



**AUTORITA' DI BACINO REGIONALE CAMPANIA SUD
ED INTERREGIONALE PER IL BACINO IDROGRAFICO DEL FIUME SELE**

Rivisitazione del Piano stralcio per l'Assetto Idrogeologico del Bacino Idrografico del Fiume Sele



**Elaborato ID: D - CRITERI DI MASSIMA PER LA PROGETTAZIONE DELLE OPERE
IDRAULICHE DEGLI INTERVENTI IDRAULICI E DELLE OPERE
PUBBLICHE INTERFERENTI CON LA RETE IDROGRAFICA -**

Scala:

Revisione: Giugno 2012

Collaborazione e supporto:

geom. Antonio **ABBAGNALE**
geom. Enrico **BELVERDE**
dr. Giancarlo **FANTINI**
rag. Domenico **LEONE**
dott. Francesco **SCHIOPPA**
sig. Giuseppe **VERNILLO**

Gruppo di pianificazione:

avv. Maria **AFFINITA**
arch. Amelia **CAIVANO**
d.ssa Valeria **DE GENNARO**
dr. Giovanni **DICANIO**
geol. Giuseppe **d'ERRICO**
ing. Gianluca **D'ONOFRIO**
ing. Luigi **FARIELLO**
ing. Sergio **IANNELLA**
geol. Gerardo **LOMBARDI**
geol. Crescenzo **MINOTTA**
geol. Filomena **MORETTA**
ing. Mario **SICA**
arch. Pellegrino **VENTRONE**

Assistenza e supporto tecnico-geologico: geol. Antonio **GALLO**

Coordinatore gruppo di pianificazione: geol. Gaetano **SAMMARTINO**

Consulenza scientifica rischio frane:
prof. Domenico **CALCATERRA**

Consulenza scientifica rischio idraulico:
prof. Pasquale **VERSACE**

Responsabile Unico del Procedimento: arch. Giuseppe **GRIMALDI**

Commissario Straordinario: avv. Luigi Stefano **SORVINO**

ALLEGATO D

*CRITERI DI MASSIMA PER LA
PROGETTAZIONE DELLE OPERE
IDRAULICHE, DEGLI INTERVENTI
IDRAULICI E DELLE OPERE
PUBBLICHE INTERFERENTI CON LA
RETE IDROGRAFICA*

Premessa

Il presente allegato è tratto dal Manuale Guida dell'APAT n.27/2003 "Atlante delle opere di sistemazione fluviale" e illustra le diverse tipologie di interventi che possono essere realizzati ai fini della sistemazione dei corsi d'acqua e la mitigazione del rischio idraulico. Offre una vasta panoramica descrittiva sugli aspetti peculiari da tenere presente in fase di progettazione delle opere, oltre alle caratteristiche geometriche principali e ai limiti funzionali degli stessi interventi.

Introduzione

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 in 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 con conseguente incremento dei fenomeni di scalzamento sulle fondazioni dei ponti e dei viadotti.

Gli 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 colate rapide e valanghe
- controllo dell'erosione superficiale

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).

Gli interventi non strutturali.

- A. provvedimenti che modificano l'assetto urbanistico esistente
 - trasferimento o conversione degli attuali insediamenti
 - acquisizione delle aree da parte dell'ente pubblico
 - ristrutturazione urbana
 - demolizione delle strutture giudicate non sicure

