



**UNIVERSITA'  
DEL SALENTO**

# **COSTRUZIONI IDRAULICHE**



**LEZIONE 16. Idraulica fluviale**

Felice D'Alessandro



## Le sistemazioni idrauliche

Con il termine “Sistemazioni Idrauliche” si intendono tutte le attività e gli interventi nei corsi d’acqua volte a modificare il regime di moto dell’acqua al fine di:

- ridurre i fenomeni di erosione in alveo e nei versanti;
- ridurre la probabilità del verificarsi di esondazioni;
- modificare il regime del trasporto solido.

In generale occorre distinguere tra:

- sistemazione del tratto montano (torrenti);
- sistemazione del tratto medio-vallivo.

Nel primo caso, gli interventi sono prevalentemente orientati a ridurre i fenomeni di erosione, e più in generale, a ridurre gli effetti nocivi legati al trasporto dei sedimenti.

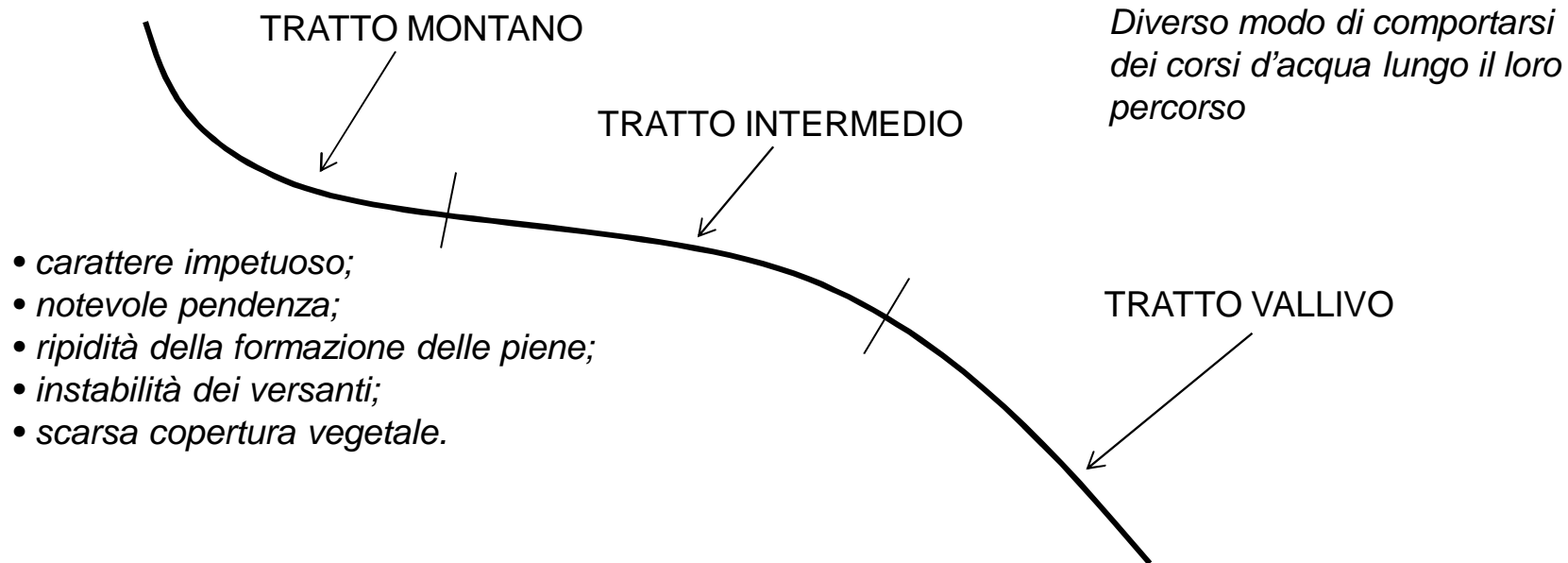
Nel secondo caso, gli interventi sono prevalentemente orientati a ridurre il rischio di esondazione, attraverso la realizzazione di manufatti come ad esempio arginature, casse di espansione, risagomatura degli alvei, ecc.





## La sistemazione dei torrenti

La sistemazione di un torrente si propone di dare un assetto stabile alla sua asta.



I torrenti rappresentano con i loro deflussi il vettore dei materiali solidi che provengono dall'erosione dei versanti, dalle frane: materiali che scorrendo verso valle si affinano nelle dimensioni, alimentando il trasporto solido specialmente nei tratti fluviali che precedono la prima pianura.





## Interventi sull'asta fluviale

Gli interventi sull'asta si prefiggono:

1. la sua stabilizzazione;
2. la stabilizzazione delle sponde.

1. La stabilizzazione dell'asta si effettua con:

- (a) SOGLIE DI FONDO: fissano la sezione dell'alveo;
- (b) BRIGLIE: introducendo salti di fondo, diminuiscono per tratti la pendenza e, quindi, la capacità erosiva della corrente.

2. La stabilizzazione delle sponde si effettua con:

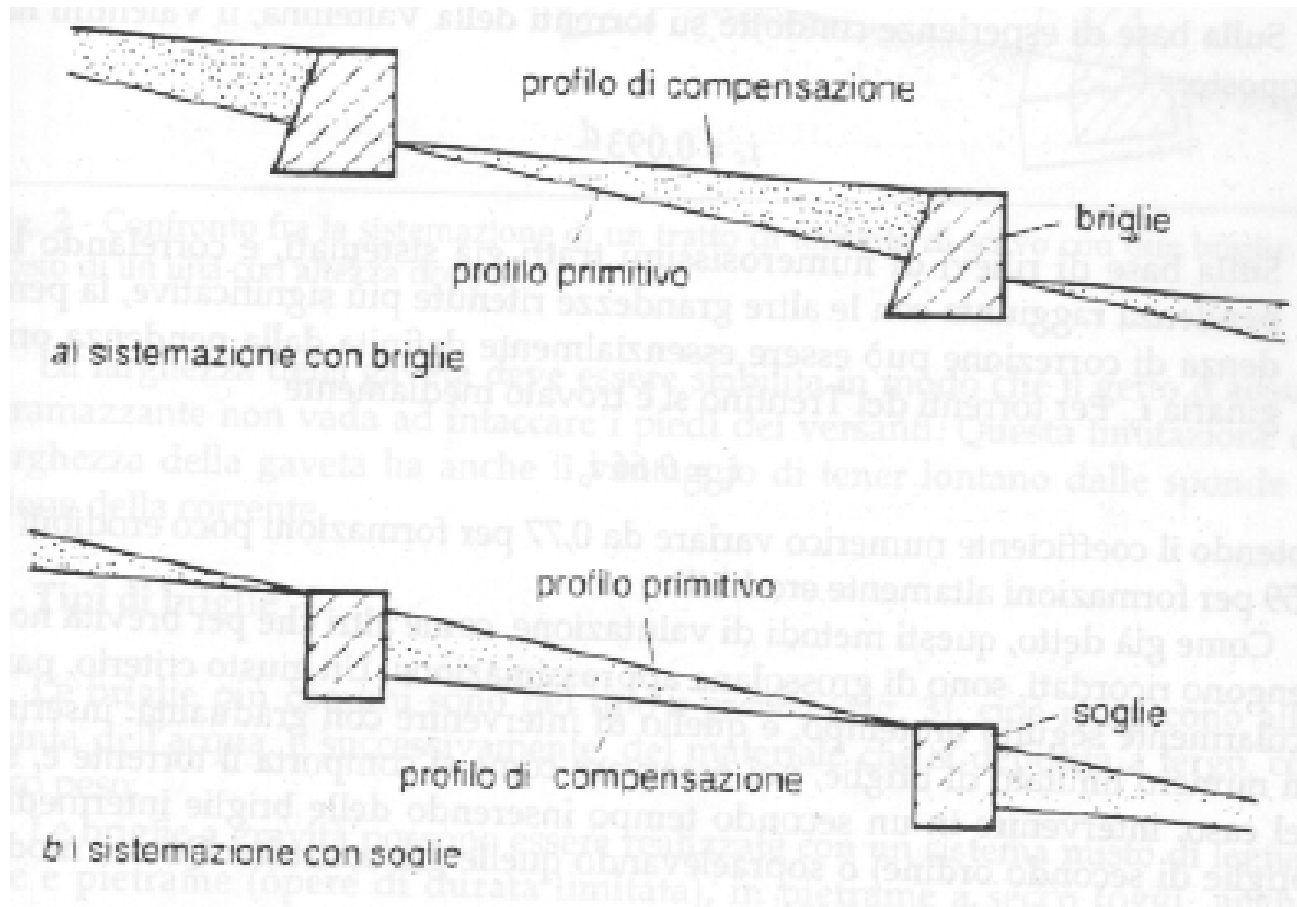
- (a) i muri di sponda;
- (b) le scogliere longitudinali;
- (c) i pennelli.

TEMPO DI RITORNO: gli interventi propri delle sistemazioni fluviali sono progettati in generale per eventi che abbiano tempo di ritorno  $T_r = 100 \div 250$  anni.





## Stabilizzazione dell'asta: briglie e soglie





## Stabilizzazione dell'asta: le briglie

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

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

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

diga: le opere trasversali di altezza tale da creare un invaso a scopo di accumulazione per usi idroelettrici, agricoli o idropotabili. Esistono dighe aventi scopo multiplo (idropotabile ed idroelettrico; irriguo e riduzione delle piene; etc.). Le dighe sono considerate tali se hanno altezza superiore a 15 m o determinano un invaso superiore a un milione di m<sup>3</sup> e rientrano nell'ambito della materia disciplinata dalla L. 1.11.1959 n. 1363 e successive modificazioni (D.M. 24.3.1982; D.L. 8.8.94, n. 507 convertito nella L. 21.10.1994, n. 584 recepita dalla Regione Piemonte con la L.R. 11.4.1995, n.58).





