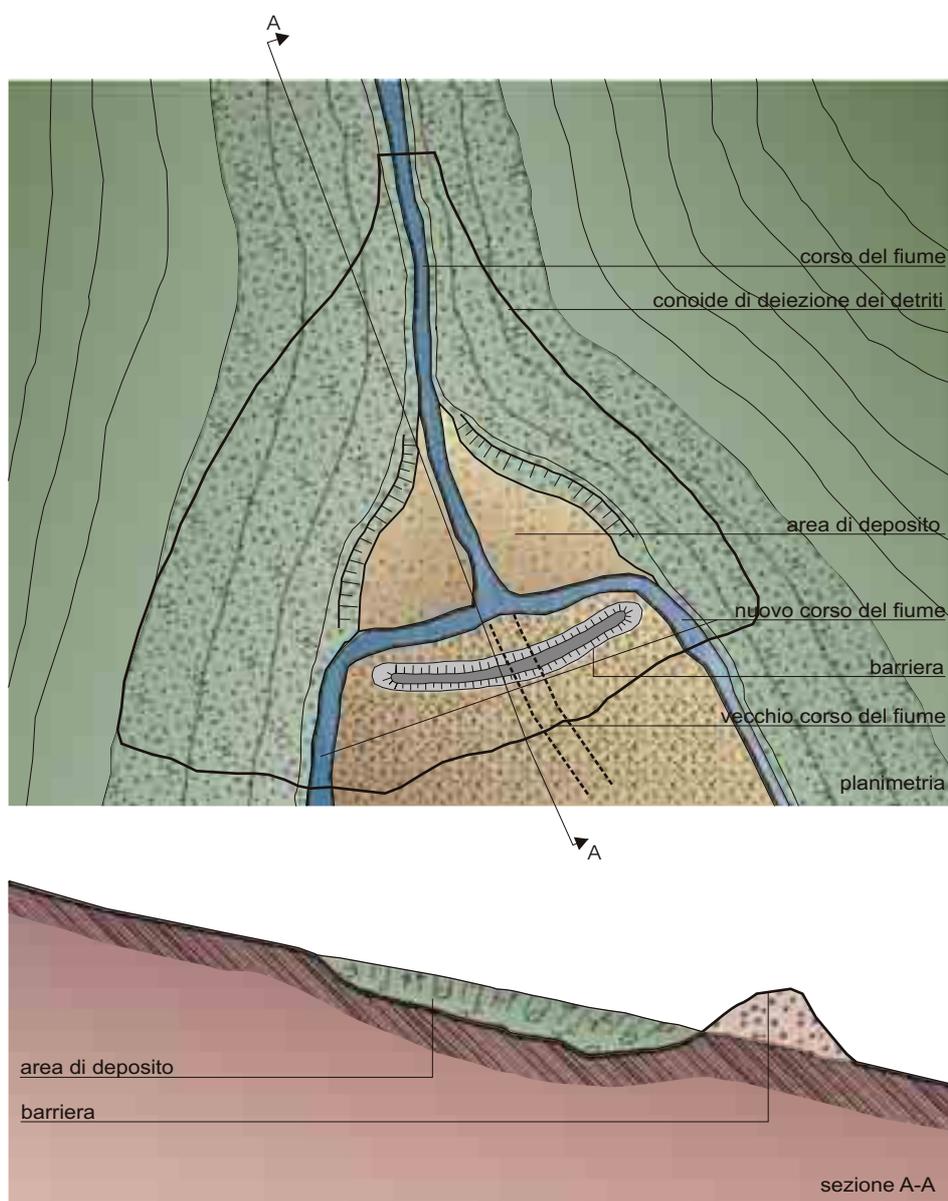
Strutture di intercettazione chiuse

Sono generalmente rilevati in terra compattata che sbarrano completamente il passaggio sia all'acqua che al materiale solido. Sono adatte sia alla difesa da colate di detrito che di fango

L'acqua viene incanalata e deviata lateralmente per essere eventualmente ricondotta nell'incisione originale. Come anticipato queste soluzioni trovano impiego nel caso di incisioni interessate dal passaggio dell'acqua solo in occasione di eventi eccezionali. A monte del rilevato in terra si scava per ricavare un'area di deposizione in grado di accogliere il volume di progetto della colata. La struttura deve avere un'altezza sufficiente ad impedire lo scavalcamento da parte della colata ed un'inclinazione del paramento di monte che sfavorisca la risalita sull'opera.