- dichiarazione di non conformità per edifici o funzioni preesistenti in zone dichiarate pericolose
 - conversione delle attività presenti in aree a rischio
 - ricostruzione delle infrastrutture pubbliche
- B. provvedimenti di carattere legislativo miranti a dissuadere dall'edificare nelle aree a rischio
- dissuasione per nuovi insediamenti
 - informazione da parte degli enti pubblici
 - segnalazioni di allarme
 - segnalazione dei fatti dannosi verificatisi nel passato
 - diversificazione della tassazione in modo che eventuali lavori di protezione siano in parte sostenuti dai proprietari protetti
 - politica finanziaria orientata a limitare la concessione di mutui fondiari agli edifici da edificarsi in aree considerate inondabili
 - obbligatorietà dell'assicurazione al fine di poter ottenere finanziamenti in caso di danno. Nel caso di danno certo (edifici siti in zone inondabili), il premio assicurativo assume il carattere di tassazione.
- C. attività legislativa preventiva che agisca attraverso la proibizione della costruzione e la regolamentazione delle modalità di costruzione laddove ciò sia ritenuto possibile.
- pianificazione dell'uso delle zone inondabili (piane alluvionali, coni di deiezione);
 - ordinanze dell'amministrazione locale per limitare gli usi del suolo in funzione della probabilità dell'allagamento. Tali interventi si basano sui risultati di processi più o meno complessi di zonazione ossia di individuazione delle aree esposte agli effetti dannosi delle esondazioni di determinata gravità e frequenza;
 - regolamenti urbanistici speciali nelle zone inondabili per limitare le costruzioni, i riporti di terreno, le tipologie strutturali;
 - impedimenti alla lottizzazione delle proprietà fondiarie;
 - appositi regolamenti nell'ambito delle disposizioni in materia di discariche;
 - appositi regolamenti edilizi che definiscano particolari costruttivi nel posizionamento degli impianti elettrici, dei materiali e delle luci libere per i tombini.

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

Interventi strutturali di sistemazione e correzione dei corsi d'acqua

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

- 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).

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 plano-altimetrico stabile;
- **rinaturalizzazione:** la ricostituzione degli habitat propri del corso d'acqua, agendo sul piano morfologico, sulle 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.

Classificazione degli interventi idraulici.

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.

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

Strutture di base

Per strutture di base si intendono 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".

Le strutture di base sono:

- Muri di sponda
- Briglie
- Rivestimenti

I **muri di sponda** sono 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.

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.

Le **briglie** sono opere a parete grossa, trasversali rispetto all'asse del corso d'acqua, che ne modificano l'assetto altimetrico con conseguenze sul regime della corrente.

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 essere 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.

Per garantire la funzionalità e la stabilità delle briglie spesso si rende necessaria la costruzione di opere accessorie. Elementi fondamentali tra le opere accessorie sono:

I **muri d'ala**, che possono essere 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.

La **platea**, per evitare la formazione del gorgo al piede della briglia. Il manufatto risulta di difficile conservazione pertanto risulta preferibile costruire la controbriglia con relativo bacino di calma.

La **contro briglia**, che è una briglia di modesta altezza sull'alveo costruita poco a valle della 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.

I **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.

Opere per l'aumento della capacità idrovettrice dei corsi d'acqua

Le opere per l'aumento della capacità idrovettrice dei corsi d'acqua sono costituite da:

- Arginature
- Drizzagni

Le arginature

Le arginature sono 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.

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**.

Il terreno di golena può essere 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**.

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.

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 condiziona 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 golena 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.

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.

Il sifonamento attraverso l'argine si previene impedendo la filtrazione dell'acqua attraverso e sotto l'argine con diaframmi in argilla o calcestruzzo e palancolate.

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.

I drizzagni

I drizzagni sono 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 ripariali.

Opere per la riduzione delle portate di piena

La riduzione delle portate può ottenersi con:

- serbatoi di piena
- casse di espansione
- laghetti collinari
- diversivi e scolmatori

I serbatoi di piena

I serbatoi di piena sono opere generalmente molto impegnative sia sotto il profilo tecnico che economico ed in considerazione del fatto che vengono utilizzate 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

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 dotato 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.

Le casse d'espansione

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 sono 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.

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.

Casse in linea

Le casse in linea non richiedono opere di imbocco ne' 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 immorsate 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.

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 invasati 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.

Casse in derivazione

Nelle casse in derivazione 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.

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 po' 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.

I laghetti collinari

I laghetti collinari 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 trasforma parte di un letto torrentizio in un laghetto artificiale, il quale può avere, a seconda dei casi le capacità d'invaso più varie.

Il laghetto collinare 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 ricoperto 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.

I diversivi e scolmatori

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 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.

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.

L'utilizzo di uno scolmatore con l'imbocco regolato consente 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.

Opere per la regimazione della falda

Con il termine bonifica si intende quel complesso di 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.

La bonifica per prosciugamento

La bonifica per prosciugamento 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.

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.

La 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.

