



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PALERMO

Dottorato D009 - Ingegneria Civile, Ambientale e Dei Materiali
Dipartimento di Ingegneria Civile, Ambientale, Aerospaziale, Dei Materiali (DICAM)
Settore Scientifico Disciplinare: Ingegneria Idraulica e Ambientale
Anno Accademico: 2017/2018

STUDIO DELL'INTERAZIONE CORRENTE-VEGETAZIONE IN UN ALVEO MEANDRIFORME DI ELEVATA AMPIEZZA IN PRESENZA DI VEGETAZIONE SOMMERSA MATURA E NON ED AL VARIARE DELLA DISTRIBUZIONE

IL DOTTORE
Ing. Alice Di Leonardo

IL COORDINATORE
Prof.ssa Antonina Pirrotta

IL TUTOR
Prof.ssa Donatella Termini

*Ringrazio in modo particolare la mia famiglia e Luca,
per avermi sostenuta e supportata sempre, anche nei
momenti difficili. E' grazie a loro se oggi sono riuscita
a raggiungere questo importante traguardo.*

INDICE

SOMMARIO	3
ABSTRACT	5
1. INTRODUZIONE	7
2. CLASSIFICAZIONE E CARATTERIZZAZIONE DELL'APPARATO RADICALE DELLA VEGETAZIONE	11
2.1 Classificazione e parametri identificativi delle radici	11
2.2 Condizioni di crisi di rottura delle radici	16
3. APPARATO SPERIMENTALE E CARATTERISTICHE DELLA VEGETAZIONE	19
3.1 Apparato sperimentale e prove effettuate	19
3.2 Caratteristiche della vegetazione utilizzata nelle prove sperimentali	23
3.2.1 <i>Caratterizzazione della vegetazione utilizzata nella prima fase</i>	24
3.2.2 <i>Caratterizzazione della vegetazione utilizzata nella seconda fase</i>	51
4. STUDIO SPERIMENTALE DEI PROCESSI DI INTERAZIONE CORRENTE-VEGETAZIONE	55
4.1 Presenza di vegetazione matura uniformemente distribuita	55
4.1.1 <i>Condizioni della prova ed osservazioni sperimentali</i>	55
4.1.2 <i>Evoluzione del processo di degradazione della vegetazione matura</i>	60
4.2 Presenza di vegetazione distribuita ad isole	74
4.2.1 <i>Generalità</i>	74
4.2.2 <i>Caratterizzazione delle prove effettuate</i>	76
5. DISCUSSIONE ED ANALISI DEI RISULTATI	79
5.1 Generalità	79
5.2 Vegetazione matura uniformemente distribuita	79
5.3 Vegetazione distribuita ad isole	90

6. CONCLUSIONI	99
7. BIBLIOGRAFIA	103
LISTA DEI SIMBOLI	109
LISTA DELLE FIGURE	115
LISTA DELLE TABELLE	118

SOMMARIO

La vegetazione presente nei corsi d'acqua naturali esercita notevole influenza nell'ambiente fluviale. Essa infatti consente di preservare la biodiversità della flora e della fauna e, per mezzo del sistema radicale, rinforza le sponde e le isole presenti lungo il corso d'acqua. Il comportamento idraulico della vegetazione è influenzato a sua volta dall'azione della corrente defluente che, soprattutto nei primi stadi di sviluppo, ne causa il degrado e la successiva erosione.

Una delle sfide della comunità scientifica in quest'ambito è quindi quella di identificare le interazioni mutue tra la corrente e la vegetazione. Tali processi di interazione sono però influenzati da molteplici fattori come, ad esempio, le caratteristiche fisiche e geometriche della vegetazione, il range di portata in cui defluisce la corrente, la morfologia fluviale, le proprietà fisiche del terreno e l'età della vegetazione che ne influenza anche l'architettura radicale.

Per questo motivo lo studio dei processi di interazione corrente-vegetazione è piuttosto complesso.

Alla luce di quanto detto, nel presente lavoro l'attenzione è stata focalizzata su due elementi caratteristici della vegetazione: l'età e la sua distribuzione spaziale. Lo studio è stato condotto in due fasi: in una prima fase sono state investigate le condizioni di degradazione della vegetazione uniformemente distribuita e nella condizione matura, sottoposta all'azione della corrente; nella seconda fase si è voluto analizzare come l'eterogenea distribuzione della vegetazione sul fondo possa influenzare le caratteristiche idrodinamiche della corrente.

L'analisi è stata condotta facendo riferimento a dati raccolti in un canale meandriforme di laboratorio realizzato presso il dipartimento DICAM dell'Università degli Studi di Palermo. In particolare, nella prima fase dello studio, in presenza di vegetazione reale, matura e uniformemente distribuita nel fondo del canale, si è voluta focalizzare l'attenzione su due aspetti: da una parte si è voluto analizzare come la variazione di curvatura del canale possa influenzare sia la tipologia di crescita della vegetazione che lo sviluppo del suo apparato radicale, identificando le caratteristiche geometriche e meccaniche della stessa vegetazione e dei suoi apparati radicali in diverse sezioni lungo la curva; dall'altra parte si è voluto analizzare il processo erosivo della stessa vegetazione matura sotto l'azione della corrente, effettuando una prova sperimentale per valori crescenti di portata. I risultati ottenuti hanno messo in luce che il processo erosivo della vegetazione varia lungo curva. In particolare, nelle aree limitrofe alla sezione di apice, dove l'apparato radicale è caratterizzato da una

resistenza meccanica inferiore a quella delle sezioni di inflessione, il processo erosivo è particolarmente evidente. Tale comportamento può essere legato al fatto che in tale zona sono stati rilevati apparati radicali con una minore resistenza a rottura, un minore ingombro ed una elevata densità radicale. Inoltre, in tale zona sono stati registrati valori elevati del tirante idrico. Ciò conferma che, come rilevato nella letteratura di settore (Hussner et al., 2009), gli apparati radicali più resistenti sono quelli in cui si hanno valori del tirante idrico più elevati.

