

ACCORDO DI COLLABORAZIONE SCIENTIFICA TRA REGIONE TOSCANA  
E  
DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA CIVILE E AMBIENTALE DELL'UNIVERSITA'  
DEGLI STUDI DI FIRENZE

PER

*ATTIVITA' DI RICERCA PER LA MITIGAZIONE DEL RISCHIO IDRAULICO  
NELLA REGIONE TOSCANA*

## **Attività "E1"**

**Interazione vegetazione in alveo e  
corrente: studi sperimentali e indirizzi  
operativi**

## **Relazione di Sintesi**

*Gruppo di Lavoro:*

Luca Solari (referente, UNIFI), Enio Paris (UNIFI),  
Pina Nicoletta De Cicco (UNIFI), Fabrizio Piccoli (UNIFI),  
Simona Francalanci (CERAFRI), Francesco Gabellini (RT)

**Firenze, gennaio 2014**

## 1. LA RESISTENZA AL MOTO NEGLI ALVEI VEGETATI

Vengono qui illustrate delle considerazioni riassuntive relative all'efficienza idraulica di sezioni schematiche, compatte e composte, nel caso di presenza di diverse specie di vegetazione (erbacea, arborea e arbustiva) lungo il perimetro bagnato.

### 1.1 Sezione compatta trapezia

Viene effettuato un confronto tra i coefficienti di Manning complessivi della sezione ( $n_{\text{equivalente}}$ ) e le diverse scale di deflusso ottenute, in modo tale da valutare l'effetto delle diverse specie vegetali (erbacee, arbustive, arboree) sull'efficienza idraulica della sezione in esame (Figura 1.1). La sezione presenta una pendenza dell'alveo pari a 0.125%, sponde con un'inclinazione pari a  $30^\circ$ , un tirante  $Y$  ed una larghezza del fondo pari a  $B$ . Il fondo della sezione è costituito da sedimenti aventi un diametro caratteristico  $D_{50} = 4.9$  cm. Il coefficiente di Manning associato a questi sedimenti è  $n_{\text{sedimenti}} = 0.029 \text{ m}^{-1/3}\text{s}$ .

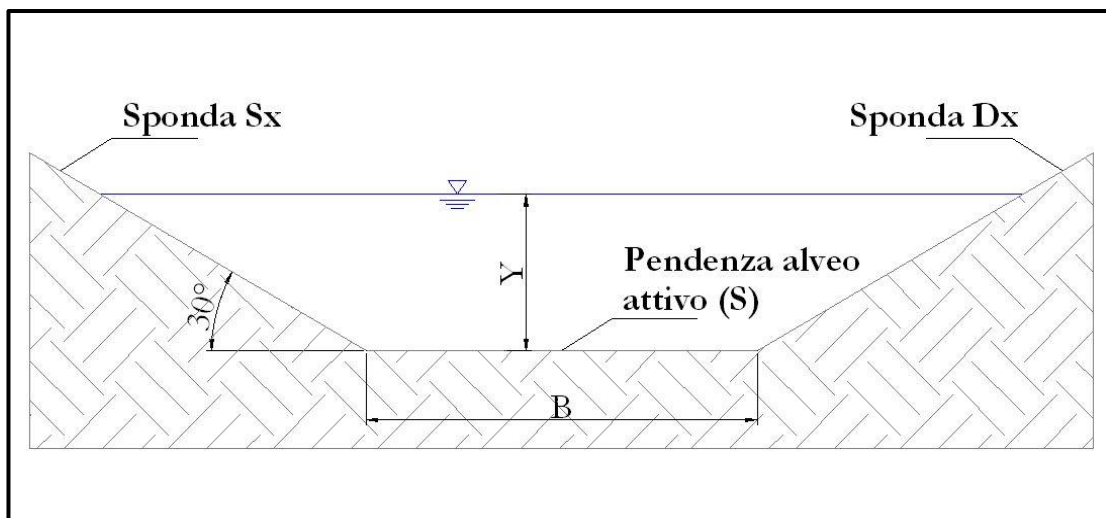
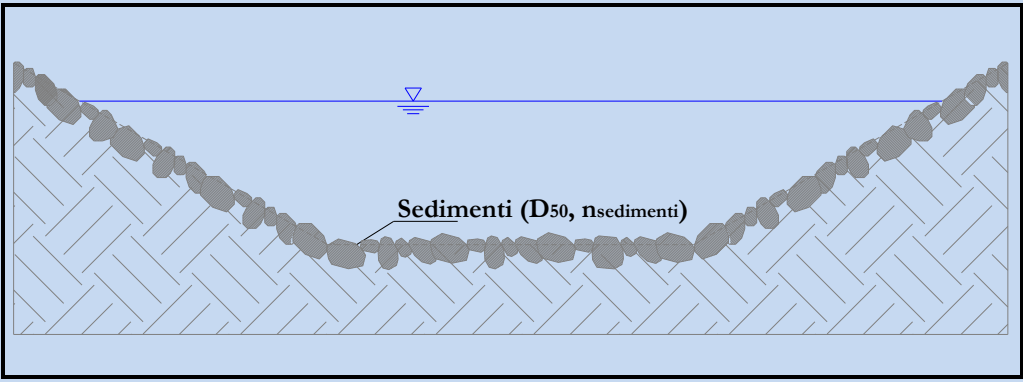
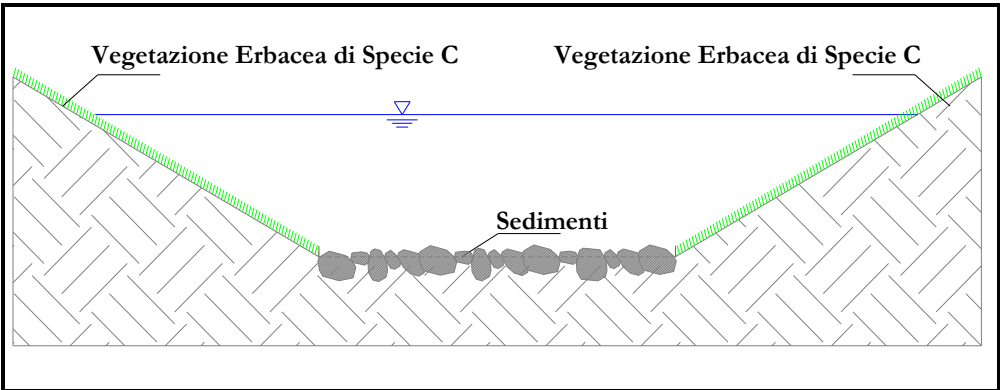
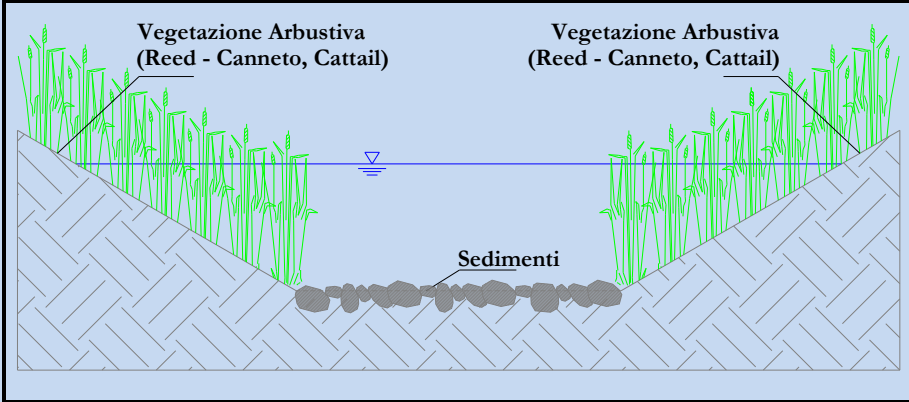
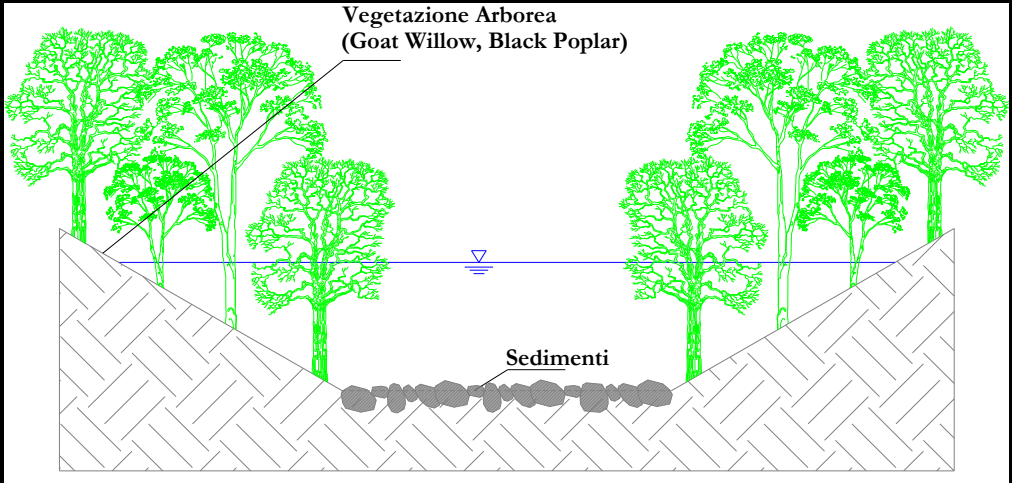
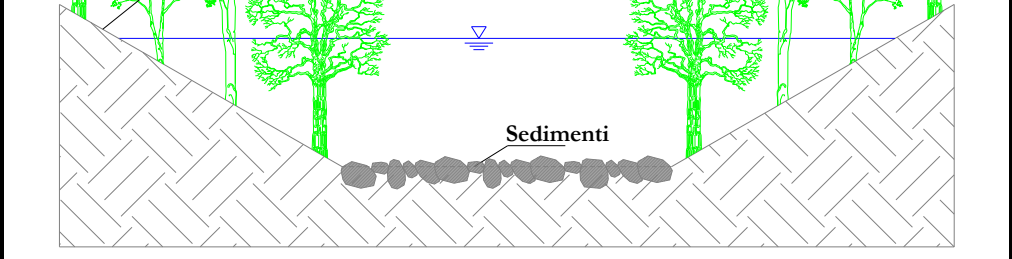


