

### 11.1 Il sistema fiume

L'insieme delle relazioni esistenti tra gli esseri viventi e dei loro rapporti con l'ambiente circostante forma un'unità funzionale chiamata *ecosistema*: la modifica di una delle componenti biotiche o abiotiche del sistema provoca inevitabilmente delle conseguenze sulle altre.

Dipendenti da dinamiche e peculiari condizioni climatiche, pedologiche e morfologiche, le diverse specie vegetali ed animali si sono evolute e sviluppate in comunità, la *biocenosi*, in stretta interdipendenza con il circostante ambiente fisico.

Il "sistema fiume" con l'acqua, l'alveo, le sponde e le rive costituisce un variegato insieme di *habitat* per un elevato numero di organismi viventi. Modellati dagli agenti atmosferici ed in base alle caratteristiche litologiche delle zone attraversate, i corsi d'acqua presentano una notevole diversità strutturale che conferisce a ciascun fiume una propria personalità.

L'aspetto di un corso d'acqua dipende anche dagli interventi operati dall'uomo. Nella maggior parte dei paesi industrializzati, i corsi d'acqua hanno subito pesanti interventi di

regimazione ed i tratti rimasti ancora naturaliformi sono diminuiti drasticamente negli ultimi decenni.

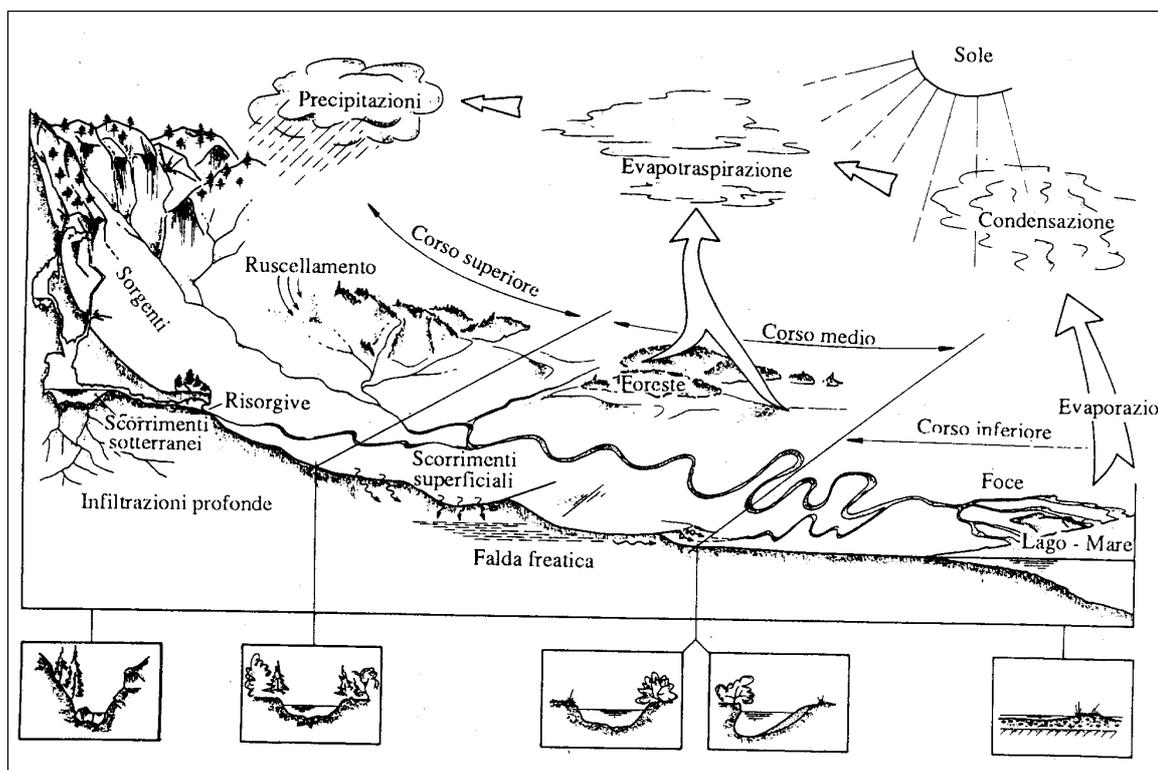
Interessi economici basati su logiche di breve periodo hanno spesso influito in maniera determinante sulla scelta degli interventi da attuare sul territorio. L'evoluzione dei modi di vivere e di pensare, così come i comportamenti sociali, hanno portato negli ultimi cinquant'anni ad un impoverimento di molti ambienti naturali, con una conseguente tendenza all'uniformità ed alla banalizzazione del territorio: i corsi d'acqua, purtroppo, non sono sfuggiti a questa regola.

Anche il modellamento del territorio dipende da diversi aspetti fisici: il principale, oltre al vento, che erode i suoli nudi e contribuisce attivamente a plasmare intere regioni, è indubbiamente l'acqua.

I fenomeni naturali legati all'acqua, come le precipitazioni, le infiltrazioni, le percolazioni ed i ruscellamenti, agiscono in modo complesso, sia a causa della variabilità dei fattori climatici che li regolano, sia per la natura dei suoli che li subiscono (fig. 11.1),

L'acqua forma dei deflussi che possono essere

Fig. 11.1 - Formazione ed evoluzione dei deflussi idrici



Fonte: Lachat, 1991, modificato.

permanenti o temporanei, superficiali o sotterranei, caratterizzati anche da fenomeni chimici di dissoluzione (carsismo).

Per comprendere le origini delle erosioni e delle inondazioni bisogna tenere presente che, da un punto di vista idraulico, l'acqua è un fluido e quando scorre dissipa una parte della propria energia per attrito; questa energia perduta si trasmette al materiale presente nell'alveo sotto forma di una forza che, in condizioni particolari, ne determina lo spostamento: la capacità dell'acqua di trasportare i materiali è direttamente proporzionale a tale energia.

Nel caso di un meandro, l'effetto frenante delle sponde provoca la formazione di vortici laterali, a volte molto forti, che risalgono verticalmente lungo la sponda; si produce in tal modo uno scavo abbastanza localizzato in funzione della portata del corso d'acqua e ciò conferisce ai meandri una forma piuttosto regolare (fig. 11.2).

L'erosione ed il conseguente trasporto di materiale, in sintesi, dipende principalmente dalle seguenti caratteristiche del fiume:

- portata idrica;
- pendenza delle sponde;
- altezza delle sponde;
- pendenza dell'alveo;
- larghezza dell'alveo;
- granulometria del materiale litoide del fondo.

In funzione dei sopracitati parametri si possono verificare, quindi, diverse forme di trasporto:

- *per trascinamento*: fenomeno che si verifica nel caso di piene eccezionali durante le quali i materiali inerti di una certa dimensione vengono spostati per brevi distanze, ma agendo

come una fresa, provocano notevoli erosioni al fondo;

- *per rotolio*: ciò accade soprattutto nei corsi d'acqua a regime torrentizio;
- *per saltazione*: i ciottoli ed i sassi compiono dei salti (da qualche centimetro a parecchi metri) in funzione delle loro dimensioni;
- *in sospensione*: i materiali di dimensioni molto piccole, come le argille, i limi e le sabbie, sono presenti nell'acqua senza esservi disciolti.

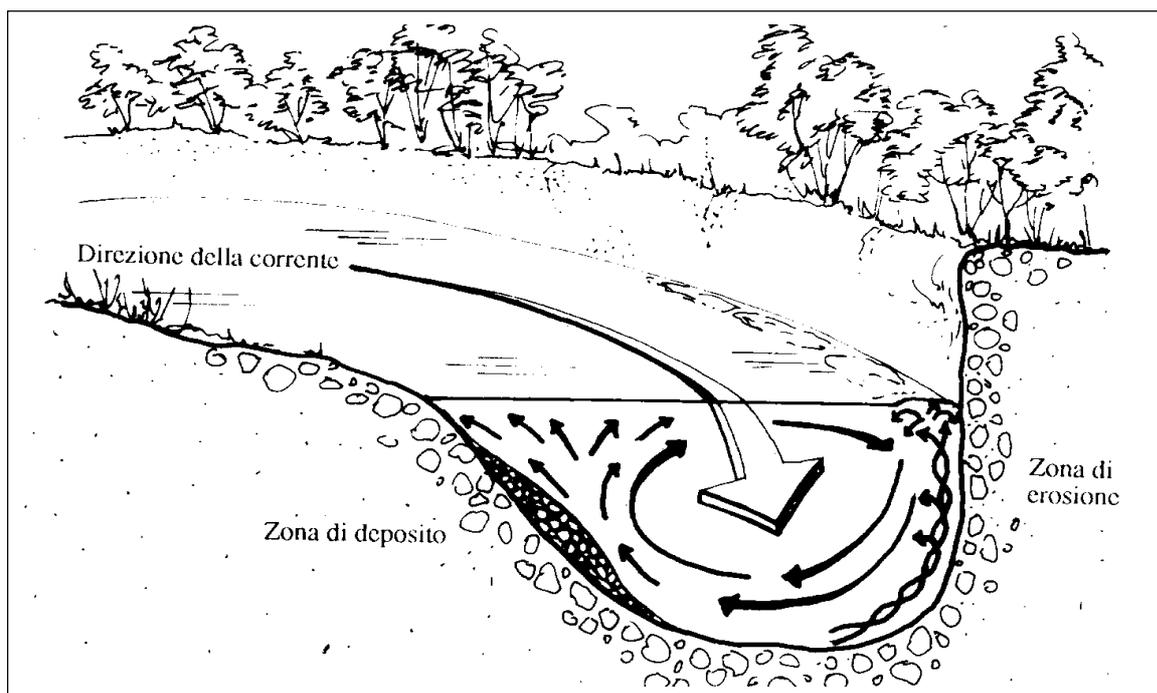
Non va infine dimenticato il trasporto in soluzione, nel quale gli elementi sono legati alle molecole d'acqua conferendone diverse e complesse proprietà fisico-chimiche.

## 11.2 Connessione tra il settore tecnico di progettazione idraulica e le opere di Ingegneria Naturalistica

### 11.2.1 Introduzione

Le più recenti impostazioni progettuali nel campo delle opere idrauliche hanno portato ad un ribaltamento nell'atteggiamento nei confronti dei corsi d'acqua, non più visti solo come entità dalle quali l'uomo si deve proteggere, ma come un patrimonio da valorizzare. Numerose sono ormai le azioni normative che recepiscono tale punto di vista, dalla legge n. 183, "Norme per il riassetto organizzativo e funzionale della difesa del suolo", del 18 maggio 1989 e successive modifiche ed integrazioni, sulla difesa del suolo che ben esprime l'esigenza di tale visione prevedendo varie fasi di conoscenza, di programmazione, di piani-

Fig. 11.2 - Dinamica della corrente idrica in un meandro



Fonte: Lachat, 1991, modificato.

ficazione e di attuazione degli interventi a livello di bacino idrografico, a quelle di varie Autorità di Bacino di carattere nazionale ed interregionale e del Ministero dell'Ambiente. La progettazione delle sistemazioni idrauliche va affrontata con una visione sistemica, che parte dalla constatazione che un corso d'acqua non è un canale ove far transitare il fluido il più rapidamente possibile, bensì un ecosistema complesso nel quale le varie componenti viventi e non viventi entrano in tipiche relazioni ed ove la recisione di un legame può mettere in crisi l'intero equilibrio.

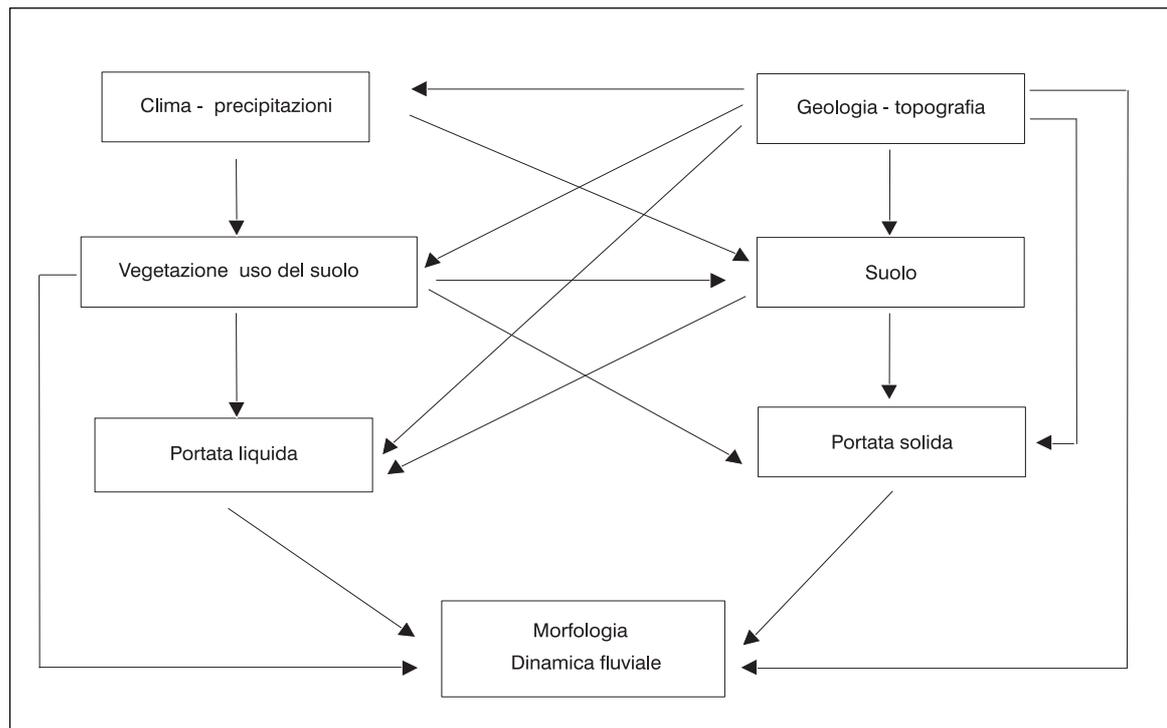
Le sistemazioni idrauliche vanno realizzate dopo uno studio a livello di bacino idrografico, iniziando a monte con interventi sui versanti in erosione e sull'alveo, per consentire l'aumento del tempo di corrivazione delle acque e la diminuzione del trasporto solido a valle e proseguendo nei tratti intermedi e di pianura con la realizzazione di casse d'espansione per abbassare i picchi delle piene, ottenendo aree da sistemare secondo principi naturalistici che aumentano la biodiversità, favorendo al massimo lo sviluppo della vegetazione ripariale.

Il progetto di Ingegneria Naturalistica nel settore delle sistemazioni idrauliche si propone quindi come un progetto multidisciplinare, dove l'ingegnere idraulico e l'esperto di Ingegneria Naturalistica lavorano insieme per individuare gli interventi di rinaturalizzazione e di Ingegneria Naturalistica, per le sistemazioni antierosive e di consolidamento, con l'obiettivo dell'aumento della biodiversità del territorio attraversato dall'alveo e del miglioramento della rete ecologica esistente.

### 11.3 Problematiche dei corsi d'acqua di fondovalle e montani

Il modellamento del territorio dipende da diversi fattori fisici: il principale, oltre al vento, è l'acqua, che modella le superfici e genera forme territoriali nuove dipendentemente dai substrati litologici e dagli ecosistemi che incontra. I fenomeni naturali legati all'acqua, come le precipitazioni, le infiltrazioni, le percolazioni ed i ruscellamenti modificano la situazione sia a causa della variabilità dei fattori climatici che li regolano, sia per la natura dei suoli che li subiscono, sia per il tipo di uso antropico che viene fatto dei suoli stessi. Lo schema che segue riporta i legami tra i fattori che determinano la morfologia del corso d'acqua (fig. 11.3). Le variazioni di modello fluviale che hanno luogo in un processo evolutivo continuo, non sono altro che l'espressione di equilibri instabili tra i fattori che determinano la morfologia di un sistema fluviale. Per comprendere le origini delle erosioni e delle inondazioni bisogna tenere presente che, da un punto di vista idraulico, l'acqua è un fluido che dissipa energia per attrito lungo le sponde e il fondo dell'alveo. L'energia si trasforma in forza che può determinare lo spostamento del materiale che costituisce l'alveo fluviale (fenomeni erosivi): la capacità dell'acqua di trasportare i materiali è direttamente proporzionale a tale energia (forza di trascinamento). L'erosione e il conseguente trasporto di materiale dipendono in primo luogo dalle caratteristiche del bacino idrografico (in particolare dalla dinamica dei versanti) e dalle seguenti caratteristiche morfologiche principali del corso d'acqua:

Fig. 11.3 - Fattori che determinano la morfologia di un corso d'acqua



- portata idrica;
- pendenza delle sponde;
- altezza delle sponde;
- pendenza dell'alveo;
- larghezza dell'alveo;
- granulometria del materiale litoide di fondo.

Il tipo e l'entità dell'erosione dipendono dai sopracitati parametri.

Generalmente, al diminuire delle pendenze la forza di trascinamento si smorza fino al punto da produrre accumuli di materiale (deposito e sedimentazione) anziché erosione.

Questi fenomeni di erosione e deposito determinano l'evoluzione continua della morfologia degli alvei fluviali, che si possono distinguere in tre tipologie differenti:

- *aste montane*: caratterizzate da forti pendenze, da substrato litoide da un'azione erosiva o di scavo e da un'elevata azione di trascinamento che mobilita periodicamente materiale detritico di varia pezzatura, dalla sabbia ai grossi blocchi. Se il bacino d'impluvio è situato al di sotto del limite dei boschi, l'alimentazione avviene da sorgenti perenni e il deflusso è più regolare; in queste zone possono essere utilmente previsti interventi mirati alla conservazione della copertura boschiva e al raggiungimento di una buona regimazione dei deflussi superficiali, limitando il trasporto solido a valle. I problemi maggiori si hanno per i tratti posti al di sopra del limite del bosco, dove non è possibile utilizzare la vegetazione per rallentare la velocità dell'acqua e diminuire il trasporto solido. In questi tratti possono rendersi necessarie opere di imbrigliamento;
- *aste intermedie*: caratterizzate da una forza erosiva inferiore, tratti di deposito di materiali grossolani (ciottoli, ghiaie), l'alveo è ampio, ramificato, intrecciato, a morfologia instabile. La pendenza dell'alveo diminuisce via via che si procede verso la confluenza di fondovalle dove, in conseguenza dello spagliamento della corrente, si determinano ampi depositi di materiale detritico (coni di deiezione). In queste zone, la presenza di insediamenti richiede spesso la regolarizzazione e regimazione dell'alveo.

Tali interventi riducono la scabrezza aumentando le velocità e la capacità di trasporto solido del torrente. Ciò causa la distruzione temporanea delle comunità vegetali e animali, oltre che aumentare le probabilità di esondazione a valle;

- *aste di pianura*: caratterizzate da alvei unici, sinuosi con anse e meandri. Le zone in erosione si alternano a quelle di deposito, formando appunto i meandri caratterizzati da erosione in sponda esterna alla curva e depositi in sponda interna. Gran parte dei corsi d'acqua di questo tipo sono caratterizzati da un sostanziale equilibrio tra erosione e sedimentazione, pur essendo talvolta notevole l'apporto solido proveniente dagli affluenti. In particolari tratti, tuttavia, l'azione di trascinamento delle acque è paragonabile a quella del corso inferiore dei torrenti montani e quindi è in grado di causare fenomeni d'escavazione intensi. Tali fenomeni possono poi essere esaltati dall'uomo, dal disboscamento e dalla messa a coltura del suolo forestale e dalla costruzione di edifici e sovrastrutture che, essendo spesso realizzate all'interno delle aree di pertinenza fluviale, causano ostacoli di deflusso, riduzione delle sezioni trasversali, aumento della velocità e dell'azione di trascinamento delle correnti idriche. Dal punto di vista ecologico le aste di fondovalle ricoprono oggi l'importantissimo ruolo di "corridoi ecologici", dato il drastico impoverimento ecosistemico delle aree coltivate e l'intensificazione dell'uso antropico dei suoli pianeggianti.

### 11.3.1 Processi di erosione e meccanismi di instabilità di sponde fluviali

L'arretramento di una sponda deriva raramente da un singolo processo, ma è piuttosto il risultato di una complessa interazione tra vari processi e meccanismi che spesso agiscono sulla sponda simultaneamente.

Questi sono raggruppati in due principali categorie:

- processi di erosione, attraverso i quali si ha

Tab. 11.1 - Principali processi di erosione agenti su sponde fluviali

Processo	Descrizione
Erosione fluviale per corrente parallela ( <i>fluvial entrainment by parallel flow</i> )	Particelle asportate da parte di corrente parallela alla sponda
Erosione fluviale per corrente incidente ( <i>fluvial entrainment by impinging flow</i> )	Particelle asportate da parte di corrente ortogonale alla sponda
Erosione per rigagnoli e per fossi ( <i>rills and gullies</i> )	Erosione da parte di acque di ruscellamento concentrato
Sifonamento ( <i>piping/sapping</i> )	Rimozione di particelle ad opera della filtrazione all'interno della sponda
Gelo/disgelo ( <i>freeze/thaw</i> )	Particelle (o aggregati) rimosse dall'azione del gelo
Onde generate dal vento ( <i>wind waves</i> )	Particelle (o aggregati) distaccate dall'azione di onde generate dal vento
Onde generate artificialmente (solo in canali e superfici navigabili)	Particelle (o aggregati) distaccate dall'azione di onde generate artificialmente

**Tab. 11.2 - Principali movimenti di massa agenti su sponde fluviali**

Meccanismo di rottura	Descrizione
Scivolamento rotazionale ( <i>rotational slip</i> )	Scivolamento lungo una superficie di rottura curva o concava verso l'alto
Scivolamento traslativo superficiale ( <i>shallow slide</i> )	Scivolamento lungo una superficie di rottura superficiale parallela al pendio
Scivolamento planare ( <i>planar failure</i> )	Scivolamento lungo una superficie di rottura piana, in genere con frattura di trazione
Ribaltamento ( <i>slab - type failure</i> )	Ribaltamento di blocchi o colonne di terra
Crollo di masse aggettanti ( <i>cantilever failure</i> )	Crollo di blocchi di materiale in aggetto
Crollo di terra ( <i>soil fall</i> )	Crollo di particelle individuali (o aggregati) di terra da sponde sub-verticali
Colata granulare secca ( <i>dry granular flow</i> )	Colamento di materiale granulare secco
Colata di terra bagnata ( <i>wet earth flow</i> )	Colamento con possibile liquefazione di materiale saturo
Sifonamento ( <i>pop-out</i> )	Movimento di massa della porzione inferiore di una sponda in seguito a forti pressioni interstiziali

**Tab. 11.3 - Schema riepilogativo dei principali fattori e cause dei processi di erosione e dei meccanismi di instabilità agenti su sponde fluviali**

<b>Erosione fluviale corrente parallela o incidente</b>	Aumento azioni tangenziali della corrente $\tau$ : per aumento delle altezze idrometriche durante piene; incremento azioni tangenziali su sponda esterna di meandri per distribuzione asimmetrica velocità e correnti secondarie.
	Riduzione sforzo di taglio critico materiale $\tau_c$ : per processi di degradazione meteorica, filtrazione o circolazione di fluidi interstiziali con passaggio da materiale addensato a sciolto.
<b>Rigagnoli e fossi</b>	Erosività dell'evento piovoso, erodibilità del terreno, morfologia della sponda (altezza e pendenza), copertura vegetale.
<b>Sifonamento</b>	Velocità del flusso di filtrazione superiore alla velocità critica particelle (superamento del gradiente idraulico critico), soprattutto in seguito a precipitazioni e durante svasso di una piena.
<b>Vento, gelo/disgelo</b>	Caratteristiche climatiche dell'area; escursioni termiche; esposizione della sponda; caratteristiche del materiale.
<b>Movimenti di massa</b>	<i>Aumento delle forze di taglio:</i> aumento di altezza e pendenza della sponda per erosione fluviale al piede o abbassamento del fondo; aumento peso di volume materiale per infiltrazione; sovraccarichi sulla sommità della sponda; sollecitazioni transitorie. <i>Riduzione resistenza al taglio:</i> <ul style="list-style-type: none"> <li>• <i>Bassi valori iniziali di resistenza al taglio:</i> composizione e tessitura del materiale; alternanza di livelli a diversa permeabilità;</li> <li>• <i>Riduzione del termine resistenza legato alla suzione:</i> infiltrazione verticale (acque di precipitazione e/o laterale (acqua del fiume durante piene));</li> <li>• <i>Riduzione degli sforzi efficaci:</i> aumento delle pressioni interstiziali per innalzamento superficie freatica; fenomeni di filtrazione; liquefazione; carico non drenato;</li> <li>• <i>Riduzione dei parametri di resistenza al taglio:</i> per processi di degradazione fessurazione, idratazione argille, crio- e termoclastismo, ecc.); possibile calpestio ad opera di animali, persone o mezzi.</li> </ul>

rimozione e trasporto di particelle individuali o aggregati di particelle dalla superficie esterna della sponda in arretramento;

- movimenti di massa, caratterizzati da movimenti di masse di materiale costituente la sponda in seguito all'azione della gravità.

Una sintetica descrizione dei principali processi

e meccanismi di instabilità responsabili dell'arretramento di sponde fluviali è riportata nelle **tabelle 11.1-11.3**.

L'inesco del processo di erosione fluviale può essere schematicamente ricondotto alla condizione in cui le azioni tangenziali esercitate dalla corrente (T) superano lo sforzo di taglio

critico di inizio del moto per un dato materiale costituente la sponda ( $T_c$ ). Per quanto riguarda le cause d'innescio di movimenti di massa è utile fare invece riferimento, come tipicamente avviene nell'analisi di stabilità dei pendii, al rapporto forze destabilizzanti e stabilizzanti, le prime legate alle sollecitazioni di taglio agenti su una potenziale superficie di scivolamento all'interno del pendio, quelle stabilizzanti legate invece alla resistenza al taglio del materiale.

Per quanto riguarda quest'ultima occorre notare che il materiale che costituisce le sponde fluviali è, almeno per gran parte dell'anno, non saturo. All'interno della sponda (in particolare di quelle costituite da materiale fine) è comunemente presente, al di sopra della falda, una frangia di risalita capillare seguita verso l'alto da una zona di parziale saturazione, con filetti d'acqua continui o con fenomeni di capillarità locali, che si può estendere fino al piano di campagna. Le condizioni di pressioni interstiziali nella zona non satura hanno importanti effetti in termini di stabilità della sponda (Rinaldi, Casagli, 1999). È pertanto utile in questi casi, per meglio inquadrare fattori che possono determinare la stabilità o l'innescio di movimenti di massa, far riferimento ad un criterio di rottura più generale di quello normalmente adottato per condizioni sature, che tenga conto anche del possibile sviluppo di pressioni negative.

Il criterio normalmente utilizzato in tali casi è quello proposto da Fredlund *et al.* (1978) che assume la forma seguente:

$$\tau = c' + (u_a - u_w) \tan \Phi^b + (s - u_a) \tan \Phi'$$

dove:

- $c'$  = coesione efficace;
- $(u_a - u_w)$  = suzione;
- $\Phi^b$  = angolo di attrito in termini di suzione;
- $\Phi'$  = angolo di attrito in termini di sforzi efficaci.

Il termine addizionale di resistenza dovuto alla suzione tende a ridursi o a scomparire del tutto (da cui il termine di coesione apparente) a seguito di eventi meteorici (infiltrazione verticale dell'acqua di precipitazione, infiltrazione laterale dell'acqua del fiume durante la piena), quando il terreno si avvicina o raggiunge condizioni di saturazione, nel qual caso la resistenza al taglio è esprimibile tramite il criterio di Mohr-Coulomb.

Facendo riferimento quindi al criterio di rottura generale per terreni insaturi, la condizione in cui le forze resistenti siano inferiori alle forze destabilizzanti è pertanto riconducibile ad uno dei seguenti quattro casi:

- condizioni iniziali che determinano bassi valori di resistenza al taglio;
- riduzione del termine di resistenza legato alla suzione;
- riduzione degli sforzi efficaci;
- riduzione dei parametri di resistenza al taglio ( $c'$ ,  $\Phi'$ ,  $\Phi^b$ ).

### 11.3.2 Processi di sedimentazione

Si possono schematicamente distinguere i processi di: *sedimentazione laterale* e di *sedimentazione verticale*, anche se essi in genere agiscono in combinazione.

La *sedimentazione laterale* è quella legata alla migrazione delle barre nei canali attivi, nei sistemi a canali intrecciati, o al tipico processo d'accrescimento della barra di meandro nei sistemi meandriiformi.

La *sedimentazione verticale* è quella dovuta a trascinamento (*overbank*), la quale determina una progressiva accrezione verticale del prisma alluvionale, il cui tasso dipende da numerosi fattori quali la produzione di sedimenti nel bacino, il tasso di subsidenza, le variazioni climatiche e del livello marino.

Alla base di sponde fluviali in arretramento, il materiale derivante dai vari meccanismi di rottura che non viene trasportato direttamente dalla corrente, unitamente a quello prodotto dai vari processi di degradazione, tende a depositarsi almeno per un certo tempo alla base della sponda. La rimozione o la stabilizzazione di tale materiale dipendono principalmente dal bilancio tra tasso di alimentazione da parte dei processi che agiscono sulla sponda e tasso di asportazione ad opera della corrente, secondo un meccanismo noto come "controllo del punto basale" (*basal endpoint control*: Thorne, 1982). In base a tale concetto, si possono schematicamente distinguere tre situazioni (Lawler *et al.*, 1997):

- *condizioni di accumulo*, quando i movimenti di massa apportano materiale alla base della sponda con una velocità maggiore rispetto al tasso di rimozione; si forma, pertanto, un accumulo di materiale alla base che riduce l'altezza e la pendenza della sponda e, di conseguenza, comporta una progressiva stabilizzazione della stessa;
- *condizioni d'equilibrio*, se i processi di apporto e rimozione si bilanciano tra loro, la sponda è in equilibrio dinamico ed evolve per arretramento parallelo;
- *condizioni di erosione*, quando l'erosione è tale da comportare una rimozione completa del detrito alla base della sponda ed è inoltre in grado di produrre un abbassamento del fondo, aumentando ulteriormente l'instabilità della sponda.

### 11.3.3 Il ruolo della vegetazione

Lo sviluppo e l'utilizzazione di tecniche di Ingegneria Naturalistica pone il problema di valutare gli effetti che possono aversi in seguito all'impianto di nuova vegetazione su una sponda fluviale. Viceversa, la parziale o totale asportazione di vegetazione da un tratto di sponda, che ha spesso costituito durante gli ultimi decenni una pratica estremamente comune da parte degli Enti preposti all'intervento sui corsi d'acqua, pone un problema di tipo opposto e solo recentemente si è messa in discus-

sione l'opportunità e la convenienza di tale tipo di intervento, anche in conseguenza della contemporanea affermazione delle tecniche di Ingegneria Naturalistica.

Risulta pertanto evidente la necessità di considerare attentamente tutti i possibili effetti che la vegetazione può avere nei confronti dei processi fluviali, in modo da poter valutare, a seconda della situazione, l'opportunità o meno di impiantare nuova vegetazione o, viceversa, di asportare quella esistente.

La vegetazione ha, infatti, molteplici effetti, sia nei confronti dei fenomeni di esondazione che dei processi responsabili dell'arretramento di una sponda, così come dei fenomeni di sedimentazione e di trasporto solido. Alcuni di tali effetti possono essere considerati positivi o stabilizzanti altri, viceversa, negativi o destabilizzanti. La valutazione degli effetti della vegetazione ed il bilancio tra quelli stabilizzanti e quelli destabilizzanti dovrebbero costituire il punto di partenza sul quale basare qualsiasi criterio di gestione e strategia di intervento.

Per inquadrare correttamente gli effetti della vegetazione, vengono di seguito dapprima descritti sinteticamente i principali processi, soprattutto quelli responsabili dell'arretramento di sponde fluviali, la cui mitigazione è in genere un obiettivo primario agli interventi di Ingegneria Naturalistica. Per quanto riguarda i processi di erosione, vengono descritti gli effetti:

- nei confronti delle azioni tangenziali della corrente;
- dell'erodibilità del materiale costituente la sponda;
- nei confronti dei processi di erosione superficiale e dilavamento.

Per quanto riguarda invece i movimenti di massa, si trattano separatamente gli effetti della vegetazione che vanno ad influire:

- sulle azioni tangenziali;
- sulle pressioni interstiziali;
- sulla resistenza al taglio del materiale.

Viene infine accennata:

- il ruolo della vegetazione nei confronti dei processi di sedimentazione, in particolare di quelli che controllano la stabilizzazione di una sponda precedentemente instabile;
- i fenomeni di trasporto e sedimentazione di materiale detritico vegetazionale.

#### 11.3.4 Effetti della vegetazione sulle azioni tangenziali della corrente

La valutazione degli effetti della vegetazione riparia sulla distribuzione delle azioni tangenziali della corrente è molto complessa ed ancora non ben conosciuta in tutti i suoi aspetti.

La complessità del problema è duplice: oltre allo studio della distribuzione delle azioni tangenziali lungo il perimetro di una sezione trasversale, problema già molto articolato che necessita di una serie di schematizzazioni ed approssimazioni, nel caso di alvei con sponde vegetate è necessario comprendere come la vegetazione influisce su tale distribuzione ed an-

che come tale influenza vari nel tempo, dal momento che la scabrezza dovuta alle piante cambia su scala stagionale e con la crescita della vegetazione stessa.

Si deve, inoltre, considerare che la vegetazione, almeno quella flessibile, tende a piegarsi quando sottoposta all'azione della corrente e pertanto i suoi effetti variano anche sulla base del singolo evento di piena in funzione dei livelli idrometrici raggiunti dal fiume.

In generale, si può comunque dire che l'effetto principale della vegetazione nei confronti dei processi di erosione fluviale è quello di:

- un *aumento della scabrezza* nella zona prossima alla sponda;
- una conseguente *riduzione della velocità e delle azioni tangenziali della corrente*;
- una *deviazione della corrente dal perimetro bagnato*, impedendo un impatto diretto nei confronti del materiale della sponda, soprattutto nel caso di corrente incidente;
- un'*azione di protezione indiretta* nei riguardi della sponda stessa.

In entrambi i casi è molto importante sia il tipo di vegetazione presente, sia la sua distribuzione spaziale (Thorne, 1990).

Nel caso di vegetazione erbacea ed arbustiva, l'effetto è significativo soprattutto per basse velocità della corrente, mentre si riduce significativamente all'aumentare della velocità e si annulla completamente quando gli steli delle piante risultano completamente piegati nel senso della corrente non offrendo più una significativa resistenza al moto.

Nel caso di vegetazione arborea, i tronchi delle specie legnose continuano a ritardare il deflusso anche per velocità della corrente molto elevate. Tali tipi di piante possono tuttavia provocare erosioni localizzate a causa dello sviluppo di turbolenza e dell'accelerazione locale della corrente. A questo proposito diventa molto importante la densità della vegetazione arborea presente. La distanza tra gli alberi può infatti determinare situazioni notevolmente differenti: singoli alberi o piccoli gruppi possono costituire un ostacolo al deflusso creando macroturbolenze; in tal caso la corrente può agire direttamente sul tratto di sponda compreso tra due piante o gruppi di alberi successivi. Affinché la presenza degli alberi sia realmente efficace nella mitigazione dell'azione erosiva della corrente, essi devono essere disposti abbastanza vicini, in modo che la zona di scia dovuta a ciascuno di essi si estenda fino al successivo e non abbia un impatto diretto sulla sponda nello spazio interposto.

In questo senso l'effetto degli alberi continua anche dopo la morte delle piante. Un albero isolato, una volta caduto, può generare erosione localizzata e, se non viene rimosso, può costituire un punto di grave instabilità. Un denso accumulo di tronchi caduti sulla sponda può invece rappresentare un'efficace protezione dall'erosione, generando però un aumento del rischio idraulico durante le piene quando la vegetazione morta, trascinata dalla corrente, può

ostruire parzialmente o totalmente le sezioni ristrette del fiume.

Per la valutazione degli effetti della vegetazione si deve inoltre tener conto delle dimensioni del fiume: in un corso d'acqua di piccole dimensioni, ad esempio, la presenza di un tronco caduto implica la deviazione della corrente e genera facilmente erosione sulla sponda opposta, effetto chiaramente trascurabile nel caso di fiumi sufficientemente larghi.

### 11.3.5 Effetti della vegetazione sull'erodibilità del materiale

Nei confronti dell'erosione fluviale, la presenza di vegetazione tende a limitare fortemente il distacco di granuli individuali o aggregati del materiale di sponda.

In confronto a sponde non vegetate, su sponde vegetate con una buona copertura si riscontra una riduzione di erosione dovuta all'azione diretta della corrente tra uno e due ordini di grandezza.

Le radici della vegetazione presente sulla superficie della sponda hanno l'effetto di favorire, in particolare nel caso di materiale coesivo, il legame tra le singole particelle e di conferire al terreno una coesione aggiuntiva.

Ciò previene quindi che l'erosione fluviale avvenga attraverso la rimozione dei singoli granuli.

La condizione critica di innesco dell'erosione fluviale, pertanto, non è tanto associata alle dimensioni dei singoli granuli costituenti la sponda, quanto piuttosto alla condizione di rottura o di sradicamento delle piante presenti, condizione che in genere può essere raggiunta per azioni tangenziali della corrente notevolmente più elevate di quelle corrispondenti allo sforzo di taglio critico per i granuli costituenti la sponda. La presenza di vegetazione ha pertanto l'effetto di aumentare notevolmente la resistenza all'erosione dovuta alla corrente fluviale.

Nei riguardi di materiale granulare, come ad esempio nel caso sia presente un livello di ghiaia embriciata ed addensata nella porzione basale della sponda, la presenza di radici può talora avere un effetto contrario di riduzione dell'addensamento del materiale e renderlo più facilmente asportabile da parte della corrente. Anche nei riguardi di tali effetti la maggiore o minore efficacia della presenza di vegetazione è legata a fattori quali:

- il tipo di vegetazione;
- l'età;
- la spaziatura;
- la densità;
- la posizione della vegetazione stessa sulla sponda.

Affinché la presenza di vegetazione sia efficace contro l'erosione essa deve estendersi fino al livello di magra, altrimenti la corrente può facilmente esercitare un'azione di erosione alla base della sponda destabilizzandone anche la porzione superiore.

### 11.3.6 Effetti della vegetazione sull'erosione superficiale e sul sifonamento

La vegetazione svolge un ruolo sicuramente positivo riguardo alla mitigazione dei processi di erosione superficiale, seppure questa sia raramente osservabile ed efficace su sponde fluviali e difficilmente costituisca una causa primaria di arretramento.

L'azione di intercettazione delle gocce di pioggia da parte delle foglie e la traspirazione riduce l'entità di ruscellamento superficiale, al quale principalmente i processi di erosione superficiale sono legati.

