

1. Stato dell'arte

1.1. Influenza della vegetazione sulla resistenza al moto

Nello studio delle correnti a pelo libero, la stima del coefficiente di resistenza al moto è generalmente realizzata ricorrendo alla formula proposta da Manning:

$$V = \frac{1}{n} R^{\frac{2}{3}} J^{\frac{1}{2}} \quad (1.1)$$

in cui n è il coefficiente di scabrezza di Manning, V la velocità media, R il raggio idraulico e J la cadente.

I metodi per la stima del coefficiente di Manning possono essere classificati come diretti, descrittivo-fotografici e analitici.

Tale coefficiente viene in genere esplicitato facendo riferimento alle diverse proposte di letteratura, come quelle di Cowan (1956) e Chow (1959), ma anche di Marchi et al. (1981) o a quelle suggerite dagli stessi autori dei software più utilizzati per il calcolo idraulico. Si può anche attingere ad esperienze di laboratorio finalizzate alla determinazione della scabrezza al variare delle caratteristiche del fondo alveo ed alla eventuale presenza di elementi sul letto del canale (Di Cristo et al., 2002) o esperimenti che stimano il coefficiente di scabrezza in funzione delle tipologie vegetali distribuite sul fondo (Medina et al., 2002).

Cowan (1956), inoltre, ha proposto un metodo nel quale il coefficiente di Manning si ottiene attraverso la conoscenza di una serie di coefficienti che tengono conto della presenza di diversi fattori dissipativi.

L'espressione da lui fornita è la seguente:

$$n = (n_0 + n_1 + n_2 + n_3 + n_4) m_5 \quad (1.2)$$

dove:

- n_0 è un valore di base che tiene conto del tipo di materiale di cui è costituito il contorno ed è valido per un canale rettilineo, con sezione trasversale costante e privo di irregolarità;
- n_1 tiene conto delle irregolarità del contorno bagnato;
- n_2 controlla le variazioni di forma e dimensioni della sezione del corso d'acqua;
- n_3 è un fattore relativo alla presenza di impedimenti ed ostacoli;
- n_4 considera l'effetto della vegetazione;
- m_5 è un termine correttivo dovuto all'eventuale presenza di meandri.

A ciascuno dei suddetti fattori Cowan associa, per le diverse condizioni, un valore numerico.

Il metodo di Cowan può essere utilizzato anche nelle aree golenali, apportando delle dovute correzioni. In questo caso non entra in gioco il coefficiente n_2 , essendo legato alla geometria delle sezioni trasversali, mentre il valore di m_5 è sempre uguale ad 1.

La scelta dei valori più idonei a caratterizzare i fattori che compaiono nell'espressione 1.2 è sempre accompagnata da un margine di incertezza dal momento che i valori suggeriti in letteratura sono spesso correlati anche al livello idrico della corrente che investe la pianta che, ovviamente, non è noto a priori (figura 1.1).

Amount of vegetation (n_4)		
Small	0.001-0.010	Dense growths of flexible turf grass, such as Bermuda, or weeds growing where the average depth of flow is at least two times the height of the vegetation; supple tree seedlings such as willow, cottonwood, arrow-weed, or saltcedar growing where the average depth of flow is at least three times the height of the vegetation.
Medium	0.010-0.025	Turf grass growing where the average depth of flow is from one to two times the height of the vegetation; moderately dense stem grass, weeds, or tree seedlings growing where the average depth of flow is from two to three times the height of the vegetation; brushy, moderately dense vegetation, similar to 1-to-2-year-old willow trees in the dormant season.
Large	0.025-0.050	Turf grass growing where the average depth of flow is about equal to the height of the vegetation; 8-to-10-years-old willow or cottonwood trees intergrow with some weeds and brush (none of the vegetation in foliage) where the hydraulic radius exceeds 0.607 m.; or mature row crops such as small vegetables, or mature field crops where depth of flow is at least twice the height of the vegetation.
Very Large	0.050-0.100	Turf grass growing where the average depth of flow is less than half the height of the vegetation; or moderate to dense brush, or heavy stand of timber with few down trees and little undergrowth where depth of flow is below branches, or mature field crops where depth of flow is less than the height of the vegetation.
Extreme	0.100-0.200	Dense bushy willow, mesquite, and saltcedar (all vegetation in full foliage), or heavy stand of timber, few down trees, depth of reaching branches.

Tabella 1.1. Valori del fattore n_4 suggeriti per l'applicazione della formula di Cowan in funzione del tipo di vegetazione presente in alveo e del rapporto tra tirante idrico e altezza della pianta (G.J. Arcement, Jr. e V.R. Schneider, Guide for Selecting Manning's Roughness Coefficients for Natural Channels and Flood Plains, United States Geological Survey, Water-supply Paper 2339).

Chow (1959) ha raccolto in una documentazione fotografica una vasta gamma di corsi d'acqua fornendo, per ciascuna tipologia individuata, una breve descrizione e una proposta di valori da assegnare al coefficiente n di Manning (figura 1.1).

