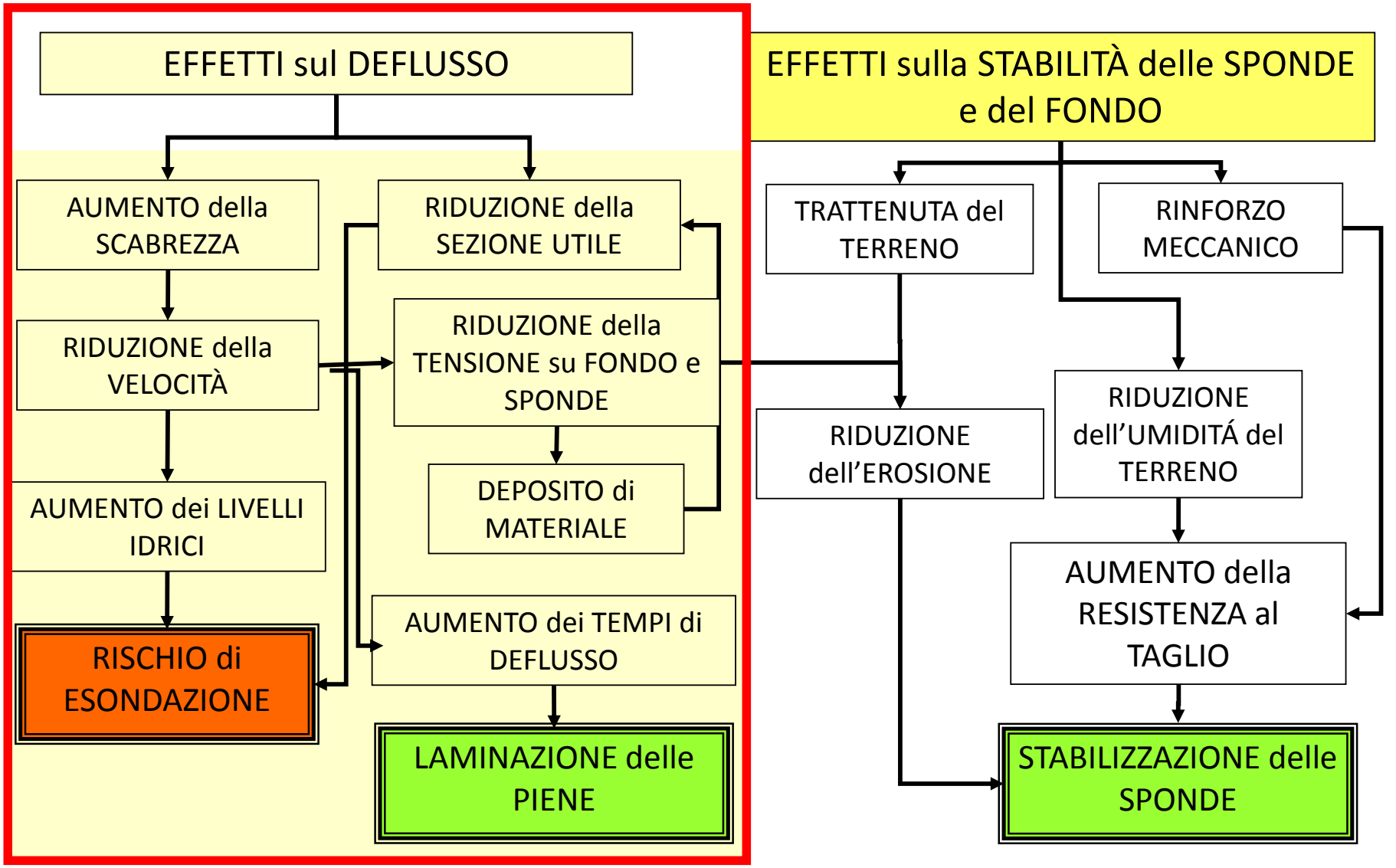
PROGETTAZIONE DELLE OPERE D'ALVEO

Dott. Ing. Alessio CISLAGHI
DiSAA – Ingegneria Agraria
Via Celoria, 2 – 20133 Milano
Tel. 02-503-16903

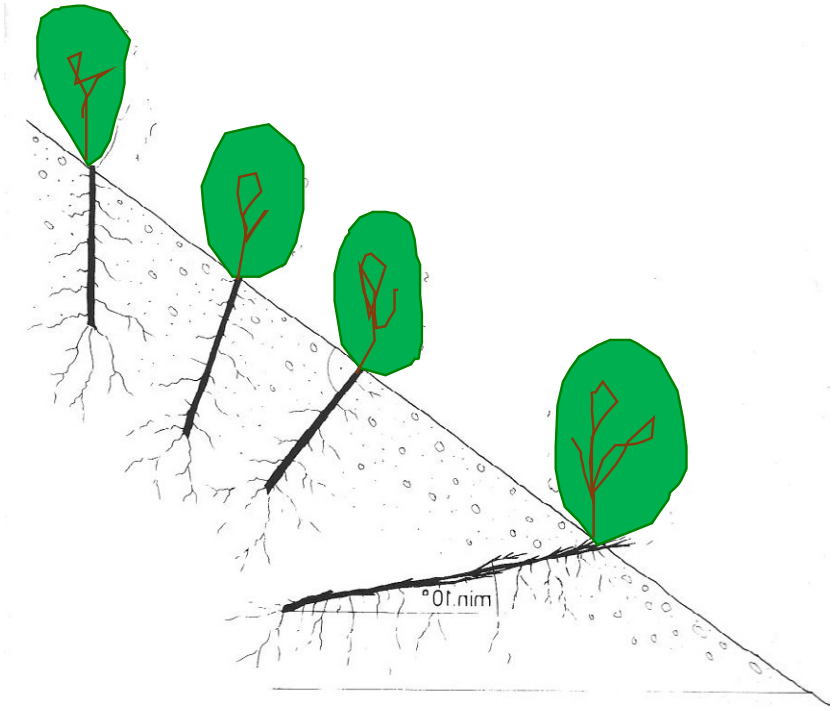

EFFETTI sul DEFLUSSO
AUMENTO della SCABREZZA
RIDUZIONE della VELOCITÀ
AUMENTO dei LIVELLI IDRICI
RISCHIO di ESONDAZIONE
RIDUZIONE della SEZIONE UTILE
RIDUZIONE della TENSIONE su FONDO e SPONDE
DEPOSITO di MATERIALE
AUMENTO dei TEMPI di DEFLUSSO
LAMINAZIONE delle PIENE
EFFETTI sulla STABILITÀ delle SPONDE e del FONDO
TRATTENUTA del TERRENO
RINFORZO MECCANICO
RIDUZIONE dell'EROSIONE
RIDUZIONE dell'UMIDITÁ del TERRENO
AUMENTO della RESISTENZA al TAGLIO
STABILIZZAZIONE delle SPONDE

Interventi di rivestimento e di rinforzo

- Inerbimenti sulle sponde con eventuale uso di reti

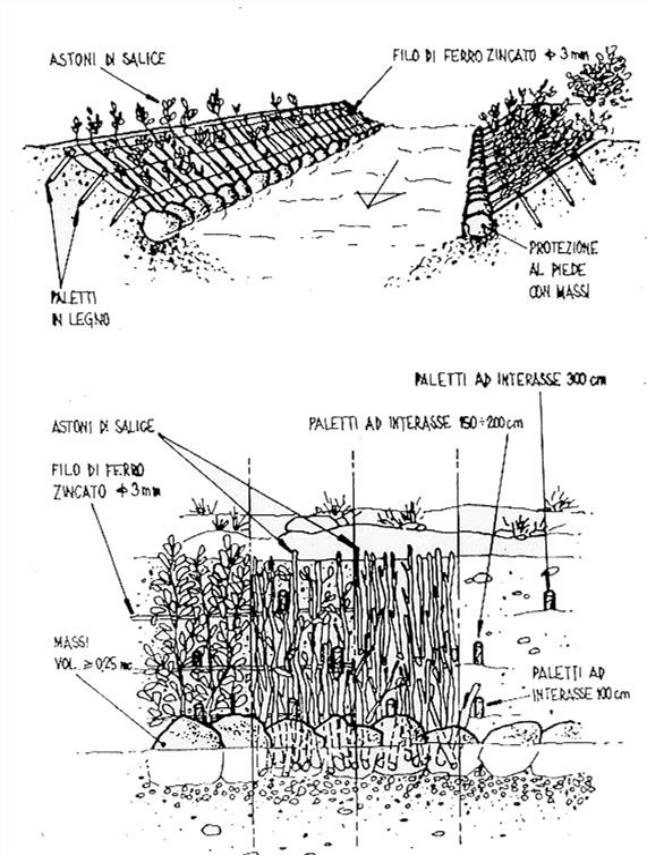
(AA.VV., 2008. La riqualificazione dei canali agricoli Linee guida per la Lombardia, Quaderni della ricerca. Regione Lombardia. https://sites.unimi.it/smartgreen/documenti/manualeLIRICA_web6MB.pd)

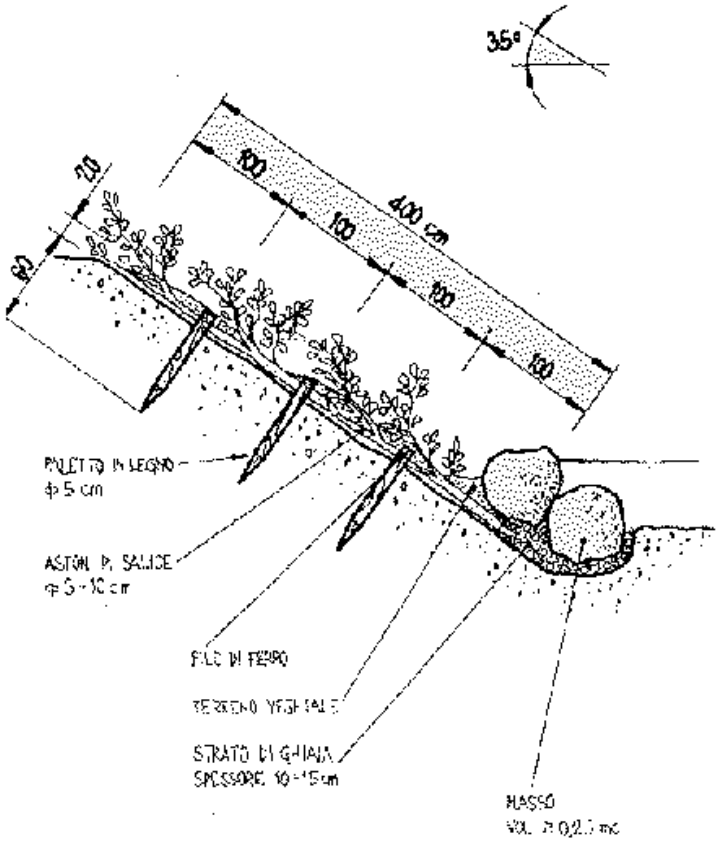
- Piantumazioni sulle sponde con eventualmente gradonate



(mod. da Schiechtl e Stern, 1994 - Ingegneria Naturalistica - Manuale delle costruzioni idrauliche.
Edizioni ARCA Gardolo, Trento, 1994.)

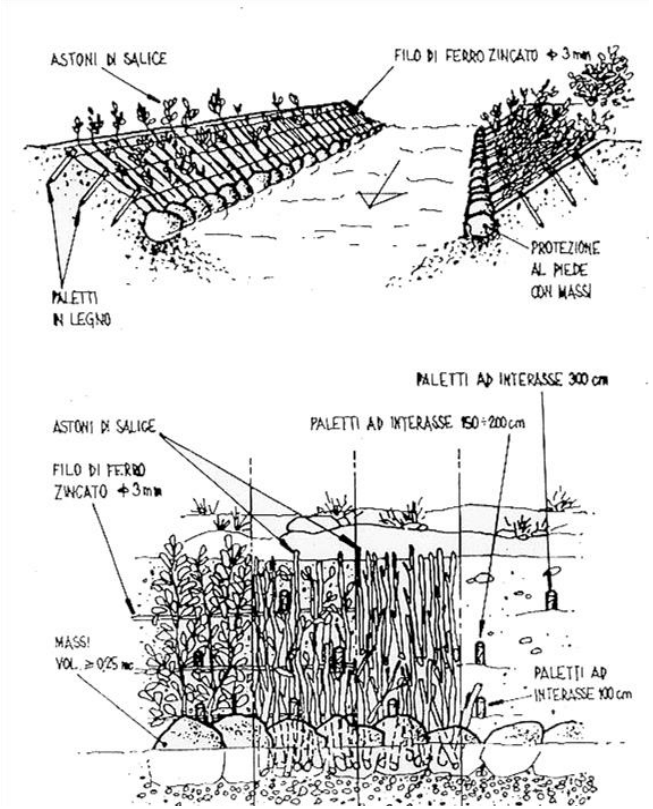
- Copertura diffusa con astoni

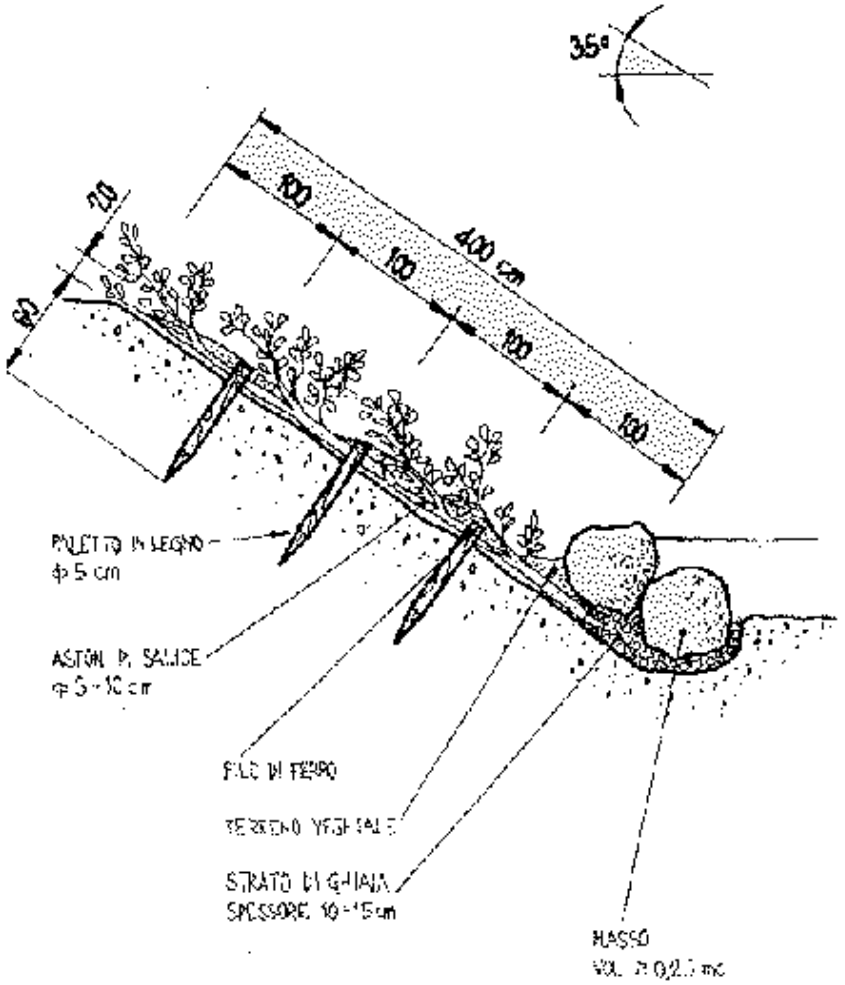




Bollettino Ufficiale della Regione Lombardia — 1° Suppl. Straordinario al n. 19 - 9 maggio 2000

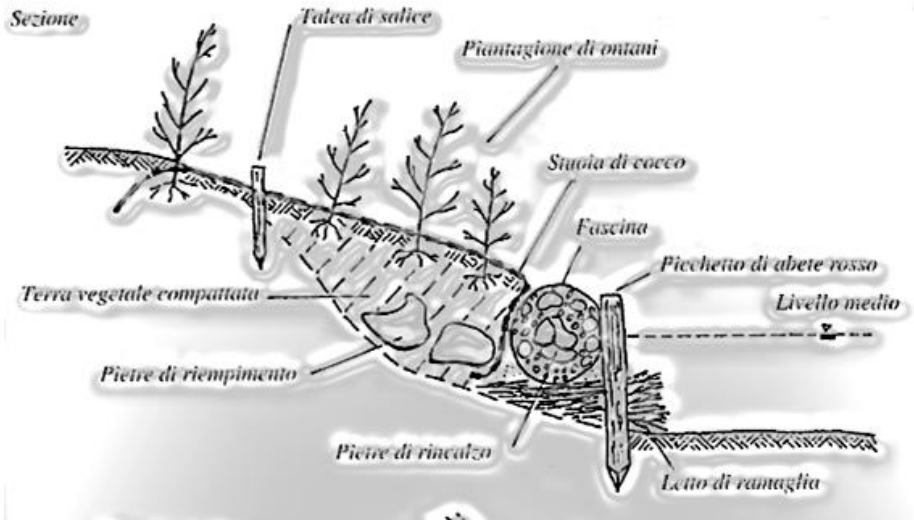
- Copertura diffusa con protezione al piede

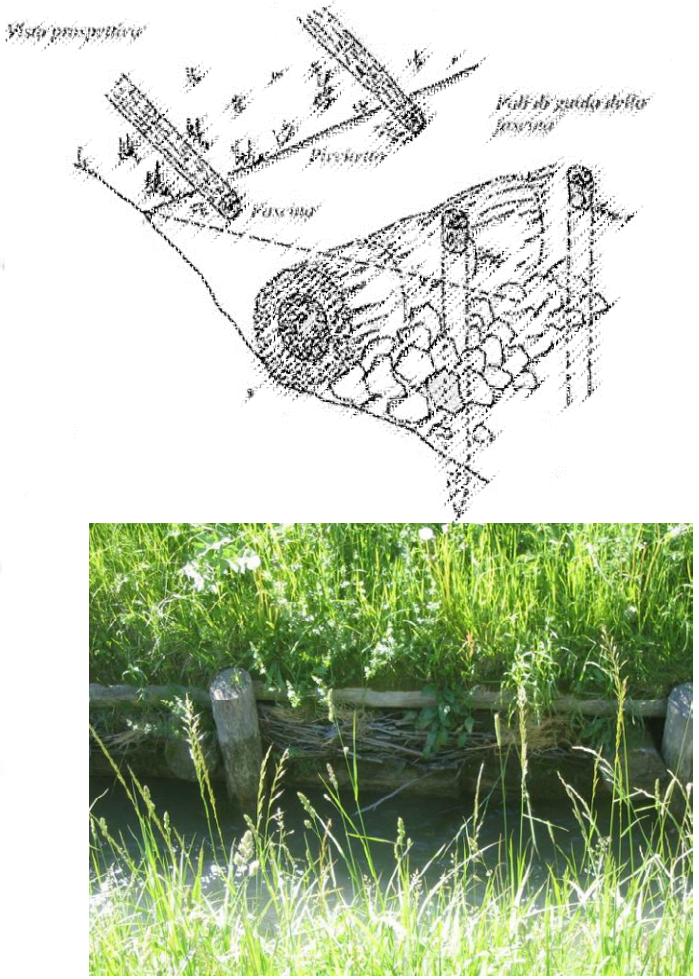




Bollettino Ufficiale della Regione Lombardia — 1° Suppl. Straordinario al n. 19 - 9 maggio 2000

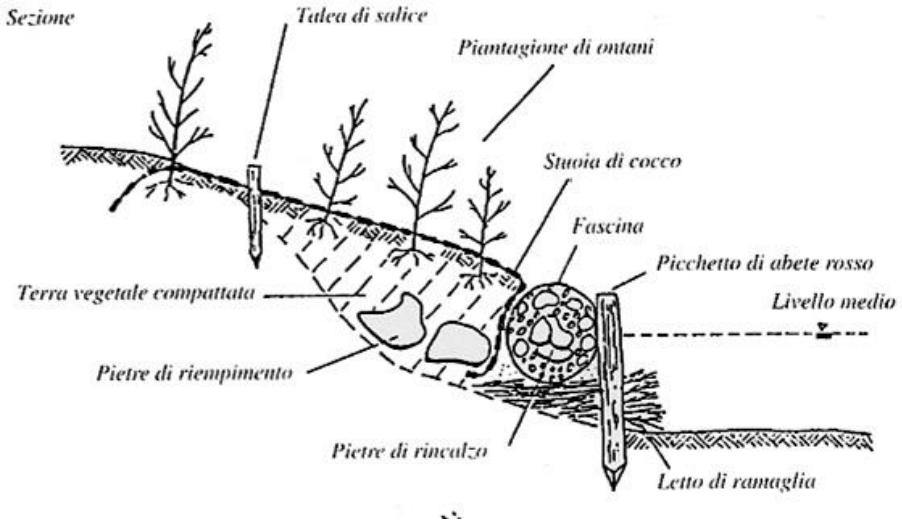
- Fascine

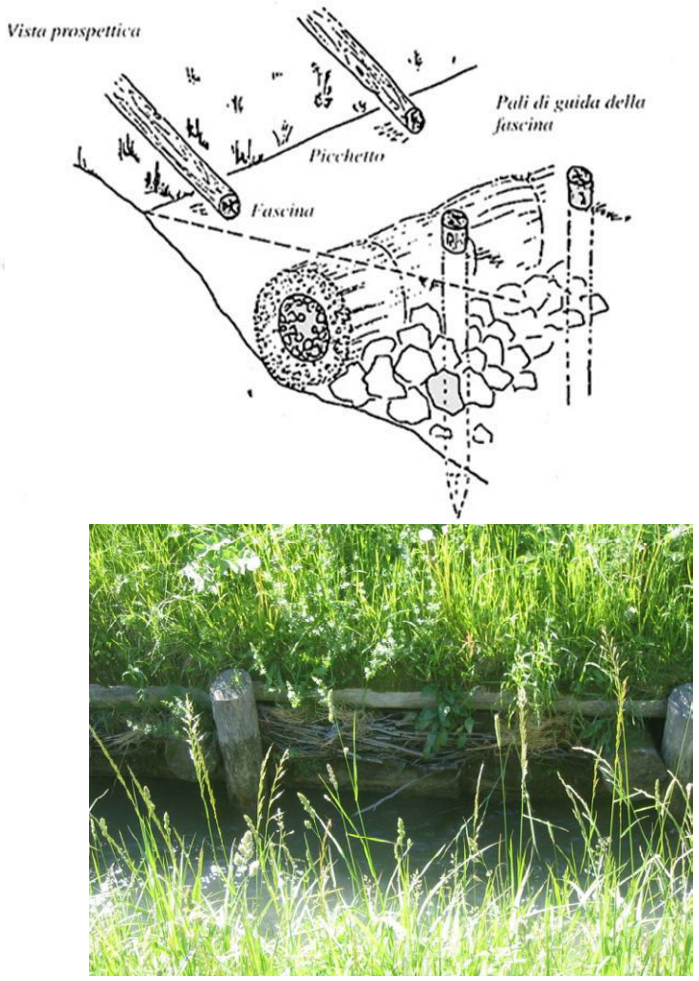




(AA.VV., 2008. La riqualificazione dei canali agricoli Linee guida per la Lombardia, Quaderni della ricerca. Regione Lombardia. https://sites.unimi.it/smartgreen/documenti/manualeLIRICA_web6MB.pd)

