

UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI MILANO FACOLTÀ DI SCIENZE AGRARIE E ALIMENTARI

CORSO DI LAUREA TRIENNALE IN VALORIZZAZIONE E TUTELA DELL'AMBIENTE E DEL TERRITORIO MONTANO

Tesi di Laurea Triennale

La flessibilità e le caratteristiche geometriche della vegetazione arbustiva ripariale: il caso studio del salice bianco in stadio giovanile

Candidato:

Relatore:

Prof. Alessio Cislaghi

Soardi Alessandro

Matricola Nr. :

949070

Anno Accademico 2022/2023

SOMMARIO

Il tirocinio si è svolto nell'ambito scientifico della idrogeomorfologia fluviale. In particolare, si è focalizzato sullo studio dell'effetto della vegetazione in alveo lungo corsi d'acqua naturali. La vegetazione ripariale lungo i corsi d'acqua ha da sempre rilevante importanza sotto molti aspetti:

- ecologia e biodiversità mediante la produzione di opere di stabilizzazione delle sponde, la creazione di fasce tampone con funzione di biofiltro;
- paesaggistica mediante la ricostituzione di habitat ad elevato valore naturalistico, grazie all'implemento delle tecniche riguardanti l'ingegneria naturalistica;
- idraulica determinante vari effetti sulle caratteristiche geometriche e idrologiche dei corsi d'acqua naturali.

Lungo i corsi d'acqua, la presenza di vegetazione costituisce un elemento che va ad aumentare le resistenze al moto, riducendone la velocità di deflusso e di conseguenza ne aumenta il tirante idrico. L'effetto della presenza delle piante sull'idraulica del corso d'acqua non è tuttavia costante e dipende oltre che dalle caratteristiche proprie della vegetazione anche da quelle della corrente idraulica. Per approfondire tale argomento, risulta necessaria l'analisi delle interazioni tra vegetazione flessibile e deflusso in alveo è stata già affrontata da molteplici autori a scala locale. In questo contesto, il tirocinio ha permesso un'analisi specifica su una specie ripariale molto comune nel territorio lombardo, ed in particolar modo, sul suo stadio giovanile (di inizio colonizzazione): il salice bianco o Salix alba. Lo studio è consistito nel campionare trenta individui presso i siti di Breno e Grosotto sul fiume Adda e di Palazzolo sull'Oglio, Urago d'Oglio, Soncino e Bompensiero sul fiume Oglio. Per ogni individuo, sono state fatte alcune misure delle caratteristiche geometriche e biomeccaniche. Per le caratteristiche geometriche sono stati raccolti dati relativi al diametro del fusto, all'altezza della pianta, all'altezza dell'intersezione della chioma e alla larghezza della chioma, mentre per quelle biomeccaniche è stata misurata la forza di resistenza alla trazione.

Tali dati hanno permesso di produrre dei modelli empirici di crescita sia delle caratteristiche geometriche che di quelle biomeccaniche. Infine, un'accurata analisi statistica ha permesso di rilevare la possibilità di una formulazione empirica universale, o almeno unica per i casi di studio, per questa specie ripariale arbustiva allo stadio giovanile.

1.	Introduzione	. 6
1.1.	Correnti a superficie libera	. 6
1.2.	Caratteristiche geometriche di una corrente a pelo libero	. 7
1.3.	Sezioni trasversali	. 9
1.3.1	1. Sezione rettangolare	10
1.3.2	2. Sezione trapezoidale	12
1.3.3	3. Canali a sezione irregolare	14
1.4.	Pendenza dell'alveo	16
1.5.	Corrente in moto uniforme	18
1.6.	Coefficiente di scabrezza in alvei a scabrezza eterogenea e alvei compositi	22
1.7.	Scabrezza indotta dalla presenza di vegetazione	26
1.8.	Vegetazione completamente sommersa	28
1.9.	Vegetazione parzialmente sommersa	33
•		_
2.	Objettivi dello studio	37
2. 3.	Obiettivi dello studio 3 Materiali e metodi 3	37 38
2. 3. 3.1.	Objettivi dello studio 3 Materiali e metodi 3 Il salice bianco 3	37 38 38
2. 3. 3.1. 3.2.	Obiettivi dello studio 3 Materiali e metodi 3 Il salice bianco 3 Misura e stima evolutiva delle caratteristiche geometriche delle piante 4	37 38 38 41
2. 3. 3.1. 3.2. 3.3.	Objettivi dello studio 3 Materiali e metodi 3 Il salice bianco 3 Misura e stima evolutiva delle caratteristiche geometriche delle piante 4 Stima delle proprietà biomeccaniche delle piante 4	37 38 38 41 43
2. 3. 3.1. 3.2. 3.3. 3.4.	Objettivi dello studio 3 Materiali e metodi 3 Il salice bianco 3 Misura e stima evolutiva delle caratteristiche geometriche delle piante 4 Stima delle proprietà biomeccaniche delle piante 4 Analisi statistica 4	37 38 38 41 43 47
2. 3. 3.1. 3.2. 3.3. 3.4. 3.5.	Obiettivi dello studio 3 Materiali e metodi 3 Il salice bianco 3 Misura e stima evolutiva delle caratteristiche geometriche delle piante 4 Stima delle proprietà biomeccaniche delle piante 4 Analisi statistica 4 Siti di studio 4	 37 38 38 41 43 47 49
2. 3. 3.1. 3.2. 3.3. 3.4. 3.5. 4.	Objettivi dello studio 3 Materiali e metodi 3 Il salice bianco 3 Misura e stima evolutiva delle caratteristiche geometriche delle piante 4 Stima delle proprietà biomeccaniche delle piante 4 Analisi statistica 4 Siti di studio 4 Risultati e discussione 5	 37 38 38 41 43 47 49 56
2. 3. 3.1. 3.2. 3.3. 3.4. 3.5. 4. 4.1.	Objettivi dello studio 3 Materiali e metodi 3 Il salice bianco 3 Misura e stima evolutiva delle caratteristiche geometriche delle piante 4 Stima delle proprietà biomeccaniche delle piante 4 Analisi statistica 4 Siti di studio 4 Risultati e discussione 5 Risultati delle prove geometriche 4	37 38 38 41 43 47 49 56 56
2. 3. 3.1. 3.2. 3.3. 3.4. 3.5. 4. 4.1. 4.2.	Objettivi dello studio 3 Materiali e metodi 3 Il salice bianco 3 Misura e stima evolutiva delle caratteristiche geometriche delle piante 4 Stima delle proprietà biomeccaniche delle piante 4 Analisi statistica 4 Siti di studio 4 Risultati e discussione 5 Risultati delle prove geometriche 4 Risultati delle caratteristiche biomeccaniche 4	37 38 38 41 43 47 49 56 56 67
2. 3. 3.1. 3.2. 3.3. 3.4. 3.5. 4. 4.1. 4.2. 4.3.	Objettivi dello studio 3 Materiali e metodi 3 Il salice bianco 3 Misura e stima evolutiva delle caratteristiche geometriche delle piante 3 Stima delle proprietà biomeccaniche delle piante 4 Analisi statistica 4 Siti di studio 4 Risultati e discussione 5 Risultati delle prove geometriche 4 Risultati delle caratteristiche biomeccaniche 4 Risultati delle caratteristiche biomeccaniche 4 Risultati delle prove geometriche 4 Risultati delle caratteristiche biomeccaniche 4 Risultati delle caratteristiche biomeccaniche 4 Risultati analisi della varianza ANOVA 5	 37 38 38 41 43 47 49 56 56 67 71
2. 3. 3.1. 3.2. 3.3. 3.4. 3.5. 4. 4.1. 4.2. 4.3. 4.4.	Objettivi dello studio 2 Materiali e metodi 2 Il salice bianco 2 Misura e stima evolutiva delle caratteristiche geometriche delle piante 2 Stima delle proprietà biomeccaniche delle piante 2 Analisi statistica 2 Siti di studio 2 Risultati e discussione 2 Risultati delle prove geometriche 2 Risultati delle caratteristiche biomeccaniche 2 Risultati delle caratteristiche biomeccaniche 2 Risultati delle prove geometriche 2 Risultati delle caratteristiche biomeccaniche 2 Risultati delle caratteristiche biomeccaniche 2 Discussione 3	 37 38 38 41 43 47 49 56 56 67 71 73

1. Introduzione

1.1. Correnti a superficie libera

Le correnti a superficie libera rappresentano il movimento (o moto) di fluidi attraverso un canale aperto dove una parte del contorno si trova a contatto con l'atmosfera. La superficie a contatto con l'atmosfera viene definita superficie a pelo libero, e quindi soggetta alla pressione atmosferica.

Una prima classificazione delle correnti a superficie libera può essere la distinzione tra le correnti in canali naturali da quelle in canali artificiali:

- i *canali naturali* ossia tutti i corsi d'acqua esistenti in natura, caratterizzati da una geometria irregolare e variabile nel tempo, generata dall'azione della corrente che mette in movimento il materiale sul fondo;
- i *canali artificiali* che, nella maggior parte dei casi, hanno una geometria regolare e costante nel tempo. Le sezioni sono riconducibili a forme geometriche semplici che si mantengono invariate lungo tutto il canale.

L'analisi matematica delle correnti a superficie libera è un campo relativamente recente. Uno dei primi sviluppi significativi in questo campo è stato il lavoro del matematico francese Jean-Baptiste Joseph Fourier, che ha sviluppato un'equazione matematica per descrivere la propagazione delle onde sulle superfici libere dell'acqua. Successivamente, altri matematici, tra cui Antoine Chézy e Pierre-Simon Laplace, hanno sviluppato ulteriormente le equazioni di Fourier e hanno iniziato a studiare le correnti in canali aperti.

Gli studi delle correnti di corsi d'acqua naturali sono più complessi rispetto a quelli di correnti in corsi d'acqua artificiali, a causa della continua variazione dell'andamento planimetrico e altimetrico, della geometria della sezione dell'alveo che varia lungo la loro lunghezza. Il materiale sul fondo è variabile: ciottoli, sabbia, scogliere e nell'alveo può essere presente vegetazione di varia tipologia, con la conseguenza che la scabrezza di fondo risulta molto variabile.

1.2. Caratteristiche geometriche di una corrente a pelo libero

Le caratteristiche geometriche della sezione delle correnti a pelo libero cambiano all'aumentare del livello del fluido, tali caratteristiche sono differenti rispetto alle correnti a pressione, dove il fluido occupa l'intera sezione e risulta quindi soggetto a pressioni differenti da quelle esterne (i.e., pressione atmosferica).

Date le geometrie della sezione geometrica trasversale, si definiscono le seguenti grandezze geometriche:

- *Tirante idrico (h)*: è la distanza tra la superficie libera e la linea di fondo (unione dei punti di massima depressione). Si esprime in metri.
- *Area bagnata (A)*: è l'area della sezione della corrente, ovvero l'area della sezione dell'alveo effettivamente occupata dall'acqua. Si esprime in metri al quadrato.
- *Contorno bagnato (P)*: è il perimetro della sezione dell'alveo a contatto con l'acqua, ovvero la lunghezza della sezione bagnata escluso il tratto della superficie libera. Si esprime in metri.
- *Larghezza superficiale (L)*: è la larghezza della sezione della corrente rispetto alla superfice libera. Si esprime in metri.
- *Raggio idraulico (R):* è il rapporto tra l'area bagnata e il contorno bagnato (Equazione 1). Si esprime in metri:

$$R = \frac{A}{P}$$
[1]



Figura 1 Rappresentazione caratteristiche geometriche della sezione. "*h*": tirante idrico; "C": contorno bagnato; "A": area bagnata; "B": larghezza superficiale; "h_m": profondità media. (Gallati e Sibilla, 2009).

1.3. Sezioni trasversali

In natura, le sezioni trasversali di correnti a superficie libera possiedono geometrie molto complesse. Tali geometrie possono variare in base alle variazioni altimetriche e planimetriche, ai differenti materiali con cui sono formate e alle varie forze a cui sono soggette. Il materiale di fondo e dei versanti può essere composto da sabbia, ciottoli e scogliere, che grazie all'azione della corrente si possono generare dei sollevamenti di materiale dal fondo o dell'erosione di materiale dalle sponde. Anche la vegetazione influisce sulla scabrezza del fondo, rendendola irregolare e variabile lungo le stagioni.

Si possono rappresentare, attraverso una semplificazione, principalmente in canali a sezione trasversale rettangolare o trapezoidale.

