



BORGHI AZIO S.p.A.

42020 S. POLO D'ENZA (Reggio Emilia) – ITALIA –

Via Papa Giovanni XXIII, 15

Tel. 0522.873193 – 874398

Fax 0522.873267

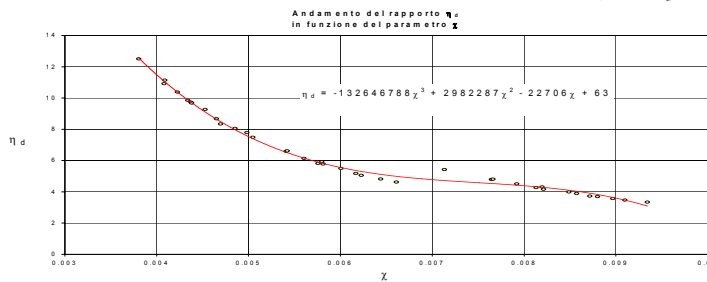
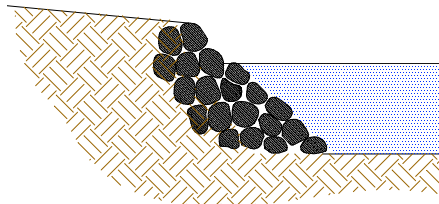
Internet: www.borghiazio.com

E-mail: borghiazio@geologi.it

IL GABBIONE IN RETE METALLICA A DOPPIA TORSIONE PER INTERVENTI DI DIFESA SPONDALE

Gabbione o Scogliera ??

SUPPORTO ALLA SCELTA



Dott. Ing. Piero Bongio

Tratto dal manuale
“Interventi di difesa
spondale in strutture
realizzate con rete
metallica a doppia torsione
e maglia esagonale:
SUPPORTO ALLA
PROGETTAZIONE”



Parte I

Premessa

1. Difese Spondali in materiale lapideo: Gabbioni e Scogliere

Le difese spondali in materiale lapideo sono opere disposte parallelamente alla direzione di deflusso della corrente aventi la funzione di contenere in alveo la portata di piena, con adeguato franco di sicurezza, ed scongiurare, dunque, eventi di esondazione con le conseguenti inondazioni dei terreni adiacenti al corso d'acqua.

In questo lavoro si eseguirà un confronto tra gli interventi che utilizzano materiale lapideo:

- Scogliere e gettate
- Gabbioni e materassi

Gabbioni e scogliere possono essere utilizzati anche per proteggere le sponde dei corsi d'acqua da fenomeni di erosione.

2. Scogliere e gettate di pietrame: Descrizione e principali “svantaggi” rispetto ad un intervento di difesa spondale realizzato con gabbioni

Le sponde dei corsi d'acqua soggette a elevate sollecitazioni idrodinamiche vengono sovente protette con scogliere e gettate in pietrame. Le differenze sostanziali esistenti tra le due tipologie di difesa spondale sono essenzialmente imputabili alle dimensioni del materiale lapideo utilizzato e alla modalità con cui esso viene collocato sulle sponde del corso d'acqua.

Le scogliere sono costituite da massi caratterizzati da maggiori dimensioni, collocati in opera singolarmente, mentre le pietre che formano le gettate sono decisamente più piccole e sono scaricate alla rinfusa.



La scelta delle dimensioni dei massi che formano scogliere e gettate deve essere fatta in funzione delle sollecitazioni meccaniche a cui verranno sottoposte in opera: il progettista deve considerare essenzialmente lo sforzo di trascinarsi esercitato dalla corrente e le sottopressioni idrauliche.

I massi che costituiscono gettate e scogliere devono comunque avere dimensioni decisamente maggiori rispetto a quelli che la corrente è in grado di trascinare a valle in occasione di piene caratterizzate da portate di adeguato tempo di ritorno (maggiore di 10-20 anni).

Nel caso in cui il pietrame venga recuperato in alveo è necessario verificare che esso non abbia forma eccessivamente tondeggiante, infatti la tendenza alla mobilità risulterebbe maggiore di quella posseduta da un masso a forma irregolare e spigoloso.

In alcuni casi, al fine di aumentare la resistenza all'azione di trascinarsi esercitata dalla corrente gli spazi vuoti tra i massi che costituiscono le scogliere e le gettate vengono riempite con malta cementizia o con un miscuglio di pietrisco e asfalto. Tali riempimenti, oltre a fornire un effetto sigillante, incrementano il legame tra i massi formando una "struttura" in grado di resistere a sollecitazioni sicuramente maggiori.

Il principale svantaggio di questa tecnica è senza ombra di dubbio l'impovertimento ecologico del corso d'acqua imputabile alla drastica riduzione dello scambio freatico tra il corso d'acqua stesso e i terreni adiacenti:

- Diminuzione del "ravvenamento" delle falde acquifere sotterranee in tempo di piena.
- Diminuzione del contributo idrico della falda acquifera dei terreni circostanti alla portata defluente nel corso d'acqua in periodo di magra.



L'equilibrio ecologico può subire profonde modifiche con la scomparsa degli originari biotipi e di specie vegetali e animali.

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

Un grosso svantaggio rispetto ad una sistemazione spondale con gabbioni in rete metallica a doppia torsione consiste nel dovere prevedere una scorta di massi da aggiungere al materiale posizionato in prima battuta, in quanto alcuni massi, soprattutto nelle gettate alla rinfusa, vengono trascinati a valle dalla corrente (in modo particolare dopo eventi di piena). Le operazioni di "ricarica" devono essere tanto più frequenti tanto maggiore è l'azione erosiva esercitata dalla corrente.

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

Nelle gettate è difficile garantire che lo spessore del rivestimento sia uniforme e comunque maggiore di quello previsto in fase progettuale. Si tenga presente che è prassi comune assicurarsi che le gettate abbiano uno spessore pari ad almeno 3 volte la dimensione della pietra più grande. E' frequente il rischio di ottenere porzioni di sponda con esigui spessori di copertura lapidea e non è raro il caso di osservare zone addirittura scoperte.

Nella parte III del presente lavoro si è dimostrato con una serie di analisi di confronto che a parità di condizioni idrauliche (portata transitante) e geometriche (larghezza di base della sezione trasversale, pendenza longitudinale del corso d'acqua) la soluzione "gabbioni" permette di utilizzare materiale lapideo di dimensioni considerevolmente ridotte rispetto ai massi necessari alla realiz-



zazione delle scogliere con tutti i vantaggi in termini economici e in termini di risparmio di tempo che ne conseguono:

1. Possibilità di utilizzare materiale lapideo di dimensioni ridotte presente in loco (risparmio dei costi di trasporto, ecc.)
2. Minori problematiche di trasporto, se è necessario approvvigionare il cantiere di materiale lapideo .

Inoltre la funzione di contenimento della rete metallica permette alle arginature realizzate in gabbioni di essere caratterizzate da un margine di sicurezza molto maggiore nei confronti delle azioni di trascinamento esercitate dalla corrente, a parità di dimensione caratteristica del materiale lapideo utilizzato nell'intervento: si veda a tal proposito le numerose analisi di confronto riportate nella Parte III del presente lavoro.