- Fascine

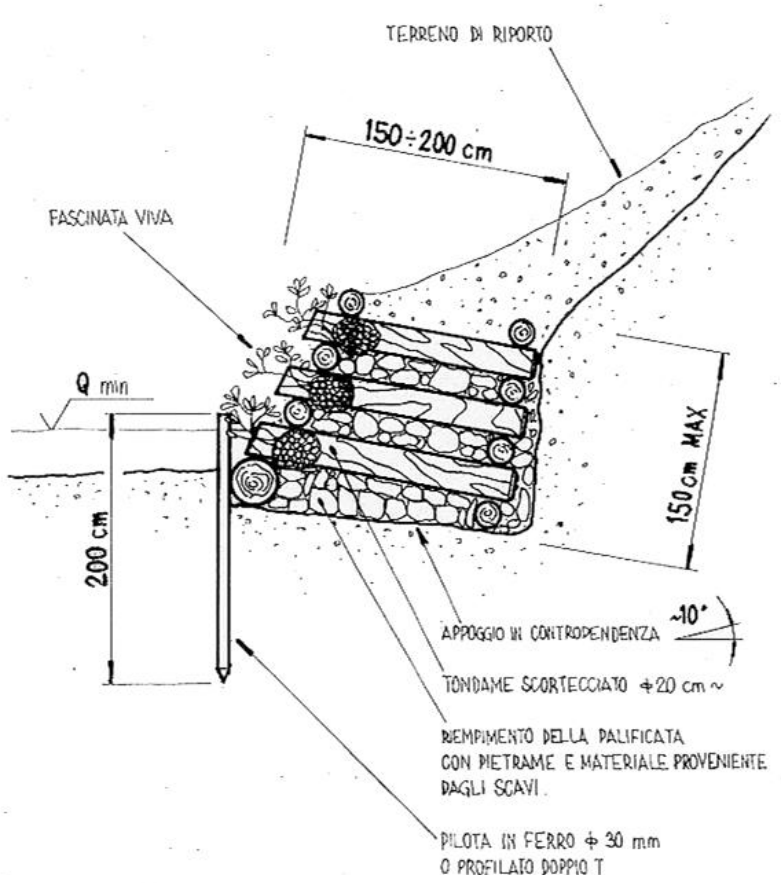


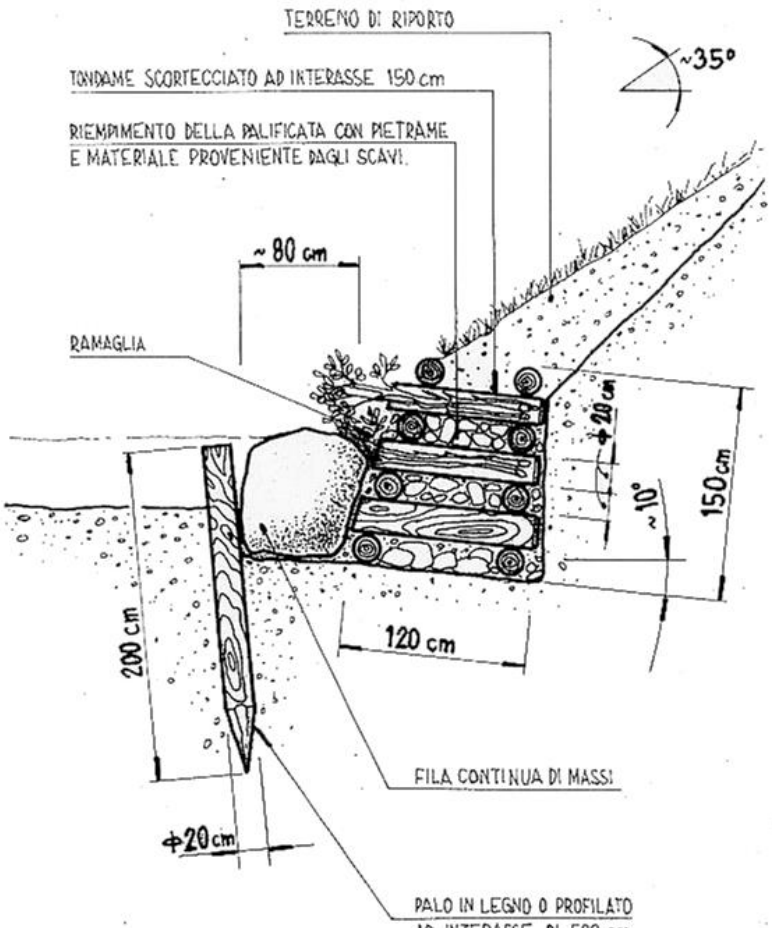


(AA.VV., 2008. La riqualificazione dei canali agricoli Linee guida per la Lombardia, Quaderni della ricerca. Regione Lombardia. https://sites.unimi.it/smartgreen/documenti/manualeLIRICA_web6MB.pd)

Interventi di sostegno

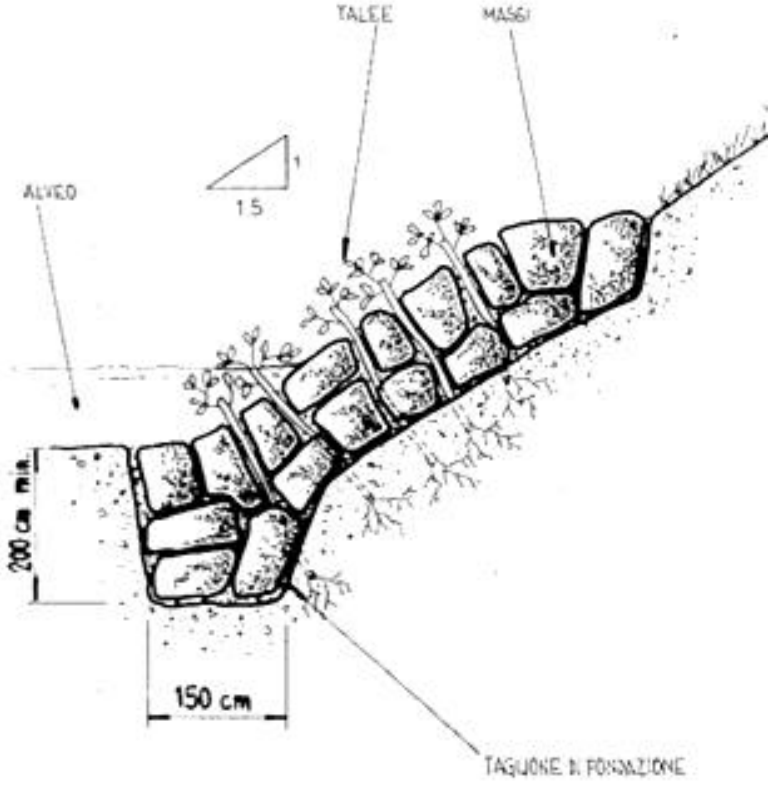
- Palizzata viva

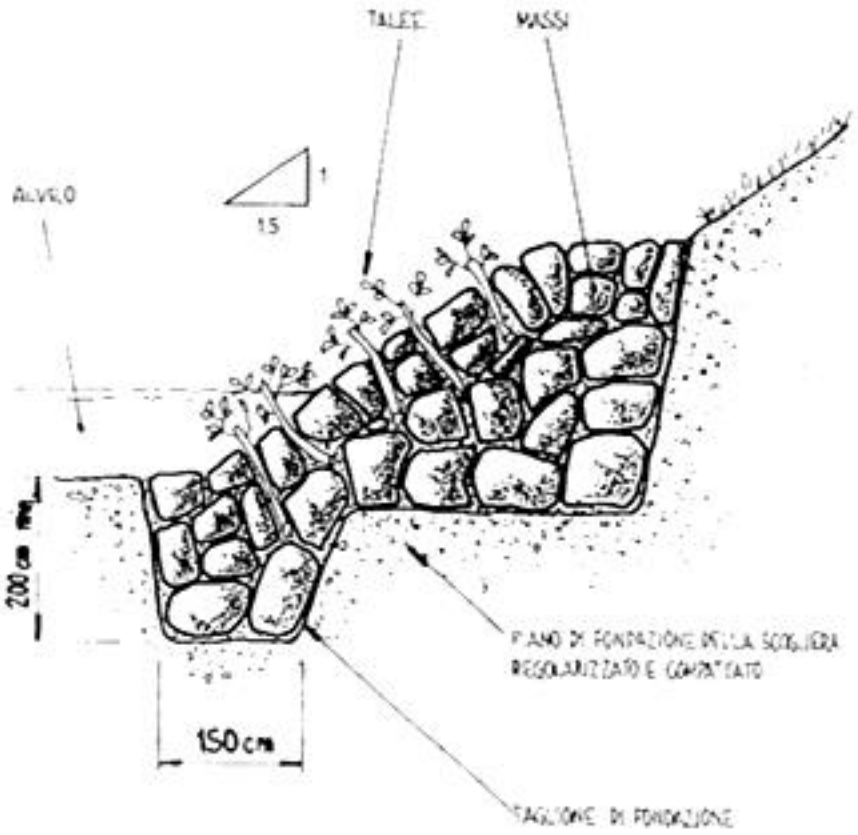




Bollettino Ufficiale della Regione Lombardia — 1° Suppl. Straordinario al n. 19 - 9 maggio 2000

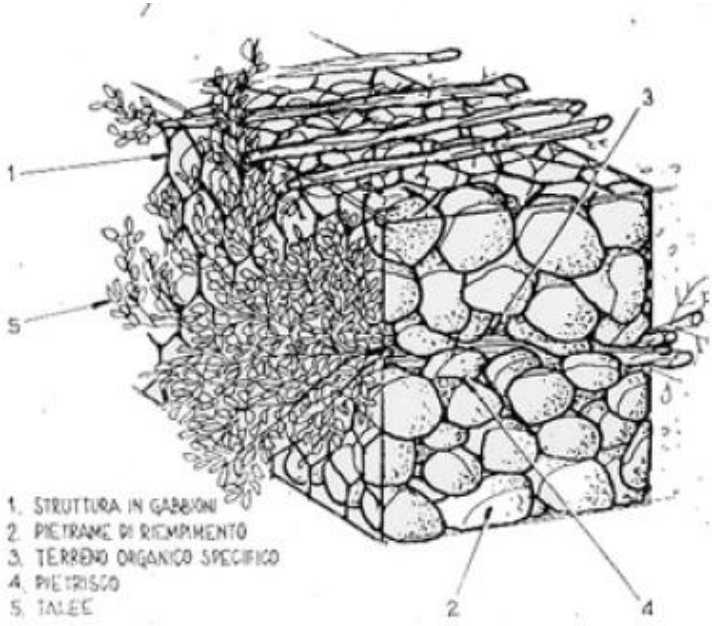
- Scogliera viva





Bollettino Ufficiale della Regione Lombardia — 1° Suppl. Straordinario al n. 19 - 9 maggio 2000

- Gabbionate con talee



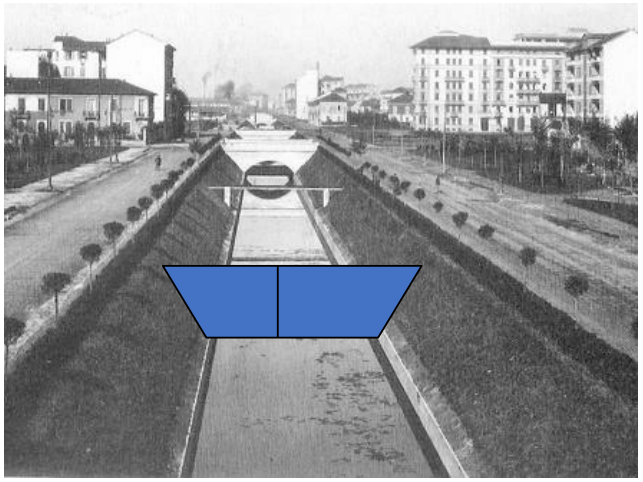
Bollettino Ufficiale della Regione Lombardia — 1° Suppl. Straordinario al n. 19 - 9 maggio 2000

Richiami di IDRAULICA

- **Correnti a superficie libera**

Definizione: le correnti a superficie libera hanno la parte superiore del perimetro è **a pressione atmosferica (-> sezione aperta).**

Sezione APERTA



Fiume Olona
Piazza Bolivar (Milano)
https://milano.fandom.com

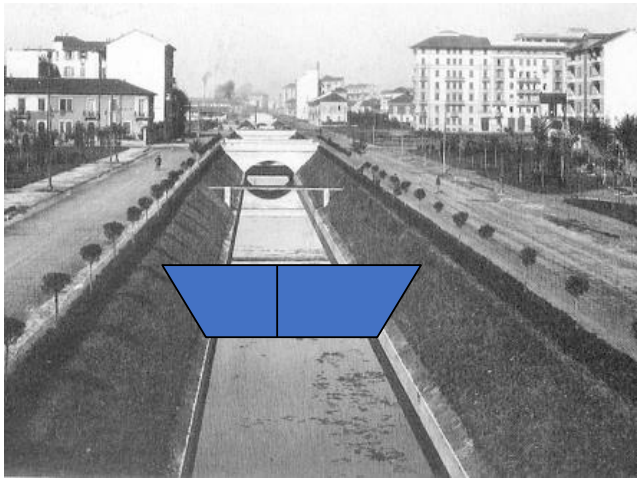
Sezione CHIUSA

Canalizzazione delle acque reflue
Uggiano La Chiesa (Otranto)
http://www.vocedellacqua.it

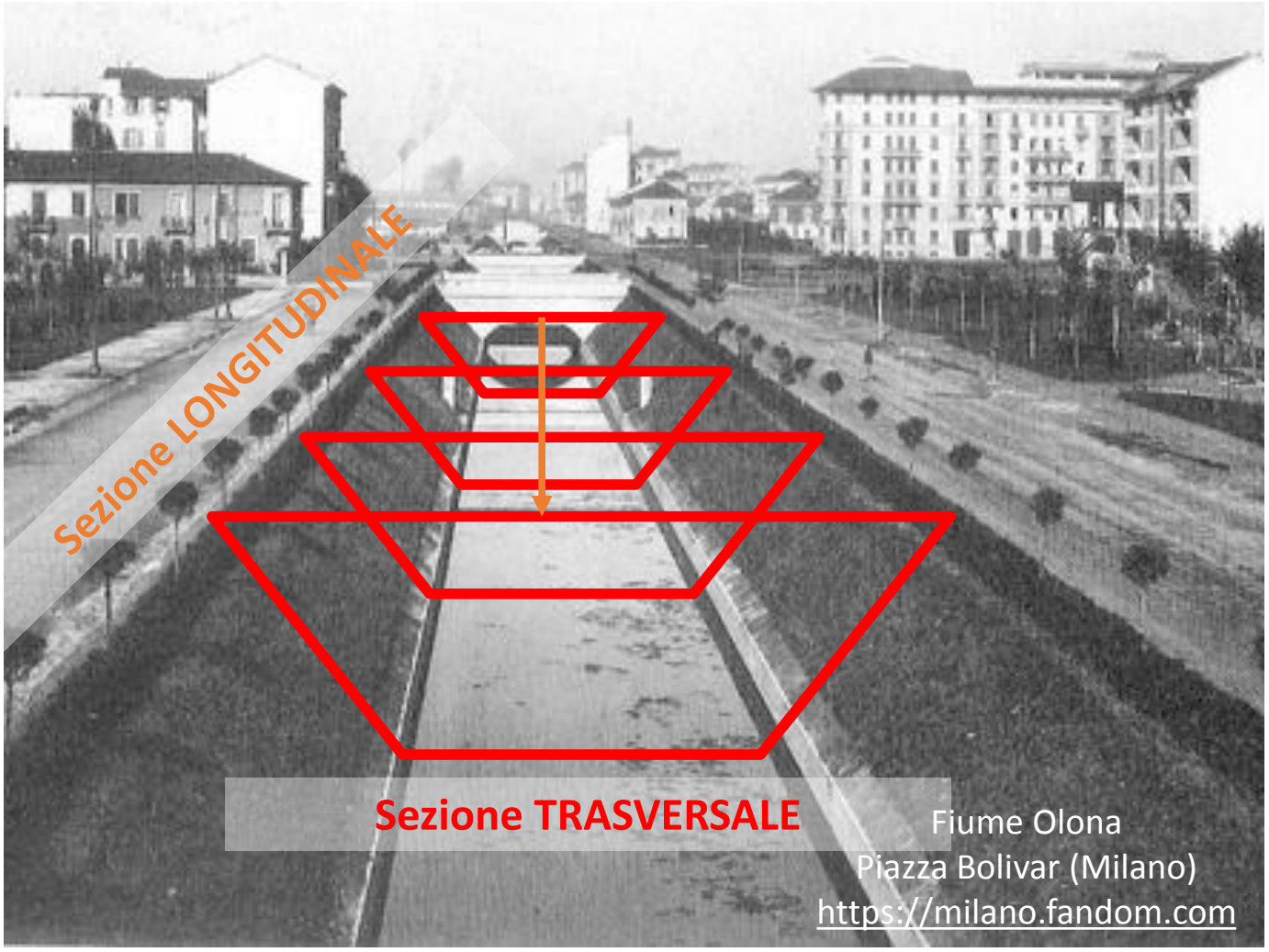
Semplificazioni:

- **Alvei cilindrici** (sezione trasversale e pendenza del fondo costanti nella direzione del moto);
- **A sezione compatta** (tirante dello stesso ordine di grandezza della larghezza in superficie e scabrezza uniforme lungo il profilo);
- **A fondo fisso** (non si ha variazione della geometria nel tempo).

Sezione APERTA



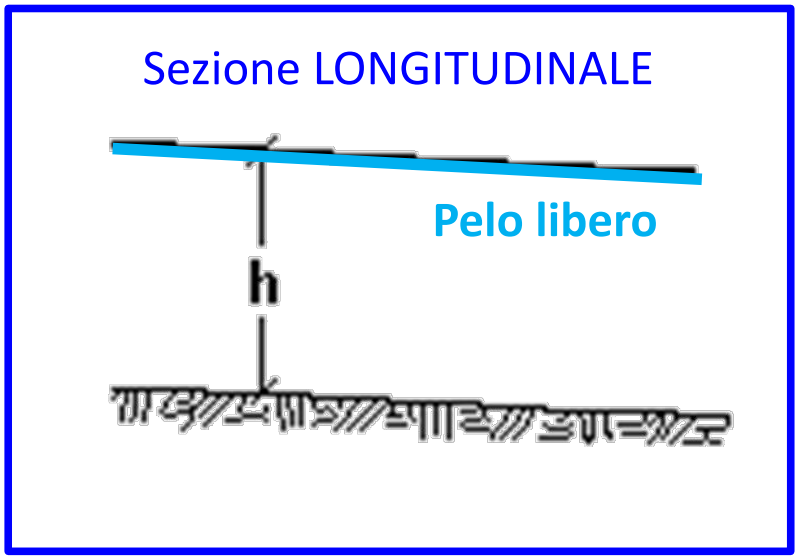
Fiume Olona
Piazza Bolivar (Milano)
https://milano.fandom.com



Fiume Olona
Piazza Bolivar (Milano)
https://milano.fandom.com

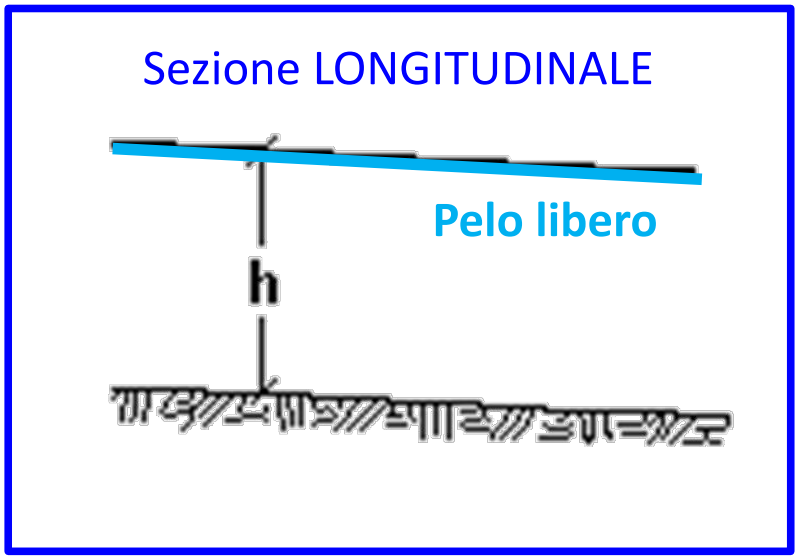
- **Profilo di corrente a superficie libera**

Definizione: il profilo di una corrente a superficie libera (o **a pelo libero**) è il luogo dei punti di intersezione della superficie libera con **la verticale passante per il punto più depresso di ogni sezione.**



Linea di fondo: linea che congiunge i punti più depressi delle sezioni progressive.

Tirante: l'altezza tra la linea di fondo e il pelo libero.



Schemi del CAMPO DI MOTO

In linea di principio, le caratteristiche del moto (ossia il campo delle velocità) sono variabili da punto a punto nello **spazio** tridimensionale e nel **tempo**: moto ***tridimensionale non stazionario (moto vario)*** ⇨ $\boldsymbol{v} = \boldsymbol{v}(x,y,z,t)$

In molte situazioni pratiche, il campo di velocità può essere assunto **costante nel tempo**: moto ***stazionario (moto permanente)*** ⇨ $\boldsymbol{v} = \boldsymbol{v}(x,y,z)$

In molte situazioni pratiche, il campo di velocità può essere assunto ***stazionario*** e ***bidimensionale*** ⇨ $\boldsymbol{v} = \boldsymbol{v}(x,y)$

o addirittura ***stazionario*** e ***monodimensionale (moto uniforme)*** ⇨ $\boldsymbol{v} = \boldsymbol{v}(x)$

In linea di principio, le caratteristiche del moto (ossia il campo delle velocità) sono variabili da punto a punto nello **spazio** tridimensionale e nel **tempo**: moto ***tridimensionale non stazionario (moto vario)*** ⇨ $\boldsymbol{v} = \boldsymbol{v}(x,y,z,t)$

In molte situazioni pratiche, il campo di velocità può essere assunto **costante nel tempo**: moto ***stazionario (moto permanente)*** ⇨ $\boldsymbol{v} = \boldsymbol{v}(x,y,z)$

In molte situazioni pratiche, il campo di velocità può essere assunto ***stazionario*** e ***bidimensionale*** ⇨ $\boldsymbol{v} = \boldsymbol{v}(x,y)$

o addirittura ***STAZIONARIO*** e ***MONODIMENSIONALE (MOTO UNIFORME)*** ⇨ $\boldsymbol{v} = \boldsymbol{v}(x)$

Moto UNIFORME

Complesso

Moto vario
la portata e la profondità variano nel tempo e nello spazio;

Moto permanente
la portata è costante mentre
la profondità nello spazio;

Moto uniforme
la portata e la profondità
sono costanti
nello spazio e
nel tempo.