1.3.1. Sezione rettangolare

La sezione della corrente rettangolare presenta una geometria riconducibile ad un rettangolo, di altezza pari al tirante idrico h e di larghezza pari alla larghezza B (*figura* 2).



Figura 2. Rappresentazione di un canale rettangolare. "*h*": tirante idrico; "C": contorno bagnato; "A": area bagnata; "B": larghezza superficiale (Gallati e Sibilla, 2009).

L'area bagnata si calcola come:

$$\mathbf{A} = \mathbf{B} \, h \tag{2}$$

Il contorno bagnato è calcolato come:

$$C = B + 2h$$
 [3]

Il raggio idraulico si ottiene:

$$R = \frac{B h}{B + 2h}$$
[4]

E dove h è valutato come il tirante idrico sulla larghezza della sezione:

$$\mathbf{h}_{\mathrm{m}} = h \tag{5}$$

Tale semplificazione è spesso accettata per canali artificiali molto larghi o tratti regolari di fiumi.

1.3.2. Sezione trapezoidale

La sezione trapezoidale della corrente ha la forma di un trapezio isoscele, di altezza pari al tirante idrico h e base minore b uguale alla larghezza del fondo dell'alveo (*figura 3*).



Figura 3 Rappresentazione di un canale trapezoidale. "h": tirante idrico; "C": contorno bagnato; "A": area bagnata; "B": larghezza superficiale; "b": larghezza fondo dell'alveo; "β": angolo di sponda; "1:z": pendenza delle sponde. (Gallati e Sibilla, 2009).

L'inclinazione delle sponde è identificata dall'angolo β ovvero $z = tan \beta$.

La larghezza superficiale risulta:

$$B = b + 2h \tan = b + 2h z$$
[6]

Dove *b* è la larghezza fondo dell'alveo; *h* tan β è la misura della proiezione di *a* su B e, ponendo *tan* $\beta=z$, si ottiene *hz*.

L'area bagnata è data da:

$$A = \frac{h}{2} (B + b) = h(b + h \tan \beta) = h(b + h z)$$
[7]

Il contorno bagnato:

$$C = b + 2\frac{h}{\cos\beta} = b + 2h\sqrt{1 + z^2}$$
[8]

Dove *b* è la larghezza di fondo, $2\frac{h}{\cos\beta}$ è *a*.

Il raggio idraulico per definizione è il rapporto tra l'area bagnata A e il contorno bagnato C, pertanto si ottiene:

$$R = \frac{A}{C} = \frac{h(b+hz)}{b+2h\sqrt{1+z^2}}$$
[9]

La profondità media si ottiene dal rapporto tra l'area bagnata A e la larghezza superficiale B:

$$h_{\rm m} = \frac{A}{B} = \frac{h\left(b+hz\right)}{b+2hz}$$
[10]

Dove h_m è il tirante idrico valutato sulla larghezza della sezione.

1.3.3. Canali a sezione irregolare

Tuttavia, i canali naturali hanno in generale una sezione di geometria non è riconducibile a una figura geometrica semplice. In questo caso, la geometria della sezione può essere definita con formule matematiche: il profilo della sezione è dato per punti, misurando la quota del fondo rispetto a un riferimento fissato a distanze note da una delle sponde.

Le proprietà della sezione della corrente possono essere ottenute definendo innanzitutto la quota z_L della superficie libera, identificando gli *n* punti sommersi per cui $z < z_L$ e aggiungendo i due puti di sponda 0 e *n*+1 alla quota z_L (*figura 4*).



Figura 4 Rappresentazione geometrica di un canale a sezione irregolare (Gallati e Sibilla, 2009)

Il contorno della sezione risulta quindi definito da una linea spezzata, composta da un insieme di punti P di coordinate (x_p, z_p) note, che approssima in modo discreto il contorno reale.

Dalla definizione di tirante idrico, si ottiene:

$$h = \max h_i = \max (z_L - z_i)$$
[11]

Con h_i tirante idrico in m del punto e h_i = z_L - z_i affondamento del punto al di sotto del pelo libero in m.

Le verticali congiungenti i punti sul fondo con il pelo libero suddividono la sezione in n+1 trapezi, il generico trapezio *i*-esimo ha area:

$$A_{i} = \frac{1}{2}(h_{i} + h_{i-1})(x_{i} - x_{i-1})$$
[12]

e lato:

$$C_i = \sqrt{(h_i - h_{i-1})^2 + (x_i - x_{i-1})^2}$$
[13]

Le proprietà geometriche della sezione composta si ottengono come somma dei contributi degli n+1 trapezi:

$$A = \sum_{i=1}^{n+1} A_i$$
 [14]

$$C = \sum_{i=1}^{n+1} C_i$$
 [15]

$$B = x_{n+1} - x_0$$
 [16]

Il raggio idraulico e la profondità media si ottengono da equazioni.

1.4. Pendenza dell'alveo

Il flusso in una corrente a pelo libero è determinato anche dall'andamento altimetrico dell'alveo. Se si considera due sezioni 1 e 2, poste a distanza Δx lungo l'alveo, i cui punti più profondi P₁ e P₂ si trovano rispettivamente a quota z_1 e z_2 , si definisce pendenza del tratto di canale il rapporto:

$$i = \frac{z_1 - z_2}{\Delta x} = \tan \alpha$$
[17]

Dove α è l'angolo formato dalla retta cui giacciono i punti P₁ e P₂ e l'orizzontale (*figura* 5):



Figura 5 Rappresentazione pendenza dell'alveo (Gallati e Sibilla, 2009)

Gli alvei artificiali sono caratterizzati da lunghi tratti a pendenza costante, mentre per quelli naturali è possibile definire una pendenza media approssimativa, valutando il dislivello su lunghe tratte. Riferendosi alla figura 6, si noti che la distanza ΔL tra le sezioni di monte e valle del tratto considerato differisce in modo significativo dalla sua proiezione dal piano orizzontale $\Delta x = \Delta L \cos \alpha$ solo per pendenze molto elevate.

Le stesse considerazioni possono essere svolte per le sezioni della corrente; per quanto la sezione della corrente non coincide con una sezione verticale, lo scostamento tra le due è trascurabile, tranne per alvei con pendenze elevate.

1.5. Corrente in moto uniforme

Le traiettorie delle particelle di un fluido in moto uniforme sono rettilinee e parallele, la velocità delle particelle liquide rimane costante lungo le loro traiettorie.

Di conseguenza, la sezione di una corrente uniforme si mantiene costante longitudinalmente, condizione necessaria perché ciò avvenga che l'alveo sia prismatico.

Dato che le particelle sono rettilinee e parallele si ha che per ogni sezione S, il cui fondo si trova alla quota z, è possibile individuare una quota piezometrica. Dopo aver stabilito che la pressione sul fondo del canale risulta essere uguale a γ h, la quota piezometrica relativa alla sezione S è pari a z + h. La linea della quota piezometrica coincide con la linea della superficie libera ed è parallela al fondo dell'alveo.

Il carico totale *H* relativo alla sezione S si calcola:

$$H = z + h + \frac{V^2}{2g} \tag{18}$$

Dove z è la quota geometrica in m, h è il tirante idrico in m, V è la velocità in m/s e g è l'accelerazione gravitazionale in m/s². Con la velocità costante lungo x, risultano costanti anche l'altezza cinetica e il carico totale. La linea dei carichi totali è quindi parallela a quella piezometrica.

Il moto uniforme in un alveo prismatico è caratterizzato dall'avere le pendenze del fondo con quella delle linee dei carichi totali uguali, quindi:

$$i = J \tag{19}$$

Dove *J* rappresenta la cadente, ovvero la perdita di energia meccanica per unità di peso per unità di lunghezza della corrente, quest'ultima misurata in metri secondo l'equazione di Bernoulli.

La formula prima citata (Formula 19) può essere riformulata anche come:

$$\frac{dH}{dx} = \frac{dz}{dx}$$
[20]

La cadente J è una grandezza adimensionale, poiché è il rapporto tra l'energia del fluido e l'ascissa curvilinea della sezione. La H corrisponde al carico totale, ovvero l'energia meccanica totale per unità di peso, mentre la z è l'energia potenziale gravitazionale per unità di peso. Nel moto uniforme, introducendo la cadente J, tutta l'energia generata dalla diminuzione di quota dell'alveo viene dissipata per vincere la resistenza di attrito opposta dall'alveo. Negli alvei naturali si ha raramente un moto uniforme, anche se, viene adottato per il calcolo della relazione tra la portata e il tirante idrico.

La cadente J è funzione della portata Q [m³] e delle proprietà geometriche della corrente, dalla (Formula 19) si ottiene una relazione tra la portata e il tirante idrico in condizioni di moto uniforme (h_0), detta scala delle portate:

$$Q = f(h_0) \tag{21}$$

Una corrente a superficie libera in un alveo naturale o artificiale scorre in condizioni di moto turbolento, dato che: la scabrezza del fondo e delle sponde è elevata a causa della presenza di ciottoli, vegetazione e da irregolarità geometriche di varia natura e a causa dell'elevato numero di Reynolds le forze d'inerzia sono superiori a quelle viscose. Il numero di Reynolds viene calcolato conoscendo la velocità media (V), il tirante idrico (h) e l'altezza media di fondo in ciottoli:

$$Re = \frac{V h}{v}$$
[22]

Quindi la cadente J è facilmente calcolabile mediante l'utilizzo della formula di Chézy:

$$J = \frac{V^2}{X^2 R}$$
[23]

Dove V^2 corrisponde alla velocità della corrente, X^2 è il coefficiente di scabrezza di Gauckler-Stickler ed *R* è il raggio idraulico della sezione presa in considerazione. Per il calcolo del coefficiente di scabrezza (χ) viene usata la formula di Gauckler-Stickler:

$$\chi = K_s R^{\frac{1}{6}}$$
 [24]

Dove K_s è il coefficiente di Gauckler-Stickler in m^{1/3}/s ed R è il raggio idraulico della sezione in m.

oppure quella di Manning:

$$\chi = \frac{1}{n} R^{\frac{1}{6}}$$
 [25]

Il parametro adimensionale n è definito in base alla natura e alle condizioni del materiale delle pareti dell'alveo. I coefficienti di Gauckler-Stickler e di Manning differiscono in quanto reciproci.

Una volta note le caratteristiche geometriche della sezione del canale, la pendenza, la scabrezza e il suo parametro n è possibile ricavare dalla (formula 22) la portata:

$$Q = \frac{\sqrt{i}}{n} A(h_0) R(h_0)^{\frac{2}{3}}$$
[26]

È inoltre possibile definire una scala delle velocità della corrente uniforme, tenendo conto che la (formula 22) può essere esplicitata come:

$$V_0 = \frac{\sqrt{i}}{n} R(h_0)^{\frac{2}{3}}$$
[27]

1.6. Coefficiente di scabrezza in alvei a scabrezza eterogenea e alvei compositi

Il calcolo del coefficiente di resistenza del moto in un corso d'acqua con rivestimento eterogeneo lungo la sezione è un caso di interesse applicativo. Infatti, il valore del coefficiente di resistenza del moto varia in base all'eventuale presenza di vegetazione di vario tipo sulle sponde, in presenza di rivestimenti parziali composti da vari materiali e anche dal tipo di corso d'acqua, naturale o artificiale. Esistono vari casi nella realtà ed è quindi difficile trovare una legge universale. In genere si è soliti suddividere due condizioni:

- alvei a sezione compatta e scabrezza eterogenea, caratterizzati da una forma della sezione "semplice" (inscrivibili, cioè in un arco di cerchio) e diversi materiali di rivestimento a cui corrispondono scabrezze differenti;
- alvei a sezione composita, caratterizzati cioè da forme della sezione articolate.

In condizioni naturali, alvei eterogenei e compositi coincido per cui viene comodo trattare le due condizioni insieme. Pasche e Rouvé (1985) affrontarono il caso del deflusso in un alveo assimilabile ad una sezione trapezoidale con un canale centrale più profondo e due aree laterali che sono soggette a sommersione alle portate più alte. I due autori proposero un'accurata descrizione ed interpretazione dell'effetto dovuto sia alla forma della sezione che alla presenza delle piante, elementi che determinano una elevata scabrezza.

La condizione studiata è ben descritta in Figura 6, dove è rappresentato l'effetto della vegetazione che genera un picco di tensione con una conseguente diminuzione del modulo della velocità delle due sub aree dell'area alluvionale, generando inoltre delle forze idrodinamiche che influenzano il canale principale. In Figura 7, vengono mostrati più nello specifico gli scambi di energia tra il canale principale e le golene attraverso la formazione di vortici e correnti secondarie.



