



Progettazione e realizzazione
di strutture idrauliche

OPERE IDRAULICHE

Ing Alessandro Cavagni

MACCAFERRI

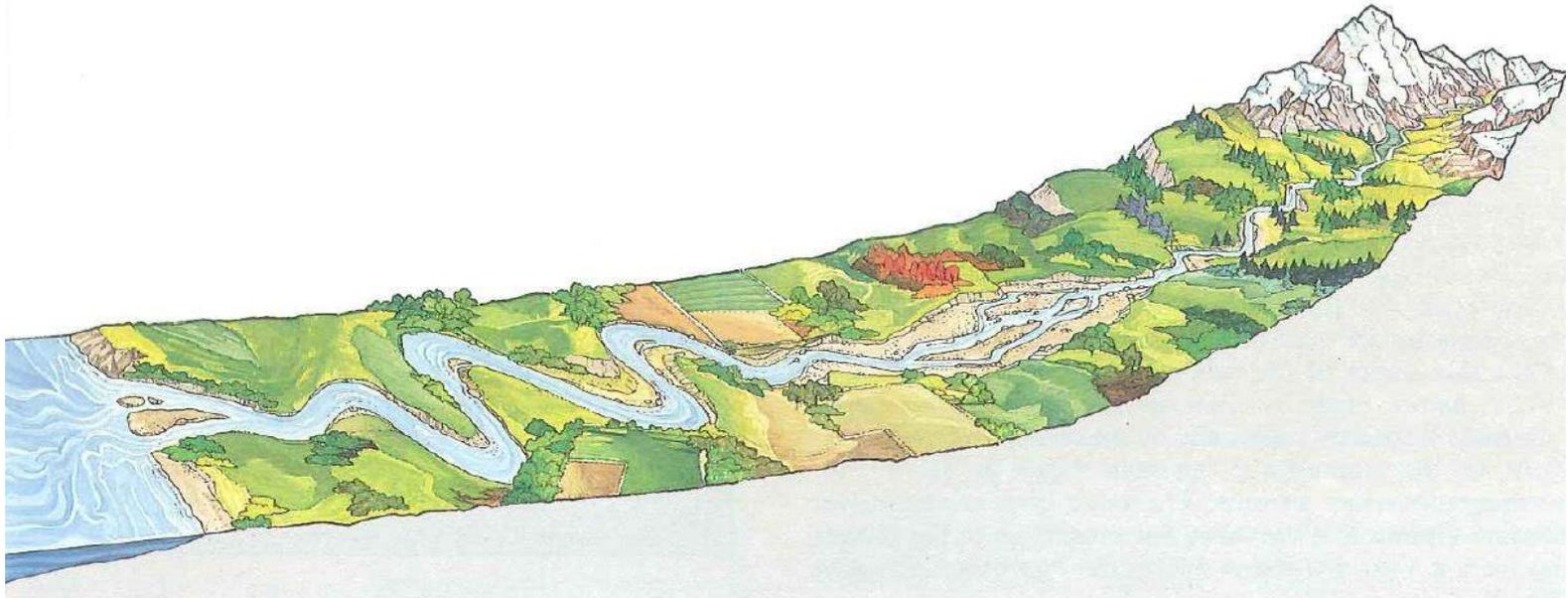
In assenza di rivestimenti o protezioni....



CARATTERISTICHE DEI CORSI D'ACQUA E TIPI DI INTERVENTO

Le caratteristiche dei corsi d'acqua variano significativamente con il clima, il tipo di terreno e la posizione lungo l'asta del corso.

Nella definizione di uno schema dei più comuni interventi idraulici, i fattori più importanti sono legati alle varietà delle situazioni incontrate lungo la lunghezza del corso d'acqua stesso.

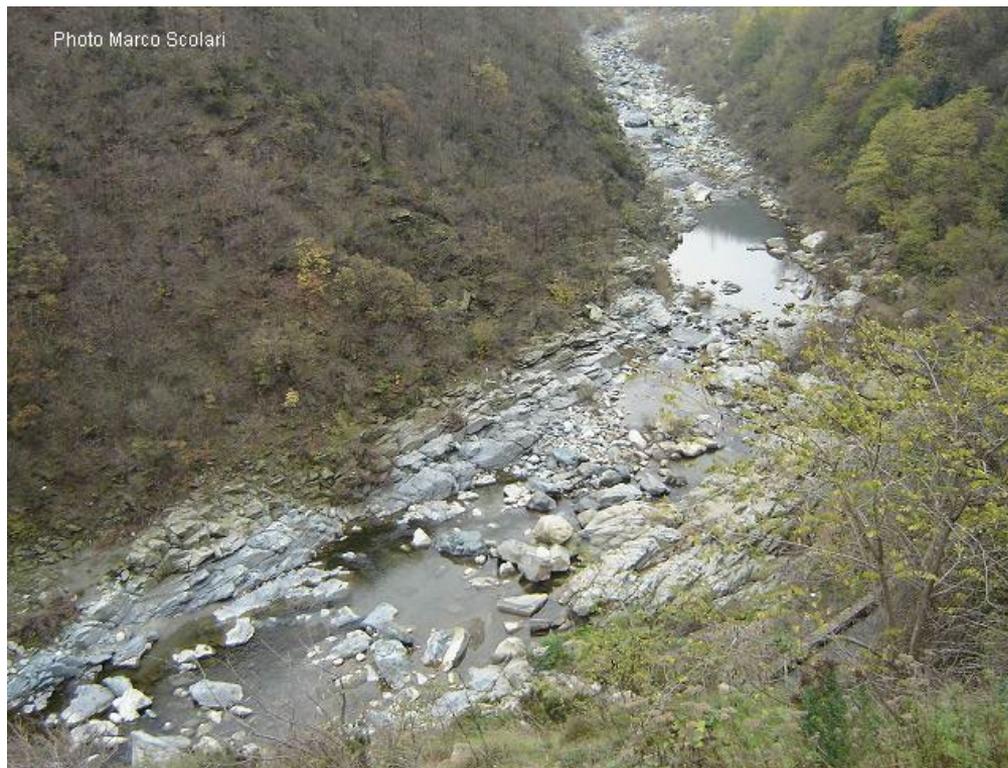


TRATTO MONTANO O BACINO DI RACCOLTA

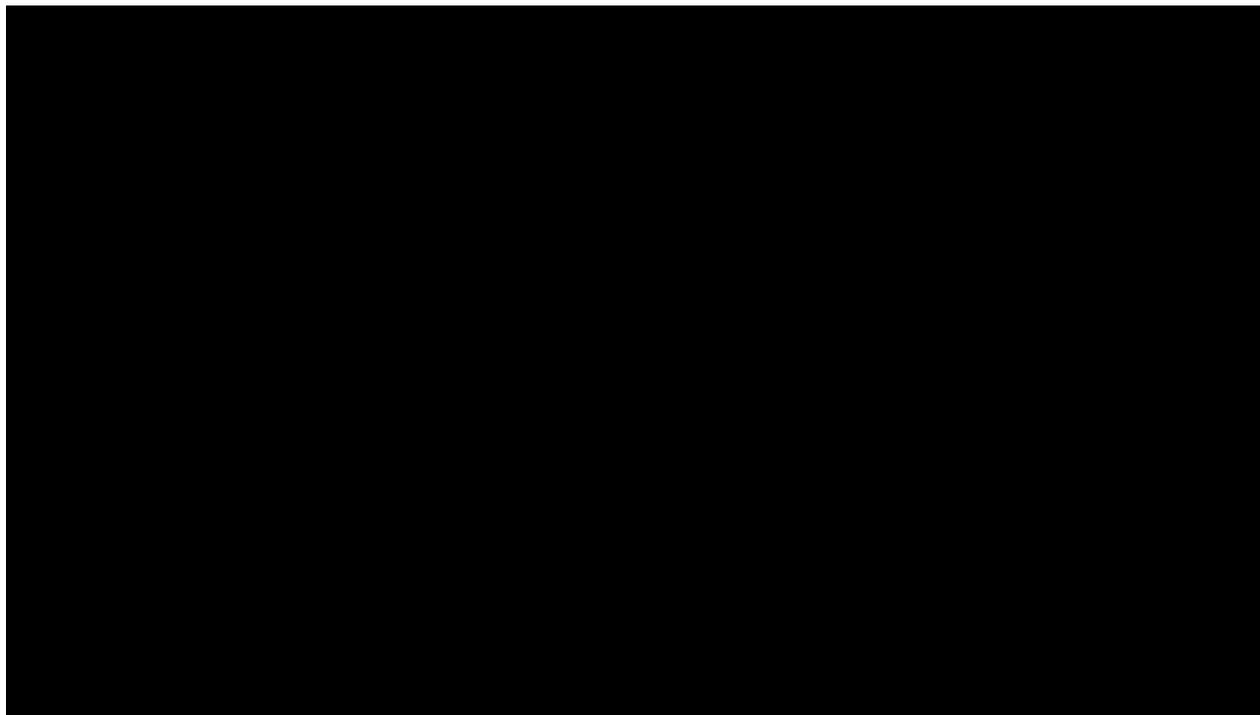
Questo bacino include il corso d'acqua principale e tutti i propri affluenti



TRATTO MONTANO O BACINO DI RACCOLTA



TRATTO MONTANO: INTERVENTI

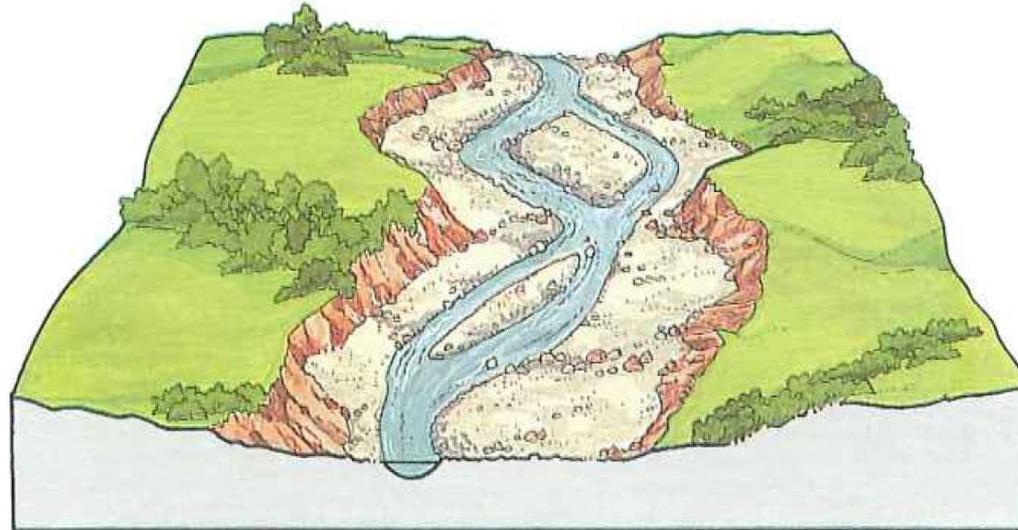


Opere longitudinali in Francia

TRATTO PEDEMONTANO

Allo sbocco delle zone vallive si ha una decisa riduzione di pendenza che provoca una la deposizione del materiale grossolano (cono di deiezione).