La presenza, inoltre, di vegetazione sulla superficie della sponda esercita anche in questo caso, come per la corrente fluviale, un'azione di protezione diretta, ostacolando il distacco di singole particelle e al tempo stesso rallentando la velocità delle acque di ruscellamento superficiale e quindi riducendone la capacità erosiva.

Un ruolo positivo è svolto, inoltre, dalla sostanza organica che si concentra in superficie, derivando dalla decomposizione di resti di fibre vegetali, che favorisce l'aggregazione di particelle del terreno e facilita l'infiltrazione riducendo quindi il ruscellamento superficiale e aumentando l'acqua disponibile per la crescita di nuove piante.

Nei confronti del sifonamento, se da un lato le piante tendono a ridurre il contenuto d'acqua nel terreno per la loro azione di drenaggio, riducendo di conseguenza l'entità delle forze di filtrazione, dall'altro lato la presenza di radici all'interno della sponda può favorire la formazione di vie preferenziali per la filtrazione stessa. Tale effetto vale soprattutto nel caso di vegetazione morta: le radici lasciate all'interno della sponda perdono con il tempo il loro effetto in termini di incremento di coesione e, al contrario, in seguito alla decomposizione delle stesse, lasciano dei vuoti e delle cavità che riducono la resistenza del materiale ed inoltre favoriscono la circolazione di acqua interstiziale e la possibilità di sviluppo di sifonamento.

### 11.3.7 Effetti della vegetazione sulla stabilità di sponde fluviali

Per quanto riguarda gli effetti sulle variazioni di resistenza al taglio del materiale, ai fini della valutazione degli effetti della vegetazione, vengono di seguito considerate due principali categorie:

- effetti sui parametri di resistenza al taglio;
- effetti della vegetazione sulle pressioni interstiziali, inglobando cioè insieme gli effetti sulla suzione (*porzione insatura della sponda*) e sulle tensioni efficaci (*porzione satura*).

### 11.3.8 Effetti sulle forze di taglio

Il primo effetto da considerare è quello del sovraccarico dovuto alla vegetazione, soprattutto a quella arborea. Seppure esso sia molto

spesso ritenuto un effetto destabilizzante, può in molti casi invece svolgere un ruolo stabilizzante nei confronti della sponda. Il peso della vegetazione, infatti, può essere scomposto in una componente normale ed una parallela al pendio e ad una potenziale superficie di scivolamento. La prima ha un effetto stabilizzante in quanto aumenta gli sforzi efficaci, e quindi la resistenza al taglio per attrito, mentre la seconda ha un effetto destabilizzante dal momento che aumenta le sollecitazioni di taglio lungo la potenziale superficie di scivolamento.

Pertanto, il prevalere degli uni o degli altri effetti dipende principalmente dall'inclinazione della sponda: su sponde con pendenze relativamente basse, il contributo del sovraccarico in direzione del pendio è piccolo rispetto alla componente normale e, di conseguenza, l'effetto netto del sovraccarico è quello di incrementare la stabilità, mentre su sponde molto ripide il sovraccarico riduce la stabilità. In termini molto generali si può dire che, facendo riferimento per semplicità ad uno scivolamento traslativo con superficie di rottura parallela al pendio, il sovraccarico ha effetto stabilizzante quando l'angolo di inclinazione del pendio è inferiore all'angolo di resistenza al taglio del terreno (Greenway, 1987).

Per tale meccanismo di instabilità, Gray e Megahan (1981) hanno in particolare mostrato che il sovraccarico favorisce la stabilità nei casi in cui:

$$c < \gamma_w \cdot H_w \cdot \tan \Phi \cdot \cos^2 \alpha$$

dove:

- $c$  = coesione;
- $\gamma_w$  = peso di volume dell'acqua;
- $H_w$  = altezza della superficie piezometrica al di sopra della superficie di scivolamento;
- $\Phi$  = angolo di attrito del materiale;
- $\alpha$  = inclinazione della sponda.

L'effetto della vegetazione nei confronti delle forze di taglio dipende anche, a parità di geometria della sponda, dalla posizione in cui le piante si trovano: la vegetazione arborea presente sulla sommità di una sponda a forte inclinazione ha un effetto destabilizzante, mentre ha l'effetto contrario se è posta alla base della stessa. In quest'ultimo caso essa svolge, infatti, un'azione di appesantimento al piede, un'azione di contrasto al movimento tramite l'apparato radicale ed, inoltre, favorisce la sedimentazione ed il conseguente sviluppo di una superficie alla base della sponda che ha effetti stabilizzanti anche nei confronti dei processi fluviali.

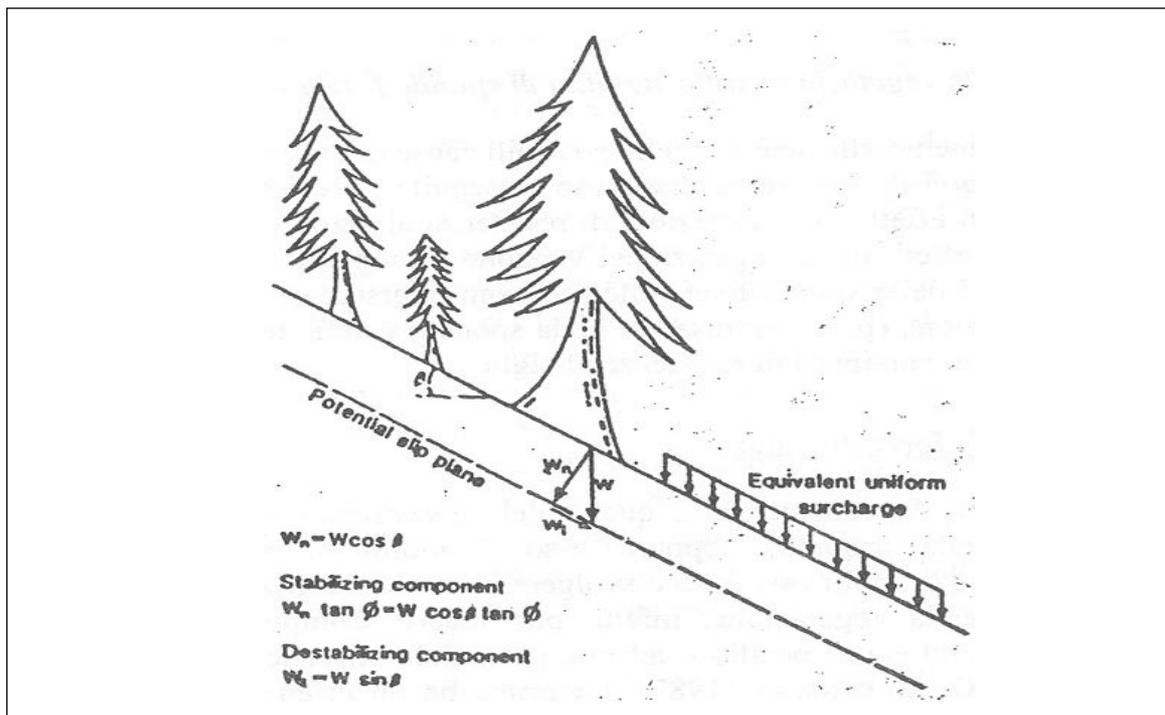
Un secondo effetto della vegetazione nei confronti delle forze di taglio è quello della trasmissione di sollecitazioni dovute al vento. Hsi e Nath (1970), attraverso una simulazione degli effetti del vento su di un versante coperto da bosco, hanno concluso che la tensione di taglio generata dal vento può essere espressa come:

$$\tau_w = C^{1/2} \cdot \rho \cdot V_a^2$$

dove:

$C$  = coefficiente di trascinamento (*drag coefficient*);

Fig. 11.4 - Sovraccarico dovuto al peso della vegetazione



Fonte: Greenway, 1987.

$\rho$  = densità dell'aria;  
 $V_a$  = velocità del vento.

Il coefficiente di resistenza risulta massimo ai margini del bosco, dove un vento di circa 90 km/h può produrre una tensione dell'ordine di 1 kPa.

Se le tensioni generate dal vento agissero simultaneamente su una vasta porzione di copertura arborea posta su di un pendio, ciò potrebbe avere significativi effetti destabilizzanti (Greenway, 1987) (fig. 11.4).

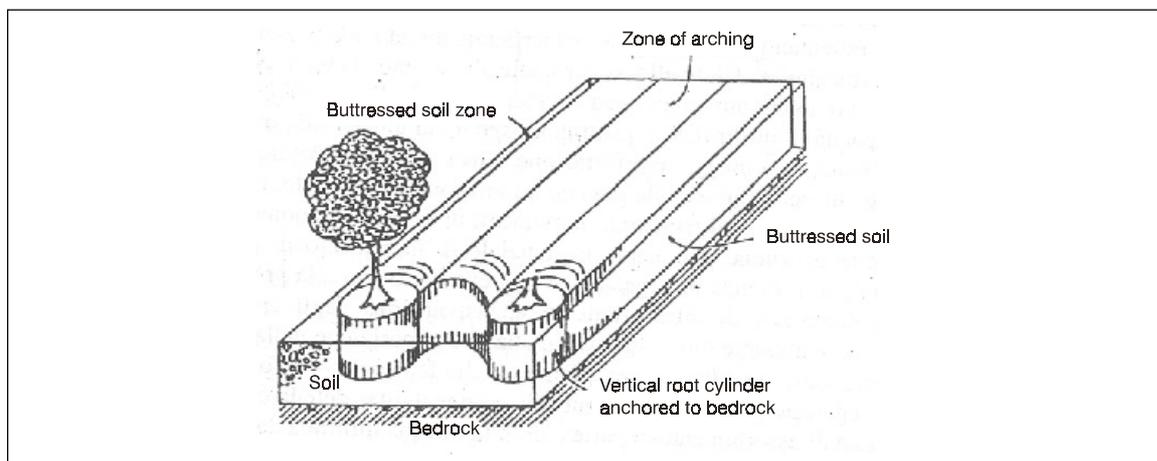
In realtà tale situazione si verifica raramente, soprattutto nel caso di sponde fluviali, dove l'effetto del vento può essere piuttosto risentito dalle singole piante tendendo talora a favorirne lo sradicamento, specie nel caso di alberi con apparati radicali deboli e superficiali. Tuttavia, poco ancora è noto sull'effetto leva prodotto dall'azione del vento sul singolo al-

bero, nonostante alcuni studi teorici condotti su tale aspetto (Brown, Sheu, 1975).

Un ultimo gruppo di possibili effetti della vegetazione nei confronti delle forze di taglio agenti su di una sponda fluviale, o su di un pendio in generale, comprende ancoraggio (*anchoring*), sostegno (*buttressing*) ed "effetto arco" (*arching*) (Gray, 1978; Greenway, 1987). Gli alberi agiscono a favore della stabilità del pendio attraverso la formazione di blocchi distanziati di terreno rinforzato ed ancorato in profondità, cui si appoggia, direttamente o per effetto arco, il terreno retrostante (fig. 11.5).

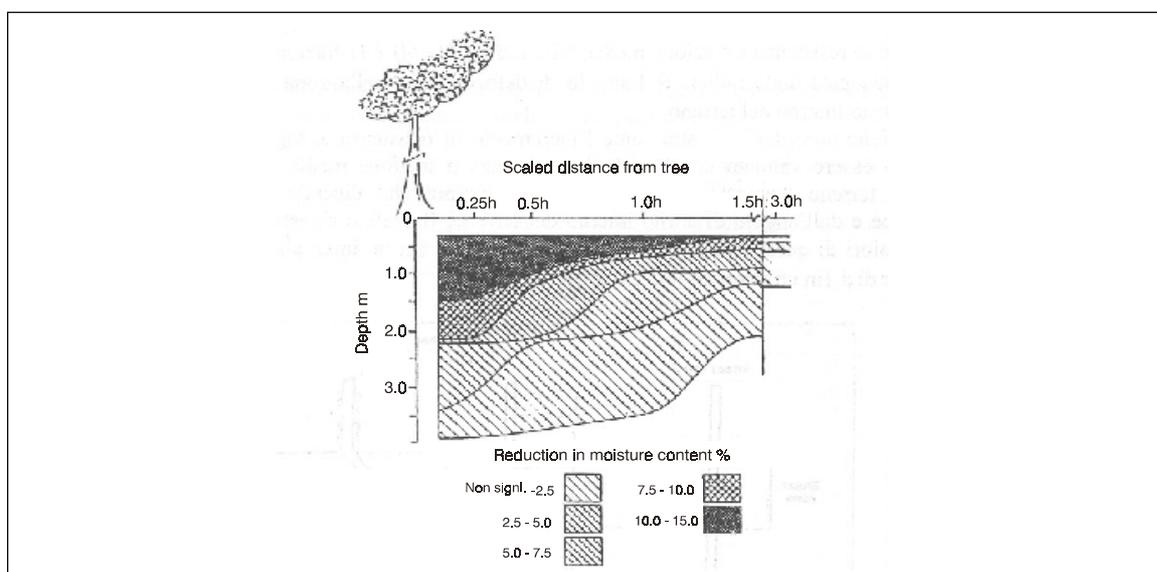
Gray (1978), in particolare, ha rappresentato graficamente la spaziatura critica (minima) teorica tra i singoli alberi richiesta affinché si abbia l'effetto arco su un pendio di una certa inclinazione e per determinate caratteristiche geotecniche del terreno.

Fig. 11.5 - Schematica rappresentazione degli effetti di ancoraggio, sostegno ed "effetto arco" legati alla presenza di alberi



Fonte: Greenway, 1987.

Fig. 11.6 - Riduzione del contenuto d'acqua nel terreno in prossimità di un pioppo



Fonte: Bibble, 1983, in Greenway, 1987.

### 11.3.9 Effetti sulle pressioni interstiziali

La presenza di vegetazione comporta, in terreni coesivi o granulari parzialmente saturi, a capacità di drenaggio superiore a quella dello stesso terreno privo di vegetazione, per la concomitanza di vari meccanismi quali, in particolare, l'intercettazione delle gocce di pioggia da parte della pianta, la traspirazione ad opera dell'apparato radicale ed il seguente incremento di suzione nella porzione non satura della sponda.

Le perdite per intercettazione che si verificano su sponde vegetate dipendono da molti fattori, tra i quali:

- il tipo e le specie vegetali presenti;
- la percentuale di area coperta da vegetazione;
- l'intensità e la durata delle precipitazioni.

Una copertura vegetale intercetta dal 10% al 25% delle precipitazioni, percentuale che può raggiungere il 100% nel caso precipitazioni di breve durata. L'intercettazione, come descritto in precedenza, ha anche capacità di ridurre l'erosione superficiale dovuta all'impatto delle gocce sul terreno e quella legata al ruscellamento superficiale.

Le piante assorbono acqua dal terreno e la disperdono nell'atmosfera tramite la traspirazione, riducendo il contenuto d'acqua e tendendo ad abbassare il livello della falda nella zona satura. Anche in questo caso il tasso di traspirazione dipende da numerosi fattori quali in particolare:

- il tipo e la dimensione della pianta;
- i fattori climatici;
- le caratteristiche del terreno.

L'assorbimento di acqua da parte delle piante per traspirazione ha quindi l'effetto, riducendo il contenuto d'acqua nel terreno, di ridurre anche le pressioni interstiziali e di alterarne la distribuzione anche ben al di sotto della zona interessata dalle radici (fig. 11.6). Nella zona insatura anche al di sotto delle radici l'effetto della traspirazione viene risentito attraverso un aumento di suzione. Le radici, infatti, aspirano acqua dal terreno aumentando l'altezza della frangia capillare, favorendo il flusso non saturo di acqua interstiziale verso la superficie ed infine inducendo maggiore perdita per evaporazione superficiale. Richards *et al.* (1983) riportano ad esempio un notevole incremento di suzione in prossimità di alberi rispetto ai valori misurati nell'adiacente pianura soggetta a pascolo.

Un fenomeno indotto dalla presenza di vegetazione, sulla superficie di un pendio che agisce invece in senso opposto è l'aumento della capacità di infiltrazione che si può verificare per il rallentamento del deflusso superficiale dovuto alla presenza di piante e per la maggiore permeabilità del livello superficiale di terreno. Nassif e Wilson (1975) hanno ad esempio osservato come una sponda poco inclinata (9°), ricoperta d'erba presenti una capacità di infiltrazione quadrupla rispetto ad una sponda di uguale geometria priva di vegetazione.

Una maggiore infiltrazione riduce il volume del deflusso superficiale e pertanto svolge un ruolo favorevole rispetto all'erosione superficiale; lo stesso fenomeno può però avere effetti negativi rispetto ai movimenti di massa, dal momento che comporta un aumento della pressione dell'acqua interstiziale. L'incremento di permeabilità dello strato superficiale in presenza di vegetazione può essere dovuto alla presenza di maggiori vuoti e vie preferenziali di infiltrazione in corrispondenza degli apparati radicali, in particolare nel caso di piante morte in seguito alla decomposizione della radice, fattori che possono causare, come ricordato in precedenza, anche fenomeni di sifonamento. Tuttavia nel caso di vegetazione viva l'aumento di permeabilità del livello superficiale è controbilanciato dall'assorbimento di parte o di tutta l'acqua infiltrata da parte delle piante.

#### 11.3.9.1 Effetti della vegetazione sui parametri di resistenza al taglio

Uno degli effetti principali della presenza di vegetazione su una sponda fluviale, soprattutto nel caso di vegetazione arborea, è quello di produrre un miglioramento delle caratteristiche geotecniche del terreno attraverso l'azione delle radici. Le radici delle piante presentano in genere un'elevata resistenza a trazione, pertanto la combinazione terreno-radici produce un sensibile rinforzo del terreno stesso paragonabile come effetti a ciò che viene ottenuto attraverso l'impiego di geotessili nella realizzazione di terre rinforzate. Le radici sono efficaci sia nell'aumentare la resistenza a rottura, sia nel distribuire, mediante la loro elasticità, le tensioni nel terreno, in modo da evitare stress locali e fessure.

Gli effetti di un sistema di radici sulla resistenza del terreno sono stati oggetto di numerosi studi. Vari autori riportano come la presenza di una copertura di varie specie arboree produca un incremento di oltre il 100% di resistenza al taglio del terreno (Waldron, 1977; Gray, 1978). Analogamente Endo e Tsuruta (1969) riportano i risultati ricavati da prove di taglio condotte su campioni contenenti radici osservando forti incrementi percentuali di resistenza al taglio per bassi valori di tensione normale (Giasi, 1994). Altri studi condotti su versanti ricoperti da vegetazione (O'Loughlin, 1974) indicano come siano le radici più fini (1-20 mm di diametro) che contribuiscono maggiormente al rinforzo del terreno, mentre le radici di dimensioni superiori non sembrano avere un ruolo significativo.

La presenza di radici aumenta la resistenza al taglio del terreno essenzialmente andando ad incrementare la coesione efficace e, indirettamente, il termine di resistenza legato alla suzione per la capacità traspirativa dell'apparato radicale stesso. Nel caso di terreno non coesivo, quando sono raggiunte condizioni di completa saturazione, l'unico contributo in terreni di coesione è legato proprio alla presenza di radici.

Un semplice modello teorico per stimare l'incremento di resistenza al taglio dovuto alla presenza di radici è stato sviluppato originariamente da Wu (1976) e riportato anche in Wu *et al.* (1979) e Greenway (1987).

Tale modello (fig. 11.7) considera una radice verticale flessibile ed elastica disposta perpendicolarmente alla zona di taglio, assumendo inoltre che la radice sia ancorata al terreno su entrambi i lati della zona di taglio, che la resistenza a trazione di tutte le radici sia completamente mobilitata e che le radici non alterino l'angolo di attrito interno del materiale.

Sotto tali ipotesi è possibile dimostrare che l'incremento di resistenza al taglio del terreno risulta pari a:

$$\Delta S = T_r (A_r/A) \cdot [\sin\theta + \cos\theta \cdot \tan\phi]$$

dove:

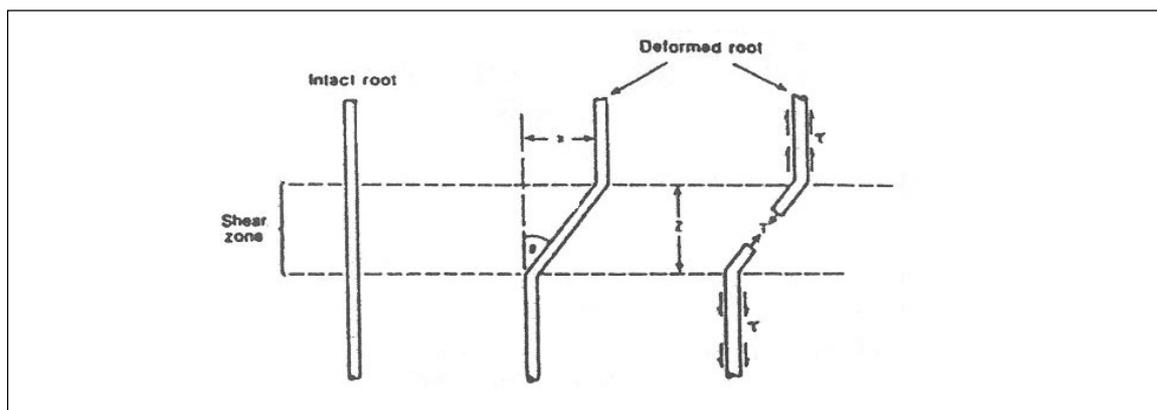
$T_r$  = resistenza a trazione media delle radici;

$(A_r/A)$  = frazione della sezione di terreno occupata dalle radici;  
 $\theta$  = angolo di deformazione nella zona di taglio;  
 $\phi$  = angolo di attrito interno del terreno.

L'equazione precedente mostra come l'incremento di resistenza al taglio dovuto alle radici possa essere valutato conoscendo la resistenza a trazione media delle radici, la frazione di terreno occupata dalle radici ed un fattore che dipende dall'angolo di deformazione e dall'angolo di attrito interno del terreno. Il grafico riportato nella figura 11.8 fornisce i valori di quest'ultimo termine in funzione di  $\theta$  (in un intervallo compreso fra 40° e 90°), e di  $\phi$  (in un intervallo tra 25° e 40°).

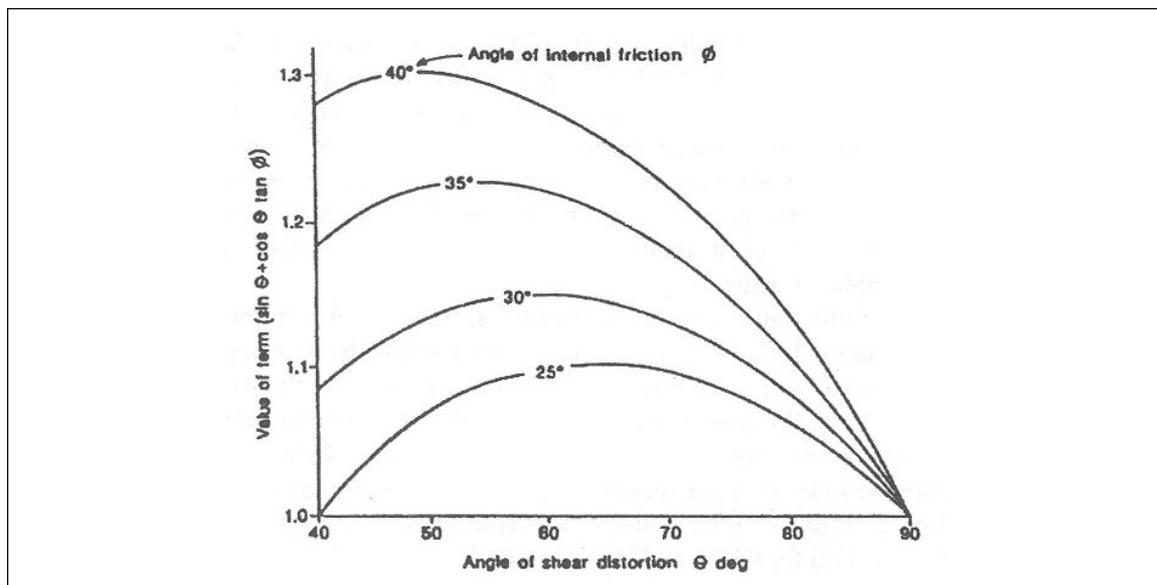
Osservazioni di campagna e di laboratorio, indicano che il termine tra parentesi riportato in equazione è relativamente insensibile alle normali variazioni degli angoli  $\theta$  e  $\phi$ , pertanto Wu *et al.* (1979) hanno proposto di utilizzare un valore medio pari a 1,2.

Fig. 11.7 - Modello di rinforzo di radici perpendicolari alla superficie di taglio



Fonte: Greenway, 1987.

Fig. 11.8 - Valori del termine fra parentesi dell'equazione



Fonte: Greenway, 1987.

Adottando tale valore, l'equazione si semplifica in:

$$\Delta S = 1,2 \cdot T_r (A_r/A)$$

In questo modo l'incremento di resistenza al taglio dipende interamente dalla resistenza a trazione media delle radici e dalla superficie occupata dalle stesse.

#### 11.3.10 Stabilità dei singoli alberi

Oltre ai meccanismi responsabili dell'instabilità dell'intera sponda in presenza di vegetazione, è necessario considerare che anche l'instabilità delle singole piante può rappresentare un importante meccanismo che può avere significativi effetti sui fenomeni di trasporto e sedimentazione. Un singolo albero presente su di una barra o su altre superfici all'interno dell'alveo di piena o su di una sponda, in occasione di una piena, è soggetto a notevoli sollecitazioni da parte della corrente in grado a volte di sradicare la pianta; l'azione di trascinamento della corrente si unisce, infatti, al fenomeno di erosione localizzata alla base del tronco, rendendo, in alcuni casi, instabile l'albero. I meccanismi di instabilità legati all'azione della corrente che possono interessare un singolo albero sono essenzialmente due:

- instabilità per scivolamento;
- instabilità per ribaltamento.

Per la schematizzazione e l'analisi di tali meccanismi occorrono tuttavia molte ipotesi semplificative ed in letteratura esistono pochi studi al riguardo. Espressioni semplificate per la verifica di stabilità allo scivolamento ed al ribaltamento ed una loro applicazione sono riportate in Pirrone (1998).

#### 11.3.11 Effetti della vegetazione sui processi di sedimentazione

La vegetazione svolge un ruolo dominante nei confronti dei processi di sedimentazione e numerosi studi di letteratura hanno messo in evidenza come esistano strette interazioni tra tipi di vegetazione, processi e forme fluviali (si veda, ad esempio, Hupp, 1990; Hupp, Osterkamp, 1996). La colonizzazione da parte di vegetazione favorisce la stabilizzazione di una superficie fluviale sia per l'azione di riduzione di velocità della corrente, a causa dell'aumento di scabrezza, sia per costituire una trappola per i sedimenti trasportati dal corso d'acqua.

La migrazione di una barra di meandro (*point bar*), la successiva colonizzazione da parte di vegetazione della porzione meno attiva della stessa e la deposizione di materiale fine per prevalenti processi di tracimazione sono i principali meccanismi responsabili della morfogenesi della pianura inondabile (*floodplain*) in fiumi di tipo sinuoso-meandriforme.

Nei riguardi dell'evoluzione di una sponda fluviale, la vegetazione svolge un ruolo fondamentale nel favorire la sedimentazione alla sua base

e la progressiva stabilizzazione, come messo in evidenza sia in studi sperimentali, sia in base ad osservazioni di campagna (Tolener *et al.*, 1982; Simon, Hupp, 1987). La vegetazione tende a colonizzare rapidamente la porzione inferiore della sponda e a favorire la formazione di una superficie basale, derivante dalla condizione di un apporto di materiale superiore rispetto al tasso di rimozione. La presenza di specie pioniere alla base della sponda quali, ad esempio, il salice, può pertanto essere considerata spesso il primo indicatore del fatto che le sponde sono in via di stabilizzazione.

#### 11.3.12 Trasporto e deposizione di detriti vegetazionali

Un altro aspetto di estrema importanza legato alla presenza di vegetazione all'interno di un alveo fluviale, verso il quale si stanno rivolgendo recentemente studi sempre più numerosi nel campo della geomorfologia fluviale, è quello legato al trasporto per flottazione di piante, soprattutto alberi, presi in carico dalla corrente in seguito a movimenti di massa di sponde ricoperte da vegetazione o per asportazione diretta di singoli alberi e, successivamente, depositati sotto forma di accumuli di tronchi e di altri detriti vegetazionali. Recentemente, numerosi studi hanno preso in esame gli aspetti legati ai detriti vegetazionali (Large Woody Debris - LWD) relativamente ai meccanismi che ne determinano la formazione, alla loro distribuzione spaziale all'interno dell'alveo ed agli effetti sull'evoluzione morfologica di un alveo e sui processi in atto (si veda, ad esempio, Gregory *et al.*, 1993; Abbe, Montgomery, 1996; Piegay *et al.*, 1999).

I principali effetti di accumuli di detriti vegetazionali all'interno dell'alveo possono essere così sintetizzati:

- formazione di ostruzioni parziali o totali delle luci dei ponti o di altri manufatti, con un innalzamento del pelo libero a monte dell'ostruzione per effetto di rigurgito che può determinare esondazioni delle portate di piena;
- deviazione della corrente fluviale sulla sponda opposta, con frequente innesco di intensi fenomeni di erosione per corrente incidente;
- viceversa, talora, quando accumulati su di una sponda, tali detriti possono esercitare un effetto di protezione dall'erosione o di stabilizzazione rispetto ai movimenti di massa.

#### 11.3.13 Interferenze della vegetazione in alveo e limiti biotecnici di impiego

Le sistemazioni idrauliche pongono alcuni problemi classici di potenziale interferenza tra la presenza di vegetazione sulle sponde ed il deflusso delle acque.

Tenere conto dei fattori biotici complica ulteriormente le già complesse interpretazioni del fenomeno idraulico localizzato, notoriamente collegato con i dinamismi a monte e a valle del corso d'acqua stesso.

Tab. 11.4 - Indicazioni di massima per le scelte tipologiche degli interventi di Ingegneria Naturalistica nelle sistemazioni idrauliche

Velocità della corrente (v)	Diámetro medio del trasporto solido ( $D_s$ )	Natura del fondo	Stabilizzazione dei versanti	Rivestimento/consolidamento delle sponde	Modifiche morfologiche del corso d'acqua	Rinaturalizzazione/ricostruzione dei biotopi umidi	Provvedimenti uso faunistico
$v > 6$ m/s	Tutti i diametri	Ghiaia, ciottoli, massi	<ul style="list-style-type: none"> <li>Semine, semine potenziate;</li> <li>Messa a dimora di talee;</li> <li>Messa a dimora di arbusti;</li> <li>Stuoie su versante;</li> <li>Geocelle a nido d'ape;</li> <li>Rivestimento in reti metalliche e stuoie;</li> <li>Viminata;</li> <li>Fascinata;</li> <li>Gradonata;</li> <li>Cordonata;</li> <li>Palizzata;</li> <li>Cuneo filtrante;</li> <li>Grata viva su scarpata;</li> <li>Palificata viva;</li> <li>Gabbionata;</li> <li>Materasso verde;</li> <li>Muro cellulare rinverdito</li> </ul>	Opere rigide in calcestruzzo; gabbionata spondale rinverdita; muro a secco rinverdito; muro cellulare rinverdito; blocchi incatenati.			Rampa a blocchi
$3 < v < 6$ m/s	$D_s > 20$ cm	Ghiaia e ciottoli		Opere rigide in cls; gabbionata spondale rinverdita; muro a secco rinverdito; muro cellulare rinverdito; blocchi incatenati; rampa a blocchi.	Ampliamento sezione/casse di espansione		Rampa a blocchi
	$5 < D_s < 20$ cm	Ghiaia, (ciottoli)		Palificate vive spondali; pennello vivo; gabbionata spondale; materasso rinverdito; muro cellulare rinverdito; blocchi incatenati.	Ampliamento sezione/casse di espansione	Parziale	Rampa a blocchi/ di scale risalita
$v < 3$ m/s	$1 < D_s < 5$ cm	Sabbia, ghiaia		Semine, idrosemine, semine a spessore; biostuoie, biofeltri; geostuoie tridimensionali sintetiche bituminatate; geocomposito in rete metalliche e geostuoia tridimensionale; messa a dimora di talee legnose; piantagione di arbusti; trapianto di cespi e rizomi; copertura diffusa con ramaglia viva; viminata viva; fascinata viva; gradonata viva; graticciata di ramaglia; ribalta viva; grata viva; palificate vive, pennello vivo; traversa viva; rulli spondali, gabbionata rinverdita; materasso rinverdito; terre rinforzate verdi; muro a secco rinverdito; muro cellulare rinverdito; rampa a blocchi; blocchi incatenati	Ampliamento sezione/casse di espansione/ recupero vecchi meandri	Buona	Rampa a blocchi/ scale di risalita
	$D_s < 1$ cm	Limo, sabbia			Ampliamento sezione/casse di espansione/recupero vecchi meandri/impaludimenti aree foce	Ottimale	

Fonte: Chieu, Sauli, Piano stralcio per il bacino del fiume Toce, 1993, modificato.

Da una parte la vegetazione migliora i parametri geomeccanici delle sponde nei confronti delle sollecitazioni idrauliche; dall'altra la vegetazione stessa riduce la sezione di deflusso con possibile interferenza negativa, specie nelle sezioni ristrette.

Va detto che esistono dei limiti d'impiego dell'Ingegneria Naturalistica e che la scelta e la collocazione degli interventi è funzione di vari parametri tra cui i principali sono:

- la velocità di deflusso (correlata soprattutto con la pendenza del fondo);
- il diametro del trasporto solido.

Nella **tabella 11.4** viene formulata (*Manuale di Ingegneria Naturalistica per la Regione Lazio*, 2002) una proposta di massima per la scelta delle tipologie di intervento con tecniche d'Ingegneria Naturalistica basata appunto sulla velocità e sul diametro del trasporto solido.

Al di sopra di una certa velocità (6 m/s) e diametro del trasporto solido (> 20 cm) in zone montane sono possibili interventi solo con opere rigide o con massi (in alcuni casi gabbionate). Sono invece sempre validi gli interventi di stabilizzazione dei versanti franosi in quanto l'applicazione sistematica su vasta scala di opere vive stabilizzanti (gradonate vive, fascinate vive) o di opere combinate (palificate vive di sostegno, grate vive) produce benefici effetti a valle, diminuendo i tempi di corrivazione ed il trasporto solido.

Con la diminuzione dei due parametri *velocità* e *trasporto solido*, aumenta progressivamente la gamma delle tecniche naturalistiche che sono comunque adottate solo nelle zone in erosione con problemi di rischio idraulico. Vale inoltre il principio della tecnica a minor impegno tecnico e pari efficienza ("legge del minimo"). In ogni caso l'abbinamento con le piante vive, con prevalente uso di piante pioniere va considerato il miglior mezzo per l'innescio di ecosistemi, in linea con le finalità dell'Ingegneria Naturalistica.

#### 11.3.14 Criteri progettuali

Gli interventi di Ingegneria Naturalistica vanno visti nel quadro della rinaturazione dei corsi d'acqua che devono comprendere non solo interventi antierosivi con le specie vegetali vive, ma anche azioni volte al massimo della diversità morfologica nel tracciato o nella sezione dell'alveo, per offrire nicchie specializzate alle comunità ittiche e bentoniche.

Va quindi valutata la possibilità di realizzare:

- modifiche morfologiche al corso d'acqua, diminuendo la monotonia dei tratti canalizzati recuperando, ove possibile, vecchi meandri, ampliando le sezioni in area golenale o creando delle casse di espansione arginate, con evidente beneficio idraulico complessivo;
- interventi di sola rinaturalizzazione a lato dei corsi d'acqua (creazione di biotopi umidi) anche in tratti senza necessità di interventi idraulici;
- provvedimenti di uso faunistico quali: rampe

a blocchi, scale di risalita per pesci, tane, stagni per riproduzione degli anfibi.

In linea generale, durante la fase di pianificazione e progettazione di lavori di sistemazione idraulica dei corsi d'acqua, è consigliabile seguire i seguenti criteri:

- si darà priorità ad allargamenti o creazione di nuove aree golenali, con il mantenimento di un alveo di magra di dimensioni limitate ad andamento meandriforme;
- si consiglia, ove possibile, di evitare il rialzamento degli argini, la scolmatura, l'ampliamento dell'alveo di magra.

Seguendo questi criteri si potranno ottenere diversi benefici, in quanto con tali soluzioni si possono:

- migliorare le condizioni di deflusso, diminuendone la velocità;
- aumentare, conseguentemente, il tempo di corrivazione a beneficio dei tratti a valle;
- ridurre i livelli idrici a beneficio della sicurezza del corso d'acqua sia nei tratti a monte, sia in quelli a valle;
- mantenere le pendenze d'equilibrio e la dinamica naturale del corso d'acqua;
- mantenere le condizioni ecologiche ottimali sia nelle aree golenali (per la presenza di vegetazione fluviale) sia nell'alveo di magra.

Gli interventi sull'asta fluviale vanno concepiti secondo il principio che la diversità morfologica si traduce in biodiversità: è necessario, pertanto, invertire la tendenza alla riduzione delle aree di pertinenza del corso d'acqua, alla loro rettificazione e alla cementazione dell'alveo, non considerando che la vegetazione igrofila sia un ostacolo al rapido deflusso delle acque; quest'ultima deve essere considerata una risorsa non solo naturalistica, ma anche di interesse idraulico per la protezione flessibile dall'erosione.