Semplificato

Complesso

equazioni di Navier-Stokes

$$\begin{cases} \dfrac{\partial u}{\partial x}+\dfrac{\partial v}{\partial y}+\dfrac{\partial w}{\partial z}=0 \\ \dfrac{\partial u}{\partial t}+u\dfrac{\partial u}{\partial x}+v\dfrac{\partial u}{\partial y}+w\dfrac{\partial u}{\partial z}=g_x-\dfrac{1}{\rho}\dfrac{\partial \rho}{\partial x}+\dfrac{\mu}{\rho}\nabla^2 u \\ \dfrac{\partial v}{\partial t}+u\dfrac{\partial v}{\partial x}+v\dfrac{\partial v}{\partial y}+w\dfrac{\partial v}{\partial z}=g_y-\dfrac{1}{\rho}\dfrac{\partial \rho}{\partial y}+\dfrac{\mu}{\rho}\nabla^2 v \\ \dfrac{\partial w}{\partial t}+u\dfrac{\partial w}{\partial x}+v\dfrac{\partial w}{\partial y}+w\dfrac{\partial w}{\partial z}=g_z-\dfrac{1}{\rho}\dfrac{\partial \rho}{\partial z}+\dfrac{\mu}{\rho}\nabla^2 w \end{cases}$$

Moto vario

equazioni di De Saint Venant

$$\begin{cases} \dfrac{\partial A}{\partial t}+\dfrac{\partial Q}{\partial x}=0 \\ \dfrac{\partial h}{\partial x}+\dfrac{v}{g}\dfrac{\partial v}{\partial x}+\dfrac{1}{g}\dfrac{\partial v}{\partial t}=i-j \end{cases}$$

Moto permanente

$$\begin{cases} \dfrac{\partial Q}{\partial x}=0 \\ \dfrac{\partial h}{\partial x}+\dfrac{v}{g}\dfrac{\partial v}{\partial x}=i-j \end{cases}$$

Moto uniforme

formula di Chezy

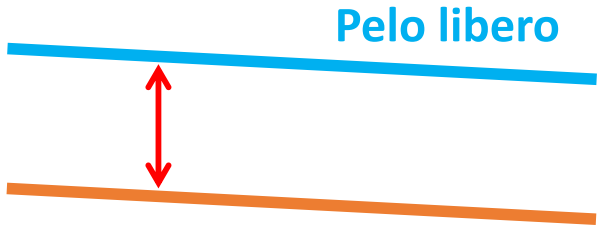
$$Q = A\,Ks\,R^{2/3}\sqrt{i}$$

Semplificato

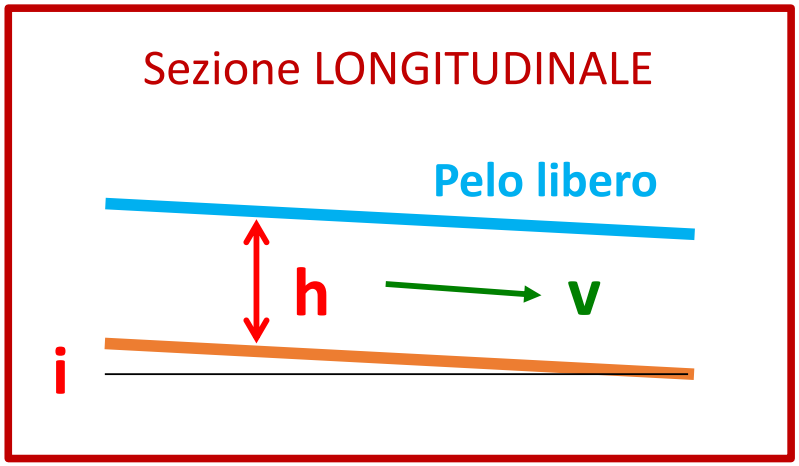
Canale Muzza, Consorzio Bonifica Muzza Bassa Lodigiana
http://www.muzza.it

Sezione TRASVERSALE

Sezione LONGITUDINALE



- **h** = altezza idrometrica (o tirante) [m]
- **A** = area della sezione bagnata [m^2]
- **P** = perimetro bagnato o contorno bagnato [m]
- **v** = velocità media della corrente
- **i** = pendenza longitudinale [m/m]
- **R = raggio idraulico = A/P -> dipende dalla geometria e dall'altezza idrometrica**



Quali sono le differenze??? **Scabrezza di fondo e di sponda**

• Elementi delle correnti a pelo libero

- **h** = altezza idrometrica (o tirante) [m]
- **A** = area della sezione bagnata [m^2]
- **P** = perimetro bagnato o contorno bagnato [m]
- **v** = velocità media della corrente
- **i** = pendenza longitudinale [m/m]
- **R = raggio idraulico = A/P -> dipende dalla geometria e dall'altezza idrometrica**
- **C = coefficiente di scabrezza ?!**
- **Q = portata liquida [m^3/s] !!**

Le equazioni fondamentali

- Equazione di continuità
  - Principio di conservazione della massa
- Equazione dell’energia
  - Principio di conservazione dell’energia meccanica
  - Teorema di BERNOULLI
- Equazione della quantità di moto
  - Principio di conservazione della quantità di moto

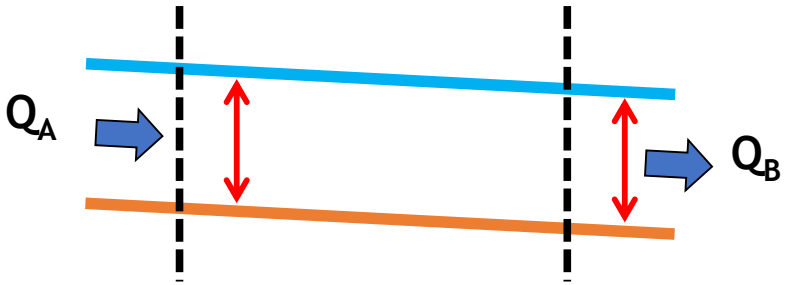
Principio di conservazione della massa

Empedocle (Akragas, 492 a.C. ca. – Akragas, 430 a.C. ca.)

"Nulla viene dal nulla"

https://nl.wikipedia.org/wiki/Empedocles

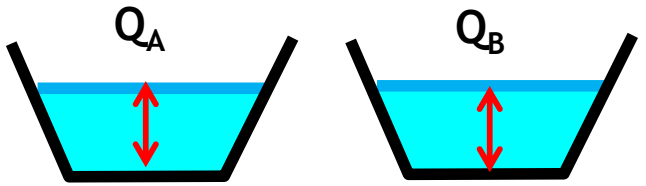
Sezione LONGITUDINALE



- sezione uguale
- Q_A-Q_B = 0

-------<> stesso tirante

Sezione TRASVERSALE



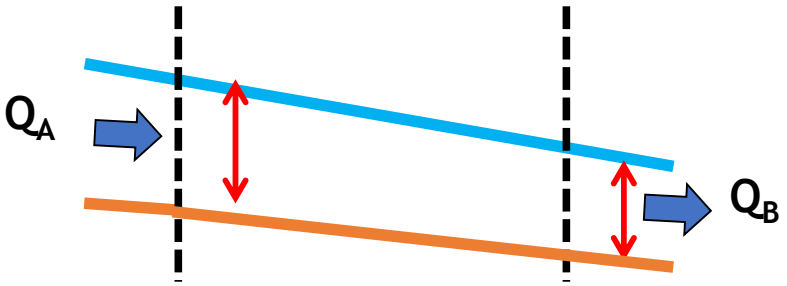
$$Q_A = Q_B$$

Principio di conservazione della massa

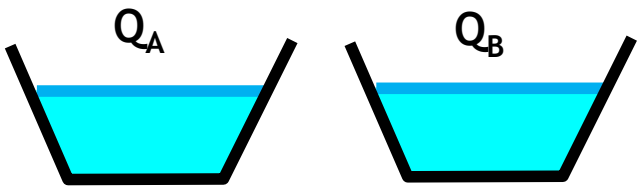
Empedocle (Akragas, 492 a.C. ca. – Akragas, 430 a.C. ca.)

"Nulla viene dal nulla"

Sezione LONGITUDINALE



Sezione TRASVERSALE



$$Q_A = Q_B$$

?

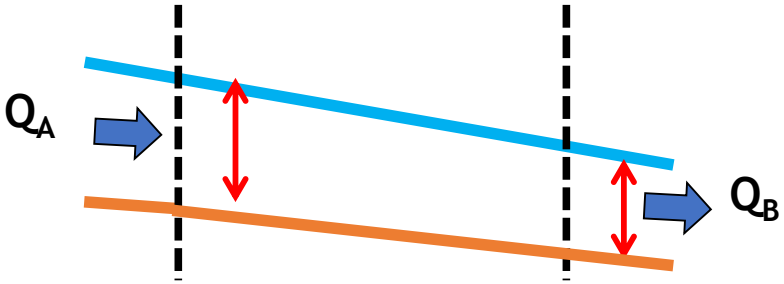
- sezione cambia
- Q_A-Q_B = 0

-------<> ????

Principio di conservazione della massa

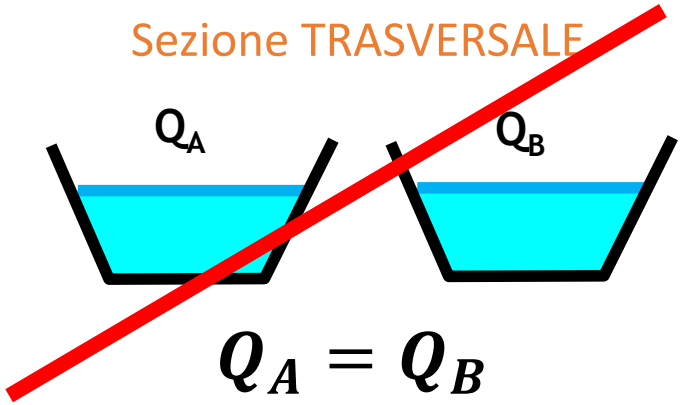
Empedocle (Akragas, 492 a.C. ca. – Akragas, 430 a.C. ca.)
"Nulla viene dal nulla"

Sezione LONGITUDINALE



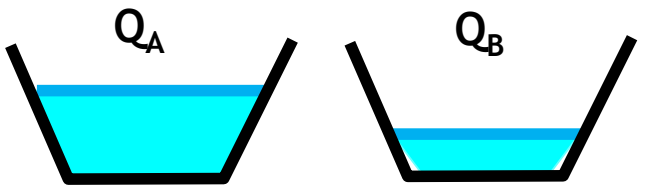
- Se la sezione si reduce
  -> la velocità aumenta
- Se la sezione aumenta
  -> la velocità si riduce

Sezione TRASVERSALE



$$Q_A = Q_B$$

Sezione TRASVERSALE



$$A_A \cdot v_A = A_B \cdot v_B$$

Principio di conservazione dell'energia meccanica

Teorema di BERNOULLI

"In caso di moto permanente di un fluido perfetto, pesante ed incomprimibile, il carico totale si mantiene costante lungo ogni traiettoria".

H = ENERGIA SPECIFICA

energia meccanica complessiva posseduta dall'unità di fluido in movimento = (m)

z = QUOTA GEODETICA o ENERGIA POSIZIONALE

energia potenziale dovuta alla posizione nel campo gravitazionale = (m)

$\frac{p}{\gamma}$ = ALTEZZA PIEZOMETRICA

forma di energia legata alla pressione p (energia di pressione) = (m)

$\frac{v^2}{2g}$ = ENERGIA CINETICA

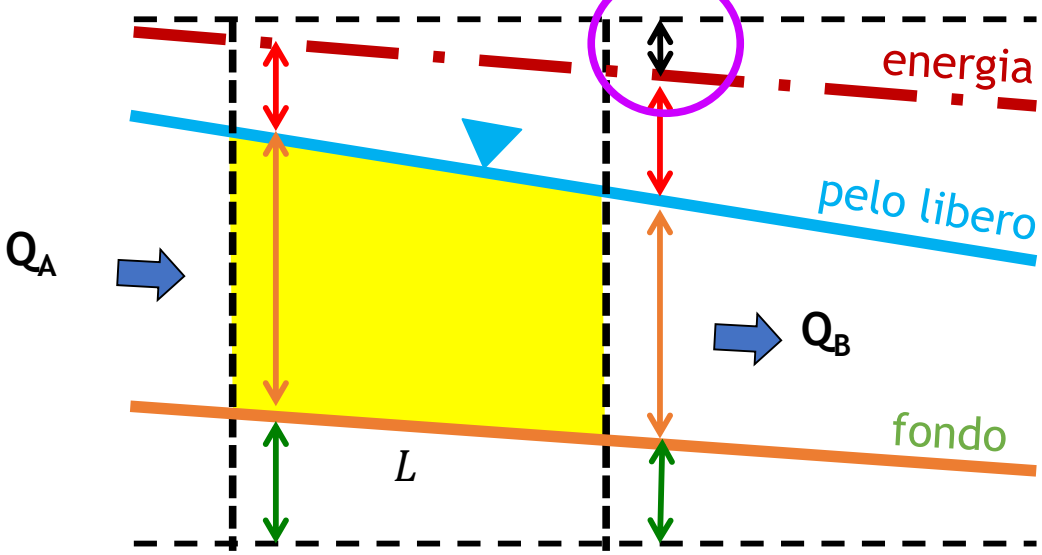
energia posseduta dall'unità di peso del fluido per il fatto che è animata dalla velocità = (m)

$$H(s) = z + \frac{p}{\gamma} + \frac{v^2}{2g} = \text{cost}$$

Teorema di BERNOULLI

$$z_A + \frac{p_A}{\gamma} + \frac{v_A^2}{2g} = z_B + \frac{p_B}{\gamma} + \frac{v_B^2}{2g} + \Delta h$$

Sezione LONGITUDINALE



Daniel Bernoulli
(Groninga, 1700 – Basilea, 1782)

https://it.wikipedia.org/wiki/Daniel_Bernoulli

$$\Delta h = L \cdot J$$

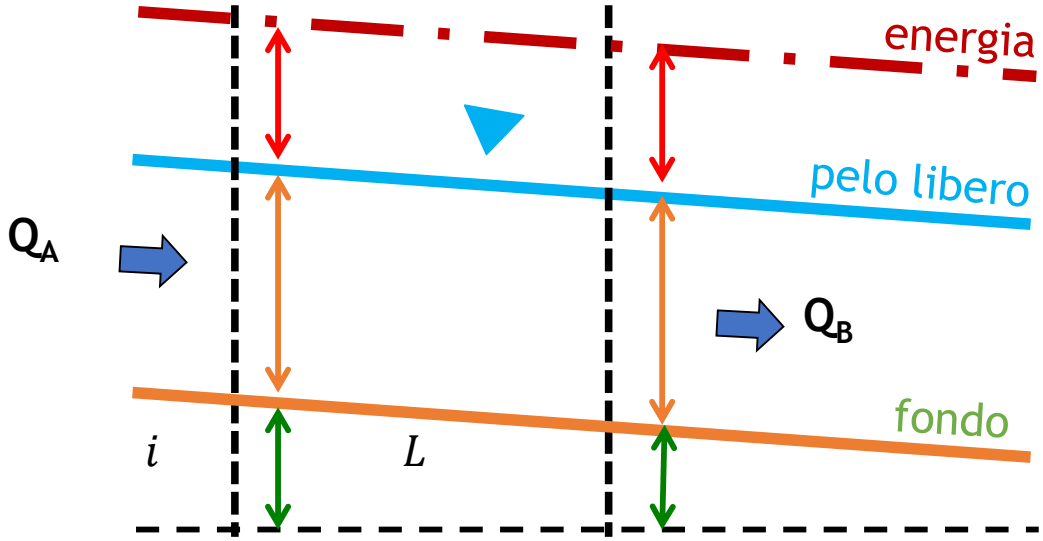
$$z = 0$$

Quota
di riferimento

Teorema di BERNOULLI

$$z_A + \frac{p_A}{\gamma} + \frac{v_A^2}{2g} = z_B + \frac{p_B}{\gamma} + \frac{v_B^2}{2g} + L \cdot i$$

Sezione LONGITUDINALE



Quando le tre linee (fondo, piezometrica ed energia) hanno la stessa pendenza, e quindi **sono parallele**, si hanno condizioni di **MOTO UNIFORME**.

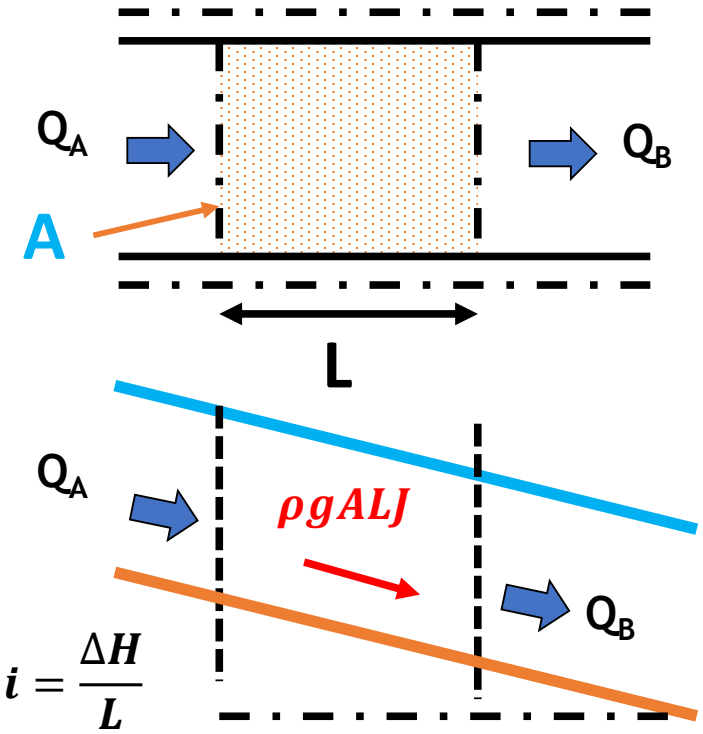
Il tirante, l'area bagnate, la portata e la distribuzione delle velocità **sono costanti** lungo l'intero tratto.

$$z = 0$$

$$i = J$$

La formula di CHEZY

- L'equazione di Chezy (1768) esprime la condizione di equilibrio tra gravità e resistenza al moto.



Forza che produce il moto

$$\rho gALJ$$

Forza che resiste al moto
(C=coefficiente di attrito-viscosità)

$$CPLV^2$$

$$V = \sqrt{\frac{\rho g}{C}} \sqrt{\frac{A}{P}} \sqrt{J}$$

$$V = \sqrt{\frac{\rho g}{C}}\sqrt{\frac{A}{P}}\sqrt{j} \quad \Rightarrow \quad V = \chi\sqrt{RJ} \quad \Rightarrow \quad \boxed{V = \chi\sqrt{Ri}}$$

- χ = coefficiente che dipende dalla scabrezza e dal raggio idraulico e rimane il punto più critico per la stima della velocità media nella sezione in moto uniforme.

https://www.photo.rmn.fr

Antoine Chézy
(Châlons-en-Champagne, 1718 – Parigi, 1798)

- Esistono varie formulazioni:

$$\chi = \frac{1}{n}R^{1/6} \qquad \text{Manning (1889)}$$

$$\chi = Ks\ R^{1/6} \qquad \text{Gauckler (1867) - Strickler (1923)}$$

Gauckler-Strickler

$$Q = Ks\ A(h)\ R(h)^{2/3}\ i^{1/2}$$

Manning

$$Q = \frac{1}{n} A(h)\ R(h)^{2/3}\ i^{1/2}$$

La formulazione mostra la relazione tra la portata (Q) e l'altezza idrometrica (h).

Essa permette di risolvere diversi problemi progettuali:

- **valutazione della capacità di deflusso** per data geometria, pendenza e scabrezza;

- **valutazione della geometria necessaria a consentire il deflusso** per data portata, pendenza e scabrezza;

- **valutazione della scabrezza** consentita per data portata, pendenza e geometria.

Il dimensionamento e la verifica di canali e tratti di corsi d'acqua in cui la corrente è in moto uniforme si basa sull'equazione del moto uniforme o di Chezy.

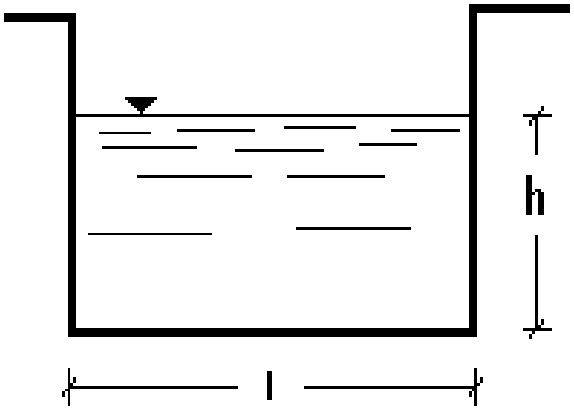
$$Q = A(h)\,\chi\,R(h)^{1/2}\,i^{1/2}$$

In genere esistono vincoli progettuali abbastanza stretti su:

- **larghezza di fondo** per ragioni economiche e statiche (espropri ampiezza della sezione in funzione della natura del terreno);
- **pendenza delle sponde** ancora per ragioni statiche;
- **pendenza di fondo** che si deve scostare di poco dalla pendenza naturale;

Le principali variabili di progetto si riducono, in genere, alla portata Q ed all'altezza h

Sezione rettangolare



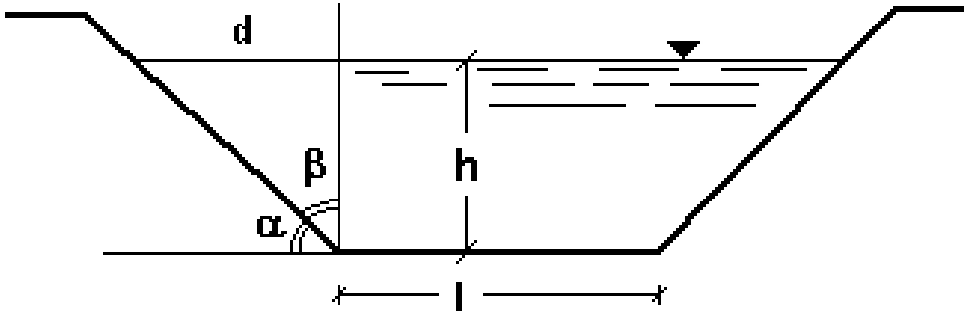
Se $l >> h$

$$R = \frac{l\,h}{2h + l} = \frac{h}{\frac{2h}{l} + 1} \approx h$$

$$R = \frac{A}{C} = \frac{l\,h}{2h + l}$$

(es. alvei naturali, canali di bonifica in cui la larghezza è preponderante rispetto alla profondità dell'acqua)

Sezione trapezia



$$d = h \operatorname{tg} \beta$$

scarpa

$$\operatorname{tg} \beta = \frac{d}{h} = n = \frac{1}{\operatorname{tg} \alpha}$$

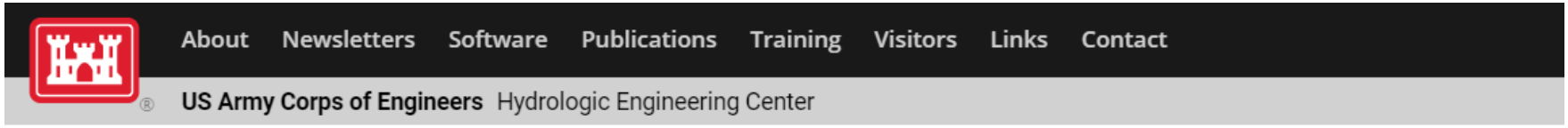
n viene spesso espressa come rapporto tra *d* e *h*: 1:1; 3:2; 2:1.

$$A = \frac{2l + 2d}{2} h = (l + d) h = lh + nh^2 = (l + nh) h$$

$$C = l + 2\sqrt{h^2} + d^2 = l + 2\sqrt{h^2 + n^2 h^2} = l + 2h\sqrt{1 + n^2}$$

$$R = \frac{A}{C} = \frac{(l + nh) h}{l + 2h\sqrt{1 + n^2}}$$

Scabrezza in sezioni omogenee



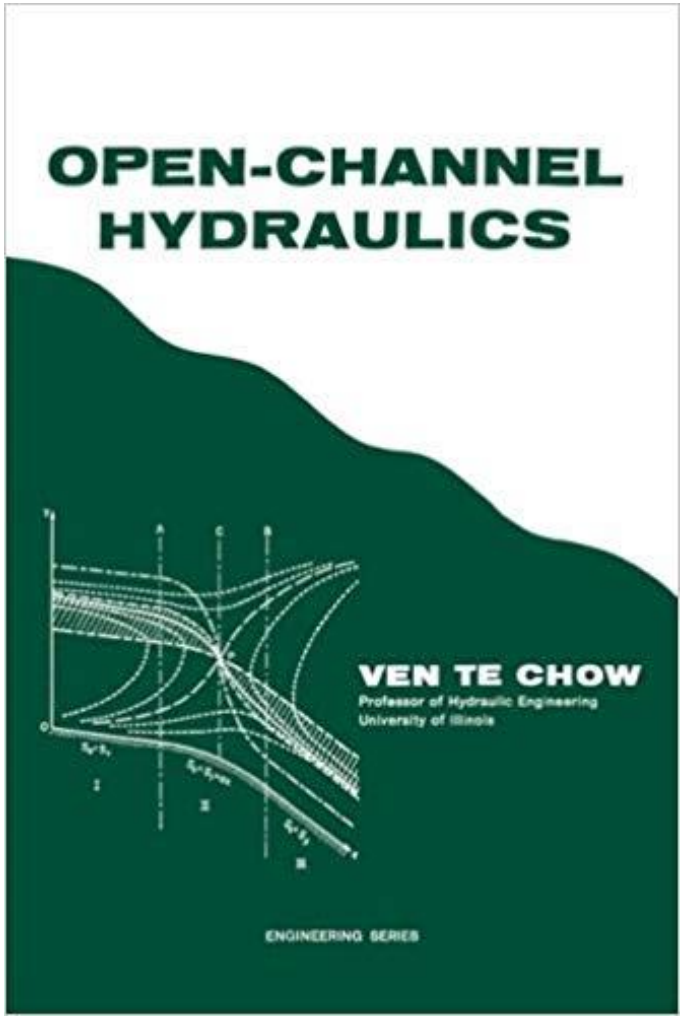
- **Manning's n**. Selection of an appropriate value for Manning's n is very significant to the accuracy of the

- **Manning's n**. Scegliere un appropriato valore del coefficiente n di Manning è molto importante per ottenere un'accuratezza accettabile nel calcolo dei profili di moto. Il valore del coefficiente di Manning è variabile e dipende da molti fattori: l'allineamento del canale, i processi di erosione e deposito; le ostruzioni e gli ostacoli al deflusso; le dimensioni e la forma del canale; il livello idrometrico e la portata; i cambiamenti stagionali; la temperatura; il trasporto solido in superficie e sul fondo.