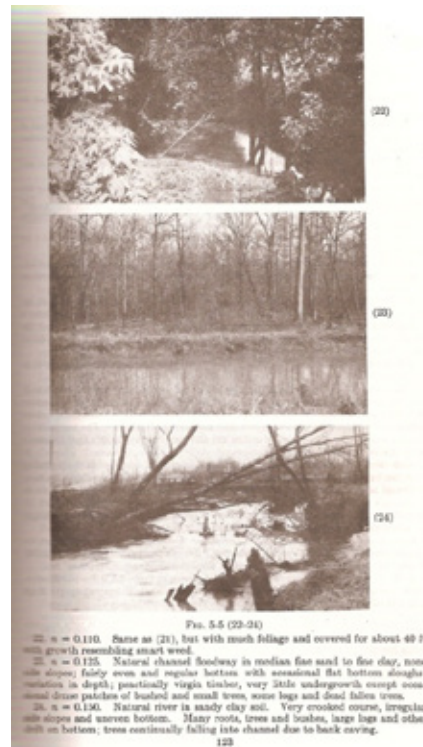


Figura 1.1. Valori di n suggeriti da V.T. Chow in Open-Channel Hydraulics (1959).

Altri metodi descrittivo-fotografici sono quelli di Aldridge e Garrett (1973), Ree and Crow (1977), Schneider et al. (1977), Colson et al. (1979).

La scelta del coefficiente di scabrezza è quindi un'operazione molto delicata perché affidata spesso a considerazioni soggettive.

Numerose sono le ricerche condotte in ambito sia nazionale che internazionale tese ad una migliore quantificazione della resistenza al moto dovuta alla vegetazione. In esse la copertura vegetale è generalmente distinta in arborea o rigida e arbustiva o flessibile.



Figura 1.2. Vegetazione rigida (a sinistra) e vegetazione flessibile (a destra).

1.2. Determinazione del coefficiente di scabrezza in presenza di vegetazione rigida

Una convincente determinazione del coefficiente di Manning in presenza di vegetazione arborea è stata effettuata da Petryk e Bosmajian (1975), i quali hanno studiato la sua variazione con la densità della vegetazione nell'ipotesi in cui il tirante idrico sia inferiore o al più uguale all'altezza delle piante.

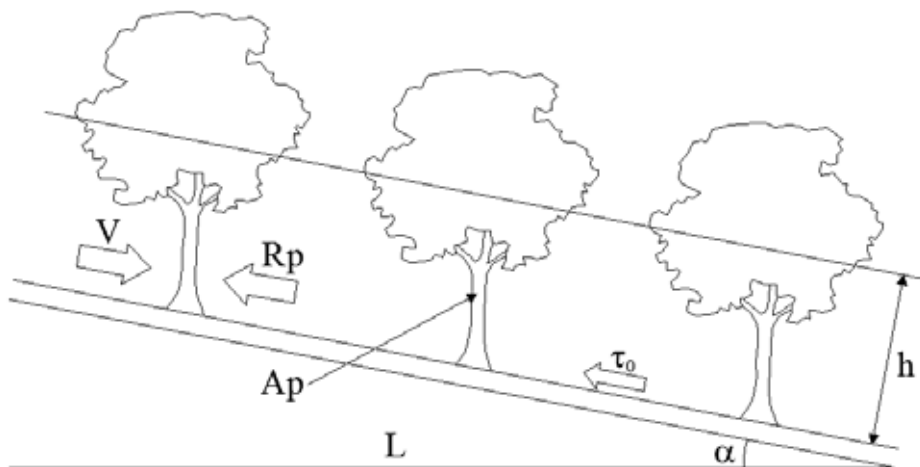


Figura 1.3. Schema del calcolo della scabrezza in presenza di vegetazione rigida.

Facendo riferimento alla figura 1.3 e supponendo condizioni di moto uniforme, la componente della forza peso nella direzione del moto di un tratto di canale lungo L ($\rho gALi$) è bilanciata dagli sforzi alla parete agenti sul contorno (τ_0PL) e dalla somma delle resistenze idrodinamiche offerte dalle singole piante ($\sum Rp_i$).

$$\rho gALi = \tau_0PL + \sum Rp_i \quad (1.3)$$

Risolviendo si ottiene l'espressione per il calcolo della scabrezza in presenza di vegetazione rigida, parzialmente sommersa:

$$n_{eq} = \sqrt{n_0^2 + \frac{1}{2g} \frac{C_D A_p}{a_x a_y}} \quad (1.4)$$

dove il termine $\frac{C_D A_p}{a_x a_y}$ rappresenta proprio la cosiddetta densità della vegetazione, C_D è il coefficiente di resistenza detto anche coefficiente di drag, A_p è la sezione di ingombro di una pianta, a_x è la distanza tra le piante nella direzione della corrente e a_y è la distanza tra le piante nella direzione perpendicolare alla corrente.