L'analisi delle varie componenti ambientali e delle loro interazioni con le caratteristiche idrauliche dovrà quindi valutare, iniziando da monte, ove porre in atto, impiegando i criteri e le tecniche dell'Ingegneria Naturalistica, i seguenti interventi:

- interventi di rinverdimento per la protezione antierosiva dei versanti in erosione per consentire l'aumento del tempo di corrivazione delle acque e la diminuzione del trasporto solido a valle;
- interventi sul corso d'acqua tesi a diminuire l'energia cinetica tramite la riduzione della pendenza; ove sia necessario ridurre la pendenza longitudinale dell'alveo al posto delle briglie in calcestruzzo, in molti casi si possono impiegare le briglie in legname e pietrame eventualmente combinate con elementi vivi quali le talee di salice; per garantire poi la continuità biologica all'ittiofauna, ove le caratteristiche morfologiche dell'alveo lo consentano, è possibile realizzare, al posto delle briglie, le rampe in pietrame per la risalita dei pesci;
- realizzazione di casse d'espansione, anche di piccole dimensioni, per abbassare i picchi delle piene, ottenendo aree da sistemare secon-

- do principi naturalistici che aumentano la biodiversità;
- realizzazione di aree inondabili in corrispondenza dell'alveo, ampliando le sezioni idrauliche con la creazione di un alveo di magra ed uno di piena ad uso periodico;
  - realizzazione di interventi nei tratti a rischio e nei tratti di maggior pendenza e, quindi, aumento costante della biodiversità;
  - realizzazione, ove possibile, di aree umide in corrispondenza delle immissioni dei canali di drenaggio o dei fossi affluenti;
  - interventi antierosivi e di consolidamento sull'asta fluviale concepiti anche invertendo la tendenza alla riduzione delle aree di pertinenza del corso d'acqua;
  - interventi tesi ad eliminare i tratti rettificati dell'alveo che possono comportare un aumento dell'erosione a monte e del deposito a valle, con conseguente pericolo di esondazione e che comportano la perdita di habitat e la riduzione della biodiversità; favorire la meandricazione del corso d'acqua nei tratti compatibili, con conseguente asimmetria della sezione idraulica significa ricomporre la morfologia naturale ed aumentare le capacità depurative del corso d'acqua;
  - eliminazioni dei tratti cementificati per spezzare l'isolamento tra l'acqua ed il substrato, ricostruendo il rapporto con la falda ed il corso d'acqua e rendendo possibile la rivitalizzazione del corso d'acqua;
  - realizzazione (soprattutto nelle aree di pianura ad agricoltura intensiva) di fasce tampone di larghezza adeguata (minimo 10 m) a lato delle rive per intercettare i nutrienti percolanti dalle aree agricole;
  - pianificare gli interventi di manutenzione non considerando, ove possibile, la vegetazione igrofila un ostacolo al rapido deflusso delle acque, bensì una risorsa non solo naturalistica, ma anche di interesse idraulico per la protezione flessibile dall'erosione (cfr. DPR "Atto di indirizzo e coordinamento alle regioni recante criteri e modalità per la redazione dei programmi di manutenzione idraulica e forestale" del 14 aprile 1993);
  - realizzazione, anche al di fuori dell'alveo di piena, di boschetti e cespuglieti, per una riqualificazione naturalistica e paesaggistica del corso d'acqua.

I progetti d'intervento devono, per esempio, secondo l'Autorità di Bacino interregionale del Fiume Magra (2001):

- contenere una valutazione sull'effettiva necessità della sistemazione idraulica, indicando gli elementi di esposizione (beni e persone) nel caso di mancato intervento;
- esprimere considerazioni e stime sul rapporto costo dell'intervento - beneficio atteso (in termini economici, ambientali e sociali);
- presentare un'attenta analisi volta all'individuazione delle cause che generano il rischio;
- indicare in quale misura l'intervento sia direttamente finalizzato all'eliminazione delle cause, tenendo conto che interventi tesi alla tem-

- poranea rimozione degli effetti sono ammissibili solo qualora la rimozione totale e permanente delle cause fosse impraticabile; in tal caso occorre darne espressa motivazione;
- esporre le alternative progettuali prese in considerazione, con i relativi vantaggi e svantaggi in termini economici, idraulici e naturalistici;
- analizzare le possibili ripercussioni idrauliche e naturalistiche dell'intervento, sia locali sia sull'evoluzione dei tratti a monte e a valle e dell'intero corso d'acqua;
- precisare gli accorgimenti di miglioramento dell'habitat acquatico, spondale e terrestre adottati o i motivi che ne impediscono l'adozione.

Si possono dare, di seguito, indicazioni progettuali specifiche, relative alle seguenti protezioni:

- difese spondali;
- arginature;
- briglie;
- taglio della vegetazione;
- risagomature dell'alveo;
- ponti.

#### 11.3.14.1 Difese spondali

Le difese spondali possono essere realizzate in presenza di rischio idraulico, qualora sia minacciata la sicurezza dei centri urbani e la stabilità di infrastrutture o importanti manufatti, mentre questo tipo di protezione spondale non è ammissibile in caso di semplici terreni in erosione, incolti o terreni agricoli.

Nelle scelte costruttive è necessario adottare accorgimenti che garantiscano la diversità ambientale, evitando una pendenza costante delle sponde, il loro allineamento a linee geometriche regolari ed ogni uniformità.

Una difesa spondale che può garantire queste condizioni è quella della costruzione di uno o più pennelli obliqui che, svolgendo un'efficace azione antierosiva, inducano la formazione di barre falciformi sulle sponde e di buche, raschi, barre in alveo.

Qualora si intenda ricorrere ad un intervento classico, si può intervenire con massi ciclopici, evitando naturalmente e per i motivi precedentemente descritti, superfici regolari, lisce. A tal fine, oltre a provvedere alla rivegetazione inserendo robuste talee di salice tra i massi, è opportuno introdurre altri elementi di scabrezza, come massi sporgenti o brevi pennelli al piede. In caso di forti sollecitazioni meccaniche, le opere di difesa spondale più adatte sono le palificate vive spondali semplici o doppie o anche i rivestimenti con astoni di salice, talee di ontano, pioppo o altra specie (copertura diffusa); in questo modo si accresce la scabrezza dell'alveo, si riduce la velocità della corrente sulla scarpata spondale e si favorisce la cattura di sedimenti.

#### 11.3.14.2 Arginature

Le principali differenze fra argini e difese spondali sono da ricercare nella forma

(sopraelevazione rispetto al piano campagna) e nelle finalità (gli argini non solo contengono l'erosione delle sponde, ma anche le acque in caso di piena).

Uno degli aspetti non positivi delle arginature è, paradossalmente, quest'ultimo: gli argini, infatti, se localmente impediscono le esondazioni, trasferiscono il rischio idraulico a valle, dove risulta così più accentuato. Questo fatto comporta una serie di riflessioni circa la loro realizzazione: in linea di massima le arginature sono giustificate solo in casi particolari come, ad esempio, negli attraversamenti di centri abitati a rischio idraulico elevato. Nella progettazione di nuovi argini si terrà quindi conto della dimensione che questi dovranno avere: i corpi arginali devono essere più larghi di quanto necessario ai soli fini idraulici; lo scheletro portante di ogni opera dovrà essere dimensionato per assolvere alle funzioni di contenimento delle acque di piena, sia staticamente che idraulicamente.

L'argine finito dovrà necessariamente avere una forma irregolare, planimetricamente non rettilineo con larghezza maggiore rispetto alla larghezza dello scheletro e con scarpate a bassa pendenza e di forme irregolari.

#### 11.3.143 Briglie

Per la costruzione di nuove briglie è consigliabile (se non necessario) tenere in considerazione due principi fondamentali:

- ridurre l'altezza del salto;
- sostituire, eventualmente, il salto verticale con una rampa inclinata.

Costruendo più briglie basse anziché una sola briglia alta, si favorirà lo spostamento dell'ittiofauna che, frammentata in tanti popolamenti riproduttivamente isolati, potrà superare gli ostacoli ( $h < 30-40$  cm) e muoversi senza difficoltà tra la struttura reticolare. I piccoli bacini che si formeranno consentiranno ai pesci di riposarsi e recuperare energia tra un salto ed il successivo. Queste altezze di briglia, tuttavia, impediscono il passaggio di macroinvertebrati e, pertanto, risolvono solo in parte il problema.

Il dislivello tra la corona e il piede della briglia può essere superato gradualmente, su una distanza maggiore, con la costruzione di una rampa inclinata che permetta ai pesci di suddividere lo sforzo di risalita in una serie di brevi salti, intervallati da soste. Ciò consente anche il passaggio di macroinvertebrati che migrano sfruttando i margini a ridosso delle sponde della rampa a blocchi, ove è presente acqua con minore forza di trazione.

#### 11.3.144 Taglio della vegetazione

La vegetazione fluviale offre resistenza alla corrente, ritarda, con ciò, la corrivazione delle acque, attenua i picchi di piena e consolida le sponde.

L'azione delle piante, estesa a tutto il reticolo idrografico, attenua il rischio idraulico, anche se in molte situazioni la vegetazione arborea, a

causa di una cattiva manutenzione, di costrizione dei fiumi in alvei ristretti, della presenza di ponti con luci inadeguate, della localizzazione imprudente degli insediamenti, ecc. rappresenta un effettivo pericolo e vi sono, quindi, situazioni locali in cui occorre procedere al taglio della vegetazione.

Devono essere individuate le singole piante che possono rappresentare un potenziale pericolo; queste devono essere potate o abbattute; gli alberi tagliati, non vanno allontanati completamente, ma depezzati; i tronchi e la ramaglia vanno, ove possibile, in parte abbandonati in piccoli cumuli nei terreni ripari (forniscono habitat, rifugio e sostengono nuove reti alimentari) ed in parte disseminati in pieno alveo o incastrati nel substrato ciottoloso.

#### 11.3.145 Risagomature dell'alveo

Nel caso di dragaggi, risagomature e ricalibrature dell'alveo, è preferibile, ove possibile, lasciare indisturbato l'alveo di magra e quello di morbida, effettuando gli scavi in quello di piena; si dovrà rifuggire ogni forma geometrica e non spianare l'alveo in modo tale da ridurre la rugosità, che, invece, favorisce la scomparsa di *habitat* vitali, aree di sosta, ripari dalla corrente, ecc.

Attenzione anche all'ampiezza della risagomatura, in quanto se le acque sono costrette a disperdersi su una superficie molto ampia, ciò può determinare una profondità e una velocità molto ridotte, tali da compromettere le normali attività della fauna ittica.

#### 11.3.146 Ponti

Tutti i manufatti come ponti, attraversamenti ed altre opere non devono interferire con il deflusso delle acque, per non favorire le esondazioni.

Per opere temporanee (guadi, rampe, piste di cantiere) dovrà essere predisposto ogni accorgimento atto a ridurre l'effetto sulla dinamica del corso d'acqua, valutando gli effetti di rigurgito in riferimento ad eventuali incrementi del rischio e/o riduzioni del franco di sicurezza nei tratti a valle e/o a monte dell'area d'intervento.

Per ogni nuovo ponte è consigliabile considerare la soluzione progettuale della campata unica o comunque un dimensionamento "a misura d'albero", tale, cioè da non comportare pericolo d'ostruzione da parte di alberi trascinati dalle piene.

## 11.4 Parametri idraulici necessari per la realizzazione di opere di Ingegneria Naturalistica in ambito idraulico

### 11.4.1 Regimazioni idrauliche e gestione delle risorse idriche

L'uomo ha sempre cercato di sottrarre spazio ai fiumi per ottenere terre coltivabili o edificabili, attraverso la realizzazione di opere

idrauliche con un conseguente impatto ambientale sempre più elevato.

Le motivazioni che stanno alla base della maggior parte degli interventi di regimazione idraulica poggiano principalmente su due ordini di problemi:

- la riduzione dei rischi d'inondazione;
- la riduzione dell'erosione dell'alveo e delle sponde.

Le cause che determinano le piene e le erosioni, devono essere attentamente analizzate al fine di potere adottare un'efficace strategia di azione con misure attive, passive o miste.

Studiati da molto tempo, i corsi d'acqua sono sempre stati assimilati a canali nei quali scorre un liquido, mentre i parametri biologici sono stati indagati assai raramente, anche in relazione al fatto che sono difficilmente trasferibili e riconducibili a modelli ed a formule matematiche.

Una delle classiche equazioni di deflusso utilizzate per dimensionare un corso d'acqua e la seguente:

$$Q = KSR^aI^b$$

dove  $Q$  rappresenta la portata che scorre attraverso una sezione ( $S$ ) la quale dipende, come il raggio idraulico ( $R$ ), dai seguenti parametri:

- profondità dell'acqua;
- pendenza delle sponde;
- larghezza dell'alveo.

$K$  rappresenta invece un empirico coefficiente di scabrezza che esprime la natura dell'alveo, delle sponde e degli eventuali ostacoli presenti, mentre  $I$  rappresenta la pendenza del corso d'acqua.

Da ciò deriva che, più elevati sono questi parametri, maggiore è la portata che può transitare e, quindi, diventano rilevanti le seguenti caratteristiche morfologiche:

- le superfici lisce che aumentano il valore di  $K$ ;
- il profilo trapezoidale, che conferisce a  $S$  ed a  $R$  valori ideali, in quanto si ottiene così una sezione che consente il passaggio della portata massima;
- la riduzione della lunghezza del corso d'acqua, mediante tratti rettilinei, che aumentano il valore della pendenza ( $I$ ).

Per ottenere le tre condizioni precedenti, bisogna operare interventi di elevato costo e di notevole impatto ambientale. Nonostante il nuovo dimensionamento del corso d'acqua in esso possono formarsi, però, accumuli di materiale alluvionale e la vegetazione può insediarsi all'interno dell'alveo, riducendo così i parametri determinati in fase progettuale, infatti:

- il coefficiente di scabrezza ( $K$ ) diminuisce per la presenza di ostacoli quali la vegetazione o altro, con conseguente rallentamento del deflusso idrico;
- la sezione ( $S$ ) diminuisce allo stesso modo, a causa dell'ingombro da parte della vegetazione, dei manufatti o dei materiali ghiaiosi depositatisi.

I corsi d'acqua così regimati sono in uno stato

di costante e forzata instabilità che può richiedere l'ulteriore costruzione di opere di difesa longitudinali e trasversali.

Talvolta si è cercato di modificare il tracciato originario dei fiumi, rettificandoli ed eliminando il più possibile i meandri e le lanche: è stato dimostrato che in tali situazioni il corso d'acqua tende a ricercare un nuovo equilibrio e, pertanto, è in base alla natura dell'alveo, al nuovo profilo, alle rettifiche ed regimazioni idrauliche, che in alcuni casi si sono verificati i seguenti fenomeni:

- l'aumento artificiale delle pendenze determina una maggiore capacità di trasporto di materiale, rispetto al tratto superiore non rettificato. Questo squilibrio è compensato da una progressiva erosione del letto, proprio a monte della correzione ( $A'$ ). A valle del tratto in esame ( $A-B$ ), quindi si verifica un maggior apporto di materiale, ma la minore pendenza non ne consente l'ulteriore trasporto ( $B'$ ). In conclusione, la rettifica può causare a monte una destabilizzazione dell'alveo e delle sponde, legata all'approfondimento del fondo, mentre a valle si può registrare un eccessivo accumulo di materiale ed un conseguente aumento del rischio d'inondazione;
- il profilo trapezoidale troppo regolare non soddisfa le esigenze ecologiche, in quanto in fase di magra, il livello dell'acqua è spesso insufficiente per la fauna ittica presente;
- sul tratto rettificato la velocità è superiore e può limitare la possibilità di vita della fauna e della vegetazione acquatica; la forza di trascinamento dei materiali, inoltre, è più elevata e la velocità dell'acqua in movimento può provocare danni a valle, obbligando a realizzare ulteriori opere di difesa spondale;
- il corso d'acqua ha una tendenza naturale a ritrovare la sua antica pendenza, attraverso l'erosione e la ricostituzione di nuovi meandri;
- un abbassamento del letto nella costituzione di un nuovo profilo o nella rettificazione può provocare fenomeni d'erosione, che modificano l'ambiente naturale circostante e possono abbassare i livelli della falda freatica.

Il primo problema che un progettista deve risolvere è quello di garantire il passaggio della portata di progetto  $Q_p$ , nelle sezioni sottoposte ad intervento di sistemazione idraulica.

La portata di progetto è in genere valutata sulla base di studi idrologici oppure a partire da livelli storici di piena. In genere, il valore di portata di progetto per tale verifica è quello corrispondente ad un tempo di ritorno di 100 anni. Se però i terreni prossimi al corso d'acqua possono tollerare l'inondazione, possono essere scelte delle portate di progetto con tempo di ritorno minore, accettando cioè una maggiore frequenza delle inondazioni. A partire da questi dati, in accordo con gli Enti e le Autorità competenti, si calcola la sezione del corso d'acqua o l'altezza d'acqua corrispondente, a seconda dei casi.

Dovrà quindi essere garantito che la portata di progetto possa transitare nella sezione proget-

tata, il che equivale a dire che dovrà essere verificata la condizione:

$$Q = A^{5/3} B^{-2/3} n^{-1} i_f^{1/2} \geq Q_p$$

che semplificata è pari a:

$$Q = \frac{1}{n} * W * R^{2/3} * if^{1/2}$$

dove:

- 1/n = coefficiente di Manning;
- W = area bagnata;
- R = raggio idraulico;
- if = inclinazione del fondo o pendenza idraulica = inclinazione del pelo libero dell'acqua).

Opportuno a tal fine sarebbe anche il calcolo della scala di deflusso per passi successivi, dividendo l'altezza totale a disposizione tra fondo alveo e piano di campagna ( $f_p$ ) in 20 parti uguali; quindi, partendo con un tirante iniziale pari a  $f_p/20$  si calcola la portata defluente per ogni tratto, e la portata complessiva  $Q_k$  come somma dei singoli contributi di ognuno di essi. Prima di passare al livello successivo (incrementando il tirante di  $f_p/20$ ) si verifica che  $Q_k$  sia minore di  $Q_p$ ; non appena questa condizione non è più soddisfatta, si ricerca il tirante d'acqua  $Y_{max}$  corrispondente a  $Q_p$  per iterazioni successive.

Qualora risulti che alla portata di progetto corrisponde una quota d'acqua superiore al piano di campagna si segnala che la sezione scelta non è in grado di smaltire la portata di progetto.

Per ogni tratto viene inoltre calcolata la velocità media  $V_{mi}$  come:

$$V_{mi} = \frac{Q_p}{A_i}$$

e il numero di Froude  $F_i$ :

$$F_i = \frac{V_{mi}}{\sqrt{g \frac{A_i}{b_i}}}$$

con i valori di  $A_i$  (sezione bagnata) e  $b_i$  (larghezza del pelo libero) corrispondenti ad  $Y_{max}$ .

Per numero di Froude  $< 1$ , il flusso è considerato lento, con energia potenziale che domina su quella cinetica.

Con numero di Froude  $> 1$ , il flusso è considerato rapido e, in questo caso, l'energia cinetica domina su quella potenziale.

Nella situazione di instabilità, in regime critico, il numero di Froude è pari a 1.

Un aspetto che non deve essere trascurato nel calcolo della portata di un corso d'acqua è quello relativo alle precipitazioni meteoriche, le quali causano portate diverse in base al periodo in cui si verificano, al diverso grado di saturazio-

ne dei terreni e dello stato dell'alveo. Per questo motivo si cercano di stimare le portate di massima piena elaborando i dati pluviometrici, considerando gli elementi di rilevamento e, in particolar modo, i livelli raggiunti dai fenomeni alluvionali nelle varie località.

Partendo dai dati pluviometrici reperibili sugli *Annali idrologici* forniti dalla stazione pluviografica più vicina, si eseguono le elaborazioni necessarie per ottenere le curve segnalatrici di possibilità climatica o pluviometrica indicative dell'altezza delle precipitazioni in funzione della loro durata.

Gli annali idrologici forniscono, in forma tabellare, le massime precipitazioni orarie registrate anno per anno, per le durate di riferimento  $t$  di 1, 3, 6, 12 e 24 ore; le precipitazioni  $h$  di massima intensità compaiono in altezze pluviometriche espresse in mm. Per bacini con limitata estensione si presuppone una certa uniformità degli eventi pluviometrici, considerati proporzionali alle effettive altezze di precipitazione.

La stima della curva segnalatrice di possibilità climatica è tanto più attendibile, quanto più il periodo delle registrazioni copre un intervallo di tempo ampio ( $> 30-35$  anni).

L'equazione che collega altezze pluviometriche  $h$  alle durate di riferimento  $t$  è:

$$h(mm) = a * t^n$$

dove:

- a = variabile in funzione del tempo di ritorno;
- n = costante per un dato valore di t.

Per la determinazione delle curve di possibilità pluviometrica si utilizza la *distribuzione asintotica del massimo valore* ("distribuzione di Gumbel") che vede la sua migliore applicazione nei casi in cui si elaborano dati relativi ad eventi eccezionali (piene, piogge intense, ecc.), in cui è interesse conoscere la legge di distribuzione di probabilità dei valori massimi che le grandezze idrologiche assumono in campioni di assegnate dimensioni.

Le portate dei corsi d'acqua variano con il passare del tempo.

Il cambiamento delle tecnologie colturali e delle caratteristiche di copertura e permeabilità dei diversi territori hanno condotto variazioni dell'assetto idraulico del territorio. Le relazioni fra pioggia e portata sono perciò spesso condizionate da fattori ambientali; quindi una stessa pioggia può causare portate ben diverse al variare delle condizioni.

Per stimare i valori di portata massima si può ricorrere alla formula di Giandotti. Questa relazione è adatta per piccoli bacini con area  $< 300$  km<sup>2</sup>, ed è ricavata da quella di Turazza:

$$Q_{max} = C * h_c * \frac{A}{3,6} * t_c$$



corsi d'acqua. In generale la determinazione del problema viene ottenuta mediante criteri di ottimizzazione.

Yang (1976) e Chang (1980) ipotizzano che il processo di adattamento di un alveo naturale sia tale da minimizzare l'energia dissipata dalla corrente. White *et al.* (1981) hanno mostrato che tale ipotesi equivale a rendere massima la concentrazione del materiale solido trasportato. In sostanza, tali criteri utilizzano le equazioni del trasporto solido e del moto dell'acqua (analogamente all'approccio semi-empirico) associate ad una condizione di minimo (o di massimo). I risultati ottenuti da White *et al.* (1982) indicano un notevole accordo tra le relazioni ricavate per via empirica e quelle ottenibili con l'approccio di tipo fisico. Da queste relazioni si può ricavare una scarsa influenza del trasporto solido nella relazione tra larghezza e portata e analogamente tra profondità e portata. Viceversa il legame tra la pendenza e la portata appare dipendente dal trasporto solido.

Quanto abbiamo detto si riferisce alla configurazione trasversale e altimetrica del corso d'acqua. Per quanto riguarda l'assetto planimetrico, si possono presentare varie configurazioni che qualitativamente possono essere schematizzabili come nella **figura 11.10**. In particolare, si osserva che per alte pendenze e forte trasporto solido il tracciato del corso d'acqua tende ad

essere rettilineo o di tipo *braided*, mentre per basse pendenze e basso trasporto solido si manifestano configurazioni di tipo meandriforme o, più raramente, del tipo multicanale (anastomizzato). Vari contributi sono stati proposti per caratterizzare l'assetto planimetrico dei corsi d'acqua. Leopold e Wolman (1957) sulla base di un'analisi dei dati sperimentali hanno proposto un criterio rappresentato graficamente, ove in ordinata è riportata la pendenza e in ascissa la portata. La retta di equazione:

$$S = 0.0116Q^{-0.44}$$

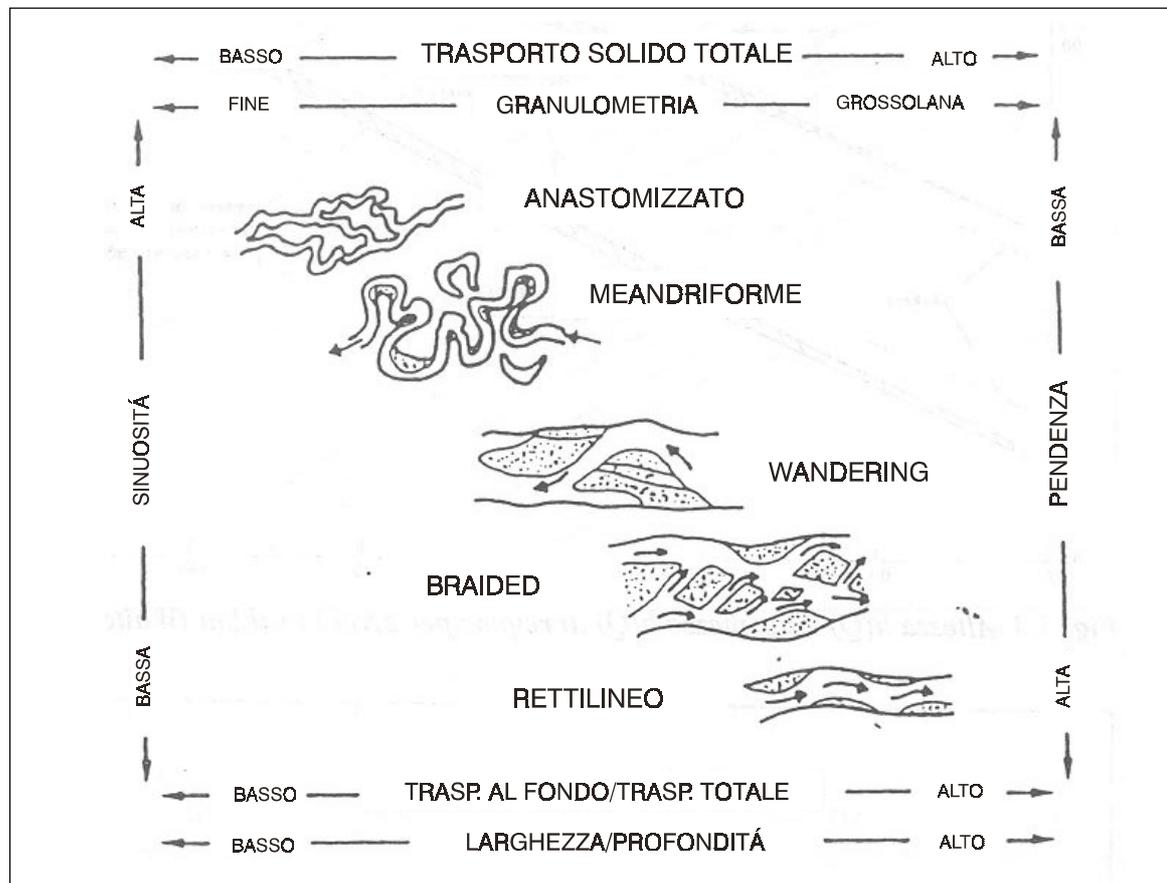
con Q misurato in m<sup>3</sup>/s, divide il piano in due regioni, quella superiore con assetto rettilineo o *braided* e quella inferiore con assetto di tipo meandriforme. Parker (1976) ha introdotto il parametro:

$$E = \frac{S}{\left(\frac{\pi F_r Y}{B}\right)}$$

dove:

- F<sub>r</sub> = numero di Froude;
- S = pendenza dell'alveo;
- Y = altezza dell'acqua;
- B = larghezza dell'alveo.

**Fig. 11.10** - Configurazione planimetrica dei corsi d'acqua naturali



Fonte: *Manuale d'Ingegneria Naturalistica*, Regione Toscana, 2000.

L'alveo tende ad essere il tipo *braided* per valori di  $E > 1$  e di tipo meandriforme per  $E < 1$ . Sempre sulla base di dati sperimentali Argwal (1983) ha dedotto un altro criterio rappresentabile graficamente ed esprimibile nella relazione adimensionale:

$$\tau_* = 0.13 \cdot \left( \frac{BS}{Y} \right)^{0.56}$$

dove  $\tau^*$  può essere espresso come *parametro di Shields*:

$$\tau_* = \frac{\tau}{(\gamma_s - \gamma) D}$$

in cui:

- $\tau$  = tensione tangenziale media al fondo;
- $\gamma_s$  = peso specifico dei sedimenti;
- $\gamma$  = peso specifico dell'acqua;
- D = diametro medio dei sedimenti.

Questi brevi cenni sulle caratteristiche di regime dei corsi d'acqua possono fornire un'idea sulla molteplicità di studi, di approcci e di criteri disponibili in letteratura.

Gli interventi su un corso d'acqua dal punto idraulico possono essere suddivisi in interventi di *regimazione* e di *sistemazione*.

Gli *interventi di regimazione* tendono a modificare il regime delle portate del corso d'acqua e comprendono le arginature, le dighe, le casse d'espansione, i diversivi e gli scolmatori.

Gli *interventi di sistemazione* tendono invece a modificare e/o consolidare l'alveo per il raggiungimento di uno stabile assetto planimetrico mediante le opere di difesa delle sponde e di stabilizzazione dell'alveo, la risagomatura delle sezioni, la riprofilatura del tracciato planimetrico.

Le opere di difesa di sponda si suddividono in:

- *opere di difesa longitudinale* (o *radenti*), disposte nella direzione della corrente con trascurabile interferenza sulle condizioni di deflusso;
- *opere di difesa trasversali* (o *repellenti*) che, viceversa, possono modificare sostanzialmente le condizioni di deflusso. In tal senso si rimanda al capitolo relativo alle rampe a blocchi.

Le considerazioni che seguono saranno limitate alla stabilizzazione delle sponde di tipo longitudinale.

Da un punto di vista strutturale tali opere sono raggruppabili in cinque categorie:

- rigide;
- semirigide;
- flessibili;
- in materiale sciolto;
- di Ingegneria Naturalistica.

Le *strutture rigide* comprendono le murature di pietrame con malta e calcestruzzo, impiegate come muri di contenimento e/o di rivestimento spondale. Tali strutture, pur essendo molto resistenti alle sollecitazioni idrodinamiche, hanno lo svantaggio di essere sensibili ai cedimenti e agli assestamenti indotti dalla di-

namica dell'alveo e del terreno (erosioni, movimenti franosi) e di offrire scarsa permeabilità agli scambi idrici falda-fiume.

Le *strutture semirigide e flessibili* non presentano tali svantaggi. Le prime fanno uso di elementi rigidi ai quali viene conferito un certo grado di deformabilità mediante connessioni di vario tipo quali giunti, perni o funi metalliche. Le seconde comprendono le strutture a gabbioni, i materassi, i buzzoni, le burghie, ecc.

I criteri di progettazione delle opere in strutture rigide e semirigide seguono le usuali procedure di calcolo, assumendo in generale lo schema di muro a gravità. Lo stesso, dicasi per le strutture a gabbioni quando funzionano come opere di contenimento.

Particolare attenzione deve essere posta nella determinazione della quota di fondazione, tenendo conto dei fenomeni di dinamica d'alveo. Le opere in materiale sciolto sono realizzate mediante massi naturali o artificiali di adeguate dimensioni disposti alla rinfusa oppure sistemati. Tali opere presentano una completa adattabilità alle deformazioni del terreno, ma possono presentare inconvenienti legati alla instabilità degli elementi.

Le opere di Ingegneria Naturalistica utilizzano materiale vegetale vivo (alberi, arbusti, piante erbacee) in associazione a materiale morto (vegetale o artificiale) per ottenere strutture funzionali dal punto di vista idraulico e nei riguardi del ripristino, della valorizzazione e della conservazione ambientale.

La progettazione delle opere in materiale sciolto consiste nel corretto dimensionamento della pezzatura media dell'ammasso, da posizionare sulla sponda in modo da garantirne la stabilità. In tal caso occorre mettere in conto, oltre agli effetti della gravità, le azioni idrodinamiche prodotte dalla corrente quali le azioni di trascinamento, i moti secondari, il moto ondoso. Considerando nel seguito la sola azione di trascinamento, espressa dalla tensione tangenziale, questa risulta diretta nel senso della corrente e di intensità variabile lungo il contorno bagnato. Alcuni studi su sezioni regolari trapezoidali e rettangolari, indicano che il valore massimo della tensione media sulla sponda è pari a circa il 75% del valore massimo del fondo. Si osserva la notevole influenza della granulometria sui valori della tensione tangenziale:

- per alvei con sedimenti fini, tipicamente alvei di pianura, la coesistenza di basse pendenze e velocità, assieme a bassi valori del rapporto di forma B/Y (larghezza dell'alveo/altezza dell'acqua in metri), appaiono limitare l'incremento della tensione al crescere della portata;
- per alvei in materiale grossolano, caratterizzati da pendenze e velocità maggiori, l'azione tangenziale appare considerevolmente più elevata e crescente con il valore della portata dominante.

All'azione tangenziale indotta dalla corrente si contrappone la resistenza al trascinamento dell'opera di difesa, che può variare anche notevolmente in funzione della tipologia, dei criteri

costruttivi, delle condizioni generali di stabilità delle sponde.

Per quanto riguarda le strutture flessibili, relativamente ad opere realizzate in "materassi Reno" di vario spessore, pur essendo riportati, in generale, valori espressi in termini di velocità della corrente, questi possono essere ricondotti in termini di tensione assumendo valori medi del coefficiente di resistenza. Il campo delle tensioni oscilla tra 50 e 250 N/m<sup>2</sup>, in funzione dello spessore di rivestimento adottato (tra 15 e 50 cm) oltre ovviamente alle caratteristiche di stabilità della sponda.

Per le opere i materiali sciolti, la tensione sviluppabile dipende essenzialmente dalla pezzatura del materiale, oltre che dall'angolo d'attrito e dall'inclinazione della sponda.

Per quanto riguarda gli interventi di Ingegneria Naturalistica, alcuni dati sono riportati da Di Fidio (1995).

Ad esempio, nel grafico della **figura 11.11** è riportato l'andamento nel tempo della tensione tangenziale sviluppata su opere di protezione in concomitanza di eventi di piena dove la curva *a* indica la resistenza al trascinarsi di una mantellata vivente in verghe di salice di 2 anni con densità di 20 pezzi al metro, mentre la curva *b* di un pettine vivente di talee di salice con spessore di 3 cm, lunghezza 60 cm e densità 7 pezzi al m<sup>2</sup>; infine, la curva *c* di una piantagione di cespugli di ontano nero, frassino e viburno in associazione 1x1 m.

Da notare che la resistenza asintotica delle varie tipologie di copertura può raggiungere valori anche considerevoli, dell'ordine di 200 ÷ 300 N/m<sup>2</sup>, in tempi dell'ordine dei 10 anni.

Durante tale periodo può rendersi necessario un intervento complementare (ad esempio, scogliera, materassi, graticciate) che garantisca la resistenza di sponda e lo stesso sviluppo della copertura (Paris, 2000).

A titolo esemplificativo utilizzando il criterio di Shields per le condizioni di stabilità del materiale, si perviene al calcolo della tensione massima sostenibile, mediante l'espressione:

$$\tau_w = \frac{D(\gamma_s - \gamma)\cos\theta\sqrt{1 - \text{tg}\theta^2 / \text{tg}\phi^2}}{25}$$

dove:

- D = diametro medio dei sedimenti in mm;
- γ = peso specifico dell'acqua;
- γ<sub>s</sub> = peso specifico dei sedimenti;
- θ = inclinazione della sponda rispetto all'orizzontale;
- φ = angolo d'attrito del materiale.

Gli effetti delle modifiche della morfologia dell'alveo sulla biocenosi ed in particolare sulla fauna ittica si possono sintetizzare in:

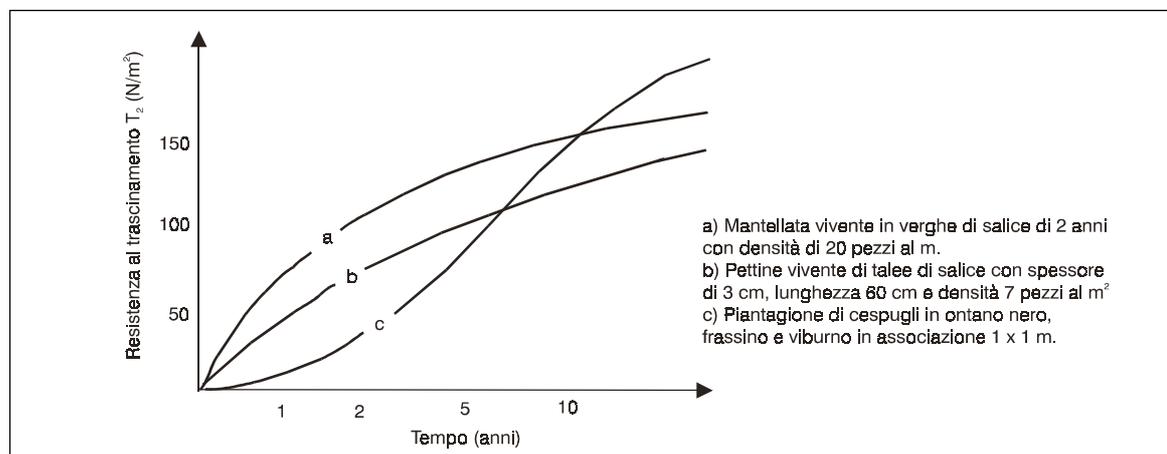
- perdita di *habitat*;
- aumento della torbidità e temperatura dell'acqua;
- diminuzione della capacità trofica e della biomassa;
- riduzione della biodiversità.

Altro fattore da considerare per certi tipi di copertura è la durata della sollecitazione idrodinamica. Il manto erboso, per esempio, non sembra essere in grado di resistere per tempi superiori a 10 ÷ 15 ore con velocità media della corrente dell'ordine dei 3 m/s.

Gli interventi di sistemazione dell'alveo tendono in generale a ridurre la capacità erosiva del corso d'acqua che, attraverso l'abbassamento del fondo porterebbe indurre stabilità delle sponde, dei versanti e delle strutture connesse (ponti, argini).

Si intuisce che lo stesso processo erosivo fa parte del fenomeno di automodellamento che tenderebbe a portare il corso d'acqua verso una configurazione di equilibrio tra capacità di trasporto e materiale solido in arrivo dai tronchi di monte. Tuttavia tale processo può estendersi su periodi anche molto lunghi (diverse decine d'anni). Una corretta sistemazione del corso d'acqua ha quindi lo scopo di accelerare tale dinamica evolutiva per il raggiungimento della condizione finale di equilibrio in tempi più brevi.

**Fig. 11.11 - Diagramma Tempo/Resistenza al trascinarsi**



Fonte: Di Fidio, 1995.