Nella seconda fase del lavoro si è voluto analizzare come la distribuzione spaziale della vegetazione possa modificare le caratteristiche cinematiche della corrente. A tal fine è stata condotta nel canale meandriforme una prova sperimentale considerando sul fondo dello stesso canale la vegetazione (questa volta artificiale) distribuita secondo una configurazione a due isole allineate (corrispondente ad un fattore di copertura pari al 10%). Durante tale prova sperimentale sono state rilevate le componenti di velocità longitudinale e verticale della corrente lungo profili di misura opportunamente scelti nella sezione di apice. Analizzando le distribuzioni verticali della media temporale delle componenti di velocità e le distribuzioni dei prodotti medi temporali $\overline{v'_X v'_X}$, $\overline{v'_X v'_Z}$ e $\overline{v'_Z v'_Z}$ (dove v'_X e v'_Z sono rispettivamente le componenti longitudinali e verticali di fluttuazione turbolenta), è stato possibile verificare che all'interno delle isole vegetate le componenti di velocità assumono valori inferiori rispetto a quelli ottenuti nelle aree non vegetate, inoltre nelle aree di passaggio dalle zone non vegetate a quelle vegetate le caratteristiche cinematiche della corrente sono fortemente influenzate dalla fluttuazione delle cime degli steli vegetati. Ciò suggerisce che la presenza delle isole influenza notevolmente le caratteristiche cinematiche della corrente e che occorre effettuare ulteriori indagini focalizzate all'individuazione della dinamica di fluttuazione degli steli vegetati.

ABSTRACT

Vegetation growing in rivers exerts considerable influence in the neighbouring environment. In fact, it allows us to preserve the river's biodiversity of flora and fauna and, thanks its roots system, it reinforces the banks and the islands. The hydraulic behaviour of the vegetation is, in turn, influenced by the action of the flow, which causes its degradation and its subsequent erosion, especially in the early development stages.

One of the challenges of the scientific community in this area is related to the identification of the mutual interactions between the flow and the vegetation. Such interactions are influenced by many factors such as the physical and the geometrical characteristics of the vegetation, the range of the flow rate, the river morphology, the physical properties of the soil and the age of the vegetation that also influences the roots architecture. For this reason, the study of the flow-vegetation interaction processes is rather complex.

In this context, in the present work attention is focused on two characteristics elements of the vegetation: its age and its spatial distribution. The study has been conducted in two phases: in the first phase, the degradation conditions of mature vegetation subjected to the action of the flow has been analysed; in the second phase the analysis has concerned how the heterogeneous distribution of the vegetation on the bed could affect the hydrodynamics characteristics of flow.

The analysis has been conducted by considering data collected in a meandering channel, constructed at the laboratory of Dipartimento DICAM- University of Palermo. In particular, in the first phase of the study, by considering the presence of real, mature and uniformly distributed vegetation on the bed, two aspects have been examined: on one hand, the effect due to the variation of curvature of the channel on the architecture of the vegetation roots has been analysed by identifying the geometric and the mechanical characteristics of the vegetation and of its roots system along the bend; on the other hand, we analysed the degradation of the vegetation under the action of the flow, by conducting an experimental run for increasing values of the flow rate. The results have shown that the erosive process of the vegetation varies along the bend. In particular, in the areas adjacent to the apex section, where the roots systems are characterized by a mechanical resistance lower than that obtained on the inflection sections, the erosive process is particularly evident. This behaviour could be linked to the fact that in such an area the vegetation roots are characterized by low breaking strength, small roots size and high roots density. Furthermore, close to the apex section high values of the water depths were also recorded. This confirms that, according to

literature (Hussner et al., 2009), the more resistant roots are those where high values of water depth occur.

In the second phase of the work, we analysed how the spatial distribution of the vegetation could modify the kinematic characteristics of the flow. To this end, an experimental run was carried out in the meandering channel, by considering artificial vegetation on the bed distributed as two aligned patches (corresponding to a coverage factor of 10%). During the experimental run, the longitudinal and the vertical flow velocity components were measured along vertical profiles opportunely selected at the apex section. By analysing the vertical distributions of the time-averaged velocity components and of the terms $\overline{v'_X v'_X}$, $\overline{v'_X v'_Z}$ e $\overline{v'_Z v'_Z}$ (where v'_X and v'_Z are respectively the longitudinal and vertical components of the turbulent fluctuation and the overbar indicates the time averaging) it has been verified that, within the vegetated patches, the flow velocity assumes values lower than those obtained in non-vegetated areas. Moreover, in the transition between the non-vegetated areas to the vegetated ones the kinematic characteristics of the flow are strongly influenced by the fluctuation of the vegetation's foliage. This suggests that the presence of the vegetation patches strongly influences the kinematic characteristics of the flow. Further investigations should be carried out focusing the attention on the identification of the fluctuating dynamics of the vegetated stems.

1. INTRODUZIONE

La vegetazione presente nei corsi d'acqua esercita notevole influenza nell'ambiente fluviale. Essa, infatti, influenza le caratteristiche cinematiche della corrente, migliora il trattenimento di sedimenti sospesi e, grazie al suo sistema radicale, contribuisce a rinforzare le proprietà meccaniche del substrato con la conseguente riduzione dell'erodibilità delle sponde e delle isole presenti lungo il corso d'acqua (Gurnell, 2013; Camporeale et al., 2013). Il comportamento idraulico della vegetazione, a sua volta, è influenzata, soprattutto nei primi stadi di sviluppo, dall'azione della corrente defluente; se l'azione di trascinamento della corrente supera la resistenza di ancoraggio delle radici, la vegetazione viene estirpata e ciò contribuisce a destabilizzare il fondo e le sponde del corso d'acqua (Pollen, 2007).

Una delle sfide della comunità scientifica in quest'ambito è quella di identificare le interazioni tra i processi evolutivi del corso d'acqua e quelli della vegetazione. Tali processi di interazione sono però influenzati da molteplici fattori che sono di tipo idrologico (legati quindi alla portata di deflusso della corrente), di tipo geometrico (legati alla morfologia fluviale), di tipo fisico e meccanico (legati ad esempio alle caratteristiche fisiche e meccaniche della vegetazione) o ancora di tipo geologico (legati alla composizione e alla granulometria del terreno) e che ne rendono complesso lo studio.

Soprattutto negli ultimi anni del 20° secolo, sono state condotte diverse ricerche sperimentali, sia in campo che in laboratorio, con lo scopo di valutare le interazioni mutue tra la vegetazione e le dinamiche evolutive dei processi fluviali. Ad esempio, Perona et al. (2012) hanno analizzato l'effetto di disturbi periodici, indotti da eventi di piena, di costante magnitudo e durata, nel processo di crescita delle radici della vegetazione acquatica. I risultati sperimentali hanno evidenziato che tali disturbi generano un meccanismo selettivo di rottura in base alle caratteristiche fisiche e meccaniche delle radici. Soprattutto in condizioni di vegetazione appena germinata, la frequenza degli eventi di piena influenza notevolmente la vita della stessa. Mettendo a confronto il tempo compreso tra eventi di piena consecutivi (t_h) e il tempo di maturazione della vegetazione necessario affinché l'apparato radicale resista all'evento (t_b), Perona et al. (2012) hanno osservato che se è $t_h/t_b < 1$ (cioè nel caso di eventi molto frequenti) il meccanismo di degradazione e rottura della vegetazione può interessare l'intera biomassa germinata; al contrario, con eventi poco frequenti (e quindi per $t_h/t_b > 1$) l'azione di trascinamento della corrente può anche non causarne l'estirpamento.