Nel caso in cui l'altezza del tirante sia superiore a quella delle piante, lo schema proposto da Petryk e Bosmajian non è più valido perché la velocità di riferimento per la valutazione della resistenza al moto indotta dalla vegetazione risulta significativamente più bassa della velocità media nel canale, intesa come rapporto tra portata liquida e area della sezione di deflusso.

Righetti (2004) ha evidenziato la necessità di considerare un opportuno modello di turbolenza e ha suggerito un fattore correttivo α pari al rapporto tra la velocità media dello strato vegetato (U_f) e quella della sezione (U), da inserire nella relazione 1.4 che diventa quindi:

$$n_{eq} = \sqrt{n_0^2 + \alpha^2 \frac{R^{\frac{1}{3}} C_D A_p}{2g a_x a_y}} \quad (1.5)$$

dove i valori di α sono sempre minori di 1 e decrescono all'aumentare del livello di sommersione.

1.3. Determinazione del coefficiente di scabrezza in presenza di vegetazione flessibile

Per quanto riguarda la determinazione del coefficiente di scabrezza in presenza di vegetazione arbustiva diversi studi (Fathi e Kouwen, 1997; Vischer e Oplatka, 1998; Kouwen e Fathi, 2000; Freeman et al., 2000; Järvelä, 2002; Chiaradia, 2006) hanno dimostrato che la scabrezza di un alveo con vegetazione arbustiva non rimane costante ma, al contrario, in determinate condizioni tende addirittura a decrescere come conseguenza del piegamento delle chiome che presentano comportamento elastico. Tuttavia, allo stato attuale non esistono molti riferimenti per la stima della scabrezza in tali condizioni.

Un metodo empirico è quello proposto da Freeman et al. (2000), suffragato da un notevole numero di prove eseguite su materiale vivo e considerando diverse condizioni idrauliche.

I fenomeni determinati dalla presenza di vegetazione arbustiva in alveo, vengono descritti attraverso quattro parametri secondo una relazione del tipo:

$$\frac{V_0}{V} = f\left(\frac{\rho V^2 A_i}{E_s A_s}, \frac{h}{h_{veg}}, MA_p, R_e\right) \quad (1.6)$$

dove E_s è il modulo di elasticità caratteristico della vegetazione (N/m^2), A_s è l'area della sezione del fusto di diametro D_s (m), h è il tirante (m), h_{veg} è l'altezza della vegetazione eretta in condizioni di riposo (m), M è il numero di piante per unità di superficie e A_p è la superficie frontale di ciascuna pianta (m^2). Il primo parametro identifica il rapporto tra la forza della corrente e la resistenza meccanica offerta dalla pianta; quest'ultima viene schematizzata come una vela di dimensioni note (la chioma) montata su di un perno (il fusto) su cui si scaricano le forze. Il secondo parametro adimensionale indica il livello di sommersione, il terzo la densità della vegetazione ovvero la superficie totale assorbente la quantità di moto, mentre il quarto rappresenta il numero di Reynolds, che esprime l'equilibrio tra le forze di inerzia e le forze di resistenza viscosse.

Dall'analisi numerica delle sperimentazioni sono state estrapolate due funzioni che descrivono la variazione del coefficiente di scabrezza dell'alveo vegetato in condizione di sommersione totale ($h > 0,8 h_{veg}$):

$$n = 0,183 \left(\frac{E_s A_s}{\rho V_0^2 A_i} \right)^{0,183} \left(\frac{h_{veg}}{h} \right)^{0,243} (MA_i)^{0,278} \left(\frac{v}{V_0 R} \right)^{0,115} \left(\frac{R^{\frac{2}{3}} S^{\frac{1}{2}}}{V_0} \right) \quad (1.7)$$

e parziale ($h < 0,8 h_{veg}$):

$$n = 3,487E - 05 \left(\frac{E_s A_s}{\rho V_0^2 A_i} \right)^{0,150} (MA_i)^{0,166} \left(\frac{V_0 R}{v} \right)^{0,622} \left(\frac{R^{\frac{2}{3}} S^{\frac{1}{2}}}{V_0} \right) \quad (1.8)$$