In quest'area il letto del fiume è di solito instabile e debolmente inciso, con alveo di magra vagante che può formare isolotti e piccole rapide



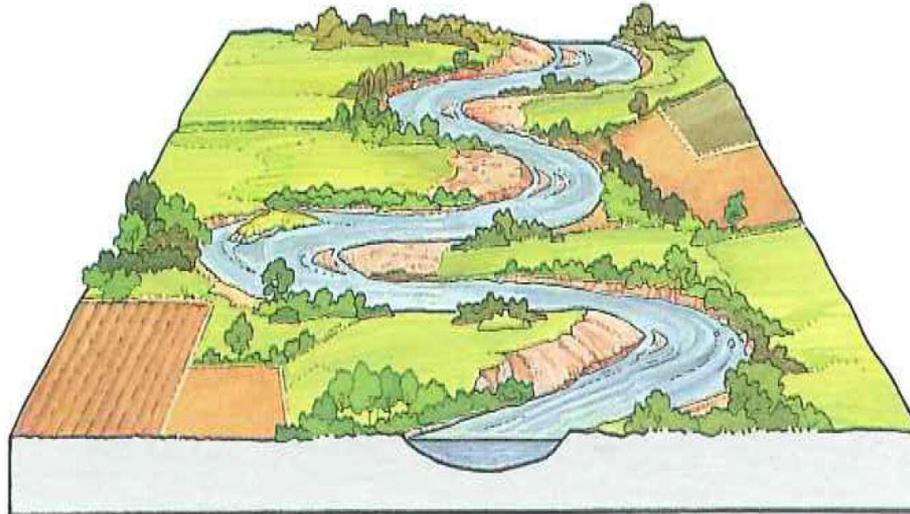
TRATTO PEDEMONTANO

Erosion Control Project in
Belo Horizonte - Brazil



TRATTO VALLIVO

La diminuzione della pendenza necessaria per l'equilibrio della corrente è ottenuta mediante un allungamento del percorso: l'alveo assume un andamento tortuoso con possibili formazioni di meandri o di barre alternate



TRATTO VALLIVO



TRATTO VALLIVO

Groynes Rio Salta, Argentina





TIPOLOGIE BRIGLIE



**A PARETE
VERTICALE**



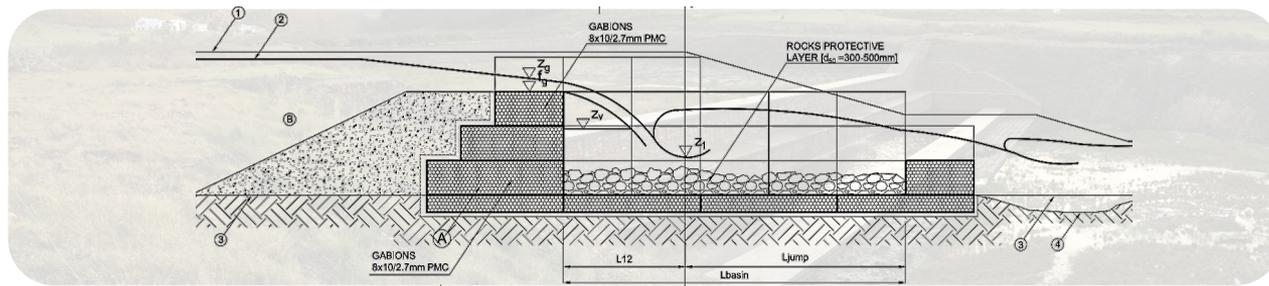
A GRADONI



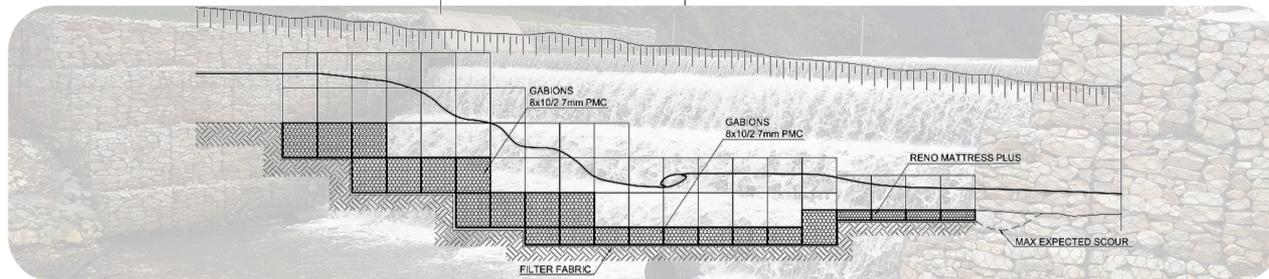
A SCIVOLO



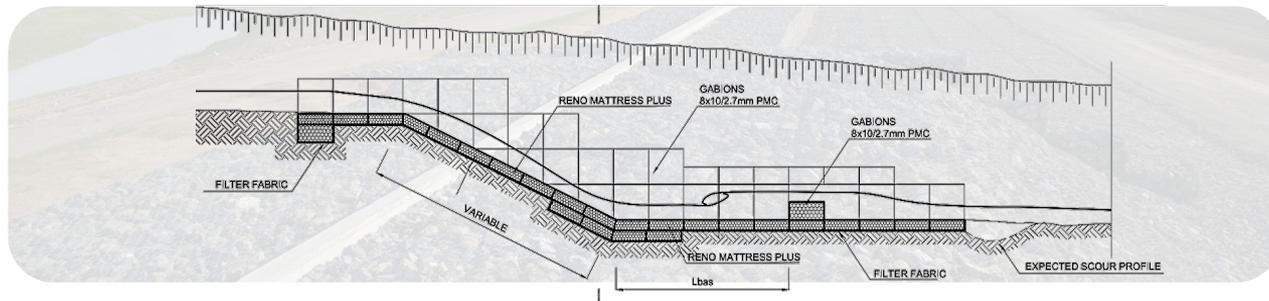
A PARETE
VERTICALE



A GRADONI



A SCIVOLO

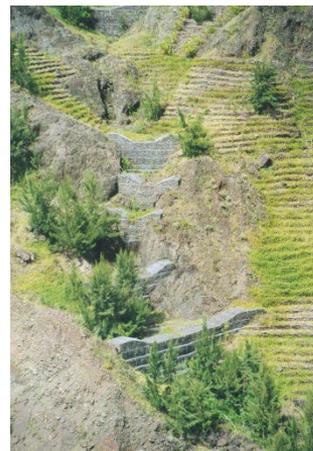
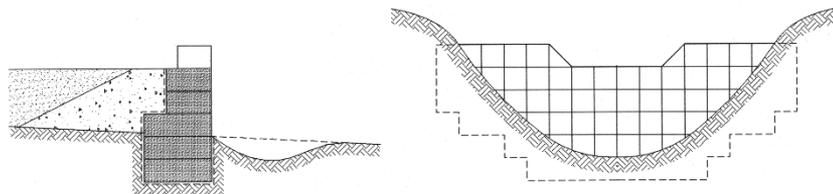