Uno dei parametri più importanti nel valutare l'evoluzione dei processi di degradazione della vegetazione è l'età della stessa. Essa, infatti, influenza notevolmente le caratteristiche geometriche (il diametro e la lunghezza) delle radici e l'architettura radicale. Come mostrano Edmaier et al. (2011), la tipologia di rottura della vegetazione giovane è diversa rispetto a quella della vegetazione matura. In particolare, nel caso di vegetazione giovane la rottura avviene nel momento in cui l'azione di trascinamento della corrente (denominata in Fig.1.1 con $\vec{D}$) supera l'azione di ancoraggio della radice al suolo (denominata in Fig.1.1 con $\vec{R}$); nel caso invece di vegetazione matura, caratterizzata da un'architettura di radici nettamente più complessa e quindi da una forza di ancoraggio generalmente superiore alla forza di trascinamento della corrente, il processo di rottura è generalmente preceduto da un'erosione locale del fondo in prossimità della vegetazione (vedi schema di Fig.1.1b) che causa un indebolimento della forza di ancoraggio.

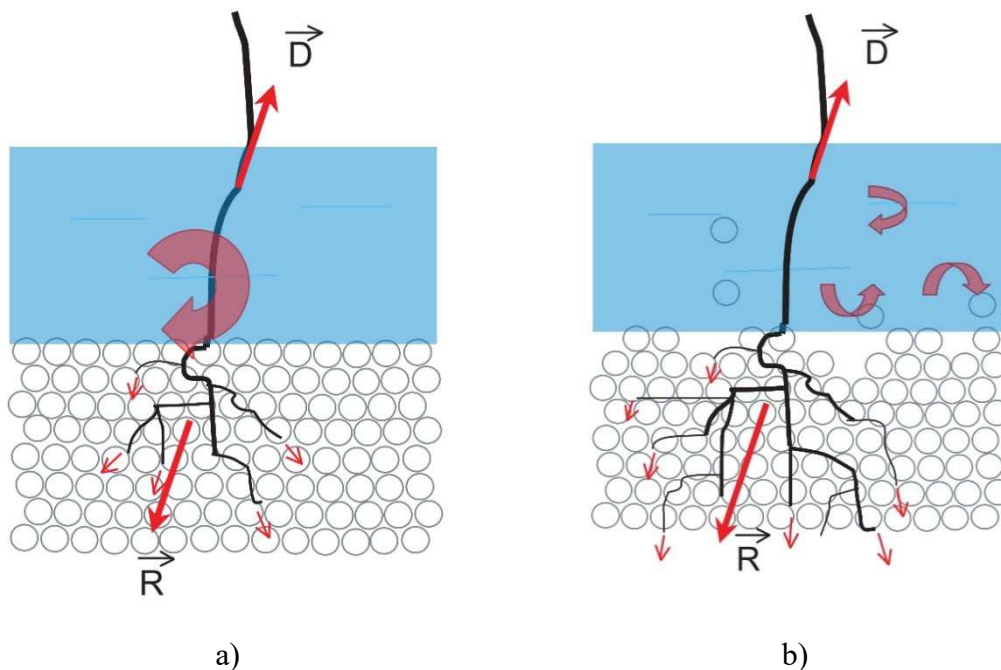


Fig. 1.1: Schematizzazione tipi di rottura (Edmaier et. al, 2011) della: a) vegetazione giovane; b) vegetazione matura

Diversi studi sono stati condotti sia in laboratorio (Ennos, 1989; Bailey et al., 2002; Mickovski et al., 2009; Schwarz et al., 2011) che in campo (Karrenberg et al., 2003; Tanaka & Yagisawa, 2009; Liu et al., 2011) al fine di caratterizzare la forza di ancoraggio delle radici nei diversi stati di crescita della vegetazione. Tali studi hanno consentito di verificare che la forza di ancoraggio delle radici al suolo dipende sia dalle loro caratteristiche fisiche e geometriche (la resistenza, il diametro, la lunghezza e l'architettura) che dalle proprietà del

terreno (Ennos & Pellerin, 2000; Dupuy et al., 2005; Genet et al., 2005; Pollen, 2007; Schwarz et al., 2010).

Gli studi sperimentali condotti in quest'ambito sono però limitati al caso di canali rettilinei. Pertanto, essi trascurano l'effetto della curvatura del canale che, invece, influenza notevolmente la distribuzione delle tensioni tangenziali sul fondo, come mostrano precedenti lavori di letteratura (vedi ad esempio Termini e Piraino, 2011; Termini, 2016).

Altro elemento da considerare nello studio dei fenomeni di interazione tra la corrente e la vegetazione è la distribuzione spaziale della stessa lungo i contorni dell'alveo fluviale. In particolare, nel passaggio dalle due condizioni estreme corrispondenti rispettivamente alla completa rimozione della vegetazione (matura e non) e alla crescita incontrollata della stessa, diversi possono essere i processi di interazione che si innescano e quindi diverse possono essere le conseguenze dal punto di vista ingegneristico. Infatti, nel caso di completa rimozione della vegetazione sia le sponde che il fondo del canale sono soggette ad una forte azione erosiva della corrente; nel caso, invece, di eccessiva colonizzazione di vegetazione, si ha una notevole diminuzione di velocità della corrente con un conseguente innalzamento del livello della superficie libera e pericolo di esondazione dei centri abitati limitrofi. Nelle condizioni intermedie fra i suddetti estremi, la vegetazione si presenta distribuita in modo eterogeneo sul fondo, formando anche isole vegetate sparse.

Diversi studi sono stati effettuati con l'obiettivo di analizzare gli effetti della vegetazione (distribuita in isole o uniformemente con diversi gradi di concentrazione) sui processi idrodinamici (Carollo et al., 2005; James et al., 2001; James e Makoa 2006; Bhembé e Pandey, 2006; Fisher, 1993). Anche la posizione mutua tra le piante può influenzare i processi idrodinamici; ad esempio, come verificato da Ming e Shen (1973), la tipologia di distribuzione della vegetazione a monte può modificare l'entità dell'azione di trascinamento nel tratto subito a valle.