3. Principali caratteristiche di una difesa spondale realizzata in gabbioni

Una comune sistemazione spondale “elastica” è costituita dai gabbioni, i quali non sono altro che, nella loro versione classica, dei parallelepipedi di rete metallica a maglia esagonale a doppia torsione, riempiti con materiale lapideo.

Il vasto impiego dei gabbioni in interventi di sistemazione spondale in ambito fluviale è dovuto essenzialmente alla loro enorme capacità di tollerare cedimenti differenziali: i fenomeni erosivi provocati dall'azione idrica della corrente possono provocare deformazioni ed assestamenti della struttura gabbione senza che ne venga compromessa la stabilità e la funzionalità.

In altre parole il “gabbione” costituisce una difesa spondale elastica e deformabile particolarmente adatta in presenza di fenomeni di instabilità del piano di appoggio, infatti le gabbionate hanno il vantaggio di adattarsi agevolmente ad una nuova configurazione di appoggio.



Inoltre l'utilizzo dei gabbioni risulta vantaggioso da un punto strettamente economico, basti ricordare i ridotti costi di manutenzione, l'assenza di interventi per il drenaggio, il facile reperimento del materiale lapideo di riempimento, la facilità realizzativa ed il fatto che non occorre prevedere fondazioni particolari.

Vale la pena sottolineare l'elevata permeabilità che caratterizza questa tipologia di strutture (basti pensare alle pezzature del materiale lapideo con cui vengono generalmente riempiti). Data la loro elevata permeabilità i gabbioni facilitano lo scambio freatico tra il corso d'acqua ed i terreni limitrofi con i conseguenti vantaggi ecologici. Inoltre le capacità drenanti del gabbione evitano la formazione di pericolose pressioni idrauliche a tergo dello stesso, responsabili di numerosi collassi di strutture arginali impermeabili (muri in calcestruzzo).

Si ricorda, infine, che le gabbionate sono facilmente ripristinabili.

Parte II

1. Dimensionamento Gabbionate

La procedura proposta si basa sul noto metodo delle tensioni di trascinamento, vale a dire sul confronto tra lo sforzo tangenziale agente sulla struttura e lo sforzo massimo ammissibile per la struttura stessa.

Lo sforzo di trascinamento critico τ_c , per il generico sasso all'interno del gabbione, è calcolato con la nota teoria di Shields e corretto attraverso una serie di coefficienti di natura empirica in grado di quantificare, seppure in maniera approssimativa ed empirica, gli effetti di alcune circostanze che portano lo sforzo critico ad assumere un valore diverso da quello fornito dalla citata teoria di Shields.

1.1 Determinazione dello sforzo tangenziale di trascinamento esercitato dalla corrente sulla struttura progettata

Per prima cosa occorre determinare il tirante idraulico, nella sezione del corso d'acqua dove si intende intervenire, associato ad una portata Q di assegnato



tempo di ritorno T. Per semplicità, si fa riferimento alle condizioni di moto uniforme.

Lo sforzo tangenziale di trascinamento agente sull'opera costituita da una struttura elastica in rete metallica a doppia torsione è calcolato nel modo illustrato di seguito.

Si calcola lo sforzo di trascinamento medio al contorno attraverso la nota formula:

$$\tau_o = \gamma_w \cdot R \cdot i \quad [\text{Pa}]$$

dove:

- R è il raggio idraulico, definito come rapporto tra l'area della sezione liquida A ed il perimetro bagnato P della sottosezione in cui è ubicata l'arginatura progettata [m].

$$R = \frac{A}{P} \quad [\text{m}]$$

- γ_w è il peso specifico dell'acqua, o meglio della corrente liquido-solido [N/m³].
 - i è la pendenza media del fondo del corso d'acqua nel tratto considerato, [m/m].
-

Lo sforzo τ_o viene corretto sulla base di coefficienti moltiplicativi in grado di quantificare alcuni aspetti che portano lo sforzo di trascinamento agente sui gabbioni ad allontanarsi dal valore medio calcolato.



1.1.1 Posizione nella sezione trasversale

Si prende in considerazione il punto a quota più bassa della struttura (verosimilmente il più sollecitato), lo sforzo tangenziale agente in tale punto può essere stimato con la formula:

$$\tau_{pos} = \gamma_w \cdot (y - z) \cdot i \quad [\text{Pa}]$$

dove:

- y è il tirante idrico misurato dal punto più depresso della sezione trasversale considerata, [m]
- z è la quota del punto dove si misura lo sforzo di trascinamento, misurata a partire dal punto più depresso della sezione trasversale, [m]

La differenza $y-z$ non è altro che l'altezza d'acqua sopra il punto considerato. Moltiplicando e dividendo l'espressione fornita per il raggio idraulico si ha:

$$\tau_{pos} = \gamma_w \cdot (y - z) \cdot i \cdot \frac{R}{R} = \frac{(y - z)}{R} \cdot \gamma_w \cdot R \cdot i$$

ma $\gamma_w \cdot R \cdot i$ non è altro che lo sforzo di trascinamento medio agente sul contorno bagnato della sottosezione di interesse. Indichiamo con η_{pos} la grandezza priva di dimensioni data dalla differenza tra l'altezza d'acqua sopra il punto considerato ed il raggio idraulico:

$$\eta_{pos} = \frac{y - z}{R}$$

la formula introdotta è valida solo se il punto in cui si sta misurando lo sforzo è posizionato in prossimità del fondo, mentre se tale punto si trova posizionato



su una sponda, è opportuno correggere il coefficiente η_{pos} , moltiplicandola per un fattore correttivo posto uguale a 0.75:

$$\eta'_{pos} = 0.75 \cdot \frac{y-z}{R}$$

Lo sforzo di trascinamento nel punto considerato, misurato prendendo in considerazione la sola posizione del punto stesso vale:

$$\begin{aligned}\tau_{pos} &= \eta_{pos} \cdot \gamma_w \cdot R \cdot i = \eta_{pos} \cdot \tau_o \text{ fondo} \\ \tau'_{pos} &= \eta'_{pos} \cdot \gamma_w \cdot R \cdot i = \eta'_{pos} \cdot \tau_o \text{ sponda}\end{aligned}$$

1.1.2 Andamento planimetrico

Appare evidente come in presenza di un meandro, la porzione concava della curva risulti maggiormente sollecitata rispetto alla parte convessa (forza centrifuga...). Se l'arginatura è posizionato sul lato esterno della curva, trascurare gli effetti della forza centrifuga porta ad una sottostima dello sforzo di trascinamento agente sullo stesso.

In funzione del rapporto tra il raggio di curvatura r_c e la larghezza della sezione in corrispondenza del pelo libero B è dato un coefficiente η_{cur} deducibile da curve sperimentali, il quale permette di quantificare in maniera soddisfacente l'incremento della tensione tangenziale per effetto della curvatura dell'alveo.