A PARETE
VERTICALE

STEPPED WEIR

SLOPED WEIR

BACINO NON RIVESTITO

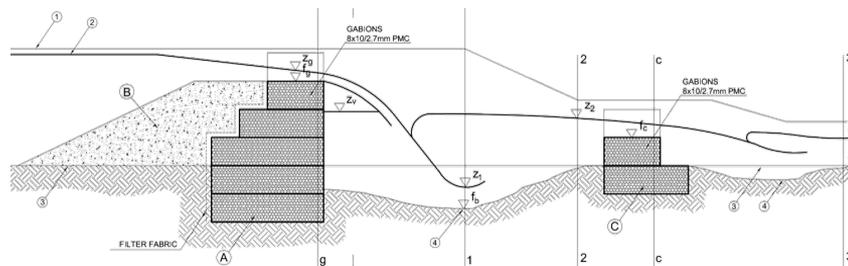


A PARETE
VERTICALE

STEPPED WEIR

SLOPED WEIR

BACINO NON RIVESTITO & CONTROBRIGLIA



A PARETE
VERTICALE

STEPPED WEIR

SLOPED WEIR

BACINO NON RIVESTITO & CONTROBRIGLIA



A PARETE
VERTICALE

STEPPED WEIR

SLOPED WEIR

BACINO NON RIVESTITO & CONTROBRIGLIA



A PARETE
VERTICALE

STEPPED WEIR

SLOPED WEIR

BACINO NON RIVESTITO & CONTROBRIGLIA

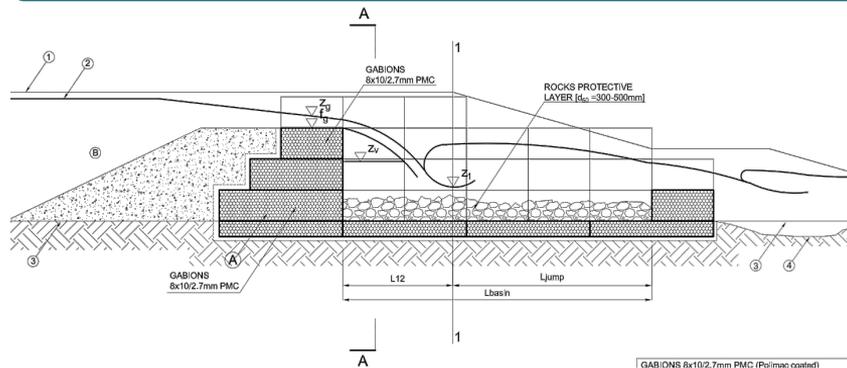


A PARETE
VERTICALE

STEPPED WEIR

SLOPED WEIR

BACINO RIVESTITO & CONTROBRIGLIA



A PARETE
VERTICALE

STEPPED WEIR

SLOPED WEIR

BACINO RIVESTITO & CONTROBRIGLIA

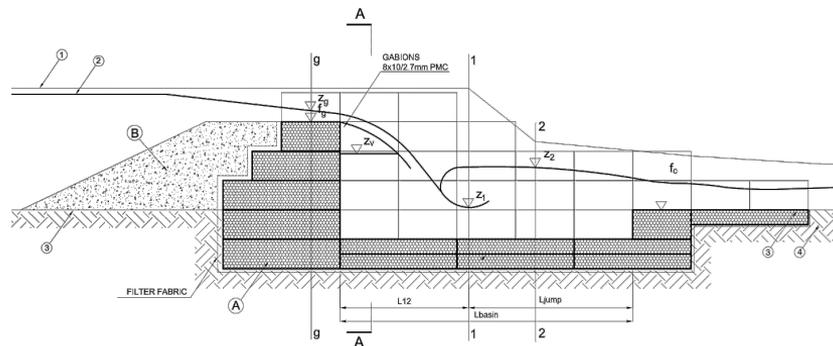


A PARETE
VERTICALE

STEPPED WEIR

SLOPED WEIR

BACINO RIVESTITO & CONTROBRIGLIA



A PARETE
VERTICALE

STEPPED WEIR

SLOPED WEIR

BACINO RIVESTITO & CONTROBRIGLIA



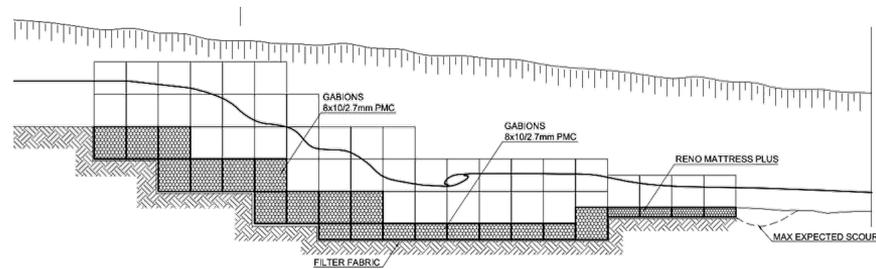
A PARETE
VERTICALE

STEPPED WEIR

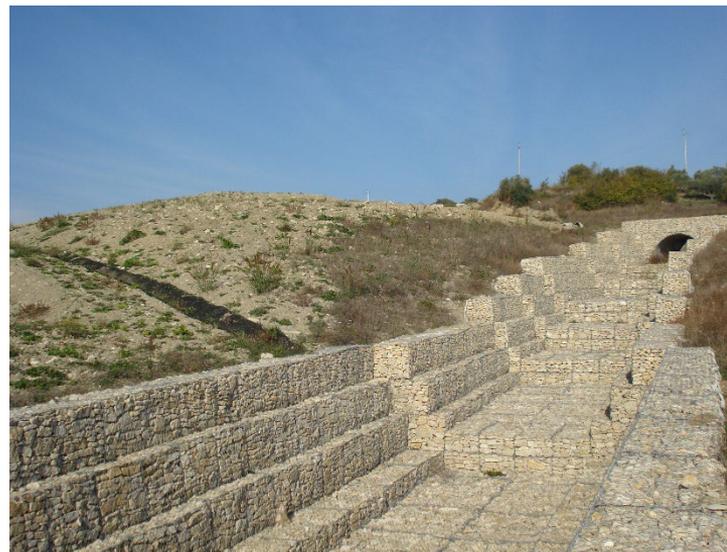
SLOPED WEIR



SINGLE VERTICAL
DROP



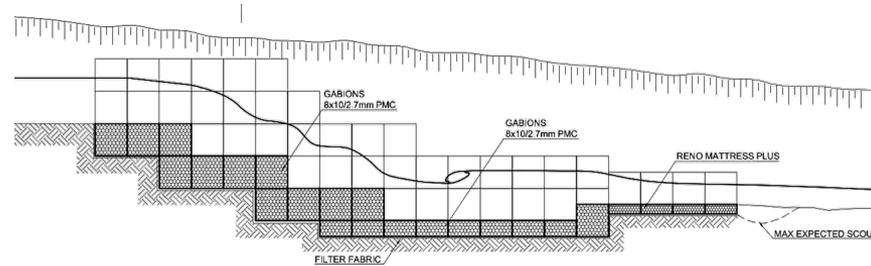
A GRADONI



SLOPED WEIR



SINGLE VERTICAL
DROP



A GRADONI

LIMITI DI APPLICAZIONE

Step ratio (1/1, 1/2, 1/3, 1/5)
Flow type: NAPPE or SKIMMING



Positive features

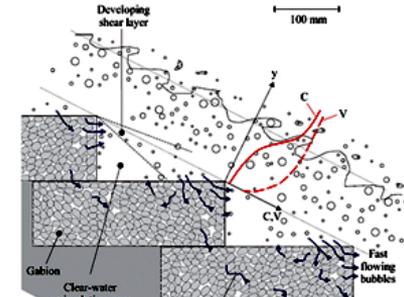
- better stability
- dissipation on each step (stilling pool reduced)



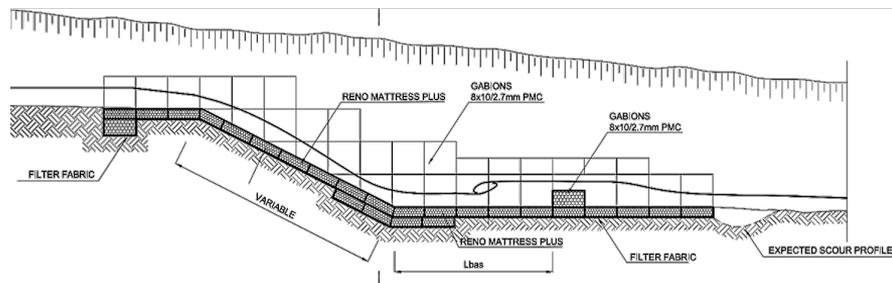
Critical issues

- possible damage/abrasion on the steps
- determination of energy on each step & residual difficult
- the water can move stones hitting the step, causing damage

SLOPED WEIR



SINGLE VERTICAL
DROP



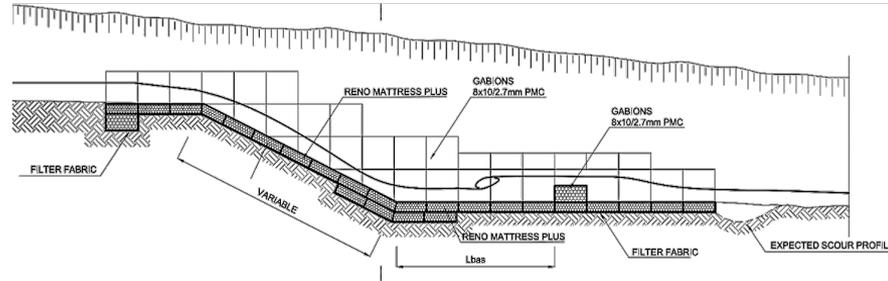
STEPPED WEIR



A SCIVOLO



SINGLE VERTICAL
DROP



LIMITI DI
APPLICAZIONE

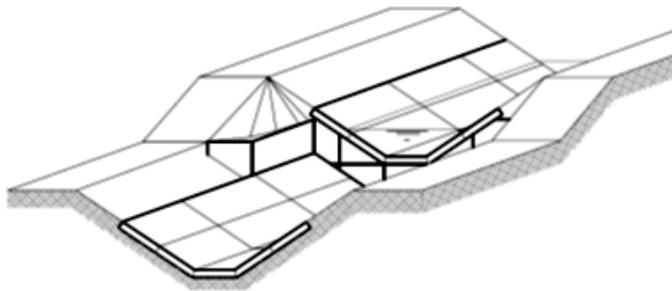
$q = Q/L = 0.5-5 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$
Slope ratios (1/2, 1/3, 1/4)
Total spillway height
2-3-4-5m

STEPPED WEIR



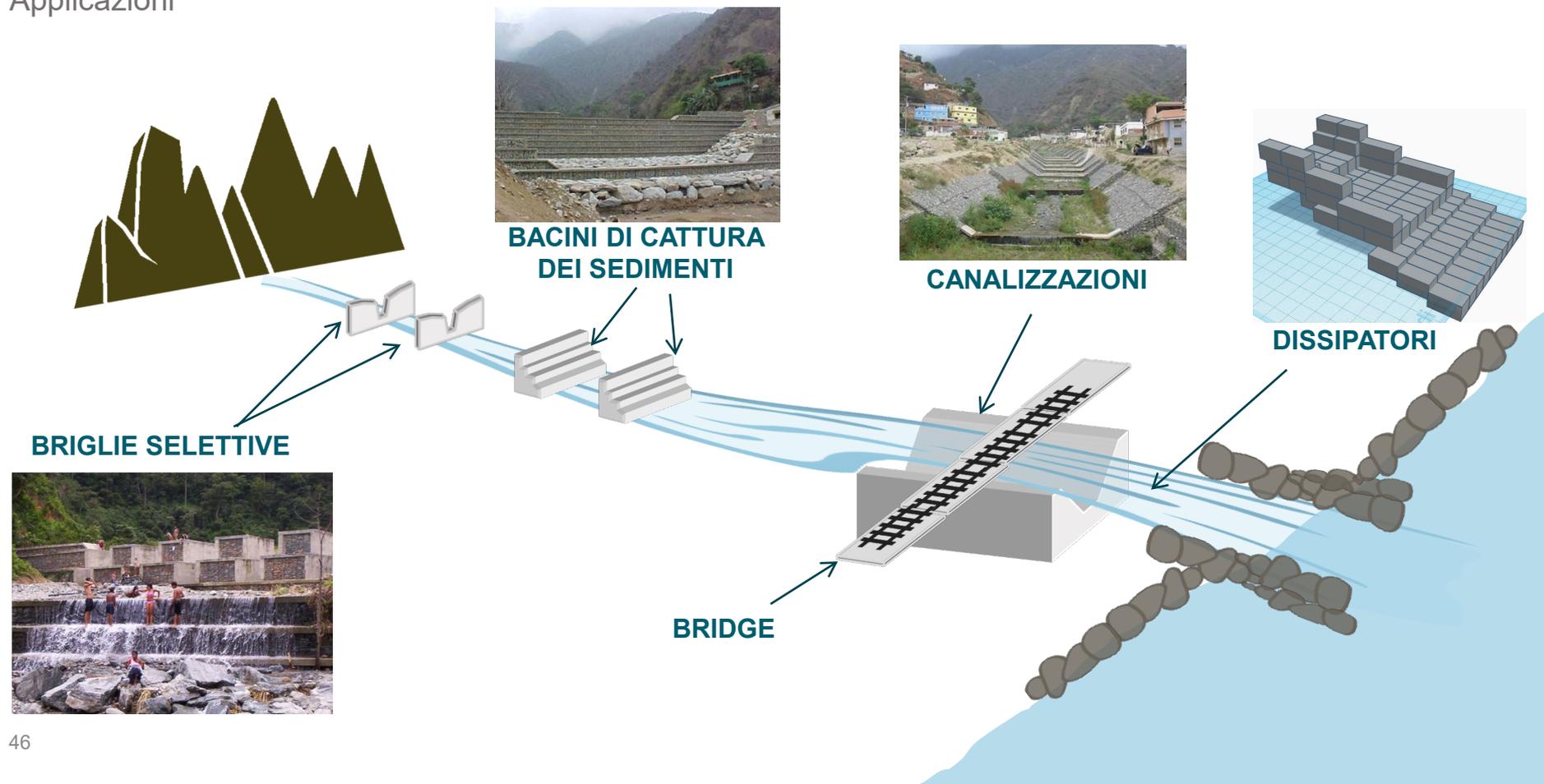
A SCIVOLO

RIVESTIMENTI DI CANALI A GRADONI MULTIPLI (DROP STRUCTURES)