Esempio di traversa fluviale. Spilamberto (MO)



Esempio di diga in terra. Val Senales (Trentino Alto Adige)





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

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

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

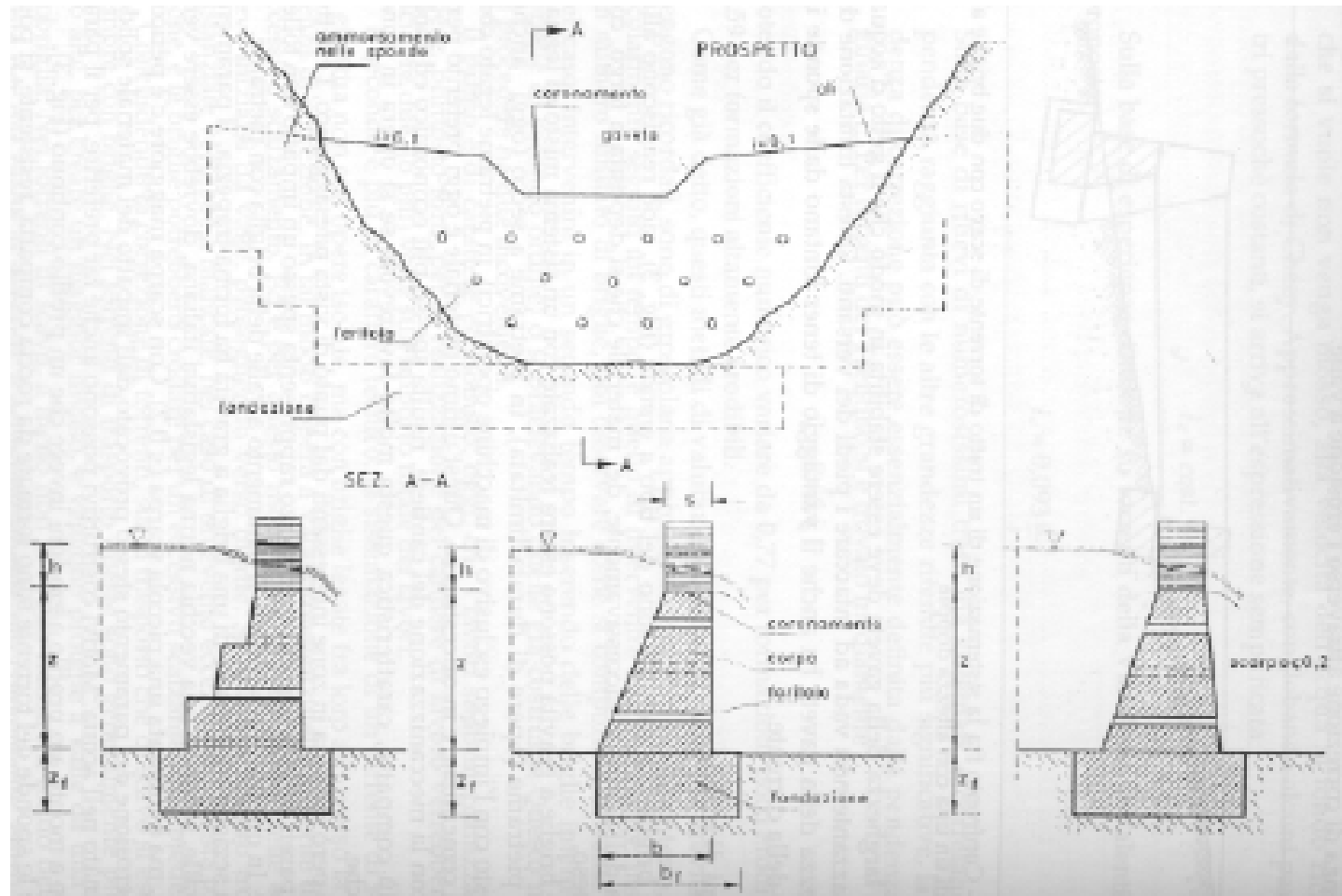
La struttura delle briglie può essere realizzata secondo varie tipologie: per forma, per modo di resistere e per materiali. Si possono così avere: briglie a gravità e ad arco; di conglomerato di cemento semplice o armato e di muratura di pietrame, di gabbioni, in terra.

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



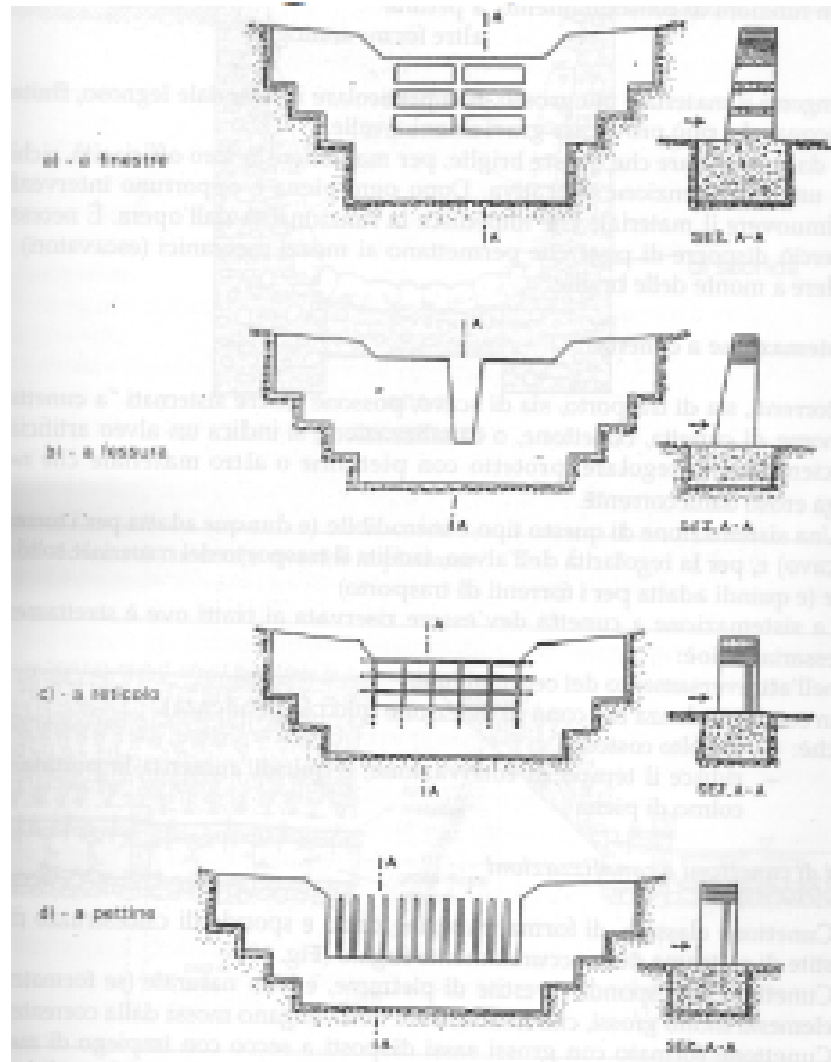


## Briglie a gravità



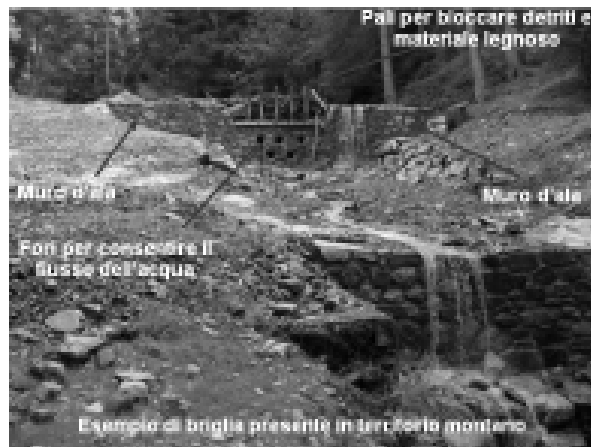
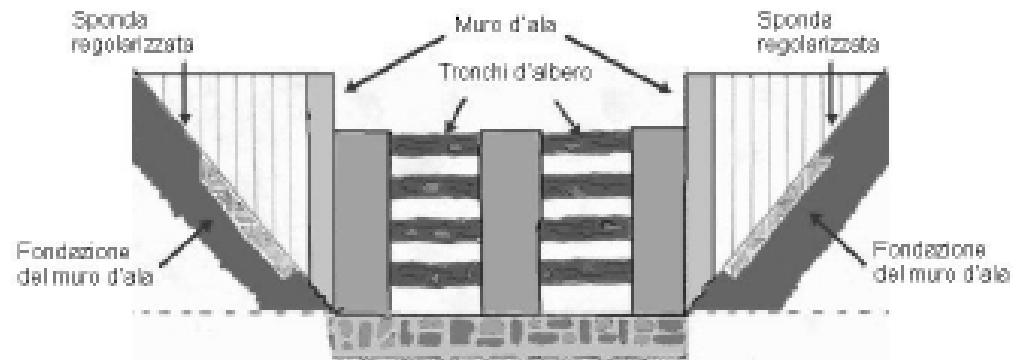


## Briglie aperte





## Briglie selettive





## Esempi di sistemazioni fluviali con briglie



*Briglie in gabbioni*



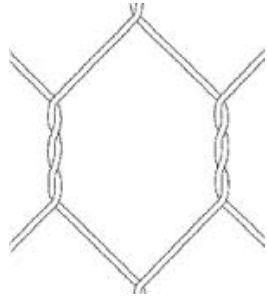
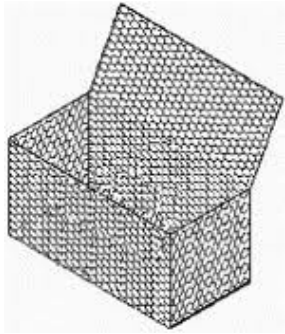
[www.maccaferri.com](http://www.maccaferri.com) (dal 1879)



*È il 1893 quando la Ditta Maccaferri viene chiamata per i lavori di contenimento della rotta del fiume Reno a Casalecchio di Reno, nel bolognese. È di questo periodo la trasformazione da attività artigianale a industriale, promuovendo l'espansione della fabbrica, installando tra l'altro una trafigliera ed inventando il famoso “gabbione”.*