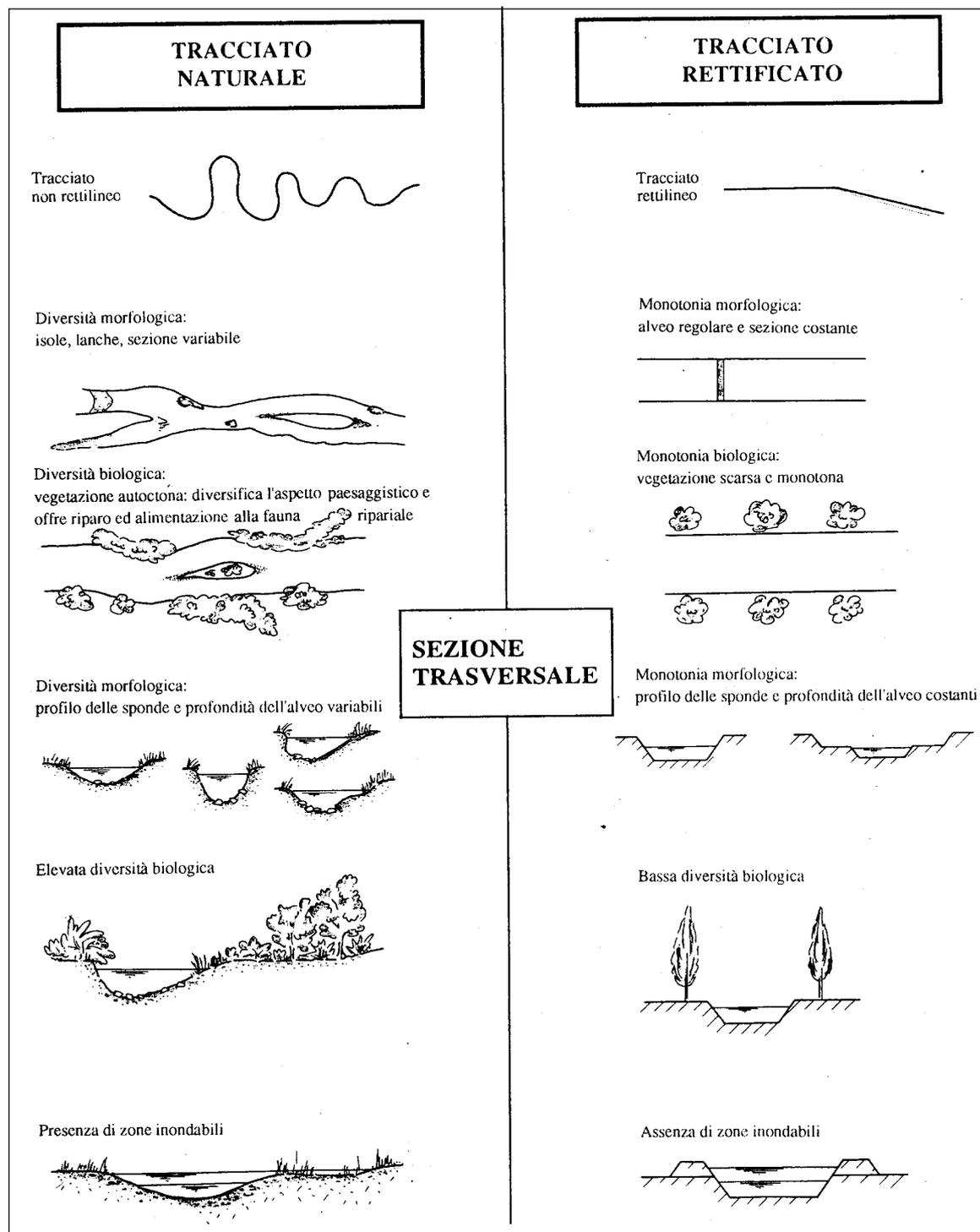
La sistemazione almetrica del corso d'acqua si basa pertanto su:

- una corretta identificazione dell'attuale dinamica evolutiva del corso d'acqua;
- la valutazione della condizione di equilibrio alla quale tende il corso d'acqua;
- la progettazione di interventi finalizzati al raggiungimento della condizione di equilibrio;
- la verifica degli altri effetti indotti dagli interventi previsti.

Da quanto sopra, occorre tenere presente che

gli interventi di difesa spondale possono indurre modifiche anche rilevanti sul preesistente assetto dei corsi d'acqua. La previsione e la quantificazione di tali effetti deve essere adeguatamente valutata nella fase progettuale dell'intervento, tenendo conto che la complessità dei fenomeni coinvolti e le loro mutue interazioni impongono spesso il ricorso ad approcci di tipo multidisciplinare finalizzati ad una corretta interpretazione della realtà fisica in esame.

Fig. 11.12 - Differenze morfologiche tra corsi d'acqua naturali e regimati artificialmente



Fonte: Lachat, 1991, modificato.

La qualità dei risultati è comunque subordinata al livello di conoscenza dei parametri fisici di base e quindi alla disponibilità dei dati e delle misure per il corso d'acqua considerato.

Di particolare importanza, soprattutto negli interventi di Ingegneria Naturalistica, appare la quantificazione delle sollecitazioni indotte dalla corrente da porre a confronto con la resistenza offerta dal tipo di copertura prevista. Dai dati disponibili si deduce che gli interventi di protezione spondale attuati con le tecniche di Ingegneria Naturalistica risultano applicabili in un ampio campo delle correnti lente, anche se ulteriori verifiche sperimentali sarebbero auspicabili soprattutto in relazione all'entità e al tempo di permanenza della sollecitazione idrodinamica.

La diversificazione ambientale è il presupposto fondamentale per una ricca presenza di specie animali e vegetali in qualsiasi ambiente: acque più o meno profonde, rami e ceppaie affioranti o sommersi, vegetazione acquatica, fondo a diversa granulometria creano le condizioni ottimali per l'alimentazione, il rifugio e la riproduzione delle diverse specie (figg. 11.12-11.13).

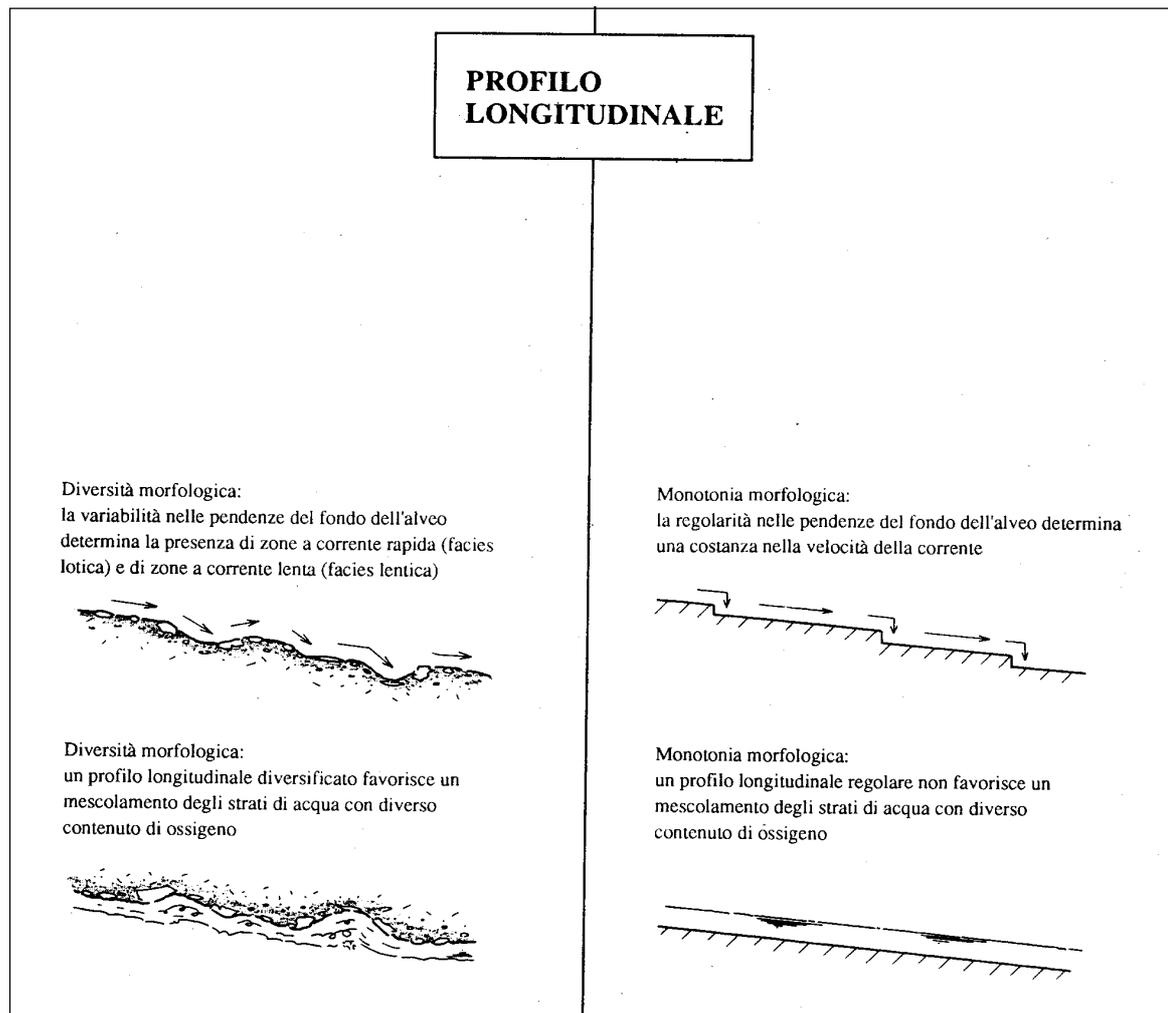
Alcuni studi hanno anche quantificato le conseguenze della riduzione dei microambienti fluviali: nei corsi d'acqua con sponde ricche di vegetazione è stata censita una fauna ittica anche dieci volte superiore a quella presente in tratti con sponde in calcestruzzo.

Lo stesso dicasi per i canali d'irrigazione che, pur essendo di origine artificiale, hanno discrete potenzialità di miglioramento in termini di qualità ambientale sia per la vegetazione che per la fauna; ciò è possibile, ad esempio, realizzando nuovi meandri, creando piccole anse, diversificando le pendenze delle sponde e dell'alveo, variando la profondità del fondo.

Un impatto ancora più pesante si è registrato laddove, al fine di acquisire nuovi spazi per l'agricoltura o per l'urbanizzazione, si è proceduto ad intubare piccoli e grandi ruscelli con la conseguente drastica riduzione di micro- e macroambienti naturali (*tombamento*).

Va ricordato, infine, che le opere di sistemazione idraulica, le derivazioni e le dighe costituiscono spesso un ostacolo insormontabile per la fauna ittica in quanto suddividono il corso d'acqua in tratti isolati fra loro; ove possibile andrebbe prevista, pertanto, la realizzazione

Fig. 11.13 - Differenze morfologiche tra corsi d'acqua naturali e regimati artificialmente



Fonte: Lachat, 1991, modificato.

d'idonee rampe di risalita per i pesci (si veda il paragrafo 11.8, *Le rampe a blocchi e rampe di risalita per pesci*).

Per quanto riguarda l'utilizzo delle risorse idriche ciò che crea le problematiche per serie sono gli eccessivi prelievi di ingenti quantità d'acqua resi possibili dai grandi sbarramenti o dalle derivazioni idriche, per svariati usi (agricoli, artigianali, industriali o domestici), in quanto le *portate di restituzione*, chiamate anche *residuali*, non consentono il mantenimento di un sufficiente equilibrio ecologico del corso d'acqua.

Una gestione delle risorse idriche più attenta agli effetti sull'ambiente può evitare impatti troppo negativi attraverso l'adozione di alcuni accorgimenti e precauzioni:

- una variazione dei prelievi a seconda delle stagioni;
- una politica delle concessioni che tenga conto della loro compatibilità ambientale;
- una "gestione" delle piene;
- il rilascio di una portata minima vitale per l'intero ecosistema;
- l'esecuzione dei lavori idraulici in periodi idonei in funzione delle esigenze trofiche e riproduttive dell'ittiofauna.

Tali misure contribuirebbero senz'altro ad una migliore conservazione e ad una maggiore protezione dei corsi d'acqua.

La determinazione del deflusso minimo vitale da rilasciare in un fiume per consentire il mantenimento di un certo equilibrio ambientale è un problema di notevole importanza e, a tal fine, sono stati elaborati diversi metodi per una sua quantificazione: tra questi si ricorda quello elaborato in Austria che si basa, in particolare, sull'analisi del *benthos* presente nel corso d'acqua, ma anche su altri parametri fisico-chimici quali la morfologia dell'alveo o la granulometria dei sedimenti.

Nei corsi d'acqua, le problematiche legate alla definizione del *Deflusso Minimo Vitale* (DMV) nascono dall'esigenza di garantirne la funzionalità biologica a lungo termine, in presenza di un non equilibrato utilizzo della risorsa idrica da parte dell'uomo.

Le derivazioni idriche, infatti, vengono spesso realizzate senza un'adeguata conoscenza dell'ecosistema fluviale e con scarsa considerazione dei potenziali impatti di origine antropica. Il governo della risorsa idrica dovrebbe avvenire, quindi, a diversi livelli:

- assicurando il rispetto di obiettivi generali di politica delle acque e specificando tali obiettivi generali in sede di pianificazione;
- valutando la disponibilità della risorsa idrica e fissando obiettivi di qualità nei diversi tratti fluviali;
- determinando per ciascun tratto fluviale l'ammontare complessivo dei prelievi e di scarichi ammissibili e compatibili con le disponibilità e con gli obiettivi di qualità delle risorse;
- disponendo la risorsa complessiva tra i diversi utilizzatori e destinandone una parte agli usi ambientali.

Al fine di rendere possibili le azioni precedentemente descritte, risulta pertanto indispensabile:

- la caratterizzazione dello stato attuale del corso d'acqua e la ricostruzione, per quanto possibile, del suo regime naturale al fine di individuare gli squilibri tra risorse disponibili e domande idriche per usi civili e produttivi da una parte e fabbisogni ambientali dall'altra;
- la valutazione di tali fabbisogni nei termini di riproducibilità della risorsa: mantenimento della vita acquatica, delle aree protette e di interesse naturalistico e ricreativo, della capacità di autodepurazione;
- la definizione di criteri di regolamentazione ambientale volti a ridurre gli squilibri, in particolare rispetto ai fabbisogni idrici di cui al punto precedente.

La riduzione della portata idraulica nel tratto a valle delle derivazioni comporta soprattutto:

- presenza di tratti compresi tra il punto di prelievo e quello di restituzione con scarsa presenza di acqua (se non assenza), specialmente nella stagione estiva;
- variazione del regime idrologico con alterazione dei rapporti ecologici tra gli ambienti di transizione acquatico e terrestre, incidendo negativamente su flora e fauna dell'alveo e delle rive (in particolare, l'alterazione dei cicli di sviluppo dei macroinvertebrati acquatici);
- riduzione della capacità di diluizione e di depurazione delle sostanze inquinanti che raggiungono il corso d'acqua con conseguente riduzione della naturale resistenza dei popolamenti ittici alle malattie batteriche, virali, parassitarie e all'inquinamento in generale;
- frammentazione dell'ittiofauna in popolamenti geneticamente isolati a causa degli sbarramenti delle opere di presa, che costituiscono un ostacolo insormontabile agli scambi tra le varie parti del corso d'acqua;
- riduzione della velocità della corrente, con sedimentazione dei materiali fini trasportati in sospensione e conseguente distruzione di numerosi *microhabitat* per l'occlusione degli interstizi tra i ciottoli e per il loro ricoprimento con uno strato fangoso.

Risulta pertanto di fondamentale importanza per i corsi d'acqua garantire una portata idrica che salvaguardi la struttura e la funzionalità degli ecosistemi fluviali senza alterare le condizioni ecologiche naturali.

Vanno segnalate, infine, anche le conseguenze provocate dallo svuotamento dei bacini idroelctrici in quanto con tali operazioni si determina per diversi km dell'asta fluviale, la scomparsa di vari organismi viventi.

Oltre ai sopracitati problemi di utilizzo e prelievo di ingenti quantità di acqua dai fiumi, vanno sottolineati anche quelli connessi alla qualità della medesima: molti corsi ricevono troppi rifiuti solidi e liquidi di vario genere e di varia origine (industriale, agricola, urbana). La raccolta delle acque inquinate in bacini di

decantazione o in canali filtranti può, ad esempio, aiutare i tratti urbani e periurbani dei fiumi a ritrovare una soddisfacente qualità biologica.

Sono stati sperimentati, infatti, diversi sistemi di depurazione delle acque inquinate con metodi biologici, utilizzando determinate specie vegetali (fitobiodepurazione).

Ulteriore tema interessante risulta essere, infatti, la fitobiodepurazione, che può essere definita come “la coltivazione delle piante acquatiche sulle acque di scarico”. Questo tipo di soluzione rappresenta un sistema naturale di depurazione, che si basa sui processi di funzionamento degli ambienti acquatici e delle zone umide.

La fitobiodepurazione presenta le seguenti caratteristiche:

- *funziona a bassi costi energetici* (energia solare), in alcuni casi si utilizzano elettropompe per sollevare i liquami, alimentate con pannelli fotovoltaici;
- *utilizza piante acquatiche e non* (macrofite e microfite) per abbattimento nutrienti, associata alla mineralizzazione (batteri, fase anaerobica o aerobica);
- *garantisce una qualità ambientale ed una integrazione fra costruito e paesaggio*, senza grosso impatto visivo tipico degli impianti tradizionali;
- *utilizza il liquame* come risorsa;
- *elimina eventuali patologie* derivanti da aerosol, rumori molesti, odori, ecc.;
- *serve ad una visione integrata del territorio*: con il frazionamento e decentramento della depurazione, infatti, si può aderire per settori territoriali alle varie parti della città;
- *serve al risanamento dei depuratori tradizionali*, come integrazione per il fissaggio finale (assorbimento di azoto e fosforo) prima dell'arrivo ai corpi recettori (fiumi, mari);
- *può creare una occupazione diretta* di tipo nuovo legata alla possibilità di nuove colture idroponiche, anche se non riduce la necessità d'impiego per la fase di manutenzione e di manodopera.

Si possono, inoltre distinguere tre tipologie d'impianti:

- sistemi di flusso superficiale (FWS);
- sistemi a flusso sub-superficiale orizzontale (FS - o);
- sistemi a flusso sub-superficiale verticale (FS - v).

Con tali sistemi si è riusciti a ridurre sia il carico inquinante di natura organica, sia quello chimico, in quanto alcune specie vegetali acquatiche (giacinto d'acqua, tifa, lenticchia d'acqua, ecc.) sono particolarmente attive nell'assimilare la sostanza organica presente in eccesso o nell'accumulare i metalli pesanti nei propri tessuti.

Anche le piante acquatiche o di ripa presenti lungo i corsi d'acqua svolgono un'importante funzione di filtraggio e di assorbimento delle sostanze inquinanti trasportate: si è potuto notare, infatti, che nei tratti di fiume o di canale

ricchi di vegetazione si verifica un maggiore abbattimento del carico inquinante. In definitiva si può ritenere che le opere idrauliche siano spesso necessarie per motivi di sicurezza, ma devono essere rese il più possibile compatibili con le esigenze di salvaguardia ambientale.

#### 11.4.2 Caratteristiche delle grandezze idrauliche

Il moto dell'acqua avviene di solito entro un alveo delimitato dal fondo e dalle sponde caratterizzati da materiali e coperture diversi. La sezione trasversale (traccia dell'alveo su un piano ortogonale alla direzione prevalente della corrente) risulta caratterizzata da due grandezze, di significato intuitivo:

- l'area bagnata ( $A$  = porzione di sezione occupata dalla corrente);
- il contorno bagnato ( $C$  = lunghezza della linea di contatto acqua-alveo).

Il rapporto fra le due grandezze:

$$R = \frac{A}{C}$$

fornisce il raggio idraulico, che sintetizza la forma geometrica dell'area bagnata. La velocità media ( $V$ ) della corrente in un tronco d'alveo a sezione costante può essere ricavata, con l'ipotesi che il movimento sia costante nel tempo, dalla relazione dovuta ad Antoine Chezy (1765):

$$V = C \cdot \sqrt{gRS}$$

dove:

- R = raggio idraulico;
- S = pendenza dell'alveo;
- g = accelerazione di gravità.

La valutazione della scabrezza è operazione delicata:

la *formula di Manning - Strickler* è molto diffusa nelle applicazioni ai corsi d'acqua naturali e mette in evidenza il coefficiente di scabrezza ( $n$  nella formulazione di Manning,  $k$  in quella di Strickler con  $k = 1/n$ ), secondo la relazione:

$$C = \frac{1}{n} \cdot R^{1/6}$$

La scabrezza dipende essenzialmente:

- dalla natura del fondo;
- dalla presenza di irregolarità o di ostacoli al deflusso nella sezione;
- dal tipo e dal grado di sviluppo della vegetazione sulle sponde e sul fondo.

L'aumento del coefficiente di scabrezza ( $n$ ) comporta una riduzione della velocità media della corrente e, pertanto, della portata convogliabile, data dalla relazione  $Q = V/A$ .

La capacità di convogliamento di un tronco d'alveo è il parametro determinante nel dimensionamento delle opere idrauliche (**tab. 11.5a - 11.5b**).

La tensione tangenziale sviluppata dai diversi

**Tab. 11.5a** - Valori del coefficiente di Gaukler - Strickler, utilizzabili nei corsi d'acqua artificiali

	Coefficiente di Strickler $m^{1/3} \cdot s^{-1} = \frac{1}{n}$ (n = Coeff. Manning)	Massimo	Normale	Minimo
<b>a) Canali in terra lisciata e uniforme</b>				
	Pulita e scavata di recente	62	56	50
	Pulita dopo prolungata esposizione	56	45	40
	Ghiaia, sezione uniforme e pulita	45	40	33
	Erba corta e pochi cespugli	45	37	30
<b>b) Canali in terra, con ondulazioni o irregolari</b>				
	Senza vegetazione	43	40	33
	Con erba e pochi cespugli	40	33	30
	Cespugli o piante acquatiche in canali profondi	33	39	25
	Fondo in terra e sponde in pietrisco	36	33	29
	Fondo in pietrame e sponde in cespugli	40	29	25
	Fondo in ciottoli e sponde pulite	33	25	20
<b>c) Canali scavati o dragati</b>				
	Senza vegetazione	40	36	30
	Cespugli sparsi sulle sponde	29	20	17
<b>d) Canali in roccia</b>				
	Lisci ed uniformi	40	29	25
	Fraggiati ed irregolari	29	25	20
<b>e) Canali senza manutenzione, sterpaglia e cespugli</b>				
	Sterpaglia densa, alta quanto il tirante idrico	20	12	8
	Fondo pulito, cespugli sulle sponde	25	20	12
	Fondo pulito, cespugli sulle sponde in piena	22	14	9
	Cespugli densi e acque profonde	12	10	7

tipi di copertura spondale, può tradursi in un aumento significativo della scabrezza complessiva dell'alveo e quindi indurre indesiderati effetti di innalzamento dei livelli idrici, soprattutto in concomitanza degli eventi di piena. Tali effetti devono essere valutati per alvei stretti, cioè quando il rapporto di forma larghezza-altezza B/Y è inferiore a 15. In tal caso l'influenza delle sponde sulla resistenza al moto diventa via via più sensibile al diminuire del rapporto di forma.

Per il calcolo del *numero di Manning*, si deve fare riferimento alla seguente formula:

$$n = (n1 + n2 + n3 + n4) * m$$

In accordo con i valori riportati nella **tabella 11.6**.

In generale si può dire che il rapporto tra velocità media della corrente (V) e velocità al fondo (V\*) è costante e pari ad un *coefficiente adimensionale di resistenza* (o di Chezy):

$$\frac{V}{V_*} = C$$

Considerando il caso di moto uniforme, la velocità media della corrente può essere espressa tramite l'*equazione di Chezy*:

$$V = C \sqrt{gRS}$$

con:

R = raggio idraulico [m];  
S = pendenza dell'alveo in %;  
g = accelerazione di gravità [m/s<sup>2</sup>].

La velocità al fondo può essere, infatti, espressa come:

$$V_* = \sqrt{\frac{\tau}{\rho}}$$

con la tensione di taglio media sul contorno ( $\tau$ ) pari a:

$$\tau = \gamma RS$$

$\rho$  = densità dell'acqua [kg/m<sup>3</sup>];  
 $\gamma$  = peso specifico dell'acqua [N/m<sup>3</sup>].

Mediante la *formula di Manning* che viene usata correntemente come equazione del moto uniforme, la stessa si può rendere:

$$V = \frac{1}{n} R^{2/3} S^{1/2}$$

Tab. 11.5b - Valori del coefficiente di Gaukler - Strickler, utilizzabili nei corsi d'acqua naturali

CORSI D'ACQUA MINORI (LARGHEZZA DEL PELO LIBERO IN PIENA <30 m)		Massimo	Normale	Minimo
<b>a) Corsi d'acqua di pianura</b>				
	Pulito diritto, con la massima portata e senza divisioni o bacini profondi	33	30	25
	Pulito diritto, con la massima portata e senza divisioni o bacini profondi, ma con una maggiore presenza di pietre ed erba	40	35	30
	Pulito, meandriforme, alcuni bacini e zone di profondità ridotta	45	40	33
	Pulito, meandriforme, alcuni bacini e zone di profondità ridotta, ma con erba e pietre	50	45	35
	Pulito, meandriforme, alcuni bacini e zone di profondità ridotta, ma con portate minori e pendenze e sezioni irrilevanti	55	48	40
	Pulito, meandriforme, alcuni bacini e zone di profondità ridotta, ma con una maggiore presenza di pietre	60	50	40
	Tratti stagnanti con erba e bacini profondi	80	70	45
	Tratti con elevata presenza di erba, con bacini profondi o scolmatori ricoperti di ceppi d'albero ed arbusti	150	100	75
<b>b) Torrenti in montagna senza vegetazione in alveo, sponde generalmente ripide, alberi ed arbusti sulle sponde sommersi durante le piene</b>				
	Fondo: ghiaia, ciottoli e grosse pietre	50	40	30
	Fondo: ghiaia e grosse pietre	70	50	40
	<b>Zone pianeggianti allagabili</b>			
<b>c) Pascolo senza cespugli</b>				
	Erba rasa	35	30	25
	Erba alta	50	35	30
<b>d) Zone coltivate</b>				
	Terreno incolto	40	30	20
	Coltivazioni a file	45	35	25
	Coltivazioni cerealicole a maturità	50	40	30
<b>e) Cespugli</b>				
	Cespugli sparsi	70	50	35
	Cespugli ad alberi radi in inverno	60	50	35
	Cespugli ed alberi sparsi in estate	80	60	40
	Cespugli a densità medio-alta in inverno	110	70	70
	Cespugli a densità medio-alta in estate	160	100	70
<b>f) Alberi</b>				
	Salici con elevata ramificazione, in estate	200	150	110
	Zone aperte con ceppi d'albero senza germogli	50	40	30
	Zone aperte con ceppi d'albero, ma con molti germogli in crescita	80	60	50
	Zona altamente boscosa, con piccoli alberi, un po' di cespugli e rami sommersi in periodi di piena crescita	120	100	80
	Zona altamente boscosa, con piccoli alberi, un po' di cespugli e rami sommersi, ma con un livello di piena che non supera i rami	160	120	100
<b>CORSI D'ACQUA MAGGIORI (LARGHEZZA PELO LIBERO IN PIENA &gt;30 m)</b>				
	Sezione regolare senza grosse pietre nè cespugli	60	-	25
	Sezione irregolare e scabra	100	-	35

dove:

 $n =$  coefficiente di Manning [ $s/m^{1/3}$ ].

$$V = \frac{1}{n} R^{2/3} S^{1/2}$$

Dal confronto delle formule:

$$V = C \sqrt{gRS}$$

appare come il coefficiente adimensionale di resistenza  $C$  in realtà rappresenti una conduttanza essendo legato al coefficiente di attrito di Darcy-Weisbach, mediante la relazione:

Tab. 11.6 - Valori per il calcolo del coefficiente di rugosità

Condizioni in cui si trova il corso d'acqua		Valori
Materiale considerato	Terra	0,020
	Sabbia grossolana	0,025
	Ghiaia fine	0,024
	Ghiaia grossolana	0,028
Grado di irregolarità	Assente	0,000
	Basso	0,005
	Moderato	0,010
	Intenso	0,020
Variazioni della sezione trasversale del canale	Graduali	0,000
	Occasionali	0,005
	Frequenti	0,010 ÷ 0,015
Relativi effetti di ostruzioni	Insignificanti	0,000
	Minori	0,010 ÷ 0,015
	Apprezzabili	0,020 ÷ 0,030
	Intensi	0,040 ÷ 0,050
Vegetazione	Bassa	0,005 ÷ 0,010
	Media	0,010 ÷ 0,025
	Alta	0,025 ÷ 0,050
	Molto alta	0,050 ÷ 0,100
Numero di meandri	Minori	1,000
	Apprezzabili	1,150
	Intensi	1,300

Fonte: Manning.

$$C = \sqrt{\frac{8}{\lambda}}$$

Il rapporto tra il *coefficiente adimensionale di resistenza* e il *coefficiente di Manning* risulta:

$$C = \frac{R^{1/6}}{n\sqrt{g}}$$

La resistenza al flusso può essere espressa indifferentemente mediante il *coefficiente di Manning* (o *coefficiente di ritardo* o *di resistenza*):

$$n = \frac{R^{2/3} S^{1/2}}{V}$$

o con il *coefficiente di attrito*:

$$\lambda = \frac{8gRS}{V^2}$$

Il *coefficiente di attrito* e quello di *ritardo* risultano legati dall'equazione:

$$n = \sqrt{\lambda} \cdot \left[ \sqrt{\frac{R^{1/3}}{8g}} \right]$$

L'equazione precedente può essere usata per convertire il coefficiente di scabrezza espresso con il corrispondente valore  $n$ .

Un'analisi teorica del moto turbolento in canale aperto dà, inoltre, il *coefficiente di attrito* in funzione del diametro rappresentativo del materiale che costituisce il letto:

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = a + c \cdot \log\left(\frac{y}{k}\right)$$

dove:

$k$  = scabrezza idraulica;

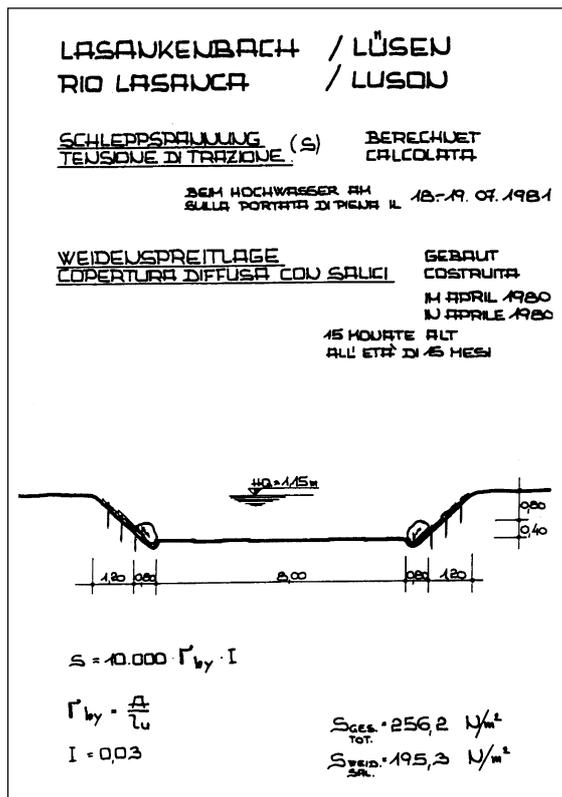
$c$  = coefficiente derivato dalla *costante di Von Karman*, solitamente posto uguale a 0,4;

$a$  = coefficiente determinato dalla forma della sezione trasversale del canale.

Nel caso di canali naturali è necessario considerare una scabrezza composita, cioè suddividere la sezione in un numero  $N$  di sottosezioni con scabrezza omogenea pari a  $n_i$ .

In questo caso il *coefficiente di resistenza* dell'intera sezione ( $n_c$ ) può essere valutato secondo alcuni metodi, fra cui quello di Lotter (con riferimento alla *formula di Manning*) che assume la portata totale pari alla somma delle portate nelle subsezioni:

**Fig. 11.14 - Calcolo della tensione di trazione, sulla portata di piena di un corso d'acqua**



Fonte: Florineth, 1981.

$$n_c = \frac{PR^{5/3}}{\sum_{i=L}^N \frac{P_i R_i^{5/3}}{n_i}}$$

con:

P = perimetro bagnato dell'intera sezione (m).

Assumendo per una distribuzione di velocità logaritmica, tipica del moto turbolento nella zona di parete, la relazione tra la velocità  $u_y$  ad una distanza  $y$  dal fondo e la scabrezza idraulica  $K$  in ciascuna sottosezione  $i$ , è data dalla (che vale per alveo fisso, quindi esente da fenomeni di trasporto solido):

$$\left(\frac{u_y}{u_*}\right) = 8.48 + 2.5 \ln\left(\frac{y}{k}\right)_i$$

Se ora si considera per semplicità un alveo rettangolare abbastanza largo da poter confondere il raggio idraulico con l'altezza dell'acqua, si ottiene un'equazione che esprime la portata in funzione del livello idrometrico (scala di deflusso):

$$Q = \left(\frac{B \times S^{1/2}}{n}\right) \times y^{5/3}$$

con:

B = larghezza dell'alveo (m);  
y = livello idrometrico (m);  
A = By = sezione bagnata (m²),  
con la condizione  $B \gg y$ .

Per una portata si può calcolare che raddoppiando la scabrezza si ha un incremento di altezza idrica del 50% ed una riduzione della velocità del 34%.

Da notare che la resistenza asintotica delle varie tipologie di copertura può raggiungere valori anche considerevoli, dell'ordine dei 200 ÷ 300 N/m² in tempi anche brevi e molto variabili. Il riferimento rimane in genere il terzo periodo vegetativo, anche se si sono ottenuti ottimi risultati anche dopo soli 6-8 mesi (fig. 11.14).

Durante il primo periodo può rendersi necessario un intervento complementare (ad esempio, scogliera, materassi o graticciate) che garantisca la resistenza di sponda e lo stesso sviluppo della copertura. Altro fattore da considerare per certi tipi di copertura è la durata della sollecitazione idrodinamica. Il manto erboso, per esempio, non sembra essere in grado di resistere a tempi superiori a 10 ÷ 15 ore con velocità media della corrente di 3 m/s.

#### 11.4.3 Interventi sui corsi d'acqua: le sistemazioni d'alveo

Gli interventi di sistemazione dell'alveo tendono in generale a ridurre la capacità erosiva del corso d'acqua che, attraverso l'abbassamento del fondo, potrebbe indurre instabilità delle sponde, dei versanti e delle strutture connesse (strade, ponti, argini).

Si intuisce che lo stesso processo erosivo fa parte del fenomeno di automodellamento che tenderebbe a portare il corso d'acqua verso una configurazione di equilibrio tra capacità di trasporto e materiale solido in arrivo dai tronchi di monte. Tuttavia tale processo può estendersi su periodi anche molto lunghi (diverse decine d'anni). Una corretta sistemazione del corso d'acqua ha quindi lo scopo di accelerare tale dinamica evolutiva per il raggiungimento della condizione finale di equilibrio in tempi molto più brevi.

Gli alvei dei corsi d'acqua naturali sono soggetti a evoluzioni plano-altimetriche indotte dai fenomeni d'erosione o deposito di tipo esteso, coinvolgenti cioè lunghi tratti del corso d'acqua. Come è noto tali processi possono essere originati da variazioni lungo l'alveo della capacità di trasporto solido e/o del trasporto solido e tendono ad esaurirsi via via che le modificate condizioni dell'alveo ristabiliscono una condizione d'equilibrio. Trattando il problema del regime del corso d'acqua, si osserva che nessun corso d'acqua naturale può considerarsi, a rigore, in condizioni di equilibrio (né erosione, né deposito), ma per gli scopi pratici si può individuare un assetto più o meno stabile se, in un opportuno intervallo temporale (50-100 anni), le varie grandezze fisiche possono ritenersi mediamente costanti.

Nella realtà gli andamenti risultano molto più irregolari e discontinui per effetto di vari fattori:

- le portate subiscono, ad esempio, delle discontinuità in corrispondenza delle confluenze;
- il profilo altimetrico risente delle varie vicende geologiche e tettoniche del bacino.

La dimensione dei sedimenti è la grandezza a comportamento più irregolare, in quanto dipende sia dalle caratteristiche generali del bacino, sia da quelle locali del tratto.

La sistemazione altimetrica del corso d'acqua si basa pertanto su:

- una corretta identificazione dell'attuale dinamica evolutiva del corso d'acqua;
- la valutazione delle condizioni di equilibrio alla quale tende il corso d'acqua;
- la progettazione di interventi finalizzati al raggiungimento della condizione di equilibrio;
- la verifica degli altri effetti indotti dagli interventi previsti.

In questo ambito si propone un inquadramento di sintesi sui criteri di progettazione degli interventi di sistemazione, tenendo presente che, in generale, tali interventi sono essenzialmente finalizzati alla sistemazione altimetrica.

#### 11.4.4 Interventi di stabilizzazione dell'alveo

Nelle zone soggette ad erosione si interviene mediante opere di stabilizzazione dell'alveo atte a contrastarne l'abbassamento. Tali interventi consistono nella realizzazione di strutture trasversali all'alveo, costituite da *briglie* o *soglie di fondo* (fig. 11.15), in grado di fissare una determinata quota altimetrica del letto nella sezione; ciò favorisce il raggiungimento di una pendenza di equilibrio  $S_e$  in tempi molto più rapidi rispetto a quelli impiegati naturalmente dal corso d'acqua e soprattutto blocca l'abbassamento in atto.

Nel caso delle *briglie* la nuova pendenza viene raggiunta mediamente il progressivo riempi-

mento della zona a monte di ciascuna struttura, secondo quanto indicato nella parte superiore della **figura 11.15**, mentre nel caso di *soglie di fondo*, l'alveo tende ad erodersi tra una struttura e l'altra, come indicato nella parte inferiore **figura 11.15**.

L'intervento con *briglie* induce un innalzamento della quota media del fondo con i seguenti effetti:

- *aumento della larghezza dell'alveo* e, a parità di portata liquida, riduzione delle altezze d'acqua; la riduzione della tensione di fondo e, quindi, della capacità di trasporto solido è provocata non solamente dalla progressiva riduzione di pendenza, ma anche dalla diminuzione del tirante idrico; in tal senso, le briglie risultano più efficienti delle soglie nel raggiungere la configurazione di equilibrio;
- *aumento dei livelli idrici*, con conseguente aumento del rischio di esondazione e incremento dei livelli di falda nei terreni adiacenti; tali effetti possono spesso risultare non accettabili.

L'intervento con le *soglie di fondo* comporta a sua volta:

- una *minore efficienza dal punto di vista idraulico*, in quanto raggiunge la pendenza d'equilibrio e conseguentemente la riduzione del trasporto solido, attraverso un processo di approfondimento che comporta tiranti d'acqua maggiori (a parità di portata) e quindi tensioni al fondo che diminuiscono solo in virtù della diminuzione di pendenza;
- un *abbassamento delle quote d'alveo*, che può compromettere la stabilità delle sponde e degli eventuali manufatti presenti sul corso d'acqua;
- *volumi di scavo* in generale *superiori* a quelli richiesti per le briglie.