Figura 1.1 – Sezione compatta: sezione trapezia di riferimento

Nello specifico vengono esaminati i vari casi riportati nella Tabella 1.1 dove sono indicate, per ogni specie vegetale, la formulazione da letteratura scelta per il calcolo del coefficiente di scabrezza di *Manning*.

| CASI DI STUDIO PER LA SEZIONE DI RIFERIMENTO TRAPEZIA PER IL CONFRONTO DELLE SCALE DI DEFLUSSO |              |   |   |
|--|--------------|---|---|
| Casi   | Alveo Inciso | Sponde  | Schema sezione  |
| Caso 0   | Sedimenti    | Sedimenti<br>(formula di Strickler)                               |   |
| Caso 1   | Sedimenti    | Vegetazione erbacea di specie intermedia C<br>(modello Whitehead) |  |

|        |           |  |   |
|--------|-----------|--|---|
| Caso 2 | Sedimenti | Vegetazione arbustiva<br>canneto (reed – cattail)<br>(modello Baptist) |  |
| Caso 3 | Sedimenti | Vegetazione arborea<br>goat willows<br>(modello Järvelä,<br>LAI=3.2)   |  |
| Caso 4 | Sedimenti | Vegetazione arborea<br>black poplar<br>(modello Järvelä, LAI=3)        |  |

|        |   |  |  |
|--------|---|--|--|
| Caso 5 | Vegetazione erbacea di specie intermedia C (Whitehead)  | Vegetazione erbacea di specie intermedia C (modello Whitehead) |  |
| Caso 6 | Vegetazione arborea (Softwood Forest) (modello Baptist) | Vegetazione erbacea di specie intermedia C (modello Whitehead) |  |

Tabella 1.1 – Casi di studio relativi alla sezione compatta trapezia di riferimento per il confronto delle scale di deflusso

La Figura 1.2 mostra il confronto dell'andamento del rapporto tra il coefficiente di Manning equivalente nella sezione ( $n_{\text{equivalente}}$ ) e quello associato ai soli sedimenti ( $n_{\text{sedimenti}}$ ), al variare della larghezza del fondo dell'alveo B nel caso di un tirante idrico  $Y = 2.5$  m per i primi cinque casi riportati in Tabella 1.1. I casi 5 e 6 non vengono illustrati poiché il fondo alveo è popolato da vegetazione.

Si noti che nel caso di sezioni 'larghe' (alti valori di  $B/Y$ ), l'aumento di resistenza prodotto dalla vegetazione risulta trascurabile; al contrario, nel caso di sezioni 'strette', la presenza della vegetazione sulla sponda dà luogo ad un incremento della resistenza al moto significativo nel caso di canneti, salici e pioppi.

Nella Figura 1.3 si riportano le scale di deflusso ottenute per i sette diversi casi, scelte per la sezione trapezia di riferimento nel caso di una larghezza del fondo  $B=10$  m. Le curve dimostrano come la variazione della vegetazione influenza significativamente la portata liquida che la sezione riesce a smaltire. Passando, per esempio, da una sezione vegetata solo su sponde da erba di classe intermedia C ad una in cui sono presenti arbusti, la capacità di deflusso si riduce di circa il 30%; la situazione migliora lievemente nel caso in cui sulle sponde siano presenti delle specie arboree (salici e pioppi) dove la diminuzione si attesta intorno al 20 – 25%; ciò è attribuibile alla maggiore resistenza al moto offerta dalla vegetazione arbustiva rispetto all'arborea. La situazione più critica si evidenzia infine nel caso in cui la vegetazione arborea e/o arbustiva sia presente nell'alveo della sezione. La portata liquida smaltita subisce una consistente diminuzione fino a valori di circa il 50 – 60 %.