Sul lato concavo lo sforzo di trascinamento è dato da:

$$\tau_{cur} = \eta_{cur} \cdot \tau_o$$

Per una stima del coefficiente η_{cur} è possibile utilizzare anche la seguente espressione approssimata:



$$\eta_{cur} = 0.0071 \cdot \left(\frac{r_c}{B}\right)^2 - 0.2036 \cdot \left(\frac{r_c}{B}\right) + 2.3810$$

Tale formula è valida nell'intervallo $2 \leq \frac{r_c}{B} \leq 10$, per valori del rapporto r_c/B maggiori di 10, l'effetto della curvatura dell'andamento planimetrico del corso d'acqua è praticamente irrilevante ($\eta_c \rightarrow 1$).

1.1.3 Scabrezza idraulica

L'azione di trascinamento non è uniformemente distribuita lunga il perimetro bagnato della sezione, ma sarà maggiore nei punti di maggiore scabrezza e minore nei punti "idraulicamente più lisci". Lo sforzo tangenziale medio esercitato sul generico tratto del perimetro bagnato caratterizzato da un valore costante di K_s , si ottiene dalla relazione:

$$(\tau_{scab})_n = \gamma_w \cdot R_n \cdot i \quad [\text{Pa}] \quad 1.1.3.1$$

è possibile scrivere:

$$(\tau_{scab})_n \cdot P_n = \gamma_w \cdot A_n \cdot i \quad 1.1.3.2$$

l'area della sezione di influenza dell'n-esimo può essere valutata come:

$$A_n = \frac{\left(\frac{V}{\sqrt{i}}\right)^{3/2}}{K_{S_n}^{3/2}} \cdot P_n \quad [\text{m}^2] \quad 1.1.3.3$$

Sostituendo la 1.1.3.3 nella 1.1.3.2 si ottiene:



$$(\tau_{scab})_n \cdot P_n = \gamma_w \cdot \left(\frac{V}{\sqrt{i}} \right)^{3/2} \cdot \frac{1}{Ks_n^{3/2}} \cdot P_n \cdot i \quad 1.1.3.4$$

e quindi:

$$(\tau_{scab})_n = \gamma_w \cdot \left(\frac{V}{\sqrt{i}} \right)^{3/2} \cdot \frac{1}{Ks_n^{3/2}} \cdot i \quad 1.1.3.5$$

Ricordando l'espressione di Gaukler-Strickler riferita all'intera sezione, possiamo scrivere:

$$\left(\frac{V}{\sqrt{i}} \right)^3 = Ks_{eq}^{3/2} \cdot \frac{A_{sezione}}{P_{bagnato}} \quad 1.1.3.6$$

Inseriamo ora 1.1.3.6 nella 1.1.3.5:

$$(\tau_{scab})_n = \gamma_w \cdot \frac{Ks_{eq}^{3/2} \cdot \frac{A_{sezione}}{P_{bagnato}}}{Ks_n^{3/2}} \cdot i = \gamma_w \cdot \frac{Ks_{eq}^{3/2} \cdot R}{Ks_n^{3/2}} \cdot i \quad [\text{Pa}] \quad 1.1.3.7$$

ma lo sforzo tangenziale medio riferito all'intera sezione vale $\tau_o = \gamma_w \cdot R \cdot i$, quindi lo sforzo tangenziale medio esercitato sul generico tratto del perimetro bagnato caratterizzato da un valore costante di Ks è dato dalla seguente relazione:

$$\tau_{scab} = \tau_o \cdot \left(\frac{Ks_{eq}}{Ks} \right)^{3/2} \quad [\text{Pa}] \quad 1.3.8$$



In definitiva, lo sforzo di trascinamento nel punto considerato è calcolato come media ponderale dei tre elementi visti in precedenza τ_{pos} , τ_{cur} e τ_{scab} :

$$\tau = \sum \alpha_i \cdot \tau_i = \alpha_{pos} \cdot \tau_{pos} + \alpha_{cur} \cdot \tau_{cur} + \alpha_{scab} \cdot \tau_{scab}$$
$$\tau = \left(\sum \alpha_i \cdot \eta_i \right) \cdot \tau_o = \left(\alpha_{pos} \cdot \eta_{pos} + \alpha_{cur} \cdot \eta_{cur} + \alpha_{scab} \cdot \eta_{scab} \right) \cdot \tau_o$$

La somma dei 3 coefficienti di peso deve essere uguale ad 1:

$$\sum_{i=1}^3 \alpha_i = 1$$

I coefficienti di peso sono assimilati a delle variabili statistiche normaldistribuite caratterizzate da un valore medio deducibile dalla Tabella 1.1.3.1. Tali valori sono stati ottenuti da un elaborazione statistica di un numero discreto di dati sperimentali ricavati da un indagine in sito su un piccolo corso d'acqua di montagna (Bongio, 1999).

	Simbolo	Valori Medi
Posizione	α_{pos}	0.20 – 0.40
Curvatura	α_{cur}	0.20 – 0.30
Scabrezza	α_{scab}	0.40 - 0.60

Tabella 1.1.3.1 Valori consigliati per i coefficienti ponderali utilizzati per il calcolo dell'azione di trascinamento (Bongio, 1999)

Come si può notare dai valori consigliati, un ruolo fondamentale nella definizione dello sforzo di trascinamento agente è giocato dalla scabrezza idraulica.

	Media	Scarto Quadratico Medio
α_{pos}	0.30	0.0324
α_{scab}	0.50	0.0324



La media delle variabili normaldistribuite α_{scab} e α_{pos} è posta uguale alla media aritmetica degli estremi dell'intervallo proposto in Tabella 1.3.1. Indichiamo con x indistintamente una tra le due variabili normaldistribuite α_{scab} e α_{pos} . Lo scarto quadratico medio è stato determinato imponendo che la probabilità di avere valori minori o uguali di $\mu_x - (\mu_x - x_{min})$ sia pari a 0.1 % vale a dire:

$$P(x \leq \mu_x - (\mu_x - x_{min})) = 0.001$$

dove:

- μ è la media
- x_{min} è il minimo valore che la variabile statistica x può assumere.

E' facile dimostrare che lo scarto quadratico medio σ_x non dipende dalla media μ_x , ma solo ed esclusivamente dalla distanza massima consentita tra il valor medio ed il valore minimo della variabile x , infatti passando dalla variabile x alla variabile standardizzata y , si ottiene:

$$P\left(\frac{x - \mu_x}{\sigma_x} \leq \frac{(\mu_x - \Delta_x) - \mu_x}{\sigma_x}\right) = P\left(y \leq \frac{(\mu_x - \Delta_x) - \mu_x}{\sigma_x}\right) = 0.001$$

e quindi:

$$\frac{-\Delta_x}{\sigma_x} \cong -3.090$$

dunque:

$$\sigma_x \cong 0.324 \cdot \Delta_x$$



Per associare un valore alle variabili α_{scab} e α_{pos} vengono generati 2 numeri casuali $N_{\alpha_{scab}}$ e $N_{\alpha_{pos}}$ compresi tra 0 e 1. Essi rappresentano le probabilità che le variabili statistiche α_{scab} e α_{pos} siano minori o eguali dei rispettivi valori ricercati α_{scab}^* e α_{pos}^* :