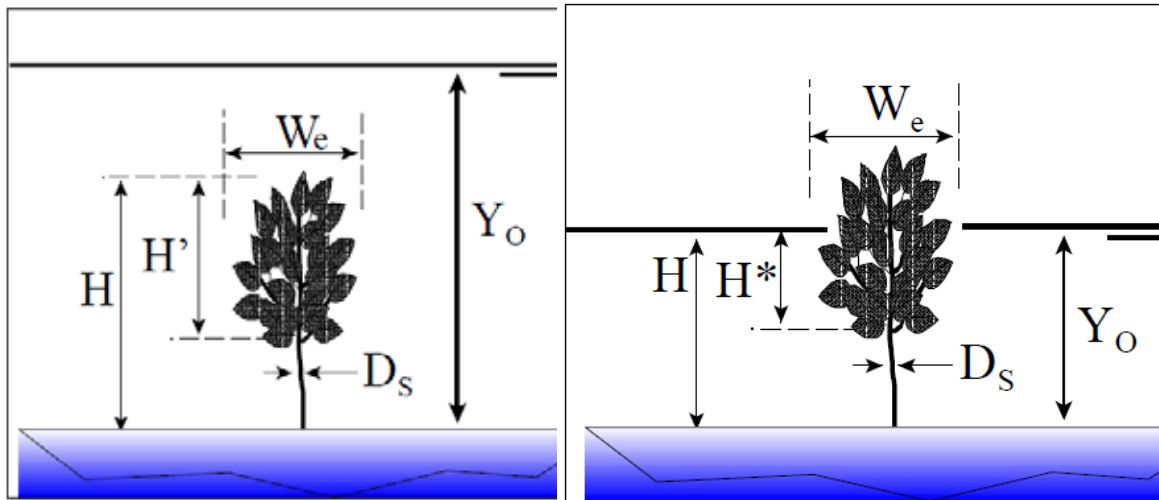


Figura 1.4. Schema relativo alla proposta di Freeman et al. nel caso di vegetazione completamente sommersa (a sinistra) e parzialmente sommersa (a destra). Tratto da Freeman et al., Determination of Resistance Due to Shrubs and Woody Vegetation, Coastal and Hydraulics Laboratory, 2000.

Freeman et al. hanno proposto anche un'espressione per la determinazione del modulo di elasticità della pianta basato sulla misura della forza orizzontale necessaria a piegare il fusto di 45 gradi.

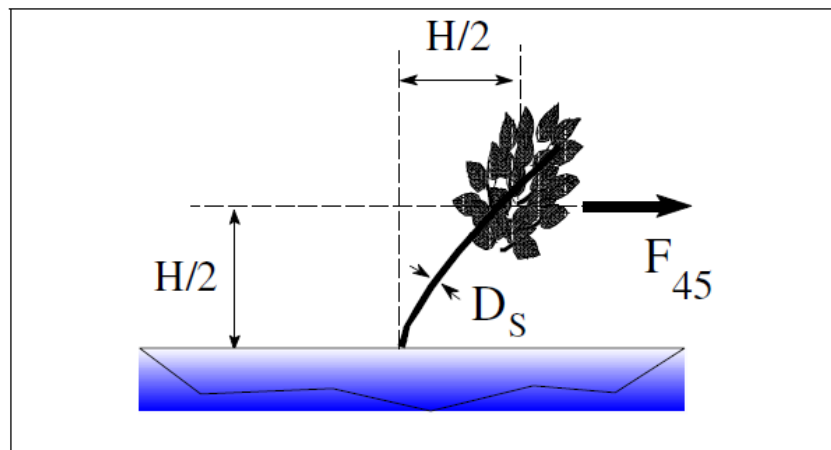


Figura 1.5. Schema relativo alla proposta di Freeman et al. per la stima del modulo di elasticità nel caso in cui l'altezza della chioma è approssimativamente uguale a quella della pianta. Tratto da Freeman et al., Determination of Resistance Due to Shrubs and Woody Vegetation, Coastal and Hydraulics Laboratory, 2000.

$$E_S = \frac{F_{45}H^2}{3I} = 6.791 \left(\frac{F_{45}H^2}{D_S^4} \right) \quad (1.9)$$

Misure effettuate sul campo e in laboratorio hanno inoltre permesso di ottenere una relazione tra il modulo di elasticità della pianta ed il rapporto tra altezza della pianta e diametro del fusto.

$$E_S \left(\frac{N}{m^2} \right) = 7.648E06 \left(\frac{H}{D_S} \right) + 2.174E04 \left(\frac{H}{D_S} \right)^2 + 1.809E03 \left(\frac{H}{D_S} \right)^3 \quad (1.10)$$

Nell'applicazione del modello di Freeman et al. occorre prestare attenzione ai limiti della attività sperimentale su cui si basa.

I limiti di validità del modello di Freeman riguardano sia le caratteristiche della vegetazione che quelle della corrente e sono di seguito elencati:

- tiranti compresi tra 0,4 e 1,4 m;
- velocità tra 0,15 e 1,1 m/s;
- n di Manning compreso tra 0,04 a 0,14;
- altezza delle piante da 0,20 a 1,52 m;
- larghezza della chioma da 0,076 a 0,91 m;
- densità di piante da 0,53 a 13 piante / m²;
- modulo di elasticità da 5,3 x 10⁷ a 4,8 x 10⁹ N/m²;
- numero di Reynolds da 1,4 x 10⁵ a 1,6 x 10⁶.

1.4. Applicazione sulla distribuzione della portata in canali a differente vegetazione

Per meglio apprezzare le teorie descritte nei precedenti paragrafi, si è svolta una applicazione per stimare la distribuzione della portata in canali con differente vegetazione. Facendo riferimento allo schema riportato in figura 1.6, si è considerato un

canale (1) dal quale si diramano due canali (2) e (3). Il canale (1) di monte ha sezione rettangolare di dimensioni 5 m x 3 m, mentre i canali (2) e (3) di valle, sempre a sezione rettangolare, hanno entrambi base pari a 3 m ed altezza pari a 3 m. A valle della biforcazione, il canale (2) presenta un fondo simile a quello del canale (1) (ciottoli e sponde pulite). Per il canale (3) si sono ipotizzati i seguenti due scenari: presenza di vegetazione rigida (betulla), nel primo caso, e presenza di vegetazione flessibile (arbusti), nel secondo.