Figura 6 Suddivisione di una sezione composita a scabrezza eterogenea in sub-aree, a sinistra, e analisi della distribuzione di velocità e delle tensioni τ , a destra (Chiaradia, 2006).

Considerando per comodità metà sezione, è possibile distinguere quattro regioni di moto disposte dalla sponda verso il centro:

- la prima sezione comprende l'area alluvionale non influenzata dalla corrente del canale principale; in questa zona, il flusso è dominato da elementi in condizione di parziale sommersione. La scabrezza indotta da tali elementi può essere determinata mediante la teoria dei corpi rigidi;
- nella seconda sezione l'area alluvionale è influenzata dalla corrente del canale principale; in questa regione, le tensioni che si generano sulla facciata tra canale principale e aree laterali vengono in parte assorbite dalle forze idrodinamiche che si generano per effetto degli ostacoli presenti, le piante;
- la terza sezione rappresenta il canale principale, suddiviso a sua volta in due subsezioni;
- la regione influenzata sia dagli effetti dell'area laterale caratterizzata dalla presenza di vegetazione sia dalla scabrezza causata dalle caratteristiche del canale principale;
- la regione in cui il moto è influenzato unicamente dalle caratteristiche di scabrezza del fondo; in questo caso la scabrezza può essere determinata con una relazione di tipo logaritmico.

Quando la scabrezza indotta dalla presenza di vegetazione ai lati è maggiore rispetto a quella del fondo del canale, è possibile trascurare quella del fondo e quindi valutare la scabrezza del canale principale secondo una funzione logaritmica che lega l'effetto di un immaginario muro alle dimensioni dell'alveo. Le dimensioni e l'influenza del muro dipendono sia dalle caratteristiche della vegetazione sia dalla larghezza della zona inondabile. Quest'ultima, infatti, aumenta la scabrezza sul flusso dove si generano le tensioni più alte.

Lo studio dell'effetto della variazione del rivestimento in un alveo naturale, soprattutto in presenza di vegetazione, è stato applicato dal punto di vista sperimentale: questo tipo di indagine ha tuttavia portato a sviluppare un grande numero di equazioni, che spesso producono risultati discordi tra loro, validi ed affidabili solo in casi pratici simili alle condizioni sperimentali considerate dai diversi autori.



Figura 7 Scambi di energia tra il canale principale e le golene attraverso la formazione di vortici e correnti secondarie. (Chiaradia, 2006).

Queste formulazioni prevedono l'introduzione di un coefficiente di resistenza al moto di Manning equivalente, n_{eq} , che viene calcolato mediante una media pesata dei singoli coefficienti di resistenza al moto che caratterizzano i rivestimenti presenti in alveo

(Yen, 2002). I pesi sono calcolati in funzione delle caratteristiche geometriche delle singole parti della sezione con diverso rivestimento.

Per stimare n_{eq} sono state proposte numerose equazioni che si basano su differenti ipotesi relativamente alla distribuzione nella sezione di portate, velocità, forze e tensioni:

- le equazioni di Cox, si fondano sull'assunzione che la velocità d'attrito riferita all'intera sezione sia pari alla somma pesata delle velocità di attrito nelle i-esime sub-sezioni. Le equazioni di Cox, Pavlovskii e Yen considerano che la resistenza totale riferita all'intera sezione sia pari alla somma delle resistenze nelle i-esime sub-sezioni, con resistenza totale *F* calcolata come il prodotto tra il perimetro bagnato (P) e la tensione al contorno (Cox, 1973);
- le equazioni di Colebatch e Horton-Einstein ipotizzano che la velocità media delle i-esime sub-sezioni V_i sia pari alla velocità media V dell'intera sezione (Colebatch et. al., 1941; Horton-Einstein et. al., 1934);
- le equazioni di Cox, Felkel, Yen, Lotter e Ida-Engelund, infine, si basano sul criterio che la portata transitante nell'intera sezione Q sia data dalla somma delle portate transitanti nelle i-esime sub-sezioni (Cox et. al., 1973; Felkel et.al., 1969; Yen et.al., 1991; Lotter et.al., 1933; Ida-Engelund et.al., 1960).

1.7. Scabrezza indotta dalla presenza di vegetazione

La presenza di vegetazione in alveo costituisce un elemento che va ad aumentare le resistenze al moto, riducendone la velocità di deflusso e di conseguenza ne aumenta il tirante. L'effetto determinato dalla presenza delle piante non è tuttavia costante e dipende, oltre che dalle caratteristiche proprie della vegetazione, anche da quelle della corrente. Ree (1949) dimostrò come i valori di scabrezza (espressi in termini di coefficiente di Manning) non rimangano costanti al variare delle condizioni di moto, ma aumentano al crescere del livello di sommersione fino ad un massimo in cui la vegetazione inizia ad oscillare creando condizioni di turbolenza, con una conseguente maggiore perdita energetica. Superata questa soglia critica, la scabrezza diminuisce intensamente in seguito al compattamento al fondo della copertura vegetale, riducendo in questo modo anche la resistenza lungo la superficie di scivolamento (Figura 8).



Figura 8 Variazione del coefficiente di scabrezza in funzione del tirante idrico per una vegetazione erbacea di media lunghezza in un canale con pendenza del 5% (Schwab et al., 1981).

La vegetazione riparia (cioè quella maggiormente interessata dai fenomeni di deflusso) può essere classificata tenendo conto di due fattori principali: le caratteristiche meccaniche dei tessuti e il livello di sommergenza.

Di conseguenza è possibile distinguere i seguenti casi:

- vegetazione flessibile totalmente sommersa (vegetazione erbacea di dimensioni inferiori rispetto ai tiranti);
- vegetazione rigida parzialmente sommersa (pioppeti in aree golenali);
- vegetazione flessibile in condizione di parziale sommersione (vegetazione arbustiva sulle sponde o nel sottobosco di aree golenali).

Nel primo caso la resistenza al moto è espressa in forma di resistenza d'attrito, legando il coefficiente di scabrezza e l'altezza relativa e le proprietà biomeccaniche della vegetazione. Nel secondo caso, si utilizza invece un approccio basato sulla resistenza di forma (resistenza di tipo idrodinamico) derivata dallo squilibrio delle pressioni che si realizza tra monte e valle di un ostacolo, ovvero la pianta, a seguito dell'impatto della corrente sul tronco. In questo caso il coefficiente di scabrezza è espresso in funzione delle proprietà idrodinamiche di resistenza al moto della vegetazione immersa nella corrente. L'ultima condizione rappresenta una variante della seconda poiché, mentre nel caso precedente le piante vengono considerate come corpi rigidi, in presenza di vegetazione flessibile le caratteristiche non rimangono costanti poiché la pianta a seconda della forza della corrente modifica la propria conformazione in modo da opporre la minore resistenza possibile. Ciò comporta, una drastica riduzione del coefficiente di resistenza.

1.8. Vegetazione completamente sommersa

La vegetazione in condizione di totale sommersione ha un comportamento che varia in funzione del grado di sommersione a cui è sottoposta e in relazione alla densità e alle caratteristiche meccaniche della vegetazione. La scabrezza diminuisce al crescere del prodotto tra la velocità media e il raggio idraulico (Equazione 30) (U.S.-S.C.S., 1966):

$$n = \frac{1}{\left[2.08 + 2.30x + 6\ln(10.8\,VR)\right]}$$
[28]

con x compreso tra 1 e 7 in funzione delle caratteristiche della vegetazione quali la densità e l'altezza media (Tabella 1).



Figura 9 coefficiente di Manning in funzione del prodotto VR (SCS, U.S. Department of Agriculture, 1947 in Schwab et al., 1981).

Condizione	Densità	Altezza Media	x
Α	Buona	> 76	- 0.5
В	Buona	28 - 61	2
С	Buona	15 - 25	5
D	Buona	5 - 15	7
E	Buona	< 5	11
В	Scarsa	> 76	2
С	Scarsa	28 - 61	5
D	Scarsa	15 - 25	7
D	Scarsa	5 - 15	7
E	Scarsa	< 5	11

Tabella 1 valori del parametro x in funzione delle caratteristiche di densità della vegetazione (SCS, U.S. Department of Agriculture, 1947 in Schwab et al., 1981).

Il metodo dell'SCS, tuttavia, per la sua forte natura empirica, può essere applicato solo nelle condizioni simili a quelle di sperimentazione, cioè nell'ipotesi di canale di grosse dimensioni e tiranti di molto maggiori rispetto all'altezza delle piante e vegetazione con caratteristiche simili a quella utilizzata durante le prove.

Un ulteriore studio può essere fatto sulla base della velocità che si instaura in condizioni di scabrezza sul fondo. Nel caso di canali molto larghi, il profilo di velocità della corrente è descritto dall'equazione di Prandtl – von Karman (Baiamonte, 2001):

$$\frac{v(y)}{V_0} = \frac{1}{k} ln \frac{y}{e_s} + 8.5$$
[29]

dove v è la velocità misurata alla quota y rispetto al fondo, k è la costante di von Karman (ovvero 0.41) e e_s rappresenta la scabrezza equivalente in sabbia di Nikuradse, noto per aver esteso la formulazione originaria di Prandtl e von Karman alla condizione di tubi scabri (Ghetti, 2006). Integrando la Equazione 29 lungo la verticale, si ottiene l'espressione del coefficiente di scabrezza di Darcy – Weisbach:

$$\frac{V}{V_0} = \sqrt{\frac{8}{f}} = A \ln \frac{h}{e_s} + B$$
[30]

Tale equazione esprime il rapporto tra la velocità media della corrente e la velocità d'attrito $\left(\frac{V}{V_0}\right)$ in funzione del logaritmo della scabrezza relativa $\left(\frac{h}{e_s}\right)$ attraverso i coefficienti di calibrazione A e B (tabella 1). Il termine della scabrezza relativa può essere espresso in termini generici da un fattore X, per cui la Equazione 30 diventa:

$$\sqrt{\frac{8}{f}} = A \ln X + B \tag{[31]}$$

Il parametro X può essere calcolato in maniera diversa a seconda della condizione in esame (Tabella 2): nel caso di fondo in ghiaia è espresso come rapporto tra il tirante e una dimensione della curva granulometrica. In presenza di vegetazione sul fondo, invece, si può considerare il rapporto tra tirante e una scabrezza equivalente, k_v, dovuta alla vegetazione che, in alcuni casi, può essere rappresentata dall'altezza della vegetazione (h_{veg}). La vegetazione disposta sul fondo tende a compattarsi variando le sue caratteristiche di scabrezza.

Kouwen e Unny (1969) e Kouwen (1988) propongono un metodo per la determinazione del k_v in funzione di alcuni parametri meccanici. Tali valori sono inerenti alla flessibilità della vegetazione, e vengono descritti dal MEI. Il MEI corrisponde al prodotto tra la densità di vegetazione M (numero di fusti/m²), il modulo di elasticità del singolo fusto E (N/m²) e dal momento di inerzia I (m⁴).

La scabrezza equivalente generata dalla vegetazione può essere quindi espressa come:

$$k_{v} = 0.14h_{veg} \left(\frac{\left(\frac{MEI}{\tau_{0}} \right)^{0.25}}{h_{veg}} \right)^{1.59}$$
[32]

Il termine di rigidità può essere calcolato conoscendo i singoli fattori. Per i casi considerati, si individuano due condizioni tipiche e una intermedia espresse dalle seguenti relazioni.

Molteplici studi (Kouwen et al., 1996, Gourly, 1970) hanno dimostrato come le velocità puntuali seguano un andamento a forma di "esse". Per poter descrivere l'andamento delle velocità si propone di suddividere il profilo di velocità in tre zone (Figura 10).



Figura 10 suddivisione del campo di moto nel profilo di velocità; z= quota rispetto al fondo, hs,t= quota di massimo dell'intensità della turbolenza. (Chiaradia, 2006).

La prima zona, quella interna allo strato vegetato è caratterizzata da velocità molto basse, soprattutto alle quote più prossime al fondo; le velocità poi crescono all'aumentare della quota in modo differente a seconda della densità di vegetazione. La seconda zona corrisponde al tratto logaritmico del profilo sperimentale più prossimo al fondo. L'ultima zona è caratterizzata da profili di velocità positivi ma decrescenti fino in prossimità della superficie libera, generando un tratto di profilo verticale.