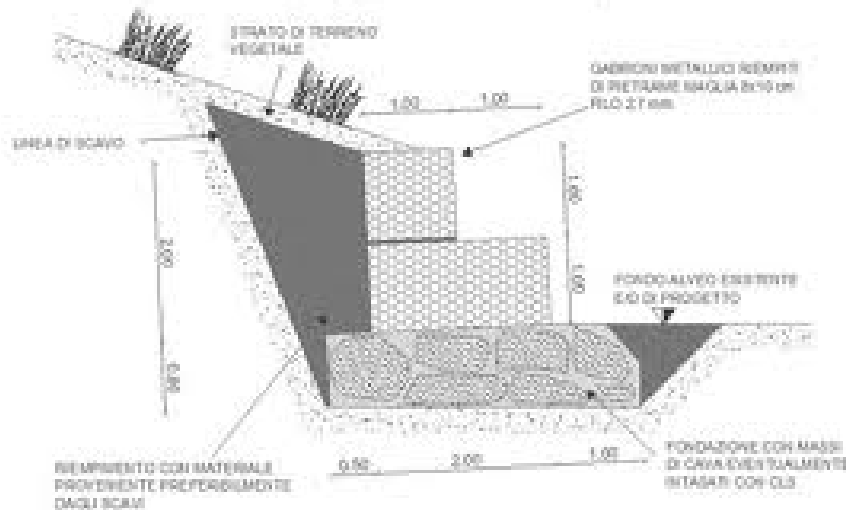




Il **gabbione** è un contenitore di rete metallica riempito di ciottoli e pietre. La rete metallica è a maglia esagonale con filo ritorto per evitare che il cedimento di qualche filo faccia smagliare una parte estesa del gabbione con fuoriuscita del pietrame. La costruzione del gabbione non richiede una perizia particolare. L'impatto ambientale è minimo in quanto è possibile realizzarlo col pietrame naturale del luogo. Nel tempo può ricoprirsi di terriccio sul quale spontaneamente tende a crescere la vegetazione che camuffa il manufatto. I gabbioni fino a 50 cm di spessore sono detti materassi, o materassi Reno, dal nome del fiume nei pressi di Bologna sul quale si iniziò ad impiegarli alla fine del secolo XIX. Il materasso di tipo Reno è in genere rinforzato da maglie intrecciate trasversali.

#### GABBIONI PER PROTEZIONI SPONDALI

Tipologia per altezza di difesa pari a 2 mt.



---

## Note costruttive

- I gabbioni e i materassi Reno hanno forma parallelepipedica di dimensioni 1 X 1 X 2 m e 0.5 X 1 X 2m
- Sono realizzati con rete metallica a maglia esagonale a doppia torsione
- Il filo di acciaio utilizzato è del tipo dolce e ricotto a zincatura forte, conforme alle norme vigenti in materia (UNI-EN 10223-3).
- I fili possono avere un rivestimento in polietilene per consentire una maggiore protezione in ambienti dove terra o acqua sono aggressivi.
- Alle estremità viene usato filo di diametro maggiore di quello usato per la realizzazione delle maglie esagonali, con lo scopo di rendere più rigido e robusto l'elemento scatolare.





## Briglie in gabbioni: caratteristiche e tipologie

La posa in opera dei gabbioni avviene secondo le seguenti fasi:

1. allestimento dei singoli elementi;
2. posa in opera e legatura degli elementi tra di loro;
3. riempimento (manuale o meccanico) degli elementi con materiale lapideo squadrato di idonea pezzatura, (ciottoli o pietrame di cava).;
4. chiusura degli elementi tramite legatura dei coperchi con filo di ferro plastificato e resistente alla corrosione

In funzione del tipo di paramento di valle le opere in gabbioni possono essere distinte in tre tipologie:

- a parete di valle verticale;
- a gradoni;
- a parete di valle inclinata con configurazione a scivolo.



## Briglie in gabbioni: caratteristiche e tipologie

*Il tipo a parete di valle verticale è di più semplice realizzazione ed è indicato per la costruzione di opere idraulica di modesta importanza. Il paramento di valle verticale determina una vena stramazante completamente areata e distaccata dal paramento stesso riducendo fenomeni di abrasione sulla gaveta a opera del materiale solido più grossolano trasportato dalla corrente.*

*La briglia con parete di valle a gradoni consente, una dissipazione progressiva del carico totale della vena stramazante della gaveta mediante una serie di piccoli salti. E' adatta a manufatti di modesta altezza e per valori di contenuti di portata, I gradoni possono essere piani e senza rivestimento, o presentare una copertina in calcestruzzo eventualmente inclinata, verso interno del gradone, oppure può presentare un dentello terminale.*

*La briglia con paramento di valle inclinato si impiega nei manufatti con altezza fuori terra superiore a 10 m. La lama stramazante è aderente al paramento di valle grazie alla particolare configurazione geometrica dello scivolo. Al piede di esso si dispone il bacino di dissipazione in rilevato o in depressione rispetto alla quota del fondo alveo di valle.*





## Il tipo a parete di valle verticale

- Negli sbarramenti a parete di valle verticale devono essere studiati dei dispositivi di dissipazione di energia della vena trascinante.
- La vena di solito erode il fondo alveo, e crea di un cuscinetto d'acqua che dissipa il carico esuberante mediante la formazione di un risalto.
- Per favorire il risalto idraulico e controllare la profondità dello scavo, si dispone una controbriglia a valle della zona di caduta.

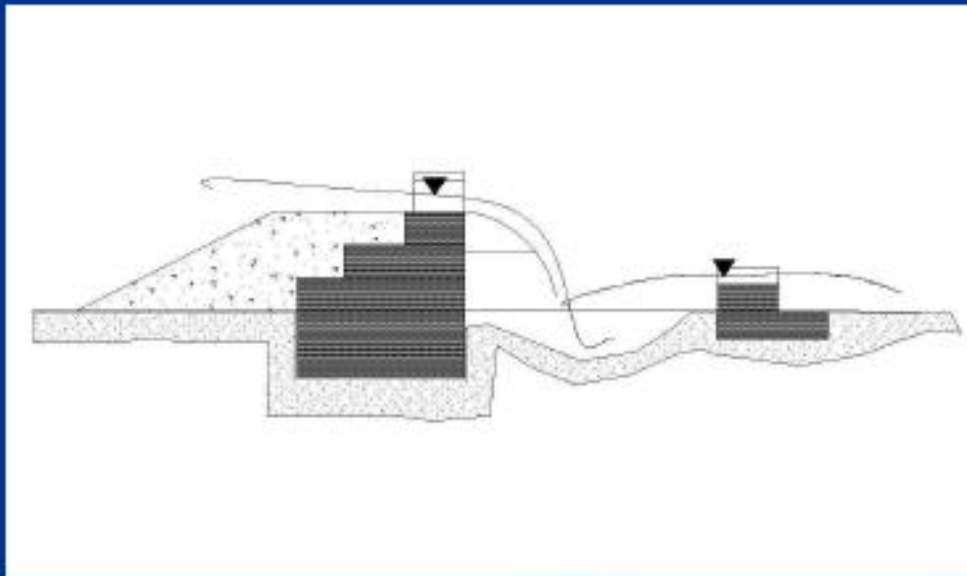
Il dispositivo può essere di tre tipi:

- con controbriglia senza rivestimento del bacino di dissipazione;
- con bacino di dissipazione rivestito e in rilievo;
- con bacino di dissipazione rivestito e in depressione.



## Briglia a parete di valle verticale

- *Controbriglia senza rivestimento del bacino di dissipazione;*
- Il più semplice e diffuso costituito dallo sbarramento in gabbioni e dalla controbriglia a valle di esso posta a una opportuna distanza. Generalmente manca una platea e si consente alla vena stramazante di erodere il fondo alveo fino a formare un bacino naturale di profondità sufficiente a garantire il dissipamento dell'energia di caduta della corrente. La controbriglia di valle ha doppia funzione:

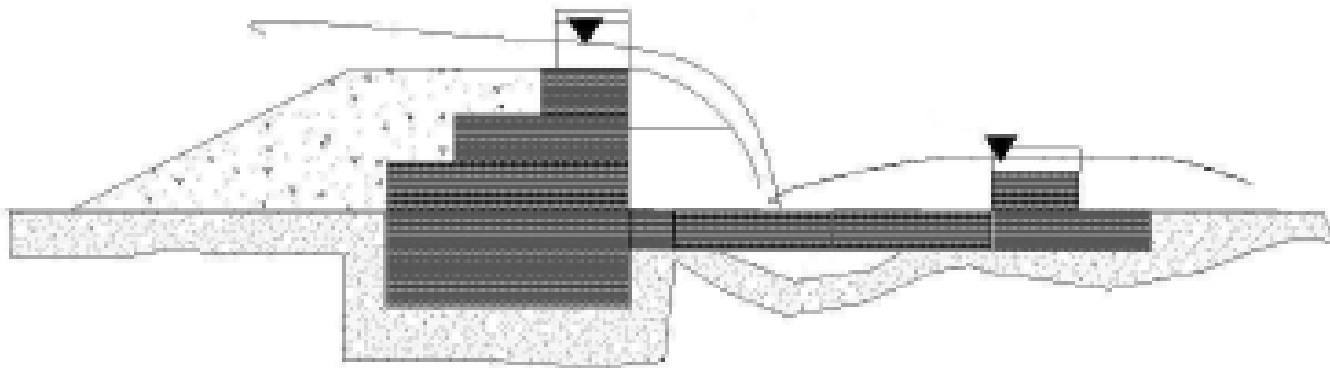


- ✓ controllare la profondità massima di escavazione che non deve raggiungere il piano di fondazione della briglia;
- ✓ permettere la formazione di un risalto idraulico fra briglia e controbriglia.