In prima approssimazione avremo:

$$A_b = (S_2 - S_1) * L$$

dove:

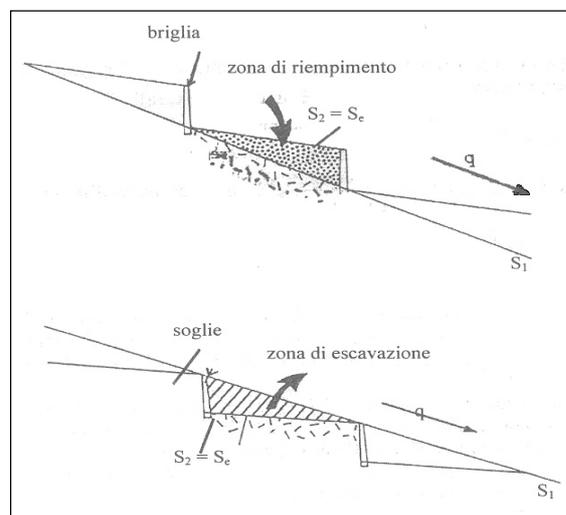
- $A_b$  = altezza delle soglie;
- $L$  = distanza fra loro.

Non risulta attendibile il semplice confronto tra la pendenza di equilibrio,  $S_e$  e quella attuale  $S_1$ , per stabilire se un determinato tronco si trova in condizione di erosione ( $S_1 > S_e$ ) o di deposito; occorre a questo scopo effettuare un bilancio sedimentologico mediante la stima degli apporti solidi di ciascun tronco e/o affluente del corso d'acqua in studio.

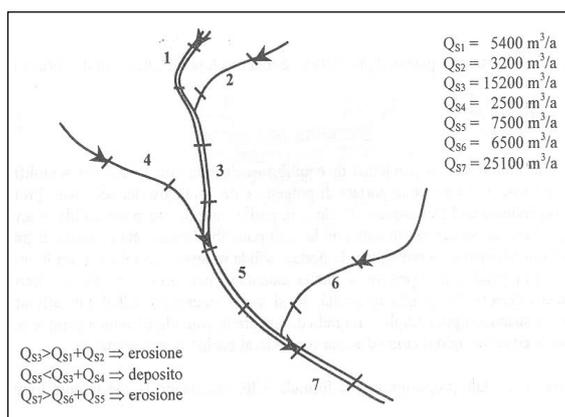
Con riferimento alla **figura 11.16** ove è schematizzata una rete idrografica, occorre prima di tutto individuare i tratti significativi sui quali effettuare le stime del trasporto solido; questi devono essere piuttosto regolari, privi di discontinuità geometriche (brusche variazioni di pendenza), idrauliche e sedimentologiche, al fine di calcolare il trasporto solido mediante una delle formule più appropriate per il caso in esame.

Con riferimento ai modelli semplificati, sulla

**Fig. 11.15** - Stabilizzazione dell'alveo mediante briglie e soglie di fondo



**Fig. 11.16** - Esempio di bilancio sedimentologico di una rete idrografica



base dei dati raccolti e delle elaborazioni, si fissa il *valore della portata di progetto*  $Q_p$  e il *diametro dei sedimenti*  $D_{s4}$ . Si ammette che la larghezza del corso d'acqua sia mediamente stabile e pari a  $B$ . Si ricavano poi i valori delle pendenze d'equilibrio o della sistemazione  $S_e = S_2$  e dell'altezza  $A_b$  delle briglie (o delle soglie); da tenere presente che comunemente  $A_b < 6 \text{ m}$ . Si adotta la soluzione a briglie o a soglie di fondo (o una soluzione intermedia) in funzione delle considerazioni svolte in precedenza.

Le *briglie di consolidamento* hanno la funzione primaria di contrastare l'erosione del letto riducendo la pendenza e contribuendo alla stabilizzazione delle sponde.

All'atto della loro costruzione tendono ad accumulare materiale solido a monte fino al loro riempimento, impiegando tempi più o meno lunghi in funzione del volume invasabile a disposizione e del regime idraulico e sedimentologico cui sono sottoposte. È possibile che, durante tale fase il ridotto apporto solido ai tronchi di valle induca fenomeni erosivi sul letto e sulle sponde da non sottovalutare. È bene quindi, in sede di progetto, stimare seppur approssimativamente il tempo di riempimento delle briglie e valutare l'entità dei possibili effetti a valle, per decidere poi eventuali modifiche.

Le *briglie di trattenuta* o *filtranti* hanno in genere dimensioni maggiori delle briglie di consolidamento e si trovano spesso isolate; hanno lo scopo di trattenere non solo i massi di grandi dimensioni, ma soprattutto i materiali ingombranti come ceppaie e interi alberi, che ostruendo i punti più stretti dell'alveo possono formare sbarramenti con conseguenti straripamenti e accumuli di acqua in grado di generare ulteriori picchi di piena. Le briglie di trattenuta sono dotate di ampie finestre di forme varie che, in occasione delle forti piene, sono comunque insufficienti a convogliare tutta la portata; si crea, a monte della struttura, un profilo di corrente ritardata che permette a monte il deposito dei materiali di dimensioni maggiori. Allo scopo di prolungare l'efficacia di tali briglie, ove possibile si realizza a monte della struttura un bacino di deposito per il contenimento di maggiori volumi di materiale.

In ogni caso per le briglie di trattenuta (o *briglie selettive*) è necessario prevedere un'adeguata manutenzione sia della struttura, sia del volume disponibile al deposito, rimuovendo periodicamente il materiale sedimentato.

Le briglie presentano, infine, una zona centrale ribassata rispetto alla quota di sommità a scopo di favorire il deflusso della corrente lontano dalle sponde e ridurre così i rischi di aggiramento della struttura.

La realizzazione di interventi di stabilizzazione dell'alveo induce come primo effetto una diminuzione degli apporti solidi verso valle; altri effetti indotti possono essere rappresentati dalla variazione della quota media di falda in comunicazione con il corso d'acqua di cui occorre stimarne l'entità e le conseguenze su attingimenti da pozzi, sulle colture in atto, sulla stabilità dei manufatti. In ogni caso è sempre consigliabile prevedere successivamente alla realizzazione dell'intervento un'adeguata attività di controllo dell'evoluzione dell'alveo mediante periodici rilievi geometrici e sedimentologici volti a evidenziare gli eventuali scostamenti dalla situazione di progetto o altri effetti non previsti.

#### 11.4.5 Effetti della vegetazione sulla scabrezza idraulica

In generale si può dire che la presenza di qualsiasi tipo di vegetazione in alveo e sulle sponde comporta un aumento della scabrezza effettiva del contorno, aumentando di conseguenza la resistenza al flusso e riducendone la velocità. Si deve tenere conto, inoltre, che l'aumento della scabrezza implica un innalzamento del livello dell'acqua, dunque un maggiore rischio di esondazione.

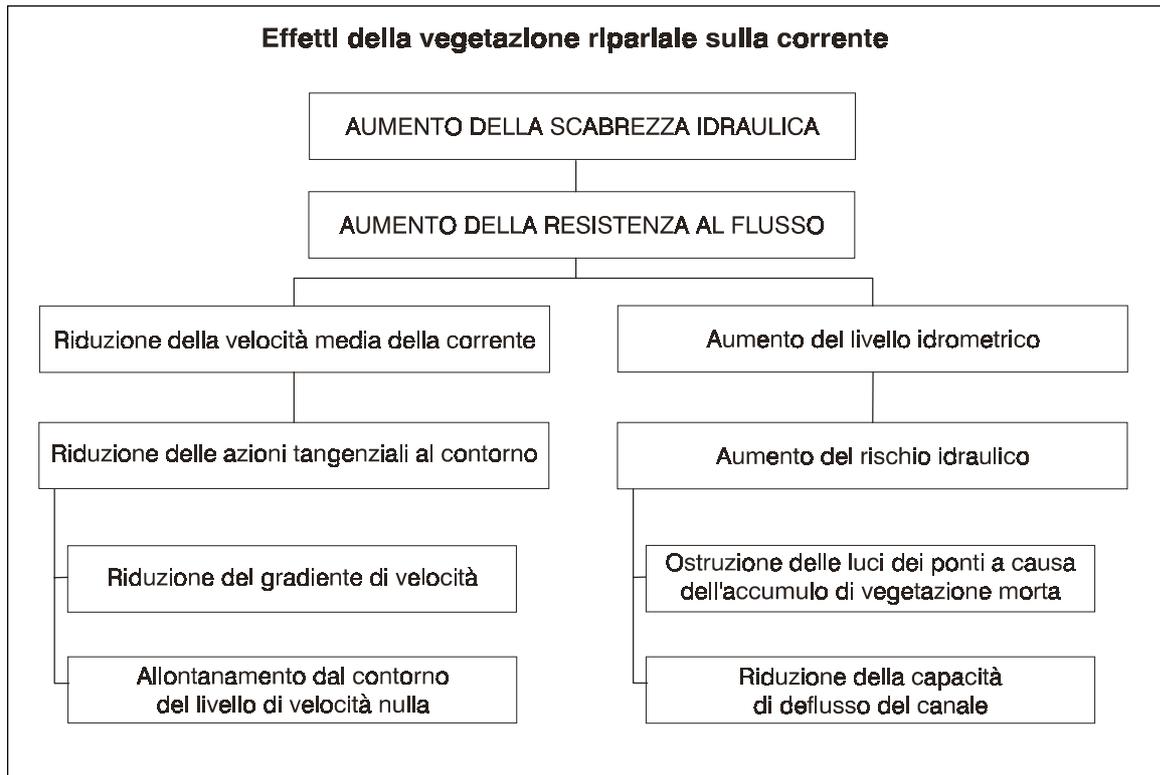
La scabrezza dovuta alla vegetazione, a differenza di quella relativa al materiale d'alveo, cambia nel tempo, sia in relazione ai periodi vegetativi, sia per effetto della corrente. La vegetazione, soggetta alla forza di trascinarsi della corrente, tende a piegarsi: l'entità della flessione dipende dalla resistenza a flessione dello stelo o del fusto e dalla forza esercitata dalla corrente stessa, ma la forza di trascinarsi dipende dalla velocità del flusso che, a sua volta, dipende in parte dal grado di flessione delle piante.

La distribuzione della velocità della corrente è approssimativamente logaritmica, in quanto la flessione dei fusti delle piante ha come principale effetto quello di traslare il livello di velocità nulla progressivamente verso il contorno, man mano che l'abbassamento delle piante aumenta.

Come si può osservare dalla **figura 11.17**, vi sono diversi effetti che la riduzione della velocità della corrente e l'aumento del livello idrometrico, comportano.

Lo studio della resistenza al flusso deve essere affrontato separatamente nel caso di *vegetazione sommersa* (canali ricoperti d'erba e livelli d'acqua superiori all'altezza della vegetazione eretta) e di *vegetazione non sommersa* (vegetazione in alveo con flussi bassi e vegetazione di sponda o delle aree golenali).

Fig. 11.17 - Livelli di scabrezza



#### 11.4.5.1 Vegetazione totalmente sommersa

Quando l'acqua o l'aria scorrono attraverso la vegetazione flessibile, questa si piega sotto determinate condizioni e perciò si riduce la sua altezza. Nel momento in cui la vegetazione si piega, la scabrezza al contorno si riduce sensibilmente. Nei flussi in canale aperto vegetato, il grado di resistenza al piegamento della vegetazione dipende dalla rigidità e dalla densità della vegetazione stessa, mentre la forza di trascinamento dovuta all'acqua che scorre determina il momento flettente imposto alla vegetazione.

È possibile ricavare il coefficiente di attrito e dunque il *coefficiente di Manning*, una volta nota l'altezza della vegetazione flessa ( $k$ ). Questo parametro dipende dalle caratteristiche biomeccaniche della vegetazione.

Tale valore può essere valutato conoscendo la resistenza a flessione MEI (in Newton) data dal prodotto fra:

$$MEI = M * E * I$$

con:

- $E$  = modulo di elasticità lineare in Pascal;
- $I$  = momento secondo di inerzia dell'area della sezione degli steli [ $m^4$ ];
- $M$  = densità relativa, definita come il rapporto tra numero di steli ed un numero di riferimento di steli per unità d'area (generalmente  $m^{-2}$ ).

La relazione che lega  $k$  alla resistenza a flessione è la seguente:

$$k = 0.14h \left[ \frac{\left( \frac{MEI}{\gamma S} \right)^{0.25}}{h} \right]^{1.59}$$

con:

- $h$  = altezza della vegetazione eretta [m];
- $y$  = altezza d'acqua [m];
- $S$  = pendenza del canale;
- $\gamma$  = peso specifico dell'acqua [ $N/m^3$ ].

Nonostante la complessità dell'interazione tra vegetazione erbosa e caratteristiche idrauliche, è stato sperimentato che per un particolare tipo di vegetazione il *coefficiente di scabrezza di Manning* è unicamente correlato al prodotto tra la velocità media  $V$  (influenzata dalla presenza della vegetazione) e il raggio idraulico  $R$ , indipendentemente dai valori relativi assunti da  $V$  ed  $R$ . Per cui avremo:

$$n = V * R$$

per erbe da 50 a 900 mm.

Per alvei erbosi e abbastanza larghi da poter trascurare l'effetto delle sponde sulla scabrezza ( $B \gg y$ ), il legame tra il *numero di Manning* e il prodotto  $VR$  è stato calcolato, per diverse altezze dell'erba. Le prove riguardano tutte le lunghezze dell'erba che si trovano con più frequenza nella pratica: da 50 mm a 900 mm.

Bisogna tenere conto che la correlazione tra  $n$  e  $VR$  è stata ottenuta con approccio empirico e

non è perciò estendibile con semplicità a situazioni diverse da quelle sperimentali.

Il livello di scabrezza (**tab. 11.7**) dipende dalla morfologia della pianta e dalla densità di crescita.

Per flussi bassi la vegetazione rimane abbastanza rigida e i valori di scabrezza sono intorno a 0,25 - 0,30, associati alla distorsione delle linee di flusso intorno agli steli delle singole piante; all'aumentare dell'altezza d'acqua gli steli cominciano ad oscillare, disturbando maggiormente il flusso e la scabrezza aumenta fino a circa 0,40. Quando la corrente comincia a sommergere le piante, il coefficiente di ritardo diminuisce rapidamente all'aumentare della profondità dell'acqua, perché le piante tendono a piegarsi e la scabrezza risulta legata soprattutto al contorno.

In presenza di flussi alti il coefficiente di ritardo tende ad assumere valore costante piuttosto basso; in queste condizioni l'erba è distesa e offre al flusso una superficie relativamente liscia, aumentando di conseguenza le velocità.

#### 11.4.5.2 Vegetazione parzialmente sommersa

I risultati sperimentali visti riguardano essenzialmente gli effetti dell'erba sommersa sulla corrente, e la correlazione tra  $n$  e  $VR$  mostra che la scabrezza diminuisce all'aumentare del prodotto tra raggio idraulico e velocità media. La diminuzione di  $n$  è dovuta al piegamento delle piante e all'aumento del livello di sommersione della vegetazione all'aumentare di  $VR$ .

Le correlazioni viste non sono più valide nel caso in cui la vegetazione sia più alta del livello d'acqua, caso che può verificarsi in alveo nei periodi di magra o nelle aree golenali durante le piene.

Nel caso in cui la pianta venga investita fino al tronco si può assumere che essa abbia comportamento rigido, altrimenti si dovrà tenere conto della flessione della chioma e delle proprietà meccaniche dei rami e delle foglie.

**Tab. 11.7** - *Categorie di scabrezza (o di resistenza al flusso)*

Densità	Altezza media (cm)	Categoria
Buona	>76	A
	28-61	B
	15-25	C
	5-15	D
	<5	E
Scarsa	>76	B
	28-61	C
	15-25	D
	5-15	D
	<5	E

Fonte: *Manuale di Ingegneria Naturalistica*, Regione Toscana, 2000.

La resistenza al flusso attraverso una data area vegetata è funzione di molte variabili tra le quali:

- la velocità del flusso;
- la distribuzione della vegetazione in direzione longitudinale e trasversale rispetto alla corrente;
- la scabrezza del contorno;
- le proprietà strutturali e idrodinamiche associate agli steli e alle foglie delle piante.

L'assunzione di scabrezza rigida in presenza di vegetazione può portare a grossi errori nelle relazioni tra velocità e forza di trascinamento. In realtà la vegetazione produce una scabrezza flessibile e non sommersa che influenza poco i flussi bassi, ma può dare un contributo significativo durante gli eventi di piena. In questo caso il valore di  $n$  diminuisce all'aumentare della velocità per una data condizione della vegetazione e un dato livello idrometrico, a differenza della scabrezza flessibile dovuta ad erba che dipende esclusivamente dal prodotto  $VR$ .

Un recente studio (1997) di Fathi-Maghadam e Kouwen dà un notevole contributo in questa direzione. Lo studio riguarda gli effetti sulla resistenza al flusso dovuti alla presenza di singoli alberi di pino e cedro, che possono poi essere estesi ad una comunità di piante assumendo che tutti gli alberi, di uguale forma e ugualmente distanziati, occupino lo stesso volume nella copertura vegetale. Si assume, inoltre, che:

- $a$  sia l'area orizzontale coperta da un singolo albero;
- $h$  sia l'altezza della copertura.

Dall'analisi dei risultati sperimentali, si nota che il coefficiente di attrito è maggiormente legato al rapporto tra  $A$  (area di assorbimento della quantità di moto, strettamente correlata alla superficie delle foglie e dei tronchi investita dall'acqua) e l'unità di volume del flusso attraverso la copertura, piuttosto che al rapporto tra  $A$  e l'unità di area orizzontale ( $A/a$ ). Perciò, si può assumere un incremento lineare di  $A$  all'aumentare dell'altezza d'acqua.

Per la *scabrezza flessibile*, come quella costituita dagli alberi, la resistenza appare correlata linearmente alla velocità, a causa della flessione delle piante (riduzione di 2) e della diminuzione del coefficiente di resistenza all'aumentare della velocità. Non potendosi misurare o calcolare direttamente la flessione di  $A$  o la riduzione del coefficiente di resistenza, in generale si calcola il parametro combinato adimensionale  $C_d (A/a)$  in funzione del quadrato della velocità media del flusso.

Questo conferma che l'ipotesi di vegetazione rigida porta a grossi errori nella stima della scabrezza. Si nota inoltre l'importanza del livello di sommersione  $y/h$  per la valutazione della resistenza.

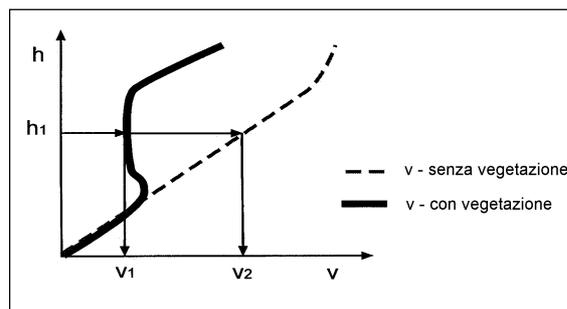
Si può, infine, studiare l'andamento di  $n$  in funzione della profondità relativa di sommersione e della velocità media del flusso. A parità di velocità, si ha un incremento massimo di  $n$  del doppio nel passaggio da flusso basso ( $y/h = 0,25$ ) alla condizione di quasi sommersione. Si-

**Tab. 11.8 - Coefficiente di scabrezza**

Casi	Coefficienza di scabrezza di Manning (n)	
Alveo inciso	0,030 ÷ 0,035	-
Alveo torrentizio	0,040	-
Presenza di vegetazione di alto fusto	0,060	Solo tronchi intercettati
	0,070	Alcuni rami parzialmente intercettati
	0,080	Rami sensibilmente intercettati
Arbusti non completamente sommersi	0,080 ÷ 0,110	Radi
	0,20 ÷ 0,40	Fitti
Arbusti completamente sommersi	0,070 ÷ 0,10	Radi
	0,150 ÷ 0,20	Fitti

Fonte: Manning, modificata.

**Fig. 11.18 - Schema della distribuzione della velocità dell'acqua (v) in prossimità del fondo del fiume nel caso di sponde con e senza vegetazione in funzione del livello dell'acqua (h)**



milmente, si ha una riduzione massima di  $n$  della metà quando la velocità aumenta da 0,1 a 0,8 m/s. a parità di altezza d'acqua. Dai calcoli deduttivi su casi reali (Calò e Palmeri, 1996) si sono dedotti i valori indicativi e conservativi riportati nella **tabella 11.8**.

**11.4.6 Effetti della vegetazione sulla velocità del flusso**

In modo molto schematico, l'andamento della velocità nel caso di sezioni con o senza vegetazione, è rappresentato dal diagramma riportato nella **figura 11.18**.

Nel 1960, Felkel eseguì delle esperienze confrontando le curve isostatiche di piccoli corsi d'acqua in assenza ed in presenza di vegetazione, arrivando a calcolare la riduzione percentuale del deflusso legata alla presenza vegetativa (**fig. 11.19**).

Nel 1982, Haber evidenziò sperimentalmente la variazione della velocità in presenza di vegetazione sommersibile di modesta altezza riportando: in ascisse, la velocità in funzione tirante liquido e in ordinate la profondità (**fig. 11.20**). Interessante è descrivere l'esperienza condotta da Bertram e Garbrecht, al fine di valutare la diminuzione della capacità di deflusso in presenza di ostacoli regolarmente disposti in sponda di sezione trapezia; nella **figura 11.21** si può osservare il confronto delle curve isostatiche senza e con ostacoli.

**11.4.6.1 Vegetazione totalmente sommersa**

Gli effetti della vegetazione in alveo sulla velocità del flusso nel caso di canali abbastanza larghi da potere trascurare gli effetti delle sponde e con sponde protette da erba con altezza di circa 0,2 m, sono tali per cui risulta evidente che per altezze d'acqua non superio-

**Fig. 11.19 - Esempio di distribuzioni di isostatiche**

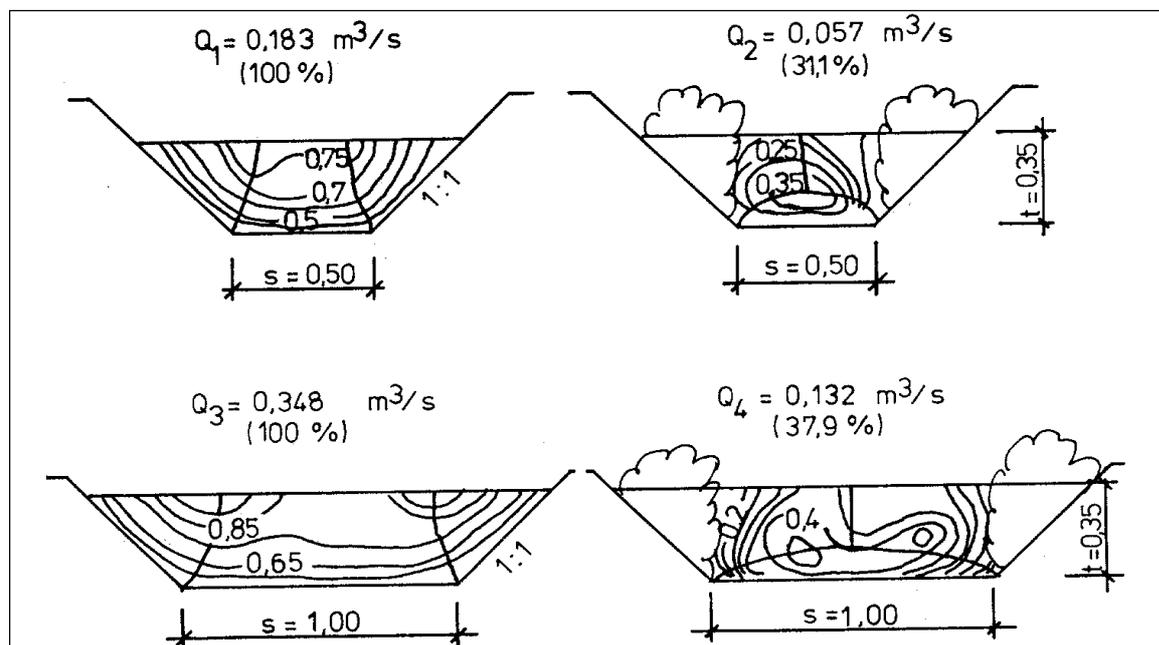
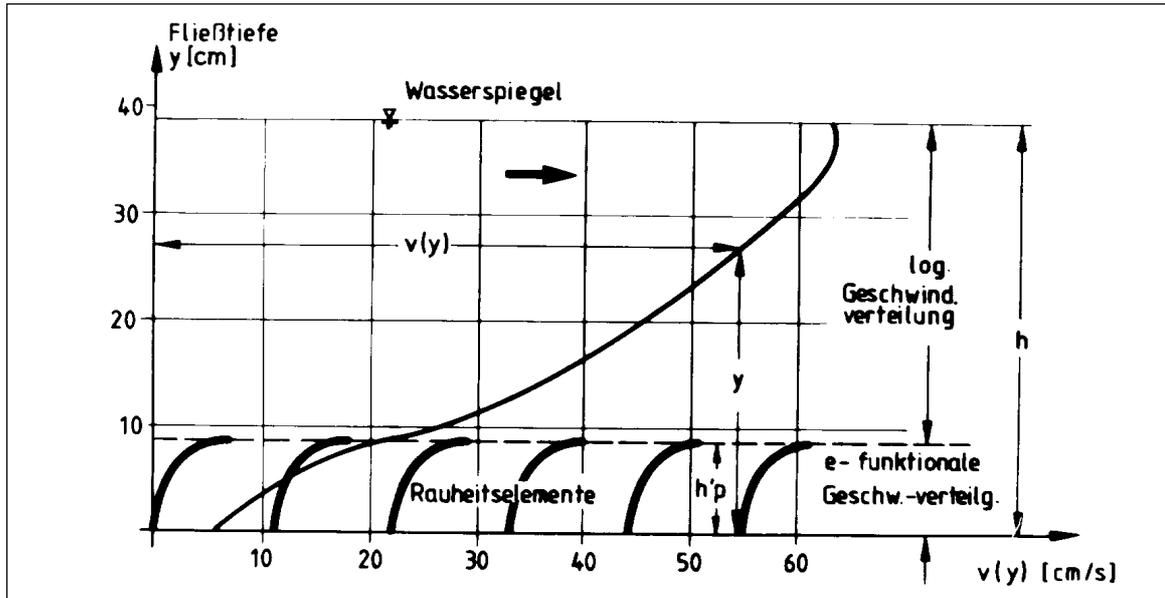
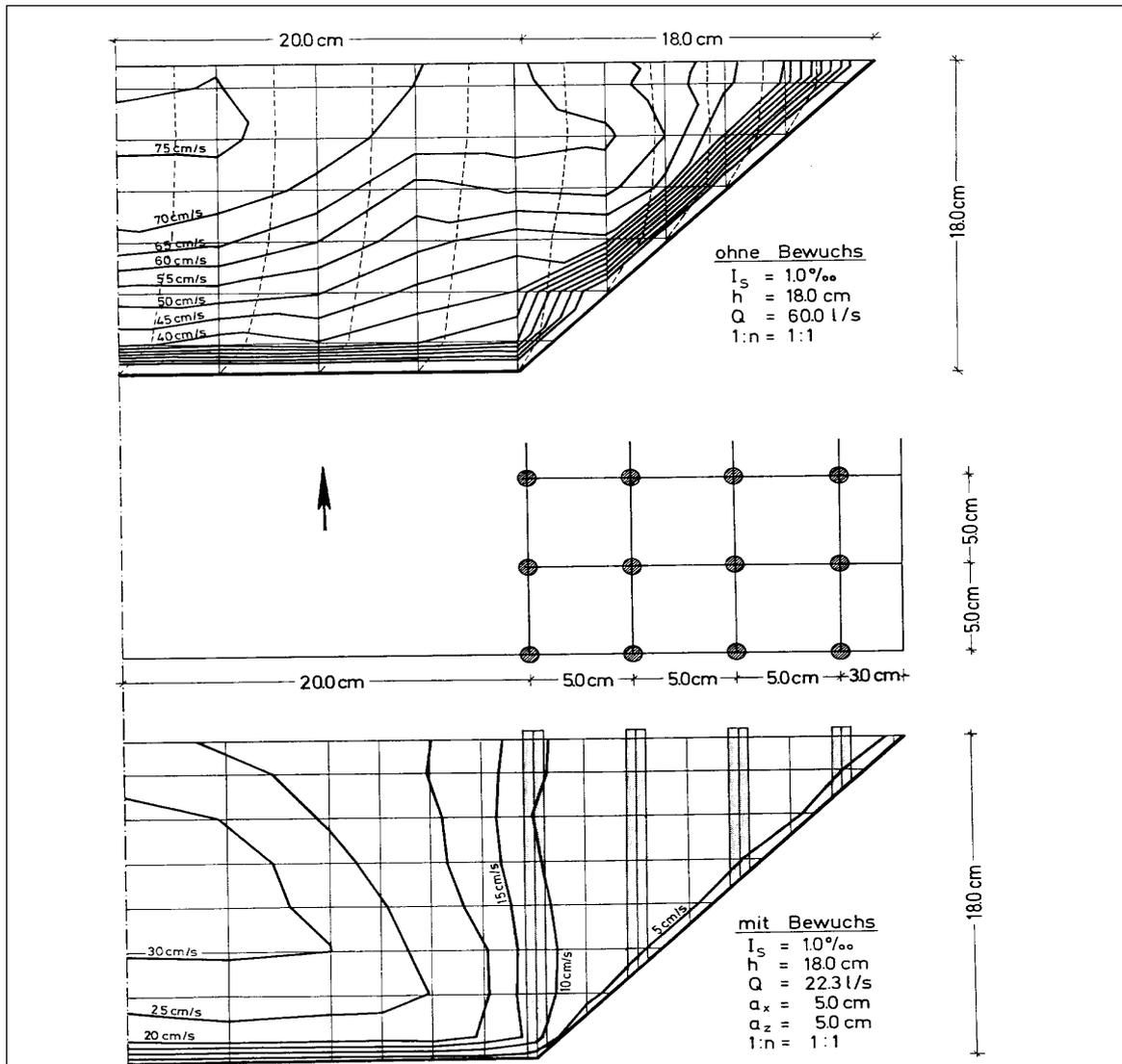


Fig. 11.20 - Variazione della velocità in presenza di vegetazione sommersibile di modesta altezza



Fonte: Haber, 1982.

Fig. 11.21 - Confronto isostatiche senza e con ostacoli



ri a  $3 \div 4$  volte l'altezza dell'erba, la velocità media del flusso è molto minore per fondo ricoperto da vegetazione rispetto a quella che si osserva sul letto spoglio.

Risultano, inoltre, minori anche i gradienti verticali di velocità e, conseguentemente, le tensioni tangenziali. La riduzione delle azioni tangenziali implica una minore erosione in alveo e alla base delle sponde, aumentando di conseguenza la stabilità di sponda.

#### 11.4.6.2 Vegetazione parzialmente sommersa rigida

Per ciò che riguarda la *vegetazione alta* (dell'ordine della profondità del flusso) e *rigida* (ignorando il contributo dei rami e delle foglie), posta in alveo, recentemente si sono ottenuti importanti risultati sperimentali circa l'effetto della vegetazione sulle caratteristiche di deflusso (altezza d'acqua e velocità) e sugli sforzi di taglio esercitati dalla corrente sul contorno.

Dalle **tabelle 11.9-11.10**, si può vedere l'effetto di diverse densità e disposizioni di vegetazione sull'altezza d'acqua, velocità di deflusso e tensione di taglio media al contorno: all'aumentare della densità di vegetazione aumenta il livello idrometrico, diminuisce la velocità media del flusso e diminuisce lo sforzo di taglio medio sul con-

torno. Nel caso di piante concentrate lungo una striscia longitudinale, a parità di numero di piante, la riduzione di velocità e tensione di taglio al contorno è minima (casi A-V e B-V). La distribuzione più efficace per la riduzione di velocità media e tensione al contorno è quella con piante distribuite in direzione trasversale e longitudinale rispetto alla corrente (casi A-VI e B-VI).

L'effetto negativo della vegetazione sui livelli d'acqua diventa particolarmente significativo nel caso di corsi d'acqua stretti; in questo caso la vegetazione sulle sponde influisce sulla distribuzione della velocità non solo vicino alla sponda, ma anche nella zona centrale dell'alveo. Per la valutazione dell'influenza della vegetazione sulla sponda sulla capacità di deflusso si può fare riferimento allo schema proposto da Hey (1979) che divide una sezione trapezoidale in tre aree che contribuiscono al convogliamento della portata totale.

Applicando questo schema a canali trapezoidali con sponde vegetate Masterman e Thorne (1992) hanno costruito un grafico in cui si osserva come il contributo delle portate laterali rispetto alla portata totale diminuisca all'aumentare del rapporto  $B/h$  (larghezza/profondità), risultando rilevante l'influenza della vegetazione sulla capacità di deflusso:

**Tab. 11.9 - Risultati del modello in accordo con i risultati sperimentali**

Caso	Numero di piante (n)	Profondità del flusso D [m]	Velocità media V [m/s]	Tensione di taglio media al contorno $\tau$ [N/m <sup>2</sup> ]
A-I	64	0,64	0,752	1,125
A-II	0	0,30	1,587	5,975
A-III	32	0,50	0,968	1,977
A-IV	32	0,52	0,934	1,824
A-V	32	0,47	1,031	2,274
AVI	32	0,52	0,928	1,800
A-VII	32	0,50	0,974	2,001
A-VIII	32	0,51	0,939	1,848

**Legenda:** diametro della vegetazione  $d = 0.1524$  m; pendenza del fondo  $S = 0.002$ ; grandezza media dei grani  $d_{65} = 0.9144$  mm; portata  $Q = 5.89$  m<sup>3</sup>/s; peso specifico dei sedimenti  $\gamma_s = 26$  kN/m<sup>3</sup>.

**Tab. 11.10 - Risultati del modello in accordo con i risultati sperimentali**

Caso	Numero di piante (n)	Profondità del flusso D [m]	Velocità media V [m/s]	Tensione di taglio media al contorno $\tau$ [N/m <sup>2</sup> ]
B-I	48	0,72	0,673	0,881
B-II	0	0,30	1,587	5,975
B-III	24	0,54	0,897	1,666
B-IV	24	0,55	0,882	1,604
B-V	24	0,51	0,939	1,848
B-VI	24	0,55	0,877	1,585
B-VII	24	0,54	0,902	1,690
B-VIII	24	0,55	0,882	1,604

**Legenda:** diametro della vegetazione  $d = 0.1524$  m; pendenza del fondo  $S = 0.002$ ; grandezza media dei grani  $d_{65} = 0.9144$  mm; portata  $Q = 4.786$  m<sup>3</sup>/s; peso specifico dei sedimenti  $\gamma_s = 26$  kN/m<sup>3</sup>.

$$\frac{(q_s + q_d)}{Q_t} > 5\%$$

solo per alvei con rapporto  $B/h < 9$ .

Quando invece  $B/h > 10 \div 15$  la resistenza dipende soprattutto dalla scabrezza del letto ed il contributo della vegetazione di sponda alla resistenza totale trascurabile, dal momento che la somma delle portate laterali risulta inferiore al 5% della portata totale.

#### 11.4.6.3 Vegetazione parzialmente sommersa flessibile

Pasche e Rouvé hanno studiato l'effetto della vegetazione di sponda sulle caratteristiche del deflusso con un modello unidimensionale basato sull'assunzione di turbolenza semplice. In questo modello, la cui validità è stata confermata da risultati sperimentali, la resistenza dovuta allo scambio di quantità di moto viene considerata dividendo il canale in diverse sezioni e considerando le tensioni di taglio dovute alla turbolenza come tensioni dovute ad una parete immaginaria.

La velocità media è espressa dall'equazione di Darcy-Weisbach, considerando il perimetro bagnato diviso in zone di diversa scabrezza:

$$v = \sqrt{\frac{8 \cdot g}{\sum \frac{\lambda_i \cdot P_i}{P}}} \cdot \sqrt{R \cdot S}$$

- Nella zona alluvionabile, non influenzata dal flusso del canale principale, il flusso è dominato dagli elementi di scabrezza non sommersi. La velocità media in quest'area è data da:

$$v_{f1} = \sqrt{\frac{8 \cdot g}{\lambda_{l,f1} + \lambda_v}} \cdot \sqrt{h_{f1} \cdot S}$$

dove:

- $\lambda_{l,fi}$  = coefficiente di attrito del letto nell'area considerata;
- $\lambda_v$  = coefficiente di attrito dovuto alla vegetazione;
- $h_{f1}$  = altezza d'acqua nell'area considerata.

Come vedremo, sono stati proposti molti modi di esprimere la scabrezza dovuta a vegetazione; Pasche e Rouvé propongono:

$$\lambda_v = \frac{4 \cdot h_{f1} \cdot d_p}{a_x \cdot a_z} C_{dT}$$

con:

- $d_p$  = diametro della pianta;
- $a_x, a_z$  = distanza delle piante nelle direzioni  $x$  e  $z$ ;
- $C_{dT}$  = coefficiente di resistenza per tronchi cilindrici.

- Nella zona del canale principale influenza-

ta dalla scabrezza delle sponde il flusso è condizionato contemporaneamente dalla vegetazione di sponda e dalla scabrezza del letto del canale principale. Il problema più grosso è la valutazione dell'attrito che si sviluppa nell'interfaccia tra aree golenali e canale principale; se la densità di vegetazione è alta il piano di interfaccia può essere interpretato in senso idrodinamico come una parete. Considerando l'effetto dominante degli sforzi di taglio immaginari sull'interfaccia, il flusso nel canale principale può essere considerato approssimativamente bidimensionale. Applicando la legge logaritmica si ottiene una distribuzione trasversale di velocità pari a:

$$\frac{v(z)}{v_*} = \frac{1}{k} \cdot \ln\left(\frac{z}{k_y}\right) + c_T$$

dove:

- $k$  = costante di Von Karman;
- $k_T$  = altezza di scabrezza immaginaria;
- $c_T$  =  $v_T/v_*$  è la velocità adimensionale di scorrimento sulla parete immaginaria.

Dai risultati sperimentali si è visto che il coefficiente di attrito finale dipende dalla densità della vegetazione e da una larghezza  $b_m$ , detta "di interazione", che rappresenta la larghezza della zona inondabile che influisce con la sua scabrezza sul flusso nel canale principale; il coefficiente di attrito può essere espresso dalla formula:

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda_T}} = -2.03 \cdot \log\left[c_1 \cdot \left(\frac{b_m}{b_c}\right)^\gamma \cdot \Omega\right]$$

con:

- $\Omega$  = funzione della distanza tra le piante;
- $b_c$  = larghezza del canale principale.

- Nella zona inondabile influenzata dal flusso nel canale principale, gli sforzi apparenti che agiscono sulla parete immaginaria dipendono soprattutto dalla resistenza degli elementi di scabrezza non sommersi. Questa resistenza può essere approssimata con una funzione parabolica dando una distribuzione della velocità nella sezione pari a:

$$v(z) = \Delta v_{f1} \cdot \left(1 - \frac{z}{b_m}\right)^3 + v_{f1}$$

### 11.5 Valutazione della scabrezza in presenza della vegetazione

Il problema pratico che si presenta nella valutazione della resistenza al moto in presenza della vegetazione è quello di calcolare l'effetto in una sezione di deflusso avente contorno costituito da materiali a scabrezza diversa.