Condizione	A	В	X	Autore
Fondo in ghiaia $(2.5 \le X \le 120)$	2.90	0.70	$\frac{h}{d_{50}}$	Bray, 1979
Piante acquatiche (Alisma Plantago)	4.28	1.24	$\frac{h}{k_v}$	Keugelan,1938
Potamogeton (P. compressus), Piante acquatiche (Alisma plantago), alghe (Cladophora), Elodea	5.22	1.19	$\frac{h}{k_v}$	Keugelan,1938
Elodea americana (Elodea canadensis), Cerastio (Callistriche spp.), e alghe	1.61	1.32	$\frac{h}{k_v}$	Plate e Quraishi, 1965
Erbe flottanti (Glyceria fluitans), lattuga arricciata (Potamogeton crispus e P. pectinatus)	2.55	1.45	$\frac{h}{k_v}$	Plate e Quraishi, 1965
Erbe flottanti (Glyceria fluitans), lattuga arricciata (Potamogeton crispus)	2.09	0.70	$\frac{h}{k_v}$	Plate e Quraishi, 1965
Vegetazione eretta	1.85	0.15	$\frac{h}{k_v}$	Kouwen, 1988
Vegetazione prona	0.6–0.8	7.6-9.9	$\frac{h}{k_v}$	Kouwen, 1988

Tabella 2 Parametri	A, B e X da	inserire	nella	(Formula	31)	(Chiaradia,	2006).
---------------------	-------------	----------	-------	----------	-----	-------------	--------

1.9. Vegetazione parzialmente sommersa

Le caratteristiche della vegetazione arborea vengono comparate a quelle dei corpi rigidi immersi in un flusso. Per tale ragione si fa riferimento all'inquadramento teorico proposto da Petryk e Bosmanjian (1975) in cui il tirante idrico è posto inferiore o uguale all'altezza delle piante che hanno comportamento rigido.



Figura 11 Schema dell'ingombro di una singola pianta e delle forze agenti su corpi rigidi. (Chiaradia, 2006).

In condizioni di moto uniforme, la componente della forza peso nella direzione del moto di un tratto di canale (γ ALi) è bilanciata dagli sforzi alla parete agenti sul contorno $\tau_0 PL$ e dalla somma delle resistenze idrodinamiche offerte dalle singole piante ($\sum_{i=1}^{N} Rp_i$):

$$yALi = \tau_0 PL + \sum_{i=0}^{N} Rp_i$$
[33]

La resistenza prodotta dalla singola pianta può essere calcolata in funzione del coefficiente di forma C_D e della sezione di ingombro medio delle piante (Ap_i) e della velocità media:

$$Rp_i = \gamma \frac{V^2}{2g} C_D A p_i$$
[34]

Introducendo il concetto di scabrezza equivalente data dalla somma della scabrezza del fondo e quella indotta dalla vegetazione si ottiene che:

$$i = \frac{\tau_0 P}{\gamma A} + \frac{V^2}{2gAL} \sum_{i=1}^N C_D A p_i$$
[35]

Esprimendo la cadente della linea dei carichi come:

$$i = \frac{n_{eq}^2 V^2}{R^{\frac{4}{3}}}$$
[36]

e la tensione come:

$$\tau_0 = \gamma \frac{V^2 n^2}{R^{\frac{1}{3}}}$$
[37]

è possibile rielaborare le relazioni sopra riportate come segue:

$$\frac{n_{eq}^2 V^2}{R^{\frac{4}{3}}} = \frac{n_0^2 V^2}{R^{\frac{4}{3}}} + \frac{V^2}{2g} \sum_{i=1}^N C_D \frac{AP_i}{AL}$$
[38]

da cui:

$$n_{eq} = \sqrt{n_0^2 + \frac{R^{\frac{4}{3}}}{2g} \sum_{i=1}^N C_D \frac{Ap_i}{AL}} = \sqrt{n_0^2 + \frac{R^{\frac{1}{3}}}{2g} \frac{A}{P} \sum_{i=1}^N C_D \frac{Ap_i P}{ALP}} =$$

$$\sqrt{n_0^2 + \frac{R^{\frac{1}{3}}}{2g} \sum_{i=1}^N C_D \frac{Ap_i}{LP}}$$
[39]

Se si pone Ap_i costante, il secondo termine della radice si riduce a:

$$n_{eq} = \sqrt{n_0^2 + \frac{R^{\frac{1}{3}}}{2g} \frac{N}{LP} C_D Ap}$$
[40]

dove, N/LP= M rappresenta la densità delle piante che può essere anche espressa sulla base delle distanze tra i singoli steli (a_x e a_y) come riportato in (Tabella 3).

Tabella 3 Parametri geometrici tipici della vegetazione in funzione delle diverse tipologie (DVKW, 1991).

Tipo di vegetazione	Grado di sviluppo	Diametro del tronco (m)	a _x (m)	a y (m)
Canneto	Annuale	0.003-0.01	0.01-0.03	0.01-0.03
Arbusti (salici)	1 anno	0.01 - 0.03	0.25-0.35	0.25-0.35
Arbusti (salici)	+ anni	0.03 - 0.06	0.15-0.25	0.15-0.25
Alberi (betulla)	5 anni	0.04 - 0.10	1.0-5.0	1.0-5.0
Alberi (betulla)	> 5 anni	0.15 - 0.50	3.0-10.0	3.0-10.0
Di conseguenza l'Equazione 40 diventa:

$$n_{eq} = \sqrt{n_0^2 + \frac{R^{\frac{1}{3}}C_D Ap}{2g a_x a_y}}$$
[41]

Nel caso in cui l'altezza del tirante sia superiore a quella delle piante, lo schema proposto dal Petryk 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, calcolata come rapporto tra portata liquida e area della sezione di deflusso.

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

$$n_{eq} = \sqrt{n_0^2 + \alpha^2 \frac{R^{\frac{1}{3}} C_D A p}{2g a_x a_y}}$$
 [42]

2. Obiettivi dello studio

L'obiettivo principale dello studio è quello di raccogliere dati utili per il calcolo della scabrezza generata dalla vegetazione in alveo. Come descritto nel capitolo precedente, la letteratura scientifica che ha investigato l'effetto della vegetazione sul flusso della corrente è molto ampia ed esistono molte relazioni empiriche elaborate da vari autori (Bray, 1979; Keugelan, 1938; Plate e Quraishi, 1965; Kouwen, 1988). Tali relazioni, tuttavia, richiedono un grande quantitativo di dati, come: il numero di fusti M (n_{fusti}/m²), il momento di inerzia I (m^4) e il modulo di elasticità del singolo fusto E (N/ m^2). Nonostante gli sforzi della comunità scientifica in questa direzione, i dati raccolti sono sempre molto esigui e molto sito-specifici. Per questa ragione, lo studio propone una raccolta di misure che vadano a descrivere le caratteristiche di una particolare specie riparia, il salice bianco (Salix alba) allo stadio giovanile della pianta. Tale specie è una tra le più diffuse in ambito fluviale lungo i corsi d'acqua dell'Italia settentrionale, e importanti per l'influenza che hanno sulla dinamica dell'alveo. Le misure raccolte permettono di valutare la variabilità nella crescita sia dal punto di vista fisiologico (altezza pianta, altezza chioma, larghezza chioma e diametro), sia dal punto di vista biomeccanico analizzando i diversi valori di flessibilità. La campagna di misure è stata svolta in diversi siti lungo il fiume Oglio sotto la quale nelle località di Urago d'Oglio, Palazzolo sull'Oglio, Soncino e località di Bompensiero (comune di Orzinuovi), e lungo il fiume Adda nelle località di Grosotto e Breno (in Valtellina).

3. Materiali e metodi

3.1. Il salice bianco

La specie investigata è il Salix alba o salice bianco. Il salice bianco è un'angiosperma eudicotiledone europea che vive lungo i fiumi e i laghi e generalmente si accresce in pianura, anche se è possibile trovarlo ad altitudini più elevate, fino ai 1000 m. Il salice bianco appartiene al genere Salix, un genere appartenente alla famiglia delle Salicacee, delle quali fanno parte più di 450 specie che si dividono in: piante perenni, arbusti e alberi. Il salice bianco è una pianta con ramoscelli molto flessibili e tenaci, corteccia giallastra o grigio-rossastra con molti fusti già dalla base. Il portamento dei rami ne identifica una chioma generalmente ampia anche se il limite del diametro del tronco non supera i 60 cm. Viene identificata come una pianta di terzo ordine, la quale può raggiungere altezze fino ai 20 m; tuttavia, mantiene generalmente una crescita in altezza mantenuta, soprattutto lungo i corsi di acqua. Attua una ottima ritenzione del suolo impedendo smottamenti e frane, inoltre è una pianta che si accresce in modo rapido. Il salice bianco ha una grande resistenza e longevità all'acqua; infatti, sopravvive anche con l'apparato radicale del tutto sommerso, attribuendo caratteristiche peculiari al suo legno che viene utilizzato per le fabbricazioni di molteplici utensili.

Le foglie risultano essere caduche, alterne e oblanceolate, con un apice molto appuntito e un margine fogliare denticolato, lunghe circa anche 20 cm e portate da un picciolo molto corto. La pagina superiore è verde lucida mentre quella inferiore è di color sericeo argentata a causa della presenza di peluria con peli molto intrecciati a formare il tomento.



Figura 12 Foglie del Salix alba, si nota la differenza tra la lamina superiore (verde lucido) e quella inferiore con il tomento (color biancastro) (Andropocene, 2019).

Il salice bianco è una pianta dioica, ovvero produce fiori femminili e maschili su individui diversi della stessa specie. I fiori femminili sono raccolti in amenti verdi arcuati (Figura 13), mentre quelli maschili si accrescono anche loro in amenti più lunghi con una colorazione gialla (Figura 14), fioriscono contemporaneamente da febbraio ad aprile.



Figura 13 figura dei fiori femminili raccolti in amenti (Andropocene, 2019).



Figura 14 figura dei fiori maschili raccolti in amenti (Andropocene, 2019).

Come tutte le angiosperme produce un frutto che circonda il seme. Il salice bianco produce delle capsule, le quali sono dei frutti secchi senescenti, ovvero si aprono a maturità per liberare i semi e contengono dei semi bruni con un apparato piumoso per il volo, permettendo una maggior dispersione durante il rilascio (Urso, 2008).

3.2. Misura e stima evolutiva delle caratteristiche geometriche delle piante

Le caratteristiche geometriche di ogni singola pianta, come altezza chioma (m), larghezza chioma (m), altezza e diametro (m), sono stati prelevate mediante l'utilizzo di diversi strumenti di misurazione. Per la misurazione dell'altezza di chioma, larghezza di chioma e altezza della pianta è stato utilizzato un metro di lunghezza massimale di 2 m (Figura 15). Per eseguire la misurazione dell'altezza della pianta si è appoggiato il metro parallelo al fusto della pianta.



Figura 15 Foto del metro utilizzato per le misurazioni.

Per la misurazione del diametro di ogni singolo fusto è stato utilizzato un calibro digitale con portata di 150 mm (Figura 16).



Figura 16 Foto del Carbon fiber composite digital caliber usato nelle misurazioni.

Una volta raccolte le misure, ogni caratteristica geometrica è stata valutata in funzione del diametro del fusto che ne rappresenta la tendenza evolutiva.

3.3. Stima delle proprietà biomeccaniche delle piante

Il comportamento della vegetazione in alveo alle sollecitazioni indotte dalla forza della corrente è strettamente correlato, alle proprietà meccaniche che la caratterizzano. Una delle sue caratteristiche è l'elasticità, la quale viene comunemente espressa considerando diversi fattori:

- il modulo di elasticità o di Young E, cioè la costante che rappresenta l'andamento rettilineo di elasticità sul diagramma sforzo allungamento;
- il momento di inerzia I, che rappresenta l'insieme delle caratteristiche geometriche della sezione del fusto;
- la tensione critica di elasticità Y, variabile anche a parità di modulo di elasticità;
- l'angolo di piegamento V.

La metodologia utilizzata per la valutazione di questi parametri nel caso di vegetazione erbacea, i cui steli sono caratterizzati da nodi (generalmente pieni) ed internodi (cavi), con proprietà meccaniche differenti è un'analisi che imita lo schema di una trave infissa soggetta ad un carico concentrato alla estremità libera (Figura 15). Il modulo di elasticità E (N/m²) viene calcolato secondo la relazione:

$$E = \frac{F \cdot b^3}{3 \cdot I \cdot \Delta} \tag{43}$$

dove F è la forza di trazione esercitata in Newton, b è il braccio in m, Δ è lo spostamento dell'asse neutro rispetto la posizione di riposo in seguito alla sollecitazione, I è il momento di inerzia in m⁴.