Manning

$$Q = \frac{1}{n} A(h)\, R(h)^{2/3}\, i^{1/2}$$

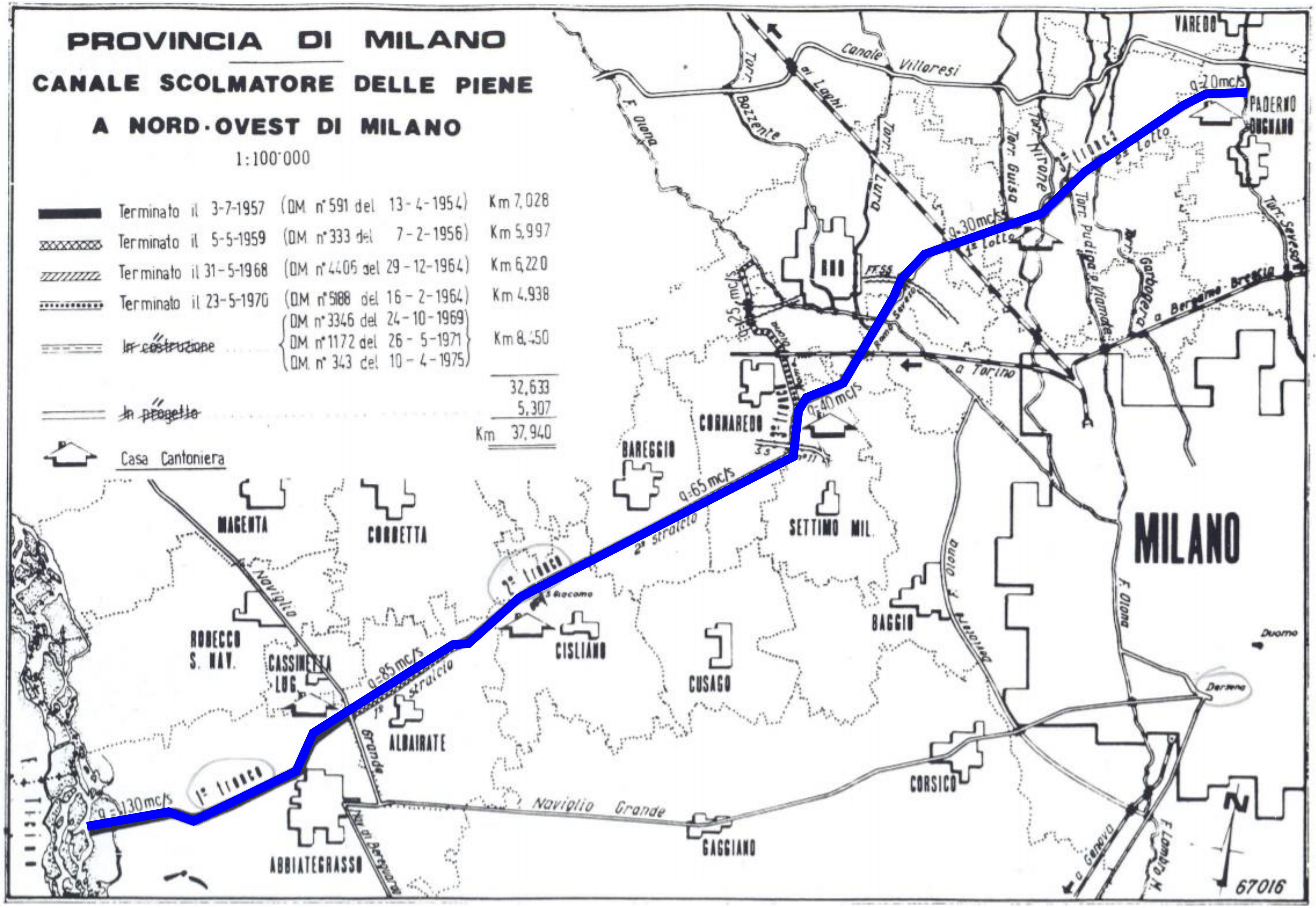
Tabelle empiriche



Tipo di canale	massimo	normale	minimo
Canali artificiali			
Canali in terra lisciata e uniforme			
Pulita, scavata di recente	62	56	50
Pulita, dopo prolungata esposizione	56	45	40
Ghiaia, sezione uniforme, pulita	45	40	33
Erba corta, pochi cespugli	45	37	30
Canali in terra con ondulazioni o irregolari			
Senza vegetazione	43	40	33
Con erba e pochi cespugli	40	33	30
Cespugli o piante acquatiche in canali profondi	33	29	25
Fondo in terra e sponde in pietrisco	36	33	29
Fondo in pietrame e sponde in cespugli	40	29	25
Fondo in ciottoli e sponde pulite	33	25	20
Canali scavati o dragati			
Senza vegetazione	40	36	30
Cespugli sparsi sulle sponde	29	20	17
Canali in roccia			
Lisci e uniformi	40	29	25
Frastagliati e irregolari	29	25	20

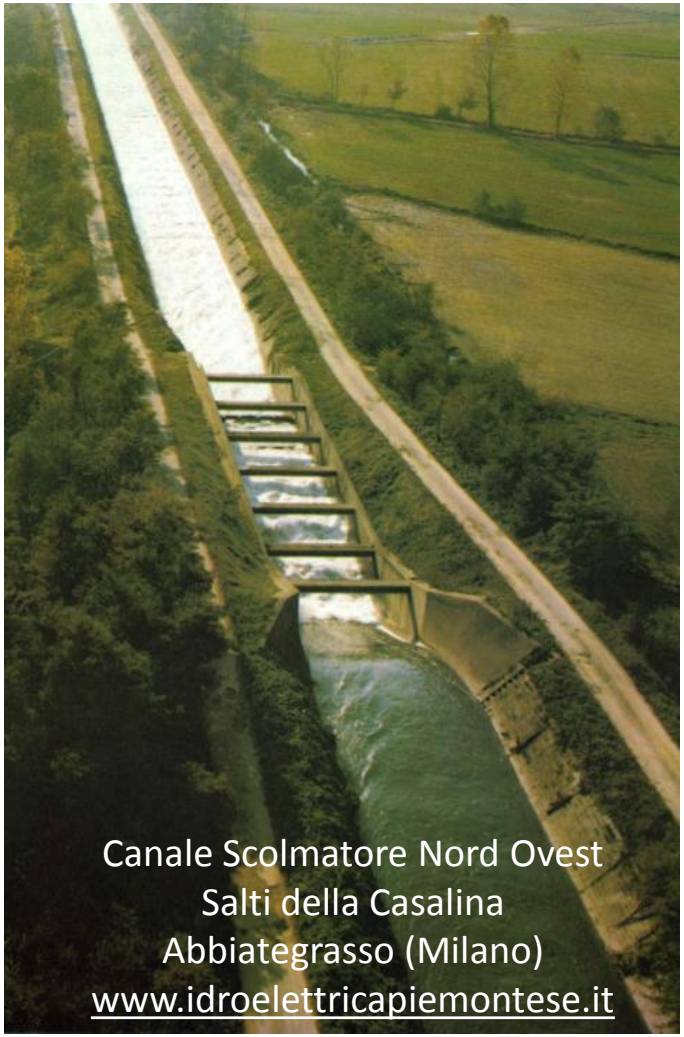
Tipo di canale	massimo	normale	minimo
Sterpaglia densa, alta quanto il tirante idrico	20	12	8
Fondo pulito, cespugli sulle sponde	25	20	12
Fondo pulito, cespugli sulle sponde, in piena	22	14	9
Cespugli densi e acque profonde	12	10	7
Corsi d'acqua naturali			
Corsi d'acqua minori (tirante inferiore a 3.5 m)			
Corsi d'acqua di pianura			
Puliti, rettilinei, in piena senza scavi localizzati	40	33	30
Puliti, rettilinei, in piena senza scavi localizzati, con sassi e sterpaglia	33	29	35
Puliti, ondulati, con alcune buche e banchi	30	25	22
Puliti, ondulati, con alcune buche e banchi, con cespugli e pietre	29	22	20
Puliti, ondulati, con alcune buche e banchi,in magra	25	21	18
Puliti, ondulati, con alcune buche e banchi, con cespugli e più pietrame	22	20	17
Tratti lenti, sterpaglia e buche profonde	20	14	12
Tratti molto erbosi, buche profonde e grossi arbusti e cespugli	13	10	7
Corsi d'acqua montani, senza vegetazione in alveo, sponde ripide, alberi e cespugli lungo le sponde sommergibili durante le piene			
Fondo: ghiaia, ciottoli e massi sparsi	33	25	20
Fondo: ciottoli e massi grossi	25	20	14

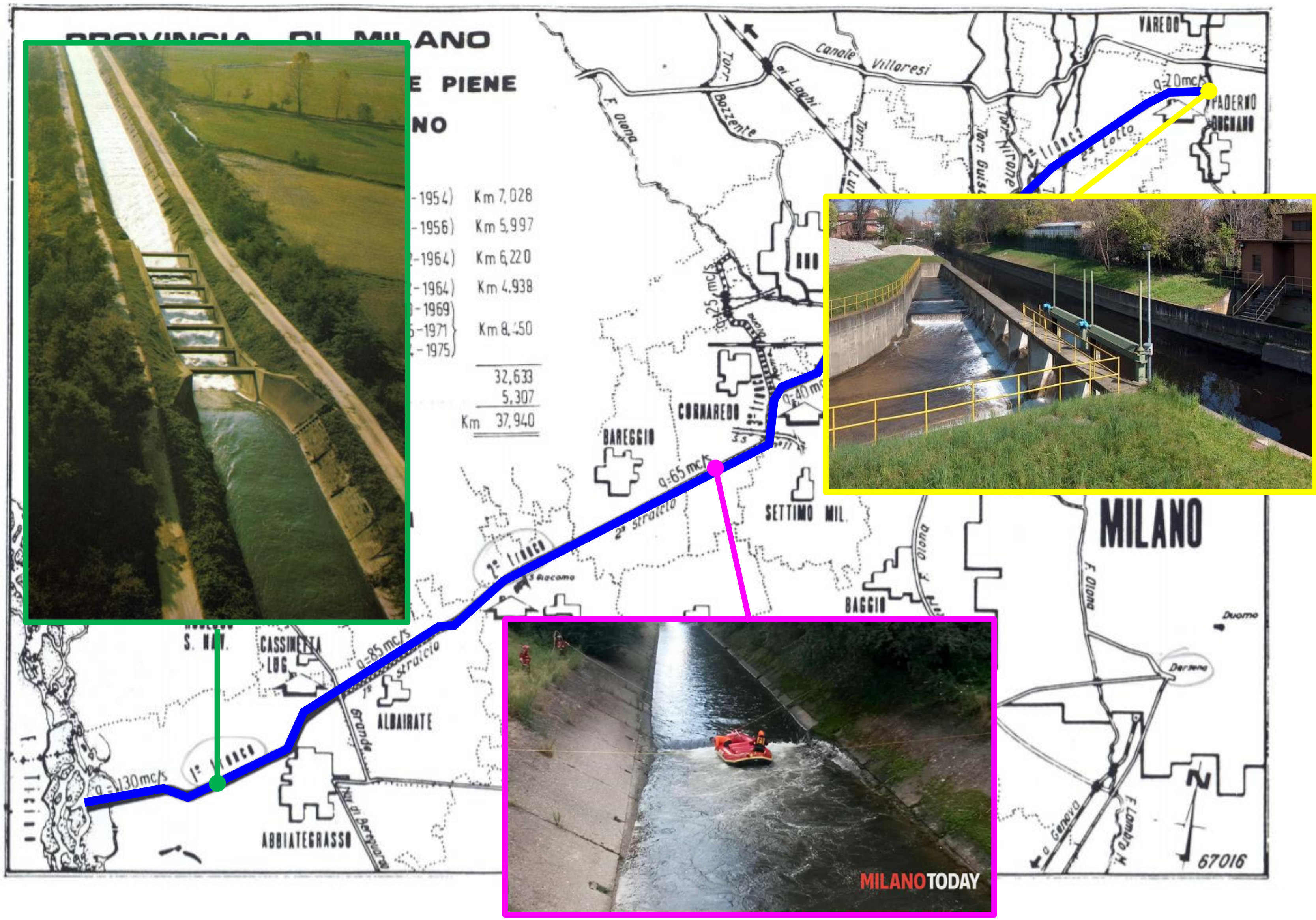
Applicazione della formula di Chezy
-
Scabrezza in sezione omogenea


PROVINCIA DI MILANO
CANALE SCOLMATORE DELLE PIENE
A NORD-OVEST DI MILANO
1:100'000
Terminato il 3-7-1957 (DM n° 591 del 13-4-1954) Km 7,028
Terminato il 5-5-1959 (DM n° 333 del 7-2-1956) Km 5,997
Terminato il 31-5-1968 (DM n° 4406 del 29-12-1964) Km 6,220
Terminato il 23-5-1970 (DM n° 5188 del 16-2-1964) Km 4,938
In costruzione (DM n° 3346 del 24-10-1969, DM n° 1172 del 26-5-1971, DM n° 343 del 10-4-1975) Km 8,450
32,633
In progetto 5,307
Km 37,940
Casa Cantoniera
Canale Villoresi
VAREDO
PADERNO DUGNANO
q=20mc/s
2° Lotto
q=30mc/s
1° Lotto
q=40mc/s
q=65 mc/s
2° stralcio
q=85 mc/s
1° stralcio
q=130mc/s
1° tronco
2° tronco
3° tronco
MAGENTA
CORBETTA
BAREGGIO
CORNAREDO
SETTIMO MIL.
MILANO
ROBECCO S. NAV.
CASSINETTA LUG.
ALBAIRATE
CISLIANO
CUSAGO
BAGGIO
CORSICO
GAGGIANO
ABBIATEGRASSO
Naviglio Grande
Naviglio
a Torino
a Genova
a Bergamo - Brescia
F. Olona
Torr. Lura
Torr. Bozzente
Torr. Guisa
Torr. Nirone
Torr. Pudiga
Torr. Seveso
Duomo
Darsena
Ticino
N
67016

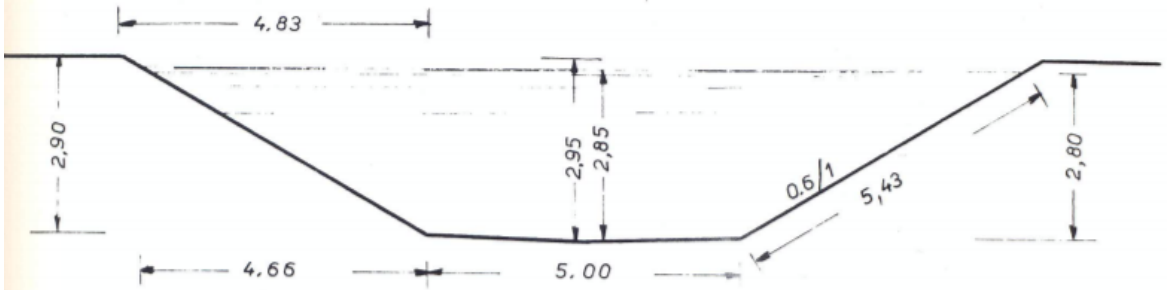
Canale Scolmatore Nord Ovest
Paderno Dugnano (Milano)

Canale Scolmatore Nord Ovest
Cornaredo (Milano)
MILANOTODAY


Canale Scolmatore Nord Ovest
Salti della Casalina
Abbiategrasso (Milano)
www.idroelettricapiemontese.it


ANO
E PIENE
NO
-1954) Km 7,028
-1956) Km 5,997
-1964) Km 6,220
-1964) Km 4,938
-1969
-1971 Km 8,450
-1975)
32,633
5,307
Km 37,940
VAREDO
Canale Villoresi
F. Olona
q-20mc/s
PADERNO DUGNANO
CORNAREDO
BAREGGIO
q-65 mc/s
2° stralcio
SETTIMO MIL.
MILANO
BAGGIO
Duomo
Darsena
S. NAV.
CASSINETTA LUG.
q-85 mc/s
ALBAIRATE
ABBIATEGRASSO
q-130 mc/s
Ticino
67016
MILANOTODAY

SEZIONE TIPO A Q= 65 mc/s i = 1 ‰



Sezione Liquida — $A = m^2\ 27,18$
Ramo Seveso

Contorno Bagnato — $C = m.\ 15,86$

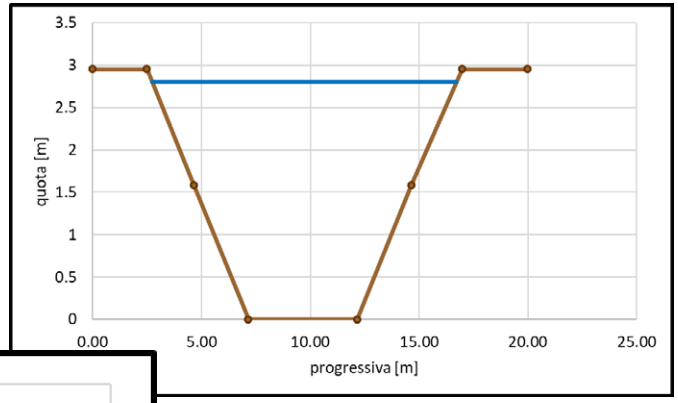
Raggio Medio — $R = \frac{A}{C} = m.\ 1,713$

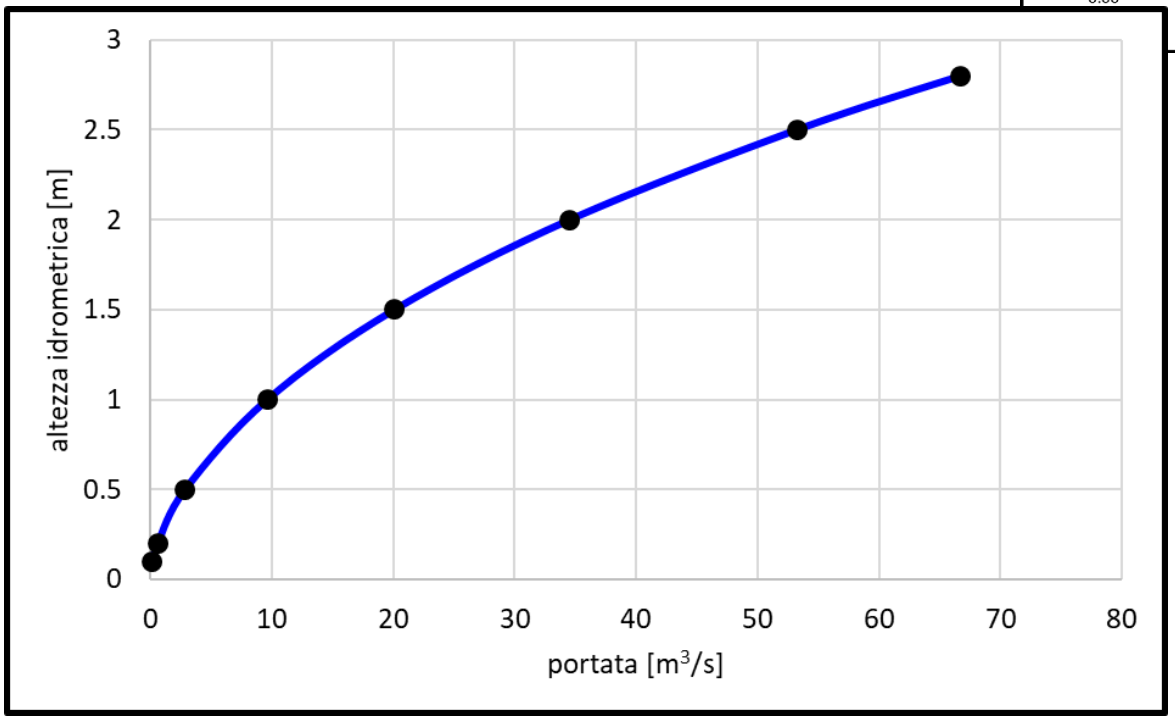
$R^{\frac{2}{3}} = 1,43$

Velocità media — $V = 56\ R^{\frac{2}{3}} i^{\frac{1}{2}} = m/s\ 2,56$

Portata — $Q = VA = mc/s\ 69,60$

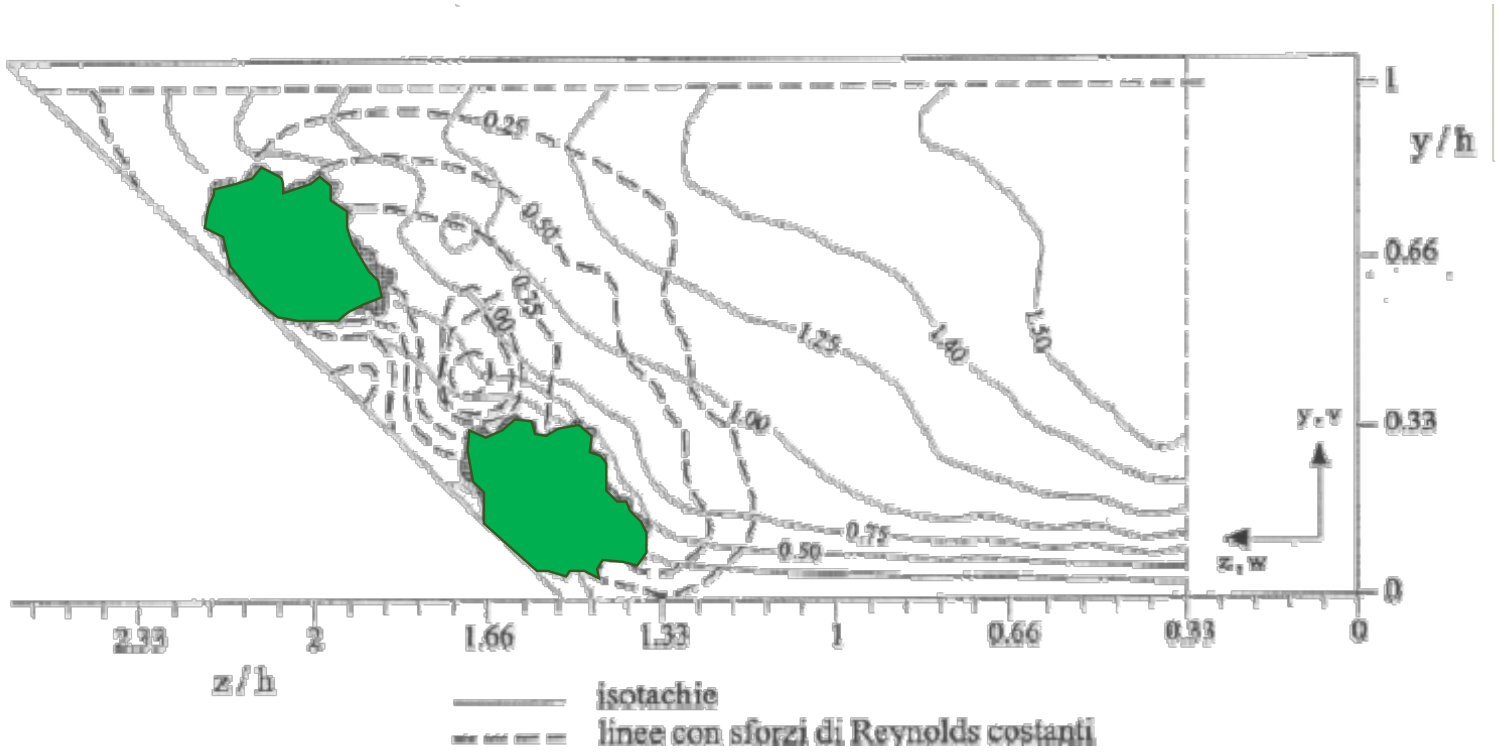
- Esercizio (1)
- Scala delle portate





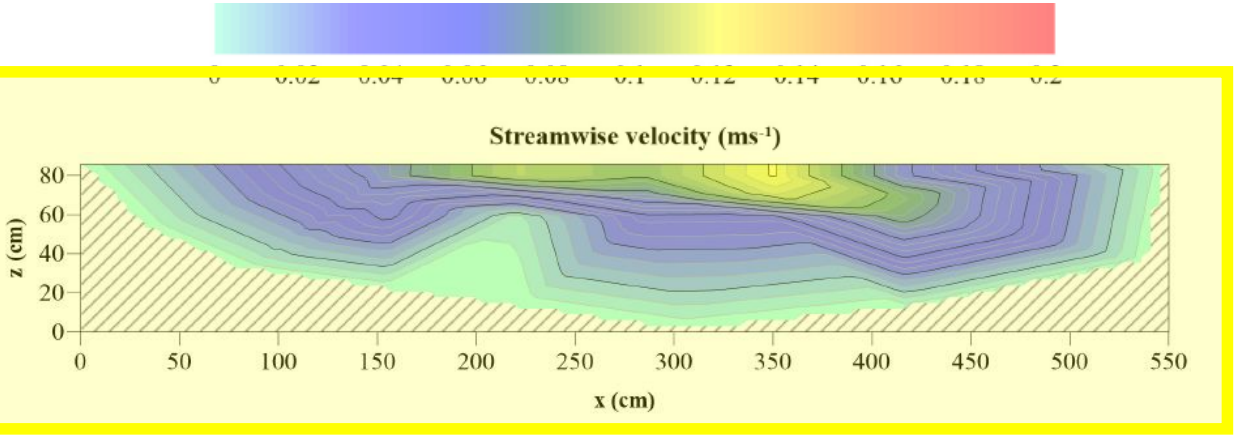
Scabrezza in sezioni miste

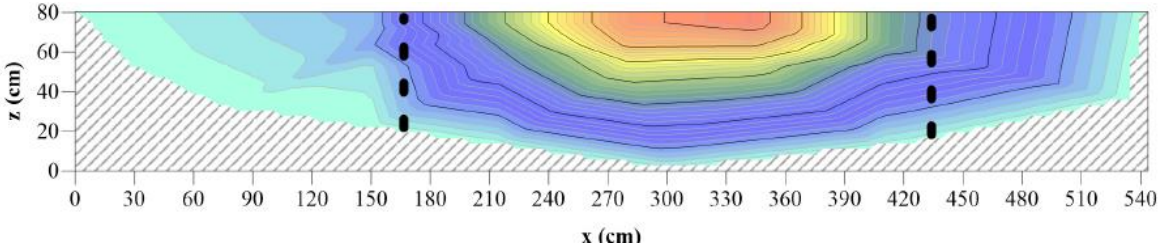
Quali sono le differenze??? **Scabrezza di fondo e di sponda -> SEZIONI MISTE**

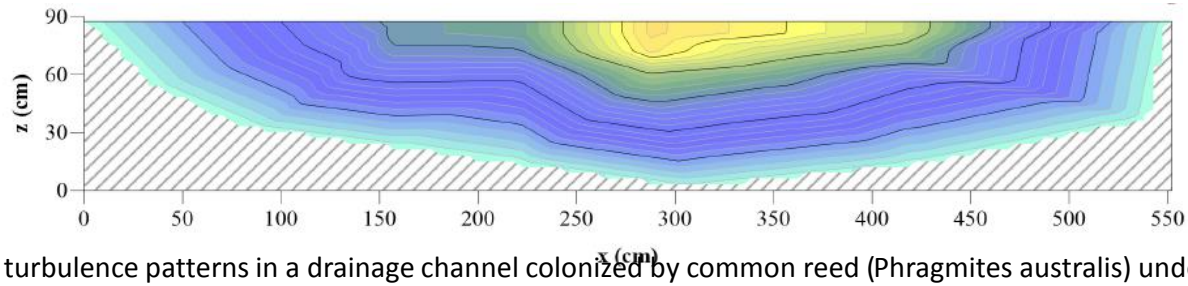


- presenza di vegetazione riduce a zero (circa) il deflusso nelle aree in prossimità delle sponde vegetate e riduce il deflusso centrale.