Opere per il controllo del trasporto solido

Il controllo del trasporto solido è un problema che si presenta principalmente nei corsi d'acqua di montagna. 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.

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", dalle piazze di deposito e dai cunettoni.

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.

I **cunettoni** sono opere di sistemazione dei torrenti, impiegate sia nei torrenti di trasporto che in quelli in scavo, ma principalmente trovano applicazione nel primo caso e nei settori di conoide.

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

Le briglie di trattenuta

Sono 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 finalizzate a trattenere il trasporto solido di fondo e quelle impiegate per intercettare anche il materiale flottante.

Briglie per il trattenimento del trasporto solido di fondo

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.

Ne esistono due tipi: a "finestre" e a "fessura".

Le **briglie a finestre** hanno il 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 pi 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.

Le **briglie a fessura** sono strutture con scopi analoghi a quelli delle briglie a finestre, ma che risultano più efficienti. Sono briglie caratterizzate da un'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.

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.

Nelle **briglie a pettine** il corpo scompare completamente 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.

Le piazze di deposito

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.

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 compattate con una fessura al centro che lasci defluire l'acqua in condizioni normali.

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 scavalco. 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.

I cunettoni

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 corrivazione) 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.

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.

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°.

Le opere di difesa dall'erosione

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.

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 trascinarsi 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.

La sistemazione a gradinata

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.

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'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.

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*.

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

in cui:

- τ_c (N/m²) = azione di trascinarsi 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:

$$\tau = \gamma \cdot R \cdot i_c = \tau_c$$

$$Q = C \cdot A \cdot \sqrt{R \cdot i_c}$$

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 trascinarsi, 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 due precedenti equazioni 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:

$$i \cdot L = h + i_c \cdot L$$

$$h = (i - i_c) \cdot L$$

dove i è la pendenza originaria dell'alveo, h è l'altezza del paramento di valle dell'opera trasversale rispetto al fondo alveo, i_c è la pendenza di correzione, L è la distanza tra un'opera trasversale e l'altra.

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

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.

Le briglie di consolidamento

Le briglie di consolidamento sono opere trasversali al torrente, sporgenti dall'alveo nel quale sono fondate. 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.

Le 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). Sono strutture che possono venire realizzate con calcestruzzo, pietrame legato con malta, gabbioni in rete metallica a doppia torsione riempiti di pietrame e legname abbinato a pietrame.

Gli elementi caratteristici di una briglia a gravità rettilinea sono:

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

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 stramazante 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).

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 quanto riguarda la fondazione, si può ritenere che essa debba avere una profondità superiore a quella del gorgo che la lama stramazante provocherà nell'alveo a valle.

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.

Per quanto concerne i criteri di dimensionamento del corpo della briglia occorre tenere in considerazione che il paramento di monte 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.

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.

Oltre al calcestruzzo armato si può fare ricorso anche al legno. 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 dalla briglia.

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.

Per la costruzione di briglie a gravità possono essere convenientemente usati anche i gabbioni ed i materassi, ovviamente se 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 una gaveta, controbriaglia, bacino di dissipazione.

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.

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.

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.

Le briglie autostabili

Particolari tipi di briglie sono vere e proprie strutture auto stabili, realizzate 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".

Le briglie con stabilizzatore posteriore

Una tipologia derivata da quella "autostabile" è la struttura con stabilizzatore posteriore, 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.

Le briglie a contraforti

Le briglie a contraforti sono una tipologia che permette di raggiungere altezze elevate (> 10m). Si hanno strutture con contraforti 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 contraforti 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 contraforti 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.

Briglie a piastra

Le briglie a piastra 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 necessario dimensionare la 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.

Briglie in terra

Sono opere 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).

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.

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 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 gaveta, 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.

Le soglie

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.

I repellenti

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 immorsate nella sponda, si protendono verso il centro dell'alveo interferendo con la corrente.

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.

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.

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).

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 immersionamento 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.

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.

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.

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, 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.

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.

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.

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.

Le opera spondali di sostegno

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.

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: un'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.

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.

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.

Muratura in pietrame a secco

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.

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 pietrale 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 pietrale 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.