TIPOLOGIE DI BRIGLIE IN GABBIONI

Applicazioni

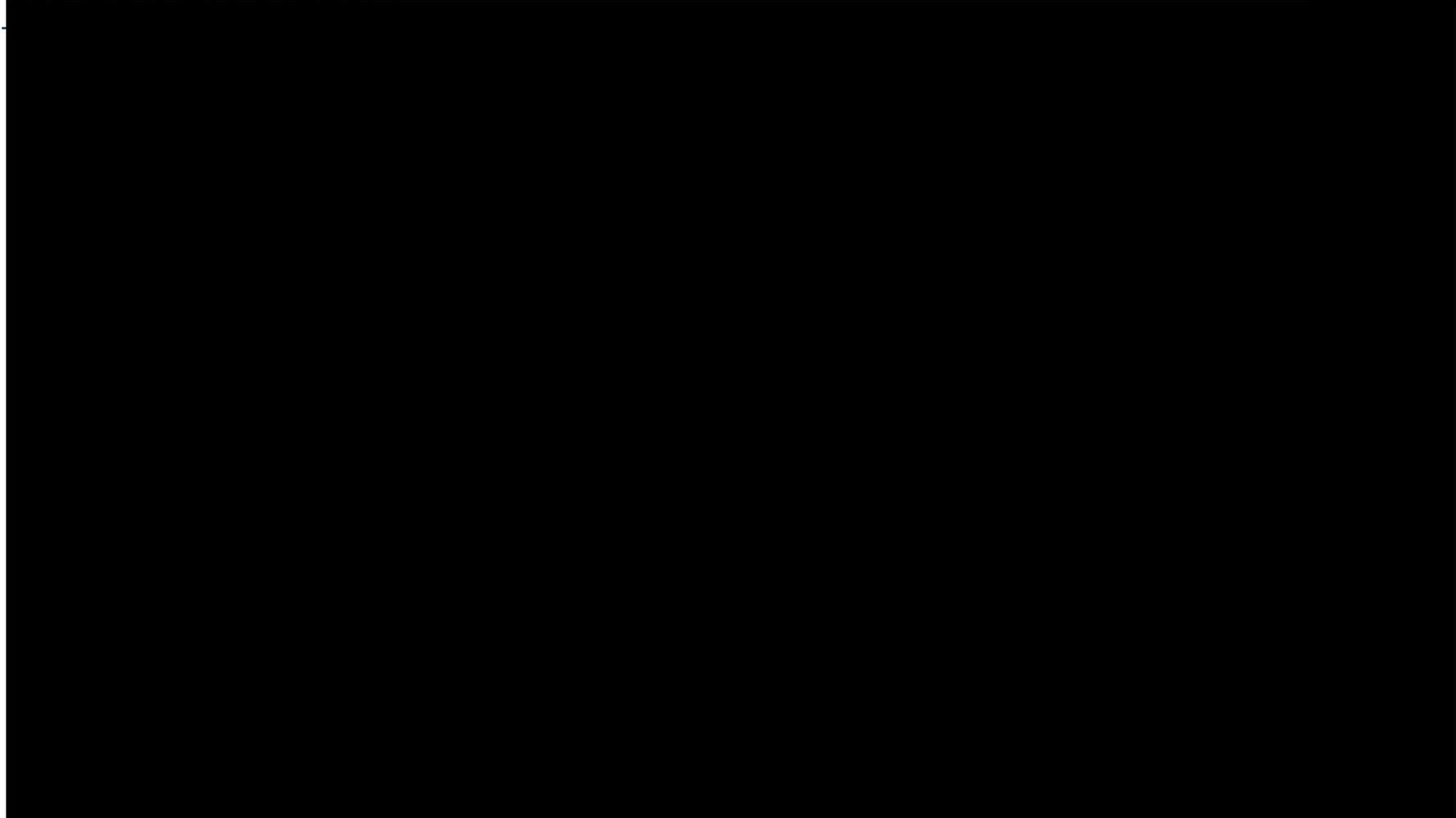




SFIORATORI LATERALI



SFIORATORI LATERALI



CASSE DI ESPANSIONE

Le casse di espansione sono opere di accumulo dei volumi idrici che consentono di ottenere la riduzione della portata di colmo di un'onda di piena attraverso il temporaneo invaso di parte del suo volume

Le casse possono essere in **linea** o in **derivazione**

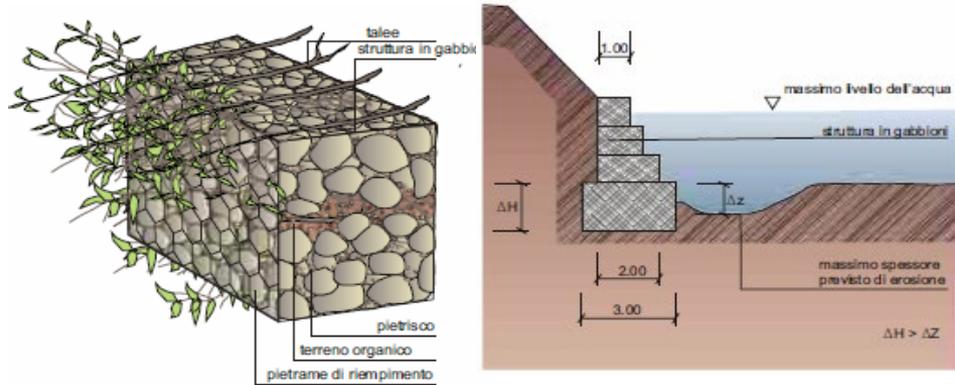




OPERE LONGITUDINALI



GABBIONI IN RETE DOPPIA TORSIONE



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

La struttura modulare e la forma degli elementi conferiscono all'opera una notevole capacità di adattamento alle conformazioni plano-altimetriche del terreno, rendendo i gabioni particolarmente adatti a interventi di sistemazione in alveo e di difesa di sponda.

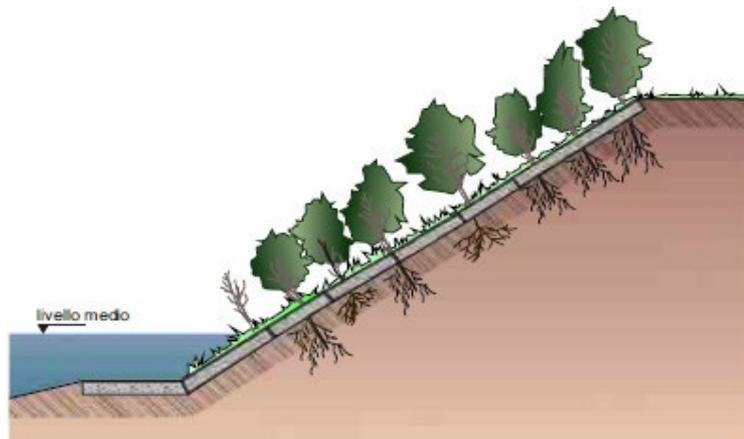
MATERASSI IN RETE DOPPIA TORSIONE



Una protezione contro l'erosione mediante strutture caratterizzate da una elevata resistenza alle azioni di trascinamento della corrente, può essere garantita da scatolari in rete metallica a doppia torsione, riempiti di pietrame di idonea pezzatura.

Di spessore variabile tra 23-30 cm i materassi sono difese studiate da lungo tempo sotto il profilo idraulico, meccanico ed ambientale.

MATERASSI IN RETE DOPPIA TORSIONE RINVERDITI

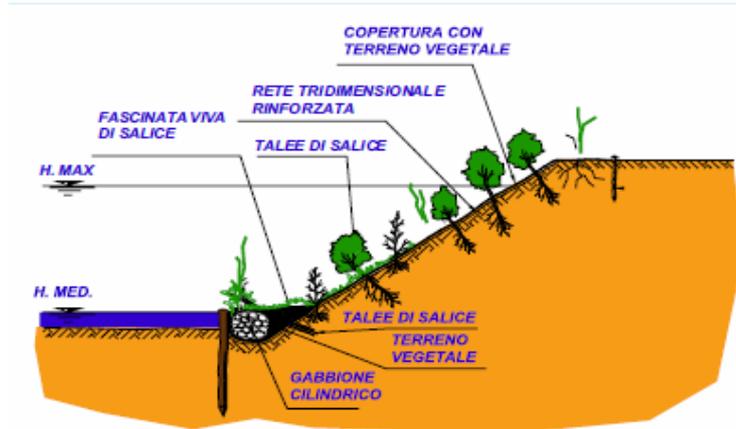


Materassi foderati all'interno con stuoie sintetiche o in fibra vegetale con funzione di filtro e ritenzione.

L'impiego di geotessili, che non consentono la radicazione delle piante, va limitato alle parti sommerse. Alcuni moduli non soggetti a sommersione, possono essere riempiti con terreno vegetale.

Vengono effettuate sulla superficie semina e messa a dimora di talee, rizomi, cespi e arbusti radicati di specie autoctone, nella parte che rimane al di fuori del livello medio di piena.