$$P(\alpha_{scab} \leq \alpha_{scab}^*) = N_{\alpha_{scab}}$$

$$P(\alpha_{pos} \leq \alpha_{pos}^*) = N_{\alpha_{pos}}$$

Automaticamente vengono forniti i valori delle variabili α_{scab} e α_{pos} associati ai livelli di probabilità relativi ai numeri casuali generati. Per rispettare la condizione $\sum_{i=1}^3 \alpha_i = 1$, il parametro α_{cur} è ottenuto per differenza:

$$\alpha_{cur} = 1 - \alpha_{pos} - \alpha_{scab}$$

1.2 Definizione dello sforzo di trascinamento critico

Come già avuto modo di ricordare, lo sforzo di trascinamento critico per la struttura “gabbione” è valutato attraverso la nota teoria di Shields e corretto attraverso una serie di coefficienti di natura empirica in grado di quantificare, seppure in maniera approssimativa, gli effetti di alcune circostanze che portano lo sforzo critico ad assumere un valore diverso da quello fornito dalla citata teoria di Shields.

Il parametro di mobilità di Shields in condizioni di equilibrio limite, viene opportunamente corretto per tenere in debito conto i seguenti fattori:

1. il parametro di Shields ($\vartheta_{Shields} \cong 0.05 \div 0.06$) si riferisce ad un sasso situato sul fondo di un corso d'acqua caratterizzato da pendenza nulla



(fondo piano), mentre all'interno di un gabbione la disposizione spaziale dei sassi limitrofi a quello considerato può dare vita ad un ipotetico piano d'appoggio caratterizzato da un angolo di inclinazione α diverso da zero; nella circostanza in cui tali particelle siano posizionate su un piano inclinato di un angolo α rispetto all'orizzontale, le condizioni critiche (di equilibrio limite) vengono raggiunte con minori sforzi tangenziali, essendo ridotta di un fattore $\cos\alpha$ la forza stabilizzante (peso del sasso).

2. l'azione di contenimento esercitata dalla rete metallica permette al materiale lapideo contenuto all'interno del gabbione di resistere a sollecitazioni idrodinamiche maggiori rispetto, per esempio, ai sassi che costituiscono un rivestimento in pietrame sciolto.
3. il gabbione è in grado di resistere a sollecitazioni idrodinamiche maggiori rispetto a quelle valutate attraverso la semplice applicazione della teoria di Shields, in quanto quest'ultima fornisce la condizione di mobilità di un singolo sasso insufficiente per determinare la crisi dell'intera struttura; dunque, se si ammette che il gabbione, in virtù della sua elasticità, sia in grado di tollerare deformazioni, esso è capace di tollerare sollecitazioni maggiori rispetto a quelle valutate attraverso la teoria di Shields .

Lo sforzo di trascinamento critico è valutato attraverso la formula:

$$\tau_c = \eta_{gab} \cdot \eta_\alpha \cdot \mathcal{G}_{Shields} \cdot \mathcal{X}_{def} \cdot (\gamma_s - \gamma_w) \cdot d_{gab} = \eta_\alpha \cdot \mathcal{G}_{gab} \cdot \mathcal{X}_{def} \cdot (\gamma_s - \gamma_w) \cdot d_{gab}$$

dove:

- η_{gab} è un coefficiente correttivo per quantificare la capacità del materiale lapideo contenuto nel gabbione di resistere a sollecitazioni idrodinamiche maggiori rispetto, per esempio, ai sassi che costituiscono un rivestimento in pietrame sciolto. E' stato visto sperimentalmente che



l'azione di contenimento esercitata dalla rete metallica determina un notevole incremento del parametro di mobilità critico di Shields, infatti:

- $\mathcal{G}_{Shields} = 0.05 \div 0.06$ per rivestimenti in pietrame sciolto.
- $\mathcal{G}_{gab} = \eta_{gab} \cdot \mathcal{G}_{Shields} = 0.1 \div 0.12$ per sassi costituenti il riempimento di un materasso in rete metallica.

Questo significa che l'impiego di gabbioni permette, a parità di condizioni idrauliche, l'utilizzo di materiale lapideo di dimensioni minori rispetto ad un rivestimento in pietrame sciolto.

- η_{α} è un coefficiente correttivo ($<$ di 1) determinato attraverso la formula di Lane, proposta per la correzione del parametro di Shields relativo a sassi posti su fondo orizzontale:

$$\eta_{\alpha} = \sqrt{1 - \frac{\text{sen}^2 \alpha}{\text{sen}^2 \phi}}$$

- dove ϕ è l'angolo d'attrito del materiale in esame.
 - γ_s è il peso specifico dei sassi che costituiscono il riempimento del gabbione.
-
- γ_w è il peso specifico dell'acqua (o della corrente liquido solida).
 - d_{gab} rappresenta la dimensione media dei sassi che costituiscono il riempimento del gabbione.
 - χ_{def} è un coefficiente moltiplicativo (maggiore di 1) in grado di quantificare, seppure in maniera piuttosto approssimativa, la circostanza che vede il gabbione resistere a sollecitazioni idrodinamiche maggiori rispetto a quelle calcolate con la precedente equazione, in quanto si conside-



ra che la struttura “gabbione” sia in grado, in virtù della sua enorme elasticità, di tollerare delle deformazioni di entità limitate incapaci di pregiudicare la stabilità e la funzionalità dell’opera.

Il prodotto del parametro di mobilità di Shields in condizioni critiche per il coefficiente correttivo η_{mat} rappresenta il parametro di Shields, in condizioni critiche, per i sassi che costituiscono il riempimento del gabbione ed è indicato con \mathcal{G}_{gab} .

2. Dimensionamento Scogliera in massi alla rinfusa

2.1 Approccio proposto da Stevens (1976)

Si illustrano i principali fondamenti teorici dell’approccio proposto da Stevens per la progettazione di scogliere in massi alla rinfusa. Tale approccio è stato utilizzato nelle numerose analisi eseguite per confrontare la soluzione “Scogliera” con la soluzione alternativa “Gabbioni”.

La pendenza della sponda, sicuramente inferiore all’angolo d’attrito del materiale utilizzato, e la pezzatura media degli elementi lapidei costituenti la scogliera o la gettata devono essere determinate con i criteri dedotti dalla nota teoria dell’equilibrio limite, con le opportune correzioni per conteggiare l’incremento della mobilità dei massi posti su sponda inclinata.

Dopo aver ottenuto una dimensione caratteristica per i massi che costituiranno la scogliera, ~~essa deve essere convenientemente incrementata per ottenere~~ un sufficientemente alto coefficiente di sicurezza.