Il momento di inerzia che nel caso di un fusto di sezione ellittica cava è semplificato come in (Figura 17).



Figura 17 schema di riferimento per il calcolo del momento di inerzia e del modulo di elasticità (trave a mensola) per un fusto con sezione cava. (Chiaradia, 2006).

Facendo riferimento all'asse maggiore, si può calcolare come:

$$I_{max} = \frac{\pi}{64} \left(d_1^3 d_2 - d_a^3 d_b \right)$$
 [44]

dove d_1 e d_2 sono i diametri esterni massimo e minimo mentre d_a e d_b sono i diametri interni, massimo e minimo. Il momento di inerzia viene calcolato nella direzione di piegamento; il modulo di elasticità è stimato considerando il campo di elasticità dei tessuti, la tensione di elasticità massima e l'angolo di piegamento vengono invece misurati sperimentalmente.

Utilizzando il modello della trave infissa precedentemente descritto; in questo caso però il fusto delle piante è considerato come un cilindro pieno e il modulo di elasticità $I(m^4)$ è dato dalla relazione:

$$I = \frac{\pi \cdot Ds^4}{64} \tag{45}$$

dove Ds (m) è il diametro caratteristico del singolo fusto.

La misura del braccio b in m e del Δ in m, per il calcolo dell'elasticità (Formula 43), è stata utilizzata una squadra da 45 cm con angoli di 30 e 60 gradi (Figura 18).



Figura 18 Foto della squadra utilizzata nella misurazione del Δ .

Per misurare la forza in Newton, definendo quindi la flessibilità del fusto è stato utilizzato un dinamometro Meilen con un range di 50g - 50 kg (Figura 19).



Figura 19 Foto del dinamometro con relativa fascetta e cordino per l'ancoraggio al fusto.

La metodologia adottata in campo per la stima del modulo di elasticità è descritta in (Figura 20): la forza viene misurata attraverso un dinamometro fissato ad una altezza *b* lungo il fusto principale della pianta ed esercitando una trazione in modo da avere

uno spostamento del fusto rispetto al suo asse neutro pari a Δ ; il diametro caratteristico è quello misurato a *b*/2.



Figura 20 Schema di riferimento per la stima del modulo di elasticità in campo. "Ds": diametro del fusto; "∆": spostamento del fusto rispetto all'asse neutro; "F": forza di trazione esercitata; "b": altezza di fissaggio del dinamometro. (Chiaradia, 2006).



Figura 21 Foto raffiguranti a sinistra la misurazione della forza di trazione con Δ nullo, a destra la misurazione della forza di trazione esercitata.

Come per il caso delle caratteristiche geometriche, i valori stimati dell'elasticità del singolo fusto sono stati messi in relazione con la dimensione del diametro.

3.4. Analisi statistica

I dati raccolti sono serviti a produrre dei modelli empirici che legano le caratteristiche geometriche e biomeccaniche con il diametro del fusto. Tali modelli permettono di dimostrare come al variare del diametro anche le caratteristiche geometriche e biomeccaniche di ogni sito campionato variano. Tali relazioni sono state ottenute andando a massimizzare il valore del coefficiente di determinazione R^2 , il quale è un valore statistico che permette di capire se un modello di regressione lineare può essere utilizzato per fare previsioni, ovvero valuta quanto le singole osservazioni si discostano dalla retta di regressione. Il suo valore è compreso tra 0 e 1, dove se prossimo a 1 identifica che il modello utilizzato presenta variabili indipendenti che riescono a spiegare quasi del tutto le variabili dipendenti. A conferma di ciò le relazioni dendrometriche analizzate, sono lineari e molto forti con valori di R^2 che si aggirano tra 0,5 e gli 0,9, come per esempio mostrato in Figura 30.

Una volta ottenuti i modelli empirici, si è valutato statisticamente le differenze delle medie dei campioni raccolti. Il confronto si è concentrato solo sull'elasticità del fusto in quanto direttamente correlata con le altre caratteristiche geometriche e con la conseguente effetto sulla scabrezza della corrente. Per fare ciò, solitamente si utilizza lo strumento statistico dell'analisi della varianza denominato ANOVA. L'ANOVA è una tecnica utilizzata per confrontare le medie e le varianze di due o più gruppi, e per valutare se tali differenze siano statisticamente significative. L'ANOVA si utilizza quindi quando la variabile o le variabili indipendenti sono di tipo categoriale, e la variabile dipendente è numerico.

Per poter attuare il calcolo dell'ANOVA, è prima necessario rispettare i seguenti assunti:

- Indipendenza dei punteggi osservati (se i soggetti sono tra loro indipendenti ci troviamo nell'opzione 'tra casi'; se l'assunto non è rispettato (ovvero si fanno più misurazioni agli stessi soggetti) siamo nell'opzione 'entro casi' che segue modalità di calcolo proprie);
- normalità della distribuzione;

• omoschedasticità (o omogeneità delle varianze).

Per verificare l'assunto della normalità di distribuzione è stato utilizzato il test di normalità di Shapiro-Wilk (Shapiro and Wilk's 1965). L'output del test è il p-value, il quale deve essere maggiore o uguale ad un valore limite di 0.05, per verificare che l'ipotesi nulla (ossia la distribuzione del campione è normale).

Per verificare l'assunto dell'omogeneità delle varianze è stato utilizzato il test di Levene, che si basa sull'analisi della varianza degli scarti dei valori campionari dalla media o dalla mediana. Il test di Levene può essere applicato anche quando gli n gruppi hanno diverse numerosità campionarie. Dell'output restituito, si legge solo il p-value, il quale deve essere maggiore o uguale ad un valore di alpha di 0.05, se l'ipotesi è nulla allora le varianze risultano omogenee. Verificati gli assunti si può procedere con l'ANOVA vera e propria; tuttavia, se l'ipotesi di normalità del campione non è soddisfatta mentre quella dell'omoschedasticità è soddisfatta, è possibile introdurre il test non parametrico di Kruskal Wallis che permette la violazione dell'assunto di normalità di distribuzione. A differenza dell'ANOVA, in cui le medie vengono confrontate, il test di Kruskal-Wallis verifica se i diversi campioni sono distribuiti in modo omogeneo e quindi appartengono alla stessa popolazione. Tale test prevede un sistema di ipotesi:

- Ipotesi nulla H₀: Tutti i campioni provengono dalla stessa popolazione (distribuzione);
- Ipotesi alternativa H₁: Almeno un campione proviene da una popolazione con una distribuzione diversa.

L'output restituito dal test di Kruskal-Wallis è il p-value, il quale, come per l'ANOVA, deve essere maggiore o uguale ad un valore di alpha di 0.05, l'ipotesi è nulla allora la distribuzione è omogenea. A seguito è stato necessario attuare il pairwise t-test, o test t per dati appaiati, il quale effettua un confronto a coppie fra gruppi, ovvero il test serve a controllare se la differenza media tra coppie di misurazioni è o meno significativa. L'ipotesi nulla è dunque che la differenza fra le coppie sia pari a zero.

3.5. Siti di studio

Sono stati prelevati trenta campioni di salice bianco in sette siti differenti: cinque lungo il fiume Oglio: località di Urago d'Oglio, Palazzolo sull'Oglio, Soncino e località di Bompensiero (comune di Orzinuovi) e due sul fiume Adda nelle località di Grosotto e Breno (Figura 22).



Figura 22 Mappa QGIS raffigurante le aree di campionamento lungo il fiume Adda e Oglio.

I due corsi d'acqua presentano diverse caratteristiche morfologiche e idrogeologiche, fornendo un esaudiente confronto tra i dati raccolti.

Il f. Adda nasce in Val Alpisella nelle Alpi Retiche, alla quota di 2122 metri, con un percorso che si sviluppa per 313 km. Il bacino dell'Adda ha una superficie complessiva di circa 7.927 km², complessivamente per il 79% in ambito montano e per il 21% in pianura (AdBPo, 2003). Il f. Adda dalla sorgente raggiunge il comune di Bormio, dove raccoglie le acque dei torrenti Viola Bormina e Frodolfo, per poi proseguire verso ovest lungo la Valtellina immettendosi nel lago di Como. Il f. Adda è l'unico emissario

del lago di Como, dal quale attraversando il Parco nazionale dello Stelvio raggiunge la pianura padana per poi immettersi nel Po. Il f. Adda è caratterizzato da un regime pluviometrico di tipo continentale, con massimi estivi e minimi invernali (Tabella 4), con una portata di immissione nel lago di Como di 87 m³/s, e in seguito controllata dalla diga di Olginate, che ne origina una portata di immissione nel Po di 190 m³/s. La vegetazione è tipicamente alpina fino al lago di Como, con numerose specie endemiche: alle medie quote prevale il bosco misto a latifoglie, oltre i 600-800 m s.m. predominano le conifere (abete bianco, abete rosso e il larice) e nel fondovalle prevale il prato, sostituito pian piano dalle latifoglie. Tra quest'ultime si trovano il salice bianco, l'ontano nero (*Alnus glutinosa*), il salicone (*Salix caprea*) e l'acero campestre (*Acer campestre*).

Sezione	Superficie Km ²	H media m s.m.	H min m s.m.	Q max m ³ /s	q max m ³ /s · km ²	Data
Adda a Tirano	906	2.136	430	540	0.60	01/11/1926
Adda a Ponte di Lecco	4.508	1.560	197	1.070	0.24	06/10/1898
Adda a Lavello	4.572	1.569	195	738	0.16	03/09/1965
Adda a Pizzighettone	7.775	1.157	40	1.650	0.21	17/09/1888

Tabella 4 Valori delle portate di piena storiche nel bacino dell'Adda (AdBPo, 2003).



Figura 23 Fotografia scattata nel sito di Breno.



Figura 24 Fotografia scattata nel sito di Grosotto.



Figura 25 Fotografia scattata nel sito di Urago D'Oglio



Figura 26 Fotografia scattata nel sito di Soncino.



Figura 27 Fotografia scattata nel sito di Palazzolo sull'Oglio.



Figura 28 Fotografia scattata nel sito di Bompensiero.

Il f. Oglio nasce a Ponte di Legno dalla confluenza dei torrenti Narcanello e Frigidolfo, è il secondo affluente del f. Po più lungo dopo il f. Adda con una lunghezza di 280 km. Il bacino del f. Oglio ha una superficie complessiva di circa 6.360 km², il 54% dei quali in ambito montano. Il f. Oglio percorre tutta la Val Camonica, attraversando il Parco Naturale Regionale dell'Adamello, alternando tratti ripidi ad altri pianeggianti, ricevendo numerosi affluenti come il f. Oglio nei pressi di Edolo e il Poia nella località di Cedegolo, per poi andare a formare il lago d'Iseo. Uscito dal lago, il fiume attraversa, con un andamento irregolare, la pianura Padana, con presenza di difese spondali abbastanza numerose; le caratteristiche geometriche dell'alveo sono rappresentate da una larghezza media di 150-200 m, continuamente variabile, da un'altezza media di sponda di 2,5 m, da un materiale d'alveo di granulometria compresa tra il campo della ghiaia e quello della sabbia e da una pendenza di fondo elevata (AdBPo, 2004). Come il f. Adda, il f. Oglio è ampiamente utilizzato come fonte idrica in agricoltura, confermando la presenza di molteplici campi coltivati fiancheggianti il corso d'acqua. Nei pressi di Soncino lo scorrere del fiume ha modificato il paesaggio forando un terrazzo alluvionale avente un dislivello di oltre otto metri. Sulla sponda bresciana il fiume tocca il paese di Orzinuovi (Bompensiero), totalmente pianeggiante e parzialmente coinvolto dal processo di genesi morfologica che ha interessato il terrazzamento alluvionale sulla sponda cremonese. Il f. Oglio è caratterizzato da un regime pluviometrico di tipo continentale, con massimi estivi e minimi invernali. In estate le portate minime del fiume sono relativamente elevate e scendono difficilmente sotto i 36 m³/s, mentre in autunno e in primavera le massime possono raggiungere i 425 m³/s (Tabella 4). Il f. Oglio scarica, con un regime regolare, una portata di 137 m³/s nel f. Po, grazie all'alimentazione alpina del suo alto corso e soprattutto alla presenza della diga di Sarnico. Le specie arboree e arbustive più diffuse lungo il fiume sono: i salici (Salix alba, S. purpurea), gli ontani bianchi e neri (Alnus incana, A. glutinosa) e i pioppi (Populus alba, P. nigra).