Pertanto, la porzione di canale coperta dalla vegetazione (Kouwen, 1969; Fisher, 1992, Green 2005), chiamata in letteratura inglese come "blockage factor" (fattore di copertura) rappresenta un parametro importante da considerare. Ad esempio, Stone e Shen (2002), facendo riferimento a vegetazione rigida disposta in modo sfalsato, hanno verificato come tale disposizione offra maggiore resistenza rispetto alla disposizione allineata. Nikora et al. (2008), indagando l'effetto delle caratteristiche della vegetazione sulla resistenza idraulica in cinque fiumi in Nuova Zelanda, per fattori di copertura compresi fra il 40% ed il 100%,

hanno verificato come la variazione della concentrazione della vegetazione influenzi notevolmente le caratteristiche idrodinamiche della corrente.

Alla luce di quanto detto, nel presente lavoro l'attenzione è stata focalizzata su due aspetti principali che influenzano i processi di interazione fra la corrente e la vegetazione. In una prima fase lo studio è stato mirato alla valutazione delle condizioni di degradazione della vegetazione matura, distribuita uniformemente sul fondo, quando viene sottoposta all'azione della corrente. Successivamente si è voluto analizzare come la distribuzione a isole della vegetazione sul fondo possa influenzare le caratteristiche idrodinamiche della corrente.

Per le suddette analisi si è fatto riferimento a un canale meandriforme di laboratorio, realizzato presso il Dipartimento di Ingegneria Civile, Ambientale, Aerospaziale, dei Materiali (DICAM) dell'Università degli Studi di Palermo. In particolare, nella prima fase dello studio si è considerato il caso di una vegetazione reale e matura; nella seconda fase dello studio è stata utilizzata invece vegetazione artificiale opportunamente distribuita sul fondo.

Nel Capitolo 2 è riportata una breve revisione letteraria sulle metodologie di classificazione delle radici della vegetazione, che sarà utilizzata nello studio del processo di degradazione della "vegetazione matura". L'apparato sperimentale è descritto nel Capitolo 3, dove sono anche descritte le caratteristiche geometriche e meccaniche delle due tipologie di vegetazione utilizzata. Nel Capitolo 4 sono descritte le prove sperimentali condotte nelle due fasi di studio. Nel Capitolo 5 sono discussi i risultati ottenuti durante le campagne sperimentali. Infine le conclusioni sono riportate nel Capitolo 6.

2. CLASSIFICAZIONE E CARATTERIZZAZIONE DELL'APPARATO RADICALE DELLA VEGETAZIONE

2.1 Classificazione e parametri identificativi delle radici

Come è noto, le radici della vegetazione acquatica svolgono un ruolo fondamentale nel mantenimento biologico dell'ambiente fluviale. Esse infatti da una parte influenzano la coesione, l'aerazione e l'attività biologica del suolo ed in particolare della rizosfera (Waisel et al., 2002; Bertin et al., 2003) in quanto forniscono una fonte di carbonio al suolo ed altre importanti sostanze nutritive; dall'altra parte le radici garantiscono l'assorbimento di acqua e nutrienti, oltre che l'ancoraggio della vegetazione al suolo (Ennos, 1989; Mickosvski et al., 2007). Mentre l'assorbimento dell'acqua è regolato dal potenziale idrico ed il conferimento dei nutrienti è governato dalla domanda metabolica della pianta (Nye & Tinker, 1969), l'ancoraggio della vegetazione al suolo è influenzato (a parità di tipologia di vegetazione) dalle caratteristiche geometriche delle radici e, quindi, dalla loro lunghezza e spessore, e dall' "architettura radicale" che ne definisce la distribuzione al suolo (Gregory, 2006).

Per la classificazione dell'architettura radicale sono state proposte in letteratura diverse metodologie. Kostler et al. (1968), facendo riferimento al caso di vegetazione matura, hanno individuato tre classi di apparati radicali (vedi Fig.2.1) in funzione della tipologia di organizzazione delle radici primarie e secondarie. In particolare Kostler et al. (1968) hanno indicato le seguenti classi:

Classe 1) (Taproots): in cui ricadono le radici con sviluppo prevalentemente monoassiale (Fig.2.1a), costituite da poche radici primarie con orientamento verticale da cui si diramano le radici secondarie

Classe 2) (Plate roots): in cui ricadono le radici con sviluppo poliassiale (Fig.2.1b), costituite quindi da diverse radici principali che si sviluppano orizzontalmente e da cui si diramano le radici secondarie

Classe 3) (Heart roots): in cui ricadono le radici con sviluppo poliassiale che si sviluppano, quindi, sia verticalmente che orizzontalmente (Fig.2.1c)

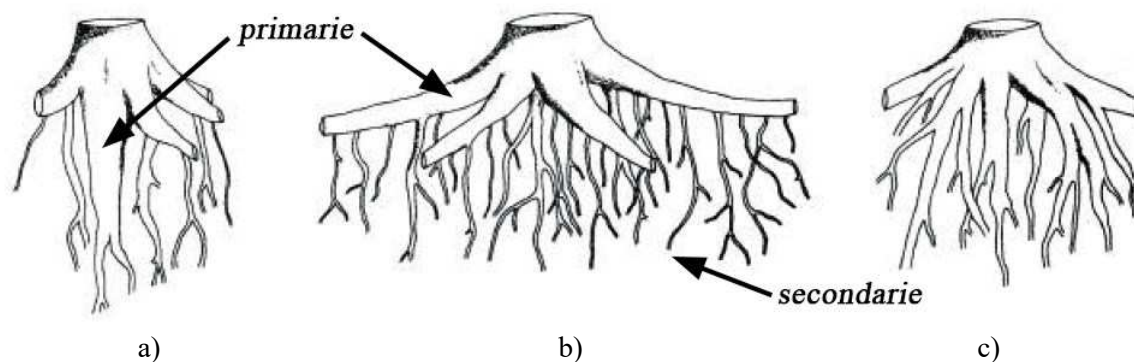


Fig.2.1: Illustrazione di un esempio di: a) taproots; b) plate roots; c) heart roots