Briglia a parete di valle verticale:

*bacino di dissipazione rivestito e in rilevato*

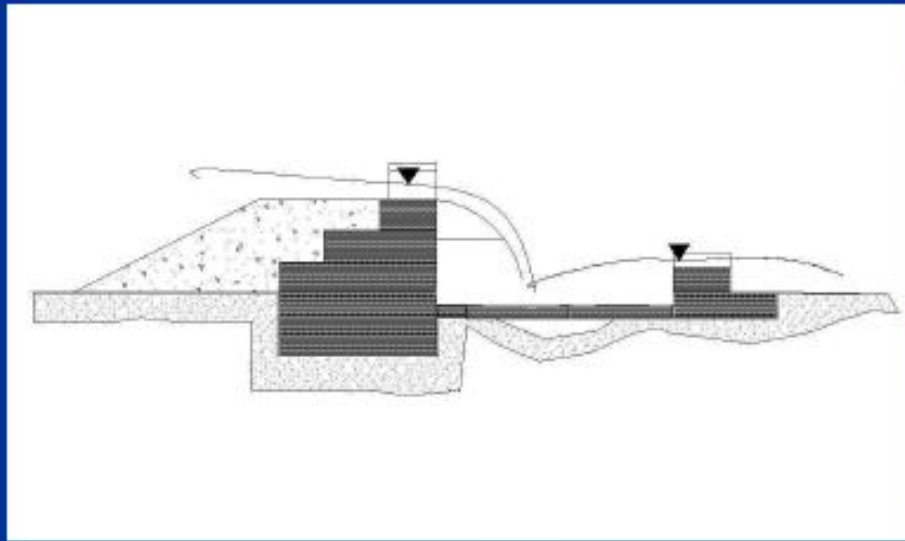




Briglia a parete di valle verticale:

*bacino di dissipazione rivestito e in depressione*

- Il bacino di dissipazione è rivestito e presenta nella sua sezione terminale una soglia di controllo la cui sommità corrisponde al fondo alveo di valle. La quota del fondo del bacino deve essere stabilita in modo tale che il risalto si formi e rimanga contenuto tutto all'interno del bacino stesso.:







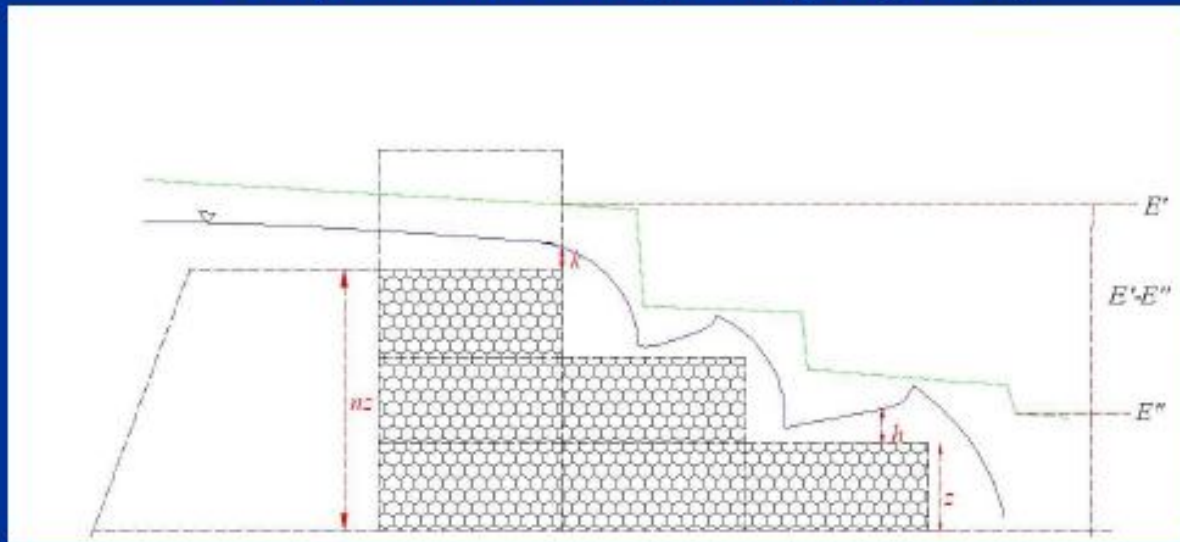
## Il tipo a gradoni

### *Briglia a gradoni*

- Sui manufatti, si possono formare due tipi di corrente: un *getto* o una corrente di tipo *skimming*. (Pyras *et al.*)
- Il *getto* è un tipo di corrente che si origina per portate unitarie di modesta entità.

Esso si forma in ciascun gradone e può colpire:

- l'intera superficie del gradone successivo (*getto isolato*);
- la parete terminale del gradone (*getto parziale*).



### *Getto isolato*

Nell'impatto con il gradone successivo, si ha il passaggio da una corrente veloce a una corrente lenta con formazione del risalto idraulico; questo fenomeno è stato osservato per valori di portata contenuti ( $< 1 \text{ mc s}$ ) e porta a una dissipazione di energia totale equivalente al totale delle altezze di singoli gradini.

### *Getto parziale*

La corrente colpisce una porzione di gradone dando origine a una considerevole turbolenza.



## Il tipo a scivolo

### *Briglie a scivolo*

- Le briglie a scivolo sono impiegate nella regolazione delle aste fluviali, con grandi portate, modesto trasporto solido e da fondo e granulometria fine.
- La vena stramazante rimane aderente al paramento di valle in quanto inclinato.
- Per evitare moti anormali dell'acqua, lo scivolo viene sagomato secondo il profilo proposto da Creager e Scimemi.
- Il nucleo della briglia a scivolo è formato da un muro in gabbioni che poggia su un sottofondo in sabbia bitumata.
- Il fondo dello scivolo viene realizzato con materassi Reno bituminati, caratterizzati da uno spessore di 0,15-0,30 m.
- il bitume colato sui materassi, determina una condizione di impermeabilità ed esercita una azione legante tra gli elementi

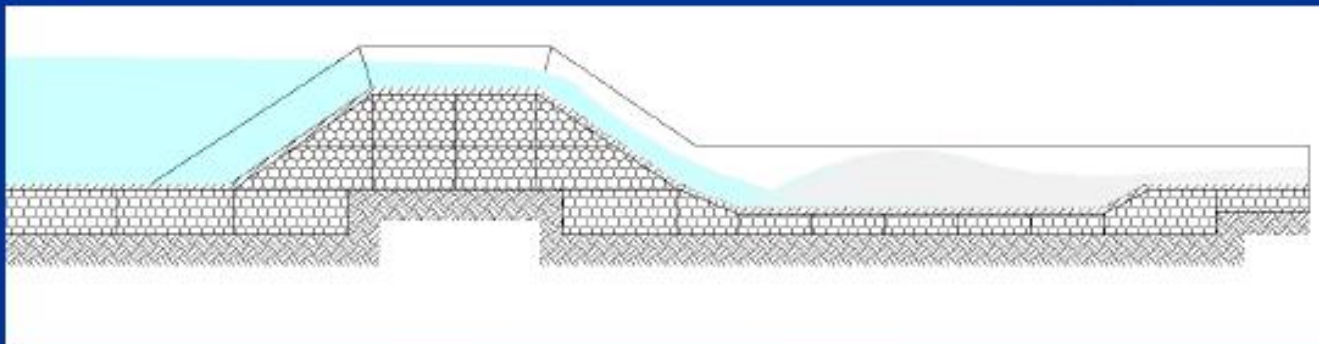




## Il tipo a scivolo

### *Briglie a scivolo*

- Per tipologia di fondazione le briglie a scivolo sono di due tipi:
  - fondazione diretta;
  - fondazione a platea.
- La fondazione diretta viene adottata quando la corrente presenta un rilevante trasporto solido costituito da materiale grossolano, in quanto la caduta di questo materiale può provocare dei tagli nella rete metallica della platea.
- Le briglie con fondazione a platea si realizza per ripartire i carichi uniformemente quando l'alveo è costituito da materiali incoerenti con scarsa resistenza alla compressione e all'erosione.





## Vantaggi e svantaggi dell'impiego dei manufatti in gabbioni

- Nel caso in cui si operi su terreni poco stabili, l'utilizzo dei gabbioni rende possibili eventuali deformazioni post realizzazione senza pregiudicare la stabilità dell'opera
- Le briglie in gabbioni possono essere facilmente integrabili grazie alla possibilità di assemblare gli elementi base (gabbie)
- In zone dove vi è una adeguata disponibilità di pietrame possibilmente non ciottoloso, le briglie in gabbioni sono opere poco costose da realizzare in quanto le spese si limiteranno alla manodopera e all'acquisto delle reti.
- Nei contesti paesaggistici dove è necessario mantenere un certo pregio naturalistico le briglie in gabbioni si dimostrano capaci nel completarsi col paesaggio.
- Utilizzando però i dovuti accorgimenti come ad esempio copertine in cemento, reti un ferro plastificato o zincato, la durata delle opere si accresce al punto da equipararsi alle opere in cemento.
- L'opera in gabbioni è una struttura dotata di forte elasticità ed è in grado di seguire i movimenti del terreno di fondazione



## Vantaggi e svantaggi dell'impiego dei manufatti in gabbioni

- Tali opere sono sconsigliate in aree scarsamente dotati di pietrame e dove è disponibile del pietrame incoerente e sgretolabile.
- In alvei con correnti impetuose e molto violente di carattere torrenziale l'impiego di gabbioni si presenta rischioso a causa di elevati sforzi di tensione a cui l'opera è sottoposta
- In occasione di portata liquida ricca di sedimenti i fili metallici possono rompersi smagliando l'intera struttura con inevitabili cedimenti dell'opera e fuoriuscite di materiale.