GEOSTUOIE

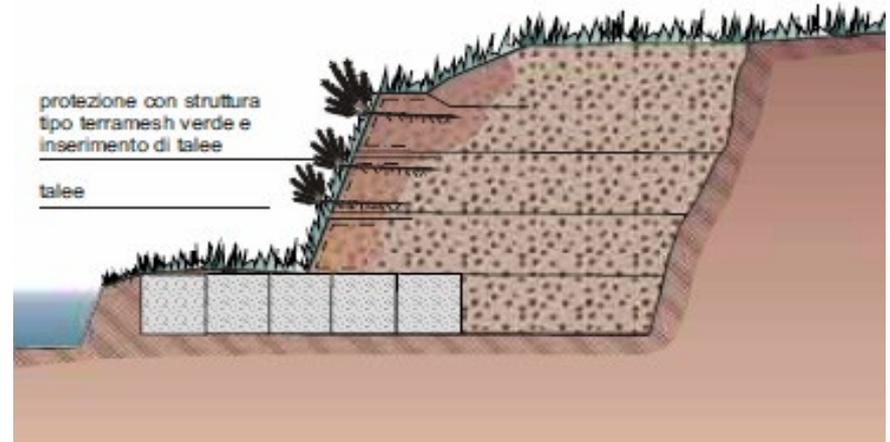


Rivestimento di sponde soggette a erosione mediante la stesa di una stuoia sintetica tridimensionale, spessore min. 10 mm, eventualmente rinforzate da una rete metallica a doppia torsione.

Le geostuoie vengono fissate al terreno mediante picchetti, eventualmente ancorati con una fune di acciaio.

Il rivestimento viene abbinato ad idrosemina a spessore e messa a dimora di arbusti autoctoni e di talee di specie con capacità di propagazione vegetativa.

TERRE RINFORZATE



Questi sistemi puntano a migliorare le caratteristiche meccaniche del terreno conferendogli anche un'adeguata resistenza a trazione.

Mediante l'inserimento nel terreno di elementi capaci di sviluppare resistenza a trazione, il risultato è un sistema composito dotato di caratteristiche meccaniche superiori rispetto a quelle del terreno originale.

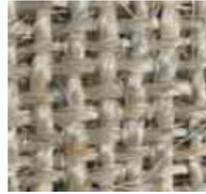
BIOSTUOIE



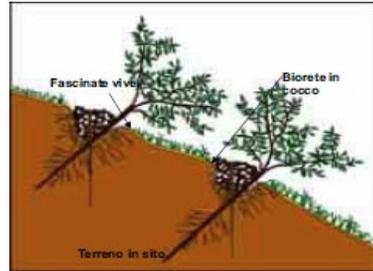
Biostuoia in fibra di cocco



Georete in fibra di cocco



Georete in fibra di Agave



Costituita da una biostuoia (biofeltro, biorete), fissata al terreno mediante picchetti metallici, eventualmente abbinata a idrosemina, posa di talee piantagione di arbusti.

Viene inserita lungo scarpate anche superiori a 40° rispetto all'orizzontale.

La disposizione spaziale consiste nel rivestimento totale della superficie di intervento.

STRUTTURE FLESSIBILI: GABBIONI E MATERASSI

Nel caso di installazione subacquea del rivestimento, le unità possono essere facilmente preriempite a terra e varate mediante gru ed appositi telai



.....

Criteri progettuali

METODOLOGIE PROGETTUALI

.....

APPROCCI DISPONIBILI

La verifica di una protezione spondale può essere fatta usando 2 diversi metodi basati su:

VELOCITA'

$$V < V_{all}$$

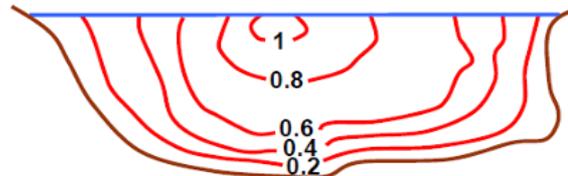
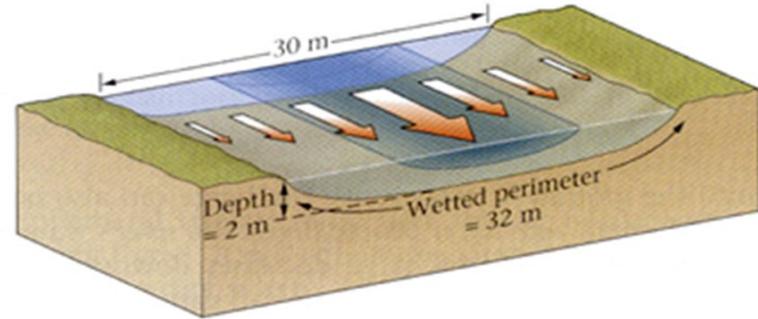
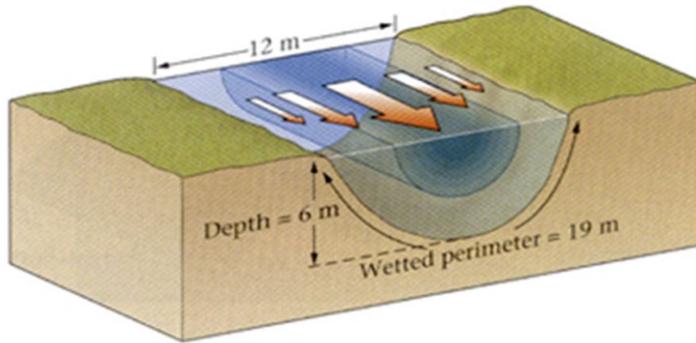
TENSIONI DI TRASCINAMENTO

$$T < T_{all}$$

T_{all} e v_{all} sono rispettivamente lo sforzo di taglio prodotto dalla corrente e la velocità di flusso dell'acqua in corrispondenza dei quali hanno inizio i movimenti delle particelle solide.

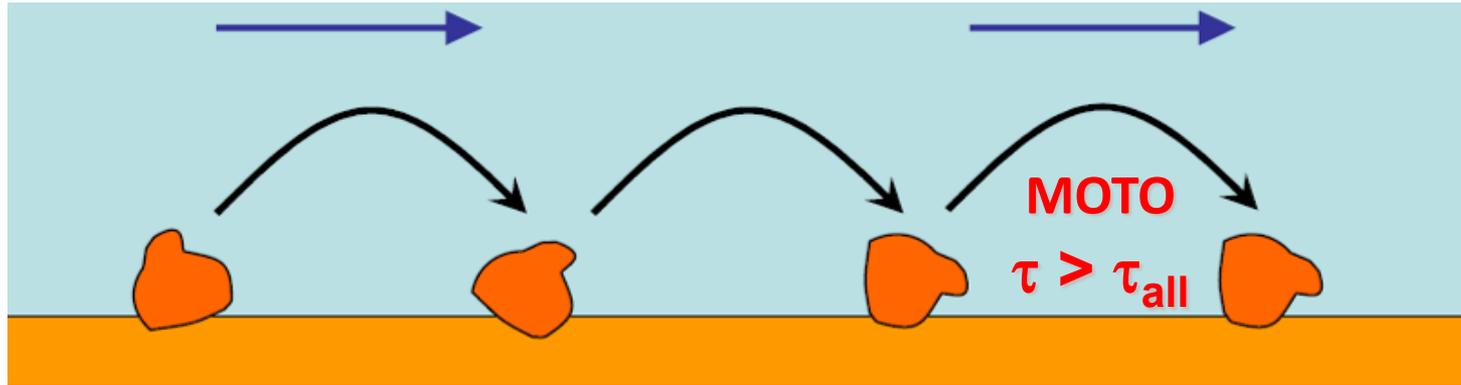
Metodo delle velocità ammissibili

La distribuzione delle velocità dipende dalla sezione idraulica; i valori minori sono in prossimità delle sponde e quelli massimi in prossimità della superficie nella sezione centrale



METODO DELLE TENSIONI AMMISSIBILI

I processi di erosione possono essere affrontati in maniera più razionale considerando le forze agenti su una particella posta sul fondo o sulle sponde. La sezione del canale viene erosa se la risultante delle forze che tende a muovere le particelle è maggiore delle forze resistenti; in caso contrario la sezione è stabile



Metodo delle tensioni ammissibili

La verifica di stabilità è soddisfatta quando:

$$\tau_{all} > \tau$$

E il coefficiente di sicurezza?

Poichè per il calcolo delle tensioni agenti τ si usa un'equazione che sovrastima i valori, si può assumere un **coefficiente di sicurezza pari a 1**

Fattori di sicurezza compresi >1 possono essere appropriati nei casi di:

- Corrente critica o supercritica ($F \geq 1$)
- Zone a basso o nullo sviluppo vegetazionale (deserti)
- Elevata incertezza sulla portata di progetto

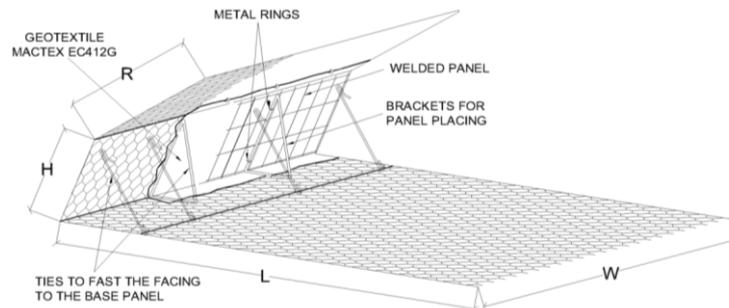
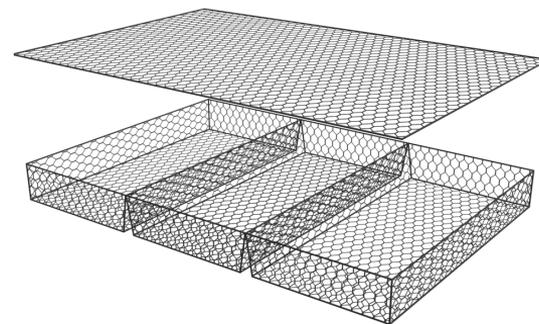
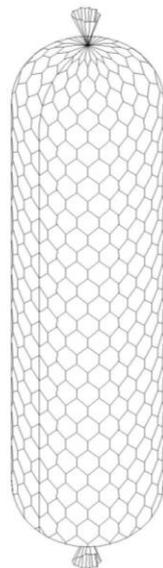
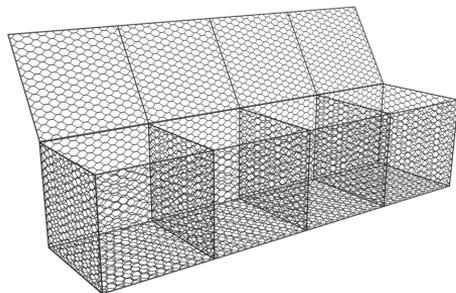
Metodo delle tensioni ammissibili