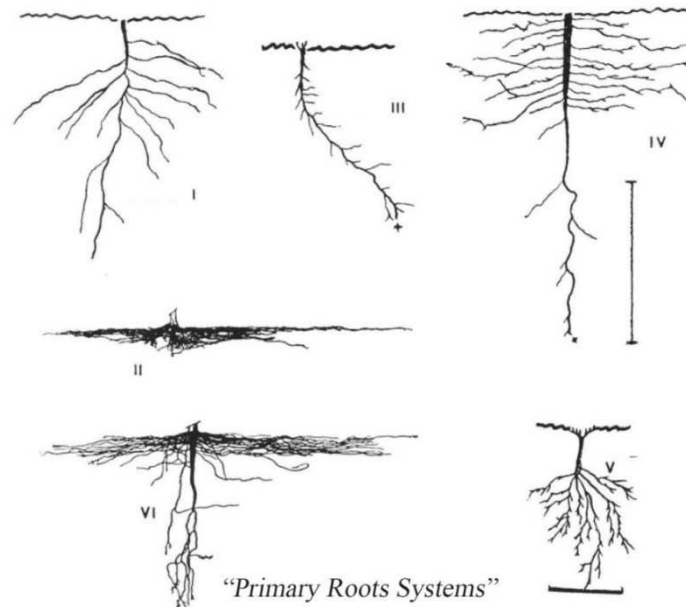
Cannon (1949) hanno proposto, invece, di distinguere due classi di apparati radicali:

Classe 1 (Primary roots systems): in cui ricadono gli apparati “monoassiali”, caratterizzati da una radice primaria da cui si diramano le radici secondarie (tipologie I, II, III, IV e V di Fig.2.2a)

Classe 2 (Adventitious roots systems): in cui ricadono gli apparati “poliassiali”, costituiti da diverse radici principali con vari orientamenti da cui si diramano le radici secondarie (tipologie VI, VII, VIII, IX e X di Fig.2.2b)

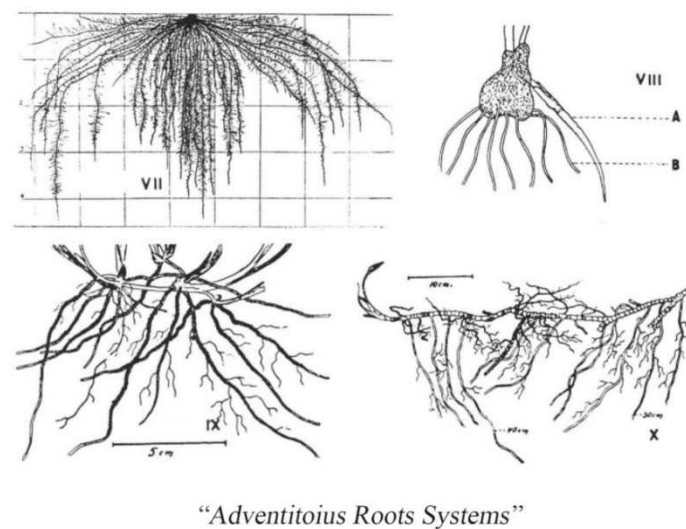
Le suddette metodologie di classificazione delle radici, quindi, legano la tipologia della ramificazione alla tortuosità delle radici, che rappresenta il rapporto fra la lunghezza della radice e la distanza lineare fra le due estremità della stessa (Popova et al., 2016).

Classe 1



a)

Classe 2



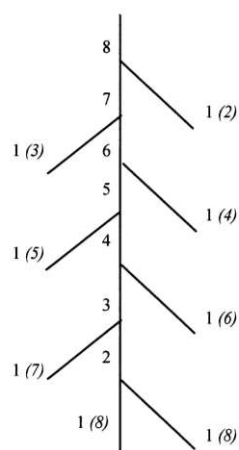
b)

Fig. 2.2: Classificazione di radici secondo Cannon (1949): a) Sistemi “Primary roots”: da I a VI; b) Sistemi “Adventitious roots”: da VII a X

Tali metodi di classificazione però non hanno avuto molto successo applicativo a causa della grande variabilità spaziale delle radici stesse che quindi rende difficile l’associazione di un particolare sistema radicale ad una singola classe.

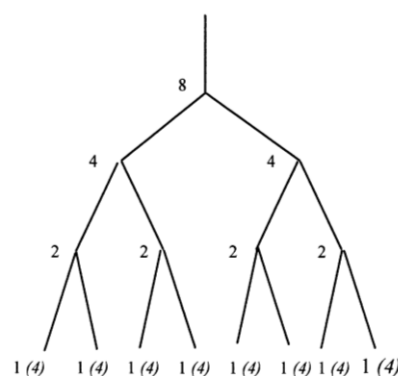
Per questo motivo, Fitter et al. (1987) hanno proposto un metodo di classificazione del sistema radicale basato sulla ramificazione delle radici interne ed esterne. Le prime sono

caratterizzate dal fatto di avere entrambi gli apici radicali connessi ad altre radici, le seconde invece sono connesse tramite un solo apice. In questo modo, la ramificazione di qualsiasi sistema radicale può essere descritta da due indici topologici, chiamati nella letteratura inglese come “Magnitude (M)”, che identifica il numero di radici esterne (Fig.2.3a) e “Altitude (A)”, che identifica il numero di tratti in cui può essere suddiviso il percorso radicale più lungo, essendo ciascun tratto delimitato fra due intersezioni consecutive fra il percorso radicale stesso e le radici secondarie. Ad esempio, il sistema radicale mostrato in Fig.2.3a è caratterizzato da otto radici esterne secondarie ($M=8$) e da una radice primaria che può essere suddivisa in otto tratti ($A=8$). Tale sistema presenta quindi una forma a spina di pesce (chiamata in letteratura inglese “herringbone branching”), che è simile a quelle delle tipologie I, III e IV proposte da Cannon (1949) di Fig. 2.2. Il secondo sistema radicale, mostrato in Fig.2.3b invece, è caratterizzato da otto radici esterne ($M=8$) e da uno sviluppo poliassiale in cui, partendo dalla sommità del sistema, tutti i percorsi radicali sono uguali e costituiti da quattro tratti ($A=4$). Quindi la ramificazione di quest’ultimo sistema viene identificata come dicotomica in quanto originata dalla biforcazione di una radice (in inglese “dichotomous branching”) e presenta una forma simile a quelle dei sistemi radicali identificati da Cannon (1949) come “adventitious roots systems” (Fig.2.2).



Herringbone branching:
 $M = 8$ ($A = 8$)

a)



Dichotomous branching:
 $M = 8$ ($A = 4$)

b)

Fig.2.3: Schematizzazione delle tipologie di ramificazione: a) “Herringbone branching”; b) “Dichotomous branching” (Bouma et al., 2001)

Alcune ricerche di letteratura hanno messo in evidenza che la tendenza della vegetazione a sviluppare sistemi radicali con ramificazione del tipo “herringbone” o del tipo “dichotomous” è condizionata dalla frequenza con cui essa viene investita durante eventi di piena. Bouma et al. (2001), ad esempio, hanno osservato che, a parità di specie erbacea, i sistemi radicali del tipo “Herringbone branching” tendono a svilupparsi quando si hanno bassi apporti di sostanze nutritive e nel caso di inondazioni poco frequenti. I sistemi radicali del tipo “Dichotomous”, invece, tendono a crescere in luoghi più inondati e quindi più ricchi di sostanze nutritive.