Per ottenere altezze considerevoli e forti inclinazioni del paramento di monte in certi casi si fa ricorso all'uso di terre rinforzate. Questa tecnica aumenta significativamente la resistenza della struttura sia all'impatto della massa della colata che al punzonamento da parte di eventuali singoli blocchi. I rinforzi aumentano la resistenza al taglio della massa resistente e distribuiscono meglio le sollecitazioni coinvolgendo una massa resistente maggiore.

Figura 7.1.6: Schema di struttura di intercettazione chiusa. L'area di deposizione può essere ricavata scavando se non è presente una morfologia favorevole. Il materiale scavato può essere riutilizzato per creare il rilevato che a valle di questa costituisce la vera e propria struttura di intercettazione. Si possono osservare i due canali che servono a smaltire le acque che altrimenti si accumulerebbero dietro la barriera.



L'area di deposizione a monte delle strutture di intercettazione chiuse generalmente è in pendenza ed il volume di colata che vi si può raccogliere, oltre che dalla larghezza del fronte, dipende dall'altezza di rilevato e dall'inclinazione che assumeranno i depositi; solitamente quest'ultima in fase di progetto si considera pari alla metà dell'angolo di inclinazione della superficie di deposizione.

Una variante delle strutture di intercettazione chiuse sono le opere usate all'interno di piazze di deposito per creare dei setti che sbarrano il passaggio alle colate detritiche. Questo espediente si rende necessario quando la pendenza e/o la lunghezza della piazza di deposito non sono tali da consentire da sole l'arresto della colata detritica.

Figura 7.1.7: La figura mostra una struttura di questo tipo realizzata in Valle d'Aosta, vista da valle, si possono notare delle strette aperture che consentono il transito di mezzi d'opera. Quest'opera è stata realizzata in seguito all'evento alluvionale del 2000, utilizzando elementi di rinforzo in rete metallica a doppia torsione plasticati



Figura 7.1.8: Il rilevato di intercettazione precedente visto da monte; le foto sono state riprese prima del rinverdimento e si può notare il canale per la raccolta delle acque superficiali che corre lungo l'opera, rivestito con una geostuoia tridimensionale, armata con rete metallica a doppia torsione, rinverdito.



Figura 7.1.9: Una struttura di intercettazione chiusa posta a lato del percorso delle colate, il fango si riversa nella struttura attraverso uno sfioratore. Le sponde della vasca sono protette con muri in gabbioni di rete metallica a doppia torsione a maglie esagonali. (Quindici AV).



Le colate di fango hanno un comportamento diverso da quelle detritiche. Si propagano più lentamente ed in maniera più simile ad un liquido fortemente viscoso. Questa caratteristica consente di impiegare sistemi di intercettazione simili alle vasche di espansione usate per laminare le piene. Le colate in questo caso vengono convogliate all'interno di un canale artificiale e si riversano in casse poste ai lati, in derivazione, per mezzo di sfioratori presenti sui muri di convogliamento. Le strutture di intercettazione sono chiuse e a differenza delle casse di espansione non sono dotate di organi di restituzione a valle.

Figura 7.1.10: Piazza di deposito con setti in terra compattata, dotati di una fessura centrale per consentire il passaggio delle acque in condizioni normali. (Vallescura BG).



Figura 7.1.11: Casse di ritenuta in cemento armato poste ai lati del canale di convogliamento delle colate. La gradonatura del fondo del canale rallenta le colate e favorisce il riversamento nelle casse di ritenuta. (Quindici AV)



Strutture di diversione

Generalità

Svolgono la funzione di deviare la colata impedendo l'impatto con strutture o infrastrutture a rischio. Sono soggette a forze di impatto inferiori rispetto alle barriere di intercettazione chiuse. Anche queste opere sono generalmente costruite con terreno compattato ed hanno caratteristiche simili alle precedenti.

L'utilizzo di questa soluzione comporta la disponibilità, a valle, di un'area in cui la propagazione della colata non provochi danni. A differenza della tipologia di opera vista in precedenza, questa può essere impiegata anche nella difesa lungo aste con presenza d'acqua costante, poiché non impediscono il normale deflusso delle portate liquide.