TENSIONI AMMISSIBILI - TECNICHE DI INGEGNERIA NATURALISTICA

MATERIALE	NON VEGETATO struttura appena realizzata senza lo sviluppo delle piante vive	VEGETATO con le piante vive sviluppate dopo il terzo periodo vegetativo
	(N/m²)	(N/m²)
Sabbia fine	3.5	-
Sabbia e ghiaia	15	-
Ghiaia grossolana	32	-
Ciottoli	52	-
Argilla compatta	22	-
Cotici erbosi	10 - 20	25 - 60
Gradonata viva (brush layer)	20	100 - 120
Copertura diffusa con ramaglia viva (living brush mattress)	50 - 150	200 - 300
Fascinata viva (willow fascine)	20	60 - 150
Ribalta viva (fascine with brushlayers, willow protection)	20	80 - 150
Palificata viva (vegetated log cribwall)	200	300 - 600

Metodo delle tensioni ammissibili

PRODOTTI IN RETI DOPPIA TORSIONE



Metodo delle tensioni ammissibili

TENSIONI AMMISSIBILI PRODOTTI IN RETE DOPPIA TORSIONE

MATERIALE	NON VEGETATO struttura appena realizzata senza lo sviluppo vegetativo	VEGETATO Struttura con piante sviluppate dopo il terzo periodo vegetativo
	(N/m²)	(N/m²)
Materassi Reno Plus 17 cm	445 ⁽¹⁾	445 – 800 ⁽³⁾
Materassi Reno Plus 23 cm	534 ⁽¹⁾	534 – 800 ⁽³⁾
Materassi Reno Plus 30 cm	638 ⁽¹⁾	638 – 800 ⁽³⁾
Gabbione 50 cm	896 ⁽¹⁾	896 - 1000 ⁽³⁾
Macmat R	20 – 120 ⁽²⁾	100 – 300 ⁽²⁾

(1) $D_{50} = 95$ mm; $C_u = 1$

(2) Funzione della durata di piena (1-60 h)

(3) Coperchio in Macmat R

CONDIZIONI DI PROGETTO

Le verifiche alle tensioni ammissibili vanno eseguite in due condizioni progettuali, al fine di tenere conto dello sviluppo vegetazionale nel tempo

1 - FINE LAVORI

La sezione è in grado di convogliare la portata massima e le tensioni resistenti sono minime: questa è la condizione critica per i rivestimenti

$\ll n$

$\ll \tau_{all}$

2 - VEGETAZIONE SVILUPPATA

Quando la vegetazione è sviluppata (>3 anni) la resistenza all'erosione è maggiore per effetto dell'apparato radicale, ma si ha al contempo un aumento della scabrezza: questa è la condizione critica per il deflusso.

$\gg \tau_{all}$

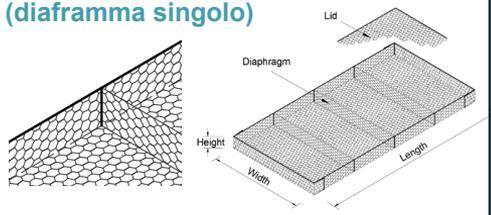
$\gg n$

$\ll Q_{all}$

Criteri progettuali

**SOLUZIONI
INNOVATIVE:
MATERASSI RENO PLUS**

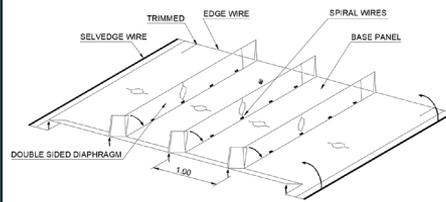
Materasso Reno standard (diaframma singolo)



1960
1° Materasso Reno Standard

1984
1° Ricerca alla CSU sui Materasso Reno Standard
Criterio di progetto
 $[C_S=0.10-0.12]$

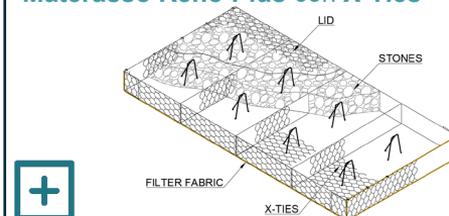
Materasso Reno (tipo Castoro)



1990
Invenzione del Materasso Reno col doppio diaframma
Criterio di progetto
 $[C_S=0.10-0.12]$

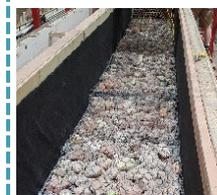
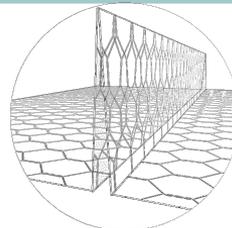
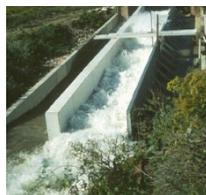
2000
Revisione del parametro C_S Basato sull'esperienza
Criterio di progetto
 $[C_S=0.14]$

Materasso Reno Plus con X-Ties



2018-2019
2° Ricerca alla CSU sul nuovo Materasso Reno Plus con X-Ties.

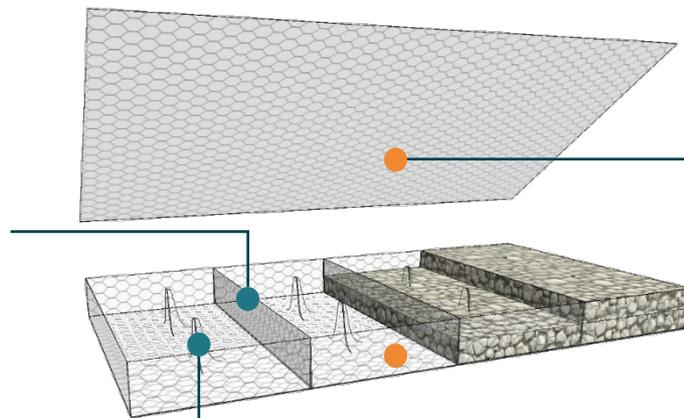
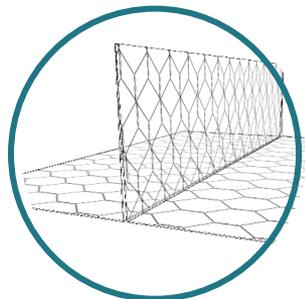
2020
Nuovi criteri di progetto basati sulle prestazioni migliorate dei Materasso Reno Plus con X-Ties



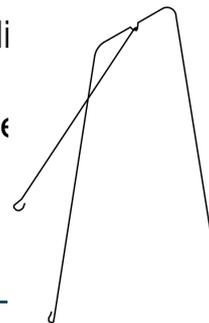
La ricerca CSU del 2019

Materasso Reno Plus con X-Ties

Il doppio diaframma verticale rende le operazioni di riempimento più semplici.



X-Tie è un Sistema di aggancio sviluppato sperimentalmente che massimizza la resistenza strutturale del materasso

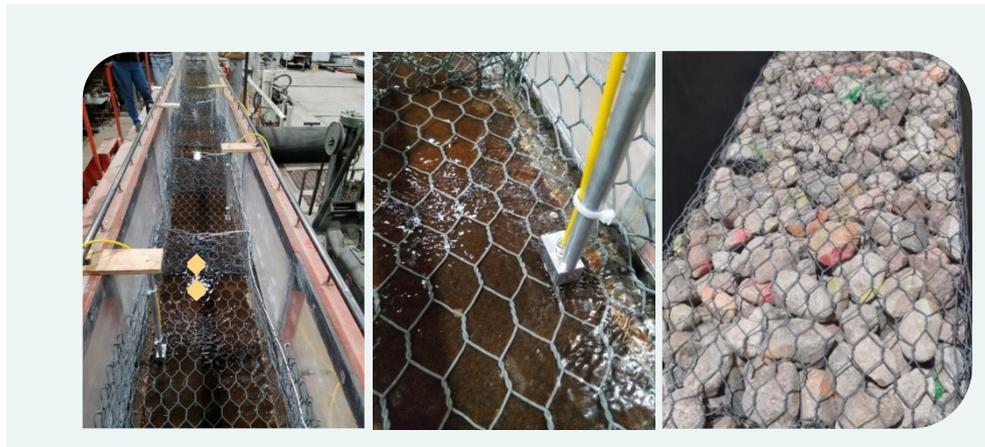


Il rivestimento **PoliMac®** fornisce una protezione eccezionale contro gli agenti abrasivi e le aggressioni chimiche



La ricerca del 2019

CAMPAGNA DI
TEST 2019
ALLA
COLORADO
STATE
UNIVERSITY



SOLUZIONI INNOVATIVE: MATERASSI RENO PLUS

MACCAFERRI

La ricerca CSU del 2019



COLORADO STATE UNIVERSITY (Fort Collins)



La ricerca CSU del 2019



ELENCO DEI TEST

TASK 1 (Tests A/B/C/D/E) Test Investigativi di laboratorio

TASK 2/3 (Tests 1/2/3/4/5/6) Test granulometria delle pietre & trasduttori di pressione

TASK 4 (Tests A/B/C) Test Investigativi di laboratorio

SCOPO (preliminare)

Monitorare gli effetti sui componenti separatamente :

- 1) Rete DT
- 2) Tipo di partizione
- 3) Pietrame (dimensione & uniformità)

SCOPO (finale)

Scegliere la combinazione più prestazionale di materassi e pietre e eseguire test alle portate più elevate, per monitorare il verificarsi di un problema per rottura meccanica o per erosione eccessiva (ASTM D6460)

La ricerca CSU del 2019

TASK 4 (CONFIGURAZIONE FINALE)

SCOPO → Con la miglior configurazione prestazionale dei materassi (tipo di riempimento in pietrame & spaziatura dei diaframmi) selezionata nei Tasks 1 & 2, il Task 3 era finalizzato a testare il massimo sforzo di taglio sopportabile con la restrizione della minima erosione sotto il materasso (ASTM D6460).