## Esempi di sistemazioni fluviali con briglie







## Esempi di sistemazioni fluviali con briglie







Esempio di briglia "selettiva"





Esempio di briglia "selettiva"





## Opere accessorie

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

Elementi fondamentali tra le opere accessorie sono:

- **muri d'ala**

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

- **platea**

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

- **controbriglia e bacino di dissipazione**

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

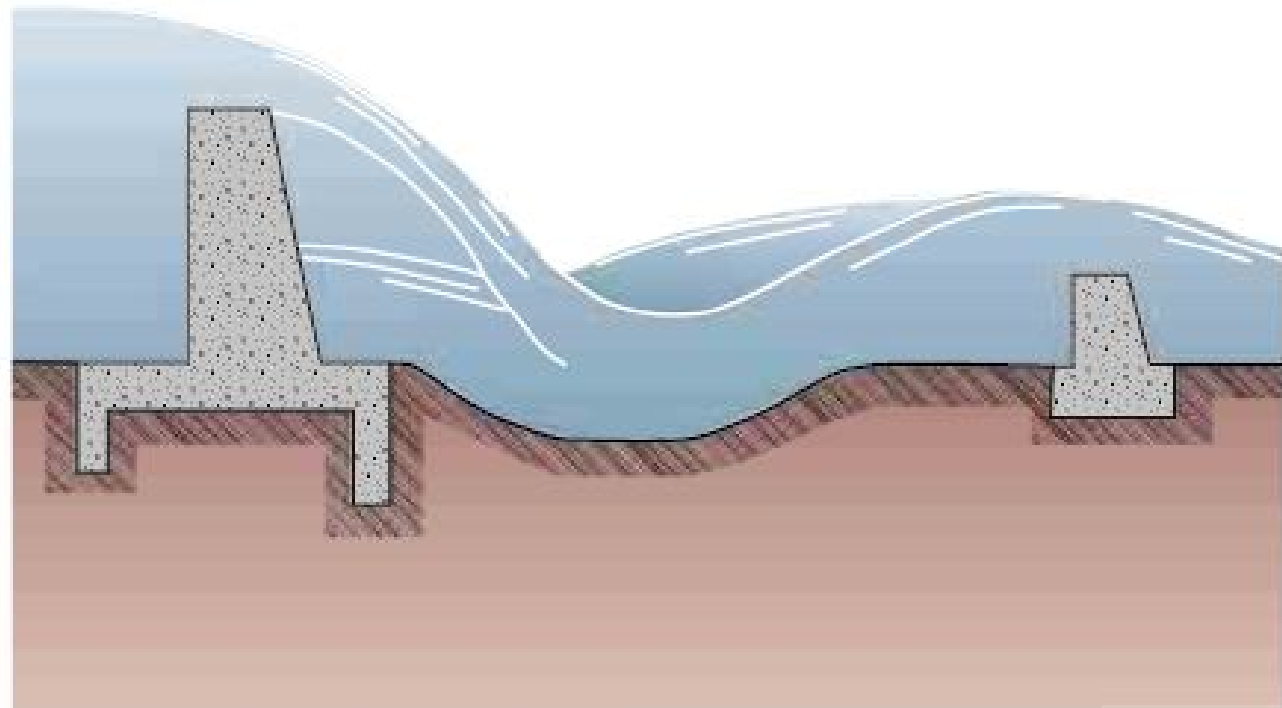
La controbriglia è dotata di una gaveta delle stesse dimensioni della gaveta della briglia. Altezza della controbriglia e distanza dalla briglia sono determinate sulla base di un calcolo fondato sul principio che il dispositivo deve contenere la vena d'acqua stramazante dalla briglia e permetterne la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







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





## Briglie in legname (ingegneria naturalistica... primi cenni)

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

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





Briglie in legname (ingegneria naturalistica... primi cenni)





## Briglie in legname (ingegneria naturalistica... primi cenni)

- L'uso di alcuni materiali come il legno e il pietrame, storicamente impiegati nelle sistemazioni sta ridestando un nuovo interesse.
- Si adottano briglie in legno nei casi di piccoli alvei con portata ridotta e in aree di un certo pregio paesaggistico
- Nel caso in cui è impedito un facile accesso a macchine e mezzi di cantiere e un'agevole trasferimento di materiali necessari alla costruzione di manufatti in calcestruzzo.
- Le proprietà fisico meccaniche del complesso legno-pietra si adattano per gli impieghi nel campo delle sistemazioni grazie alle buone caratteristiche di resistenza unitamente alle discreta durabilità dei materiali.
- Sia il legno sia la pietra, sono materiali facilmente lavorabili manualmente.
- Le briglie in legno diventano necessarie in aree sottoposte a vincolo ambientale come parchi e zone protette.







## Briglie in legname (ingegneria naturalistica... primi cenni)

- La situazione ambientale in cui è sconsigliato l'impiego del legno per la costruzione dei manufatti è quella tipica dei corsi d'acqua a regime torrentizio con deflussi occasionali (umidità variabile) e caratterizzati da una totale assenza di ombreggiamento lungo le sponde (climi di tipo mediterraneo)
- In zone in cui il legname è difficilmente disponibile, i costi di realizzazione delle opere dovuti agli oneri di trasporto e di acquisto del legname renderebbero più conveniente altre soluzioni progettuali.
- Nel caso di alvei a forte pendenza le briglie richiedono paramenti di valle di notevole altezza, non realizzabili con le briglie in legno.
- Alvei con elevate portate liquide e con rilevante trasporto solido e fondi alvei particolarmente larghi (tratti vallivi delle fiumare) non potrebbero sopportare strutture esigue come le briglie in legno





## Trasporto solido

Nelle sistemazioni dei torrenti il trasporto solido assume un'importanza fondamentale.

Una prima differenziazione: materiali incoerenti/"debris flow".

Si distinguono, essenzialmente, due diversi modi di mobilitazione del materiale in dipendenza, specialmente, del rapporto che l'acqua trattiene con i materiali stessi.

In un caso: una corrente che, pur trascinando sul fondo e in sospensione materiali di varia natura per lo più incoerenti ma anche coesivi, mantiene però il carattere di corrente nell'accezione classica del termine.

Nell'altro: una corrente o "impasto fluido" di materiali (detriti ed altro) nella quale l'acqua ha il ruolo di fluidificante, con il risultato di produrre una massa detritica o colata notevolmente deformabile. Essa, se associata alle notevoli pendenze dei versanti o dell'asta, può raggiungere velocità anche assai elevate, con effetti distruttivi ("debris flow").

Entrambi i fenomeni: difficili da trattare per le indeterminazioni che si riscontrano quando si voglia provvedere alla loro descrizione. Di queste indeterminazioni, ovviamente, risentono le valutazioni che pur accompagnano i progetti di sistemazione dei torrenti.

Trattazione semplificata, aspetti qualitativi e quantitativi dei fenomeni (modelli).





## Trasporto di materiali incoerenti

Il termine trasporto solido designa l'insieme dei fenomeni che riguardano l'erosione e il modellamento degli alvei ad opera della corrente che li percorre.

Il materiale è trasportato secondo due modi:

1. sul fondo (rotolamento, strisciamento, saltellamento) modo proprio dei materiali di maggiori dimensioni;
2. in sospensione: per effetto della turbolenza, per i materiali più fini (sabbie, limi, argille).

Il trasporto solido dipende da numerosi parametri:

- (a) geometria della sezione dell'alveo;
- (b) interazioni (attrito/coesione) sponda/corrente;
- (c) tensioni tangenziali che si esercitano lungo il perimetro bagnato dovuto alla distribuzione della velocità.

$$\tau_0 = \gamma R i \quad \text{Valor medio della tensione tangenziale alla parete}$$

$$\tau_{cr} = ? \quad \text{Tensione tangenziale critica (moto incipiente del granulo)}$$

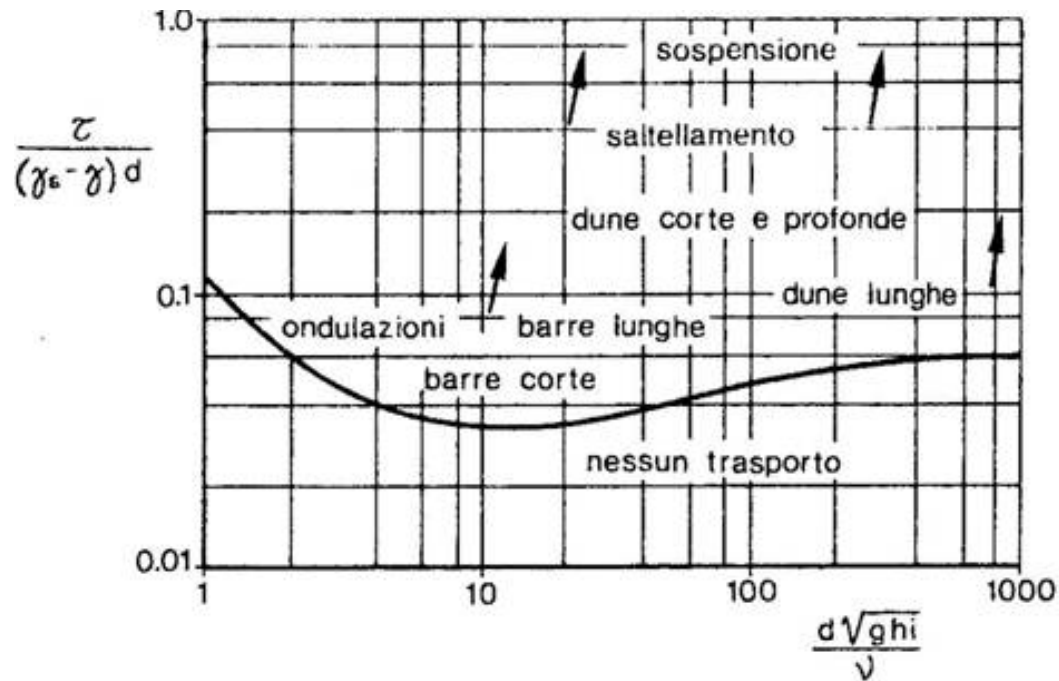




## Abaco di Shields

Shields ha investigato sperimentalmente il caso di un letto formato da particelle uniformi non coesive, fornendo la relazione di dipendenza di  $\tau_{cr}$  da  $Re^*$  :

$$\frac{\tau_{cr}}{(\gamma_s - \gamma)d} = f(Re^*)$$



$Re^* > 1000$   
(regime turbolento)