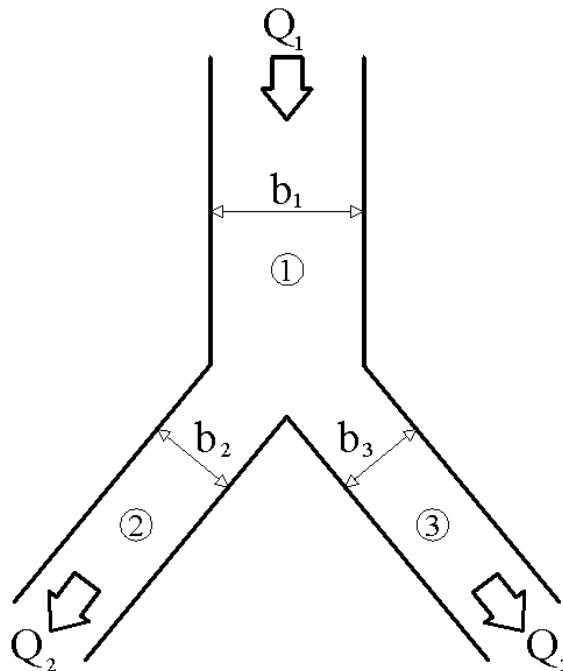


Figura 1.6. Schema considerato nell'applicazione.

La stima della distribuzione della portata nei due canali di valle è stata effettuata utilizzando l'equazione di conservazione dell'energia:

$$\begin{cases} y_1 + z_1 + \frac{\alpha_1 U_1^2}{2g} = y_2 + z_2 + \frac{\alpha_2 U_2^2}{2g} + S_{f2}L + C \left| \frac{\alpha_2 U_2^2}{2g} - \frac{\alpha_1 U_1^2}{2g} \right| \\ y_1 + z_1 + \frac{\alpha_1 U_1^2}{2g} = y_3 + z_3 + \frac{\alpha_3 U_3^2}{2g} + S_{f3}L + C \left| \frac{\alpha_3 U_3^2}{2g} - \frac{\alpha_1 U_1^2}{2g} \right| \end{cases} \quad (1.11)$$

Nel primo caso, relativo alla presenza di vegetazione rigida, la determinazione della scabrezza indotta dalla vegetazione è realizzata utilizzando la formula di Petryk e Bosmajian. In questo modo, si sono ricavati i valori di scabrezza in relazione all'altezza d'acqua calcolata per le diverse portate defluenti nel ramo considerato.

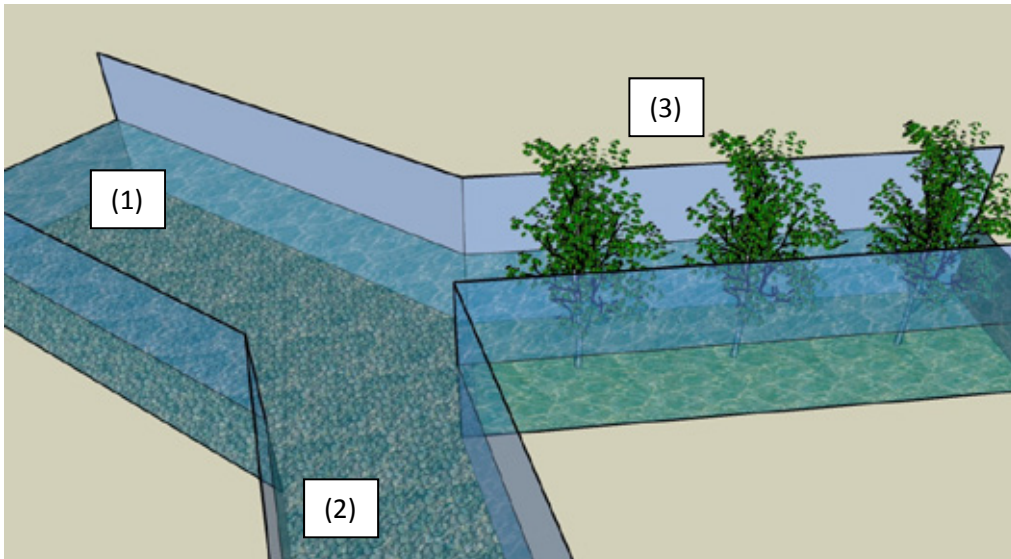


Figura 1.7. Schema relativo al primo caso: canali (1) e (2) senza vegetazione e canale (3) con vegetazione rigida sul fondo.