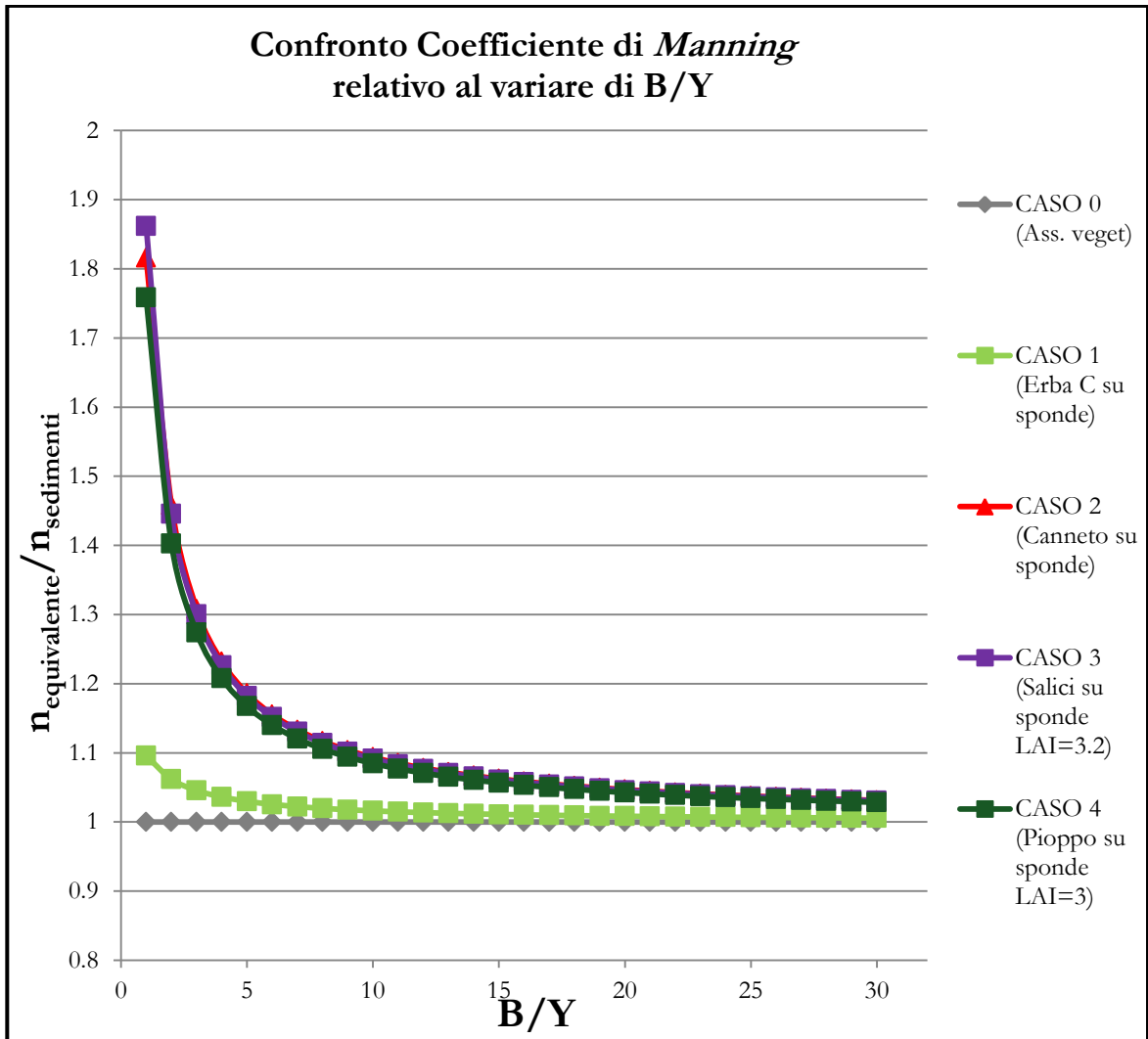


Figura 1.2 – Andamento del coefficiente di Manning equivalente adimensionalizzato al variare del rapporto B/Y per le diverse casistiche analizzate

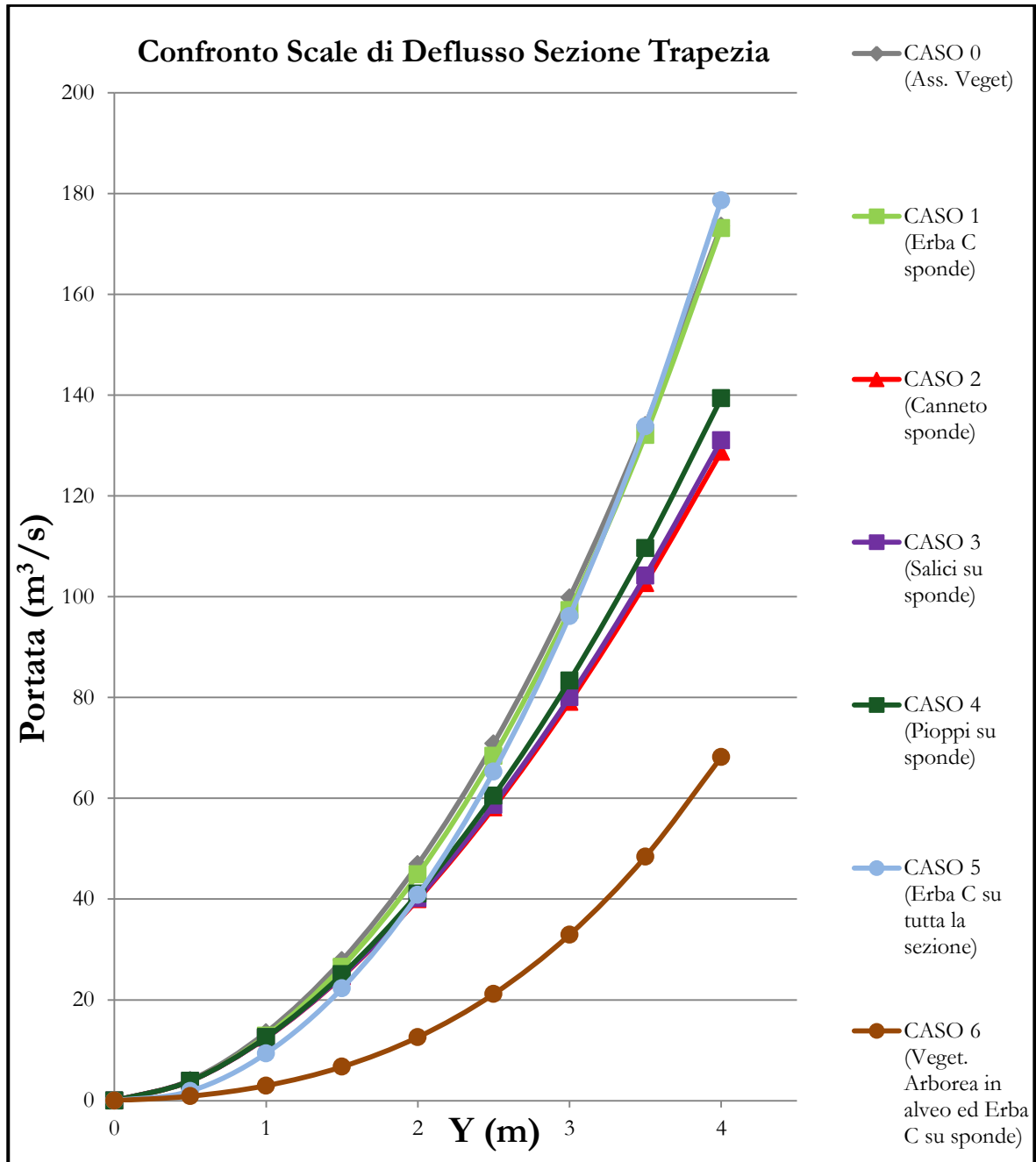


Figura 1.3 – Confronto finale delle scale di deflusso per le sette diverse casistiche analizzate della sezione trapezia



## 1.2 Sezione composta

In analogia con quanto presentato nel caso della sezione compatta di riferimento (Figura 1.4), si presenta un confronto tra i coefficienti di Manning e le scale di deflusso per le diverse configurazioni riportate nella Tabella 1.2 dove sono indicate, per ogni specie vegetale, la formulazione scelta per la stima del coefficiente di scabrezza di *Manning*.