Sezione	Superficie Km ²	H media m s.m.	H min m s.m.	Q max m ³ /s	q max m ³ /s · km ²	Data
Oglio a Temù	119	2.204	1140	54	0.45	24/10/1923
Oglio a Capo di Ponte	777	1.857	355	353	0.45	09/10/1933
Oglio a Capriolo	1.842	1.429	185	414	0.22	20/09/1960
Oglio a Castelvisconti	2.316	1.180	-	418	0.18	01/11/1928

Tabella 5 Valori delle portate di piena storiche nel bacino dell'Oglio (AdBPo, 2004).

4. Risultati e discussione

4.1. Risultati delle prove geometriche

In questo capitolo vengono riportati i risultati delle prove di misurazione effettuate lungo gli argini del fiume Oglio nelle località: Urago D'Oglio, Palazzolo sull'Oglio, Soncino e Bompensiero e quelli delle prove effettuate presso Breno e Grosotto sul fiume Adda. Per ogni sito sono stati analizzati 30 esemplari di *Salix alba*, per un complessivo di 180 individui. In particolare, per quanto riguarda le caratteristiche morfologiche sono state analizzati: il diametro preso alla base del fusto, l'altezza della pianta, altezza e larghezza di chioma e il numero di steli. I risultati ottenuti sono stati interpretati con i modelli riportati in bibliografia e precedentemente descritti e con un nuovo modello interpretativo. I valori dei diametri ottenuti sul f. Oglio sono compresi in un intervallo tra 5.2 mm a 28.7 mm, mentre quelli sul f. Adda sono compresi in un range di 16.0 mm a 40.5 mm. Solo pochi valori risultano superare i 30.0 mm di diametro del fusto; quindi, gli individui campionati possono essere considerati giovani (Tabella 3).

Nella Figura 29 è possibile osservare come i valori della mediana dei diametri raccolti dai due siti di Grosotto e Breno sul fiume Adda siano maggiori e con una distribuzione dei dati più simmetrica rispetto ai siti campionati sul fiume Oglio.



Figura 29 Box plot che relaziona i diametri dei vari siti.

Nella Figura 30 è possibile osservare la distribuzione delle altezze dei singoli individui, prelevati dai diversi siti, in relazione alle loro altezze, ottenendone il grado di dispersione rispetto alla retta di regressione:

Per il sito di Urago d'Oglio, sono stati misurati esemplari con diametro che variano da 11.62 mm a 22.98 mm, con (17.32 ± 5.68) mm, le cui altezze sono misurate tra 1.69 m a 3.65 m, con (2.67 ± 0.97) m. Analizzando i dati raccolti possiamo osservare che la dispersione di quest'ultimi risulta essere molto ampia anche se distribuiti vicini alla retta di regressione, presentando un valore di deviazione standard pari a 5.68 mm per il diametro e 0.97 m per l'altezza. Dai campioni analizzati si ottiene una concentrazione accurata di dati intorno ai valori di altezza 3 m e diametro di 20 mm. L'andamento della dispersione riportato all'interno del grafico evidenzia una distribuzione ampia, con una distribuzione dei valori da entrambi i lati della retta di regressione (Tabella 6);

Sezione	H min (m)	H max (m)	H media (m)	R ²	Y
Urago d'Oglio	1	6	2.67	0.5493	y = 0.1276x + 0.4572

Tabella 6 Valori di R² e Y per il sito di Urago d'Oglio.

Per il sito di Palazzolo sull'Oglio, sono stati misurati esemplari con diametro che variano da 8.6 mm a 19.4 mm, con (14.0 ± 5.4) mm, le cui altezze sono misurate tra 0.81 m a 2.29 m, con (1.55 ± 0.94) m. In questo caso i dati non risultano avere un'alta dispersione ma si concentrano in un range di valori aventi deviazioni standard di 5.4 mm per il diametro e 0.74 m per l'altezza, raggruppandosi vicino alla retta di regressione (Tabella 7);

Tabella 7 Valori di R² e Y per il sito di Palazzolo sull'Oglio.

Sezione	H min (m)	H max (m)	H media (m)	R ²	Y
Palazzolo sull'Oglio	0.81	2.29	1.55	0.8111	y = 0.1226x - 0.1698

Per il sito di Soncino, sono stati misurati esemplari con diametro che variano da 3.9 mm a 25.2 mm, con (14.0 ± 6.7) mm, le cui altezze sono misurate tra 0.8 m a 2.5 m, con (1.7 ± 0.9) m. I dati ottenuti corrispondono a punti che si distribuiscono, vicino alla retta di regressione, aventi valori di deviazione standard di 6.7 mm per l'altezza e 0.9 m per il diametro (Tabella 8), con altezze e diametri simili a quelli del sito di Palazzolo sull'Oglio;

Tabella 8	Valori d	di R ² e	Yper	il sito	di Soncino
-----------	----------	---------------------	------	---------	------------

Sezione	H min (m)	H max (m)	H media (m)	R ²	Y
Soncino	0.8	2.5	1.7	0.7919	y = 0.1209x - 0.0125

• Per il sito di Grosotto, sul fiume Adda, sono stati misurati esemplari con diametro che variano da 20.9 mm a 31.5 mm, con (26.2 ± 5.3) mm, le cui

altezze sono misurate tra 2.8 m a 5.2 m, con (4.0 ± 1.2) m. I dati ottenuti corrispondo a punti aventi un alto grado di dispersione con deviazione standard di 5.3 mm per il diametro e 1.2 m per l'altezza. Gli esemplari prelevati presentano valori di altezze e diametri maggiori rispetto ai precedenti siti, pur mantenendosi vicini alla retta di regressione (Tabella 9);

Sezione	H min (m)	H max (m)	H media (m)	R ²	Y
Grosotto	2.8	5.2	4.0	0.7598	y = 0.2033x - 1.2832

Tabella 9 Valori di R² e Y per il sito di Grosotto.

 Per il sito di Breno, sono stati misurati esemplari con diametro che variano da 18.8 mm a 35.2 mm, con (27.0 ± 8.2) mm, le cui altezze sono misurate tra 2.2 m a 5.4 m, con (3.8 ± 1.6) m. I dati ottenuti si distribuiscono similmente a quelli prelevati sull'Adda nel sito di Grosotto, aventi una distribuzione ampia su tutta la retta di degenerazione raggiungendo i massimi valori misurati di altezza e diametri (Tabella 10);

Tabella 10 Valori di R² e Y per il sito di Breno.

Sezione	H min (m)	H max (m)	H media (m)	R ²	Y
Breno	2.2	5.4	3.8	0.8915	y = 0.2091x - 1.5173

Per il sito di Bompensiero (comune di Orzinuovi), sono stati misurati esemplari con diametro che variano da 9.2 mm a 16.8 mm, con (13 ± 3.8) mm, le cui altezze sono misurate tra 1.7 m a 2.7 m, con (2.2 ± 0.5) m. Per quanto riguarda i dati di questo prelievo i valori si raggruppano al di sopra della retta degenerativa in punti che variano tra un range di valori di 1.5 m a 3 m di altezza e 9 mm a 16 mm di diametro (Tabella 11).

Sezione	H min (m)	H max (m)	H media (m)	R ²	Y
Bompensiero	1.7	2.7	2.2	0.6066	y = 0.0959x + 0.9973

Tabella 11 Valori di R² e Y per il sito di Bompensiero.

Analizzando i dati relativi alle altezze dei singoli siti, in relazione al diametro del fusto, si ottengono valori di R² simili tra loro con conseguenti rette di regressione vicine e parallele tra loro. Quindi è possibile rappresentare l'altezza della pianta per ogni sito in un unico grafico deterinando una singola retta di regressione (Figura 30).



Figura 30 Distribuzione delle altezze delle piante prelevate in relazione al diametro del fusto.

Nella Figura 31 e nella Figura 32 è possibile osservare rispettivamente i valori riguardanti l'altezza e la larghezza della chioma dei singoli individui relazionati al

proprio diametro. Il coefficiente di determinazione R^2 per la Figura 31 ha un valore di 0.8957, mentre per la Figura 32 è di 0.9235, tali coefficienti essendo molto vicini al 1 determinano, che il modello statistico adottato rappresenti i dati in maniera soddisfacente.

Per ogni sito sono stati raccolti i valori delle altezze chiome di ogni singolo individuo e relazionati ai diametri del fusto. Naturalmente l'andamento atteso è che all'aumentare del diametro anche l'altezza e la larghezza chioma aumentino:

Per il sito di Urago d'Oglio, sono stati misurati esemplari con diametro che variano da 11.62 mm a 22.98 mm, con (17.32 ± 5.68) mm, le cui altezze di intersezione della chioma sono misurate tra 1.16 m a 1.3 m, con (1.23 ± 0.07) m (Tabella 12), e le larghezze chioma risultano essere tra 0.49 m a 1.23 m, con (0.86 ± 0.37) m (Tabella 13). Tali valori hanno un'ampia dispersione lungo tutta la retta di regressione, sia per quanto riguarda l'altezza chioma che per la larghezza chioma;

Tabella 12 Valori di R² e Y per l'altezza dell'intersezione della chioma del sito di Urago d'Oglio.

Sezione	H _{i.c.} min (m)	H _{i.c.} max (m)	H _{i.c.} media (m)	R ²	Y
Urago d'Oglio	1.16	1.3	1.23	0.5051	y = 0.0854x - 0.2543

Tabella 13 Valori di R² e Y per la larghezza chioma del sito di Urago d'Oglio.

Sezione	L _{c.} min (m)	L _{c.} max (m)	L _{c.} media (m)	R ²	Y
Urago d'Oglio	0.49	1.23	0.86	0.2558	y = 0.0329x + 0.2838

• Per il sito di Palazzolo sull'Oglio, sono stati misurati esemplari con diametro che variano da 8.6 mm a 19.4 mm, con (14.0 ± 5.4) mm, le cui altezze di

intersezione della chioma sono misurate tra 0.3 m a 1.02 m, con (0.66 ± 0.36) m (Tabella 14), e le larghezze chiome risultano essere tra 0.16 m a 0.64 m, con (0.42 ± 0.26) m (Tabella 15). I dati sono rappresentati da punti aventi una grande dispersione mantenendosi vicini alla retta di regressione;

Tabella 14 Valori di R² e Y per l'altezza dell'intersezione della chioma del sito di Palazzolo Sull'Oglio.

Sezione	H _{i.c.} min (m)	H _{i.c.} max (m)	H _{i.c.} media (m)	R ²	Y
Palazzolo sull'Oglio	0.3	1.02	0.66	0.5872	y = 0.0508x - 0.0471

Tabella 15 Valori di R² e Y per la larghezza chioma del sito di Palazzolo sull'Oglio.

Sezione	L _{c.} min (m)	L _{c.} max (m)	L _{c.} media (m)	R ²	Y
Palazzolo sull'Oglio	0.16	0.64	0.42	0.5015	y = 0.0341x - 0.0623

Per il sito di Soncino, sono stati misurati esemplari con diametro che variano da 3.9 mm a 25.2 mm, con (14.0 ± 6.7) mm, le cui altezze di intersezione della chioma sono misurate tra 0.23 m a 1.07 m, con (0.65 ± 0.42) m (Tabella 16), e le larghezze chiome risultano essere tra 0.14 m a 0.80 m, con (0.47 ± 0.33) m (Tabella 17). I dati riguardanti l'altezza della chioma sono rappresentati da punti che si raggruppano sotto la retta di regressione aventi deviazione standard di 0.42 m;

Tabella 16 Valori di R² e Y per l'altezza dell'intersezione della chioma del sito di Soncino.

Sezione	H _{i.c.} min (m)	H _{i.c.} max (m)	H _{i.c.} media (m)	R ²	Y
Soncino	0.23	1.07	0.65	0.6586	y = 0.0511x - 0.0668

	T!	I	T modio		
Tabel	lla 17 Valori di F	R ² e Y per la la	arghezza chioma	ı del sito di ,	Soncino.