Frequentemente negli alvei dei corsi d'acqua sono presenti situazioni di scabrezza molto eterogenee, caratterizzate dalla presenza di associazioni vegetali arbustive o arboree riparie, naturali o piantumate e di materiale ghiaioso nella zona centrale di alveo (Preti, 1998; Armanini, 1999).

Tali metodi si differenziano tra loro dall'esponente con cui pesare, nell'operazione di media, il coefficiente di scabrezza tramite una suddivisione della sezione trasversale in sub-aree e ad un'operazione di media pesata, con opportune potenze del perimetro bagnato, delle scabrezze caratteristiche di ciascuna sub-area (Armanini, 1994).

Tali metodi si differenziano tra loro per i valori dell'esponente con cui pesare, nell'operazione di media, il coefficiente di scabrezza di ciascuna area; i valori dichiarati dai vari autori dipendono dalla legge di resistenza al moto considerata e dal criterio utilizzato nella procedura di suddivisione in sub-aree.

Altri metodi diffusamente applicati sono il *metodo di Einstein-Horton* ed il *metodo di Lotter* (Chow, 1959).

Il *metodo Einstein-Horton* si basa sulle ipotesi di suddivisione della sezione idrica in sub-aree compatte a medesima velocità media, attraverso le cui superfici di separazione non si esplicano sforzi tangenziali; tali ipotesi sono tuttavia confutate da numerosi dati sperimentali. Si citano, a titolo d'esempio, i dati di Bertram (1985) riguardanti la distribuzione delle linee isotachie in una sezione trasversale di un canale a sezione trapezia, con vegetazione arborea spondale; essi evidenziano una forte disomogeneità della distribuzione di velocità tra zone riparie e alveo centrale, incompatibile con le succitate ipotesi.

Il metodo di Lotter consiste nella suddivisione della sezione trasversale in  $N$  subaree, secondo ideali linee di separazione verticali, attraverso le quali non si esplicano sforzi di attrito dove, per ogni subarea, si considera uno specifico coefficiente di scabrezza  $n$ .

Il *coefficiente di Manning* dell'intera sezione ( $n_c$ ) può essere valutato secondo la formula di Lotter che assume la portata totale pari alla somma delle portate delle sub-sezioni.

Le misure condotte da Tsujimoto (1996) sulla distribuzione degli sforzi tangenziali trasversali in alvei parzialmente vegetati, evidenziano invece che l'effetto di resistenza offerto dalle zone laterali alla vena centrale non è trascurabile e che il suo massimo si esplica in una zona molto prossima alla ideale linea verticale di separazione tra zona vegetata ed alveo centrale.

Sviluppando il *metodo di Petyk e Bosmanjian* (1975), Armanini (1999) propone un criterio alternativo, per il quale nella suddivisione della zona trasversale in sub-aree, l'effetto di resistenza al moto esercitato dalla porzione laterale, vegetata, sulla zona centrale, viene quantificato come frazione non trascurabile (pari a circa 1/3) del coefficiente di scabrezza caratteristico della vegetazione.

## 11.6 Verifica della protezione spondale con tecniche di Ingegneria Naturalistica rispetto alle caratteristiche della corrente

Per tale verifica la situazione più critica è quella a crescita vegetazionale avvenuta; in quanto a parità di caratteristiche geometriche è quella con le scabrezze di Manning più grandi. Il calcolo della *scala di deflusso* (e contemporaneamente la verifica della protezione) dovrà essere quindi fatto due volte per verificare la sezione delle differenti condizioni:

- a *fine lavori*, utilizzando le scabrezze minime (**tab. 11.11**);
- a *regime*, inserendo le scabrezze relative alle sponde vegetate considerate dopo il terzo periodo vegetativo.

Si riportano nelle prossime tabelle, a titolo d'esempio, ulteriori valori di  $\tau$  (*tensione tangenziale ammissibile*), in quanto si vuole mettere in evidenza come, a seconda degli autori e delle loro particolari indagini, il valore di tale parametro, sia variabile. Nella **tabella 11.12** si fa riferimento al progetto inserito nel *Piano degli interventi di ripristino e prevenzione dei danni alluvionali* di cui alla LR 471/94 della Regione Lazio, il quale individua gli interventi di sistemazione idraulica del Rio Inferno con particolare attenzione all'impiego delle tecniche di Ingegneria Naturalistica.

Per la verifica delle capacità di resistenza delle opere di Ingegneria Naturalistica, si sono effettuati calcoli di resistenza idraulica secondo il metodo delle tensioni tangenziali ( $\tau = \gamma * R * i$ ). In relazione ai livelli di piena raggiunti durante le piene si sono ottenuti i valori riportati in **tabella 11.12**. Per quanto riguarda la resistenza durante le piene, tutte le opere hanno superato quelle primaverili nonostante il limitato sviluppo vegetativo; le talee, le palificate doppie e le scogliere rinverdite hanno resistito alle piene autunnali in concomitanza con gli eventi alluvionali di Soverato e del Po; le fascinate vive sono state asportate quasi completamente, un po' alla volta dalle ripetute piene verificatesi tra settembre e novembre 2000 (Cornellini e Menegazzi in *Interventi di Ingegneria Naturalistica nel Parco Nazionale del Vesuvio*, 2001). Si può riportare anche un'ulteriore tabella (**tab. 11.13**) in cui i valori di resistività sono messi in relazione alla profondità raggiunta dalla particolare tecnica di Ingegneria Naturalistica (Florineth, 1982, modificata). Nel calcolo (progettazione o verifica) di una protezione spondale, si fa riferimento a due metodi generali basati sull'ammissibilità per un materiale di velocità e tensioni di trascinamento. Il secondo metodo è più corretto dal punto di vista scientifico, anche se quello basato sulle velocità è spesso più facile da applicare in quanto è più semplice misurare o calcolare una velocità media in una sezione piuttosto che le tensioni tangenziali. Ai fini della valutazione dell'efficacia antiersiva di una protezione è necessario considerare tutti i parametri idraulici e geometrici: altezza d'acqua della

**Tab. 11.11** - Tabella riassuntiva dei diversi valori di scabrezza, per le principali tecniche di Ingegneria Naturalistica e per i materiali impiegati

N.	Tipologie	Autore	$\tau$ (N/m <sup>2</sup> )	v (m/s)	Fine lavori	I° p.	II° p.	III° p.
1	Sabbia fine ( $\leq 0,2$ mm)	Maccaferri (1996)	2		2			2
2	Ghiaietto (<2mm)	Maccaferri (1996)	15		2			2
3	Sabbia e ciottoli	Maccaferri (1996)	30		3			3
4	Ciottoli e ghiaia	Maccaferri (1996)	50		3.5			3.5
5	Gettata di pietrame rinverdita	Di Fidio (1956)			50	-	100	250
6	Prato rado su ghiaia	LfU (1996)	30	1,5				
	Erba < 5 cm	Calò - Palmeri (1996)			20			
	Erba > 5 cm	Calò - Palmeri (1996)				25		30
	Cotico erboso	Maccaferri (Macra) (1996)	10-30		4			5
7	Prato seminato	Folrineth (1982)	10			30	30	30
7	Prato seminato	LfU (1996)	40	1,3				
8	Prato naturale	Witzig (1970)	50-(100)					
9	Piote erbose	LfU (1996)	>60	>3,5				
10	Piantagione	Florineth (1982)	0			10	30	>30
11	Talee	Calò - Palmeri (1996)			10	20	60	60
	Talee - arbusti	Maccaferri (1996)	10-60		10			7-40
	Talee di salice	Witzig (1970)	165					
12	Talee di salice	LfU (1996)	100-150	3,0-3,5				
		Di Fidio (1995)			10	30	30	30
13	Massi con talee	Maccaferri (1996)	20-350		4-7			7-40
14	Fascinata morta	LfU (1996)	70-100	2,5-3,0				
15	Fascinata viva	LfU (1996)	100-150	3,0-3,5				
		Calò - Palmeri (1996)			20	50	60	60
16	Rulli di canne	Calò - Palmeri (1996)			10	20	30	50
17	Viminata	Steiger (1918)	50					
	Viminata in ghiaia	Calò - Palmeri (1996)			10	10	15	20
	Viminata in sabbia	Calò - Palmeri (1996)			0	10	10	10
18	Copertura diffusa	Florineth (1995)	309					
19	Copertura diffusa di salici	Witzig (1970)	100					
	Copertura diffusa	Maccaferri (1996)	50-300		10			7-40
	Copertura diffusa	Di Fidio (1956)			50	150	300	300
	Copertura diffusa di salici con armatura al piede	Calò - Palmeri (1996)			150	200	300	450
20	Copertura diffusa con ramaglie vive di salice	Florineth (1982)	195-218					
21	Ribalta viva	Calò - Palmeri (1996)			20	60	80	100
	Ribalta viva	Maccaferri (1996)	20-100		10			7-40
22	Graticciata semplice	Calò - Palmeri			10	20	30	5.300
	Graticciata spondale a repellente (pali e ghiaia)	Calò - Palmeri (1996)			100	200	300	
	Graticciate spondali	Maccaferri	10		10			7-40
	Graticciata viva	Di Fidio (1956)			100	200	-	>300
23	Gradonata viva	Calò - Palmeri (1996)			20	100	120	140
24	Gettata di massi rinverdita	Calò - Palmeri (1996)			100	150	300	350
25	Scogliera di massi rinverdita	Di Fidio (1956)			75	100	300	>350
		Florineth (1982)	75			100	300	>350
26	Palificata viva spondale	Calò - Palmeri (1996)			500	600	600	600
27	Materassi rinverditi	Folorineth (1982)	32			40	100	300
28	Repellenti vivi	Folorineth (1982)	100			200		>300

**Tab. 11.12** - Primi risultati del monitoraggio sulla resistenza delle tensioni tangenziali degli interventi di Ingegneria Naturalistica sul Rio Inferno

Tipologia d'intervento	Periodo di realizzazione	Rinverdimento	Resistenza all'erosione	$\tau_{\max}$ sopportate (N/m <sup>2</sup> )
Fascinate vive	Febbraio 2000	Getti di 30 ÷ 40 cm a fine aprile 2000 e di oltre 1 m a settembre	Resistito al 100% alla piena di fine aprile 2000	8
			Resistito all'80% alla piena di settembre 2000	18
			Resistito al 30% alla piena di novembre 2000	18
			Resistito al 5% alla piena di dicembre 2000	20
Scogliera rinverdita con talee di salice	Febbraio 2000	Getti di 30 ÷ 40 cm a fine aprile 2000 e di oltre 1 m a settembre	Resistito a tutte le piene	15
Palificata doppia con altezza di 2 m	Marzo 2000	Getti di 30 ÷ 40 cm a fine aprile 2000 e di oltre 1 m a settembre	Resistito a tutte le piene	15
Palificata doppia con altezza di 1 m	Marzo, metà aprile 2000	Getti di 30 ÷ 40 cm a fine maggio 2000 e di oltre 1 m a settembre	Resistito a tutte le piene	15
Talee in alveo	Febbraio, marzo 2000	Getti di 30 ÷ 40 cm a fine maggio 2000 e di oltre 1 m a settembre	Resistito a tutte le piene	15

Fonte: Cornellini, Menegazzi, 2001.

**Tab. 11.13** - Valori di resistività secondo la profondità raggiunta con l'utilizzo di diverse tecniche di Ingegneria Naturalistica

Tecnica d'intervento	$\tau$ (N/m <sup>2</sup> )	Profondità efficace
Radici in acqua	20	0,40
Alberi grezzi	40	0,80
Fascinate	60	0,60
Burga in rete zincata	80	0,80
Balze in geotessuto	80	1,00
Rullo in canne	50	0,60
Scogliere elastiche	> 300	2,50

corrente, pendenza della sponda, andamento planimetrico del corso d'acqua, durata dell'evento di piena. Ciò significa, in altri termini, che occorre esprimere risultati di prove sperimentali e le conseguenti indicazioni progettuali in termini di tensioni tangenziali ammissibili, tecnicamente più significative del parametro idraulico *velocità della corrente*. Di estrema importanza per alcuni materiali o tecniche è infine anche il riferimento alla durata della sollecitazione stessa: in ambito fluviale oltre al picco di piena è di fondamentale importanza considerare la durata complessiva dell'evento stesso ed occorre rifarsi a *durate caratteristiche degli*

*eventi di progetto* escludendo frazioni di ora, in quanto generalmente non significative. Tale fattore non riguarda le protezioni spondali in cui la resistenza al trascinarsi è garantita dal peso del materiale costituente la protezione: per una scogliera non si ha crisi della protezione finché non viene raggiunta la tensione tangenziale critica di inizio movimento che dipende esclusivamente dalla forma del pietrame e dalle sue dimensioni; per materassi e gabbioni l'azione di contenimento della rete incrementa tale resistenza, permettendo che avvenga un movimento parziale all'interno delle tasche senza crisi della protezione.

Le informazioni sulla resistenza di un rivestimento (non in pietrame) in funzione della durata di un evento di piena sono però ridotte a pochi materiali per i quali sono state condotte opportune prove sperimentali.

### 11.7 Calcolo delle tensioni di trascinamento

Questo procedimento si basa sul confronto tra le tensioni tangenziali massime che nascono nel punto di verifica prescelto e quelle massime ammissibili per il materiale ivi presente.

#### 11.7.1 Tensioni agenti

La formula per calcolare la tensione tangenziale massima al fondo ( $\tau_b$ ) fa riferimento al raggio idraulico  $R$ :

$$\tau_b = \gamma_w R i_f \text{ (al fondo)}$$

dove:

- $\gamma_w$  = peso di volume dell'acqua;
- $R$  = raggio idraulico;
- $I_f$  = pendenza dell'alveo.

Per i corsi d'acqua naturali ed i canali sufficientemente larghi il raggio idraulico  $R$  risulta pressoché coincidente con il tirante d'acqua; la formula quindi diviene, per un punto posizionato sul fondo (si fa notare che tale semplificazione è a favore di sicurezza):

$$\tau_b = \gamma_w (Y_{\max} - z_i) * i_f \text{ (al fondo)}$$

dove:

- $z_i$  = quota del punto da verificare.

Se il punto è situato su una sponda lungo un'asta fluviale planimetricamente rettilinea, la tensione tangenziale massima  $\tau_m$  è ridotta e vale:

$$\tau_m = 0.75 \gamma (Y_{\max} - z_i) * i_f$$

(sulla sponda rettilinea)

Diversamente, se l'asta è in curva si ha un aumento della tensione tangenziale sulla sponda concava (esterna), di cui si tiene conto attraverso il coefficiente  $K$ , funzione del rapporto tra il raggio di curvatura e la larghezza del pelo libero dell'acqua (fig. 11.22).

Ne consegue che  $\tau_m$  assume la seguente espressione:

$$\tau_m = K 0.75 \gamma_w (Y_{\max} - z_i) * i_f$$

(sulla sponda in curva)

#### 11.7.2 Tensioni resistenti e loro verifica

Per quanto riguarda la resistenza al trascinamento si definisce tensione massima di trascinamento  $\tau_c$  la massima forza a partire dalla quale il materiale al fondo comincia a muoversi. Per i materiali non coesivi la formula generalmente utilizzata è la seguente:

$$\tau_c = 80 d_{75}$$

dove:

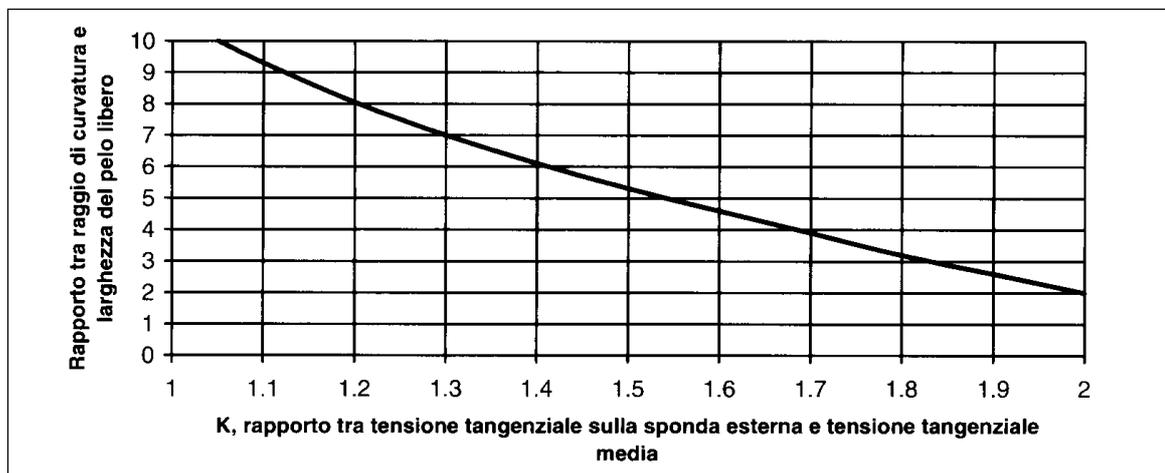
- $\tau_c$  = tensione massima di trascinamento ( $\text{kg/m}^2$ );
- $d_{75}$  = diametro del vaglio che consente il passaggio del 75% del materiale d'alveo (cm).

Affinché la verifica sia soddisfatta deve risultare, per un punto sul fondo:

$$\tau_b \leq \tau_c \text{ (al fondo)}$$

A sua volta per il materiale non coesivo non situato su un fondo orizzontale, occorre tenere conto della riduzione della tensione massima di trascinamento  $\tau_s$ , dovuta all'effetto della pendenza della sponda, mediante un coefficiente correttivo e la tensione così modificata va confrontata con la massima tensione agente  $\tau_m$ :

Fig. 11.22 - Effetto della curvatura del corso d'acqua sulla tensione tangenziale agente sulla sponda esterna



$$\tau_m \leq \tau_s \text{ (sulla sponda)}$$

e dove:

$$\tau_s = \tau_c \sqrt{1 - \frac{\sin^2 \theta}{\sin^2 \varphi}}$$

in cui:

- $\varphi$  = angolo di attrito interno del materiale (non coesivo) che costituisce la sponda;  
 $\theta$  = angolo di inclinazione della sponda sull'orizzontale.

Per evitare che il termine sotto radice diventi negativo, occorre che il materiale che costituisce la sponda abbia un angolo di attrito interno superiore all'inclinazione della sponda. In caso contrario il calcolo della  $\tau_s$  può essere comunque svolto, assumendo che per inclinazione delle sponde  $\theta > (\varphi - 2^\circ)$  il coefficiente riduttivo sia costante e pari al valore:

$$\tau_s = \tau_c \sqrt{1 - \frac{\sin^2(\vartheta - 2)}{\sin^2 \varphi}}$$

assegnando quindi al materiale una resistenza residua assimilabile al fatto che in genere è presente una coesione.

## 11.8 Le rampe a blocchi e rampe di risalita per pesci

### 11.8.1 Premessa

L'interposizione di opere idrauliche trasversali in un corso d'acqua costituisce sovente un ostacolo insormontabile per la fauna ittica.

Ciò crea notevoli danni all'ecosistema andando ad interrompere i flussi trofici ed energetici: la presenza, infatti, di opere insormontabili impedisce di raggiungere le aree di frega e riproduzione ed ostacola lo scambio genetico all'interno di popolazioni altrimenti isolate.

Da qui l'esigenza di coniugare, nella progettazione di opere idrauliche di siffatta natura, le esigenze idrauliche con quelle ecologiche.

Il problema degli sbarramenti potrebbe essere positivamente risolto, inoltre, affrontandolo zona per zona, valutando la situazione di fatto ed i risultati che diversamente si potrebbero ottenere.

Le rampe di risalita in pietrame per pesci, se correttamente concepite, rappresentano un'ideale soluzione.

La funzionalità di tali strutture è legata al rispetto di alcuni parametri di natura idraulica e biologica, per cui una loro accurata progettazione presuppone un'attenta analisi di diversi fattori quali il regime idraulico, la morfologia dell'alveo, la composizione specifica della fauna ittica, le caratteristiche biologiche del corso d'acqua, ecc.

Negli ultimi decenni si sono dovute affrontare situazioni ed esigenze complesse nella progetta-

zione dei passaggi, mettendo a punto dispositivi di risalita idraulicamente e tecnologicamente perfezionati.

Le tecnologie alle quali possono essere ricondotti i passaggi attualmente applicati, sono:

- passaggi rustici;
- rampe grezze o rapide artificiali;
- chiuse per pesci;
- passaggi a bacini successivi;
- passaggi a rallentatori (tipo *Denil*);
- ascensori.

Nella pratica bisogna tenere considerare che ogni realizzazione costituisce una risposta a misura delle esigenze locali, definite dalla quantità dei dati forniti:

- numero di specie che si vuol far risalire;
- taglie;
- periodo di risalita;
- livelli d'acqua e portate durante la risalita in relazione ai dati minimi e massimi, annuali e mensili.

Naturalmente maggiori e note sono le informazioni iniziali, migliore è il risultato ottenibile, anche se quest'ultimo può dipendere da variabili che devono essere valutate durante successive modifiche.

La manutenzione delle opere è fondamentale e deve avviare i periodici danni causati dal trasporto solido e dall'evoluzione della situazione ambientale.

Una manutenzione ordinaria e la possibilità di modificare i passaggi sono parte integrante della gestione delle opere stesse, in quanto gli eventi idraulici periodici o straordinari causano fatti nuovi che possono modificare la percorrenza dei passaggi per pesci: solo la costante presenza di un "gestore" può produrre elementi di valutazione sullo stato di efficienza dell'opera.

I metodi di valutazione dell'efficacia delle opere realizzate sono in rapida evoluzione e, in caso di necessità, si sostituisce il classico trappolaggio con impianti di cattura automatici, *radio-tracking*, *fish-counters* elettronici, ecc. (Ferri, 1988).

Ai fini idraulici, la presenza di una briglia determina una dissipazione dell'energia cinetica della corrente attraverso il risalto idraulico che si forma a valle dell'opera stessa in maniera proporzionale alla sua altezza.

Con le rampe in pietrame, invece, il processo dissipativo va correlato alla loro irregolarità e scabrosità.

Nel caso delle briglie il processo dissipativo è facilmente correlabile al numero di Froude (*Fr* ottimale se compreso tra 4,5 e 9), mentre nel caso delle rampe ciò si lega alla turbolenza dell'acqua e, perciò, esso si verifica in presenza di deflussi scarsi o con elevate scabrezze relative (AA.VV., 1993):

$$\frac{k}{y}$$

dove:

- $k$  = altezza della scabrezza;  
 $y$  = altezza del livello d'acqua.

Il valore di  $Fr$  al piede della rampa è, infatti, di  $1 \div 1,5$ , per cui a valle si viene a formare un risalto idraulico.

È quindi evidente che il dimensionamento della rampa va eseguito in funzione della portata per la quale si verifica una dissipazione ottimale dell'energia cinetica posseduta dalla corrente.

Detto ciò va posta attenzione alla considerazione che, lasciando solo come parametro progettuale quello dell'energia da dissipare, si potrebbero configurare dimensionamenti esagerati delle rampe stesse; va peraltro evidenziato che il vantaggio idraulico costituito dalle rampe è, in realtà, quello di modificare la pendenza dell'alveo, concentrando il dislivello in un'area ristretta, consentendo così un efficace consolidamento delle sponde situate a monte dell'opera. In questo modo, pur realizzando strutture di modesta altezza, si è in grado di mitigare in modo adeguato la forza erosiva della corrente, senza creare ostacoli insormontabili alla fauna ittica.

### 11.8.2 Tecniche costruttive

Occorre fissare il concetto che ogni passaggio per i pesci deve necessariamente rispondere ad un'attenta valutazione territoriale per l'acquisizione di dati (dislivelli d'acqua), portate, conformazione del terreno, qualità e quantità dell'ittiofauna locale, periodi ed identità delle "migrazioni", senza i quali non è possibile entrare nel merito di una progettazione ed una realizzazione efficace.

La progettazione richiede, inoltre, anche il contributo di capacità creative per l'adattamento di una tipologia che, una volta sviluppata, si concretizzerà in un'opera idonea a risolvere le necessità locali e "personalizzata" a tal punto da essere considerata un vero prototipo. Le opere maggiori necessitano spesso anche di una fase di laboratorio per la preliminare verifica di modelli in scala ridotta.

Occorre anche prevedere la possibilità di dover riesaminare le scelte già effettuate per perfezionare il progetto anche in corso o a fine d'opera, risolvendo i problemi della manutenzione periodica (Martino, 1991).

L'esperienza ha dimostrato l'efficacia di rampe di modesta altezza ( $h < 2$  m), di limitata pendenza ( $i < 1:8$ ), con altezze medie di scabrosità pari a  $0,3 \div 0,5 d_s$  ( $d_s$  = diametro della sfera equivalente di pietrame) e strutturalmente eterogenee.

L'irregolarità delle rampe, creando spazi vuoti, consente di avere un'alternanza tra zone a corrente rapida e zone a corrente lenta, favorendo la risalita della fauna ittica, così come la diversificazione dei microambiti fluviali.

Sconsigliato è annegare il pietrame nel calcestruzzo così come è opportuno favorire la possibilità di concentrare la portata di magra lungo l'asse centrale dell'alveo.

Ribadendo la necessità di risolvere il problema della continuità morfologica ed ecologica dei corsi d'acqua si possono, infine, configurare due principali tecniche costruttive:

- posa in opera di massi in modo irregolare;
- posa in opera di massi in modo regolare.

### 11.8.3 Cenni sul dimensionamento e sulla progettazione delle rampe in pietrame

Fra i vari metodi conosciuti si evidenziano quello di Whittaker-Jäggi, l'equazione di Gauckler-Manning-Strickler-Gleichung e l'equazione di Scheuerlein.

#### a) Whittaker-Jäggi

Nel caso di strutture realizzate con massi posti in maniera irregolare, il valore limite di stabilità della rampa, oltre il quale si verifica il danneggiamento della struttura stessa, diviene:

$$qc = 0,257 \left( \frac{P_s - P_w}{P_w} \right)^{\frac{1}{2}} g^{1/2} i^{-7/6} d_{65}^{-3/2}$$

con:

- $qc$  = portata specifica critica ( $m^3/s$ );
- $P_s$  = peso specifico del pietrame ( $kg/m^3$ );
- $P_w$  = peso specifico dell'acqua ( $kg/m^3$ );
- $g$  = accelerazione di gravità ( $m/s^2$ );
- $i$  = pendenza della rampa;
- $d_{65}$  = diametro del pietrame con passaggio del 65% al vaglio  $d_{65} = \frac{d_s}{1,06}$  (m);
- $d_s$  = diametro della sfera equivalente di pietrame (m).

È bene osservare che il dimensionamento derivante dal calcolo di cui sopra è più idoneo per rampe di altezze considerevoli ( $h > 2$  m), altrimenti determina un effettivo sovra-dimensionamento.

In questi casi ( $h < 2$  m) pare più opportuno applicare le formule esplicitate dalle equazioni di Gauckler-Manning-Strickler-Gleichung e di Scheuerlein.

#### b) Equazione di Gauckler-Manning-Strickler-Gleichung

$$q = k_{st} y^{5/3} i^{1/2}$$

con:

- $q$  = portata specifica ( $m^3/m s$ );
- $d_{65}$  = diametro del pietrame con passaggio del 65% al vaglio  $d_{65} = \frac{d_s}{1,06}$  (m);
- $k_{st}$  = coefficiente  $\frac{21}{d_s^{1/6}}$  (m);
- $y$  = profondità dell'acqua (m);
- $i$  = pendenza della rampa.

#### c) Equazione di Scheuerlein

$$q = y v$$

$$= y (8 g y i)^{1/2} \log \left[ \frac{12}{(1,7 + 4,05 * i)} * \frac{y}{d_s} \right]^{\frac{3}{2}}$$

con:

- $q$  = portata specifica ( $m^3/m\ s$ );  
 $y$  = profondità dell'acqua (m);  
 $v$  = velocità dell'acqua (m/s);  
 $g$  = accelerazione di gravità ( $m/s^2$ );  
 $i$  = pendenza della rampa;  
 $d_s$  = diametro della sfera equivalente di pietrame (m).

Di fondamentale importanza risulta essere la conoscenza della portata che determina il cambiamento del deflusso (passaggio dallo stramazzo a lama aderente allo stramazzo rigurgitato). Si verifica quando il battente a valle è uguale a quello sul limite della rampa e cioè quando abbiamo:

$$y_u = h + y_r$$

con:

- $y_u$  = profondità dell'acqua a valle (m);  
 $h$  = altezza della rampa (m);  
 $y_r$  = profondità dell'acqua sul limite della rampa (m).

In base alla scala di deflusso della sezione a valle si può determinare la portata con la quale avviene il suddetto cambiamento di deflusso, applicando detta portata ( $q_c$ ) alla relazione  $a$ ) di Whittaker-Jäggi si ottiene il dimensionamento del pietrame.

Particolare attenzione va posta poi per le sponde dell'alveo situate ai lati delle rampe che devono essere consolidate per evitare il fenomeno dell'erosione laterale; così come è stata dimostrata l'opportunità di posizionare pietrame sufficientemente eterogeneo (ovviamente interponendo alcuni massi di dimensioni maggiori di quelli emersi dal calcolo).

Un ulteriore accorgimento di cui tenere conto è quello che riguarda il passaggio tra l'opera in pietrame ed il fondo in presenza di rampe di notevoli dimensioni.

Al fine di evitare lo scalzamento dell'opera si può dimensionare il pietrame da collocare sul fondo alla base della rampa, con la seguente relazione (*formula di Knaus*):

$$d_m = 0,04 v_m^2$$

con:

- $d_m$  = diametro medio del pietrame (m; cfr. la definizione di  $d_{95}$  usata per la relazione  $a$ ) di Whittaker-Jäggi);  
 $v_m$  = velocità media dell'acqua a valle (m/s).

#### 11.8.4 Inserimento delle rampe in presenza di opere idrauliche esistenti

Le problematiche connesse alla risalita delle specie ittiche non si limitano solamente con la possibilità di costruire rampe in pietrame in luogo delle tradizionali briglie.

Spesso, infatti, ci si trova di fronte un alveo già radicalmente regimato su cui necessita intervenire.

In questo caso non ci sono regole ferree, si tratta di contemperare le tecnologie conosciute con

le caratteristiche morfologiche complessive badando, in ogni caso, a rispettare un criterio di sostanziale economicità.

Si tratta infatti di trasformare, ove possibile, vecchie briglie in rampe, andandosi a raccordare gradualmente con il profilo della gaveta, badando, ovviamente, a mantenere un opportuno franco laterale di sicurezza, rispetto al conseguente innalzamento del pelo libero. Si può pure collocare la rampa lateralmente alla briglia, in particolare in alvei caratterizzati da periodi prolungati di scarso deflusso.

Altra interessante soluzione è quella di creare, nelle zone limitrofe l'alveo, veri e propri ruscelli in pietrame (cunette eterogenee) capaci di aggirare l'ostacolo rappresentato dall'opera trasversale. Si può giungere a realizzare delle vere e proprie scale di risalita (a scivoli, a vasche successive, ecc.).

#### 11.8.5 Caratteristiche di dinamicità della fauna ittica

Nei paragrafi precedenti la problematica è stata trattata da un punto di vista squisitamente idraulico. È però evidente che una corretta progettazione non può prescindere da una completa conoscenza delle caratteristiche e dei comportamenti dell'ittiofauna.

Si è dimostrata una correlazione tra la resistenza dei pesci alla velocità dell'acqua in funzione della temperatura e delle dimensioni del pesce stesso (**figg. 11.23-11.24**).

Altrettanto importante è conoscere il comportamento dei pesci in presenza di ostacoli artificiali al variare del flusso idrico (**fig. 11.25**).

I valori di riferimento per quanto concerne la velocità massima della corrente d'acqua superabile dalle diverse specie sono indicativamente riportate nella **tabella 11.14** (Stahlberg, Peckmann, 1986).

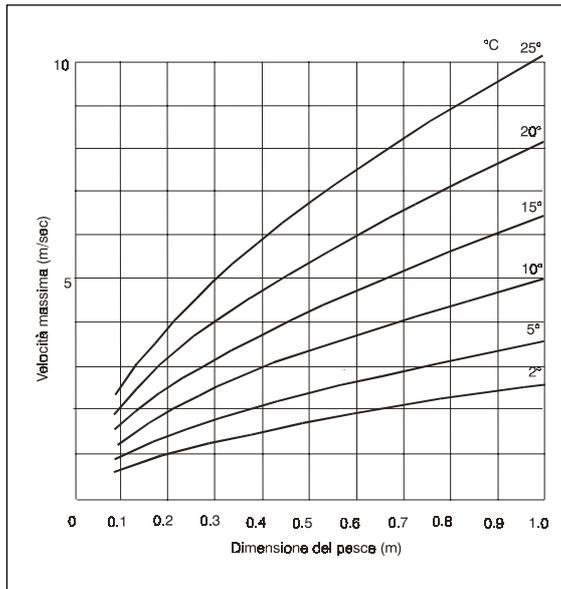
Si è compreso come sia necessario predisporre zone di calma per consentire ai pesci di riposarsi potendo gli stessi resistere a forti correnti solo per brevi tratti.

La combinazione degli aspetti idraulici con quelli tipici della fauna ittica consente, quindi, di giungere ad una razionale progettazione, suffragata dall'esperienza e dal buon senso, di questi elementi strutturali capaci di mitigare profondamente gli effetti negativi delle opere trasversali poste a salvaguardia idraulica dei corsi d'acqua così come di sbarramenti artificiali posti all'interno degli alvei fluviali o torrentizi.

**Tab. 11.14** - Velocità massima di corrente d'acqua superficiale delle diverse specie

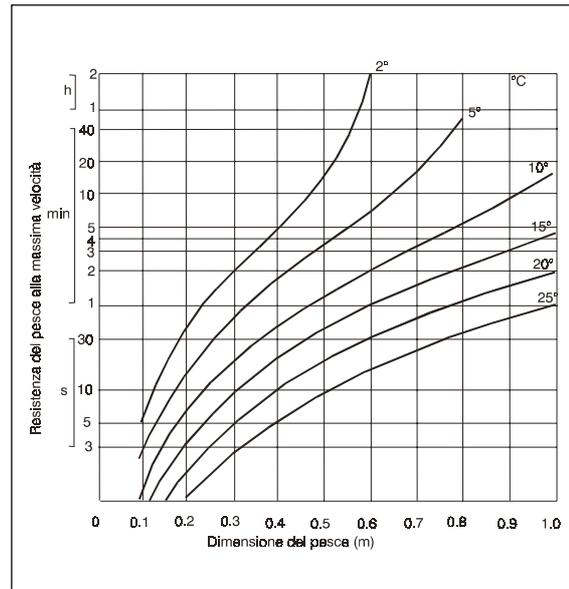
Tipo di ittiofauna	Velocità massima (m/sec)
Trote e salmonidi	2,0
Ciprinidi	1,5
Pesci di dimensioni minori o in stadio giovanile	1,0

**Fig. 11.23** - Velocità massime dei pesci in funzione delle loro dimensioni e della temperatura dell'acqua



Fonte: Beach, 1984.

**Fig. 11.24** - Rapporto tra la resistenza dei pesci alla velocità dell'acqua in funzione anche della temperatura



Fonte: Beach, 1984.

### 11.9 Classificazione delle tecniche di Ingegneria Naturalistica impiegabili in ambito idraulico

In linea di massima tutte le modalità e tipologie costruttive delle opere impiegate su versante possono essere impiegate anche per tutti i campi dell'idraulica.

Oltre gli effetti di staticità delle terre e pedo-meccanici, in ambito idraulico devono essere però prese in considerazione le forze supplementari che derivano dalla velocità di scorrimento e dalla forza di trascinamento dell'acqua corrente. Nel caso di interventi stabilizzanti e combinati viene quindi ampliata l'offerta di alcune tipologie sviluppate specificatamente per l'idraulica.

L'Ingegneria Naturalistica, in ambito idraulico, afferma il suo ruolo sia come tecnica solitaria, sia come elemento di combinazione e complemento degli interventi tecnici idraulici. Nella sistemazione introdotta da Schiechl (1973) suddividiamo i metodi costruttivi in:

- interventi di rivestimento;
- interventi stabilizzanti;
- interventi combinati;
- interventi complementari.