Si riportano di seguito le formule fornite dalla teoria di Stevens, dedotta dopo un’approfondita analisi sui momenti delle forze agenti su un generico elemento solido.



$$\sigma = \frac{21 \cdot \tau}{\left(\frac{\gamma_s}{\gamma_w} - 1 \right) \cdot \gamma_w \cdot d_m} = \frac{0.30 \cdot u_r^2}{\left(\frac{\gamma_s}{\gamma_w} - 1 \right) \cdot g \cdot d_m}$$

$$\beta = \arctan \left(\frac{\cos \lambda}{\frac{2 \cdot \sin \theta}{\sigma \cdot \tan \phi} + \sin \lambda} \right)$$

$$\frac{\sigma'}{\sigma} = \frac{1 + \sin(\lambda + \beta)}{2}$$

$$F_s = \frac{\cos \theta \cdot \tan \phi}{\sigma' \cdot \tan \phi + \sin \theta \cdot \cos \beta}$$

dove:

- τ è l'azione di trascinamento esercitata dalla corrente sul masso, [Pa]
- d_m è il diametro medio del masso, [m]
- F_s è il coefficiente di sicurezza al ribaltamento del masso rispetto al punto di rotazione. Tale coefficiente non è altro che il rapporto tra il momento risultante delle forze stabilizzanti ed il momento risultante delle forze ribaltanti.
- ϑ è l'angolo di inclinazione adottato per la scarpata, [°]
- ϕ è l'angolo d'attrito del materiale in acqua, [°]
- β è l'angolo che la direzione di caduta del masso forma con la linea di massima pendenza della scarpata, [°]



- λ è l'angolo diedro esistente tra il piano orizzontale ed il piano inclinato costituente il fondo del corso d'acqua, [°]. La tangente di detto angolo non è altro che la pendenza del fondo dell'alveo:

$$i = \tan \lambda \quad [\text{m/m}]$$

- σ' e σ sono i numeri di stabilità del masso rispettivamente su sponda inclinata e fondo piatto.

$$\sigma \Rightarrow \theta = 0$$

$$\sigma' \Rightarrow \theta \neq 0$$

- u_r è la velocità della corrente in corrispondenza del masso considerato, [m/s].

Una stima della velocità con cui la corrente impatta sul masso considerato può essere ottenuta dalla legge logaritmica di distribuzione di velocità lungo la verticale in condizioni di moto assolutamente turbolento:

$$u(y) = 2.5 \cdot u_* \cdot \ln \left(30.2 \frac{y}{d_m} \right)$$

dove u_* non è altro che la velocità d'attrito, calcolabile con la formula

$$u_* = \sqrt{\frac{\tau}{\rho_w}}$$

in cui ρ_w è la densità dell'acqua, [Kg/m³]

Integrando la formula che fornisce la velocità della corrente sulla verticale, si ottiene per la velocità media della corrente la seguente espressione:



$$V = 2.5 \cdot u_* \cdot \ln \left(12.3 \cdot \frac{y_o}{d_m} \right)$$

in cui y_o è il tirante idrico.

Ammettendo che la velocità u_r sia corrispondente alla profondità $y=d_m$, dalle espressioni viste in precedenza si ottiene:

$$u_r = \frac{3.4}{\ln \left(12.3 \cdot \frac{y_o}{d_m} \right)} \cdot V$$

dalla quale si può ottenere la velocità u_r noti il tirante idraulico e la velocità media della corrente V .

Quest'ultima formula può essere utilizzata solo ed esclusivamente in condizioni di alta sommergenza, vale a dire quando il tirante idraulico è almeno 6 volte maggiore del diametro dei sassi che costituiscono la scogliera ($y_o/d_m > 6$). In condizioni di bassa sommergenza ($y_o/d_m < 6$), quando la turbolenza e l'areazione della corrente sono molto elevate, in via pratica si può assumere:

$$u_r = V$$

Le formule proposte permettono di verificare la stabilità di una scogliera: ipotizzata, infatti, una dimensione d_m dei massi che la costituiscono, noto l'angolo di inclinazione della scarpata e l'angolo d'attrito del materiale, si stima la velocità u_r e la sua direzione e quindi si calcola il coefficiente di sicurezza F_s . Se questo risulta maggiore di uno significa che la scogliera è stabile. In fase progettuale è consigliabile prevedere coefficienti di sicurezza adeguatamente elevati (maggiori di 3).



Parte III

1. Breve descrizione del programma GABSCOG

E' stato messo a punto un programma informatico (GabScog, Bongio 2002) in grado di fornire utili indicazioni sulla scelta della tipologia di intervento per proteggere le sponde di un corso d'acqua.

Il programma richiede come dati di ingresso la definizione della geometria della sezione trasversale del corso d'acqua oggetto dell'intervento di sistemazione idrogeologica, in altre parole occorre precisare:

- Larghezza di base della sezione, B_{base} [m]
- Pendenza longitudinale del corso d'acqua nell'intorno della sezione dove ha sede l'intervento, i [m/m]
- Pendenza da assegnare alle sponde dove sistemare i sassi nell'intervento "scogliera" ϑ [°]
- Geometria della gabbionata in termini di altezze h [m] degli elementi e larghezza b dei tratti suborizzontali [m] e inclinazione di base i_{base} [°]

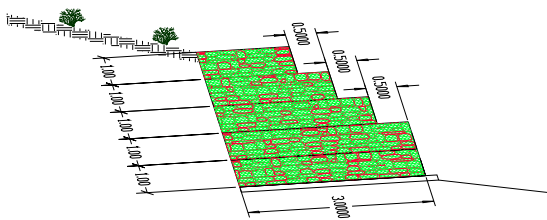


Figura 1.1 Esempio di definizione della geometria di un argine in gabbioni.

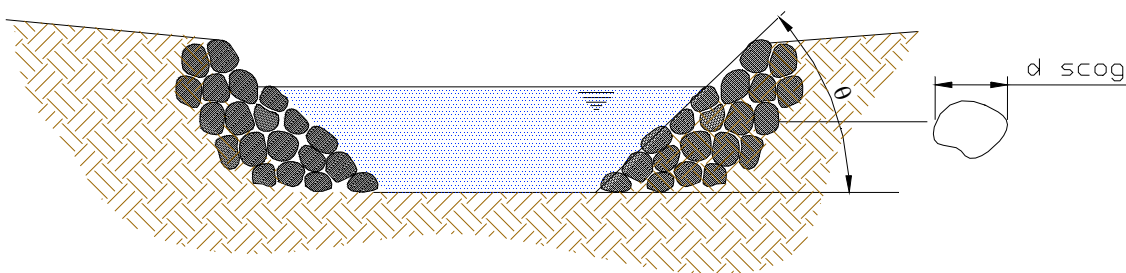


Figura 1.2 Esempio di definizione della geometria di una scogliera

- Raggio di curvatura del corso d'acqua r [m], se il suo andamento planimetrico non risultasse rettilineo.
- Angolo che l'ipotetico piano d'appoggio su cui giace un generico elemento lapideo all'interno del gabbione forma con l'orizzontale, α [°]

Le caratteristiche del materiale lapideo utilizzato:

- Dimensione media caratteristica del materiale utilizzato [m]
- Peso Specifico [kN/m^3]
- Angolo d'attrito ϕ [°]

Inoltre occorre precisare i coefficienti di scabrezza:

- Coefficiente di scabrezza del fondo alveo Ks_{fondo} [$\text{m}^{1/3}/\text{s}$]
- Coefficiente di scabrezza attribuite ai tratti di perimetro bagnato occupati da scogliera o gabbionate Ks_{scab} e Ks_{gab} [$\text{m}^{1/3}/\text{s}$]

Infine occorre precisare una portata di progetto Q_{prog} [m^3/s]

Assegnati i dati di ingresso in precedenza elencati, il programma, attraverso le teorie espone in precedenza, fornisce i coefficienti di sicurezza Fs_{gab} e Fs_{scog} associati agli interventi di progetto e ne calcola un rapporto in grado di fornire indicazioni immediate sui maggiori margini di sicurezza offerti dall'intervento in gabbioni rispetto alla scogliera.