Armanini e Righetti, M. (1998). Resistenza al moto in alvei vegetati a scabrezza eterogenea. *Proc., 26th Convegno di Idraulica e Costruzioni Idrauliche*, 3-14.

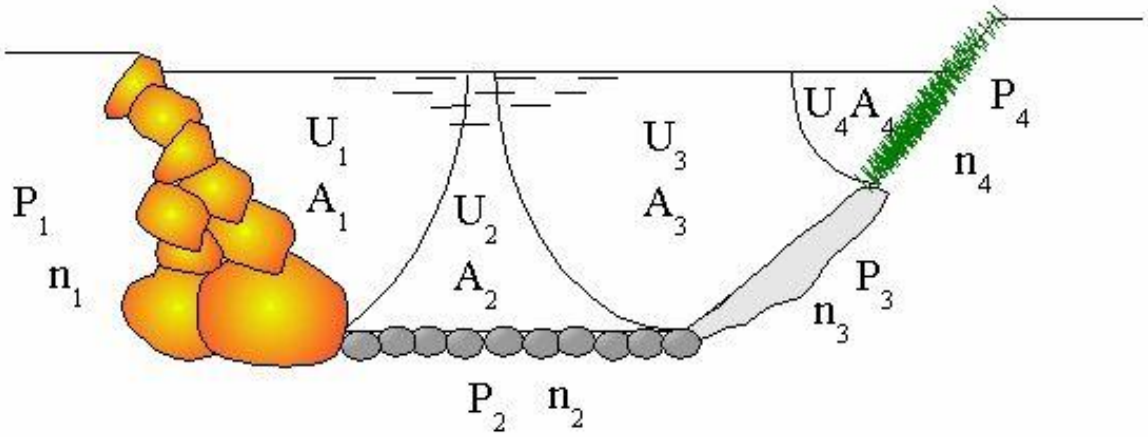






Errico et al., 2019. Flow dynamics and turbulence patterns in a drainage channel colonized by common reed (Phragmites australis) under different scenarios of vegetation management. Ecological Engineering 133, 39–52. https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2019.04.016

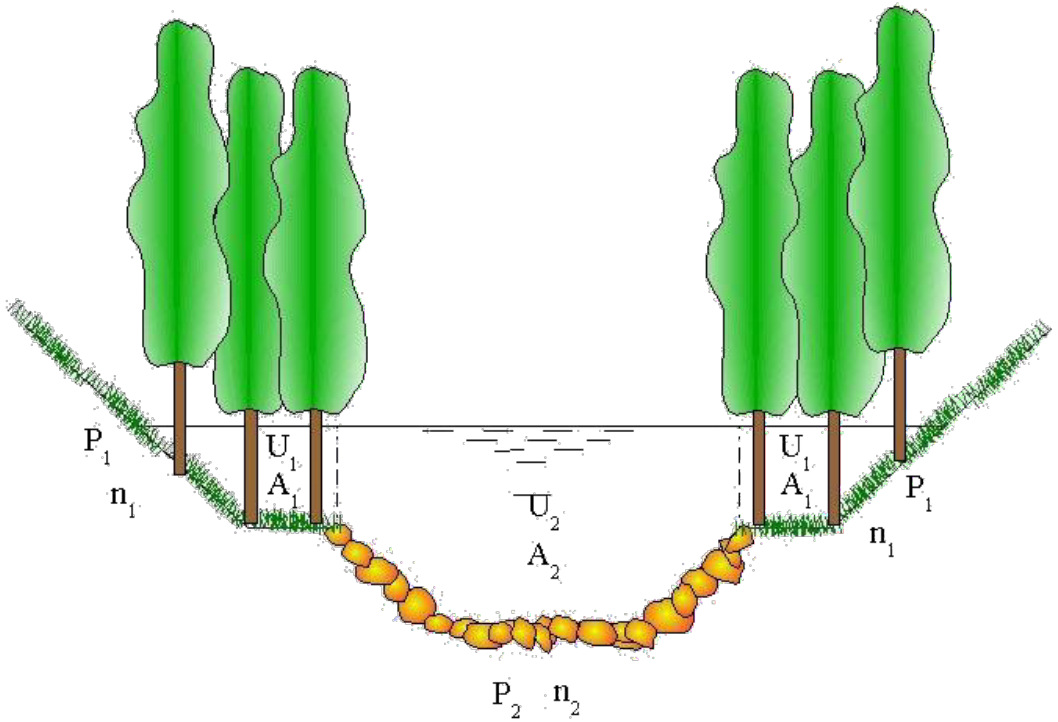
- Metodo di Einstein-Horton (1933-1934)



$$n_c = \left[\frac{\sum_{i=1}^{N} \left(P_i n_i^{1.5} \right)}{P} \right]^{2/3}$$

- suddivisione sezione in sub-aree con medesima velocità;
- lungo le superfici di separazione non si esplicano sforzi tangenziali;
- **adatto a sezione con scabrezza eterogenea**.

- Metodo di Lotter (1933)



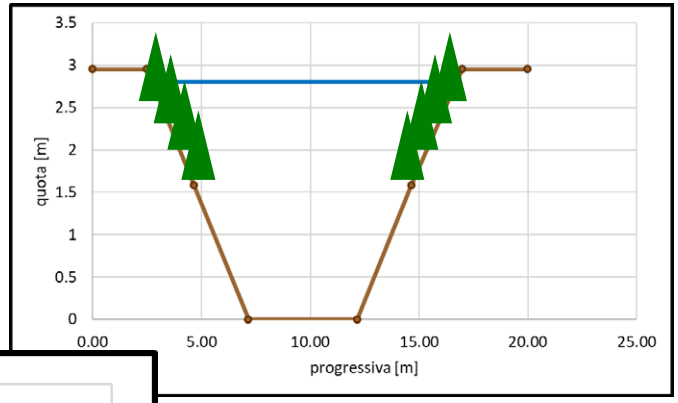
$$n_c = \frac{PR^{5/3}}{\sum_{i=1}^{N} \frac{P_i R_i^{5/3}}{n_i}}$$

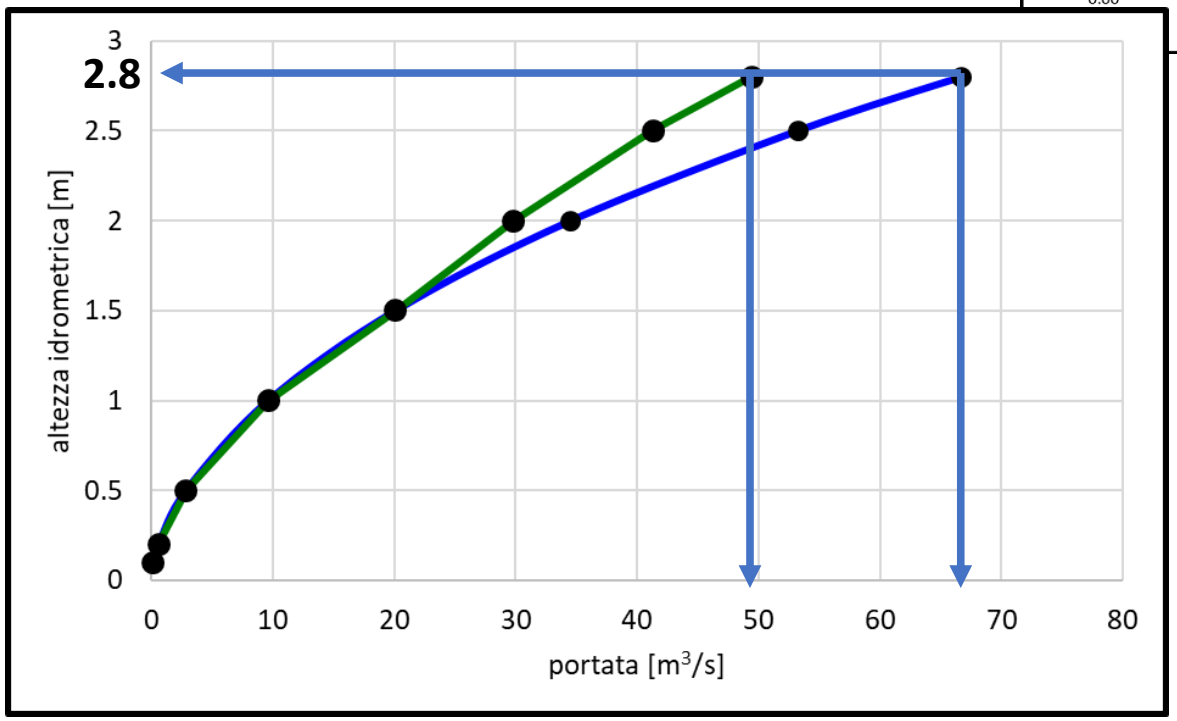
- suddivisione sezione in sub-aree mediante linee verticali;
- lungo le superfici di separazione non si esplicano sforzi tangenziali;
- **In genere è utilizzato per alvei con golene**.

Applicazione della formula di Chezy

Scabrezza in sezione mista

- Esercizio (2): base = 5m
- Scala delle portate

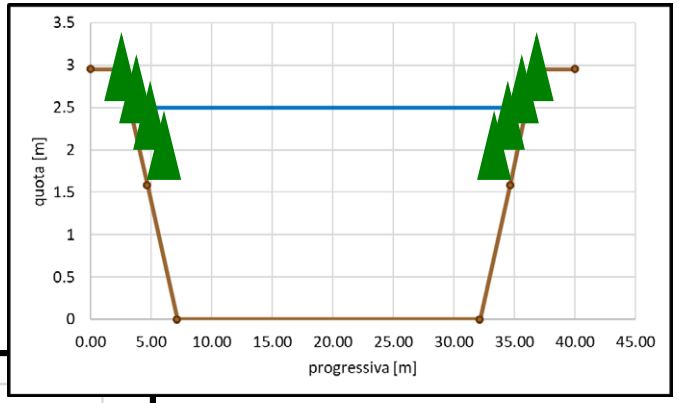


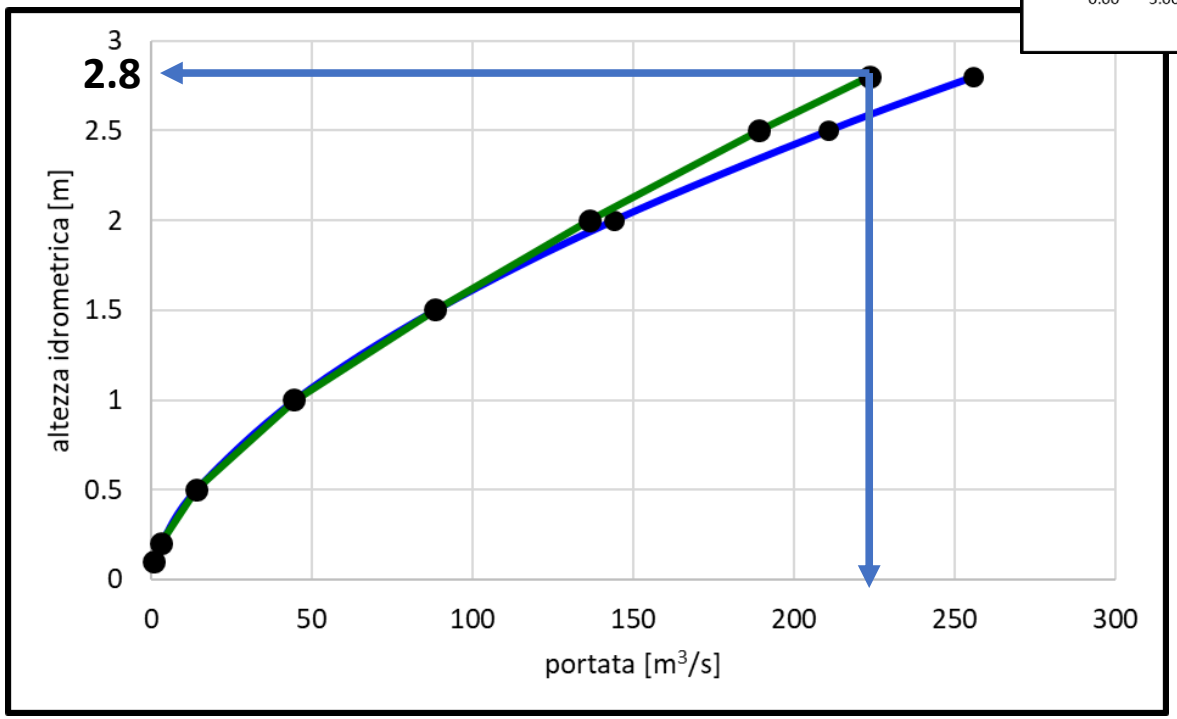


$$\frac{b}{h} \cong 2$$

-25%

- Esercizio (3): base = 25m
- Scala delle portate



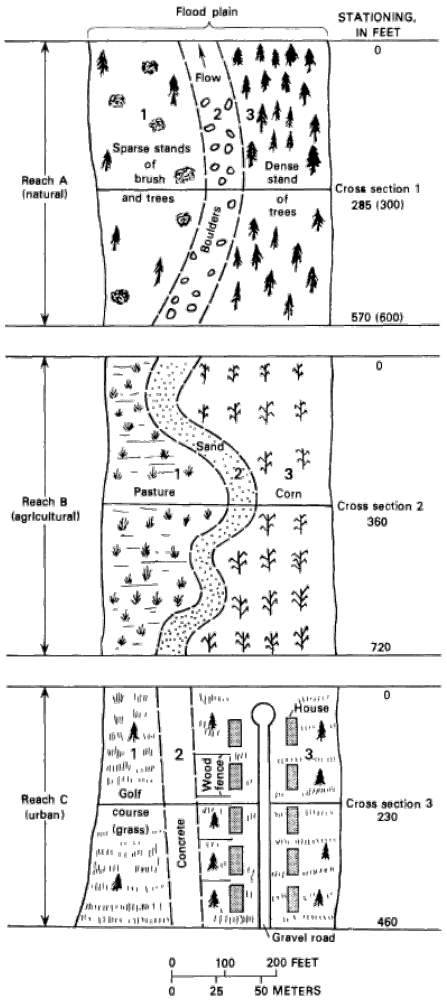


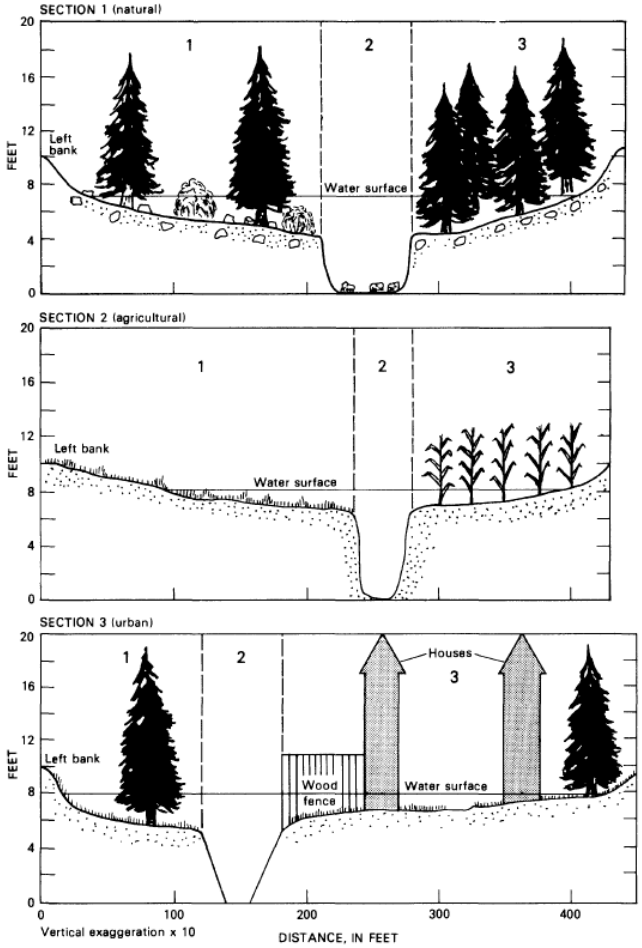
$$\frac{b}{h} \cong 9$$

-12%

Scabrezza in tratti composti da sezioni miste

- Resistenza additiva
- Metodo U.S.G.S.





(Cowan, 1956)

$$n = (n_0 + n_1 + n_2 + n_3 + n_4) \cdot m$$

valore di base per n valido per un canale rettilineo, uniforme in materiale naturale

n_0 = irregolarità della superficie

n_1 = forma e dimensione del canale

n_2 = ostacoli in alveo

n_3 = vegetazione e condizioni di deflusso

n_4 = meandrizzazione

(Cowan, 1956)

n_o = *f*(tipologia di materiale del fondo)

Materiale costituente l'alveo	Dimensione media del materiale (mm)	Valore di base per *n*
Sabbia fine	0,2	0,012
Sabbia media	0,5	0,022
Sabbia grossolana	1,0	0,026
Sabbia molto grossolana	1-2	0,026-0,035
Ghiaia	2-64	0,028-0,035
Ciottoli	64-256	0,030-0,050
Massi	>256	0,040-0,070

n_1 = f(irregolarità fondo)

Irregolarità della superficie della sezione	Fattore di correzione per *n*	Caratteristiche
Trascurabile	0,000	Canali regolari con materiale del fondo ben distribuito.
Bassa	0,001-0,005	Canali in buone condizioni aventi però le sponde leggermente erose.
Moderata	0,006-0,010	Canali dragati aventi scabrezza dell'alveo da moderata a considerevole e sponde moderatamente erose.
Elevata	0,011-0,020	Canali aventi sponde pesantemente erose.

n_2 = f(variabilità della forma e delle dimensioni della sezione)

Variazione della forma e della dimensione della sezione trasversale	Fattore corr. per *n*	Caratteristiche
Graduale	0,000	La dimensione e la forma della sezione trasversale del canale varia gradualmente.
Variazione occasionale	0,001-0,005	Sezioni trasversali grandi e piccole si succedono occasionalmente.
Variazione frequente	0,010-0,015	Sezioni trasversali grandi e piccole si succedono frequentemente.

n_3 = *f*(presenza di elementi di occlusione)

Effetto relativo di ostruzioni	**Fattore corr. per n**	**Caratteristiche**
Trascurabile	0,000-0,004	Ostruzioni poco diffuse: queste comprendono depositi di detrito, ceppi, tronchi, radici esposte o massi isolati che occupino meno del 5% della sezione.
Modesto	0,005-0,015	Le ostruzioni occupano dal 5% al 15% della sezione e la distanza tra di esse è tale che la sfera di influenza intorno ad una ostruzione non si estende fino alla sfera che si trova intorno ad un'altra.
Apprezzabile	0,020-0,030	Le ostruzioni occupano dal 15% al 50% della sezione o la distanza tra di esse è sufficientemente piccola da far sì che gli effetti delle diverse ostruzioni si sommino, in modo che viene ostruita, di conseguenza, una frazione equivalente della sezione.
Elevato	0,040-0,050	Le ostruzioni occupano più del 50% della sezione o la distanza fra di esse è sufficientemente piccola da causare turbolenza attraverso la maggior parte della sezione.

$n_4 = f$(presenza di vegetazione)

Effetto della vegetazione	Fattore corr. per *n*	Caratteristiche
Basso	0,002-0,010	Fitta vegetazione erbacea che si sviluppi dove la profondità media della corrente è da una a due volte l'altezza della vegetazione stessa; vegetazione arbustiva flessibile, come il salice, che si sviluppi dove la profondità media della corrente è almeno tre volte l'altezza della vegetazione stessa.
Medio	0,010-0,025	Vegetazione erbacea che si sviluppi dove la profondità media della corrente è da due a tre volte l'altezza della vegetazione stessa; vegetazione arbustiva moderatamente fitta, simile a delle piante di salice di 1 o 2 anni durante la stagione invernale, che cresca lungo le rive e dove non sia presente vegetazione significativa lungo il fondo del canale dove il raggio idraulico è maggiore di 0,61 m.
Alto	0,025-0,050	Vegetazione erbacea che si sviluppi dove la profondità media della corrente è circa uguale all'altezza della vegetazione stessa; piante di salice di 8-10 anni (in riposo vegetativo) cresciute insieme a vegetazione erbacea dove il raggio idraulico sia superiore a 0,60 m; salici di 1 anno circa cresciuti insieme a vegetazione erbacea lungo le sponde (durante la stagione vegetativa), dove non sia presente vegetazione significativa lungo il fondo del canale con un raggio idraulico maggiore di 0,61 m.
Molto alto	0,050-0,100	Vegetazione erbacea che si sviluppi dove la profondità media della corrente è meno della metà dell'altezza della vegetazione stessa; piante di salice di circa 1 anno con vegetazione erbacea lungo le sponde (durante la stagione vegetativa), o fitta vegetazione di *typha* lungo il fondo del canale.

$m = f$(sinuosità dell'alveo)

Grado di sinuosità dell'alveo (m)	Fattore moltiplicativo	Caratteristiche
Modesto	1,00	Il rapporto fra la lunghezza effettiva del canale ed il percorso rettilineo compiuto dallo stesso è compreso fra 1,0 e 1,2.
Apprezzabile	1,15	Il rapporto fra la lunghezza effettiva del canale ed il percorso rettilineo compiuto dallo stesso è compreso fra 1,2 e 1,5.
Elevato	1,30	Il rapporto fra la lunghezza effettiva del canale ed il percorso rettilineo compiuto dallo stesso è maggiore di 1,5.