Muri in calcestruzzo, pietrale e/o mattoni

I muri in calcestruzzo, pietrale 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 pietrale con malta idraulica (o muri in muratura) sono costruiti utilizzando pietrale locale di varie dimensioni e forme, legato da malta idraulica. 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.

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.

Muri in cemento armato

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.

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.

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 piano 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.

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 una materiale di riempimento di pezzatura idonea ad evitare la mobilizzazione, o riempire con terreno e combinare le strutture con materiale vivo che radicando e sviluppando le proprie parti aeree esercitino una funzione di protezione e consolidamento.

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

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

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

Terre rinforzate

Sono sistemi che 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.

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.

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

- Rinforzi metallici
 - inestensibili quali strisce d'acciaio nervate e barre d'acciaio zincate
 - estensibili quali reti a doppia torsione in trafilato d'acciaio protetto con galvanne e plastica.
- Rinforzi geosintetici
 - tessuti in polipropilene
 - geogriglie estruse in HDPE o polipropilene
 - geogriglie a nastri in poliestere protette con LDPE
 - geogriglie tessute in poliestere protette con PVC o EVA

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

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

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

Le 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.

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.

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.

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.

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.

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.

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.

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.

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.

I rivestimenti

I rivestimenti 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 hannoun 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.

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.

Rivestimenti con materiali inerti

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.

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 tergo 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.

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 (riprap) 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 trascinarsi 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 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 che dalla sua estensione in senso orizzontale, in funzione della profondità dell'erosione prevista.

In alternativa, la difesa dallo scalzamento si può realizzare con un diaframma in calcestruzzo o colonne di jet-grouting.

Nei rivestimenti in pietrame sciolto, parte del materiale viene trascinato a valle dalla corrente (in modo particolare dopo eventi di piena). Le operazioni di "ricarica" devono essere tanto più frequenti quanto maggiore è l'azione erosiva esercitata dalla corrente.

L'aggiunta di materiale lapideo si rende inoltre necessario per controbilanciare i fenomeni di assestamento cui sono spesso soggette le gettate.

Le scogliere vengono costruite con massi provenienti da cave o prelevati da torrenti. I massi movimentati con l'escavatore, vengono addossati in maniera regolare alla sponda in maniera da formare un rivestimento stabile e ben assestato.

In alcuni casi, al fine di aumentare la resistenza all'azione di trascinarsi 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 trascinarsi esercitata dalla corrente, ma i costi crescono in maniera non trascurabile.

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.

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 immersioni 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.

Materassi in rete metallica a doppia torsione a maglie esagonali

La necessità di una protezione antierosiva caratterizzata da una elevata resistenza alle tensioni di trascinarsi, 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 "materassi in rete metallica" possono essere considerati alla stregua di un rivestimento in pietrame sciolto con la differenza che la stabilità 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.

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, vengono realizzati con un acciaio dotato di una doppia protezione, galvanizzazione con lega di Zn-5% di alluminio e terre rare (Galfan) e 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).

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 spessore 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.

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

Materassi rinverditi

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.

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.

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.

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 antierosiva leggera in condizioni di basso rischio ad esempio nei recuperi ambientali.

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.

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.

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.

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°-55°). 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.

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 antierosiva 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.

Semina a spaglio di specie erbacee

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.

È 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). È 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.

Idrosemina

Per idrosemina si intende il rivestimento della superficie del terreno con una miscela complessa, distribuita per via idraulica per mezzo di una macchina (idrosematrice) 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'idrosematrice 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.

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 idrosematrice, 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.

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. Tra i materiali utilizzati vi 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.

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'idrosematrice, 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.

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.

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 sfolto 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.

Piantagione 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 piantagione 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.

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.

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.

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.

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.

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.

Presidi al piede

I presidi al piede sono opere di altezza limitata, costruite a difesa del piede disposte 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.

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.

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.

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 rincalzate 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.

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.

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 sintético 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.

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.

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.

Opere di difesa dalle colate detritiche

Le colate di detrito di fango sono fenomeni estremamente pericolosi e 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.

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.

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 torrenziale;
- la disponibilità di materiale sciolto su versante o nell'alveo;
- pendenza sufficientemente elevata.

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.

Strutture di intercettazione

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.

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.

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.

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 scavalco 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.

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 del 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.

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.

Strutture di diversione

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.