Si ricorda che nell'intervento "scogliera" il fattore di sicurezza è definito dall'espressione :

$$F_s = \frac{\cos \theta \cdot \tan \phi}{\sigma' \cdot \tan \phi + \sin \theta \cdot \cos \beta}$$

mentre per la gabbionata il fattore di sicurezza non è altro che il rapporto dell'azione di trascinamento critica (quella in grado di "mettere in crisi" la struttura) e l'azione di trascinamento effettivamente agente sui gabbioni.

Il programma può anche essere utilizzato per fornire, a parità di fattore di sicurezza, le dimensioni medie degli elementi lapidei utilizzati nell'intervento "scogliera" d_{scog} e nell'intervento "gabbionata" d_{gab} necessari per garantire il margine di sicurezza prestabilito. Con η_d si indica la grandezza:

$$\eta_d = \frac{d_{scog}}{d_{gab}}$$

2. Confronto tra la soluzione "gabbione" e soluzione "scogliera" in interventi di difesa spondale in termini di fattore di sicurezza.

Sono state eseguite 143 analisi di confronto tra la soluzione "gabbione" e la soluzione "scogliera" facendo variare la larghezza di base della sezione trasversale, la pendenza longitudinale del corso d'acqua, la pendenza delle sponde, la dimensione caratteristica del materiale lapideo utilizzato e la portata di progetto.

Si sono considerati costanti i seguenti parametri:

- $\phi = 36^\circ$
- $\vartheta_{gab} = 5^\circ$
- $Ks_{fondo} = 35 \text{ m}^{1/3}/s$
- $Ks_{gab} = 30 \text{ m}^{1/3}/s$

Il coefficiente di scabrezza ks_{scog} è stato calcolato con la formula:



$$Ks_{scog} = \frac{26}{d^6}$$

con d in metri e Ks in $m^{1/3}/s$.

Definito il parametro ξ nel modo seguente:

$$\xi = \left(\frac{Q_{prog}}{B_{base}} \right)^{-2.5} \cdot g^{5.9078} \cdot i^{-0.8} \cdot d^{6.4818}$$

è possibile osservare in Figura 2.1 l'andamento del rapporto Fs_{gab}/Fs_{scog} in funzione di tale parametro e svolgere interessanti considerazioni sui maggiori margini di sicurezza offerti dalle gabbionata rispetto a quelli legati ad un intervento "scogliera".

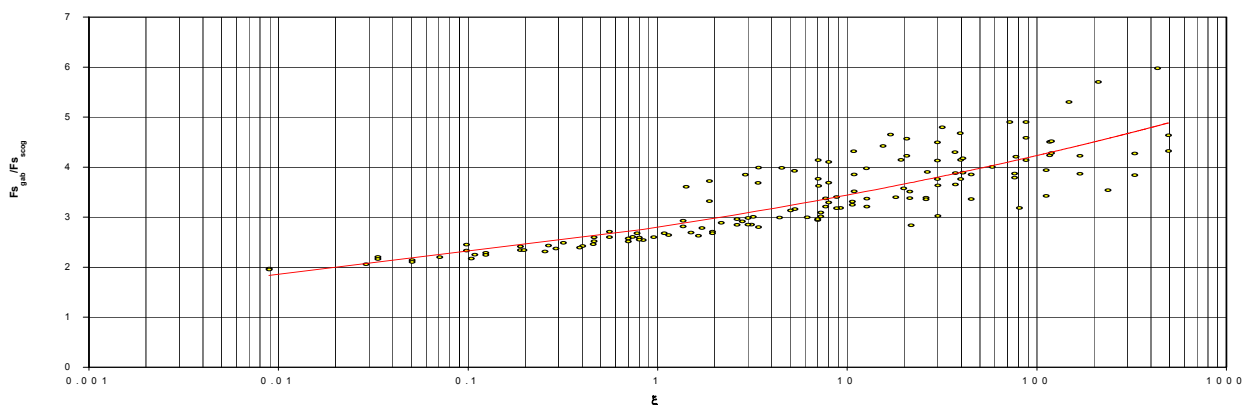


Figura 2.1 Andamento del rapporto Fs_{gab}/Fs_{scog} in funzione del parametro ξ



Innanzitutto è importante notare che per tutti i 143 casi esaminati si ha che $F_{s_{gab}}$ è più del doppio di $F_{s_{scog}}$: questo significa essenzialmente che l'azione di contenimento esercitata dalla rete metallica a doppia torsione consente ai gabbioni di raggiungere condizioni di sicurezza, a parità di condizioni geometriche e idrauliche, decisamente maggiori rispetto alla scogliera.

E' utile sottolineare alcune considerazioni:

- All'aumentare della pendenza della sponda ϑ , il rapporto $F_{s_{gab}}/F_{s_{scog}}$ cresce.
- Al crescere della dimensione lapidea del materiale lapideo d , il rapporto $F_{s_{gab}}/F_{s_{scog}}$ cresce.
- Al variare della pendenza longitudinale, il rapporto $F_{s_{gab}}/F_{s_{scog}}$ resta pressoché costante.

Al fine di evidenziare questi aspetti si riportano i seguenti grafici esplicativi.

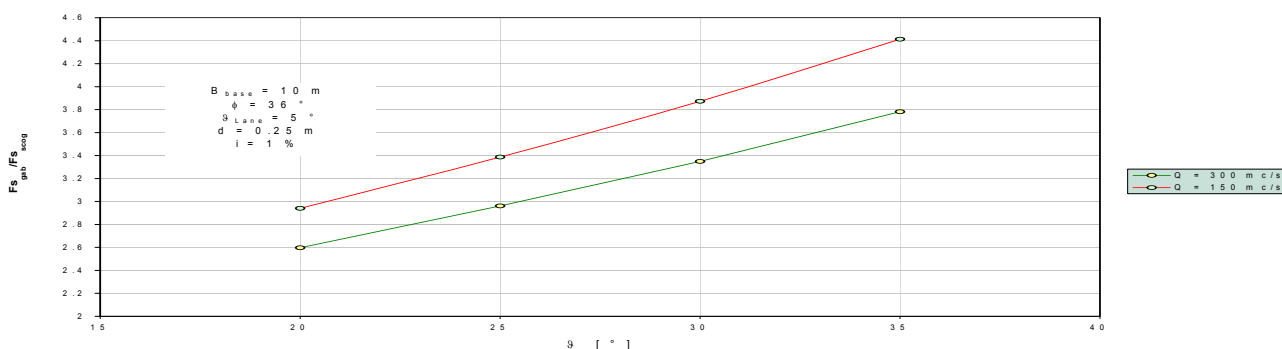


Figura 2.2 Influenza della pendenza assegnata alla sponda dove sono posizionati i massi che costituiscono la scogliera.