I risultati ottenuti sono sintetizzati nella figura 1.8, dalla quale si evince che, applicando nella sezione con vegetazione rigida la formula di Petryk e Bosmajian, il coefficiente di scabrezza aumenta linearmente con l'aumentare del tirante.

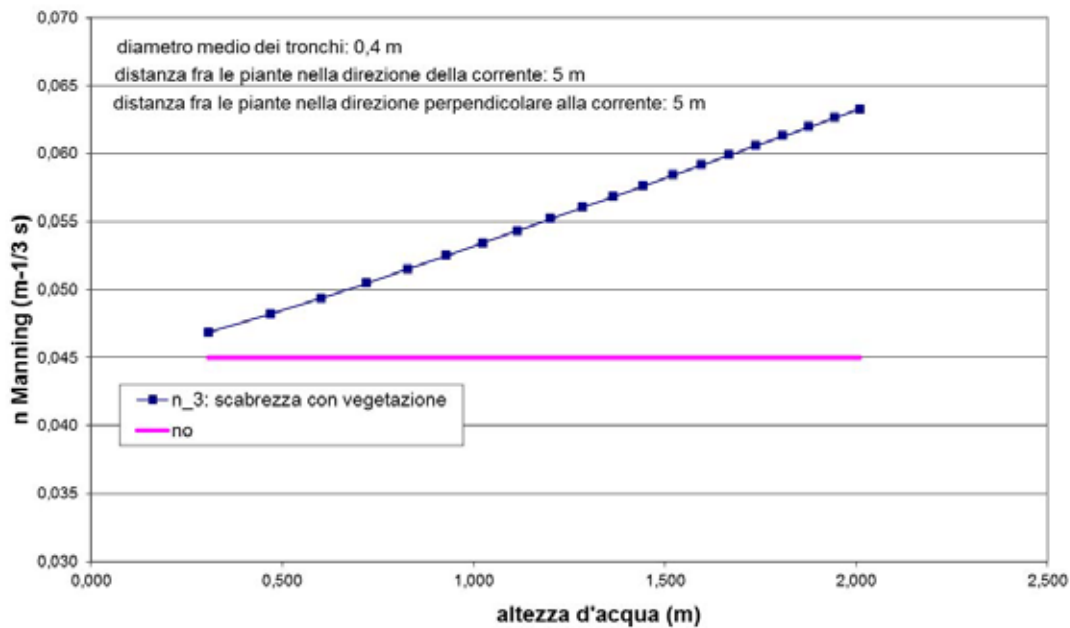


Figura 1.8. Variazione della scabrezza con l'altezza d'acqua in una sezione del canale (3) con vegetazione rigida sul fondo.

Nella seguente figura, inoltre, si mostra come la portata Q_1 defluente nel canale (1) di monte si distribuisce nei due canali a valle della biforcazione: la portata Q_2 che defluisce nel ramo (2) senza vegetazione risulta maggiore di quella Q_3 che defluisce nel ramo (3) con vegetazione rigida sul fondo. A causa dell'incremento di scabrezza nel canale 3 all'aumentare del tirante, anche la disuniformità di distribuzione della portata aumenta al crescere della portata.