Scabrezza dovuta alla vegetazione

Influenza del grado di sommersione

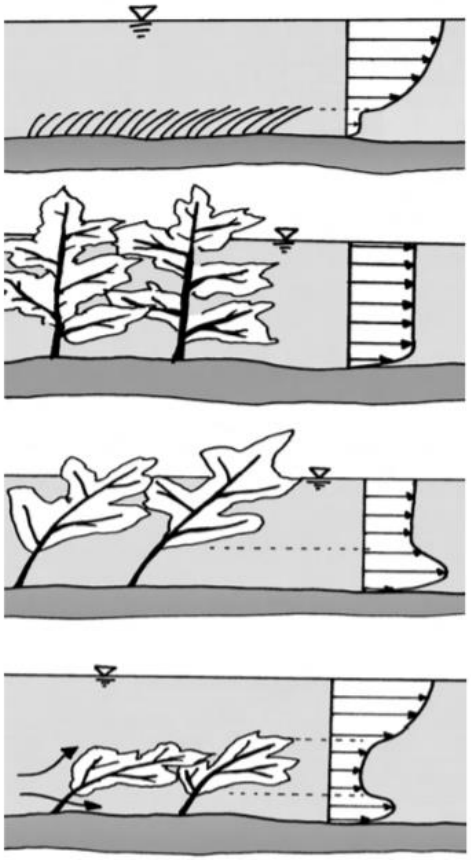
La **vegetazione** in genere costituisce un **ostacolo al deflusso** in alveo ma essendo costituito da un «materiale» **dotato di una certa flessibilità**, il suo comportamento non è costante ma varia, spesso a favore, a seconda delle condizioni idrauliche che si verificano nell'alveo.

Dal punto di vista idraulico, si possono verificare le seguenti condizioni:

1. vegetazione con altezza molto più bassa del livello di sommersione ($h_{veg} << h$)
   -> le resistenze sono per attrito

2. vegetazione con altezza maggiore del tirante ($h_{veg} >= h$) **-> le resistenze sono di forma**

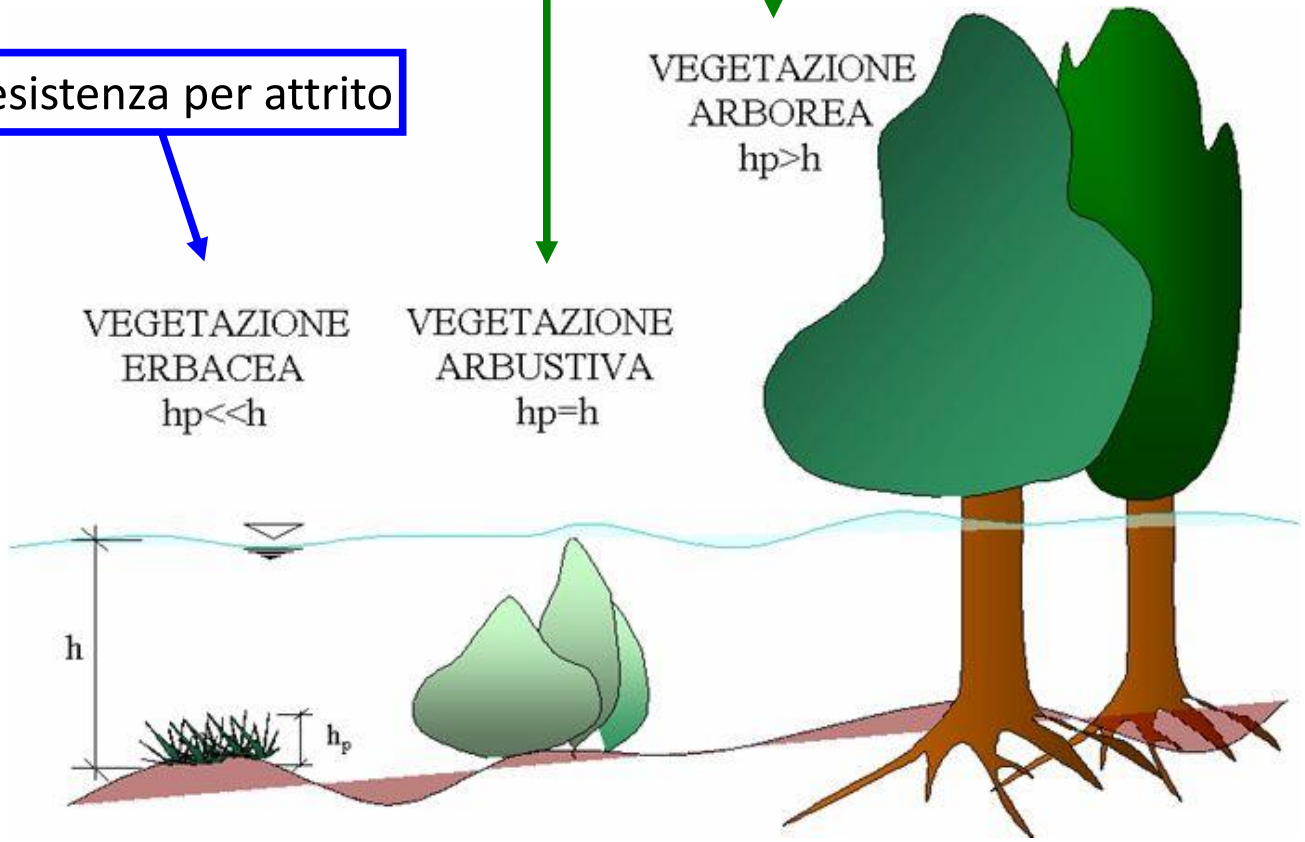
A questa suddivisione va poi aggiunto **l'effetto «elastico»** che modifica la forma e l'ingombro delle chiome/biomassa soggetta a sommersione.



- Diversi tipi di vegetazione

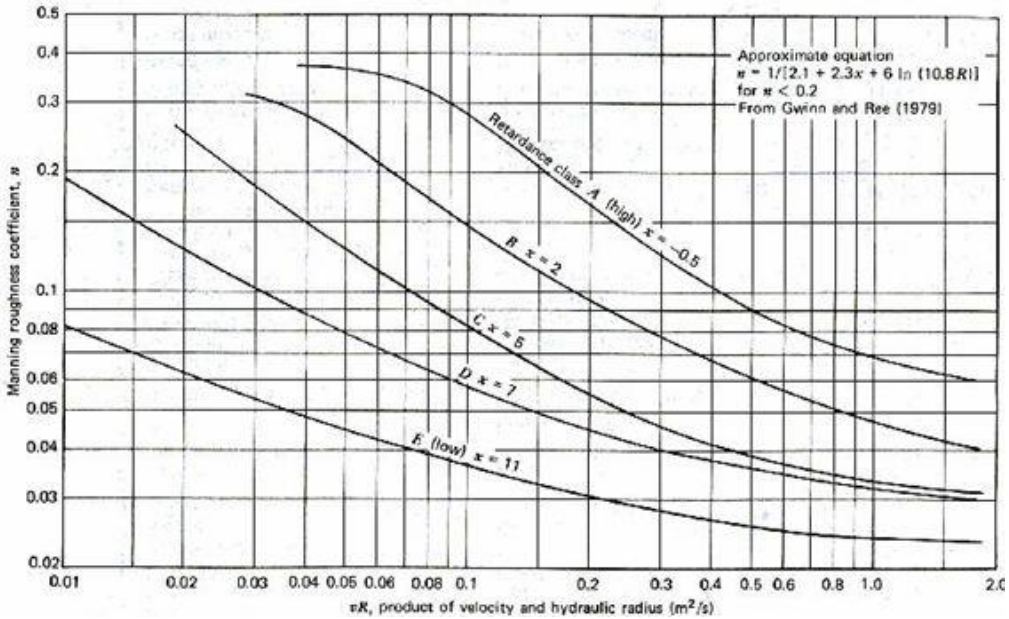
Resistenza di forma (squilibrio tra pressioni di monte e di valle)

Resistenza per attrito



- Esempio (1): **<u>vegetazione erbacea totalmente sommersa</u>**

Metodo S.C.S. U.S.D.A. (1966)



Densità	Altezza media (cm)	X	Categoria
Buona	>76	-0,5	A
"	28-61	2	B
"	15-25	5	C
"	5-15	7	D
"	<5	11	E
Scarsa	>76	2	B
"	28-61	5	C
"	15-25	7	D
"	5-15	7	D
"	<5	11	E

$$n = \frac{1}{[2.08 + 2.30x + 6\ln(10.8vR)]}$$

Schwab et al. (1981). *Soil and water conservation engineering*. John Wiley and Sons.

- Esempio (1): **<u>vegetazione erbacea totalmente sommersa</u>**

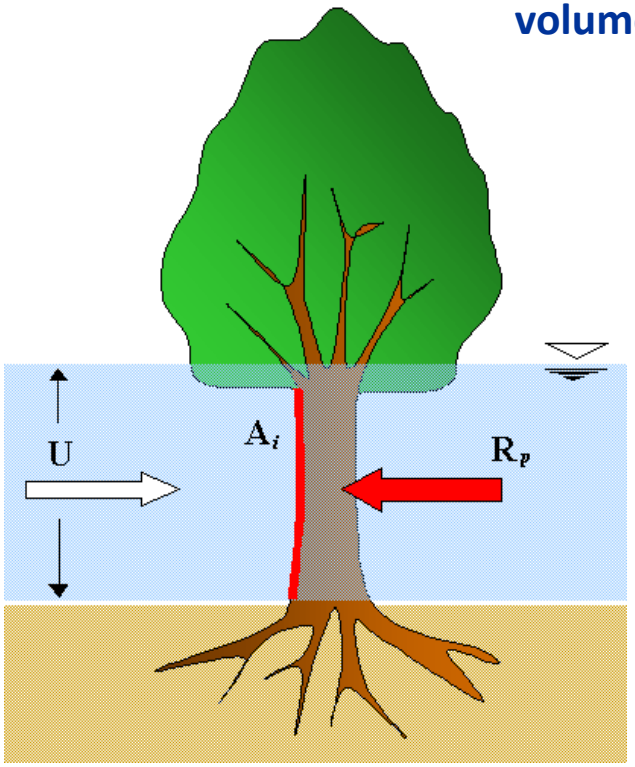
Metodo S.C.S. U.S.D.A. (1966)

Densità	Altezza media (cm)	X	Categoria
Buona	>76	-0,5	A
"	28-61	2	B
"	15-25	5	C
"	5-15	7	D
"	<5	11	E
Scarsa	>76	2	B
"	28-61	5	C
"	15-25	7	D
"	5-15	7	D
"	<5	11	E

RESISTENZA	SPECIE	STATO VEGETATIVO
A - Molto alta	Eragrostis curvula	Eccellente (~ 75 cm)
B - Alta	Eragrostis curvula	Buono (30-60 cm)
	Cynodon dactylon (gramigna)	Buono (~30 cm)
	Medicago Sativa (Erba medica)	
C - Moderata	Digitaria ischaemum (Sanguinella)	
	Cynodon dactylon (gramigna)	Buono (tagliata a 15 cm)
	Dactilis glomerata (erba mazzolina), Olium multiflorum (Loiessa)	Buono (15-20 cm)
D - Bassa	Cynodon dactylon (gramigna)	Buono (tagliata a 6 cm)
	Dactilis glomerata (erba mazzolina), Olium multiflorum (Loiessa)	Buono (10 cm)
E - Molto bassa	Cynodon dactylon (gramigna)	Buona (tagliata a 3-4 cm) o bruciata

Schwab et al. (1981). *Soil and water conservation engineering*. John Wiley and Sons.

- Esempio (2): **vegetazione arborea o arbustiva a comportamento rigido parzialmente sommersa**



Forza peso del volume d'acqua — **Sforzi sul contorno bagnato** — **Resistenze sul contorno bagnato**

$$\gamma JAL = \tau_0 PL + \sum_{i=1}^{N} R_{p_i}$$

Metodo di Petryk – Bosmanjian (1975)

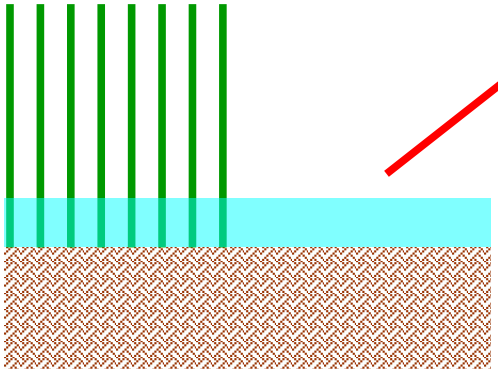
$$n_{eq} = \sqrt{n_{base} + \frac{R^{4/3}}{2g} \sum_{i=1}^{N} C_D \frac{A_{p_i}}{AL}}$$

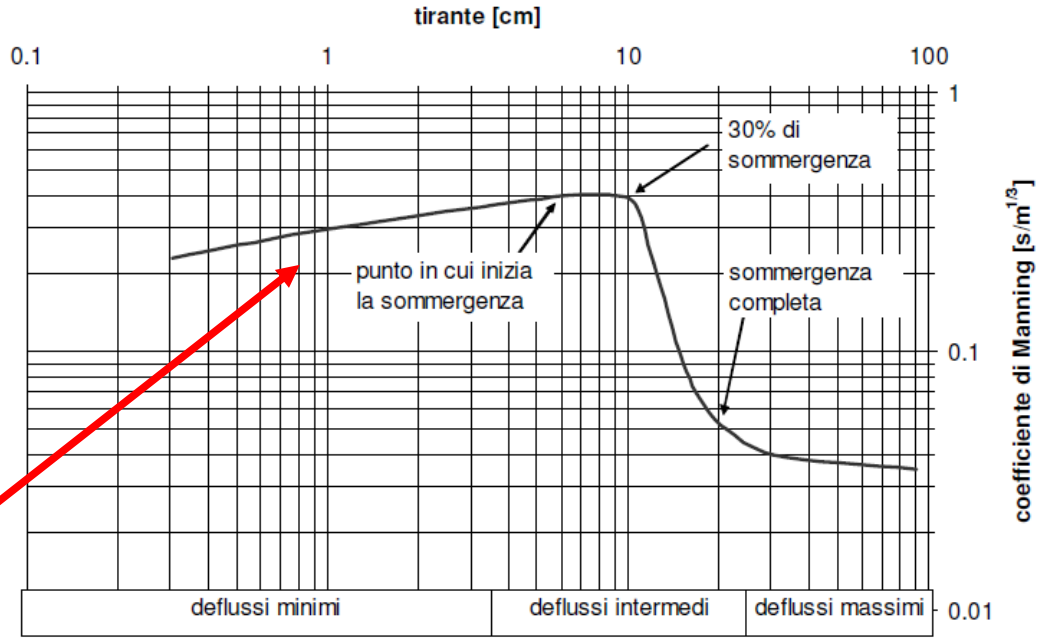
Coefficiente di resistenza aerodinamica

Rappresenta la densità della vegetazione

Petryk e Bosmajian (1975). Analysis of flow through vegetation. *Journal of the Hydraulics Division*, *101*(ASCE# 114517 Proceeding).

- Esempio (3): **<u>vegetazione erbacea parzialmente sommersa</u>**

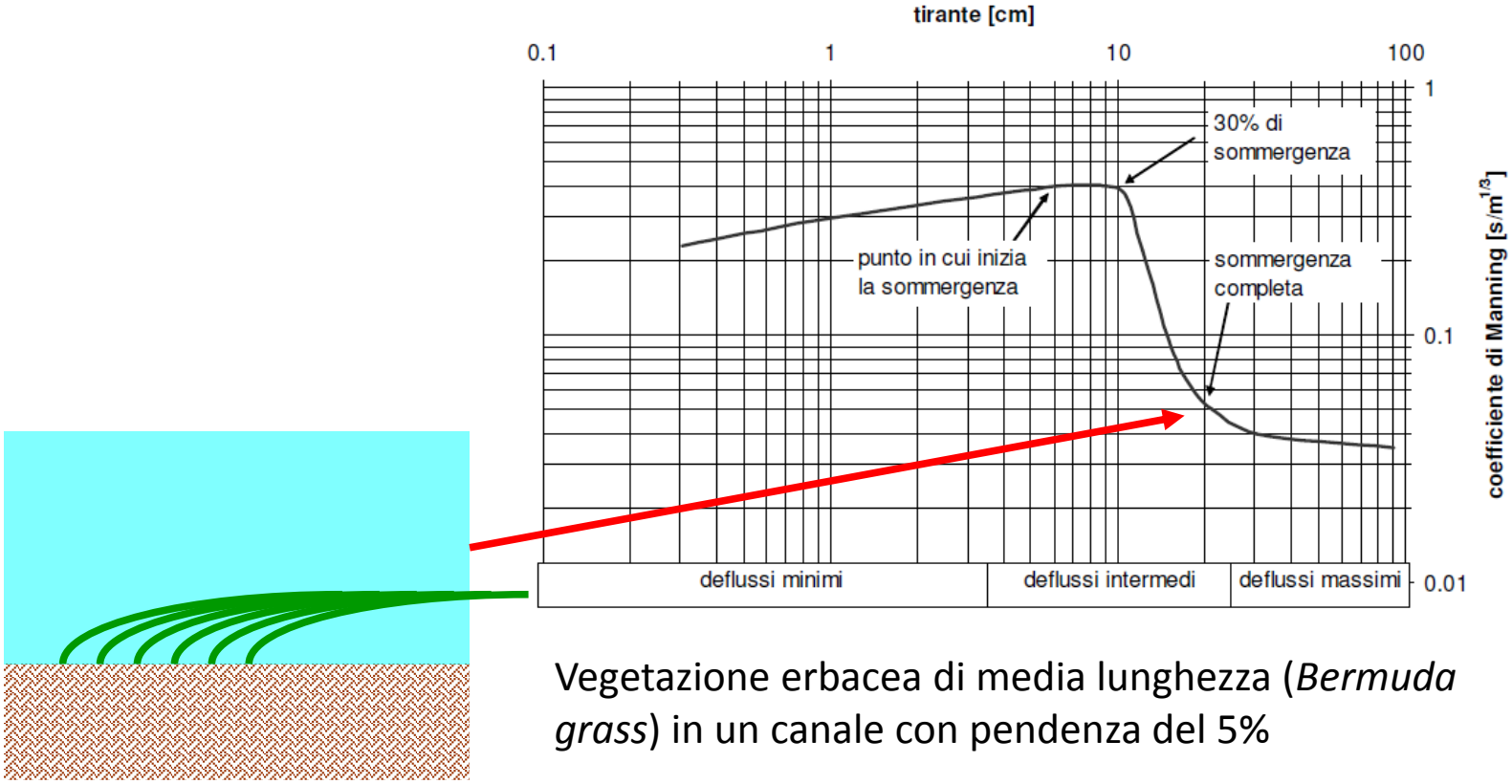




Vegetazione erbacea di media lunghezza (*Bermuda grass*) in un canale con pendenza del 5%

Morgan e Rickson (2003). *Slope stabilization and erosion control: a bioengineering approach*. Taylor & Francis.

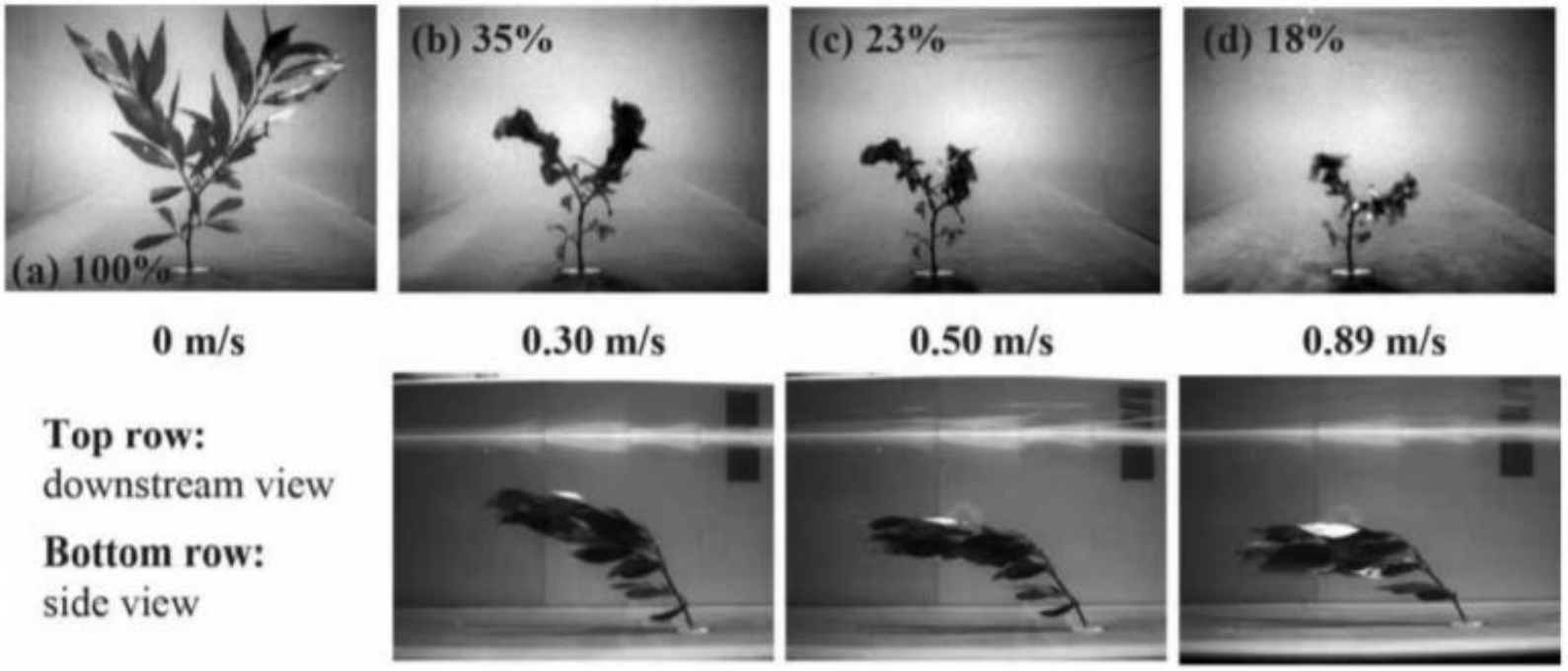
- Esempio (3): **<u>vegetazione erbacea parzialmente sommersa</u>**



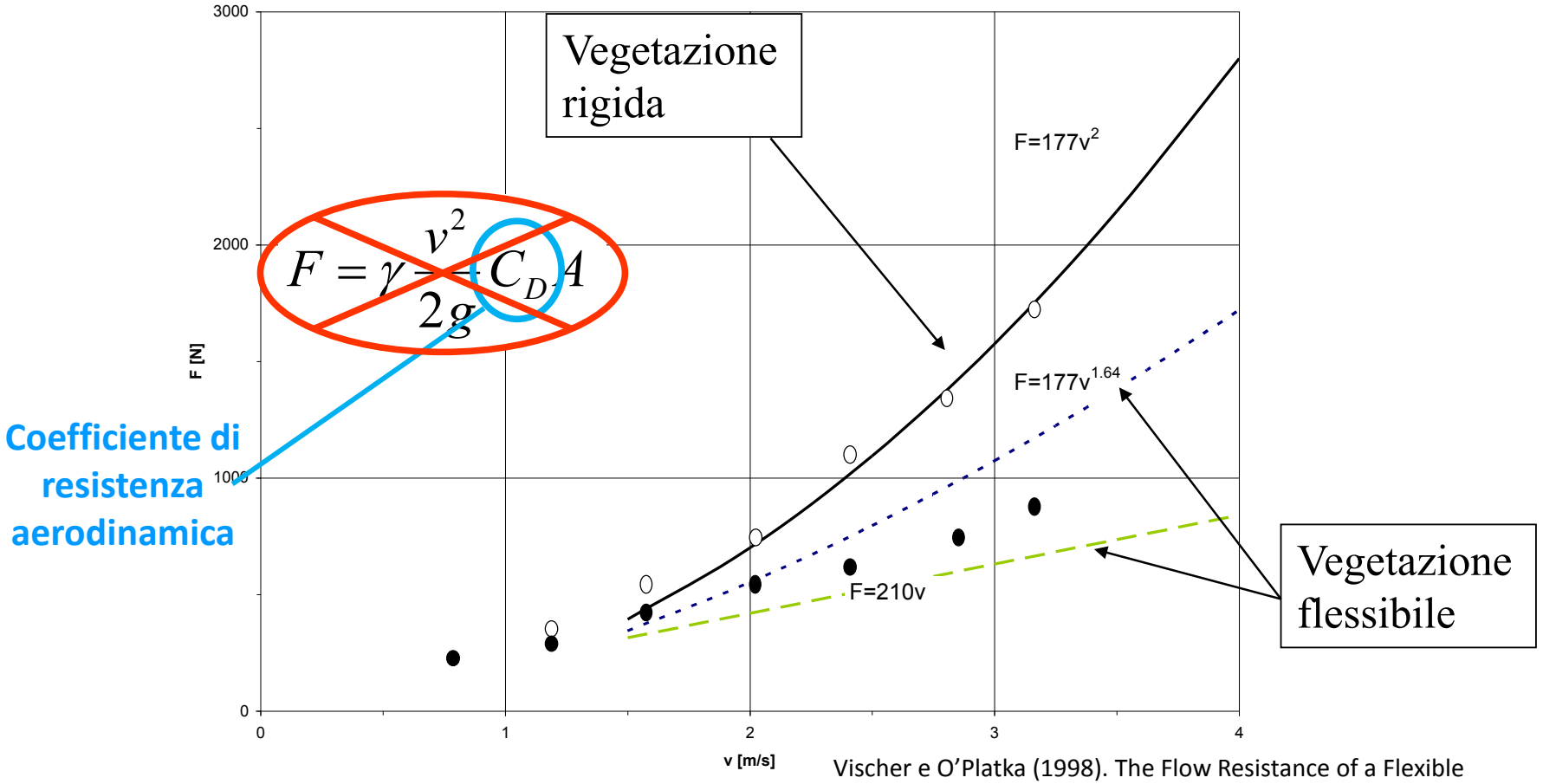
Vegetazione erbacea di media lunghezza (*Bermuda grass*) in un canale con pendenza del 5%

Morgan e Rickson (2003). *Slope stabilization and erosion control: a bioengineering approach*. Taylor & Francis.