Sezione	L _{c.} min (m)	L _{c.} max (m)	L _{c.} media (m)	R ²	Y
Soncino	0.14	0.80	0.47	0.5498	y = 0.0364x - 0.042

Per il sito di Grosotto, sono stati misurati esemplari con diametro che variano da 20.9 mm a 31.5 mm, con (26.2 ± 5.3) mm, le cui altezze di intersezione della chioma sono misurate tra 1.6 m a 3.4 m, con (2.5 ± 0.9) m (Tabella 18), e le larghezze chiome risultano essere tra 0.85 m a 1.39 m, con (1.12 ± 0.27) m (Tabella 19). Anche i dati relativi al sito di Grosotto presentano un'ampia dispersione lungo la retta di regressione;

Tabella 18 Valori di R^2 e Y per l'altezza dell'intersezione della chioma del sito di Grosotto.

Sezione	H _{i.c.} min (m)	H _{i.c.} max (m)	H _{i.c.} media (m)	R ²	Y
Grosotto	1.6	3.4	2.5	0.7508	y = 0.1463x - 1.2956

Tabella 19 Valori di R² e Y per la larghezza chioma del sito di Grosotto.

Sezione	L _{c.} min (m)	L _{c.} max (m)	L _{c.} media (m)	R ²	Y
Grosotto	0.85	1.39	1.12	0.6797	y = 0.042x + 0.0194

 Per il sito di Breno, sono stati misurati esemplari con diametro che variano da 18.8 mm a 35.2 mm, con (27.0 ± 8.2) mm, le cui altezze di intersezione della chioma sono misurate tra 1.2 m a 3.6 m, con (2.4 ± 1.2) m (Tabella 20), e le larghezze chiome risultano essere tra 0.7 m a 1.5 m, con (1.1 ± 0.4) m (Tabella 21). Dati caratterizzati da un'ampia dispersione con massimali valori sia di altezza chioma che di larghezza chioma;

Tabella 20 Valori di R^2 e Y per l'altezza dell'intersezione della chioma del sito di Breno.

Sezione	H _{i.c.} min (m)	H _{i.c.} max (m)	H _{i.c.} media (m)	R ²	Y
Breno	1.2	3.6	2.4	0.9098	y = 0.1534x - 1.4742

Tabella 21 Valori di R² e Y per la larghezza chioma del sito di Breno.

Sezione	L _{c.} min (m)	L _{c.} max (m)	L _{c.} media (m)	R ²	Y
Breno	0.7	1.5	1.1	0.8723	y = 0.0507x - 0.2116

Per il sito di Bompensiero (comune di Orzinuovi), sono stati misurati esemplari con diametro che variano da 9.2 mm a 16.8 mm, le cui altezze di intersezione della chioma sono misurate tra 0.8 m a 1.4 m, con (1.1 ± 0.3) m (Tabella 22), e le larghezze chiome risultano essere tra 0.4 m a 1.0 m, con (0.7 ± 0.3) m (Tabella 23). I dati sono raggruppati sopra la linea di regressione compresi tra valori di deviazione standard di 0.3 m per l'altezza chioma di 0.3 m e per la larghezza chioma.

Tabella 22 Valori di R² e Y per l'altezza dell'intersezione della chioma del sito di Bompensiero.

Sezione	H _{i.c.} min (m)	H _{i.c.} max (m)	H _{i.c.} media (m)	R ²	Y
Bompensiero	0.8	1.4	1.1	0.2883	y = 0.0377x + 0.5778

Tabella 23	Valori di R ² e	Y per la largl	hezza chioma del	sito di Bompensiero.
------------	----------------------------	----------------	------------------	----------------------

Sezione	L _{c.} min (m)	L _{c.} max (m)	L _{c.} media (m)	R ²	Y
Bompensiero	0.4	1.0	0.7	0.3224	y = 0.0385x + 0.1566

Analizzando i dati raccolti sia sull'altezza intersezione della chioma sia sulla larghezza della chioma per ogni sito, è possibile creare una curva di regressione con il medesimo tipo di grafico. I valori del coefficiente R², pur non essendo simili tra i vari siti, definiscono curve di regressione molto vicine e parallele tra loro, premettendo di costruire un grafico con una singola retta di regressione per l'altezza d'intersezione della chioma (Figura 31) come per la larghezza della chioma (Figura 32).



Figura 31 Distribuzione delle altezze inserimento chioma delle piante prelevate in relazione al diametro del fusto.



Figura 32 Distribuzione della larghezza chioma delle piante prelevate in relazione al diametro del fusto.

4.2. Risultati delle caratteristiche biomeccaniche

Dai dati raccolti riferiti all'aspetto biomeccanico dei campioni, si puó osservare che l'elasticitá decresce all'aumentare del diametro del fusto. Infatti dai seguenti grafici le piante aventi un diametro del fusto minore, cioè quelle piú giovani, sono quelle a cui corrispondono valori di elasticitá maggiori. Tale andamento è ben descritto nella Figura 33 di una funzione decrescente dall'andamento asintotico.



Figura 33 Andamento dell'elasticità in riferimento al diametro del fusto.

Per il sito di Urago d'Oglio è stata calcolata l'elasticità dai dati geometrici e biomeccanici mediante l'utilizzo della Formula 43, ottenendo valori che variano da 8.04 N·m⁻²·10⁸ a 45.1 N·m⁻²·10⁸ con (24.32 ± 10.2) N·m⁻²·10⁸ (Tabella 24).

Sezione	E min (N·m ⁻² ·10 ⁸)	E max (N·m ⁻² ·10 ⁸)	E media (N·m ⁻² ·10 ⁸)	R ²	Y
Urago d'Oglio	8.04	45.1	24.32	0.4877	$y = 43221x^{-2.55}$

Tabella 24 Valori di R² e Y per l'elasticità del sito di Urago d'Oglio.

Per il sito di Palazzolo sull'Oglio è stata calcolata l'elasticità dai dati geometrici e biomeccanici mediante l'utilizzo della Formula 43, ottenendo valori che variano da 9.36 N·m⁻²·10⁸ a 48 N·m⁻²·10⁸ con (28.4 ± 11.5) N·m⁻²·10⁸ (Tabella 25).

Tabella 25 Valori di R² e Y per l'elasticità del sito di Palazzolo sull'Oglio.

Sezione	E min (N·m ⁻² ·10 ⁸)	E max (N·m ⁻² ·10 ⁸)	E media (N·m ⁻² ·10 ⁸)	R ²	Y
Palazzolo sull'Oglio	9.36	48	28.4	0.41	$y = 2886.9x^{-1.63}$

Per il sito di Soncino è stata calcolata l'elasticità dai dati geometrici e biomeccanici mediante l'utilizzo della Formula 43, ottenendo valori che variano da 7.98 N·m⁻²·10⁸ a 48.5 N·m⁻²·10⁸ con (26.18 ± 13.55) N·m⁻²·10⁸ (Tabella 26).

Tabella 26 Valori di R^2 e Y	per l'elasticità del sito di Soncino.
--------------------------------	---------------------------------------

Sezione	E min (N·m ⁻² ·10 ⁸)	E max (N·m ⁻² ·10 ⁸)	E media (N·m ⁻² ·10 ⁸)	R ²	Y
Soncino	7.98	48.5	26.18	0.3288	$y = 624.31x^{-1.1}$

Per il sito di Grosotto è stata calcolata l'elasticità dai dati geometrici e biomeccanici mediante l'utilizzo della Formula 43, ottenendo valori che variano da 5.28 N·m⁻²·10⁸ a 48.75 N·m⁻²·10⁸ con (13.45 ± 9.37) N·m⁻²·10⁸ (Tabella 27).

Sezione	E min (N·m ⁻² ·10 ⁸)	E max (N·m ⁻² ·10 ⁸)	E media (N·m ⁻² ·10 ⁸)	R ²	Y
Grosotto	5.28	48.75	13.45	0.5989	$y = 1978.2x^{-1.594}$

Tabella 27 Valori di R² e Y per l'elasticità del sito di Grosotto.

Per il sito di Breno è stata calcolata l'elasticità dai dati geometrici e biomeccanici mediante l'utilizzo della Formula 43, ottenendo valori che variano da 4.39 N·m⁻²·10⁸ a 28.27 N·m⁻²·10⁸ con (12.91 ± 6.87) N·m⁻²·10⁸ (Tabella 28).

Tabella 28 Valori di R² e Y per l'elasticità del sito di Breno

Sezione	E min (N·m ⁻² ·10 ⁸)	E max (N·m ⁻² ·10 ⁸)	E media (N·m ⁻² ·10 ⁸)	R ²	Y
Breno	4.39	28.27	12.91	0.0801	$y = 64.74x^{-0.537}$

Per il sito di Bompensiero è stata calcolata l'elasticità dai dati geometrici e biomeccanici mediante l'utilizzo della Formula 43, ottenendo valori che variano da 3.0 N·m⁻²·10⁸ a 48.7 N·m⁻²·10⁸ con (35.6 ± 11.8) N·m⁻²·10⁸ (Tabella 29).

Tabella 29 Valori di R² e Y per l'elasticità del sito di Bompensiero.

Sezione	E min (N·m ⁻² ·10 ⁸)	E max (N·m ⁻² ·10 ⁸)	E media (N·m ⁻² ·10 ⁸)	R ²	Y
Bompensiero	3	48.7	35.6	0.6554	$y = 32251x^{-2.616}$

Nella Figura 34 è possibiile osservare le differenze in valori delle mediante di elasticitá dei vari siti. Nel caso dei siti di Grosotto e Breno sull'Adda si puó notare come le medie di elasticitá risutlino molto inferiori rispetto a quelli dei campioni prelevati sull'Oglio.



Figura 34 Box plot raffigura la distribuzione dei valori di elasticità.

4.3. Risultati analisi della varianza ANOVA

Dai dati ottenuti è stato necessario verificare l'applicabilità del metodo statistico ANOVA, verificando se le assunzioni di normalità, omoschedasticità e indipendenza dei punteggi osservati fossero rispettate.

È stato utilizzato il test di normalità di Shapiro-Wilk per verificare la normalità:

W = 0.35382, p-value <
$$2.2 \cdot 10^{-16}$$
.

Dai risultati si è ottenuto un p-value inferiore a 0.05, quindi ipotesi non nulla, ovvero l'assunzione di normalità non è stata soddisfatta.

Per il calcolo dell'omogeneità delle varianze è stato utilizzato il test di omogeneità di Levene:

$$F = 2.21$$
, p-value = 0.05551.

È stato ottenuto un valore del p-value poco superiore a 0.05, quindi ipotesi nulla, ovvero l'assunzione di omoschedasticità è stata soddisfatta.

Dai risultati ottenuti, ovvero dall'ipotesi non nulla di normalità e dalla presenza d'omoschedasticità, non è stato possibile utilizzare il metodo statistico ANOVA "ad una via", ma si è dovuto introdurre l'utilizzo del test di Kruskal-wallis:

chi-squared (
$$\chi^2$$
)= 86.758, df = 5, p-value < 2.2 $\cdot 10^{-16}$.

È stato ottenuto un p-value inferiore a 0.05, quindi i siti da cui sono stati presi i campioni mostrano valori medi statisticamente non uguali. In particolare, confrontano a due a due i gruppi si ottiene che (Tabella 31):
Comparison		Z	P. unadj	P. adj	H ₀
Bompensiero	Breno	6.463049	1.0E-10	1.5E-09	Rigettata
Bompensiero	Grosotto	6.236904	4.5E-10	6.2E-09	Rigettata
Breno	Grosotto	0.009293	9.9E-01	9.9E-01	Accettata
Bompensiero	Palazzolo	0.525568	6.0E-01	1.0E+00	Accettata
Breno	Palazzolo	-5.91764	3.3E-09	4.2E-08	Rigettata
Grosotto	Palazzolo	-5.71134	1.1E-08	1.3E-07	Rigettata
Bompensiero	Soncino	0.747368	4.5E-01	1.0E+00	Accettata
Breno	Soncino	-5.68747	1.3E-08	1.4E-07	Rigettata
Grosotto	Soncino	-5.48954	4.0E-08	4.0E-07	Rigettata
Palazzolo	Soncino	0.221799	8.2E-01	1.0E+00	Accettata
Bompensiero	Urago	1.979319	4.8E-02	3.3E-01	Accettata
Breno	Urago	-4.40901	1.0E-05	9.3E-05	Rigettata
Grosotto	Urago	-4.25759	2.1E-05	1.7E-04	Rigettata
Palazzolo	Urago	1.453751	1.5E-01	8.8E-01	Accettata
Soncino	Urago	1.231951	2.2E-01	1.0E+00	Accettata

Tabella 30 Confronto dei valori medi dei siti a due a due.