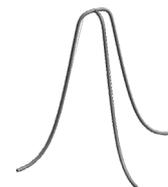


Materiale di riempimento colorato.
Erosione sottostante monitorata

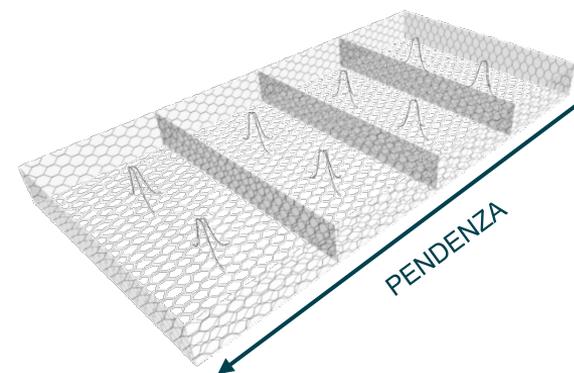
La ricerca CSU del 2019

X-Tie è il tirante innovativo che massimizza le prestazioni strutturali del Materasso Reno.

- Capacità di distribuire le forze su una superficie maggiore
- Installazione più rapida, con i suoi uncini preformati può essere facilmente attaccato alla base del pannello
- La densità è la meta dei tradizionali tiranti verticali.



1 X-Tie
per m²



INSTALLAZIONE PIU' RAPIDA, PRESTAZIONI MIGLIORI

La ricerca CSU del 2019

TASK 4 (Test B)
Materasso Reno Plus 17 cm
Doppio diaframma con X-Ties
 $D_{50} = 100 \text{ mm}$
 $C_u = 1$

Massima tensione agente = 445 N/m²



La ricerca CSU del 2019

TASK 4 (Test C)

Materasso Reno Plus 30 cm
Doppio diaframma con X-Ties

$$D_{50} = 100 \text{ mm}$$

$$C_u = D_{60}/D_{10} = 1$$

Massima tensione agente = 638 N/m²



La ricerca CSU del 2019

1984-2000:

CSU 1984

Reno Mattress (s.d.)

$$\tau_{all} = K_s C^* (\gamma_s - \gamma_w) d_{50}$$

$$[C_{Shields} = 0.047 \text{ Rip rap}]$$

$$[C^*_{Shields} = 0.10 (+20\%) = 0.12 \text{ GB, RM}]$$

[con controllo della deformazione]

Late 80s



Castoro mattress



Lo sviluppo del nuovo materasso Reno alla fine degli anni 80 con il doppio diaframma (Castoro), insieme a una storia di diversi casi di successo, ci consente di assumere che il $C_{Shields}$ per questi nuovi materassi può essere incrementato di circa il 17%

2000-2018:

Reno Mattress
(Castoro)

$$[C^*_{Shields} = 0.12 (+17\%) = 0.14]$$

1984-2000

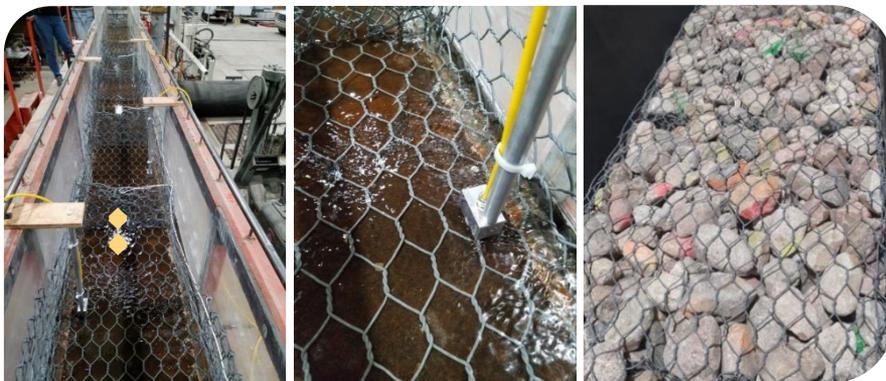
2000-2018

thickness (m)	d_{50} (m)	All. Shear (N/m ²)
0.17	0.100	195
0.23	0.120	230
0.30	0.150	288
0.50	0.200	384

All. Shear (N/m ²)
224
268
336
470

La ricerca CSU del 2019

E COSA CI DICONO I RISULTATI DELLE PROVE 2019?



La ricerca CSU del 2019 - RISULTATI

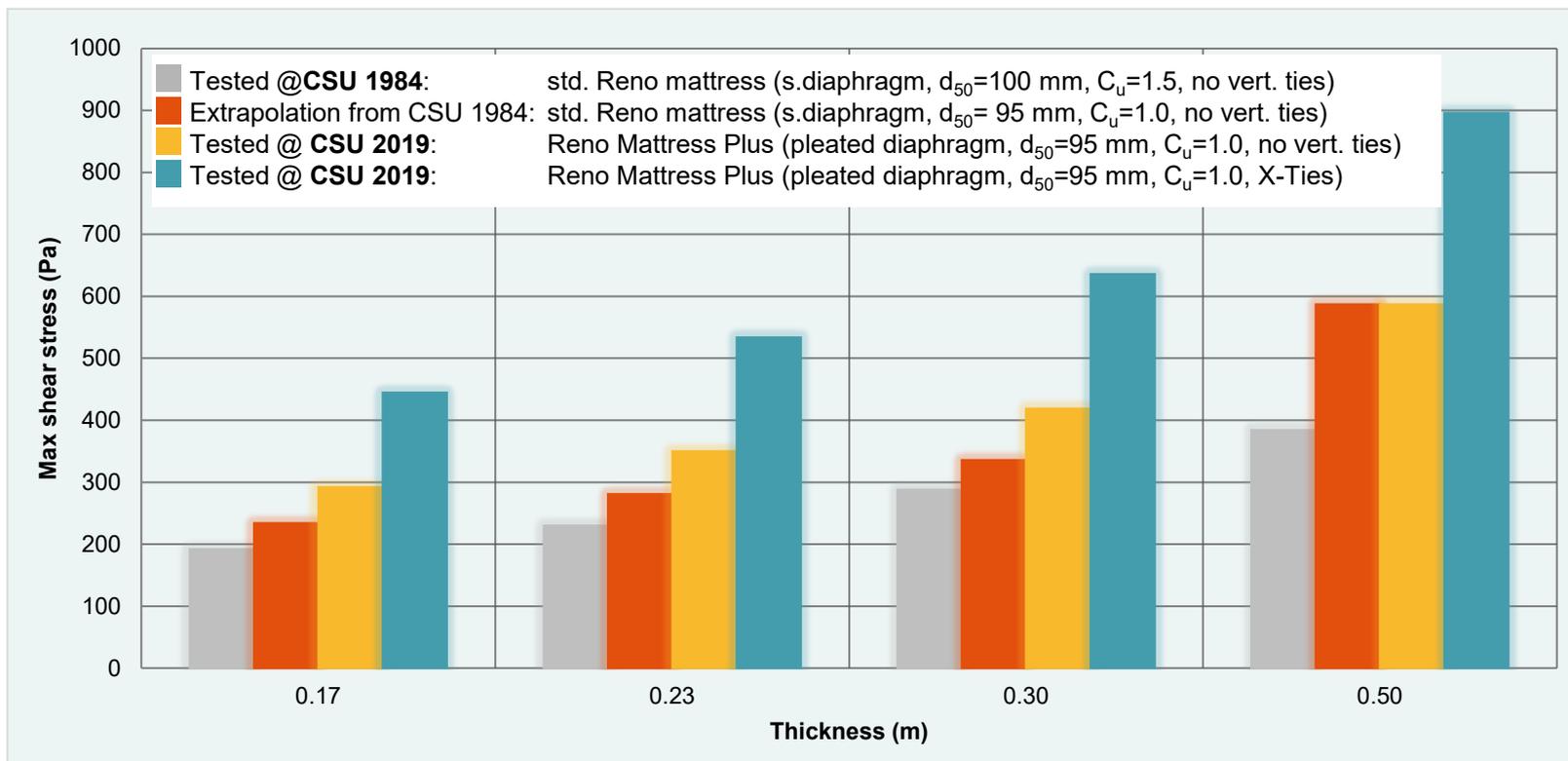
La tensione massima ammissibile dipende da diversi fattori (non solo da C_s , peso e diametro d_{50}) ma anche da:

- Uniformità del riempimento in pietrame
- Spessore del materasso
- Tipo di diaframma (singolo o castoro)
- Presenza di tiranti verticali (per incrementare il confinamento)

$$\tau = C_{shields}(\gamma_s - \gamma_w)d_{50}f[d_{50}, C_u, t, \text{partition}, \text{ties}]$$

H (m)	d_{50} (m)	C_u	τ_{max} (Pa)	Diaframma doppio (Y/N)	X Ties (Y/N)
0.17	0.083	1.0	402	Y	Y
0.17	0.083	1.5	321	Y	Y
0.17	0.095	1.0	445	Y	Y
0.17	0.095	1.5	355	Y	Y
0.23	0.083	1.0	482	Y	Y
0.23	0.083	1.5	385	Y	Y
0.23	0.095	1.0	534	Y	Y
0.23	0.095	1.5	426	Y	Y
0.23	0.102	1.5	445	Y	Y
0.30	0.083	1.0	576	Y	Y
0.30	0.083	1.5	459	Y	Y
0.30	0.095	1.0	638	Y	Y
0.30	0.095	1.5	509	Y	Y
0.30	0.102	1.5	532	Y	Y
0.30	0.121	1.5	591	Y	Y
0.50	0.102	1.0	783	N	Y
0.50	0.127	1.0	896	N	Y
0.50	0.127	1.5	714	N	Y

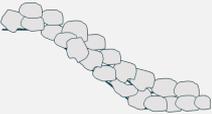
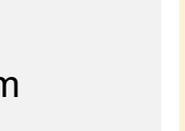
La ricerca CSU del 2019 - RISULTATI



SOLUZIONI INNOVATIVE: MATERASSI RENO PLUS

La ricerca CSU del 2019 - RISULTATI

Progetto di protezione spondale usando **LA TENSIONE TANGENZIALE** come parametro di progetto

TENSIONE AGENTE (N/m ²)	PIETRAME SCIOLTO	MATERASSO RENO	MATREASSO RENO RENO PLUS (con X-Ties)
< 200	 40 cm	 17 cm	 17 cm
200-250	45 cm	23 cm	17 cm
250-300	60 cm	30 cm	17 cm
300-400	84 cm	50 cm	23 cm