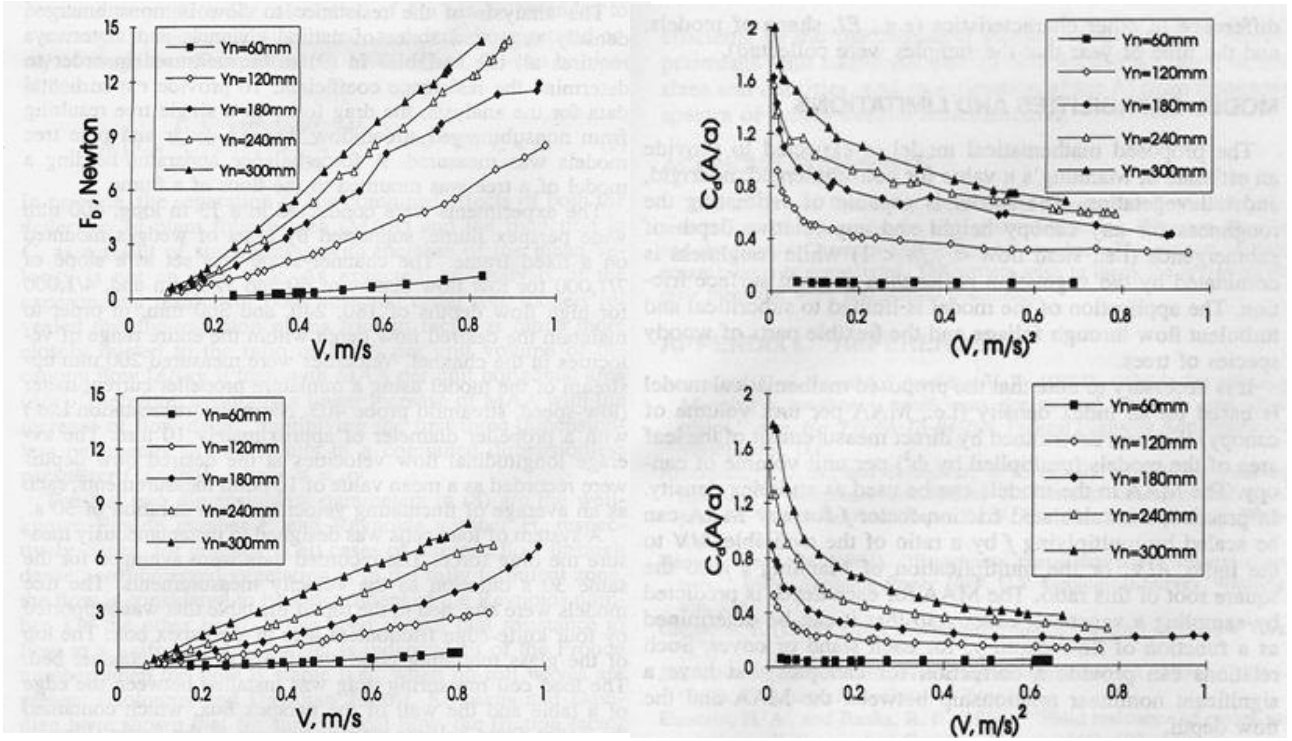
- Esempio (4): **<u>vegetazione arbustiva flessibile parzialmente sommersa</u>**



Aberle, J., Järvelä, J., 2013. Flow resistance of emergent rigid and flexible floodplain vegetation. Journal of Hydraulic Research 51, 33–45. https://doi.org/10.1080/00221686.2012.754795



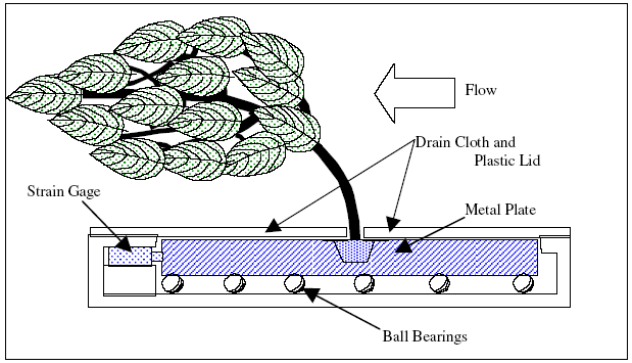
Vischer e O'Platka (1998). The Flow Resistance of a Flexible Bank and Floodplain Plant. *Wasserwirtschaft*, *88*(6), 284-288.



Vedi caso della vegetazione arborea:

$$F_D = \frac{1}{2} \cdot \frac{\gamma}{g} \cdot C_D(A/a) \cdot U^2$$

Kouwen, N., & Fathi-Moghadam, M. (2000). Friction factors for coniferous trees along rivers. *Journal of hydraulic engineering*, *126*(10), 732-740.



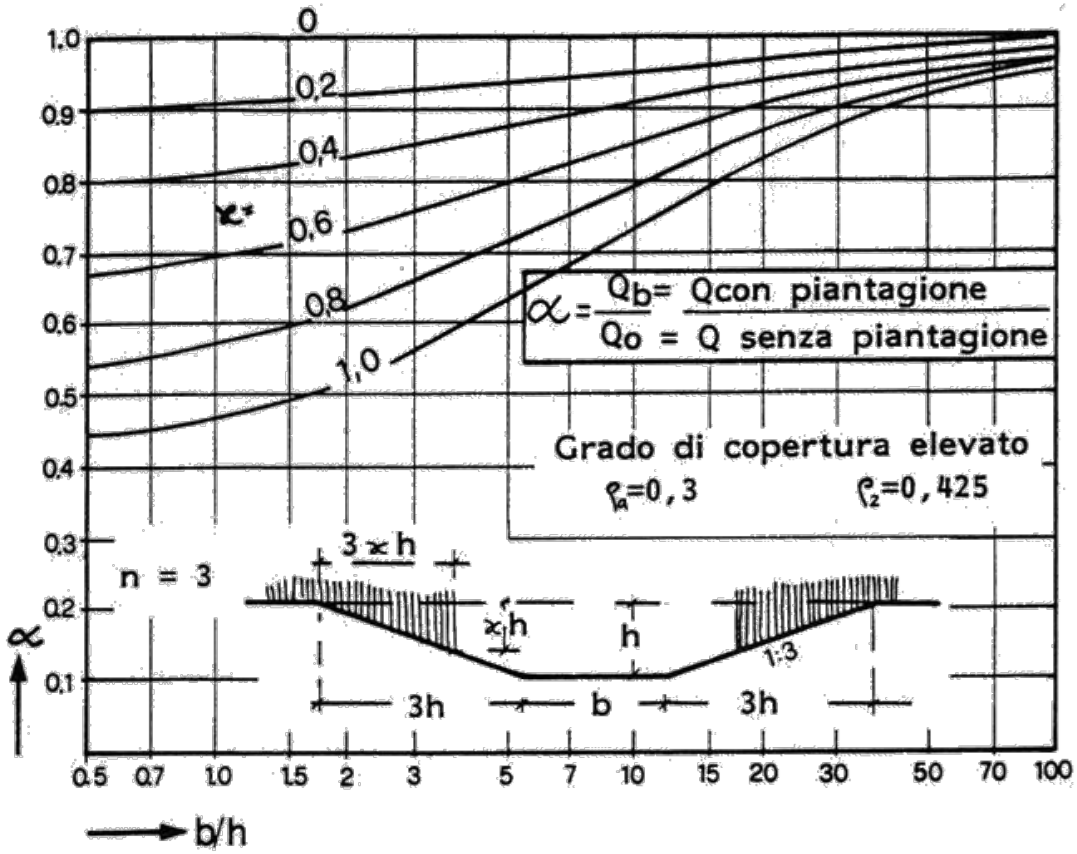
- Esempio (5): **<u>vegetazione erbacea a comportamento rigido su sponda</u>**

$$Q_{veg} = \alpha Q_{non\,veg}$$

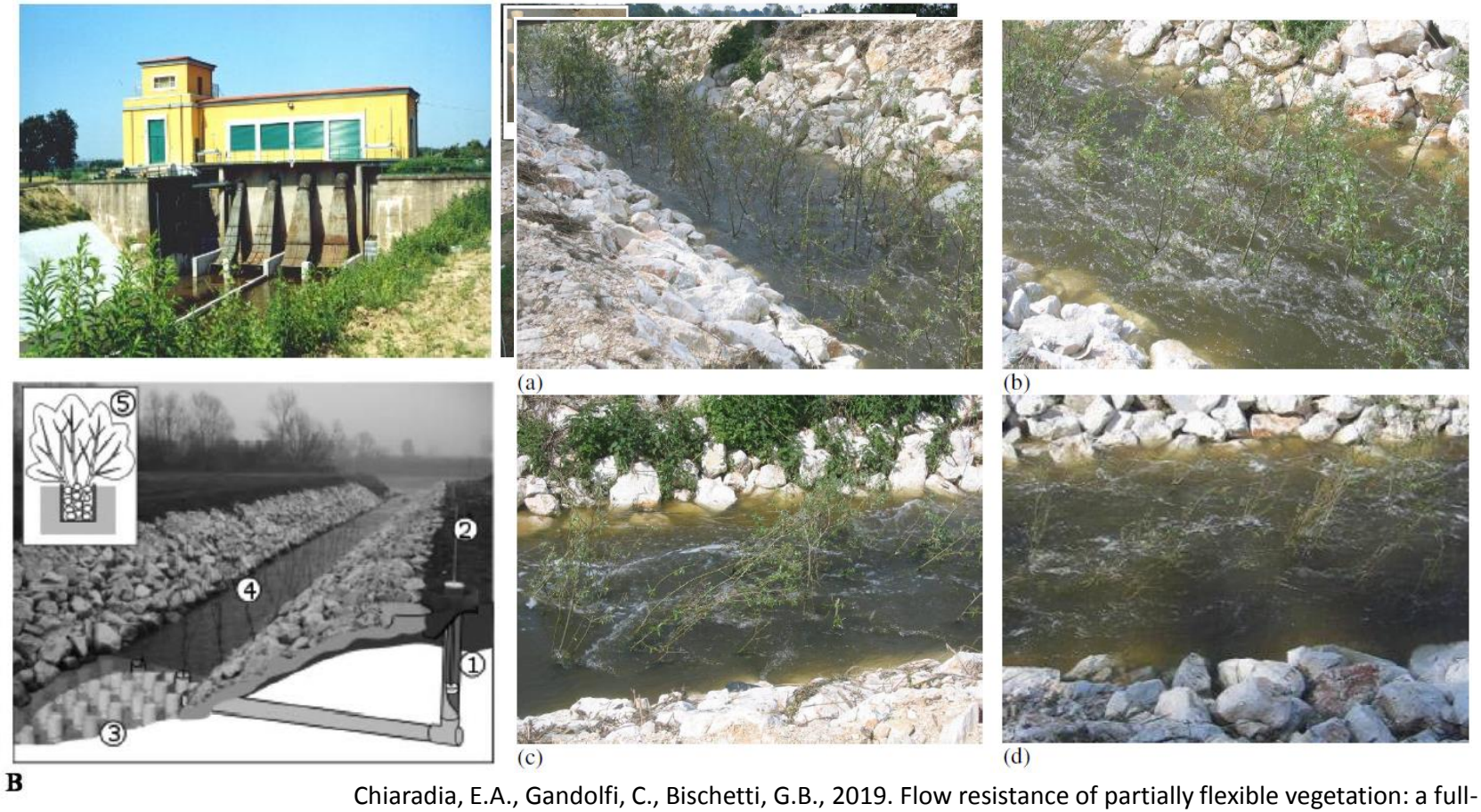
<u>Metodo di Kauch (1984)</u>
sulla base delle ricerche condotte da Fenkel (1960)

<u>Da utilizzare</u>: con piccoli rapporti di b/h e per piccoli corsi d'acqua e canali; no alvei naturali.

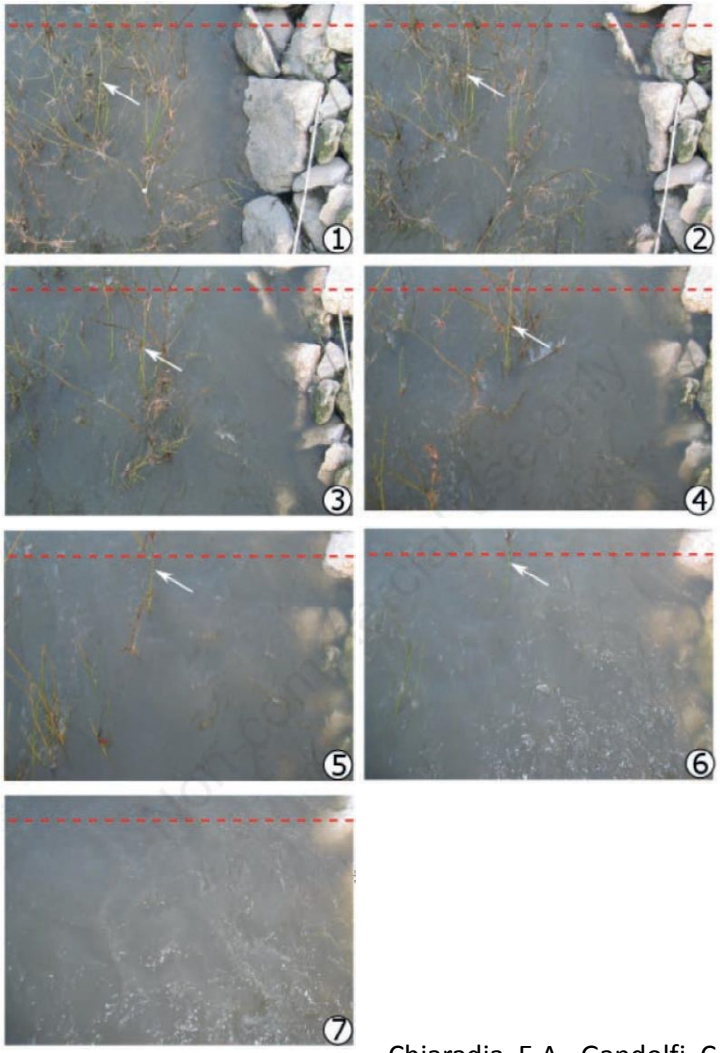
<u>Densità vegetazione:</u>
bassa: 50 rami/m²
alta: 100 – 200 rami/m²



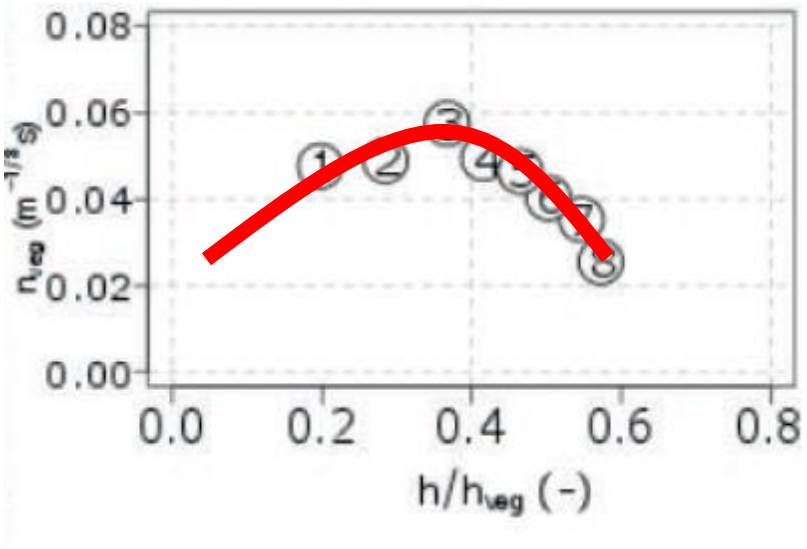
- Esempio (5): **<u>vegetazione arbustiva flessibile parzialmente sommersa</u>**



Chiaradia, E.A., Gandolfi, C., Bischetti, G.B., 2019. Flow resistance of partially flexible vegetation: a full-scale study with natural plants. J Agricult Engineer 50, 55–65. https://doi.org/10.4081/jae.2019.885



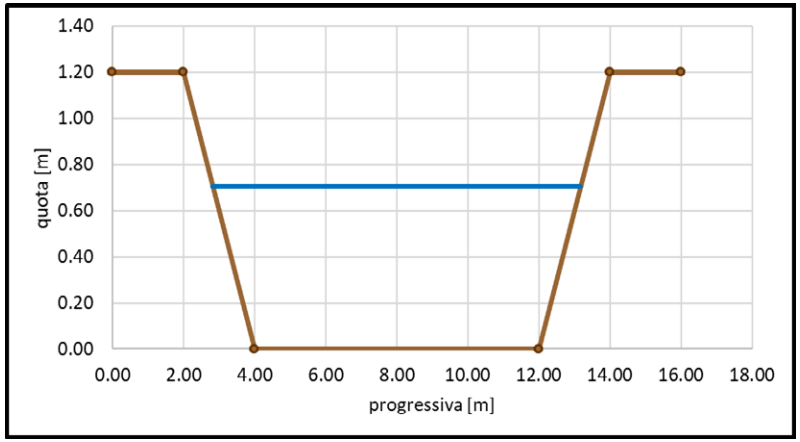
Tutte queste sperimentazioni mostrano come all'aumento del tirante, la vegetazione generi una resistenza diversa al deflusso nella sezione. Per questo motivo, non è corretto utilizzare un unico coefficiente di Manning per tutte le portate.

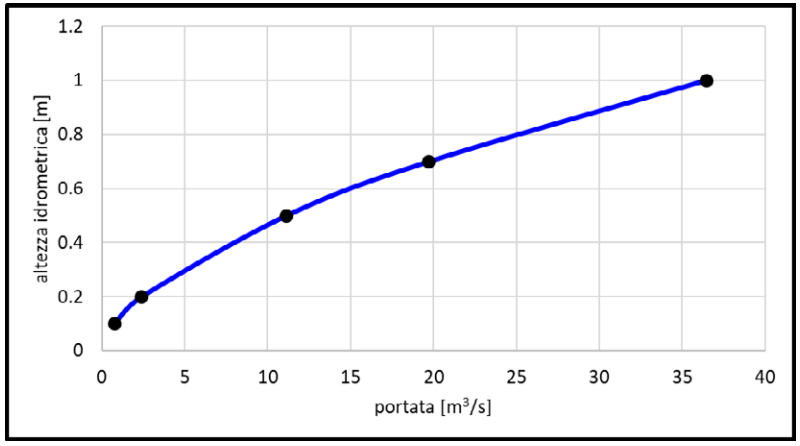


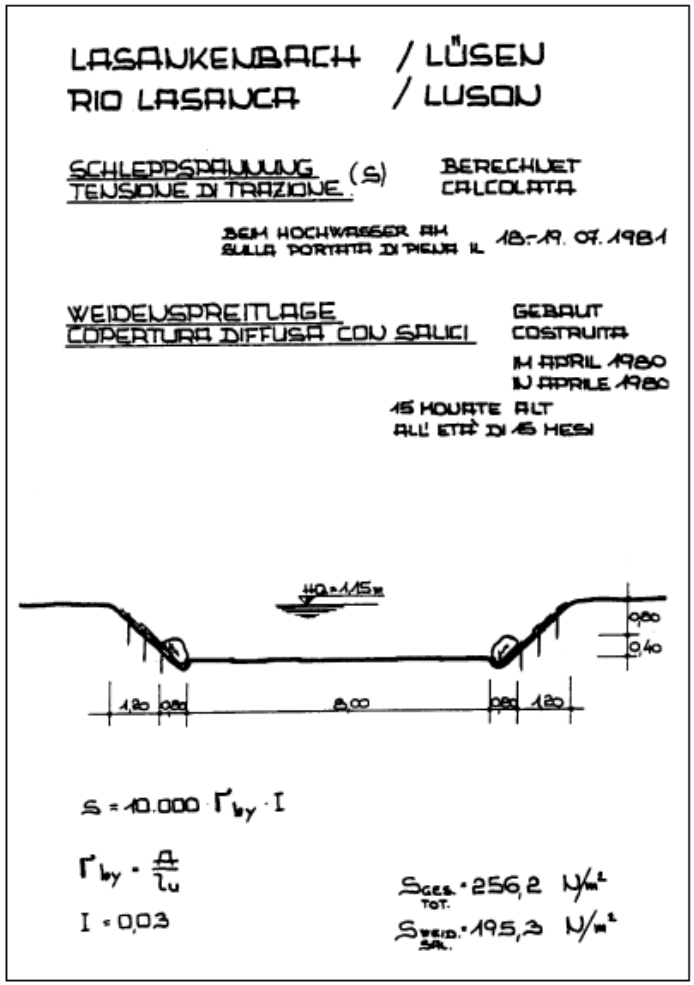
Chiaradia, E.A., Gandolfi, C., Bischetti, G.B., 2019. Flow resistance of partially flexible vegetation: a full-scale study with natural plants. J Agricult Engineer 50, 55–65. https://doi.org/10.4081/jae.2019.885

Esempio di verifica idraulica

- Esercizio (4): base = 8 m

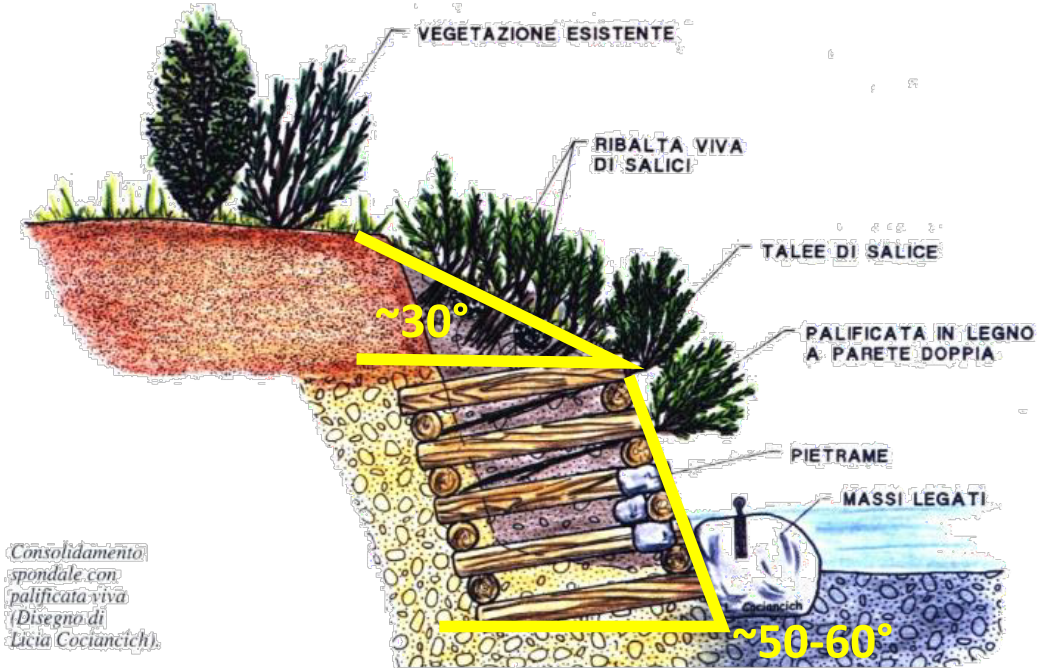






Fonte: Florineth, 1981.