La sezione presenta una pendenza dell'alveo pari a 0.125%, sponde con un'inclinazione pari a 30°, un tirante  $Y$  ed una larghezza del fondo  $B=10$  m. Il fondo della sezione è costituito da sedimenti aventi un diametro caratteristico  $D_{50} = 4.9$  cm. Il coefficiente di Manning associato a questi sedimenti è  $n_{\text{sedimenti}}=0.029$   $\text{m}^{-1/3}\text{s}$

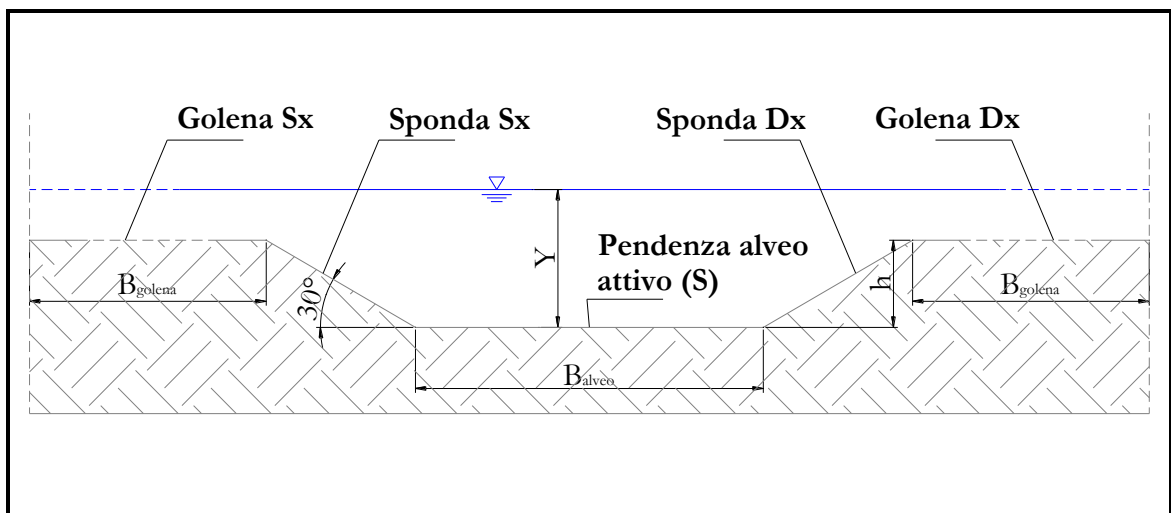
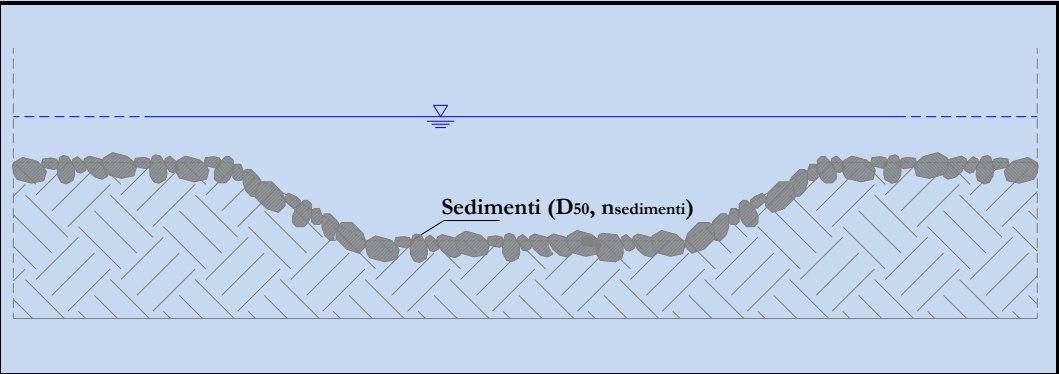
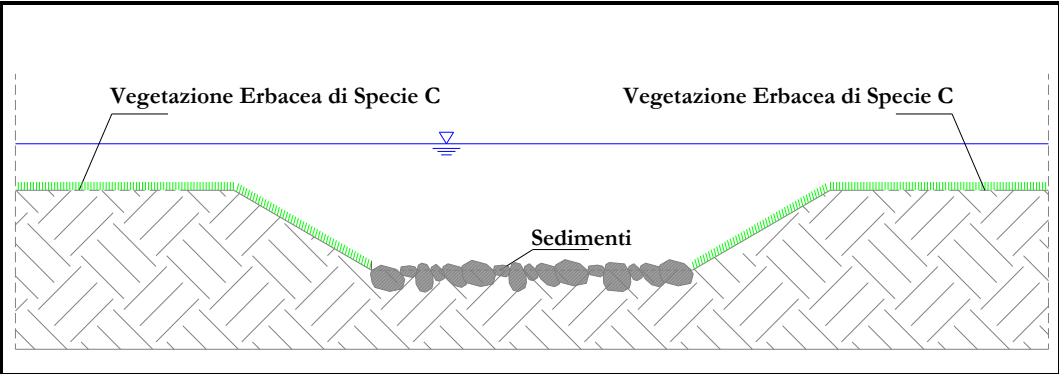
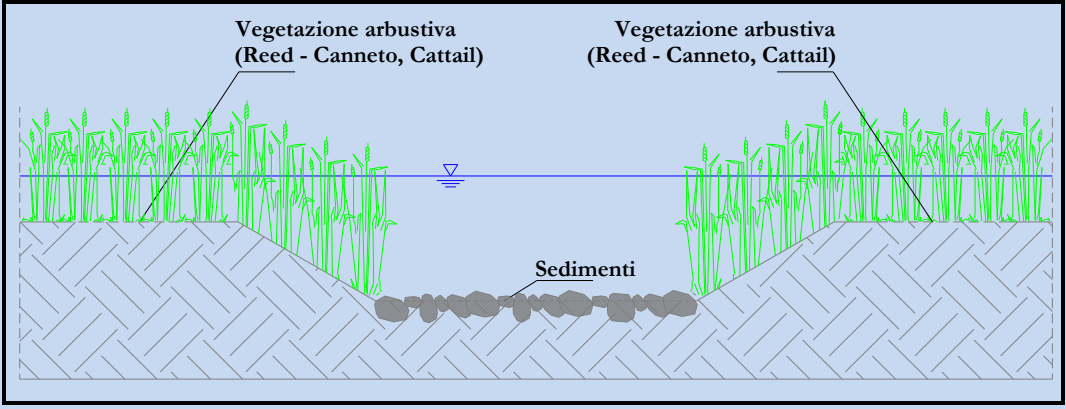
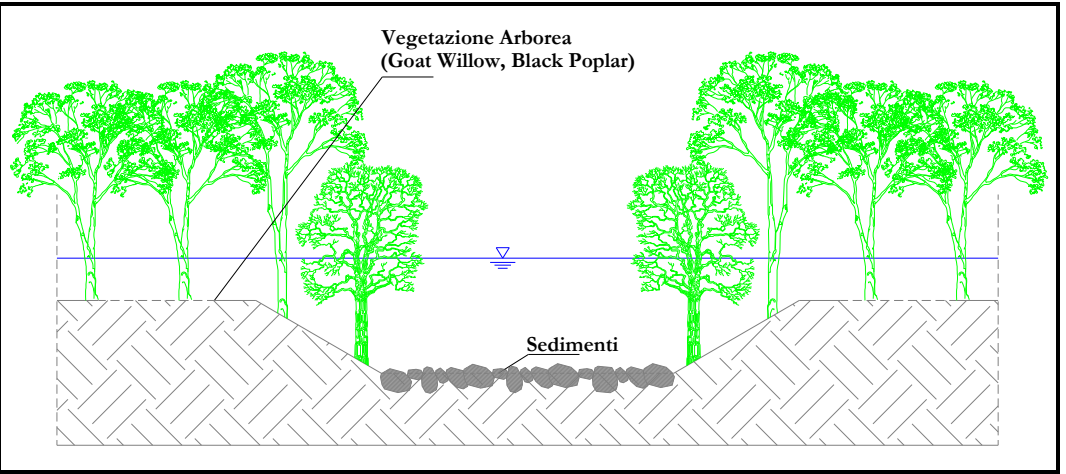
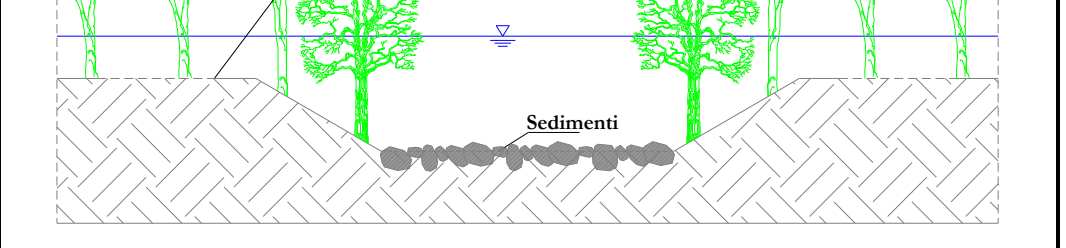