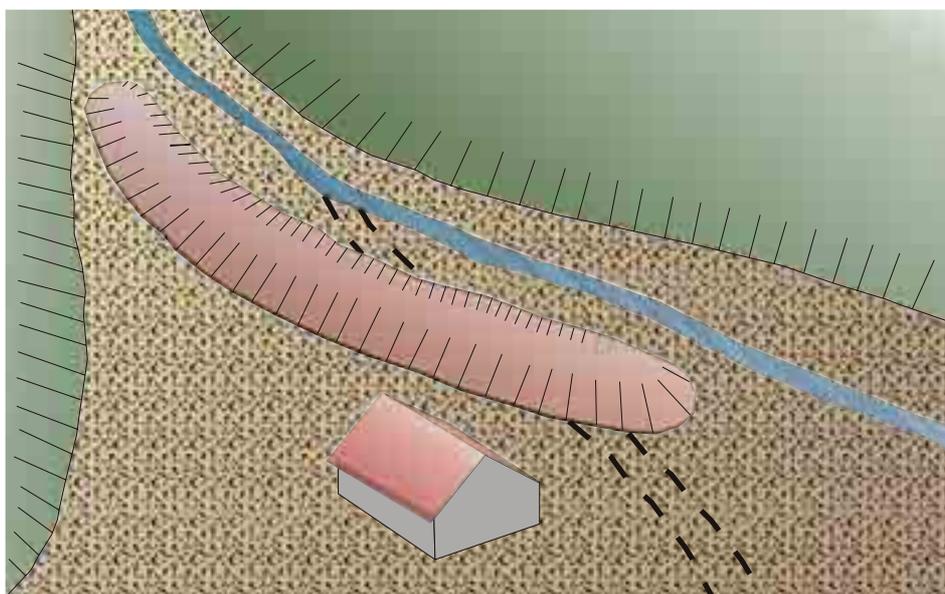


Figura 7.2.1: Schema di un sistema di diversione realizzato con un rilevato un terra per la difesa di un'abitazione. In planimetria si può osservare come la costruzione della struttura possa comportare anche la deviazione dell'alveo del corso d'acqua. L'opera è posta generalmente sulla conoide.

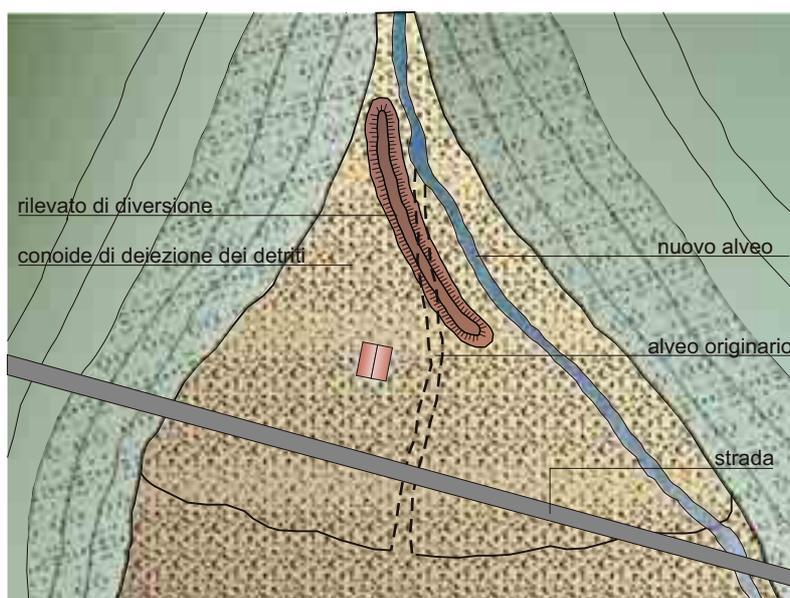


Figura 7.2.2: Nella foto è mostrato un rilevato di diversione in fase di costruzione (Messigny (AO), a monte di un gruppo di case). Si tratta di strutture realizzate in terra rinforzata con elementi in rete metallica a doppia torsione plasticata, con una protezione antierosiva di paramento in biostuoia di fibre di cocco.



Figura 7.2.3: In certi casi a monte della struttura di deviazione si può creare una bassa struttura di intercettazione in grado di captare parte del volume della colata, nella foto se ne vede un esempio realizzato con gabbioni in rete metallica a doppia torsione, con al centro il canale rivestito in pietrame che convoglia le portate liquide.