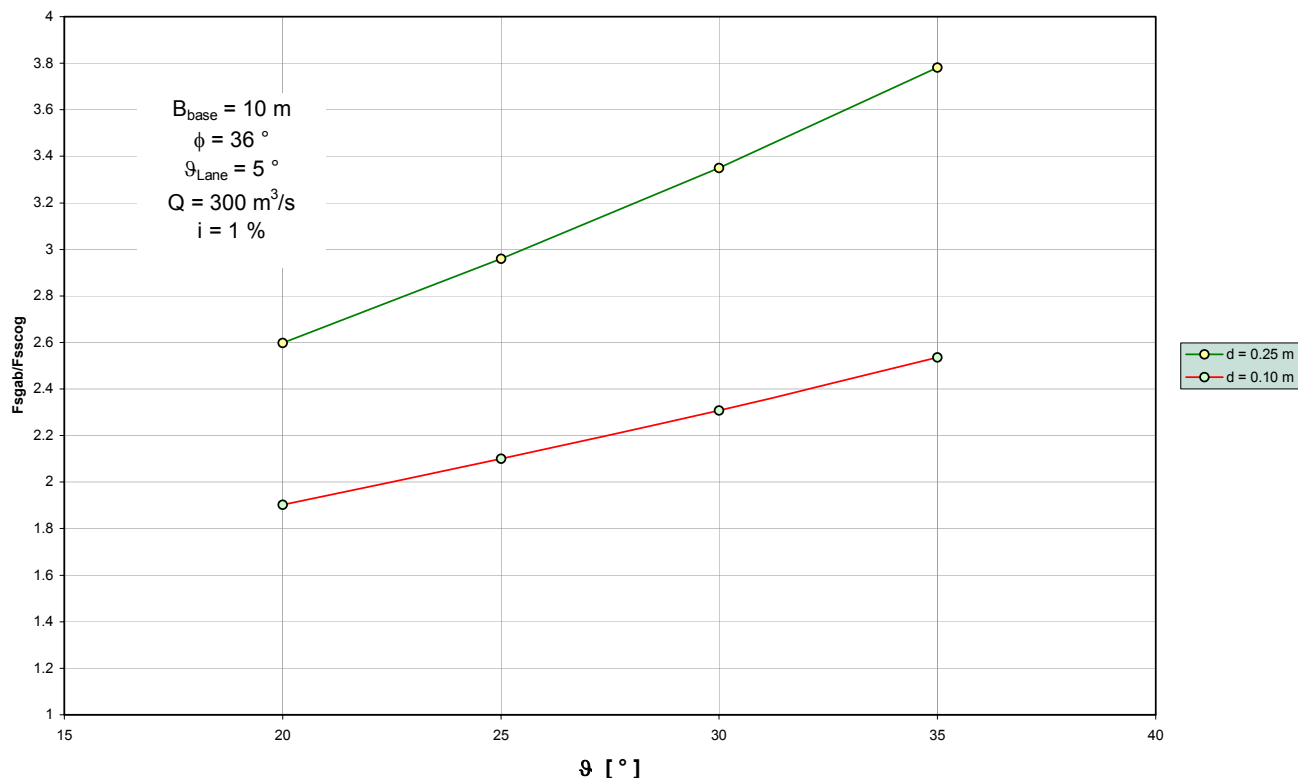


Figura 2.3 Influenza della pezzatura del materiale lapideo utilizzato

3. Confronto tra la soluzione “gabbione” e soluzione “scogliera” in interventi di difesa spondale in termini di dimensione del materiale lapideo a parità di condizioni di sicurezza

Sono state eseguite 157 analisi di confronto tra la soluzione “gabbione” e la soluzione “scogliera” facendo variare la larghezza di base della sezione trasversale, la pendenza longitudinale del corso d’acqua, la pendenza delle sponde e la portata di progetto, andando a determinare la dimensione caratteristica del materiale lapideo necessaria per il raggiungimento della condizione di equilibrio limite $F_s=1$.

Si sono considerati costanti i seguenti parametri:

- $\phi=36^\circ$



- $\vartheta_{gab} = 5^\circ$
- $Ks_{fondo} = 35 \text{ m}^{1/3}/s$
- $Ks_{gab} = 30 \text{ m}^{1/3}/s$

Il coefficiente di scabrezza ks_{scog} è stato calcolato con la formula:

$$Ks_{scog} = \frac{26}{\frac{1}{d^6}}$$

con d in metri e Ks in $\text{m}^{1/3}/s$.

Siccome a parità di altre condizioni (larghezza di base, pendenza longitudinale, $\vartheta = \text{cost}$), al variare della portata il rapporto η_d , definito in precedenza, resta pressoché costante si è proceduto a calcolare una media dei casi esaminati, vale a dire mantenendo costante B_{base} , i e ϑ si calcola η_d per diverse portate dopodiché si calcola una media. Si sono calcolati 38 valori medi e sono stati inseriti in un piano cartesiano dove nell'asse delle ascisse è stato inserito il parametro χ , definito nella maniera seguente:

$$\chi = i^{0.065} \cdot B_{base}^{-0.1} \cdot \vartheta^{-1.55}$$

Osservando la curva riportata in Figura 3.1 è facile rendersi conto come l'azione di contenimento della rete metallica permette di utilizzare sassi di dimensioni decisamente minori rispetto a quelli necessari per formare una scogliera.

L'aspetto più importante da sottolineare è che all'aumentare della pendenza della sponda η_d aumenta, vale a dire le dimensioni dei massi necessari per la formazione di una scogliera crescano con tutte le problematiche relative illustrate in precedenza.