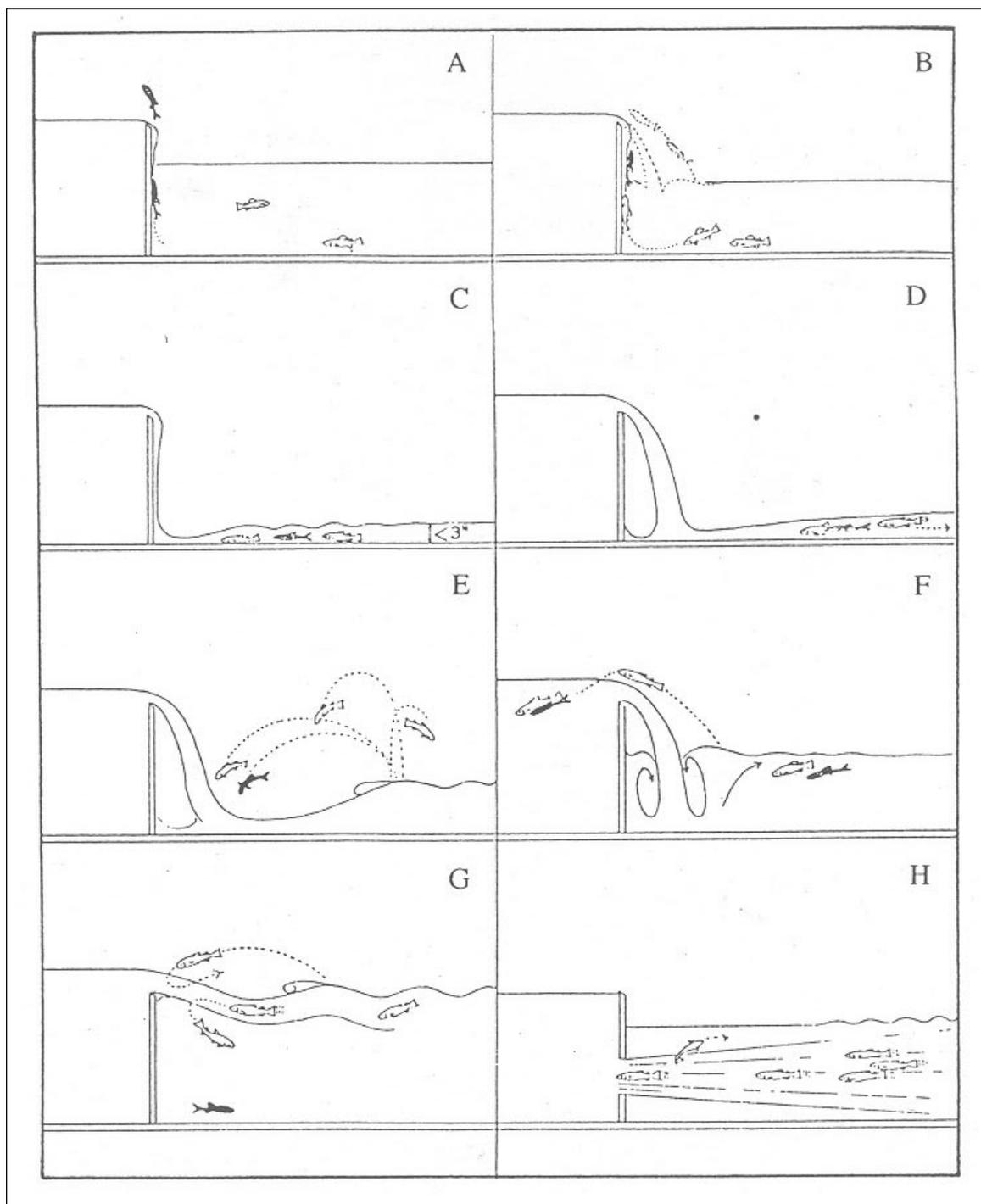
Ognuno di questi modi costruttivi e le relative tipologie assolvono funzioni ben precise e colmano specifici ambiti applicativi:

- gli *interventi di rivestimento* proteggono rapidamente il terreno dall'erosione superficiale e dall'irraggiamento con la loro azione di copertura esercitata sull'intera superficie. Essi migliorano il bilancio termico e idrico e promuovono così l'attivazione biologica del terreno. Gli strati con copertura di paglia offrono già prima dell'attecchimento della ve-

getazione (graminacee e erbe non graminoidi, piante legnose) una protezione contro le precipitazioni;

- gli *interventi stabilizzanti* servono per diminuire, fino ad escludere, le forze meccaniche. Essi stabilizzano e consolidano le sponde e le loro scarpate, come pure i versanti instabili, mediante la compenetrazione delle radici ed il consumo idrico. Trattasi di sistemi disposti linearmente o in maniera puntiforme, costituiti da arbusti e alberi, ovvero dalla relativa ramaglia con capacità di propagazione vegetativa. Le sistemazioni stabilizzanti vengono di norma integrate, a difesa dall'erosione, con interventi di rivestimento;
- gli *interventi combinati* sostengono e consolidano scarpate e sponde instabili, combinando i materiali da costruzione vivi (piante e parti di piante) con quelli inerti (sassi, calcestruzzo, legno, acciaio, materiale sintetico). Si consegue così un costante miglioramento del grado di efficienza ed una maggiore durata delle opere di sostegno;
- gli *interventi complementari* comprendono le semine e le piantagioni nell'accezione più ampia e servono a fornire una prova sicura che le sistemazioni sono giunte allo stadio finale della progettazione.

L'impiego delle tecniche di Ingegneria Naturalistica nelle sistemazioni idrauliche trova alcuni limiti che vanno ben evidenziati per non commettere gravi errori: prima di adottare qualsiasi soluzione è quindi opportuno valutare tra le diverse alternative l'efficacia, l'impatto ambientale e la convenienza economico-sociale. Si potrà quindi spaziare dal non-intervento negli ambienti più naturali e delicati, fino all'esclu-

**Fig.11.23** - Comportamenti dell'ittiofauna in presenza di un ostacolo artificiale al variare del deflusso idrico

Fonte: Stuart, 1962.

siva considerazione delle esigenze di massima sicurezza negli ambienti antropizzati.

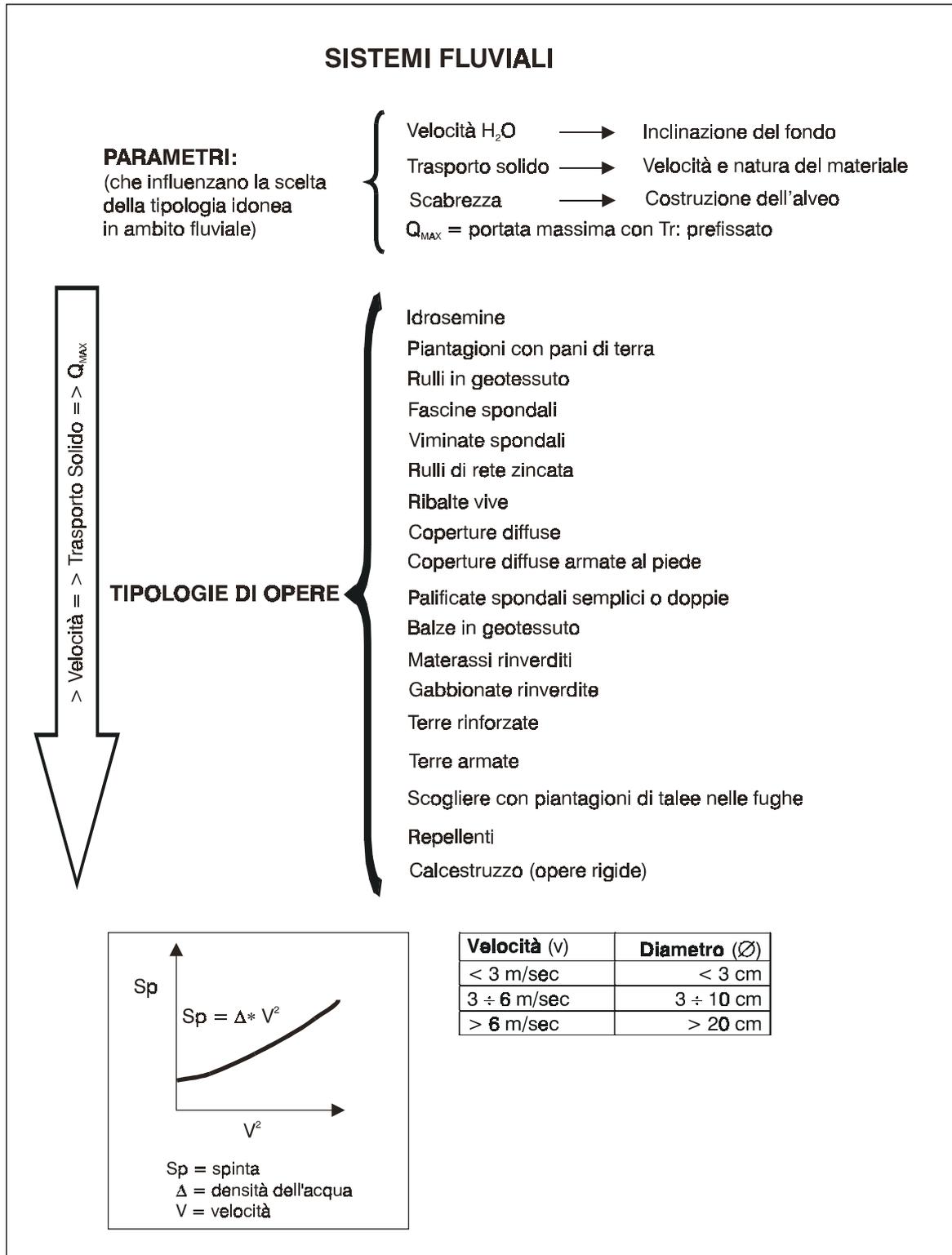
Valutata l'opportunità di intervenire con tecniche più o meno biologiche, andranno presi in considerazione una serie di fattori biotici, abiotici e antropici, alcuni dei quali possano assumere, a seconda della situazione, una valenza prevalente nell'indirizzare la scelta.

Tra i fattori abiotici l'*orografia* e, in particolare, la *pendenza* costituiscono un limite molto netto per poter applicare alcune tecniche: la

maggior parte degli interventi trova normalmente impiego solo per aste fluviali con pendenza massima del 5%, meglio se tra 3 e 4%. Risulta quindi immediatamente evidente che queste condizioni si verificano nei corsi d'acqua montani e collinari solo per brevi e limitati tratti anche se, con opportune verifiche, tali limiti possano venire superati.

Sempre tra i fattori abiotici particolare importanza riveste il regime idraulico, soprattutto in riferimento al trasporto solido: il rotolito di ma-

**Fig. 11.26 - Classificazione delle tecniche di Ingegneria Naturalistica in ambito idraulico**

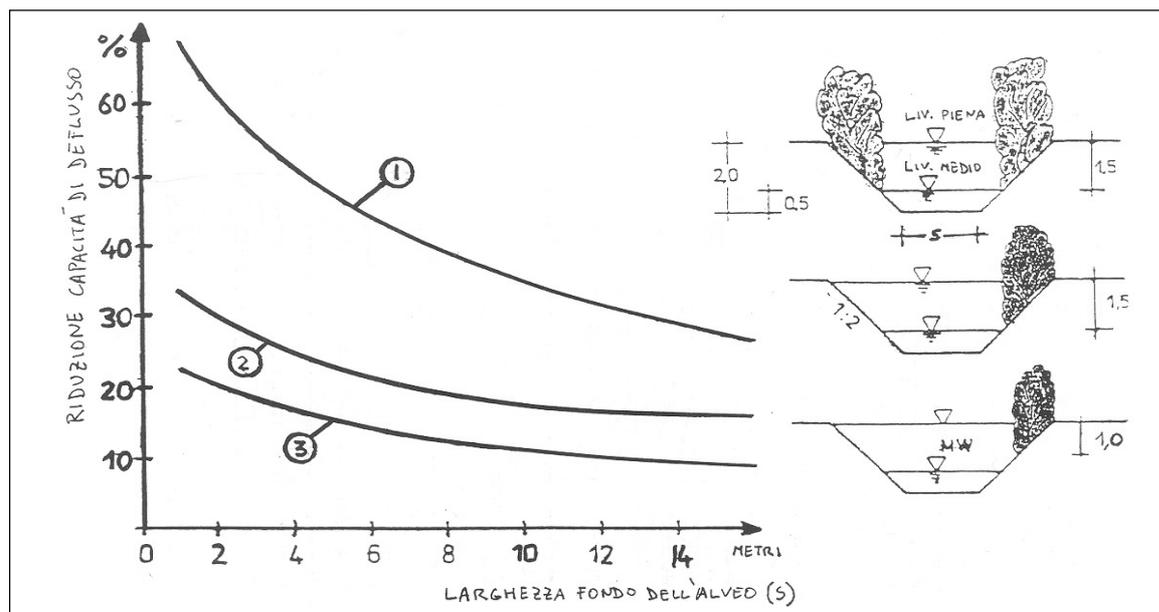


teriale lapideo di medie e grosse dimensioni può danneggiare in maniera anche molto grave le opere con materiale vegetale vivente. Per quanto riguarda infine i fattori antropici un limite è costituito dalla possibilità di lavorare per periodi relativamente ristretti, ed è quindi necessaria una accurata organizzazione del lavoro (fig. 11.26).

**11.10 Dimensionamento minimo efficace e statica delle tecniche di Ingegneria Naturalistica in ambito idraulico**

Già si è detto del fatto che, nel caso d'impiego di tecniche di Ingegneria Naturalistica all'effetto tecnico si aggiungono contemporaneamente

Fig. 11.27 - Diagramma larghezza fondo dell'alveo/ riduzione capacità di deflusso



Fonte: Stern, 1994, modificato da Calò, Palmeri, 1996.

Tab. 11.15 - Deflusso di un corso di acqua con copertura legnosa sulle sponde

**Esempio di calcolo per corso d'acqua con copertura legnosa sulle sponde**  
 $Q_m = F_m \cdot V_m = F_m \cdot K_{GMS} \cdot (Lo/U)_m \cdot R^{2/3}_m \cdot I^{1/3}_w$  [m<sup>3</sup>/s]

Progressiva in km	Sezione	Distanze parziali	Quota del fondo	Quota del pelo dell'acqua	Profondità dell'acqua $\tau$	Differenza fra i peli liberi	Area della sezione liquida F	Area media della sezione liquida $F_m$	Contorno bagnato U	Contorno bagnato medio $U_m$
Km	-	m	NN+..m	NN+..m	m	m	m <sup>2</sup>	m <sup>2</sup>	m	m
0+00	I		52,00	54,06	2,06		20,07		17,44	
		50				0,10		20,07		17,44
0+050	I		52,10	54,16	2,06		20,07		17,44	
		60				0,13		17,94		15,10
0+110	II		52,22	54,29	2,07		15,81		12,76	
		50				0,12		15,93		12,81
0+160	II		52,32	54,41	2,09		16,05		12,85	

Fonte: Schiechl, Stern, 1994.

te un effetto ecologico, economico ed estetico. Errori grossolani nella progettazione o gravi carenze nella esecuzione delle opere di ingegneria classica, possono essere rimediati solo raramente con l'aiuto dell'Ingegneria Naturalistica. I metodi dell'Ingegneria Naturalistica devono quindi integrare fin dall'inizio le tipologie tracciate nel modo classico.

In casi particolari è persino possibile sostituire completamente gli interventi costruttivi eseguiti con materiali inerti mediante interventi di Ingegneria Naturalistica, specie quando si può contare su un miglior effetto globale. Le formazioni di piante legnose, che non sono

state progettate e curate adeguatamente possono avere effetti negativi sul deflusso della piena. Una densa copertura legnosa sulle scarpate spondali diminuisce non solo la velocità della corrente, ma modifica anche la ripartizione della velocità nel profilo trasversale e cioè in modo tale che, le velocità relativamente più alte calano nella zona inferiore della sezione.

A causa della modificata distribuzione della velocità della corrente, la riduzione della portata risulta più evidente nei corsi d'acqua più stretti che in quelli più larghi (fig. 11.27). Felkel ha introdotto il coefficiente di riduzione  $Lo/U$  ( $Lo$  = la parte non coperta da vegetazione del peri-

metro bagnato;  $U$  = perimetro bagnato in m), modificando la formula di Manning-Strickler per velocità di deflusso medie nei profili con vegetazione legnosa. Un esempio di calcolo con l'adozione di questo coefficiente è riportato nella **tabella 11.15** (Dwk, 1984).

In riferimento a questo fatto sono sorte varie raccomandazioni, di piantare le scarpate con salici arbustivi su stretti corsi d'acqua, solo a partire da una larghezza dell'alveo di 5 m, e cioè da un solo lato (Eidgen. Ba. Wasserwirtschaft, 1982).

### 11.11 Progettazione con criteri ecologici in ambito fluviale

La necessità di controllare le acque correnti in funzione della difesa della viabilità e delle attività economiche che si svolgono lungo un corso d'acqua è stato un elemento costante nelle interazioni tra uomo e ambiente fluviale.

La preminenza di questo controllo ha determinato sino ad epoche recenti un tipo di approccio teorico e applicativo basato essenzialmente su un concetto idraulico del fiume, visto quindi essenzialmente come un collettore di acque superficiali, con la principale funzione di drenaggio del territorio dalle acque in eccesso, in modo da trasferirle al collettore finale, eventualmente "arricchite" da scarichi civili ed industriali.

Sia a causa del forte impatto ambientale determinato da questo tipo di approccio, sia a causa del deterioramento generalizzato del territorio, si è cominciato a riattribuire ai corsi d'acqua una valenza paesaggistica ed ecologica. Alle necessità produttive e idrauliche ne sono state quindi affiancate altre, poste sulla bilancia di un'ipotetica analisi costi-benefici che, ad una lettura semplicistica, poteva sembrare una sorta di contrapposizione tra interessi dell'uomo e della natura.

È solo negli ultimi decenni che, grazie soprattutto alle ricerche derivanti da teorie e modelli per un'interpretazione sistemica dell'ambiente, si è sanata questa apparente contraddizione, dimostrando come sotto tutti i profili (idraulico, paesaggistico, naturalistico, ecologico, sanitario, economico, ecc.) sia conveniente una gestione dei corsi d'acqua a livello di bacino idrografico che abbia tra le principali finalità quella di far riacquisire ai fiumi, attraverso il recupero dei loro caratteri naturali, anche le capacità omeostatiche (cioè di mantenere o tornare all'equilibrio in conseguenza di un disturbo) strettamente correlate alla diversità ambientale e biologica.

È in quest'ottica che si deve inserire lo sviluppo di nuove tecniche di intervento in ambito fluviale, come l'Ingegneria Naturalistica. Non tanto quindi come una nuova tecnica al servizio di teorie superate (compresa quella di una visione prevalentemente estetica del paesaggio), bensì come mezzo utile per riconferire naturalità al corso d'acqua, nonché per limita-

re l'impatto di interventi resi indispensabili in situazioni specifiche (Sansoni, 1999).

L'Ingegneria Idraulica può affrontare, nella maggior parte dei casi, soltanto differenti aspetti parziali delle costruzioni idrauliche naturaliformi.

Nelle costruzioni fluviali, come già discusso, un importante compito consiste nello smaltimento della piena di dimensionamento. Per questo scopo sono necessarie costruzioni che resistano alle sollecitazioni in gioco.

Le costruzioni idrauliche naturaliformi hanno tuttavia bisogno di spazio. È illusorio pensare di poter realizzare costruzioni idrauliche naturaliformi senza un'adeguata disponibilità di spazio.

L'impiego dei diversi metodi costruttivi di Ingegneria Naturalistica, dipende direttamente dal concepire i corsi d'acqua in una visione ambientale. Se le premesse tecniche delle costruzioni idrauliche naturaliformi non corrispondono in modo adeguato ai principi ecologici, l'Ingegneria Naturalistica viene degradata al ruolo di un sussidio estetizzante.

Non è obiettivo del presente manuale trasmettere i principi fondamentali delle costruzioni idrauliche in campo ambientale: tentiamo unicamente di esporre in modo conciso i più importanti criteri di base riguardo alle costruzioni idrauliche naturaliformi, secondo Kauch (1992) e secondo le direttive BMLF/OWWW (1992) (Ministero Federale per l'Agricoltura e Foreste/Associazione idraulica austriaca).

Ogni ambiente è caratterizzato da una rete di corsi d'acqua tipica, disegnata dalla geomorfologia. In un paesaggio fortemente antropizzato, corsi d'acqua primordiali quasi non esistono o non esistono per niente. Nella migliore delle ipotesi solo tratti parziali dei nostri corsi d'acqua, per non parlare affatto delle acque ferme, coincidono con il termine di *Naturnahe* (vicino alla natura), termine di scelta non molto felice che però è stato introdotto e al quale si dovrebbe preferire il termine "naturaliforme".

Esistono da molto tempo principi informativi generali per le costruzioni idrauliche su base biologica o, anche, ecologica quali:

- conservazione della morfologia dei corsi d'acqua, tipica del paesaggio su cui si opera;
- conservazione della dinamica delle acque;
- conservazione dei gorghi, dei guadi e dei banchi di ghiaia;
- conservazione del fondo del corso d'acqua;
- conservazione delle sponde pianeggianti e di quelle ripide, di quelle in erosione e di quelle di scorrimento;
- conservazione della larghezza di alvei fluviali variabili;
- conservazione dei diversi tipi di corrente;
- ritenzione della corrente nell'alveo;
- conservazione della possibilità di migrazione degli organismi acquatici;
- creazione, sviluppo e cura di una vegetazione adatta alle caratteristiche stazionali;
- gestione orientata alla cura dei lembi spondali

e dei boschi ripari secondo i principi dell'ecologia forestale;

- progettazione che tenga conto della sicurezza, ai fini di danni potenziali, a causa del cattivo funzionamento dell'opera;
- messa in conto della multifunzionalità delle acque correnti nelle zone residenziali;
- messa in conto della grande convenienza dei consolidamenti spondali, eseguiti con l'Ingegneria Naturalistica, incluse anche le riparazioni dopo le piene.

Alcune importanti regole da seguire per la realizzazione di opere di Ingegneria Naturalistica in ambito idraulico sono le seguenti (tratto da Schiechl, Stern, 1994):

- scelta ed impiego di macchine operatrici ed attrezzi, che devono essere appropriati dal punto di vista tecnico ad adattarsi alle condizioni del terreno;
- conformazione della scarpata che salvaguardi l'aspetto naturale e quindi sia stabile, cosa che viene raggiunta evitando pendenze troppo forti, arrotondando i bordi e gli spigoli della scarpata;
- impiego di materiali da costruzione adatti al paesaggio ed al luogo, ad esempio sassi, ghiaia, ciottoli, terreni e terre a granulometria da fine a finissima, legno;
- evitare l'impiego di materiali da costruzione naturali che non si trovano nella zona interessata dal progetto; ad esempio nessun impiego di pietrame in torrenti costituiti da sedimenti alluvionali fini;
- evitare l'impiego, fin quando possibile, di materiali da costruzione estranei al paesaggio quali acciaio, calcestruzzo, materie sintetiche; ad esempio per il rivestimento o l'impermeabilizzazione del fondo del corso d'acqua, privilegiando l'impiego di materiale da costruzione vivo;
- provvista di piante legnose a propagazione vegetativa provenienti dalla zona del cantiere o da soprassuoli naturali equivalenti, quanto più vicini possibile;
- conservazione di canneti e di piante acquatiche nella zona della sistemazione;
- conservazione della vegetazione che cresce nelle immediate vicinanze del cantiere, al di fuori dell'area della sistemazione, che rimane anche dopo la fine dell'intervento, mediante un avveduto impiego delle attrezzature;
- trasferimento, immagazzinamento transitorio e nuova messa a dimora (traslazione) della vegetazione;
- ridurre al minimo, o meglio ancora evitare, il taglio parziale, lo spezzettamento o la diciocatura dei boschi ripari.

Le costruzioni idrauliche, in particolare le sue varianti naturaliformi, costituiscono elementi di modellazione del paesaggio. Prima di progettare gli interventi di Ingegneria Naturalistica, i corpi idrici dovrebbero essere delimitati in base al loro tracciato o alla posizione delle sponde. Il *tracciato*, il *profilo longitudinale* e il *modellamento delle sezioni trasversali* ne sono il risultato.

Per quanto riguarda il tracciato adattato al paesaggio :

- nei tratti inferiori delle depressioni vallive, presenta una successione regolare di curve a destra ed a sinistra con diversi raggi;
- la larghezza del fiume dovrebbe aumentare dal punto d'inizio della curvatura dell'arco verso la parte centrale dell'arco stesso.

Per principio il tracciato è naturaliforme, quando esso si avvicina il più possibile al tipo del corpo idrico.

Nei corsi d'acqua lasciati allo stato naturale sono presenti:

- diverse *pendenze del fondo*;
- diverse *profondità dell'acqua*;
- diverse *correnti*.

Le *buche* o *fosse* esplicano in questo caso molteplici compiti. Esse sono spazi vitali preziosi che servono allo smorzamento dell'energia dell'acqua corrente, per cui la protezione spondale viene meno sollecitata. Le buche sono anche dei regolatori del trasporto solido. Nei corsi d'acqua lasciati allo stato naturale, le buche coincidono in larga misura con la zona di curvatura più forte. Per questa ragione la corrente rallenta, in corrispondenza di quei punti, la propria velocità di scorrimento.

I *guadi* (vale a dire, tratti ripidi) o *raschi*, coincidono con i punti del paesaggio fra due curvature di senso contrario. Nel caso di nuovi tracciamenti (regolazioni) va tenuto conto di questo dato di fatto, al fine di evitare di uniformare le condizioni della corrente. Da ciò risulta pure che l'ubicazione di una rampa di fondo, adattata alle condizioni naturali, che riproduce il tratto ripido fra due buche, andrebbe inserita nel punto di inversione fra i due archi di opposta curvatura.

Le differenti larghezze e profondità, in particolare la loro varianza, sono molto significative per i corsi d'acqua come *habitat* per animali. Ugualmente determinante diventa un modellamento molteplice e vario delle sezioni, ai fini di un impiego, quanto più efficiente possibile, delle tipologie di Ingegneria Naturalistica, non solo dal punto di vista del consolidamento tecnico, ma specialmente da quello ecologico.

La scelta di materiali da costruzione inerti e vivi è legata allo stesso tempo alla scelta del tipo di sezione. Nella maggior parte dei casi, gli interventi costruttivi sui corsi d'acqua si sviluppano come combinazione fra lavori di terra e costruzioni idrauliche nel senso più stretto del termine.

L'erosione, la spinta attiva delle terre, la sovrappressione idrica dei pori, la forza di trascinamento, la corrente idrica, la spinta di galleggiamento e la pressione idrica artesiane si sovrappongono in modo particolarmente sfavorevole nell'ambito della linea di passaggio fra il piede e la scarpata del corso d'acqua.

Il piede della scarpata può venire scalzato nel caso di carente consolidamento di quest'area (la scarpata viene in un primo momento scalzata fino al livello di portata media, fino a che l'intera sponda può crollare). Il modellamento

corretto ed il consolidamento sicuro delle zone inferiori della scarpata è perciò una premessa essenziale per ulteriori e ben riusciti interventi di Ingegneria Naturalistica nella zona superiore della sezione. I consolidamenti con materiali da costruzione inerti, devono essere limitati a quei siti o sezioni nei corpi idrici dove l'erosione non può più essere evitata esclusivamente mediante opere biologiche, e cioè quando:

- la spinta e la velocità della corrente idrica superano la resistenza del materiale presente nell'alveo;
- la sollecitazione sulle sponde in erosione diventa eccessiva;
- parti della scarpata devono essere consolidate fino al completo attecchimento delle piante;
- i materiali costruttivi vivi deperiscono a seguito di un forte inquinamento delle acque o per scarsità di precipitazioni;
- in presenza di suoli finemente sabbiosi, limosi, con afflusso di acqua di falda si verifica un innalzamento dell'alveo;
- non si disponga di altro spazio per le sistemazioni con tecniche di Ingegneria Naturalistica.

### 11.12 Pianificazione dei lavori di Ingegneria Naturalistica

Accade di frequente che le tecniche di Ingegneria Naturalistica non vengano previste come primo intervento, ma che si fa ricorso ad essi, solo quando le abituali costruzioni rigide hanno fallito. L'impiego dell'Ingegneria Naturalistica avviene allora in tempi brevi e non è possibile, quindi, procedere metodicamente in modo ben organizzato.

È quindi opportuno interessare già nelle discussioni preliminari, relative a progetti di costruzione che riguardano l'ambiente, degli esperti

di Ingegneria Naturalistica, per chiarire in che modo gli interventi relativi alle costruzioni ingegneristiche classiche possano raccordarsi con quelli dell'ingegneria naturalistica.

La decisione circa la scelta di singoli metodi costruttivi e del materiale da costruzione vivo, necessario allo scopo, può, essere presa solo dopo un'esatta conoscenza delle condizioni locali ed aver completamente chiarito i concetti o i desideri dei committenti relativi al risultato finale.

La *check-list* riportata nella **tabella 11.16** può essere impiegata per decidere quali siano i punti assolutamente necessari nella progettazione e quali possano essere omessi.

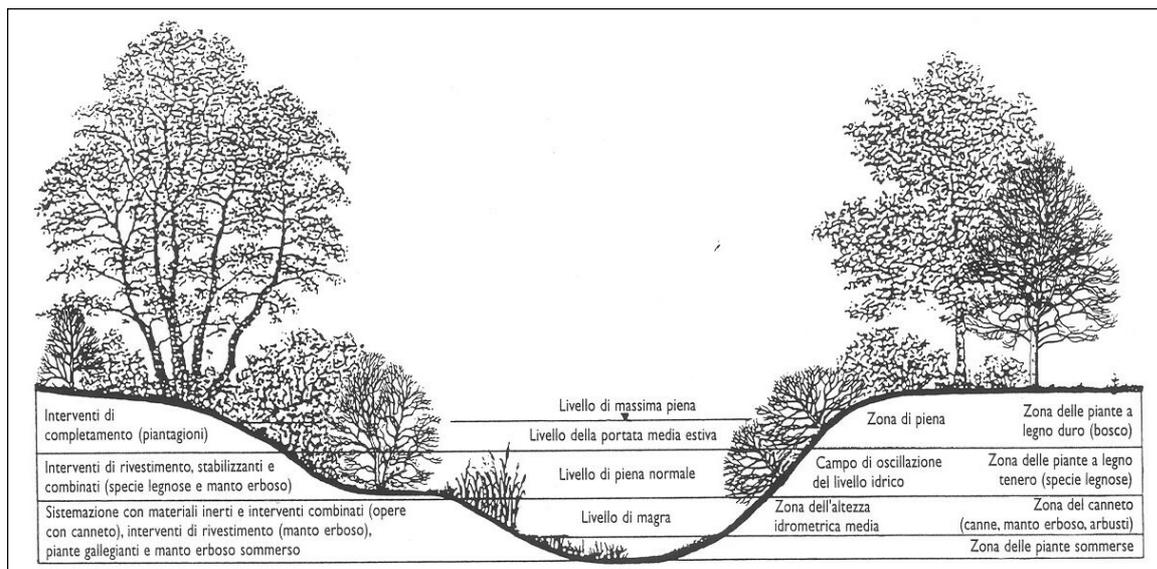
Si tratta dunque soprattutto di effettuare il consolidamento superficiale e profondo ed il reinserimento naturalistico di scarpate e superfici devastate nella realizzazione e gestione di infrastrutture (strade, ferrovie, cave, opere idrauliche, ecc.), in base ad un'esigenza di riqualificazione dell'ambiente ormai universalmente riconosciuta. Sia l'inserimento di materiali costruttivi inerti che vivi, avverrà in primo luogo secondo l'area della sezione e del profilo bagnato che deve essere consolidato. In relazione alla durata della piena ed al superamento o meno di determinati livelli d'acqua, si può dividere la sezione del corpo idrico in zone con differenti profili bagnati. Nel confronto con i rilievi vegetazionali si possono in questo modo stabilire limiti di vegetazione delle scarpate spondali, tipici dei corpi idrici.

Poiché in natura non esistono confini rigidi e regolari, occorre evitare una schematizzazione troppo rigida. Questi limiti vegetativi non sono confini precisi ed essi si presentano con tutti i possibili passaggi e mescolanze e, addirittura, possono essere assenti ove esiste un'unica associazione vegetale che si sviluppa su tutte le zone.

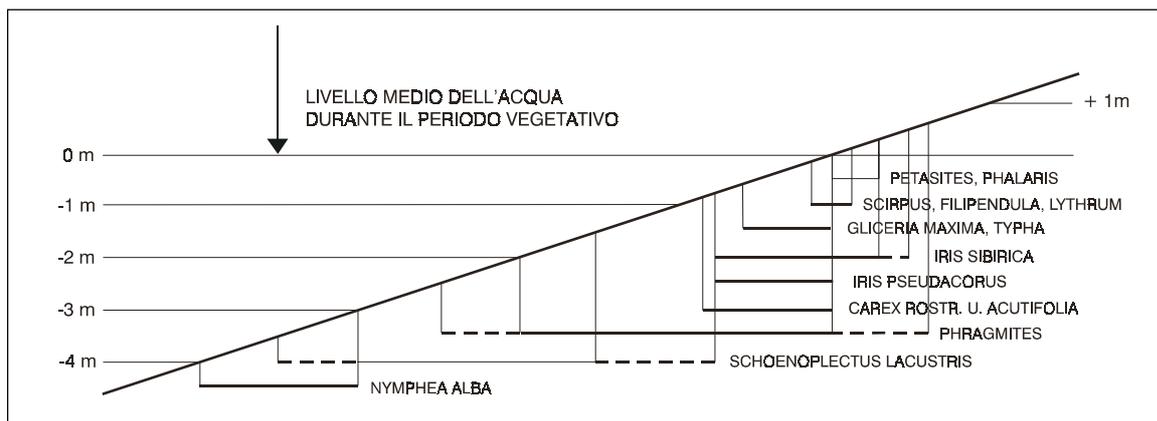
**Tab. 11.16** - Lista delle fasi di progettazione di interventi di Ingegneria Naturalistica

Tipo di indagine
Provvista di carte topografiche, foto aeree, ortofotografie dei progetti.
Esame del progetto generale relativamente al tracciato, alla sezione longitudinale, alla conformazione delle sezioni trasversali e dei dati idraulici.
Studio dei rilievi geologici ed idrologici.
Studio dei rilievi pedologici relativi al substrato dell'alveo e della stabilità della scarpata.
Studio dei dati idrologici.
Studio dei rilievi vegetazionali o cartografici esistenti o loro esecuzione nell'ambito del futuro tratto da sistemare.
Studio dei lavori preliminari relativi all'ecologia dei corpi idrici.
Analisi della causa del danno, nel caso di lavori di risanamento.
Determinazione dell'obiettivo e dello stato finale degli interventi d'Ingegneria Naturalistica.
Scelta dei materiali da costruzione vivi (scelta delle specie) e di quelli inerti.
Scelta delle tipologie costruttive.
Esame degli obblighi legali (proprietà, utilizzo, responsabilità).
Studio del progetto idraulico particolareggiato.
Coordinamento definitivo degli interventi di Ingegneria Naturalistica.

**Fig. 11.28** - Schema per la strutturazione del profilo di un corso d'acqua in zone idrauliche e in zone di vegetazione ed il possibile coordinamento delle tipologie dettata dall'Ingegneria Naturalistica



**Fig. 11.29** - Stazioni adatte per le piante del canneto. Compatibilità con il livello dell'acqua



Fonte: Schiechl, Stern, 1994.

Se confrontiamo le zone interessate dall'oscillazione del livello delle acque con i corrispondenti tipi di vegetazione, otteniamo lo schema illustrato nella **figura 11.28**. Non può esistere un profilo regolare per la distribuzione della vegetazione, poiché il tipo di vegetazione può essere molto diverso, sia in ambito regionale che nelle diverse sezioni dei corpi idrici.

Il coordinamento delle possibili tipologie costruttive di Ingegneria Naturalistica viene quindi esemplificato in questo schema d'orientamento.

Nella zona di magra, quella dei potamogeti, il popolamento con piante adattate alla stazione come, ad esempio, il Potamogeton, il Miriofillo ed il Ranuncolo d'acqua, presenta tuttora grosse difficoltà in quanto non si sono finora potuti risolvere in modo soddisfacente i problemi tecnici e biologici legati alla provvista, all'allevamento, al trasporto ed alla messa a dimora di piante, oltretutto molto sensibili.

Nella zona situata fra il livello di magra e quello medio, quella inferiore di alternanza del livello idrico, l'acqua agisce già in maniera intensa. Poiché qui si può operare con i canneti, tenendo conto delle corrispondenti stazioni, questa zona viene chiamata anche zona del canneto. I getti e le foglie del canneto dividono la corrente, nell'ambito compreso fra la superficie libera dell'acqua ed il terreno spondale e ne smorzano l'energia; la sedimentazione e l'interrimento vengono favoriti dalla corrente rallentata.

Le radici ed i rizomi delle piante del canneto consolidano il terreno. I canneti prediligono stazioni soleggiate e tale fatto può essere considerato già nella progettazione generale, coordinando in tal senso la collocazione delle piantagioni legnose ombreggianti.

La canna palustre (*Phragmites australis*) è la più nota pianta di protezione spondale e, fra quelle del gruppo che compongono il canneto,

anche la migliore sui corsi d'acqua, soprattutto però sui laghi. La canna sopporta notevoli correnti e resiste, come unica specie del canneto, all'urto e al risucchio dell'onda da parte di imbarcazioni (moto ondoso), in quanto è ancorata sopra e sotto l'acqua e nel terreno spondale con un fitto intreccio di rizomi radicati.

In funzione delle condizioni locali legate al livello idrico, della possibilità di procurarsi il materiale vegetale adatto, del periodo di piantagione, del consolidamento spondale, viene impiegata fra l'altro, nel caso di nuovi impianti, la piantagione con pane di terra, con rizomi, con germogli o con culmi; in tal caso la piantagione con culmi risulta essere il metodo più rapido ed economico, ma ha lo svantaggio di un periodo di piantagione relativamente breve (da 4 ÷ 6 settimane da maggio a giugno). Essa può infatti colonizzare aree spondali sott'acqua solo se i culmi non subiscono danni, giacché le radici ricevono sufficiente aria per la respirazione solo attraverso le parti aeree.

Laddove i culmi della canna vengono danneggiati per effetti meccanici, le parti sotterranee soffocano e le giovani piante non sopravvivono.

Si possono usare anche, con diverse caratteristiche (fig. 11.29):

- *Phalaris arundinacea*;
- *Schoenoplectus lacustris*;
- *Typha latifolia*;
- *Cyperaceae* (*Carex*).

Nell'area superiore della zona di alternanza del livello dell'acqua sopra la linea della portata media estiva vengono impiegati, come protezione spondale viva, il manto erboso e gli arbusti, per lo più salici.

Il manto erboso deve la sua importanza, come elemento di protezione spondale, ai seguenti vantaggi:

- il manto erboso non influisce che in misura minima sul deflusso della piena;
- la creazione di un manto erboso chiuso è relativamente semplice quando si osservano le condizioni di crescita e quelle stagionali;
- il manto erboso ha un lungo periodo di vita;
- le spese per creare scarpate ricoperte con manto erboso sono inferiori rispetto ad altri metodi di protezione spondale;
- il manto erboso è di facile manutenzione (lavori colturali);
- le sedimentazioni di materiale galleggiante sono minori rispetto alle sistemazioni eseguite con arbusti e di più facile rimozione.

A questi vantaggi si contrappongono però anche alcuni svantaggi:

- la manutenzione semplice, ma frequente, produce costi elevati;
- l'ambiente fluviale e perifluviale si impoverisce e viene banalizzato;
- la crescita delle piante acquatiche (generalmente eliofile) viene favorita dalla eliminazione dell'ombreggiamento.

Nonostante queste limitazioni il manto erboso

spondale conserverà però la sua posizione dominante nell'area di deflusso della piena, come materiale di protezione per le zone spondali al di sopra della portata media, come anche per i gradoni, le golene e gli argini. La stabilità delle superfici erbose chiuse è straordinariamente elevata. Il manto erboso sopporta per prolungati periodi velocità della corrente di 1,8 m/s, che per brevi periodi possono venir aumentati a 4,5 m/s.

La forza di trascinamento ammissibile è pari a 105 N/m<sup>2</sup> (Linke, 1964).

L'erosione del cotico inizia sempre in corrispondenza dei punti danneggiati del manto erboso, come, per esempio, i cretti di aridità, il passaggio di animali, i franamenti ed il calpestio del bestiame. Con un manto erboso chiuso si forma, al di sotto dei culmi che si rovesciano per le forti velocità della corrente, uno strato di debole corrente che protegge efficacemente il terreno anche nel caso di una modesta altezza dei culmi.

Nella zona di alternanza del livello dell'acqua vengono impiegati di preferenza, nel quadro delle sistemazioni di Ingegneria Naturalistica eseguite con tipologie costruttive stabili e combinate, materiali da costruzione vivi con capacità di ricaccio come, per esempio, i salici arbustivi.