$\Phi = 0.06$







## Velocità critica

Velocità critica: valore della velocità che da luogo al moto

$$\tau_{cr} = \gamma R i_{cr}$$

$$V = KR^{2/3} i^{1/2} \longrightarrow V_{cr} = KR^{2/3} i_{cr}^{1/2}$$

$$V_{cr} = KR^{2/3} \left( \frac{\tau_{cr}}{\gamma R} \right)^{1/2} = \frac{KR^{1/6}}{\gamma^{1/2}} \sqrt{\tau_{cr}} = \frac{KR^{1/6}}{\gamma^{1/2}} \sqrt{0.06(\gamma_s - \gamma)d} = KR^{1/6} \sqrt{0.06 \left( \frac{\gamma_s}{\gamma} - 1 \right)} \sqrt{d}$$

$$K = 25 \div 35 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$$

$$V_{cr} = 7.7 \div 10.8 R^{1/6} d^{1/2}$$





## Portata solida

Un problema di non facile risoluzione è quello di determinare la quantità di materiale trasportato al fondo. Le formulazioni proposte, assai schematiche, sono da assumersi come indicazioni.

$$\text{Du Boys (1879)} \quad q_s = C_s \tau (\tau - \tau_{cr}) \quad \tau \text{ (N/m}^2\text{)} \quad C_s \text{ (m}^6\text{/N}^2\text{s)} \quad q_s \text{ (m}^3\text{/sm)}$$

La portata solida  $q_s$  per unità di larghezza è funzione dell'eccesso di  $\tau$  sul valore critico oltre che del  $\tau$  stesso, essendo  $C_s$  un coefficiente che esprime l'attitudine del materiale ad essere trasportato.

$$\text{Straub (1935)} \quad \{C_s, \tau_{cr}\} = f(d)$$

Altra formula per il calcolo di  $C_s$ :

$$C_s = 5.5 \cdot 10^{-2} / (\gamma_s - \gamma) / \gamma \quad q_s = \text{m}^3/\text{s,m}$$

$$C_s = 5.5 \cdot 10^{-2} / (\gamma_s - \gamma) / \gamma \quad q_s = \text{N/s,m}$$





## Portata solida

Un problema di non facile risoluzione è quello di determinare la quantità di materiale trasportato al fondo. Le formulazioni proposte, assai schematiche, sono da assumersi come indicazioni.

Meyer-Peter (1934) (sabbia e ghiaia uniforme)

$$q_s = \left( 2.5q^{2/3}i - 194.8d \right)^{3/2} \quad q_s \text{ (N/s,m); } \quad d \text{ (m)} \quad q \text{ (N/s,m)}$$

Shields (formula con struttura adimensionale)

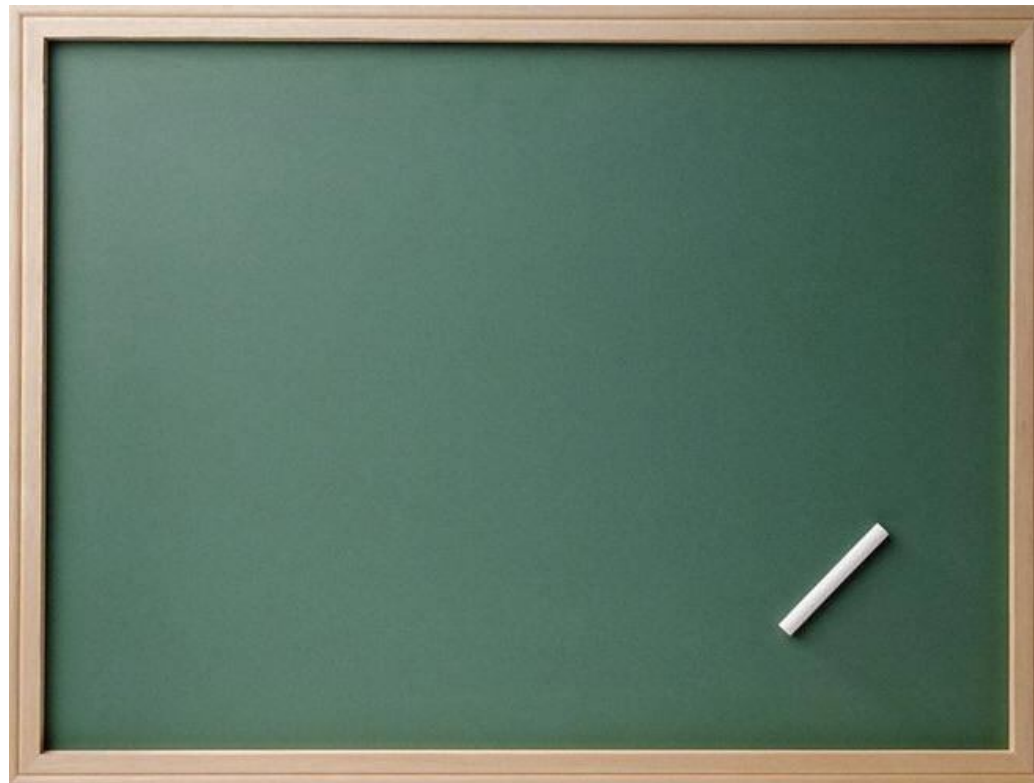
$$\frac{q_s}{q} = 10 \frac{\tau - \tau_{cr}}{\tau_{cr}} \frac{\gamma}{\gamma_s - \gamma} i \Phi(\text{Re}^*)$$





## Stima della portata solida in alveo: *applicazione*

Si voglia stimare quale portata solida sia da attendersi per un corso d'acqua nel quale siano  $i = 0.0005$  ed  $h = R = 2.00$  m con riferimento ad un materiale di dimensione  $d = 0,004$  m e con  $\gamma_s = 26000$  N/m<sup>3</sup>.







## Generalità sulle briglie e sulle soglie

La sistemazione dell'asta di un torrente è generalmente ottenuta diminuendone la pendenza con opere trasversali: briglie e soglie, le prime sporgenti, le seconde fissate nell'alveo.

L'obiettivo che gli interventi si propongono è quello di ridurre l'attitudine al trasporto solido di fondo.

Le briglie sono opere trasversali al torrente, sporgenti dall'alveo nel quale sono fondate, costruite per fissare col coronamento la quota d'alveo stesso e determinare, col materiale che va accumulandosi verso monte, la modifica della primitiva pendenza del torrente.





## Dimensionamento statico della briglia

Il problema statico delle briglie classiche è assai semplice: trattasi di un muro a gravità il cui stato di equilibrio globale può indagarsi con la statica dei sistemi rigidi.

Le forze che sollecitano la struttura sono:

- peso proprio;
- spinta sul paramento di monte/valle prima/dopo l'interrimento;
- sottopressioni lungo la linea di contatto calcestruzzo/terreno di fondazione;
- eventuale aggiunta delle azioni sismiche.

Le varie possibilità di sollecitazione sono legate a due diversi stati: prima e dopo l'interrimento di monte, e, in quest'ultimo caso, alla presenza o non di drenaggi nel corpo murario della briglia.

E' importante sottolineare il benefico effetto dei dreni sulla riduzione delle spinte cui è assoggettata la struttura.





## Verifiche di stabilità

- RIBALTAMENTO
- SCORRIMENTO
- SIFONAMENTO (verifica idraulica)





## Le soglie

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

Le soglie trovano due impieghi nella sistemazione dei torrenti: l'uno per conseguire la riduzione della pendenza provocando l'asportazione di materiale d'alveo compreso tra due soglie successive, in alternativa alle briglie; l'altro per fissare e stabilizzare, in un definito tratto del corso d'acqua, il fondo dell'alveo.







## Rivestimenti

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





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



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





## Opere per l'aumento della portata convogliabile

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

- Argini;
- Drizzagni.

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

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

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





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



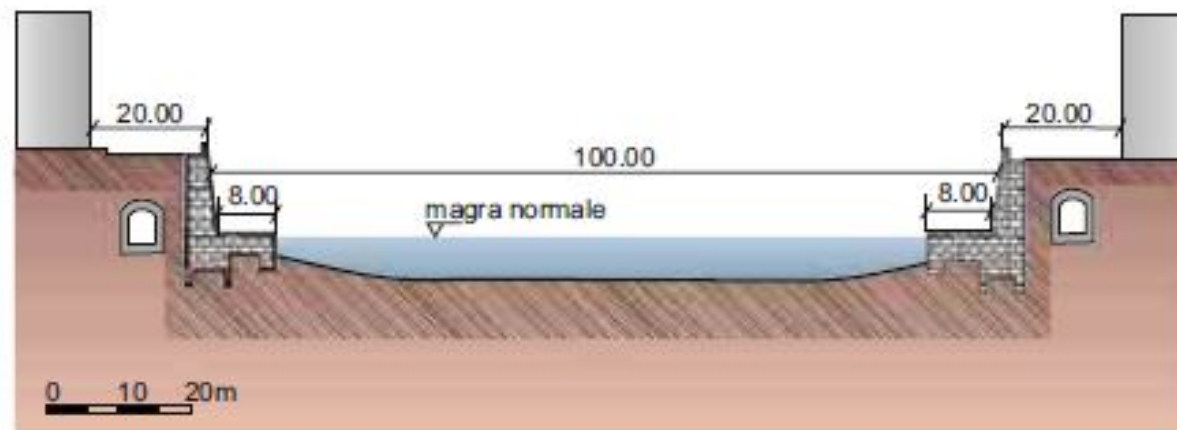


Figura 2.0.2: Rettificazione di un un tratto del fiume Adda nell'attraversamento della città di Sondrio





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



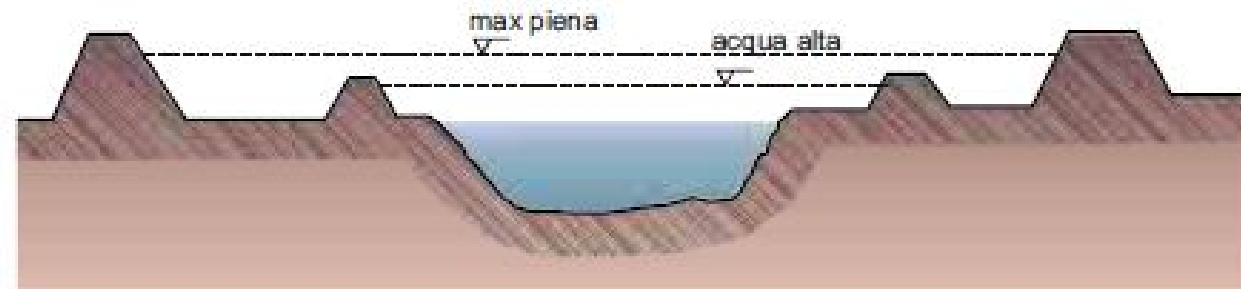
**Figura 2.0.3:** Nella figura viene illustrato il progetto del 1875 di R. Carnevari, con le modifiche di seguito apportate dei grandi muraglioni di contenimento delle sponde del Tevere nell'attraversamento della città di Roma, eseguiti a partire dal 1876.