Figura 1.4 – Sezione composta di riferimento

Nella Figura 1.5 si mostra l'andamento, al variare del rapporto  $B_{\text{golena}}/B_{\text{alveo}}$ , del coefficiente di Manning relativo per un battente d'acqua  $Y=5$  m, per i primi cinque casi riportati in Tabella 1.2. Si noti il notevolissimo incremento di resistenza al moto associato ai canneti e salici.

| CASI DI STUDIO PER LA SEZIONE DI RIFERIMENTO COMPOSTA PER IL CONFRONTO DELLE SCALE DI DEFLUSSO |              |   |   |
|--|--------------|---|---|
| Casi   | Alveo Inciso | Sponde  | Schema sezione  |
| Caso 0   | Sedimenti    | Sedimenti<br>(formula di Strickler)                               |   |
| Caso 1   | Sedimenti    | Vegetazione erbacea di specie intermedia C<br>(modello Whitehead) |  |

|        |           |  |   |
|--------|-----------|--|---|
| Caso 2 | Sedimenti | Vegetazione arbustiva<br>canneto (reed – cattail)<br>(modello Baptist) |   |
| Caso 3 | Sedimenti | Vegetazione arborea<br>goat willows<br>(modello Järvelä,<br>LAI=3.2)   |  |
| Caso 4 | Sedimenti | Vegetazione arborea<br>black poplar<br>(modello Järvelä, LAI=3)        |  |

|               |  |   |  |
|---------------|--|---|--|
| <p>Caso 5</p> | <p>Vegetazione erbacea di specie intermedia C (Whitehead)</p>  | <p>Vegetazione erbacea di specie intermedia C (modello Whitehead)</p> |  |
| <p>Caso 6</p> | <p>Vegetazione arborea (Softwood Forest) (modello Baptist)</p> | <p>Vegetazione erbacea di specie intermedia C (modello Whitehead)</p> |  |

Tabella 1.2 – Casi di studio relativi alla sezione composta di riferimento per il confronto delle scale di deflusso

Nella Figura 1.6 vengono illustrate le scale di deflusso ottenute per le sette diverse configurazioni scelte per la sezione trapezia con aree golenali di riferimento. Le curve dimostrano come la variazione della vegetazione influenza significativamente la portata liquida in transito. Passando, per esempio, da una sezione vegetata solo su sponde e golene da erba di classe intermedia C ad una in cui sono presenti arbusti, la capacità di deflusso si riduce di circa il 50%; la situazione migliora lievemente nel caso in cui sulle sponde siano presenti delle specie arboree (salici e pioppi) dove la diminuzione si attesta intorno al 40 – 45%.

La situazione più critica, che era stata già evidenziata nella sezione compatta trapezia nel caso in cui la vegetazione arborea e/o arbustiva sia presente nell'alveo, si ripresenta anche nel caso della sezione con golene ma con una lieve attenuazione; la portata liquida smaltita subisce comunque una diminuzione del 55% andando ad allinearsi al caso di vegetazione arborea sulle sponde e sulle golene.

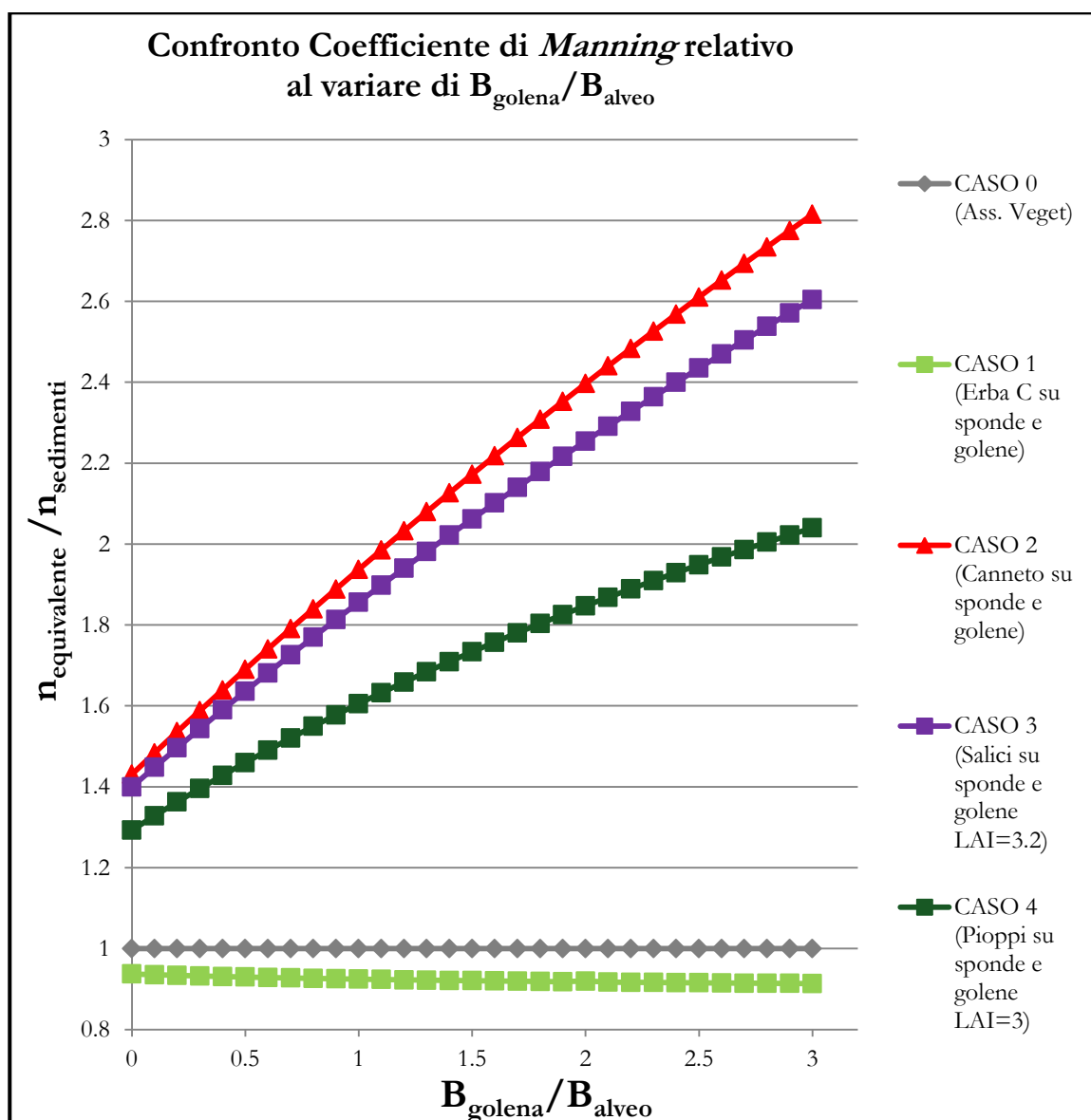


Figura 1.5 – Andamento del coefficiente di Manning equivalente relativo al variare del rapporto  $B_{golena}/B_{alveo}$  per i diversi casi analizzati