Altri autori hanno suggerito di classificare l'apparato radicale utilizzando parametri che invece sono legati alla densità delle radici. Ad esempio, è stato utilizzato il parametro “Root Area Ratio” (RAR), che rappresenta l'area di suolo occupata dalle radici per unità di superficie (De Baets et al., 2008) o il parametro “Root Length Density” (RLD), che identifica il rapporto fra la lunghezza delle radici ed il volume di ingombro dell'intero sistema radicale (De Baets et al, 2008; Li et al., 1991; Dube et al., 2014).

Recentemente, sono anche stati elaborati specifici codici di calcolo che permettono di quantificare i parametri di classificazione dell'architettura radicale attraverso l'analisi delle immagini. A parte alcuni codici a pagamento, come WinRHIZO (Arsenault et al., 1995), ve ne sono diversi open source e quindi personalizzabili dall'utente. Questi ultimi però spesso consentono una parziale identificazione dei parametri identificativi degli apparati radicali. Uno dei più comuni programmi open source è “SmartRoot”, che consente di stimare il grado di ramificazione dell'apparato radicale trasformando l'immagine dell'apparato stesso in immagine vettoriale (Lobet et al., 2011). Un altro software open source è “ARIA” (Automatic Root Image Analysis) che, nonostante permetta di analizzare diversi parametri di architettura radicale, come l'ingombro dell'intero apparato e la lunghezza ed il diametro delle radici, presenta il limite di analizzare solo tre radici per volta (Pace et al. 2014). Infine, il software “DIRT” (Digital Imaging Root Traits) permette solo di misurare la lunghezza, la forma e il diametro di singole radici (Bucksch et al., 2014), non consentendo quindi un'analisi globale dell'apparato. “Gia Roots” (General Image Analysis of Roots) è uno dei pochi software open-source (Galkovskyi et. al, 2012), implementato in C++, estensibile e personalizzabile dall'utente. Tale codice permette di ricavare diversi parametri dell'architettura radicale in modo automatico, analizzando contemporaneamente migliaia di immagini. I parametri individuati possono essere raggruppati nelle seguenti cinque classi: ingombro dell'architettura radicale, ellisse di contenimento, numero di radici, caratteristiche geometriche delle radici e densità radicale.

Sulla base di quanto detto, nel presente lavoro è stato utilizzato il codice “Gia Roots” per analizzare l’apparato radicale della vegetazione matura utilizzata nella prima fase del lavoro, come verrà spiegato più in dettaglio nella sezione “Architettura radicale” del paragrafo 3.2.1.

2.2 Condizioni di crisi di rottura delle radici

La capacità della vegetazione acquatica nel resistere all’azione di trascinamento della corrente dipende dalla forza di ancoraggio del suo apparato radicale al suolo, la cui identificazione è particolarmente complessa a causa delle molteplici variabili in gioco (Ennos & Pellerin, 2000; Dupuy et al., 2005; Genet et al., 2005; Pollen, 2007; Schwarz et al., 2010). In letteratura sono stati proposti diversi metodi che consentono di sintetizzare le condizioni di crisi del sistema radici-terreno. Ad esempio, Ennos (1990) suggerisce che il sistema può entrare in crisi per tre motivi: rottura delle radici, sradicamento delle radici dal suolo e cedimento del terreno. Focalizzando l’attenzione sul primo meccanismo, Ennos (1990) propone di calcolare la resistenza a rottura del sistema radicale composto da n radici di diametro D_r come:

$$F_r = n\pi D_r^2 \sigma_r \quad (2.1)$$

dove σ_r è la tensione a rottura del sistema radicale, il cui valore, a parità di specie di vegetazione, varia notevolmente a livello stagionale, spaziale e temporale.

Per i motivi sopra esposti, per calcolare la tensione di rottura e l’elasticità del sistema radicale, si ricorre spesso ad effettuare test a trazione o test di sradicamento, sia in laboratorio (Ennos, 1989; Bailey et al., 2002; Mickovski et al., 2009; Schwarz et al., 2011) che in campo (Karrenberg et al., 2003; Liu et al., 2011). L’elasticità del sistema radicale viene definita per mezzo del modulo di Young E , che si ottiene come output dalle macchine a trazione utilizzate in laboratorio.

Per mezzo dei test a trazione è possibile indagare la resistenza a trazione delle radici al variare delle loro caratteristiche fisiche e geometriche, ovvero al variare del loro spessore, della loro lunghezza, della loro elasticità e della loro tortuosità. Sottoponendo quindi a trazione radici appartenenti a diverse specie erbacee, alcuni autori (Yang et al., 2016; Cheng et al., 2004) hanno osservato che la resistenza cresce all’aumentare dello spessore ed al diminuire della lunghezza (De Baets et al., 2008; Zhang et al., 2012). Inoltre la stima dell’elasticità delle radici, definita dal Modulo di Young, è caratterizzata da un elevato range

di incertezza (Ennos, 1989; Goodman, 2005) a causa del grado di umidità delle radici. In particolare, le radici secche tendono ad essere più rigide e fragili, le radici umide, invece, sono caratterizzate da un alto potenziale di elongazione ed elasticità (Goodman, 2005). Si è anche osservato che la tortuosità delle radici può contribuire a falsare la stima del modulo di Young. Commandeur e Pyles (1991), infatti, hanno osservato che, durante il test a trazione, il valore del Modulo di Young può variare sensibilmente soprattutto nel momento in cui la radice inizia a stirarsi allineandosi con il carico.

Pertanto, alcuni autori hanno analizzato la resistenza allo sradicamento del sistema radicale effettuando dei test chiamati in letteratura inglese “pullout test”, al variare delle proprietà geometriche del sistema stesso (morfologia, distribuzione spaziale al suolo, densità delle radici, angolo di inclinazione delle radici e grado di ramificazione) e delle proprietà del terreno (granulometria e umidità). A risultato di ciò è stato verificato (Ali, 2013) che gli apparati radicali con radici secondarie inclinate di 45° rispetto alla radice principale sono caratterizzati da una maggiore resistenza allo sradicamento rispetto a quelli con radici laterali perpendicolari alla radice principale; inoltre, maggiore è il grado di ramificazione o il “Root Length Density”, maggiore è la forza necessaria per estirpare la radice dal suolo (Schwarz et al, 2010; Lee et al., 2017; Normaniza et al., 2011). Attraverso “pullout test” per diversi gradi di umidità e di granulometria del terreno, è stato anche possibile verificare che è necessaria una forza maggiore per sradicare un apparato radicale dal suolo asciutto rispetto che dal suolo bagnato (Ennos, 1990; Schwarz et al., 2011) e che la resistenza allo sradicamento decresce all’aumentare della dimensione dei sedimenti (Edmaier et al., 2014). Le suddette prove sono state effettuate nell’ipotesi semplificativa che alla resistenza allo sradicamento contribuiscano tutte le radici del sistema (Ennos, 1993). In realtà, a causa di possibili vuoti nel terreno o in casi di eccessiva tortuosità delle radici, tale condizione in genere non si verifica.