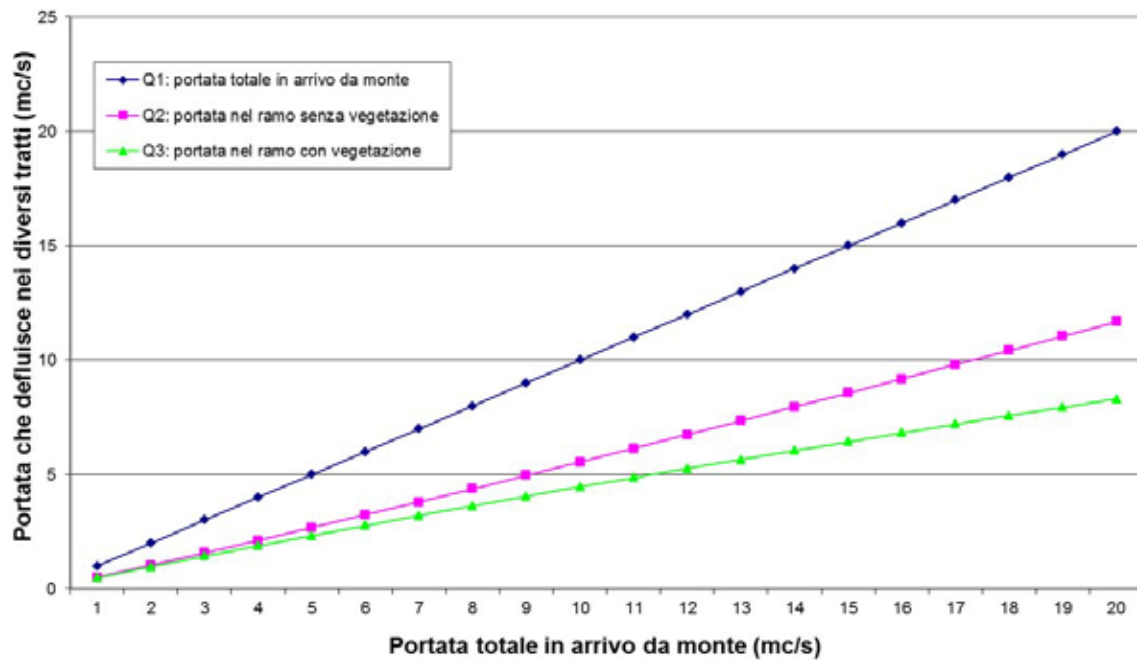


Figura 1.9. Esempio di split della portata nei due rami (1) e (2) di uguale geometria e differenti caratteristiche di scabrezza idraulica considerati nell'applicazione. Primo caso relativo alla presenza di vegetazione rigida sul fondo del canale (3).

Nel secondo caso (figura 1.10) si sono ipotizzate le stesse caratteristiche geometriche del caso precedente e si è fatto riferimento allo stesso coefficiente di scabrezza n di Manning nei canali (1) e (2). Nel canale (3), invece, si è ipotizzata la presenza di vegetazione flessibile sul fondo e si è utilizzata la formula di Freeman et al. per la stima del suo coefficiente di scabrezza. In aggiunta, per valori del rapporto tra tirante e altezza della pianta minori di 0,8 la vegetazione è stata considerata parzialmente sommersa; mentre per valori maggiori di 0,8 si è utilizzata la formula proposta per vegetazione completamente sommersa.

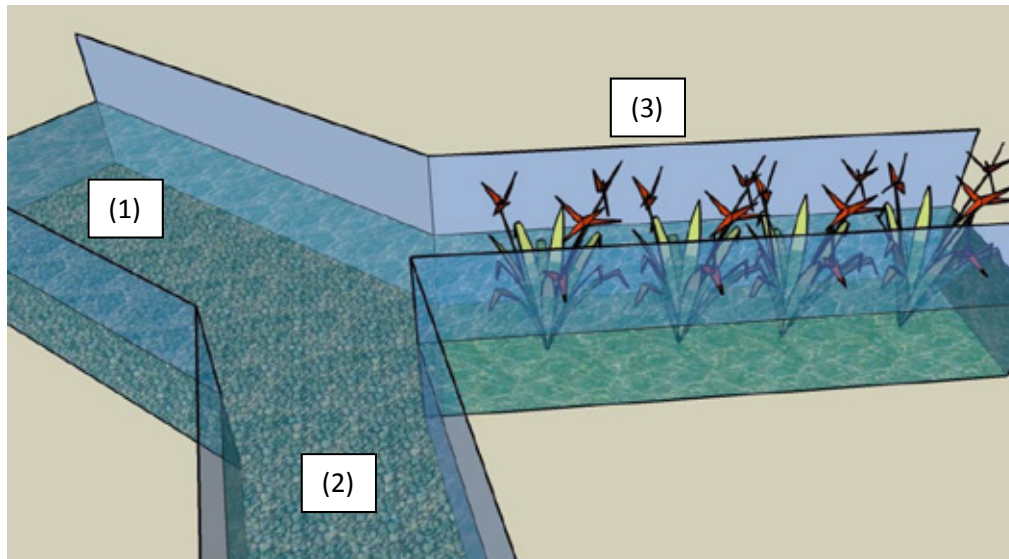


Figura 1.10. Schema relativo al secondo caso: canali (1) e (2) senza vegetazione e canale (3) con vegetazione flessibile sul fondo.

Come mostrato nella figura seguente, in questo caso il coefficiente di Manning aumenta con il tirante in condizioni di sommersione parziale e decresce con il tirante in condizioni di sommersione totale, come conseguenza del piegamento delle chiome.