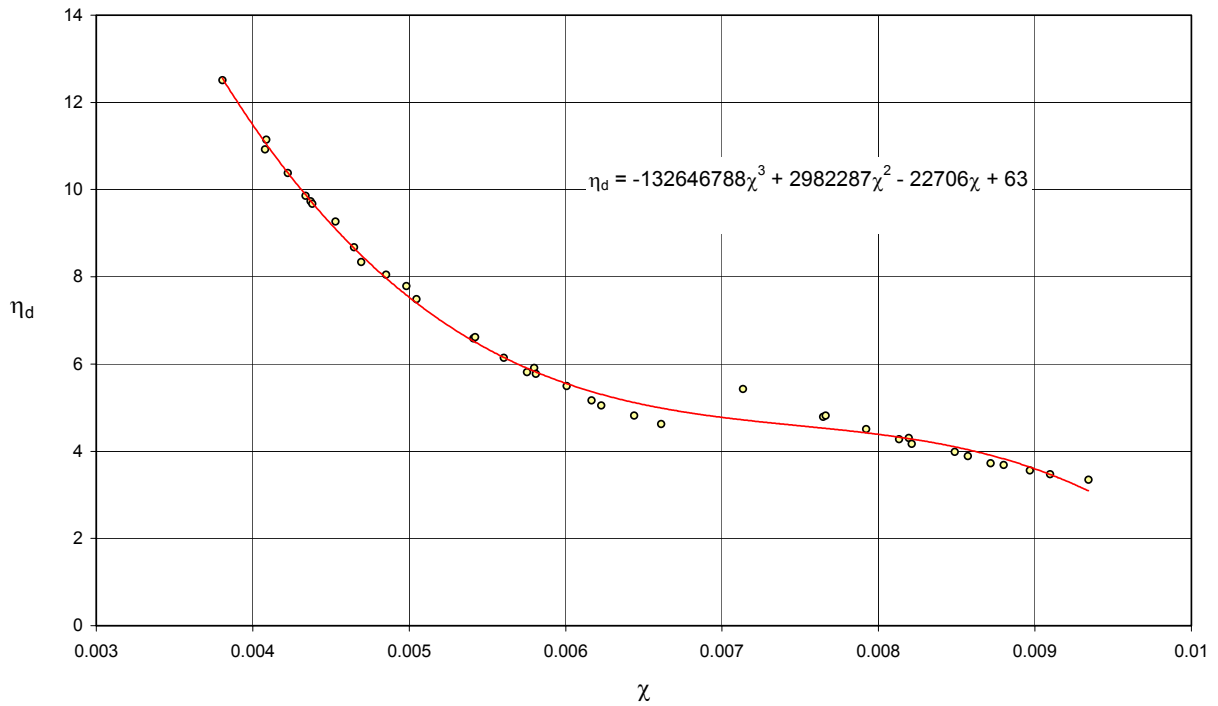


Figura 3.1 Andamento del rapporti η_d in funzione del parametro χ



4. Scelta della pezzatura del materiale lapideo da inserire nelle gabbionata in interventi di difesa spondale

Le numerose analisi eseguite hanno permesso di determinare una formula empirica per la stima della dimensione minima (vale a dire corrispondente alla situazione di equilibrio limite $\tau_{critico}=\tau_{agente}$) che deve possedere il materiale lapideo contenuto nelle gabbionata. Per applicare la formula proposta è sufficiente conoscere esclusivamente la portata specifica $q=Q/B_{base}$ e la pendenza longitudinale del corso d'acqua i .

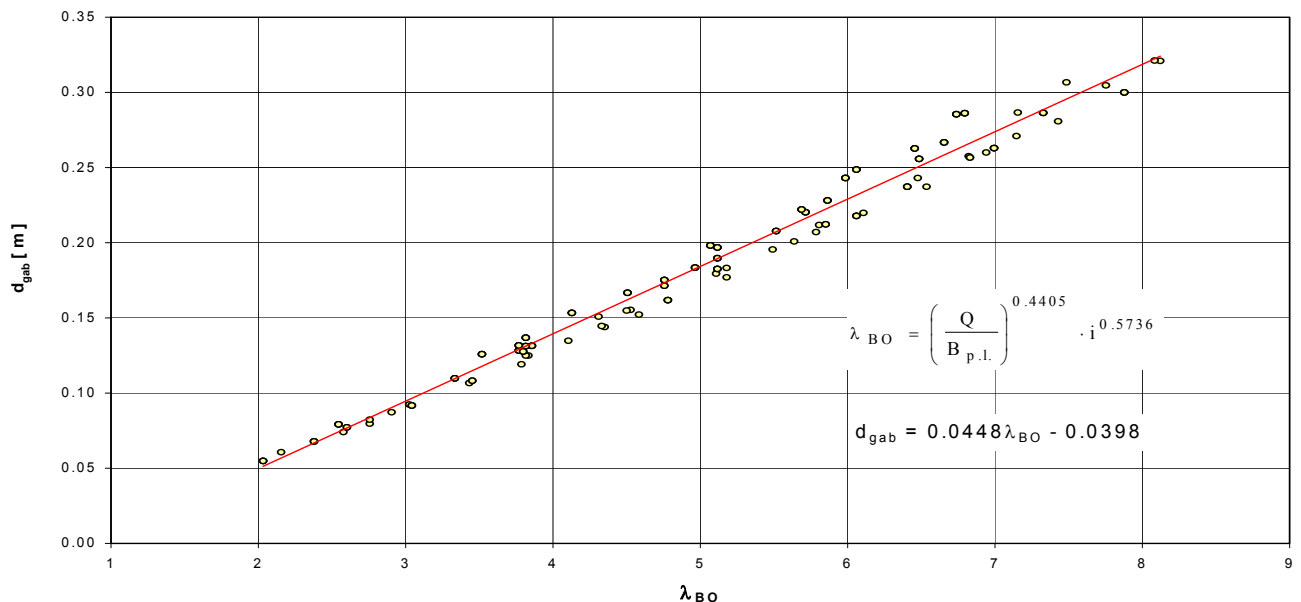


Figura 4.1 Dimensione media dei sassi che costituiscono il riempimento lapideo dei gabbioni al variare del parametro λ_{BO}



SOMMARIO

PARTE I.....	1
PREMESSA.....	1
1. DIFESE SPONDALI IN MATERIALE LAPIDEO: GABBIONI E SCOGLIERE.....	1
2. SCOGLIERE E GETTATE DI PIETRAMME: DESCRIZIONE E PRINCIPALI “SVANTAGGI” RISPETTO AD UN INTERVENTO DI DIFESA SPONDALE REALIZZATO CON GABBIONI	1
3. PRINCIPALI CARATTERISTICHE DI UNA DIFESA SPONDALE REALIZZATA IN GABBIONI ..	4
PARTE II.....	5
1. DIMENSIONAMENTO GABBIONATE.....	5
1.1 Determinazione dello sforzo tangenziale di trascinamento esercitato dalla corrente sulla struttura progettata	5
1.1.1 Posizione nella sezione trasversale.....	7
1.1.2 Andamento planimetrico	8
1.1.3 Scabrezza idraulica	9
1.2 Definizione dello sforzo di trascinamento critico.....	13
2. DIMENSIONAMENTO SCOGLIERA IN MASSI ALLA RINFUSA.....	16
2.1 Approccio proposto da Stevens (1976)	16
PARTE III.....	20
1. BREVE DESCRIZIONE DEL PROGRAMMA GABSCOG.....	20
2. <u>CONFRONTO TRA LA SOLUZIONE “GABBIONE” E SOLUZIONE “SCOGLIERA” IN INTERVENTI DI DIFESA SPONDALE IN TERMINI DI FATTORE DI SICUREZZA.</u>	22
3. <u>CONFRONTO TRA LA SOLUZIONE “GABBIONE” E SOLUZIONE “SCOGLIERA” IN INTERVENTI DI DIFESA SPONDALE IN TERMINI DI DIMENSIONE DEL MATERIALE LAPIDEO A PARITÀ DI CONDIZIONI DI SICUREZZA</u>	25
4. SCELTA DELLA PEZZATURA DEL MATERIALE LAPIDEO DA INSERIRE NELLE GABBIONATA IN INTERVENTI DI DIFESA SPONDALE.....	28