Da quanto sopra esposto emerge come l’identificazione delle condizioni di rottura delle radici e l’effetto dei diversi parametri su tali condizioni è ancora oggi un importante aspetto da investigare.

3. APPARATO SPERIMENTALE E CARATTERISTICHE DELLA VEGETAZIONE

3.1 Apparato sperimentale e prove effettuate

Al fine di analizzare i processi di interazione corrente-vegetazione in diverse fasi di crescita della stessa lungo la curva, sono state condotte prove sperimentali in un canale di laboratorio realizzato presso il dipartimento di Ingegneria Idraulica, Civile, Aerospaziale e dei Materiali (DICAM) dell'Università degli Studi di Palermo. Il canale ha uno sviluppo meandriforme e segue la curva sine-generated con un angolo di deflessione alla sezione di inflessione $\theta_0 = 110^\circ$; la larghezza del canale è costante e pari a $B = 0.5$ m, mentre la lunghezza in asse del canale è pari a circa 28 m (vedi Fig.3.1). Le pareti sono in plexiglass trasparente di spessore pari a 3 mm e altezza pari a circa 0.67 m. Nelle campagne sperimentali oggetto del presente lavoro è stata posta particolare attenzione alle sezioni 1, 2, 3, 4, 5 di Fig.3.1.

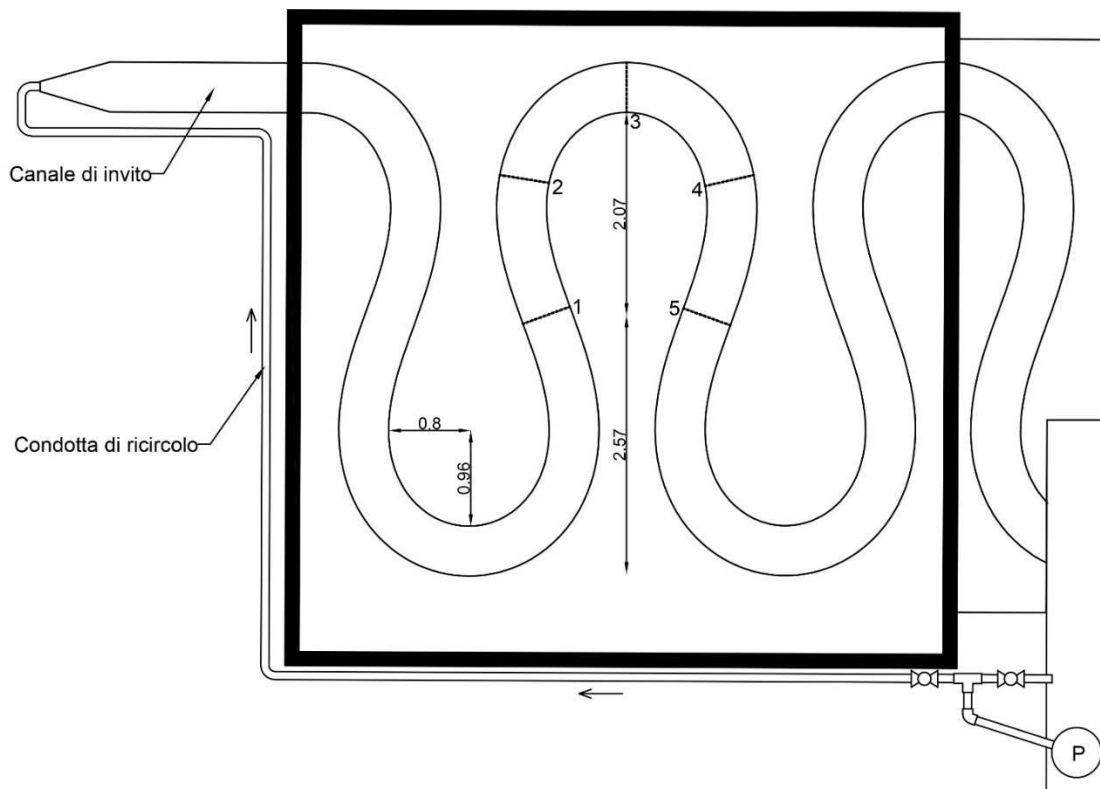


Fig.3.1: Planimetria del canale sperimentale

Il canale è alimentato a circuito chiuso tramite una pompa del tipo Flygt 3085-183, sommersa nella vasca di valle che, attraverso la condotta di ricircolo, immette la corrente al canale rettilineo di invito, corredato di opportune scabrezze per dissipare la forte energia della corrente stessa.

Come indicato in Introduzione, l'attività sperimentale è stata condotta in due fasi. Nella prima fase del lavoro è stata condotta una prova sperimentale con fondo deformato (precedentemente ottenuto come configurazione di equilibrio in una prova a fondo mobile) e ricoperto di vegetazione reale, matura, flessibile e distribuita uniformemente con una densità di 200 steli/dm^2 . Tale vegetazione è del tipo *Festuca arundinacea*, una specie di angiosperme monocotiledoni appartenente alla famiglia delle *Poaceae* (o *Gramineae*) e allo stato della prova si trovava nella condizione “matura”, dopo essere stata in precedenza impiantata nel canale ed aver subito il deflusso della corrente con una portata di 12 l/s (vedi Termini, 2016). In Fig. 3.2 è mostrata la foto di un tratto del canale coperto da vegetazione matura.