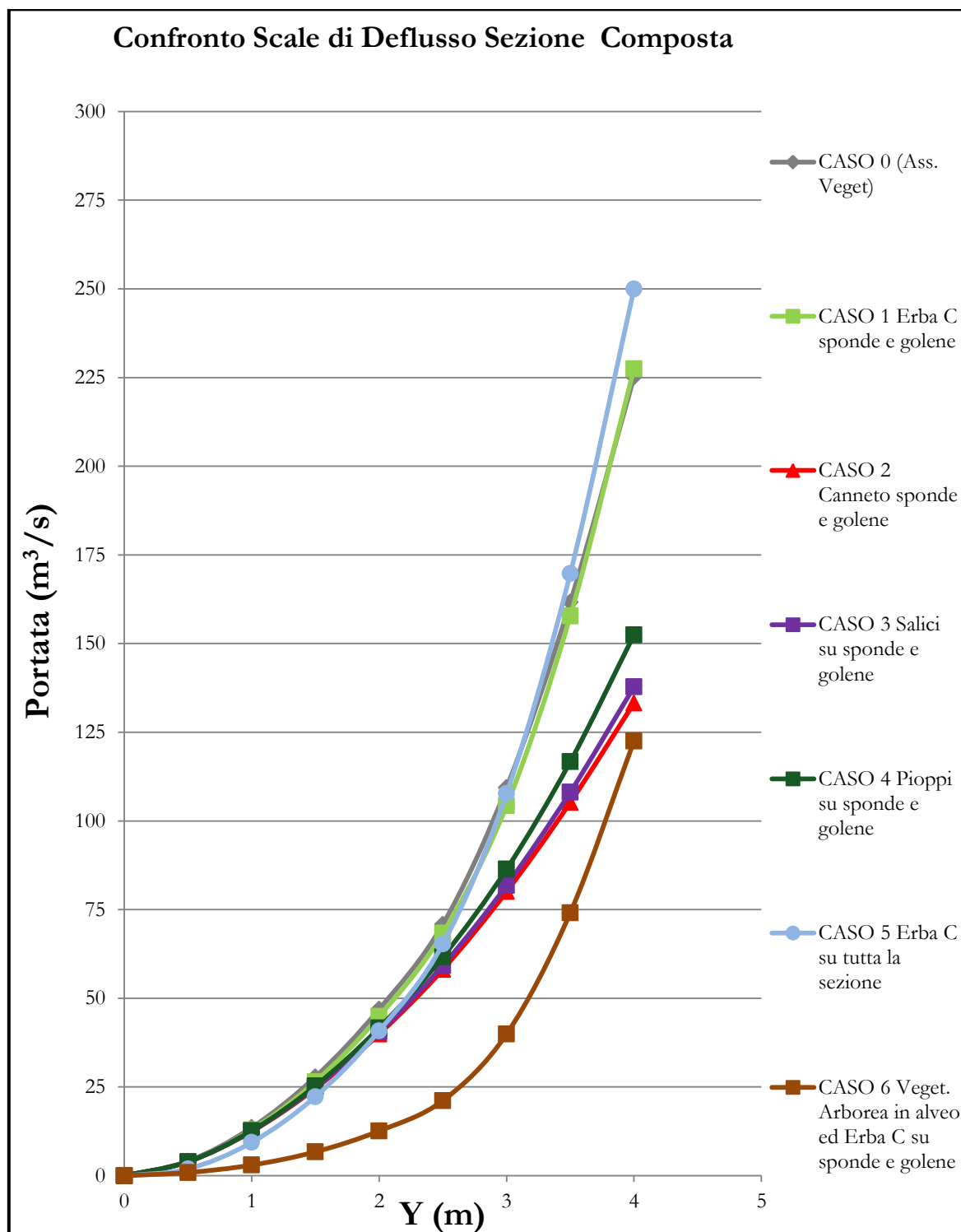


Figura 1.6 – Confronto finale delle scale di deflusso per i sette casi analizzate della sezione composta.

## **2. OCCLUSIONE DEGLI ATTRAVERSAMENTI DA PARTE DEI DETRITI LEGNOSI**

La dinamica del trasporto di detriti arborei nei corsi d'acqua è un fenomeno di rilevante importanza per la valutazione del rischio idraulico, in particolare modo in prossimità di infrastrutture e centri abitati. L'accumulo di detriti arborei in prossimità di ponti e restringimenti di sezione, comporta la riduzione della sezione utile al deflusso delle portate con conseguente rischio di esondazione.

La metodologia sviluppata nel presente lavoro, ai fini della valutazione dei rischi di occlusione delle luci dei ponti e delle sezioni derivanti dal trasporto nei corsi d'acqua di detriti arborei galleggianti, richiede la conoscenza delle dimensioni della vegetazione presente nei corsi d'acqua in esame, oltreché le dimensioni delle sezioni e delle luci dei ponti, e quantifica il livello di interferenza con le dimensioni delle sezioni fluviali.

A tal proposito sono state condotte delle prove sperimentali nel laboratorio di Idraulica del Dipartimento di Ingegneria Civile e Ambientale dell'Università di Firenze.

### **2.1 Le prove sperimentali**

Le prove sono finalizzate ad acquisire due tipologie di misure:

- Il numero di elementi transitanti/trattenuti.
- I livelli idrici a monte e a valle del restringimento.

Le prove sono state condotte in una canaletta rettilinea con pareti in Plexiglas (PMMA – Polimetilmetacrilato) avente lunghezza totale di 5.095 m, larghezza del canale principale 0.30 m e altezza delle sponde 0.18 m.

A distanza di 3.30 m dalla sezione di monte del canale è stato inserito un restringimento di sezione realizzato in plexiglass.



### Restringimento di sezione nel modello

Per valutare la percentuale di restringimento della sezione della canaletta sono state utilizzate le misure di larghezza di 901 sezioni fluviali e delle luci di 118 ponti relative ai corsi d'acqua dei bacini ricadenti all'interno del comprensorio del Consorzio di Bonifica dell'Area Fiorentina ricavando le larghezze medie (si veda il rapporto finale della convenzione con il DICEA del 2012). Dal rapporto tra la larghezza media della luce dei ponti e la larghezza media delle sezioni è stata determinata la percentuale di occlusione della sezione (Tabella 2.1).

*Tabella 2.1 Determinazione della percentuale di occlusione della sezione in canaletta.*

|                     | Sezioni | Luce ponti | % occlusione        |
|---------------------|---------|------------|---------------------|
| numero              | 901     | 118        | 41.74% ≈ <b>42%</b> |
| Larghezza media [m] | 16.72   | 9.74       |                     |

### Classi di tronchi d'albero riprodotte nel modello

Sulla base dei campionamenti per la caratterizzazione della vegetazione forniti dal Consorzio di Bonifica dell'Area Fiorentina nell'area del comprensorio, sono state individuate tre classi di tronchi in base al diametro, alla lunghezza e alla percentuale di diffusione sul territorio.

Le misure sono state scalate nel modello come riportato in Tabella 2.1.