L'effetto del soprassuolo legnoso al di sopra della linea di portata media, si basa sulla riduzione della velocità della corrente in vicinanza della scarpata e sul consolidamento del terreno della zona spondale, attuato dal fitto apparato radicale degli arbusti che arrivano a diverse profondità.

I getti epigei devono rompere come una parete flessibile la forza erosiva dell'acqua e trasformare la parte dannosa dell'energia cinetica dell'acqua, mediante la produzione di turbolenze, in attrito, calore, oscillazione e risonanza. All'atto del passaggio del materiale galleggiante, le piante legnose evitano l'attacco alla scarpata spondale.

Le piante legnose che sporgono oltre il coronamento spondale diminuiscono, all'uscita dell'acqua del profilo nella zona di inondazione, la velocità della corrente proteggendo così il margine superiore della scarpata minacciato. Per giunta, il deposito del materiale galleggiante, del fango e dei rifiuti rimane limitato all'area della fascia dei cespugli e le aree circostanti non vengono deturpate.

Nella zona di alternanza del livello d'acqua dovrebbero venir piantate come piante legnose solo cespugli flessibili, perché le piante legnose rigide e non elastiche ostacolano il deflusso della piena, causano vortici e spostamenti del filone della corrente e sono di frequente la causa di franamenti spondali.

La copertura vegetale di questa zona deve quindi essere oggetto di manutenzione ogni 5-8 anni, mentre il taglio di sgombero andrebbe eseguito a settori, affinché siano sempre presenti sufficienti getti protettivi ed elastici e la forma a cespuglio venga mantenuta.

Per la sistemazione di quest'area spondale sono perciò adatti solo salici a forma di cespuglio. I limiti d'impiego degli arbusti possono essere così schematizzati:

- il corso d'acqua deve essere stabilizzato nel suo alveo, poiché la pianta non può impedire né l'erosione in profondità, né quella laterale al piede della scarpata;
- il tratto di fiume da sistemare deve trovarsi nell'areale delle specie tipiche delle zone spondali adatte per la sistemazione in vivo;
- la sponda non dovrebbe superare la pendenza di 1:3 e solo in casi eccezionali avere una scarpata di 2:3;
- per natura le piante tipiche delle zone spondali scendono fino al livello della portata media estive. Poiché queste hanno bisogno di almeno un periodo di vegetazione, ed anche oltre, per radicare in modo efficace nel terreno, per motivi di sicurezza è opportuno non occupare la scarpata ad una profondità maggiore di quella corrispondente al livello della portata media estiva;
- la forza di trascinarsi deve essere compresa fra i 100 ed i 400 N/m<sup>2</sup> (valori di prima approssimazione).

Le piante spondali sono particolarmente adatte ad essere impiegate nei progetti di sistemazione che si basano sui dettami dell'ingegneria naturalistica per i seguenti motivi:

- fra tutte le piante legnose, sono quelle che crescono più in profondità verso il fondo del letto;
- in particolare, i salici hanno la facoltà di originare radici secondarie, le cosiddette *radici avventizie*, dalla corteccia dei rametti, dei rami o dei fusti recisi, di propagarsi cioè per talee;
- molte di queste specie, ed in particolare i salici, possono essere mantenuti in forma arbustiva mediante un taglio periodico (governo a ceduo) e con ciò rinnovati;
- grazie all'elevata elasticità dei rami e dei fusticini essi stessi sono in grado di resistere a sollecitazioni estreme;
- queste specie possiedono un'elevata vitalità, che si traduce fra l'altro nella loro energia di accrescimento, l'insensibilità ai danni ed il loro potere di rigenerazione.

In particolare per i salici, per un loro proficuo impiego non si possono però trascurare le seguenti proprietà di queste specie legnose (si confronti, al riguardo, il capitolo sulle caratteristiche biotecniche):

- come specie eliofile essi sopportano poco l'aduggiamento. In mescolanza con altre piante legnose esse perdono quindi presto in vitalità. Nelle cure colturali da eseguire alle ripe dei salici piantati sulla sponda, devono essere perciò allontanate le specie legnose concorrenziali, in particolare l'ontano in forma arborea ed altre specie;
- l'apparato radicale dei salici è molto esteso, va però in profondità solo sui terreni sciolti. Essi non sopportano una copertura del ter-

reno da parte dell'erba, in quanto essi hanno molta necessità di ossigeno. La resistenza di un'area inerbita non può quindi venire aumentata successivamente contro l'attacco dell'acqua corrente mediante l'inserimento di talee di salice. L'accrescimento radicale dei salici viene invece favorito dal loro taglio periodico;

- i salici richiedono per il loro attecchimento calore e acqua a sufficienza in aprile e maggio. Le precipitazioni superiori alla media, che in estate possono essere distribuite entro pochi giorni, oppure le piene di breve durata, hanno effetti positivi sul loro sviluppo;
- essi possono rimanere per 8 giorni circa completamente sott'acqua, senza subire dei danni. Essi sopportano una parziale sommersione per alcune settimane, quando cioè alcuni rami o ramoscelli fuoriescono ancora dall'acqua;
- la loro durata di vita arriva a 40 anni circa con uno sviluppo normale del soprassuolo, a oltre 100 anni se manca la concorrenza o se il popolamento viene sempre ceduto;
- le specie di salice si distinguono una dall'altra per la forma di sviluppo, le esigenze stagionali, la loro attitudine per le sistemazioni a verde. L'osservanza della differente attitudine è quindi molto importante ai fini di un attecchimento sicuro, di uno sviluppo futuro e dell'adempimento delle funzioni tecniche ed ecologiche loro assegnate;
- il vantaggio dei salici sta nella loro elevata capacità di resistenza che può essere conservata, impedendo la successione naturale.

Per questa ragione una protezione spondale biologica dovrebbe iniziare per principio quanto più in basso possibile, sotto la linea di portata media, poiché solo in questo modo può essere evitata l'erosione (scalzamento) che innesca i franamenti delle scarpate nell'area del piede della scarpata.

Una protezione spondale, predisposta solo per il consolidamento degli ambiti posti al di sopra della linea di portata media, perde il suo effetto.

Nelle **tabelle 11.17-11.21** sono elencate le specie vegetali utilizzate per la sistemazione delle rive dei corsi d'acqua.

### 11.13 Corsi d'acqua in ambito provinciale

Per "corso d'acqua caratterizzato da dissesto" si intende generalmente l'azione di erosione lineare, spondale e/o di fondo determinata dalla dinamica fluviale, che può determinare il movimento, più o meno repentino, di porzioni, più o meno grandi, dell'argine o pendio prossimale alla sponda; il vertice di valle della superficie su cui si verifica il movimento è localizzata in prossimità dell'alveo.

I movimenti franosi che interessano il pendio a monte della sponda possono essere ricondotti alle casistiche di cui al paragrafo precedente, soprattutto per i fattori predisponenti mentre

Tab. 11.17 - Simboli delle tabelle

Simbolo	Significato	Simbolo	Significato
<b>Possibilità di riproduzione vegetativa</b>		<b>Contenuto dei nutrienti e carbonati</b>	
f	Forte	nu'	Povero di nutrimenti
m	Media	nu	Ricco di nutrimenti
-	Nulla	b'	Povero di basi
<b>Tipo di suolo</b>		b	Ricco di basi
P	Pietre, detriti rocciosi	c'	Povero di carbonati
G	Ghiaia, ciottoli	c	Con carbonati
S	Sabbia	c	Ricco di carbonati
L	Limo	<b>Movimenti delle acque</b>	
F	Fango	st	Acque stagnanti
A	Argilla	lf	Acque lentamente fluenti
T	Torba	fl	Acque fluenti
p	Pietroso sempre in associazione con	<b>Modalità di utilizzazione dei vegetali</b>	
h	Umoso S,L,F o A	Se	Semi
<b>Grado di umidità ecologico</b>		Fr	Frutti
I	Per lo più acque aperte	Ri	Rizomi e stoloni
II	Bagnato	Ge	Germogli verticali
III	Umido	Ca	Canne
IV	Moderatamente secco e alternativamente umido	Pi	Piante senza zolla

Tab. 11.18 - Canne e piante erbacee per la sistemazione delle rive di corpi d'acqua nella zona interessata dal livello medio delle acque (DIN 19657)

	Altezza di crescita (m)	Ambito di applicazione		Grado di umidità ecologico e contenuto di nutrienti	Movimenti delle acque	Modalità di utilizzazione	Osservazioni
		Profondità max acqua (m)	Tipo di suolo				
<i>Fragmites communis</i>	3	1,5	da hS a hA, T	I, li, anche ts, nu, b	st, lf	P, R,, Ge, Ca	Piantagione Ca particolarmente conveniente
<i>Phalaris arundinacea</i>	1,5	0,3	da G ad A	I, II, anche ts, nu', b	fl	P, P, R,, Ze, Se	Acque ricche di ossigeno
<i>Glyceria maxima</i>	1,5	0,3	da hS a hA	I-III, anche ts, nu, b	st, lf	P, R,	Sopporta oscillazioni di livello
<i>Aroca calamus</i>	1,2	0,3	da hS a hA	I, II, anche ts, nu	st, lf	R,	Sopporta acque inquinate
<i>Carex gracilis</i>	1,2	0,3	da L ad A	I, II, anche ts, nu, b	st, lf	P,, Pz	Località in parte paludose
<i>Schoenoplectus (Scirpus) lacustris</i>	3	0,5-2	da hS a hA	I, anche ts, nu	st, lf	R,, Pz	Sopporta anche acque fenoliche
<i>Filipendula ulmaria</i>	1,5	0,2	da L ad A, T	11-1V, raro ts, nu	st, fl	P,, Pz	--
<i>Iris pseudacorus</i>	1	0,3	da S a A	I-III, anche ts, nu	st, lf	P,, R,	Necessari suoli umosi
<i>Typha laifolia e Typha angustifolia</i>	2,5	1	hS	I, li, nu'	st, lf	Pz, R,	In prevalenza zone di sedimentazione aperte
<i>Carex riparia e Carex acutiformis</i>	1,5	0,5	hA, T	I, II, anche ts, nu, b	st, lf	P,, Pz	-
<i>Petasites hybridus</i>	1	0,2	pA, A	I II, anche ts, nu	fl	P, R,	Corpi d'acqua freschi
<i>Bolboschoenus (Scirpus) maritimus</i>	1,2	0,5-1,5	A	I, anche ts, n, b	st, lf	R,, P,	-
<i>Schoenoplectus (Scirpus) tabernaemontani</i>	1,5	0,5-1,5	A	I, anche ts, nu, b	st, lf	R,, P,	-

Nota: per il significato dei simboli si veda la tabella 11.17.

Fonte: M. Di Fidio, *Capitolato speciale d'appalto per opere di costruzione del Paesaggio*, 1970.

Tab. 11.19 - Piante erbacee per la sistemazione a prato delle rive di corsi d'acqua (DIN 19657)

Ambito d'applicazione	Specie erbacee																Quantità totale di semi per miscela (kg/ha)					
	Agrostis stolonifera (17.000)	Poa trivialis (5.500)	Poa palustris (5.500)	Phleum pratense (2.000)	Agrostis gigantea (11.000)	Agrostis canina (20.000)	Poa pratensis (3.300)	Festuca rubra commutata (1.000)	Festuca rubra eurubra (1.000)	Agrostis tenuis (16.000)	Festuca pallens (1.700)	Festuca trachylla (2.000)	Festuca tenuifolia (2.500)	Corynephorus canescens (10.000)	Brachypodium pinnatum (220)	Bromus erectus (220)		Lotus uliginosus (1.400)	Lotus corniculatus (970)	Antyllis vulneraria (400)	Medicago lupulina (560)	
Nella zona delle escursioni medio-bassa; su suoli sabbio-limo-argillosi da freschi ad umidi	10	20	20	10	10																70	
Nella zona delle escursioni medio-alta; su suoli limo-argillosi asciutti di media profondità						20	15	25	10									10				80
Nella zona delle escursioni medio-alta; su suoli sabbiosi da freschi ad umidi					2	10	10	20	8													60
Sopra la zona delle escursioni per scarpe, su suoli sabbiosi e petrosi acidi asciutti e freschi							10	5	15	5	30	20										85
Sopra la zona delle escursioni per scarpe, su suoli petrosi calcarei, asciutti con profondità da piccola a media																						230
Sopra la zona delle escursioni per scarpe, su suoli sabbiosi molto leggeri, asciutti poveri di humus											50	40	20		60	100		5	15	15		110

Nota: per il significato dei simboli si veda la tabella 11.17

Fonte: M. Di Fidio, *Capitolato speciale d'appalto per opere di costruzione del Paesaggio*, 1970.

Tab. 11.20 - Talee utilizzate per la sistemazione delle rive dei corsi d'acqua (DIN 19657)

Specie	Altezza di crescita (m)	Ambito di applicazione			Osservazioni
		Tipi di suolo	Grado di umidità	Nutrienti e carbonati	
<i>Salix purpurea</i>	2-3, rar. fino a 10	da G ad A	da II a VII, anche ts	da nu a nu', da c ad a'	Resistente alla siccità, anche su suoli grezzi, consolidante
<i>Salix triandra</i>	2-4, rar. fino a 10	da S ad A	II, III, anche ts	nu, b, da c ad a	Consolidante
<i>Salix viminalis</i>	3-5	G, S, L	II, III, anche ts	nu, b, da c ad a'	Anche su suoli grezzi
<i>Salix fragilis</i>	8-20	da G ad F, anche h	da III a V, anche ts	nu, b, da c' ad a'	Anche su suoli con cattiva areazione e su suoli grezzi
<i>Salix alba</i>	10-30	da G ad A	da III a V, anche ts	nu, b, da c ad a'	Su suoli grezzi ben aerati e su suoli grezzi
<i>Salix elaeagnos</i>	2-6	da G ad A	da V a VII, anche ts	nu', b, c	Colonizzatore, anche su pendii marnosi instabili, consolidante
<i>Salix nigricans</i>	fino a 4	da G ad A, anche h	da II a IV anche ts	nu, b, c	Soprattutto per suoli calcarei freschi e umidi
<i>Salix pentandra</i>	2-5, rar. fino a 15	A, T, anche h	II, III	nu, b, da c' ad a'	-
<i>Salix daphnoides</i>	5-10	da G ad A	da II a V, anche ts	da nu' a nu, b, c, n	Su suoli grezzi, consolidante
<i>Salix appendiculata</i>	1-3, rar. fino a 8	pL, L, pA, A	da III a V	nu, b, c, n	In gole e solchi di slavine
<i>Salix hastata</i>	fino a 1,5	hP, hL	da III a V	nu, b, c'	-
<i>Salix glabra</i>	fino a 2	P, L	III	da nu' a nu, c	Anche su detriti dolomitici
<i>Salix waldesteiniana</i>	fino a 1	hL, hA	II, V	da nu' a nu, b, da c a c'	Su suoli ben aerati
<i>Populus spec.</i>	-	-	-	-	Si veda tabella 11.21

Nota: per il significato dei simboli si veda la tabella 11.17

Tab. 11.21 - Specie arboree utilizzate per la sistemazione delle rive dei corsi d'acqua (DIN 19657)

Specie arboree	Quota* (m)	Ambito di applicazione			Possibilità di riproduzione vegetativa	Osservazioni
		Tipi di suolo	Grado di umidità	Nutrienti e carbonati		
<i>Alnus glutinosa</i>	0,3	da hG a hA, T	da II a IV, in parte ts	nu, da c' ad a	f	Con radici profonde e superficiali, consolidate
<i>Betula pubescens</i>	0,3	hS, T	II, III	b', a', a	-	-
<i>Alnus incana</i>	0,5	G, S, A	V, ts	da nu, a nu', b, c	f	Con stoloni, consolidante
<i>Salix Spec.</i>	-	-	-	-	-	Si veda tabella 11.20
<i>Prunus padus</i>	0,5	da hG a hA	da III a V, anche ts	nu', da c a c'	m	-
<i>Fraxinus excelsior</i>	0,5	pL, L, pA, A	da II a IV	nu, b, da c a c'	m	Diverse sottospecie locali
<i>Populus nigra</i>	0,7	S, L	da III a V, anche ts	nu, b	f	Con radici superficiali
<i>Populus euramericana</i>	0,7	S, L	da III a V, anche ts	nu, c	f	Non adatto per stazioni con umidità stagnante
<i>Populus alba e P. canescens</i>	0,8	da G ad A	IV, V	nu, b, c	f	Con radici superficiali
<i>Quercus robur</i>	1,0	pL o hL, pA o hA	da IV a VI	b, b', c	m	Con radici profonde, tollera la sommersione per parecchi giorni

(segue)

segue tab. 11.21 - Specie arboree utilizzate per la sistemazione delle rive dei corsi d'acqua (DIN 19657)

Specie arboree	Quota* (m)	Ambito di applicazione			Possibilità di riproduzione vegetativa	Osservazioni
		Tipi di suolo	Grado di umidità	Nutrienti e carbonati		
<i>Ulmus minor</i>	1,0	da S a A, anche p o h	da III a V, anche ts	nu, b, c	m	Con radici profonde e superficiali, amante del calore
<i>Carpinus betulus</i>	1,0	hS, hL	da V a VII	nu, da c' a c	f	Con radici profonde
<i>Acer pseudo-platanus</i>	1,5	P, pL	V, VI	nu, b, da c' a c	m	Consolidante
<i>Tilia cordata</i>	1,5	pL, L, A	IV, V	b, c'	m	Con radici profonde e superficiali, consolidante
<i>Prunus avium</i>	1,5	pL, L	IV, V	nu, b	m	-
<i>Sorbus aucuparia</i>	1,5	P, pL, L, T	da III a VI	nu', b', da c ad a	m	Adatto per suoli grezzi, sopporta la neve
<i>Ulmus glabra</i>	1,5	pL, pA	IV, V	nu, da c a c'	m	Con radici profonde, tollera anche stazioni fresche
<i>Betula pendula</i>	1,5	p, S, L	da III a VII	nu', a', n	m	Consolidante
<i>Populus tremula</i>	-	da P a A	V, VI	nu, b, c, c'	f	Consolidante, anche per suoli grezzi
<i>Pinus sylvestris</i>	-	S, pL, T	VI, VII	da c ad a	-	-

Nota: per il significato dei simboli si veda la tabella 11.17.

Fonte: M. Di Fidio, *Capitolato speciale d'appalto per opere di costruzione del Paesaggio*, 1970.

per quelli scatenanti è da notare come l'erosione al piede e lo scalzamento siano, in questo caso, l'elemento principale.

Va precisato che i fenomeni erosivi e quelli di depositi sono parte della dinamica fluviale e determinano, giorno per giorno e localmente, il rimodellamento del *talweg* del corso d'acqua in relazione al modificarsi dell'assetto energetico di quel tratto di corso d'acqua.

Nella casistica dei dissesti che possono interessare i corsi d'acqua, oltre alle erosioni di fondo e di sponda, va tenuto conto che tali fenomeni possono determinare il dissesto degli argini e/o delle eventuali opere idrauliche in alveo; inoltre, la dinamica fluviale può causare l'innalzamento del fondo dell'alveo e/o il restringimento della sezione trasversale determinando le condizioni per l'esondazione dall'alveo e l'inondazione delle aree limitrofe.

Oltre ai dissesti di cui sopra, va considerato che il corso d'acqua è inteso come un sistema fluviale che costituisce con l'acqua, le sponde e le rive un variegato insieme di *habitat* per l'elevato numero di organismi viventi pertanto la distruzione delle sponde o l'alterazione dell'alveo naturale, sia a causa del fiume stesso che dell'azione dell'uomo, determina un impoverimento dell'ambiente naturale fluviale, con la conseguente tendenza all'uniformità ed alla banalizzazione del territorio.

La diversificazione dei microambienti è infatti il presupposto fondamentale per una ricca presenza di specie animali e vegetali, acque più o meno profonde, rami e ceppaie affioranti o som-

mersi, vegetazione acquatica, fondo a diversa granulometria, creano le condizioni ottimali per l'alimentazione, il rifugio e la riproduzione delle diverse specie.

I fenomeni naturali legati all'acqua, come le precipitazioni, le infiltrazioni, le percolazioni ed il ruscellamento, agiscono in modo complesso, sia a causa della variabilità dei fattori climatici che li regolano, sia per la natura dei terreni; inoltre, la dinamica fluviale con i suoi meccanismi di erosione e deposito è un equilibrio continuo, tra energia di cui è dotata l'acqua ed il materiale trasportato. L'erosione ed il trasporto di materiale, dipende principalmente dalle caratteristiche del corso d'acqua quali la portata idrologica, la geometria (distanza, pendenza ed altezza) delle sponde, la pendenza longitudinale dell'alveo e le caratteristiche geomeccaniche e granulometria del materiale di fondo e laterale dell'alveo. Al contrario, si possono verificare anche perdite di energia cinetica, che corrispondono a relativi processi di sedimentazione del materiale nell'alveo; le perdite lineari di energia sono, infatti, quelle che si producono per attrito lungo il contorno del corso d'acqua e, si possono indicare con la seguente espressione:

$$L * \frac{(J_1 + J_2)}{2}$$

con:

L = lunghezza del tratto esaminato;  
J = pendenza idraulica.

In relazione a rapporti complessi tra i sopracitati parametri si possono verificare, quindi, le diverse forme di trasporto:

- *solido (trascinamento, rotolìo e salto o reptazione)*, caratterizzato da movimento di particelle solide (blocchi o ciottoli di varia dimensione) a seguito di piene eccezionali o di variazioni di portata repentine (regime torrentizio) con spostamento sul fondo per brevi distanze e talora (reptazione) a balzi successivi (da qualche centimetro a parecchi metri) in funzione della dimensione;
- *in sospensione*, caratterizzato da movimento di particelle fini originate dalla disgregazione di argille, limi e sabbie, trasportate dall'acqua in sospensione;
- *in soluzione*, caratterizzato da "sali" risultato della dissoluzione chimica dei materiali litoidi con cui l'acqua è venuta a contatto.

Tutti i corsi d'acqua assolvono alla funzione di trasporto dei materiali provenienti dal bacino imbrifero e, di conseguenza, ogni intervento eseguito nel loro alveo avrà un'influenza sia sul deflusso idrico sia sul trasporto solido a valle. Nel territorio provinciale è possibile, in base a quanto descritto nei paragrafi precedenti, definire alcune situazioni geologiche e geomorfologiche "tipo" relativamente all'ambito di corso d'acqua, nelle quali l'utilizzo di tecniche di ingegneria naturalistica permette di:

- ottenere una forte riduzione dell'azione erosiva spondale favorendo la stabilità del pendio a monte;
- difendere o ripristinare la sponda favorendo il corretto deflusso delle acque e nel contempo la ricostituzione della vegetazione ripariale e dell'*habitat* naturale del corso d'acqua;
- intervenire con modificazioni della dinamica fluviale di limitato impatto ambientale, atte ad evitare problematiche locali di erosione o deposito che alterino l'alveo naturale;
- ripristinare le opere idrauliche esistenti o realizzarne di nuove di limitato impatto ambientale;

Alcune situazioni-tipo, possono essere schematicamente riassunte nei casi di seguito descritti.

- *Corso d'acqua caratterizzato da erosioni di fondo o di sponda che può comportare dissesto degli argini o del pendio.*

È una condizione in cui possono venirsi a trovare molti corsi d'acqua, di varia importanza e regime, per quanto riguarda l'erosione di fondo e spondale può interessare i tratti di alveo compresi nelle parti medio-alte del bacino dove le pendenze medie longitudinali e quindi le velocità di deflusso sono elevate, l'erosione spondale può anche interessare gli argini di corsi d'acqua di una certa portata nel loro tratto compreso nella parte medio-bassa del bacino in aree pianeggianti soprattutto se presenta un andamento curvo o meandriforme.

I terreni costituenti il *talweg* del corso d'acqua possono essere di qualsiasi natura e

granulometria, anche se nelle aree pianeggianti prevalgono i depositi elastici più o meno grossolani rappresentanti depositi alluvionali relativi a eventi precedenti del corso d'acqua stesso; le caratteristiche geomecchaniche dei litotipi presenti ovviamente influenzano in maniera determinante il comportamento del fondo e della sponda all'azione erosiva. Il dissesto è spesso dovuto ad uno scivolamento dei terreni costituenti la sponda con l'asportazione del materiale franato da parte del fiume e quindi un arretramento progressivo dell'argine; ove la morfologia lo permetta, l'elisione dell'argine può provocare, soprattutto in caso di piene, la fuoriuscita dall'alveo del corso d'acqua con conseguente allagamento delle aree limitrofe e talora la creazione di un nuovo alveo di scorrimento.

Il fenomeno erosivo nel caso di una sezione trasversale a "V" con un pendio incipiente sulla sponda può causare un'erosione al piede del versante ed un conseguente innesco di una situazione di instabilità del versante che nel caso di volumi rilevanti di materiale franato può determinare una parziale o totale occlusione del corso d'acqua con la deviazione del percorso o la formazione di bacini di accumulo.

I fattori che determinano il dissesto, possono essere ricercati, nella non regimentazione del corso d'acqua che può essere stato alterato nella sua dinamica da interventi di alterazione dell'alveo (cave, discariche, opere idrauliche non corrette, ecc.) nel suo tratto di monte, lo stato di degrado o di denudamento o riporto delle sponde, l'antropizzazione a ridosso dell'alveo.

- *Corso d'acqua caratterizzato da deposito che può comportare l'innalzamento del fondo dell'alveo ed il restringimento della sezione di deflusso.*

È una condizione in cui possono venirsi a trovare molti corsi d'acqua, di varia importanza, soprattutto nei tratti ubicati sia in aree pianeggianti di fondovalle che in prossimità di variazioni più o meno repentine della pendenza longitudinale del corso d'acqua; infatti riguarda condizioni idrauliche di perdita di velocità con conseguente deposizione del materiale solido, di varia natura e dimensione, trasportato dalle acque con le modalità già descritte.

Il deposito può interessare, in relazione alla dinamica fluviale locale, gli argini di corsi d'acqua di una certa portata nel loro tratto compreso in aree pianeggianti, soprattutto se presenta un andamento curvo o meandriforme, ma anche il fondo, soprattutto nei tratti medio-alti del bacino e nei tratti con cambi di pendenza.

I terreni depositati possono essere di qualsiasi natura e granulometria, anche se nelle aree pianeggianti di monte prevalgono i depositi elastici più o meno grossolani mentre nelle aree prossimali alla foce prevalgono sedimenti fini.

Il dissesto è spesso dovuto alla tendenza al colmamento dell'alveo che, determinando un abbassamento degli argini, può provocare una sempre maggiore tendenza all'esonazione con lo svilupparsi di tratti di alveo alternativi a quello originario o, in caso di parziale o totale occlusione del corso d'acqua, la formazione di bacini di accumulo; il restringimento della sezione di deflusso può inoltre provocare fenomeni di rigurgito delle acque a monte.

Va inoltre ricordato che in tali tratti è bene che il corso d'acqua mantenga il suo spazio golenale naturale che gli permette di spaziare lateralmente riducendo la pericolosità delle eventuali esondazioni e delle modificazioni di percorso. I fattori che determinano tale situazione, possono essere ricercati, nella non regimizzazione del corso d'acqua che può essere stato alterato nella sua dinamica da interventi di alterazione dell'alveo (cave, discariche, opere idrauliche non corrette, ecc.) nel suo tratto di monte, lo stato di degrado o di denudamento o riporto delle sponde.

- *Corso d'acqua caratterizzato da dissesto delle opere idrauliche in alveo e non.*

È la condizione in cui possono venirsi a trovare molti corsi d'acqua, di varia importanza e regime, in particolare nei tratti montani dove sono elevate la pendenza longitudinale e l'energia in gioco e spesso sono state realizzate opere idrauliche, soprattutto trasversali quali briglie, traverse e soglie, al fine di attenuare le azioni erosive. Talora la scarsa manutenzione effettuata a distanza di anni su tali opere ha avuto come effetto il malfunzionamento e, quindi, l'annullamento dell'effetto benefico, oppure l'energia del corso d'acqua, in un momento di piena ne ha determinato lo scalcamento e danneggiamento dell'opera od il suo bypassamento. È bene ricordare che le opere idrauliche trasversali tradizionali costituiscono spesso un ostacolo insormontabile per la fauna ittica e pertanto suddividono il corso d'acqua in tratti ecosistemicamente isolati tra loro; può essere utile ricercare soluzioni compatibili quali, ad esempio, le rampe di risalita o progettare gli interventi tenendo conto delle esigenze di salvaguardia ambientale. La condizione di dissesto delle opere in alveo si verifica inoltre, molto frequentemente, nei tratti medio-bassi del corso d'acqua (aree a bassa acclività o pianeggianti) con una elevata urbanizzazione anche a ridosso dell'alveo, dove spesso le opere sono state realizzate non assecondando la dinamica fluviale ma costringendo il corso d'acqua in un alveo spesso insufficiente che in condizioni di piena può dissestare gli argini ed i rivestimenti spondali o rigurgitare in corrispondenza di tombamenti od attraversamenti insufficienti. Va inoltre ricordato che l'uso indiscriminato di cementificazione delle sponde con la distruzione della vegetazione ripariale determina una distruzione dell'*habitat* naturale della sponda fluviale con un impoverimento

vegetazionale e della fauna ittica, favorendo nel contempo l'aumento della velocità di deflusso delle acque a scapito delle zone di valle.

## Bibliografia



- AA.VV., 1993  
*Manuale tecnico di Ingegneria Naturalistica*, Regione Emilia Romagna - Assessorato all'ambiente, Regione Veneto - Assessorato Agricoltura e Foreste, Bologna.
- AA.VV., 1994  
*Corso di formazione professionale in Ingegneria Naturalistica*, atti, Regione Veneto, Belluno.
- AA.VV., 2000a  
*Principi e linee guida per l'Ingegneria Naturalistica. Vol. 1: Processi territoriali e criteri metodologici*, Collana "Fiumi e Territorio".
- AA.VV., 2000b  
*Principi e linee guida per l'Ingegneria Naturalistica. Vol. 1: Processi territoriali e criteri metodologici*, Regione Toscana - Giunta regionale, Dipartimento Politiche Territoriali e Ambientali, Firenze.
- Abbe T.B., Montgomery D.R., 1996  
*Large woody debris, channel hydraulics and habitat formation in large rivers*, Regulated Rivers: Research & Management.
- Agarwal V.C., 1983  
*Studies on the characteristics of meandering streams*, Ph. D. thesis, UOR.
- Autorità di Bacino Interregionale del Fiume Magra, 2001  
*Indicazioni per la progettazione ambientale dei lavori fluviali. Piano Assetto Idrogeologico. Allegato 3.*
- Biddle P.G., 1983  
*Patterns of soil drying and moisture deficit in the vicinity of trees on clay soils*, Geotechnique.
- Brown C.B., Sheu M.S., 1975  
*Effects of deforestation on slopes*, in "J. Geotech. Eng. Div.", ASCE, 101 (GT2).
- Calò P., 2001  
*Le rampe a blocchi e le rampe di risalita per i pesci*, inedito.
- Calò P., Palmeri F., 1996  
*Influenza della vegetazione sul deflusso: analisi comparata di diverse esperienze, coefficiente di scabrezza, manutenzioni*, in *Sistemazioni idrauliche con metodi naturalistici: un programma di calcolo*, a cura di AIPIN Nazionale, atti del convegno, Bologna.
- Carson M.A., Kirby M.J., 1972  
*Hillslope form and process*, Cambridge University Press, Cambridge.
- Chang H.H., 1980  
*Stable alluvial canal design*, in ASCE, JHD, 106, HY5.

- Endo T., Suruta T., 1969  
*On the effect of tree's roots, upon the shearing strenght of soil*, annual report of the Hokkaido Branch Forest Experiment Station, Sapporo.
- Ferri M., 1988  
*Passaggi per pesci negli sbarramenti fluviali: aspetti tecnici e politici del grave ritardo accumulato in Italia*, in "Bollettino del Museo di Storia Naturale della Lunigiana", Aulla.
- Fredlund D.G., Morgenstern N.R., Widger R.A., 1978  
*The shear strength of unsaturated soils*, in "Can.Geotech. J.", 1978.
- Gray D.H., Ohashi H., 1983  
*Mechanics of fiber reinforcement in sand*, in "J.Geotech. Eng.Div.", ASCE.
- Gray D.H., Leiser A.J., 1982  
*Biotechnical slope protection and erosion control*, Van Nostrand Reinhold, New York.
- Gray D.H., Megahan W.F., 1981  
*Forest vegetation removal and slope stability in the Idaho Batholith*, Research Paper INT-271, Intermountain Forest and Range Experiment Station, Ogden, Utah.
- Gray D.H., 1978  
*Role of woody vegetation in reinforcing soils and stabilising slopes*, in "Proc.Symp.Soil Reinforcing and Stabilising Techniques", Sydney.
- Greenway D.R., 1987  
*Vegetation and slope, stability*, in M.G. Anderson, K.S.Richards (eds.), *Slope Stability*, John Wiley & Sons.
- Gregory K.J., Davis R.J., Tooth S., 1993  
*Spatial distribution of coarse woody debris dams in the Lymington basin*, Hampshire, U.K. Geomorphology.
- Hsi G., Nath J.H., 1970  
*Win drag within a simulated forest*, in "J.Appl.Meteorol".
- Hupp C.R., 1990  
*Vegetation patterns in relation to basin hydrogeomorphology*, in J.B. Thorne (ed.), *Vegetation and Erosion*, John Wiley & Sons.
- Hupp C.R., Osterkamp W.R., 1996  
*Riparian vegetation and fluvial geomorphic processes*, in "Geomorphology".
- Kirby M.J., Morgan R.P.C., 1980  
*Soil Erosion*, Wiley-Interscience, London - New York.
- Lawler D.M., Thorne C.R., Hooke J.M., 1997  
*Bank erosion and instability*, in C.R Thorne, R.D. Hey, M.D. Newson (eds.), *Applied Fluvial Geomorphology for River Engineering and Management*.
- Leopold L.B., Wolman M.G., 1957  
*River channel pattern: braided, meandering and straight*, in "US Geol. Surv.", professional paper.
- Linke H., 1964  
*Rasenmatten - ein Baustoff zur Ufersicherung*, in "Wasserwirtschaft - Wassertechnik", 9, Berlino.
- Nassif S.H., Wilson E.M., 1975  
*The influence of slope and rain intensity on runoff and infiltration*, in "Hydrol. Sci. Bull.", 20(4).
- Martino N., 1991  
*Tutela e gestione degli ambienti fluviali*, serie "Atti e Studi", n. 8, WWF Italia.
- O'Loughlin C.L., 1974  
*A study of tree root strength deterioration following clear felling*, in "Can. J. Forest Res.".
- Piegay H., Thévenet A., Citterio A., 1999  
*Input, storage and distribution of large woody debris along a mountain river continuum*, The Drome River.
- Pirrone G., 1998  
*Effetti della vegetazione in alveo e applicazione per lo studio della stabilità delle sponde*, tesi di laurea inedita in Ingegneria per l'Ambiente ed il Territorio, Università degli Studi di Firenze.
- Richards B.G., Peter B., Emerson W.W., 1983  
*The effects of vegetation on the swelling and shrinking of soils in Australia*, in "Geotechnique".
- Rinaldi M., 1998  
*Instabilità di alvei e di sponde fluviali*, in *Sperimentazione di interventi di Ingegneria Naturalistica per sistemazioni idraulico-forestali e monitoraggio a scala di bacino*, Progetto IFNAT (responsabile I.Becchi), CIR Ambiente - Regione Toscana - PIN Centro Studi Ingegneria.
- Rinaldi M. Casagli N., 1999  
*Stability of streambanks formed in partially salurated soils and effects of negative pore water pressures: the Sieve River (Italy)*.
- Sauli G., Cornelini P., Preti F., 2002  
*Manuale di Ingegneria Naturalistica applicabile al settore idraulico nella Regione Lazio*, Regione Lazio, Roma.
- Schiechl H.M., 1973  
*Sicherungsarbeiten im Landschaftsbau*, Verlag G.D.W., Callwey, Munchen.
- Schiechl H.M., Stern R., 1994  
*Ingegneria Naturalistica. Manuale delle costruzioni idrauliche*, Edizioni Arca.
- Selby M.J., 1982  
*Hillslope materials and processes*, Oxford University Press, Oxford.
- Simon A., Hupp C.R., 1987  
*Geomorphic and vegetative recovery processes along modified Tennessee streams: an interdisciplinary approach to disturbed fluvial systems*, International Association of Scientific Hydrology, special publication n.167.

- Sansoni G., 1999  
*Ingegneria Naturalistica fluviale: strumento per la gestione idraulico-naturalistica del territorio o cosmesi ambientale?*, in atti seminario di studio "I biologi e l'ambiente, oltre il 2000", Venezia.
- Thorne C.R., 1982  
*Processes and mechanisms of river bank erosion*, in R.D. Hey, J.C. Bathurst, C.R. Thorne (eds.), *Gravel-bed Rivers*, Wiley, Chichester.
- Thorne C.R., 1990  
*Effects of vegetation on riverbank erosion and stability*, in J.B. Thornes (ed.), *Vegetation and Erosion*, Wiley.
- Thorne C.R., 1998  
*Stream reconnaissance handbook. Geomorphological investigation and analysis of river channels*, Wiley, Chichester.
- Thorne C.R., Reed S., Doornkamp J.C., 1996  
*A procedure for assessing river bank erosion problems and solutions*, National Rivers Authority, R&D report 28.
- Virgilio A., s.d.  
*Il rispetto delle caratteristiche idrologiche dei corsi d'acqua*, in Regione Liguria - Assessorato Edilizia, Energia e Difesa del Suolo, *Opere d'Ingegneria Naturalistica e recupero ambientale*, Genova.
- Waldron L.J., 1997  
*The shear resistance of root permeated homogeneous and stratified soil*, in "Soil Sci. Soc. Am. J.", n. 41.
- White W.R., Bettess R., Paris E., 1981  
*Tables for design stable channels*, report n. IT 201, Hydraulics Research Station, Wallingford.
- White W.R., Bettess R., Paris E., 1982  
*Analytical approach to river regime*, in "ASCE, JHD".
- Woolhiser D.A., Lenz T., 1965  
*Channel gradient above gully-control structures*, in "Journal of the Hydraulics Division - Proceeding of A.S.C.E.", n. 3.
- Wu T.H., 1976  
*Investigation of landslides on Prince of Wales Island*, Geotechnical Engineering Report 5, Ohio State University - Civil Engineering Department, Columbus, Ohio.
- Wu T.H., Mckinnel W.P., Swanston D.N., 1979  
*Strength of tree roots and landslides on Prince of Wales Island, Alaska*, in "Can. Geotech. J."
- Yang C.T., 1976  
*Minimum unit stream power and fluvial hydraulics*, "ASCE JHD", n. 102, HY7.
-