## Gli argini

### Generalità

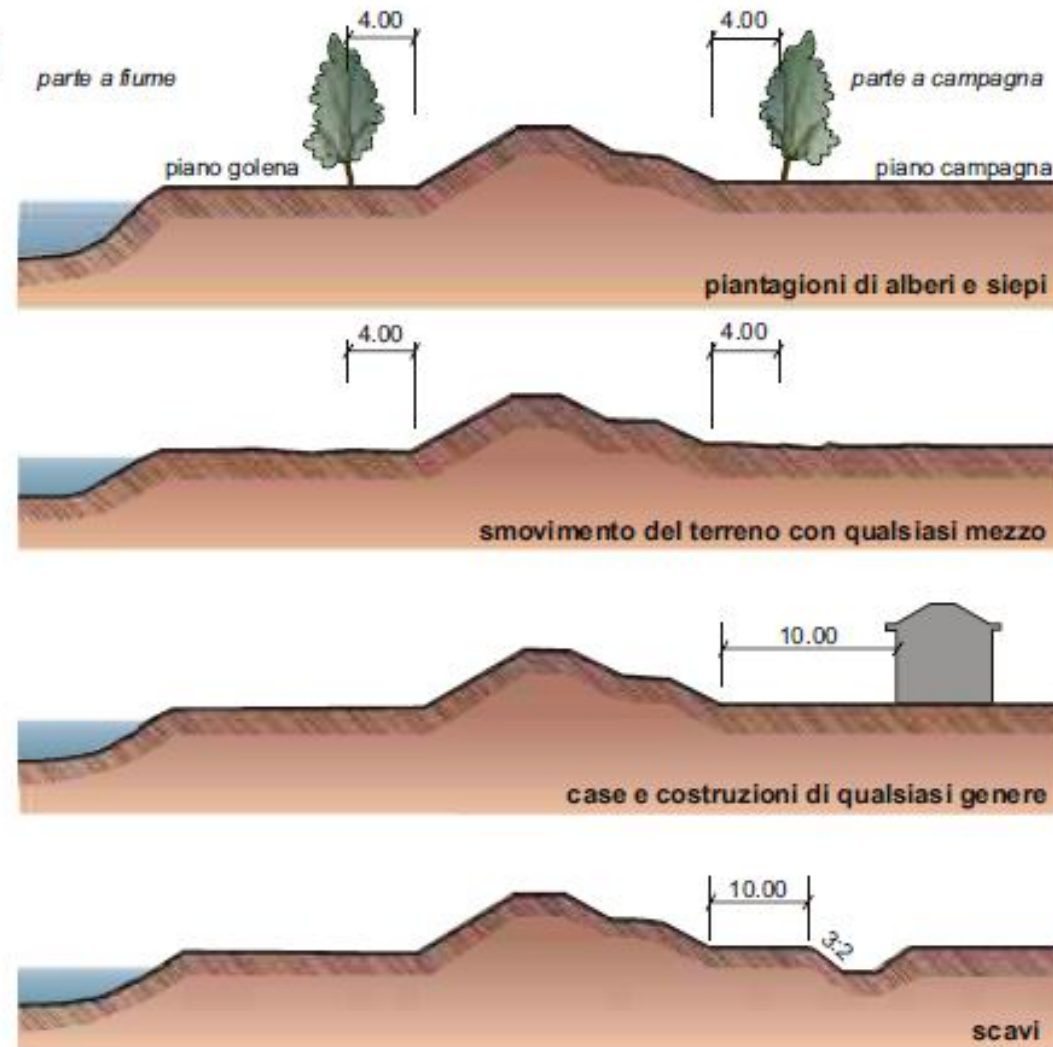
**G**li argini sono costituiti da rilevati artificiali in terra con funzione di tenuta d'acqua, di altezza generalmente inferiore ai 10/12 m, che si realizzano specialmente nel bacino inferiore di corsi d'acqua, allo scopo di contenere le acque di piena, e preservare da inondazioni le aree poste lateralmente.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



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



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





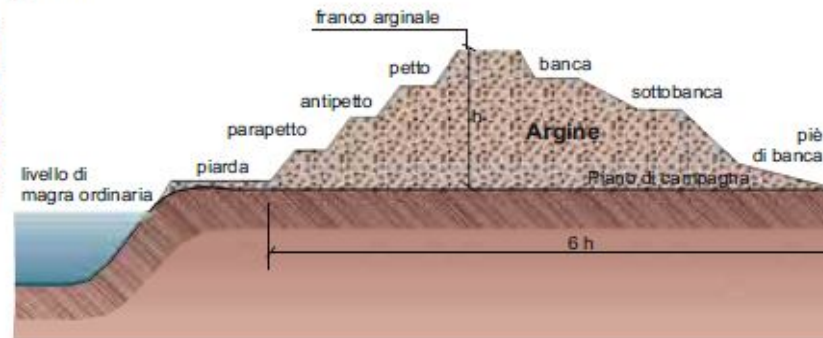


## Argini longitudinali

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

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

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



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

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

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



## Argini trasversali

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







## Descrizione e Caratteristiche

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

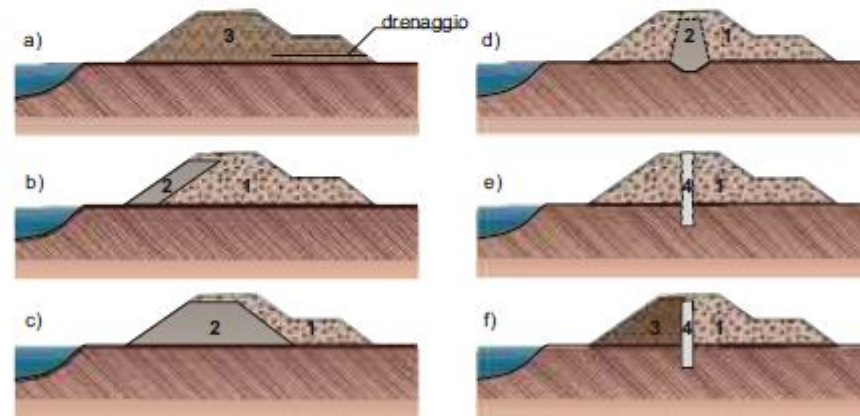
Si utilizzano generalmente materiali a bassa permeabilità di natura argillosa e limosa, in grado di assicurare la stabilità del complesso argine-terreno di fondazione e nel contempo da adattarsi ai cedimenti del terreno di fondazione.

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

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

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

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



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



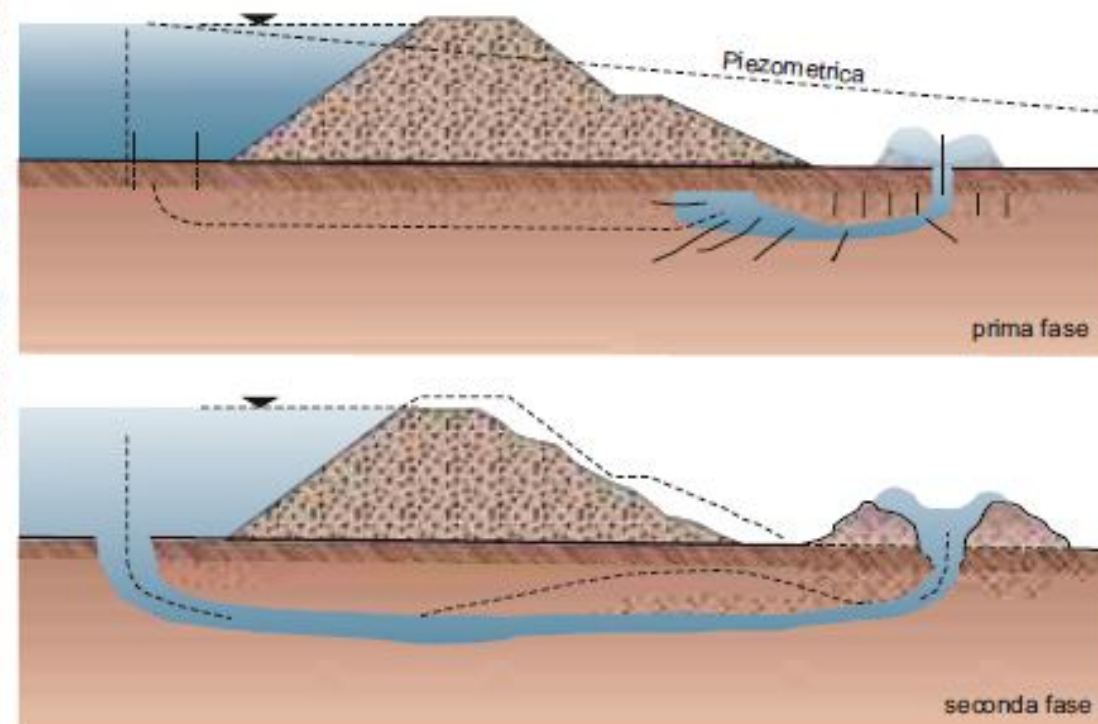
**Figura 2.1.4:** Quando necessario, soprattutto nel caso di argini esistenti, si può assicurare l'impermeabilità del rilevato arginale mediante geosintetici usati sia in superficie che all'interno dell'argine stesso come un diaframma verticale.