*Tabella 2.2 Classificazione dei tronchi d'albero e confronto misure nel reale e nel modello*

| classe                                     | MISURE REALI |        | MISURE MODELLO |        | Colore bastoncini di legno |
|--|--------------|--------|----------------|--------|----------------------------|
|  | L tronco [m] | D [cm] | L tronco [cm]  | φ [mm] |                            |
| 1 ( $L_{\text{tronco}} < L_{\text{sez}}$ ) | 5-11         | 5-10   | 10             | 2      | rosso                      |
| 2 ( $L_{\text{tronco}} = L_{\text{sez}}$ ) | 14-16        | 15-20  | 17             | 4      | giallo                     |
| 3 ( $L_{\text{tronco}} > L_{\text{sez}}$ ) | 17-20        | 25-35  | 20             | 6      | verde                      |

### Materiale utilizzato per riprodurre i tronchi

Il materiale utilizzato per riprodurre i tronchi d'albero in canale è il legno di faggio, scelto per la sua densità e durabilità (intesa come la capacità del legno di conservare le proprie caratteristiche di resistenza nel tempo) (Welber, 2013).

### Percentuali di legnetti immessi in canaletta

La quantità di legnetti da immettere in canale nel corso di ciascuna prova è stata stabilita in base alla percentuale di presenza delle specie arboree sul territorio e alla composizione degli accumuli di detriti arborei in alveo (Kramer, 2013 – in review ESPL).

*Tabella 2.3 Percentuali di elementi appartenenti a ciascuna classe immessi nella canaletta durante le prove*

| classe                                     | % di presenza |
|--|---------------|
| 1 ( $L_{\text{tronco}} < L_{\text{sez}}$ ) | 83            |
| 2 ( $L_{\text{tronco}} = L_{\text{sez}}$ ) | 13            |
| 3 ( $L_{\text{tronco}} > L_{\text{sez}}$ ) | 4             |

Il caso riprodotto nelle simulazioni è quello di trasporto solido di detriti arborei di tipo “congested”, vale a dire il caso in cui il rapporto tra portata di tronchi in input e portata liquida è piuttosto alto.

### Condizioni idrauliche

La portata di riferimento e le condizioni al contorno sono state stabilite dopo una serie di prove effettuate in canaletta allo scopo di verificare che la portata circolante fosse tale per cui il livello medio di tirante idrico corrispondesse a circa 2/3 dell'altezza della sezione, rispettando così la condizione di incipiente movimento per i detriti arborei (MacVicar and Piegay, 2012), e in modo tale che la corrente fosse indisturbata e che l'assetto

idrometrico della corrente a monte e a valle non risentisse particolarmente della presenza del restringimento.

Per avere un riscontro tra il modello fisico e quello numerico, la geometria della canaletta di laboratorio è stata importata in HEC-RAS.

*Tabella 2.4 Parametri utilizzati nella simulazione con HEC-RAS e nelle prove in canaletta.*

| Portata<br>Q[m <sup>3</sup> /s] | Coefficiente<br>di Manning<br>alveo<br>[s/m <sup>1/3</sup> ] | Coefficiente<br>di Manning<br>sponde [s/m <sup>1/3</sup> ] | Condizione<br>al contorno<br>di monte | Condizione<br>al contorno<br>di valle | Apertura<br>paratoia<br>a valle<br>[cm] |
|---------------------------------|--|--|---------------------------------------|---------------------------------------|---|
| 0.0174                          | 0.015  | 0.01   | Normal<br>depth<br>(0.001)            | Y <sub>v</sub> = 0.07 m               | 0.5                                     |

### Set di prove

Il primo set di prove è T1 è costituito da 5 prove per ciascuna delle quali è stato fissato un tempo di campionamento pari a 180 s e un tempo di acquisizione pari a 20 s.

Si riportano nelle Tabella 2.5 Tabella 2.6 le caratteristiche e i parametri utilizzati in ciascuna prova:

*Tabella 2.5 Parametri e caratteristiche di ciascuna prova*

| <b>set prove T1</b> |             |                                     |                              |                                 |  |                    |
|---------------------|-------------|-------------------------------------|------------------------------|---------------------------------|--|--------------------|
| <b>N°<br/>prova</b> | <b>data</b> | <b>tipologia<br/>restringimento</b> | <b>upstream<br/>BC</b>       | <b>downstream<br/>BC Y [cm]</b> | <b>apertura<br/>paratoia a<br/>valle</b> | <b>Q<br/>[l/s]</b> |
| 1                   | 23/1/14     | restringimento<br>di sezione        | normal<br>depth<br>(i=0.001) | 6,6 - 6,8                       | h= 0.5 cm                                | 1.74               |
| 2                   | 23/1/14     | restringimento<br>di sezione        | normal<br>depth<br>(i=0.001) | 6,6 - 6,8                       | h= 0.5 cm                                | 1.74               |

|   |         |                           |                        |           |           |      |
|---|---------|---------------------------|------------------------|-----------|-----------|------|
| 3 | 23/1/14 | restringimento di sezione | normal depth (i=0.001) | 6,6 - 6,8 | h= 0.5 cm | 1.74 |
| 4 | 23/1/14 | restringimento di sezione | normal depth (i=0.001) | 6,6 - 6,8 | h= 0.5 cm | 1.74 |
| 5 | 23/1/14 | restringimento di sezione | normal depth (i=0.001) | 6,6 - 6,8 | h= 0.5 cm | 1.74 |

*Tabella 2.6 Parametri e caratteristiche di ciascuna prova*

| set prove T1 |                           |                                     |                            |                           |        |       |                    |        |       |                                     |
|--------------|---------------------------|-------------------------------------|----------------------------|---------------------------|--------|-------|--------------------|--------|-------|-------------------------------------|
| N° prova     | tempo di acquisizione [s] | Numero di dati acquisiti al secondo | N° impulsi gruppi legnetti | N° elementi di un impulso |        |       | N° elementi totale |        |       | frequenza immissione legnetti [1/s] |
|              |                           |                                     |                            | rossi                     | gialli | verdi | rossi              | gialli | verdi |                                     |
| 1            | 180                       | 20                                  | 5                          | 20                        | 3      | 2     | 100                | 15     | 10    | 1gruppo/20s                         |
| 2            | 180                       | 20                                  | 5                          | 20                        | 3      | 2     | 100                | 15     | 10    | 1gruppo/20s                         |
| 3            | 180                       | 20                                  | 5                          | 20                        | 3      | 2     | 100                | 15     | 10    | 1gruppo/20s                         |
| 4            | 180                       | 20                                  | 5                          | 20                        | 3      | 2     | 100                | 15     | 10    | 1gruppo/20s                         |
| 5            | 180                       | 20                                  | 5                          | 20                        | 3      | 2     | 100                | 15     | 10    | 1gruppo/20s                         |

## 2.2 Risultati sperimentali

Sulla base dello studio condotto da Betti et al. (2006) si sono determinati i seguenti parametri:

- il coefficiente di cattura  $C_c$  espresso come rapporto tra il numero di elementi transitati e il numero di elementi catturati.
- il coefficiente di presenza (o frequenza di transito)  $C_p$  espresso come il rapporto tra il numero di elementi transitati per classe e il numero di elementi transitati totali.
- l'indice di attitudine alla cattura come rapporto tra  $C_c$  e  $C_p$