Nella Tabella 31 vengono mostrati quali confronti presentano un valore di p-value superiore a 0,05 rendendo l'ipotesi H_0 vera, questo si spiega perché i salici analizzati hanno un diametro differente (Figura 29) e quindi età differente. La rigidezza del fusto è molto influenzata dallo stadio evolutivo della pianta.

4.4. Discussione

Dai risultati di queste misurazioni è possibile verificare come il modulo di elasticità diminuisca all'aumentare del grado di maturità dei tessuti, dovuto in parte anche al minor contenuto di acqua; anche l'angolo di piegamento è superiore per gli internodi secchi rispetto a quelli in fase vegetativa.

Nel caso di vegetazione secca, i valori misurati sono comparabili con quelli del legno che, tra l'altro, non presenta differenze sensibili tra legno verde e secco, tale fattore è da tenere in considerazione per l'analisi di specie arbustive.

Per quanto riguarda la vegetazione arbustiva ed arborea i valori di elasticità per alcune specie tipiche delle aree ripariali (salice, frassino, ontano e acero). La tecnica utilizzata segue la normativa DIN 52186 che applica il principio di una trave semplicemente appoggiata su cui agiscono due carichi concentrati posti ad 1/3 e 2/3 della lunghezza complessiva della trave stessa (lo spezzone di ramo nel caso specifico). Il salice bianco (*Salix alba* L.), il salicone (*Salix caprea* L.) e l'ontano nero (*Alnus glutinosa* L.), presentano, a parità di diametro, un modulo elastico più piccolo rispetto a quello del frassino maggiore (*Fraxinus excelsior* L.) e acero montano (*Acer pseudoplatanus* L.), di conseguenza ci si aspetta che le prime specie offrano, rispetto alle seconde, una minore resistenza al flusso dovuta ad una contrazione della chioma. Il frassino in particolare risulta essere il più rigido tra le specie analizzate (tabella 5).

VALORI MECCANICI RELATIVI ALLA FLESSIBILITÁ							
	Alnus glutinosa	Fraxinus excelsior	Salix alba	Salix caprea	Acer pseudoplatanus		
Numero misure	82	85	54	17	57		
Modulo elastico (N/mm ²)	6879,64	10237,28	6267,77	7808,4	9533,89		
Tensione di rottura (N/mm ²)	37,577	58,176	40,147	48,463	67,744		
Deformazione di rottura	0,018	0,023	0,018	0,025	0,022		
Deformazione nel modulo elastico	0,005	0,006	0,006	0,006	0,007		
Deformazione nel Modulo plastico	0,012	0,017	0,011	0,019	0,015		
Rapporto modulo Plastico/elastico	2,23	3,09	1,73	2,96	2,09		

Tabella 31 valori meccanici relativi alla flessibilità per le specie sopra arboree elencate. (Chiaradia, 2006).

I risultati relativi al grado di elasticità, ottenuti dall'analisi dei dati campionati nei vari siti (Tabella 31), risultano essere più piccoli rispetto a quelli raccolti da altri autori (Tabella 30). Questa differenza è dovuta al fatto che la raccolta dei campioni è stata effettuata su un numero di individui minore e che l'analisi è stata appositamente effettuata su esemplari giovani, di un'unica specie (*Salix alba*), aventi un diametro inferiore ai 3 cm.

Tabella 32 Risultati sul grado di elasticità dei siti sul fiume Oglio e Adda.

Siti	Palazzolo sull'Oglio	Urago d'Oglio	Soncino	Breno	Grosotto	Bompensiero
Modulo elastico (N/mm ²)	2432.288	2840.197	2618.039	1345.114	1291.363	3562.866

Dalle analisi affrontate è possibile osservare come esiste una grande correlazione tra le caratteristiche geometriche (altezza pianta, altezza intersezione della chioma e larghezza della chioma) e biomeccaniche (forza alla resistenza di trazione e l'elasticità) con il diametro del fusto. Il diametro del fusto è un indicatore dello stadio di crescita della pianta, ovvero ne indica l'età, determinando, con un suo aumento, una variazione delle caratteristiche geometriche e biomeccaniche. L'aumentare del diametro del fusto corrisponde ad un accrescimento lineare delle altre caratteristiche geometriche, mentre ne determina, grazie anche al veloce aumento della rigidezza dovuto con la formazione della lignina, ad una diminuzione del valore di elasticità. Altri autori hanno preso in esame un numero maggiore di specie e diversi stadi vegetativi, mentre in questo studio è stata eseguita una raccolta di misure che vadano a descrivere le caratteristiche di un'unica specie il salice bianco (*Salix alba*) allo stadio giovanile della pianta, ovvero considerati come arbusti aventi un diametro del fusto inferiore ai 3 cm.

5. Conclusioni

Lo studio delle caratteristiche geometriche biomeccaniche essenziali per il calcolo della resistenza idraulica esercitata dalla vegetazione arbustiva, che presenta un notevole grado di elasticità dei tessuti con conseguenti modificazioni della forma della chioma, quando questa è sottoposta ad una corrente è stato oggetto di studio di questo tirocinio. Esistono molte relazioni empiriche elaborate da vari autori che si propongono di descrivere i vari effetti della vegetazione in alveo che, tuttavia, richiedono un grande quantitativo di dati. Dallo studio effettuato, sono state considerate quattro caratteristiche geometriche e una biomeccanica. Le caratteristiche geometriche sono; l'altezza della pianta, l'altezza dell'intersezione della chioma e la larghezza della chioma misurate mediante un metro, mentre per le caratteristiche biomeccaniche è stata misurata la forza di resistenza alla trazione in Newton mediante un dinamometro Meilen.

Sono stati prodotti dei modelli empirici che mettono in relazione le varie grandezze geometriche e biomeccaniche raccolte con il diametro del fusto. Da tali modelli sono state ottenute delle relazioni empiriche robuste, misurate mediante l'utilizzo del coefficiente di regressione R². Quindi è stato possibile, mediante l'utilizzo dell'analisi della varianza, riguardante l'analisi della variabilità interna ai gruppi con la variabilità tra i gruppi, confrontare i vari dati dei singoli siti con quelli degli altri. Da tali dati è stato verificato che la rigidezza dipenda, più che da sito a sito, dal diametro del fusto e quindi dallo stadio evolutivo della pianta.

I dati raccolti, inoltre, rappresentano un essenziale dataset per una specie in stadio giovanile per l'applicazione di formulazioni sul calcolo della scabrezza. Tuttavia, è stato, necessario per ottenere i fattori determinanti la scabrezza, introdurre il coefficiente di Manning, che, anche in questo caso, per tali analisi sono state prese in considerazione numerose equazioni che si basano su differenti ipotesi relativamente alla distribuzione nella sezione di portate, velocità, forze e tensioni. Per il calcolo del modulo di elasticità, è stato utilizzato quello della trave infissa, che ha permesso di ottenere dei risultati soddisfacenti. Per il calcolo della scabrezza si è tenuto conto della

relazione che lega il coefficiente di resistenza, alle caratteristiche del moto (velocità e tirante) a quelle di elasticità.

Bibliografia

Pasche, E., & Rouvé, G. (1985). Overbank flow with vegetatively roughened flood plains. Journal of Hydraulic Engineering, 111(9), 1262-1278.

Cox. (1973). "Effective hydraulic roughness for channels having bed roughness different from bank roughness". Misc. Paper H-73-2, U.S. Army Corps of Engineers W.E.S. Vicksburg.

Colebatch, G.T. (1941). "Model tests on the Lawrence Canal roughness coefficients." J. Inst.Civil Eng. Australia, 13(2), 27-32.

Einstein, H.A. (1934). "Der hydrauliske oder profil-radius.", Schweizerische Bauzeitung, Zurich, 103(8), 89-91.

Felkel, K. (1969). "Gemessene abflusse in gerinnen mit weidenbewuchs." Mitteilungen der BAW, Heft 15, Karlsruhe, Germany.

Yen, B.C. (1991). "Hydraulic resistance in open channels.", in Channel Flow Resistance: Centennial of Manning's Formula, Water resource Publications, Highlands Ranch, Colo., 1-135.

Lotter, G.K. (1933). "Soobrazheniia k Gidravlicheskomu Raschetu Rusel s Razlichnoi Sherokowatostiiu Stenok. (Considerations on hydraulic design of channels with different roughness of walls.)" Izwestiia Vsesoiuznogo Nauchno-Issledovatel'skogo Instituta Gidrotekhniki (Trans. All-Union Sci. Res. Inst. Hydraulic Eng.), Leningrad, Vol. 9, 238-241.

Ida, Y. (1960). "Steady flow in wide channel – on the effect of shape of its cross section." (In Japanese) Tarns. Jpn. Soc. Civ. Eng., 69 (3-2), 1-18.

Ree, W. O., & Palmer, V. J. (1949). Flow of water in channels protected by vegetative linings (No. 967). US Department of Agriculture.

U.S.-S.C.S. (1966). "Handbook of channel design for soil and water conservation." SCD-TP-61.

Bhattarai, R., & Dutta, D. (2007). Estimation of soil erosion and sediment yield using GIS at catchment scale. Water Resources Management, 21, 1635-1647.

Baiamonte, G. (2001). Un approccio teorico per la determinazione della legge di resistenza al moto in alvei granulari a fondo fisso. L'ACQUA, 1, 7-18.

Ghetti, A. (2004). "Idraulica. Seconda edizione." Ed. Libreria Cortina Padova.

Kouwen, N., Unny, T. E., & Hill, H. M. (1969). Flow retardance in vegetated channels. Journal of the Irrigation and Drainage Division, 95(2), 329-342.

Gourly, M.R. (1970). Discussion of "Flow resistance in vegetated channels" by Kouwen N., Unny T.E., Hill H.M., Proc. ASCE, J. Of Irrigation and Drainage Division, 96(3), 351-357, citato in Carollo et al., 2001.

Chiarardia E.A. (2006). Indagini sull'interazione tra vegetazione arbustiva e deflusso in alveo, ai fini della difesa e della riqualificazione del territorio agro-forestale, Istituto di Idraulica Agraria (tesi di dottorato, Università degli Studi di Milano).

Bray, D. I. (1979). Estimating average velocity in gravel-bed rivers. Journal of the Hydraulics Division, *105*(9), 1103-1122.

D'Odeigne, OC (2018). Caratterizzazione dell'evoluzione morfologica di un fiume soggetto a rapide inondazioni ad Haiti (tesi di dottorato, Università Cattolica di Lovanio).

Plate, E. J., & Quraishi, A. A. (1965). Modeling of velocity distributions inside and above tall crops. Journal of Applied Meteorology and Climatology, 4(3), 400-408.

Kouwen, N. (1988). Field estimation of the biomechanical properties of grass. Journal of Hydraulic Research, 26(5), 559-568.

Petryk, S. and Bosmajian, G.B. III (1975). "Analysis of flow through vegetation." J. Hydraul. Div., ASCE 101 (7), 871–884.

Righetti, M., & Romano, G. P. (2004). Particle–fluid interactions in a plane near-wall turbulent flow. Journal of Fluid Mechanics, 505, 93-121.

Biermann, F. (2022). Earth system governance. In Routledge Handbook of Global Environmental Politics (p. 283). Routledge.

Urso, T. (2008). Caratteristiche morfo-anatomiche del legno di salice con particolare riferimento al salice bianco. Annali, 56, 45-51.

AdBPo. (2004). Studio di Fattibilità della Sistemazione Idraulica del fiume Oglio nel tratto da Sonico alla confluenza in Po e del suo affluente Cherio dal lago di Endine alla confluenza; del fiume Mella da Brozzo alla confluenza in Oglio, del fiume Garza dalla confluenza Valle del Loc alla confluenza in Chiese e del fiume Chiese da Gavardo alla confluenza in Oglio.

AdBPo. (2003). Linee generali di assetto idrogeologico e quadro degli interventi sul bacino dell'Adda sotto lacuale.

Ringraziamenti

Al termine del mio lavoro ritengo importante ringraziare le persone che mi hanno accompagnato economicamente ed affettivamente in questi tre anni di studio, in particolare, i miei genitori, mio fratello, la nonna Velia, la zia Loredana, Ester e tutti gli amici.

Uno specifico ringraziamento al mio relatore il Prof. Alessio Cislaghi che si è dimostrato fino all'ultimo disponibile nel fornirmi consigli, spunti per valorizzare al meglio le mie capacità ed infine il supporto necessario per portare a termine questo mio lavoro.