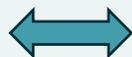
La ricerca CSU del 2019 - RISULTATI

- **Il Materasso Reno Plus con X-ties** da 0.17m con pietrame selezionato ha le stesse prestazioni , o migliori, del materasso da 0.30-m con singolo diaframma
- **Il Materasso Reno Plus con X-ties** da 0.30m con pietrame selezionato ha le stesse prestazioni , o migliori, di un gabbione da 0.50-m
- **Il Materasso Reno Plus con X-ties** da 0.17-m - 0.30-m copre il più ampio raggio di applicazioni idrauliche

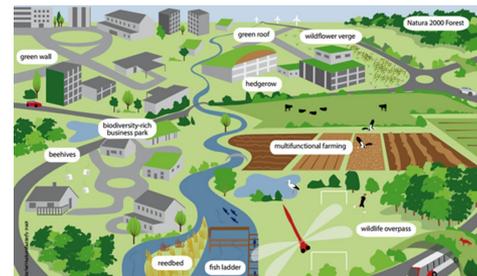
**EFFICIENZA
AMBIENTALE**



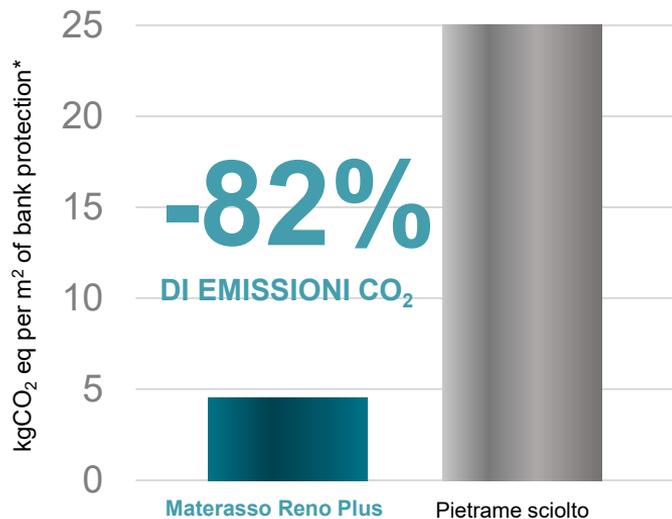
Uso di minore materiale
(acciaio & pietrame)



Minor impatto ambientale
rispetto alle alternative
convenzionali
(calcestruzzo, rip-rap) o
anche simili (reti
metalliche)



BENEFICI AMBIENTALI



VS.

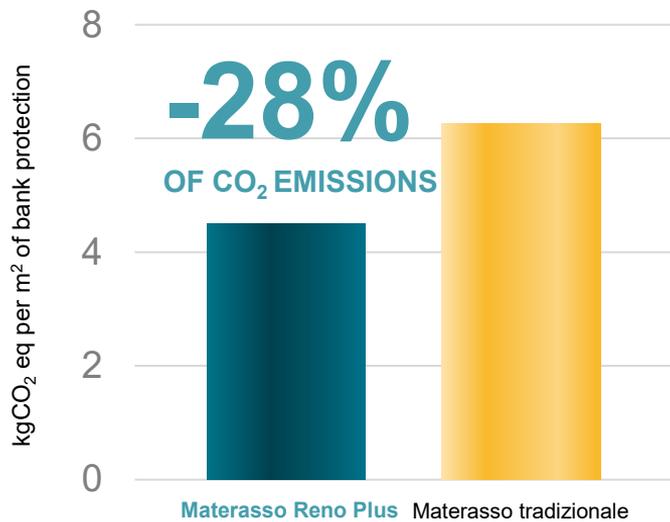


Il **Materasso Reno Plus** riduce l'impatto ambientale della protezione delle sponde fluviali. Ciò è dovuto al risparmio di materiali e di trasporto.

Poiché il materasso favorisce la crescita della vegetazione, produce anche un sequestro di carbonio di 0,46 kgCO₂/m² all'anno**.

Il **Materasso Reno Plus** reduce le emissioni di CO₂ dell'82% rispetto al pietrame sciolto

BENEFICI AMBIENTALI



Il **Materasso Reno Plus con X-Ties** riduce ulteriormente il carico ambientale rispetto ai materassi standard.

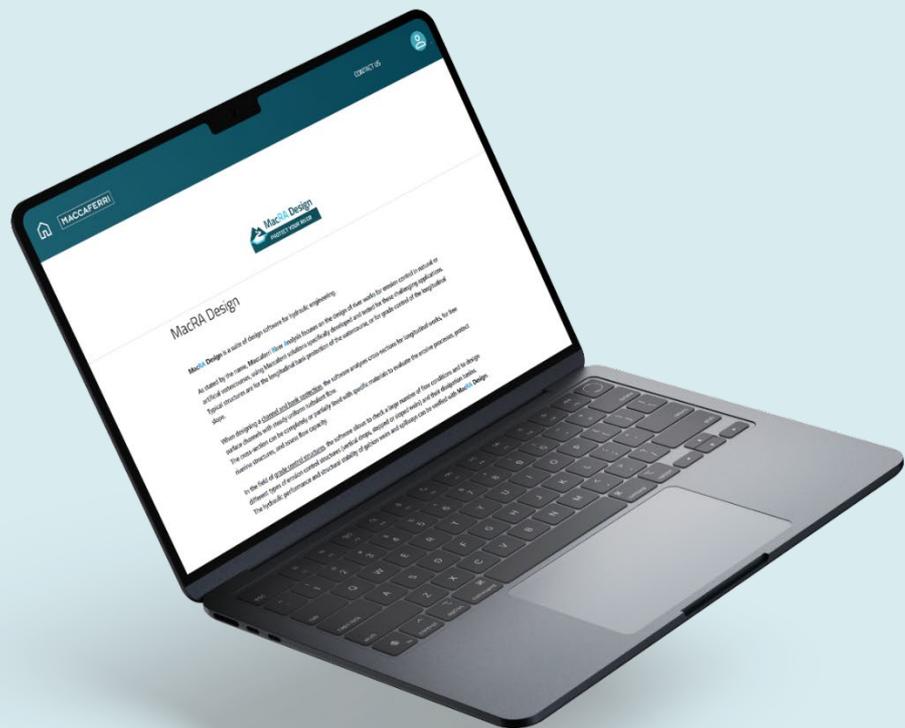
Meno pietre significa meno emissioni di CO₂, meno spostamenti di camion

Il **Materasso Reno Plus** rivestito con **PoliMac®** **reduce** riduce le emissioni di CO₂ del 28% rispetto al materasso tradizionale

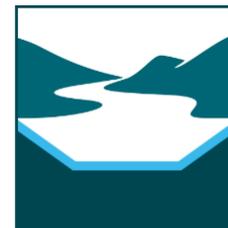


**SOFTWARE
MACRA DESIGN**





Maccaferri River Analysis è una suite di software di progettazione per l'ingegneria idraulica, che si concentra sulla progettazione di opere fluviali riguardanti il controllo dell'erosione in corsi d'acqua naturali o artificiali, utilizzando soluzioni Maccaferri appositamente sviluppate e testate per queste sfidanti applicazioni.

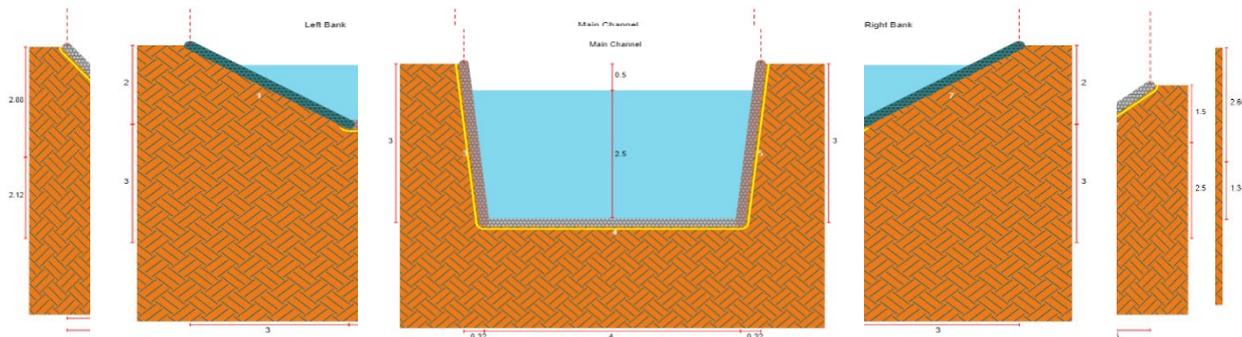


PROTEZIONE DEL
CANALE E DELLE
SPONDE

Nella progettazione di un canale e di una protezione spondale, il software analizza le sezioni riguardanti opere longitudinali, per correnti a pelo libero in moto uniforme.



PROTEZIONE DEL CANALE E DELLE SPONDE



M Sezioni rettangolari

M Sezioni a singolo e doppio trapezio

M Sezioni con sotto settori

M Sezioni con sponde verticali



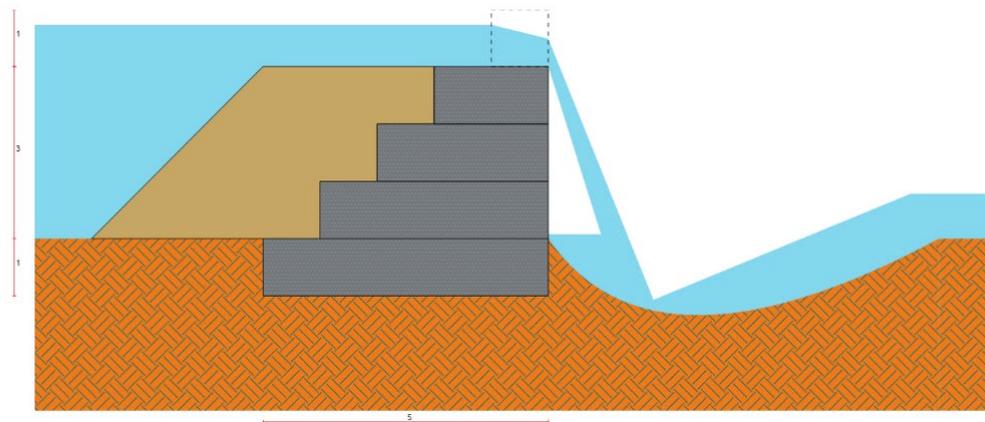
STRUTTURE DI
CONTROLLO DELLA
PENDENZA





STRUTTURE DI CONTROLLO DELLA PENDENZA

Il software consente di verificare numerose condizioni di flusso e di progettare diversi tipi di strutture di controllo dell'erosione e relativi bacini di dissipazione.



M Briglie inclinate

M Briglie a gradoni

M Briglie a salto verticale