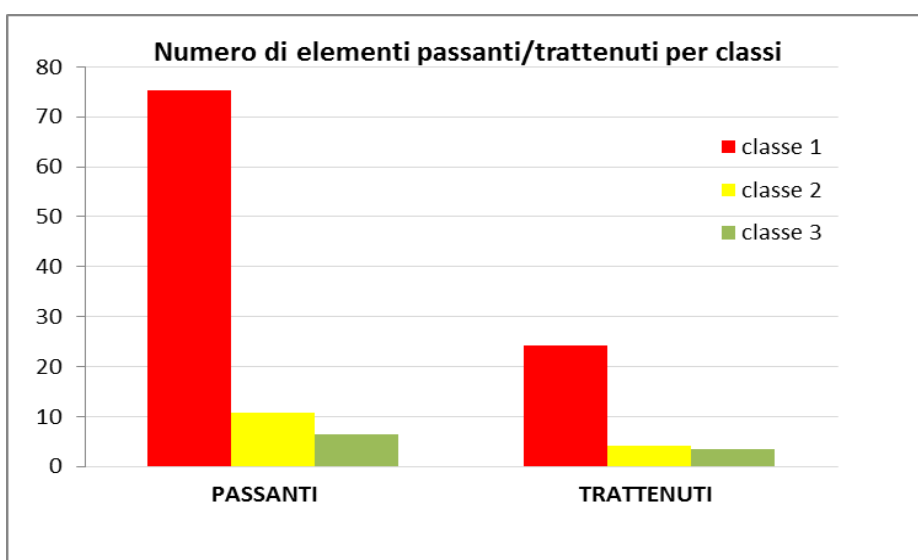


Figura 2.1 Numero medio di elementi passanti/trattenuti per classi per il set di prove T1

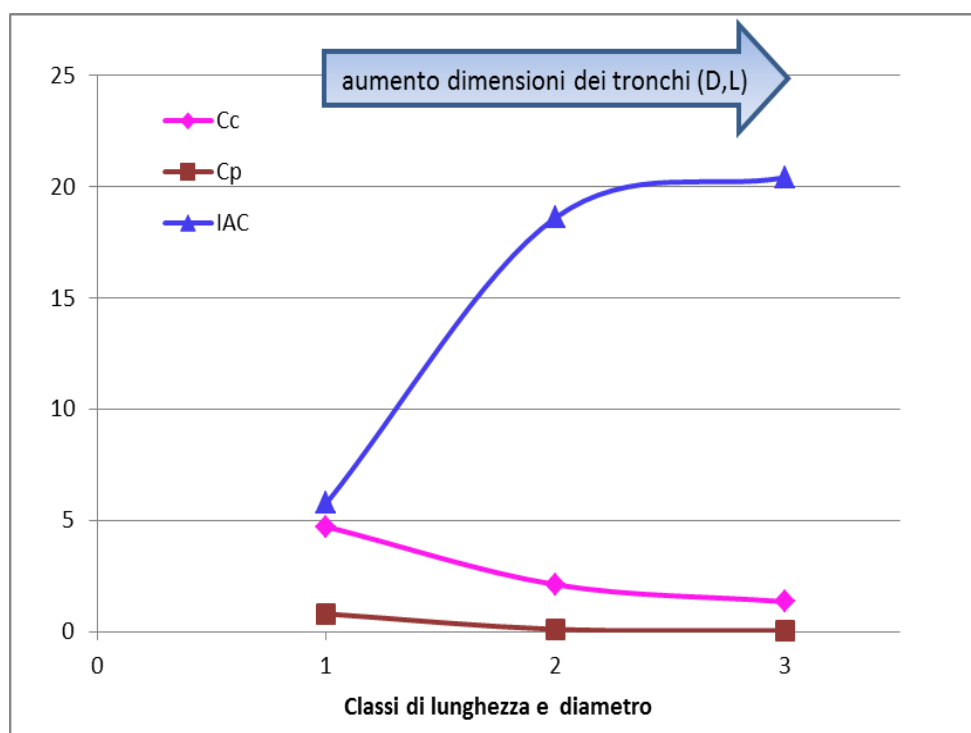


Figura 2.2 Confronto tra gli andamenti del coefficiente medio di cattura, del coefficiente medio di presenza e dell'indice di attitudine alla cattura medio al variare della classe di lunghezza e diametro dei legnetti.

Dalla Figura 2.2 si osserva che il valore del coefficiente di cattura e del coefficiente di presenza aumentano al diminuire delle dimensioni dei detriti arborei.

Se si osserva invece l'indice di attitudine alla cattura, questo sembra evidenziare l'esistenza di una classe di lunghezza e diametro dei tronchi più propensa alla cattura rispetto ad altre. I detriti arborei "privilegiati" alla cattura sono quelli con diametro maggiore e lunghezza maggiore della larghezza dell'ostruzione tali da essere definiti elementi "chiave", responsabili dell'innescio del fenomeno di occlusione, che nel caso in esame coincidono con gli alberi aventi diametro pari a 25-35 cm e lunghezza pari a 17-20 m.

Questa classe è presente nelle fasce ripariali dei bacini tributari dell'Arno ricadenti all'interno del comprensorio del Consorzio di Bonifica dell'Area Fiorentina solo per il 9% (come emerge dallo studio condotto dal Dipartimento

di Ingegneria Civile e Ambientale dell'Università di Firenze in convenzione con il Consorzio di Bonifica dell'Area Fiorentina, 2012), ma se si considera che la larghezza media delle sezioni nella stessa area è di circa 17 metri e i ponti hanno una luce media di 8 metri, l'indice di rischio che deriva dalla sovrapposizione tra la curva di distribuzione della larghezza delle sezioni e la curva di distribuzione della lunghezza dei tronchi, è medio-alto.

La presenza di un'ostruzione può incidere considerevolmente sui livelli idrici, in particolar modo si è osservato un fenomeno di innalzamento dei livelli a monte del restringimento, e abbassamento dei livelli a valle (nella Figura 2.3 si riporta a titolo di esempio il confronto tra i livelli prima e dopo la simulazione per la prova 3). Questo dislivello è più accentuato all'aumentare del volume di materiale che si accumula in prossimità del restringimento.

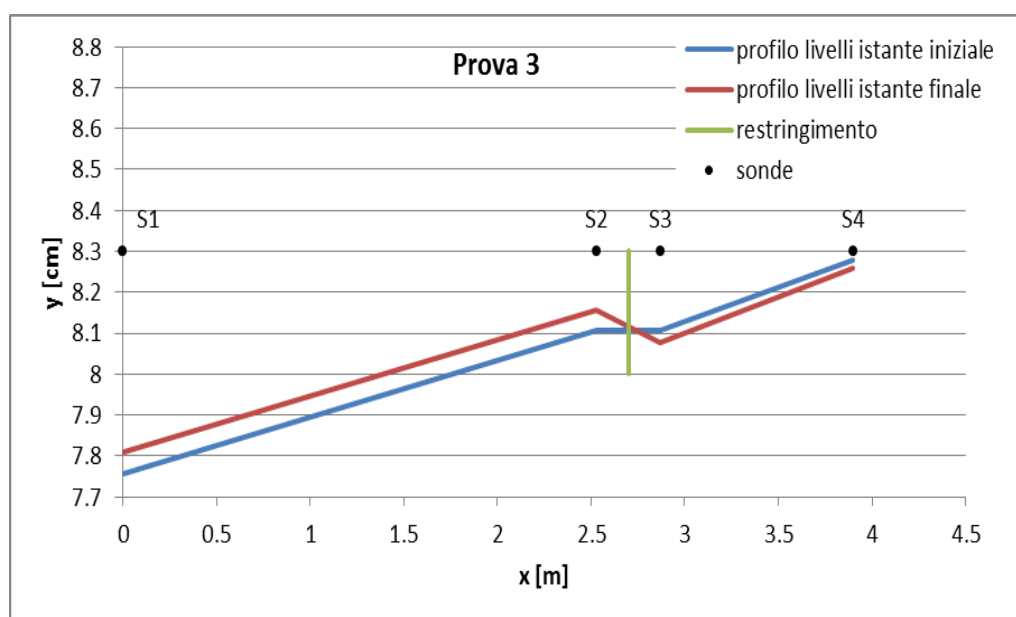


Figura 2.3 Confronto tra profili idrici prima e dopo la simulazione per la prova 3