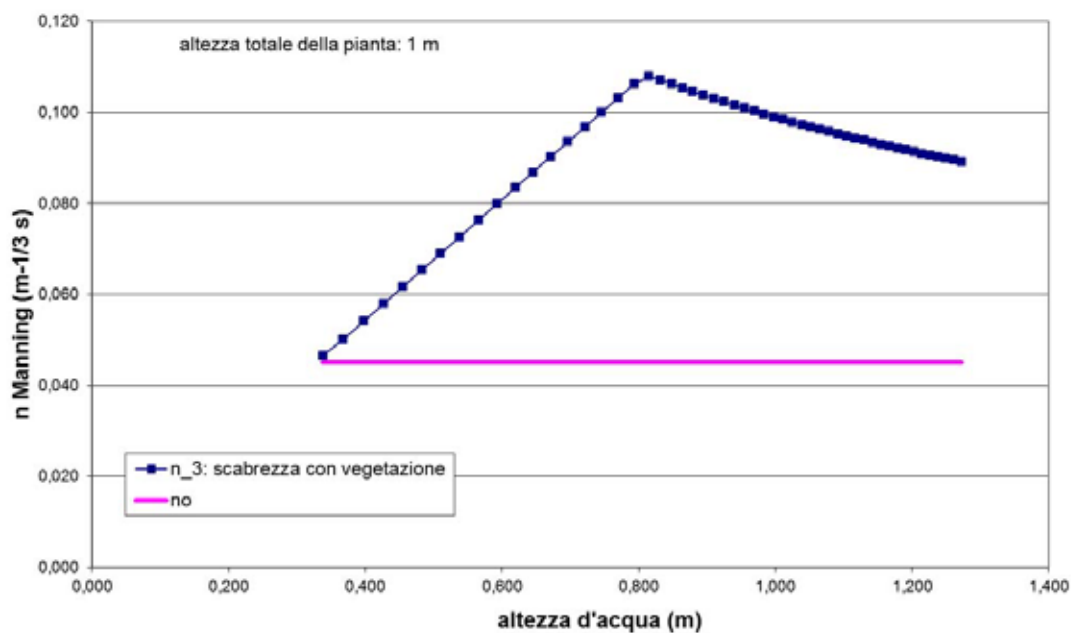


Figura 1.11. Variazione della scabrezza con l'altezza d'acqua in una sezione del canale (3) con vegetazione flessibile sul fondo.

Anche in presenza di vegetazione flessibile, come nel caso di vegetazione rigida, la portata che defluisce nel ramo (2) senza vegetazione è maggiore di quella che defluisce nel ramo (3) con vegetazione flessibile sul fondo (figura 1.12).

In questo caso, si nota come inizialmente la differenza fra portate dei rami (2) e (3) aumenta all'aumentare della portata, poi una volta raggiunte le condizioni di sommersione totale la differenza tende a rimanere costante.

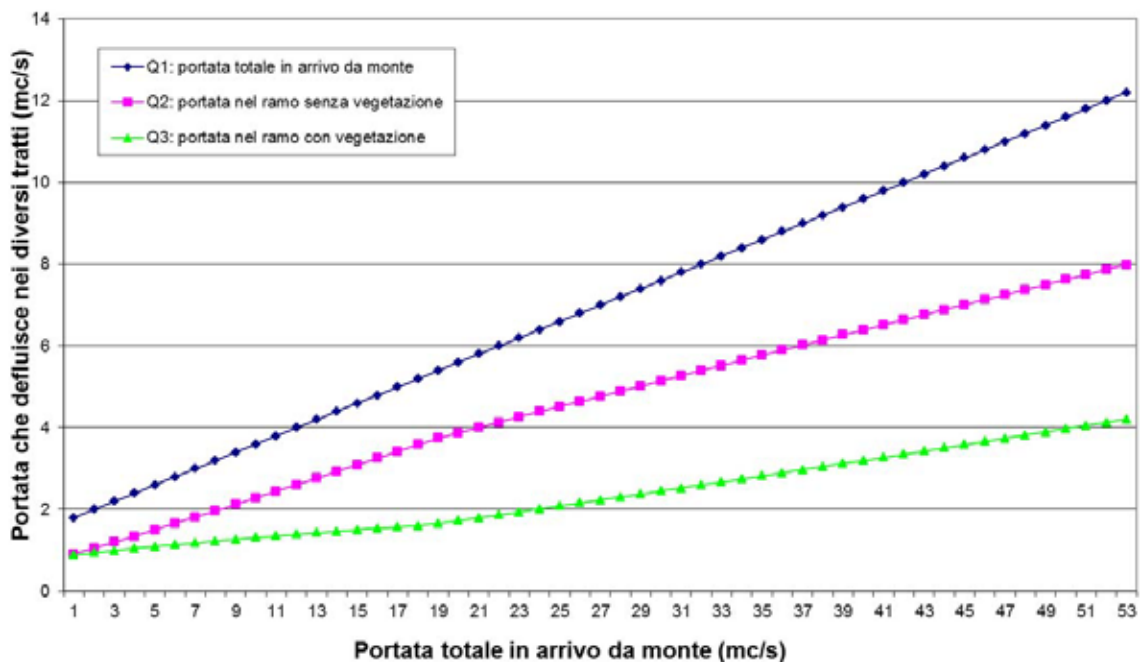


Figura 1.12. Esempio di split della portata in due rami di uguale geometria e differenti caratteristiche di scabrezza idraulica considerati nell'applicazione. Secondo caso relativo alla presenza di vegetazione flessibile sul fondo del canale (3).

L'applicazione evidenzia l'importanza della stima della scabrezza nei fenomeni idraulici. Nel caso presentato, infatti, a parità di geometria dei canali e di portata e resistenza al moto del canale di monte, la distribuzione della portata nei canali a valle della biforcazione è fortemente influenzata dalla resistenza al moto offerta dalla

vegetazione presente sul fondo. Inoltre tale influenza varia al variare del tirante e si ha un comportamento differente a seconda che si tratti di vegetazione rigida o flessibile.

Negli studi volti a determinare il pericolo di inondazione, la scelta del coefficiente di scabrezza risulta particolarmente delicata: da essa infatti, può dipendere l'inondabilità di un territorio.