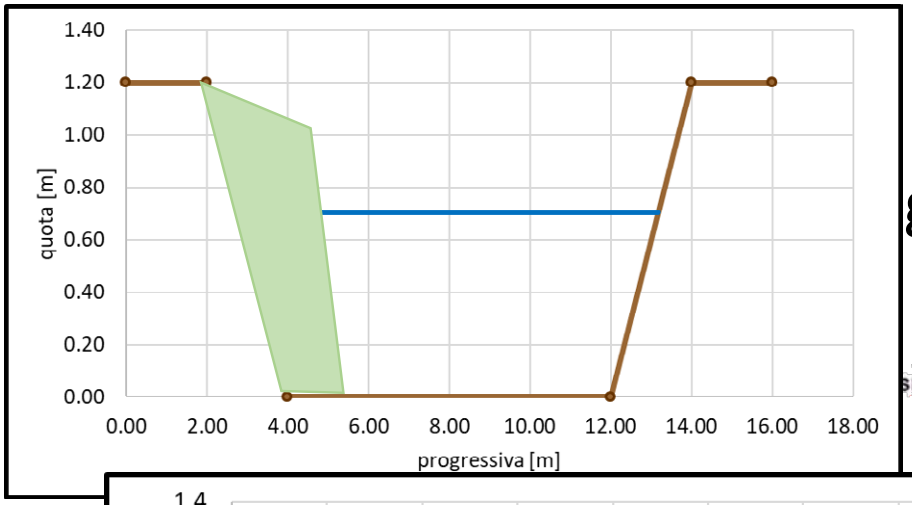
- Esercizio (5):
- base = 8 m portata di progetto = 20 m^3/s
- Palificata viva



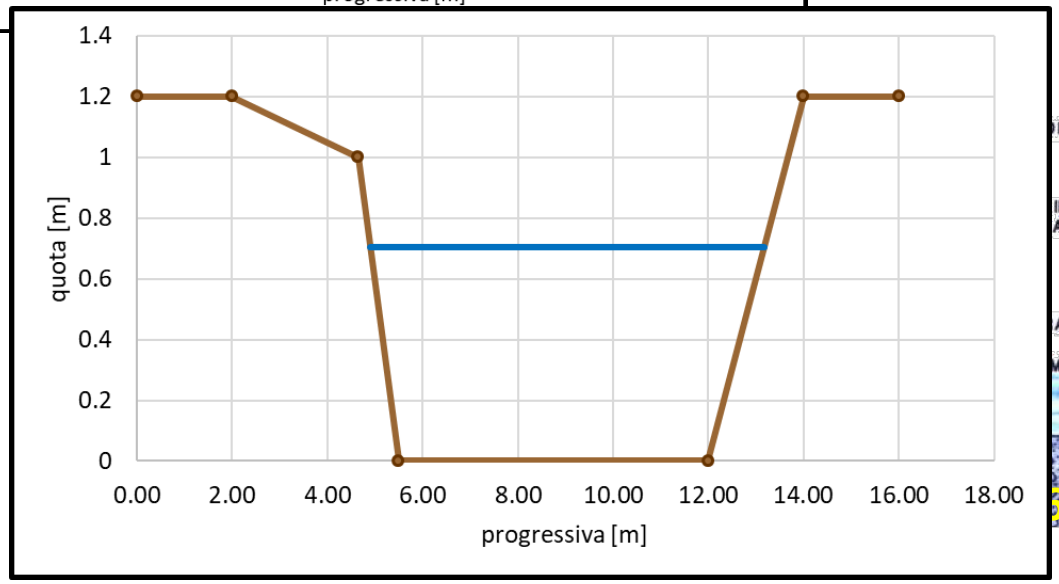
Consolidamento spondale con palificata viva (Disegno di Licia Cociancich).

- Densità 10 piante/m^2
- Diametro 0.01-0.02 m
- Tensione critica ~500 N/m^2 (Palmieri e Calò, 1996)

Fonte: Licia Cociancich (2005)



getto = 20 m³/s

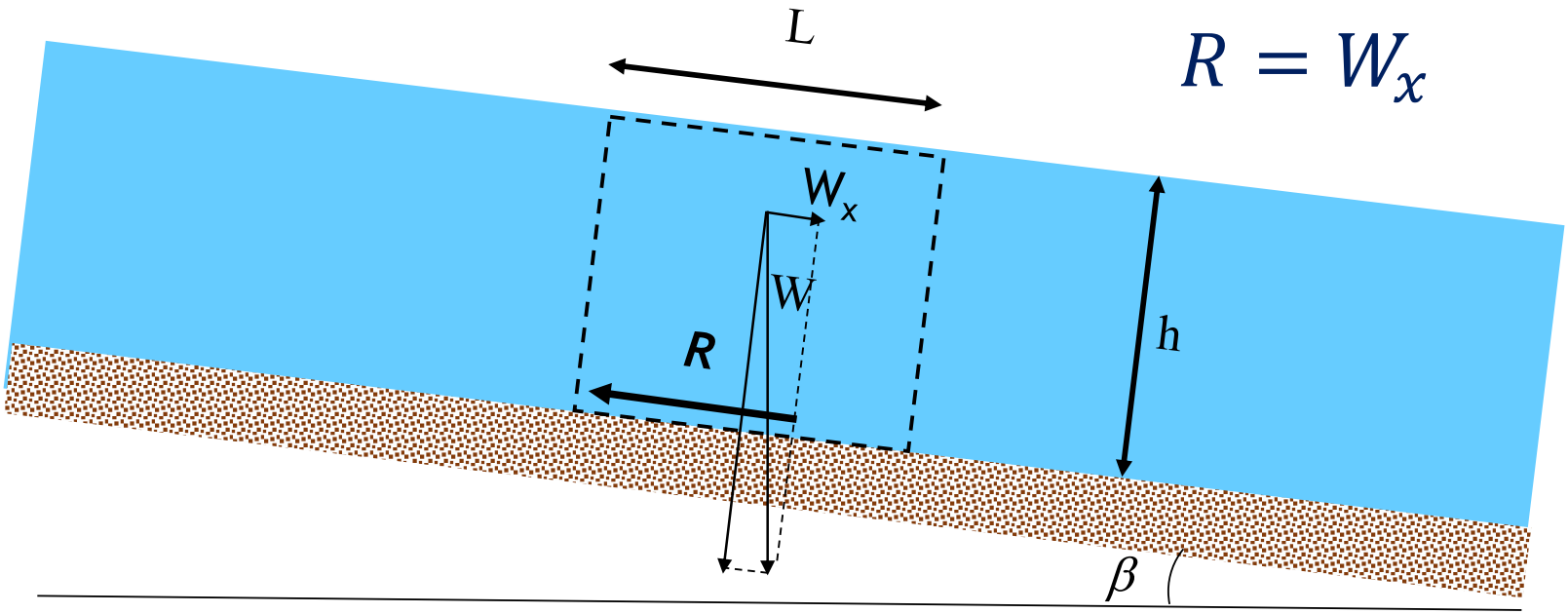


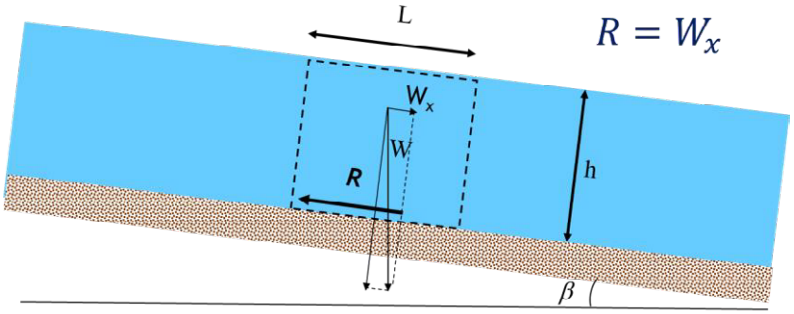
$$Q \cong 15 \frac{m^3}{s}$$

Fonte: Licia Cociancich (2005)

Resistenze e tensioni al moto rettilineo uniforme

- Le condizioni di moto uniforme implicano che la **velocità rimane costante**, perciò non si ha né accelerazione né decelerazione della corrente.





Componente peso del volume d'acqua

$$W_x = W \cdot \sin\beta = \gamma \cdot A \cdot L \cdot \sin\beta$$

$$W_x \cong \gamma \cdot A \cdot L \cdot i$$

Resistenza sul fondo al deflusso

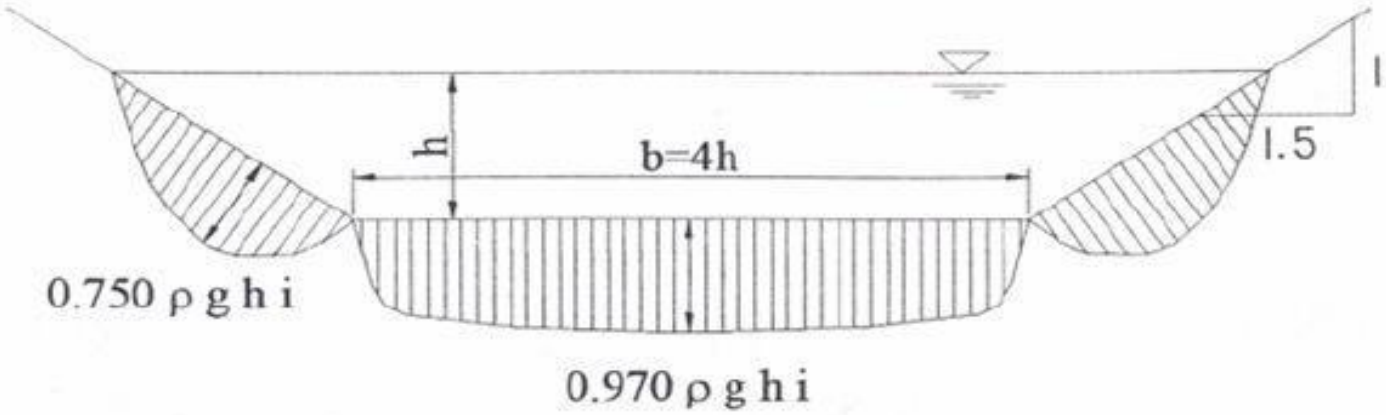
$$R = \tau_0 \cdot P \cdot L$$

$$\gamma \cdot A \cdot L \cdot i = \tau_0 \cdot P \cdot L$$

$$\tau_0 = \frac{\gamma \cdot A \cdot L \cdot i}{P \cdot L}$$

Tensione massima sul fondo

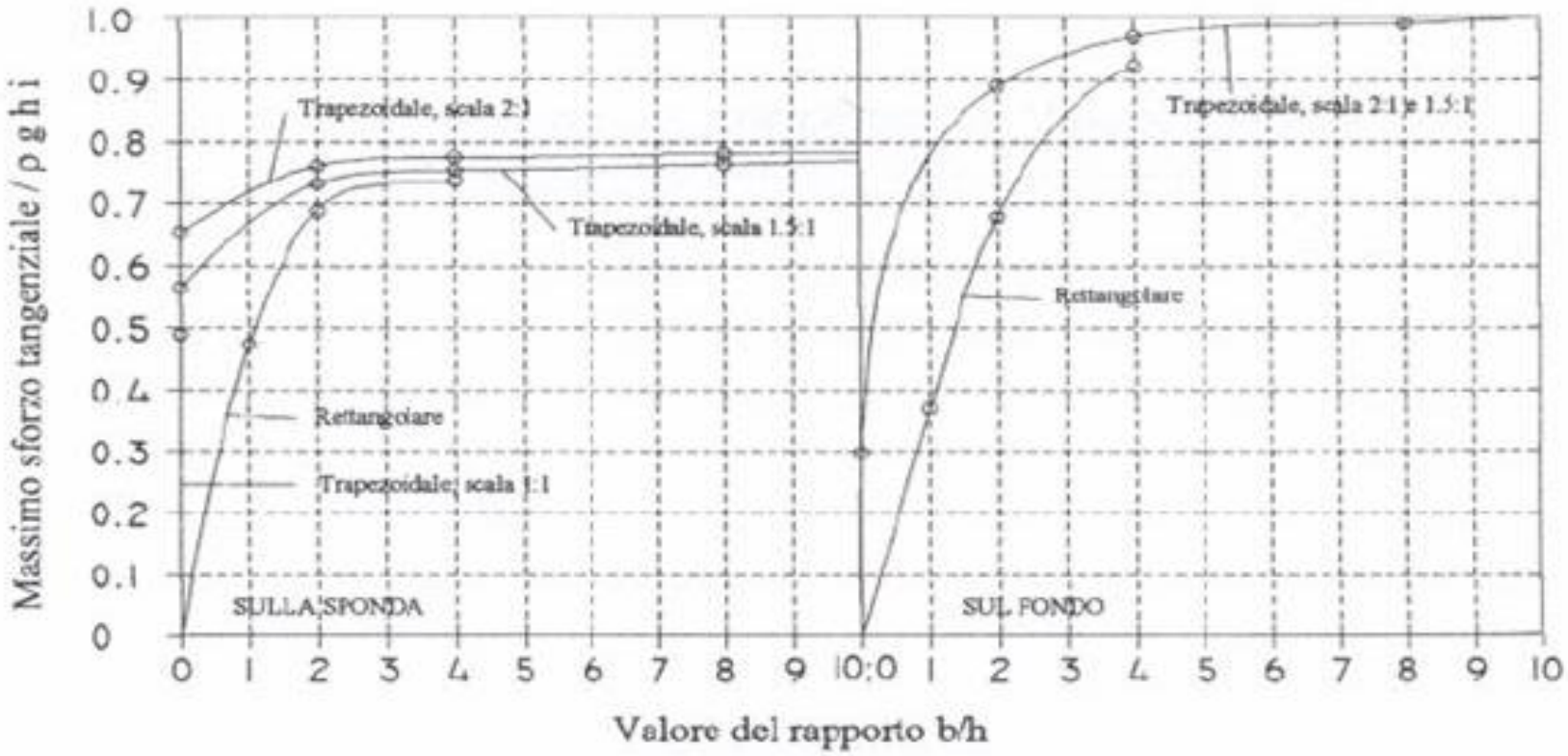
$$\tau_0 = \gamma \cdot R \cdot i \approx \gamma \cdot h \cdot i$$



Andamento degli sforzi tangenziali lungo il fondo di una sezione trapezia.

(Lane e Carlson, 1953)

$$\tau_{fondo} \approx K_f \gamma h i \qquad \tau_{sponde} \approx K_{sp} \gamma h i$$



(Lane e Carlson, 1953)

- Tensione critica di opere ingegneria naturalistica

• Manto erboso	(10-20)	25-100 N/m^2
• Trapianto di canneto	(5)	30 N/m^2
• Rullo di canneto	(30)	60 N/m^2
• Graticciata	(10)	50 N/m^2
• Fascina viva	(20-70)	80-100 N/m^2
• Gradonata di salici	(20)	140 N/m^2
• Copertura diffusa	(50-150)	300 N/m^2
• Piantagione latifoglie	(20)	120 N/m^2
• Fastelli di fascine	(100)	300 N/m^2
• Pietrame con talee	(50)	250 N/m^2
• Scogliera con rami	(200)	300 N/m^2

* (Florineth, 1993) Tra parentesi, i valori critici dalla struttura appena realizzata.

- Tensione critica di opere ingegneria naturalistica

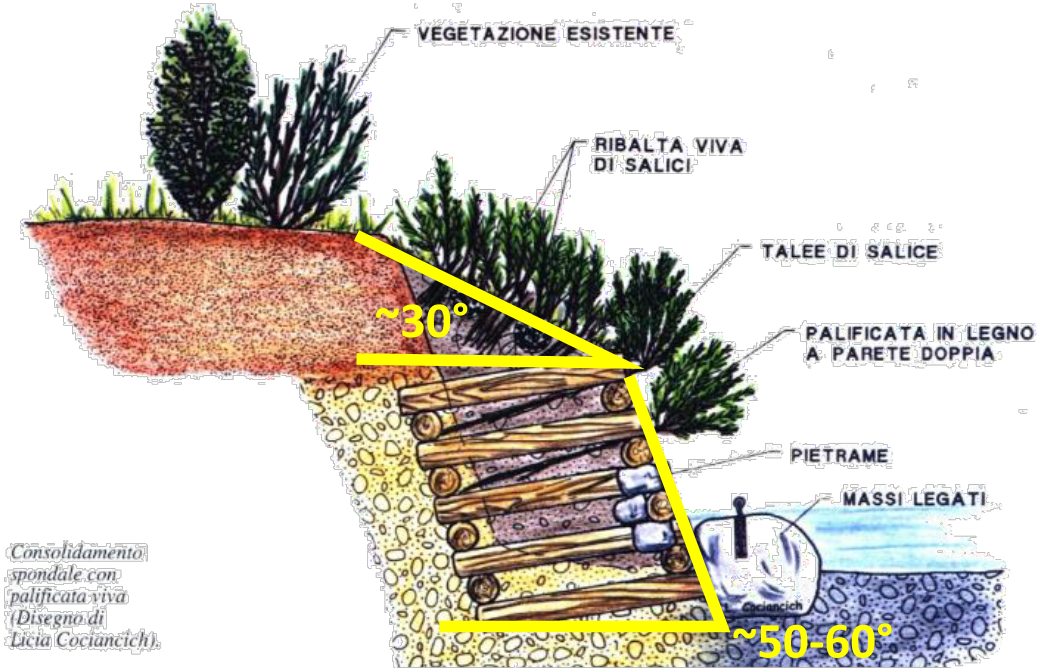
• Talee	(10)	60-150 N/m^2
• Viminate	(10)	20-50 N/m^2
• Pali con fascine	(-)	250 N/m^2
• Gradonata viva	(20)	120 N/m^2
• Palificata doppia	(500)	600 N/m^2
• Gabbionate vive	(340)	400 N/m^2
• Materassi rinverditi	(200-320)	400 N/m^2
• Scogliera rinverdita con talee di salice	(100)	300 N/m^2

Florineth Acer 4, 1999
Maccaferri - Programma Macra 1996
Palmeri, Calò – 1996
Gertsgraser - Convegno EFIB Trieste 1999
Cornelini , Crivelli, Palmeri, Sauli - Acer 2, 2001

*Tra parentesi, i valori critici dalla struttura appena realizzata.

Esempio di verifica alle tensioni

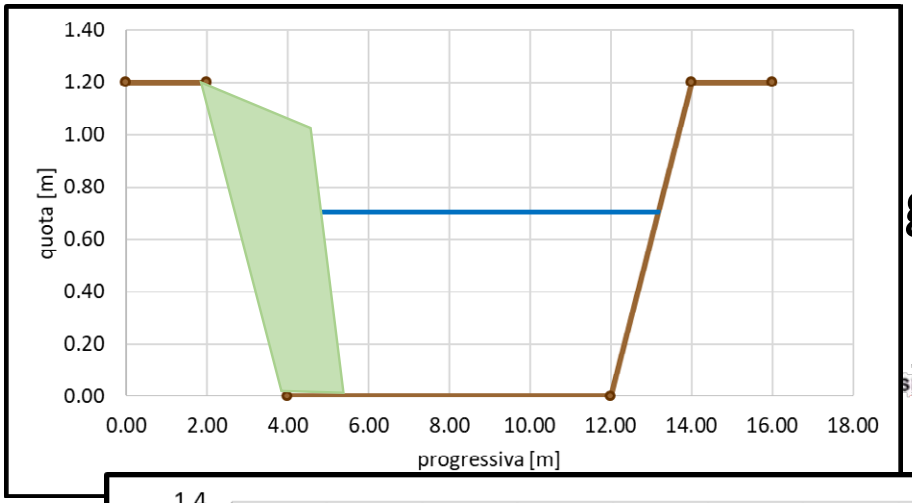
- Esercizio (5):
- base = 8 m portata di progetto = 20 m^3/s
- Palificata viva



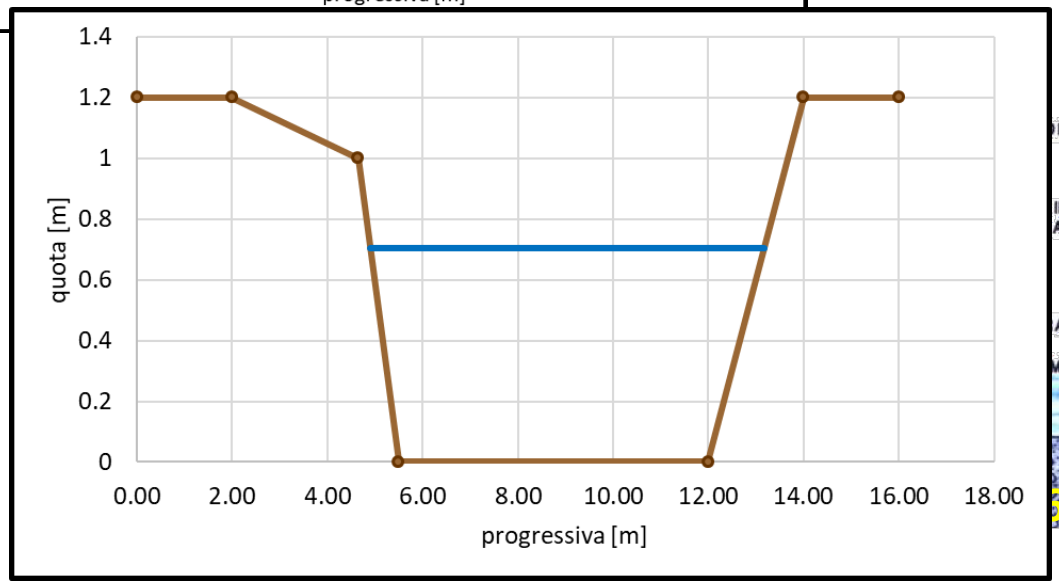
Consolidamento spondale con palificata viva (Disegno di Licia Cociancich).

- Densità 10 piante/m^2
- Diametro 0.01-0.02 cm
- Tensione critica ~500 N/m^2 (Palmieri e Calò, 1996)

Fonte: Licia Cociancich (2005)



getto = 20 m³/s

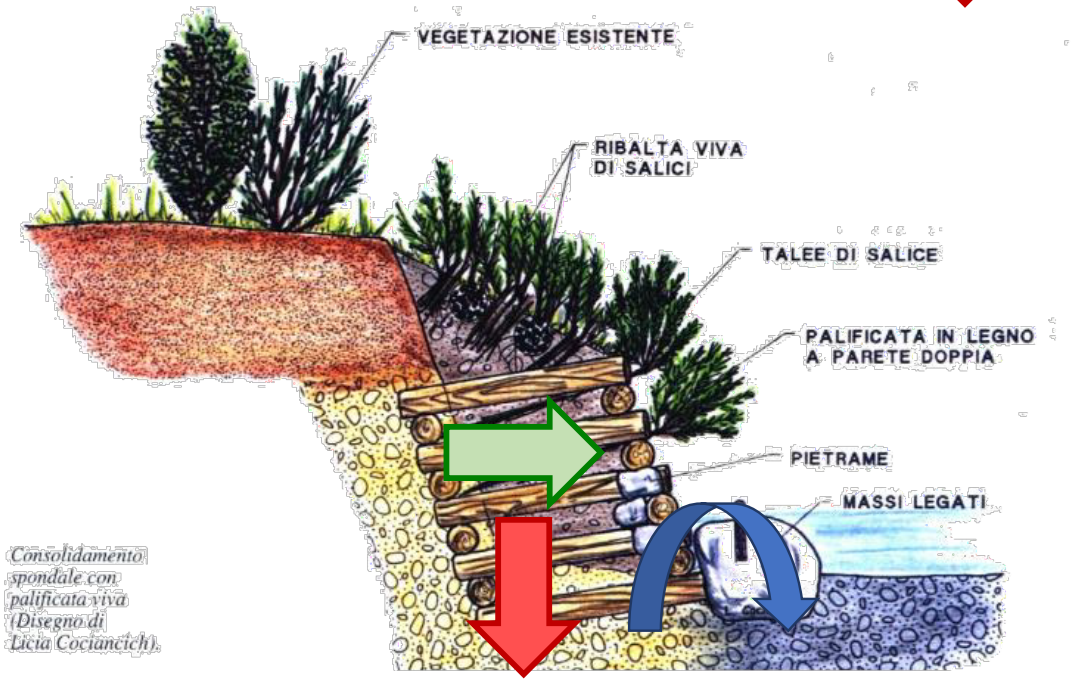


$$Q \cong 15 \frac{m^3}{s}$$

$$\tau_0 \cong 210 \frac{N}{m^2}$$

Fonte: Licia Cociancich (2005)

- Non dimentichiamo le verifiche sulla struttura:
  - Verifica allo SCIVOLAMENTO
  - Verifica al RIBALTAMENTO
  - Verifica allo SCHIACCIAMENTO



Fonte: Licia Cocincich (2005)