Bibliografia

- AA.VV.: *"Atlante delle opere di sistemazione dei versanti"*, a cura di Leonello Serva e Domenico Ligato. APAT (Agenzia per la protezione dell'Ambiente e per i Servizi Tecnici). Manuali e Linee Guida n.10/2002.
- AA.VV.: *"Difesa idrogeologica del territorio"*, a cura di Ugo Maione e Armando Brath. Bios. 1997.
- AA.VV.: *"Emergenza alluvione ottobre 2000"*, a cura di Leonello Serva e Eutizio Vittori. APAT (Agenzia per la protezione dell'Ambiente e per i Servizi Tecnici). Rapporti n. 7/2001.
- AA.VV.: *"La difesa idraulica dei territori fortemente antropizzati"*, a cura di Ugo Maione ed Armando Brath. Bios, 2000.
- AA.VV.: *"Le attività APAT a seguito di emergenze alluvionali e sismiche"*, a cura di Leonello Serva e Eutizio Vittori. APAT (Agenzia per la protezione dell'Ambiente e per i Servizi Tecnici). Rapporti n. 35/2003.
- AA.VV.: *"Linee guida per la progettazione delle casse di laminazione"*. Autorità di bacino del fiume Arno. Quaderno n. 9, Dicembre 2000.
- AA.VV.: *"Manuale di Ingegneria Naturalistica applicabile al settore idraulico"*. Regione Lazio, Assessorato per l'Ambiente, Dipartimento Ambiente e protezione Civile, luglio 2002.
- AA.VV.: *"Manuale tecnico di "Ingegneria Naturalistica"*. Regione Emilia Romagna, Assessorato all'Ambiente, Regione del Veneto, Assessorato Agricoltura e Foreste. , Bologna, 1993.
- AA.VV.: *"Piano di bacino del fiume Arno Rischio Idraulico"*. Autorità di bacino del fiume Arno. Quaderno n. 5, Luglio 1996.
- AA.VV.: *"Repertorio Italiano dei Geosintetici"*. AGI IGS, Seconda edizione 1998/1999, BE MA Editrice, Milano.
- AA.VV.: *"Sistemazioni dei corsi d'acqua. Metodi avanzati nella progettazione di interventi di ingegneria naturalistica"*, a cura di Ugo Maione, Armando Brath, Paolo Mignosa. Bios, 1999.
- AA.VV.: *"Sistemazioni in ambito fluviale"*. Quaderni di Ingegneria Naturalistica. Il Verde Editoriale., 1995.
- Aquater S.p.A.: *"Settori lavori: Civil Works Departement"*. Brochure documentaria, S. Lorenzo in Campo (PS).
- Casadio M., Elmi C.: *"Il manuale del geologo"*. Pitagora editrice, Bologna 1997.
- Cestelli G.: *"Geotecnica e tecnica delle fondazioni"*. Edit. Hoepli, Milano, 1981.
- Cestelli Guidi C.: *"Meccanica del terreno e stabilità delle fondazioni"*. Edit. Hoepli, Milano, 1947.
- Da Deppo L., Datei C.: *"Le opere idrauliche nelle costruzioni stradali"*. Bios. 1999.
- Da Deppo L., Datei C., Salandin P.: *"Sistemazione dei corsi d'acqua"*. Cortina, Padova, 2002.
- Deymier C., Tcnet J-M., Mathys N.: *"Conception et calcul des barrages de corrctin torrentielle"*. Cemagref, Etudes, no. 18, 1995.
- Dogliani A.: *"Muri cellulari a gabbia: un sistema ecologico di realizzare opere di sostegno e contenimento delle terre"*. Quarry and Construction, giugno 1989.
- Fantini P., Roberti R.: *"Risanamento di un pendio in frana mediante L'utilizzo di opere di sostegno in terra rinforzata"*. Quarry and Construction n.10, ottobre 1991.
- Gray D. H, Sotir R.B.: *"Biotechnical and Soil Bioengineering Slope Stabilization"*. Wiley, New York, 1996.
- Italdreni Geotecnologie per l'ambiente: *"Sistemazione versanti e opere idrauliche"*. Brochure varie, S.Polo d'Enza (RE).
- Lancellotta R.: *"Geotecnica"*. edit. Zanichelli, Bologna, 1987.
- Levi C.: *"Costruzioni"*. Hoepli, 1929.
- Lichtenhahn C.: *"Calcolo delle briglie in calcestruzzo basato su nuove ricerche eseguite in Svizzera negli ultimi anni"*. Annali dell'Accademia Italiana di Scienze Forestali, 20, 89-112, 1971.

Maccaferri S.P.A.: “ Gabions”, “ I materiali ecocompatibili”, “ Soluzioni per l'ambiente”, “ Opere Stradali”, “ Opere Fluviali”. Brochure varie, Bologna, 1995 - 2002.

"Manuale dell'ingegnere". Hoepli, 1985.

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

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

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

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

Regione Piemonte: “Interventi di sistemazione del territorio con tecniche di Ingegneria Naturalistica”. Torino, 2003.

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

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

Schiechtl H. M., Stern R.: “Bioingegneria forestale, basi, materiali da costruzione vivi, metodi”. Edizioni Castaldi. Feltre, 1991.

Schiechtl H. M., Stern R.: “Ingegneria naturalistica, manuale delle opere in terra”, Edizioni Castaldi. Feltre, 1992.

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

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