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

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



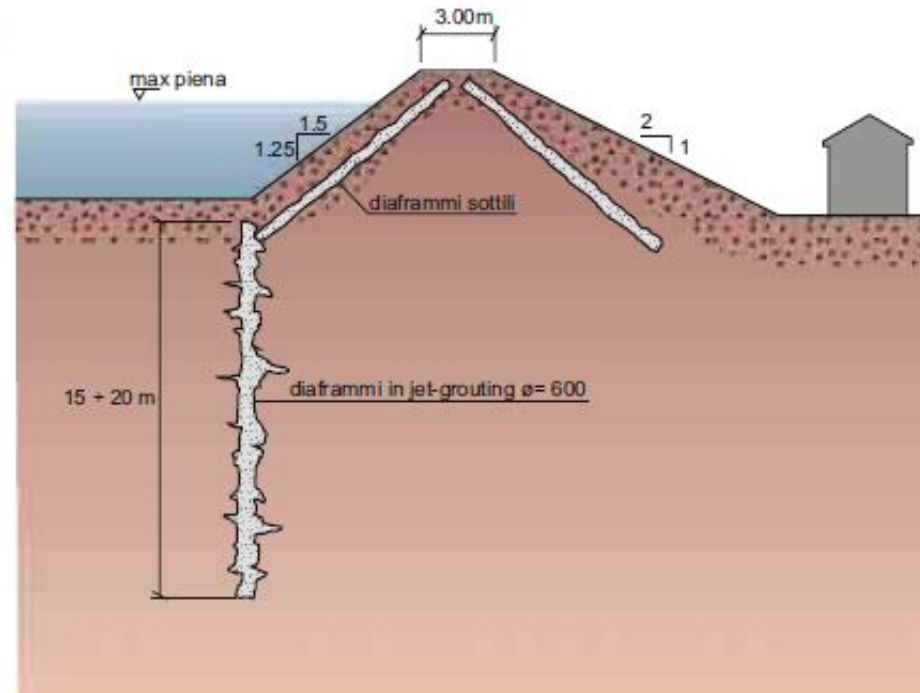




La rotta di un argine è un evento che può avere conseguenze catastrofiche e può avvenire in vari modi, tra i quali il meccanismo principale (60-70% dei casi) è quello del sormonto.

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

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



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

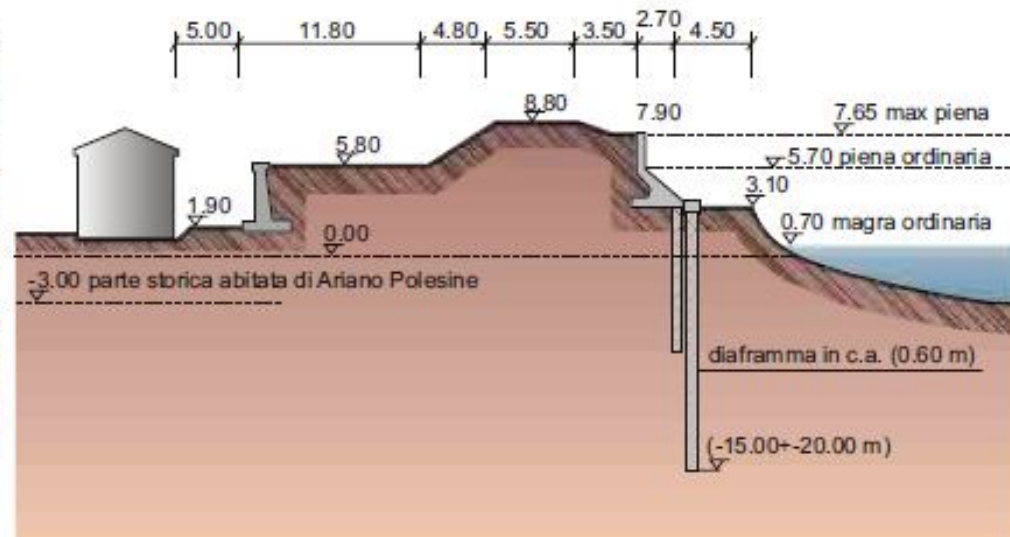
Un tipico esempio è rappresentato dalla difesa, con un muro di sostegno ed un diaframma dell'argine di protezione dell'abitato di Ariano Polesine. A seguito dei vistosi fenomeni di sifonamento verificatisi nel centro abitato durante la piena del 1994 è stato progettato un nuovo diaframma a fiume di maggiore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







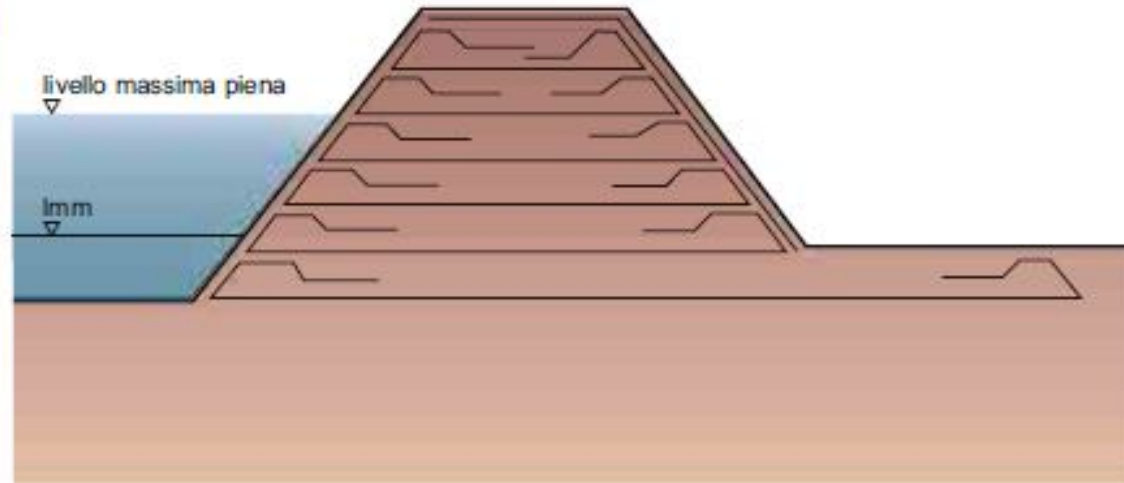
**Figura 2.1.8:** La scarsità di spazio disponibile nei centri abitati può rendere necessario l'impiego di muri di sponda per diminuire l'ingombro degli argini. In tal caso però si possono innescare fenomeni di sifonamento degli argini. Per evitare che ciò accada si può ricorrere all'impiego di diaframmi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





**Figura 2.1.9:** La diminuzione di ingombro degli argini si può conseguire anche aumentando la pendenza delle scarpate per mezzo della tecnica del rinforzo dei terreni: l'aggiunta di rinforzi plastici o metallici opportunamente dimensionati può consentire di realizzare inclinazioni di 60-70°.

L'uso di questa tecnica richiede però l'impermeabilizzazione dell'argine per impedire fenomeni di filtrazione che verrebbero accentuati dalla presenza di discontinuità all'interno del terreno.

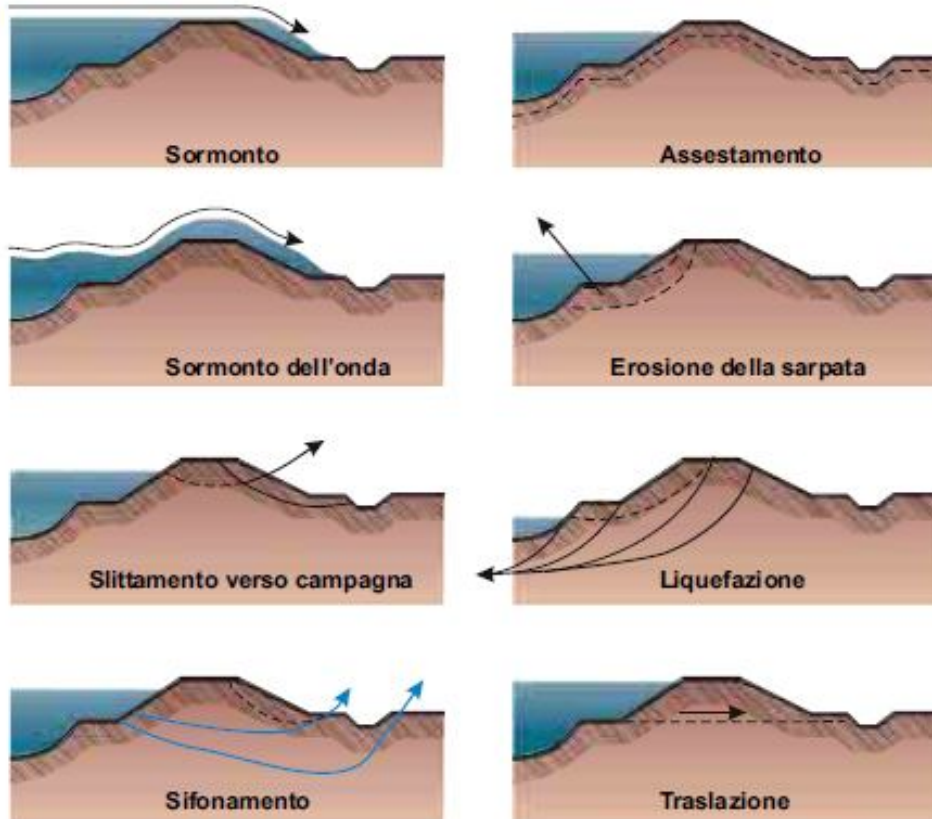




La rottura degli argini può avvenire anche per scorrimento sulla base dovuto a scarso immorsamento o perdita di consistenza del terreno di fondazione o del rilevato stesso causata dall'imbibizione.

Infine può accadere che l'argine sia intaccato dall'erosione; questo può riguardare soprattutto per gli argini in frodo; in tali casi è opportuno intervenire realizzando dei rivestimenti protettivi con tecniche diverse a seconda della velocità della corrente..

**Figura 2.1.10:** Meccanismi di rottura degli argini.





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

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







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