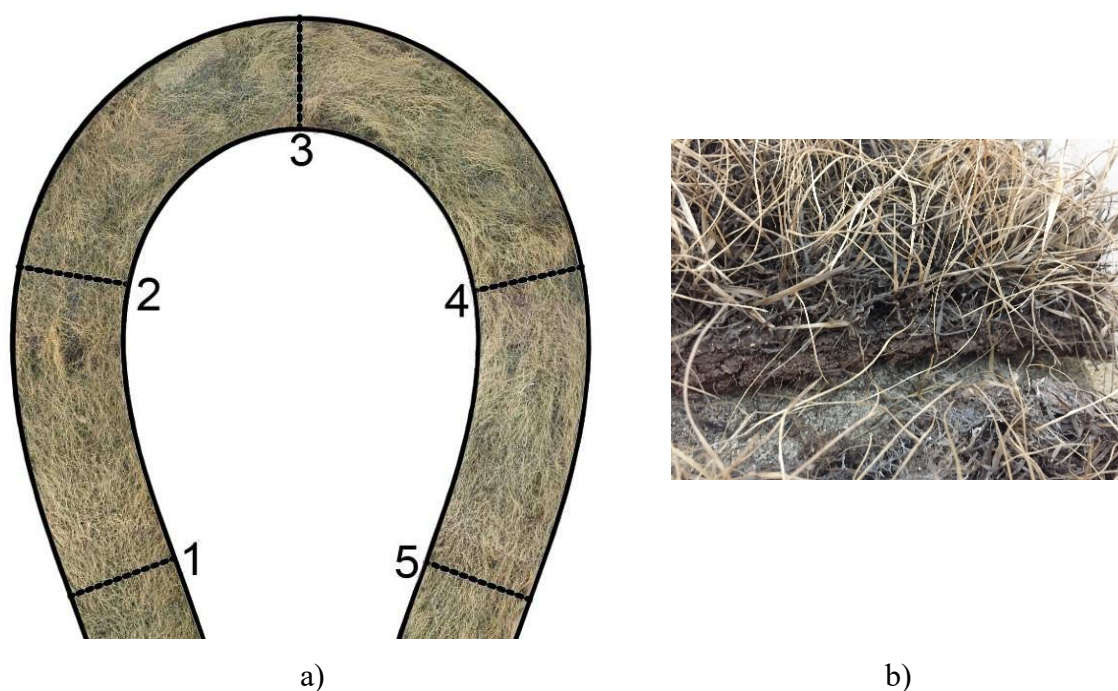


Fig. 3.2: a) Tratto di canale studiato nella prima fase del presente lavoro; b) Particolare della vegetazione matura presente

L'obiettivo della campagna sperimentale condotta in questa fase è quindi quello di analizzare le condizioni di degradazione ed estirpamento di tale vegetazione per effetto del deflusso della corrente.

Nella seconda fase del lavoro, si è invece voluto analizzare il caso di distribuzione della vegetazione a isole sul fondo dello stesso canale. A tal fine, per escludere gli effetti dovuti alla deformazione del fondo, esso è stato reso piano e con pendenza uniforme pari a 0.2% in asse. Al fine di assicurare l'immutabilità nel tempo delle caratteristiche geometriche e meccaniche della vegetazione, per la campagna sperimentale condotta in questa fase si è scelto di utilizzare una vegetazione artificiale flessibile, con caratteristiche flessionali paragonabili a quelle della "condizione giovane" della vegetazione reale utilizzata nella prima fase del lavoro. D'altra parte, come mostrano altri lavori di letteratura (Kouwen e Unny, 1973; Nikora et al. 2013) la vegetazione artificiale può presentare un comportamento simile alla vegetazione naturale anche per ciò che concerne il movimento e la piegatura degli steli.

La vegetazione artificiale adottata è costituita da cespugli disposti secondo una griglia regolare e composti da un numero costante di steli. In Fig. 3.3 è mostrata la foto di un campione di vegetazione (Fig.3.3a) e del singolo cespuglio (Fig.3.3b) con indicazione degli assi di riferimento del singolo stelo (assi w ed l rispettivamente lungo la larghezza e lungo l'altezza del singolo stelo).



Fig.3.3: Vegetazione artificiale utilizzata per le prove: a) foto del campione; b) foto del singolo cespuglio con indicazione degli assi di riferimento del singolo stelo

Inoltre, sul fondo stesso è stato posto un sistema a strappo (“Binder Band”) costituito da due componenti: un nastro a strappo in polipropilene fissato permanentemente al fondo del canale, chiamato “Pressogrip” ed una controparte in tessuto chiamata “Velour”, cucita alla base delle isole vegetate. In Fig. 3.4 è mostrata la foto del tratto di canale in esame, su cui è stato applicato il nastro a strappo “Pressogrip”.



Fig. 3.4: Tratto di canale studiato preso in esame nella seconda fase sperimentale

3.2 Caratteristiche della vegetazione utilizzata nelle prove sperimentali

Le caratteristiche geometriche e meccaniche della vegetazione utilizzata per ciascuna delle prove descritte al paragrafo precedente sono state determinate facendo riferimento a specifici campioni.

Nella prima fase del lavoro, considerando la vegetazione reale e matura presente, sono stati utilizzati alcuni campioni di zolle prelevati dal fondo vegetato in prossimità delle sponde delle sezioni in esame, come spiegato nel seguente paragrafo 3.2.1.

Per quanto riguarda la seconda fase del lavoro, sono stati considerati campioni di pianta quadrata $10 \times 10 \text{ cm}^2$ della vegetazione artificiale considerata, come indicato nel seguente paragrafo 3.2.2.

Le caratteristiche meccaniche dei campioni di vegetazione sono state determinate, in entrambi i casi, sottoponendo i campioni considerati a prove di trazione. A tal fine è stata utilizzata la macchina a trazione della Zwick/Roell, di cui dispone il laboratorio dei Materiali del dipartimento DICAM dell'Università di Palermo, mostrata in Fig.3.5. Tale macchina è dotata di una cella di carico di massimo 5 kN ed una risoluzione della forza di carico pari a 10^{-2} . Per mezzo del software di cui è dotata ("textExpert II") la macchina registra in tempo reale i dati di tensione, σ_T , e deformazione ε , in funzione dei dati di input che sono: la sezione trasversale iniziale, la distanza iniziale fra le due morse l_0 (vedi Fig.3.5), la velocità di traslazione della morsa superiore ed il valore della pretensione iniziale. Il software permette, altresì, di calcolare il modulo di Young E che consente di definire l'entità della deformazione elastica del materiale in seguito all'applicazione di uno sforzo. Tale valore viene ottenuto come coefficiente angolare della curva $\sigma_T - \varepsilon$ nella fase elastica o in base alla secante passante per due punti della stessa.



Fig. 3.5: Immagine della macchina a trazione utilizzata

3.2.1 Caratterizzazione della vegetazione utilizzata nella prima fase

a) Caratteristiche geometriche

Per valutare le caratteristiche geometriche della vegetazione matura sono state estratti dal fondo vegetato dieci campioni di zolle, in prossimità di entrambe le sponde delle sezioni di misura, come mostrato in Fig. 3.6.

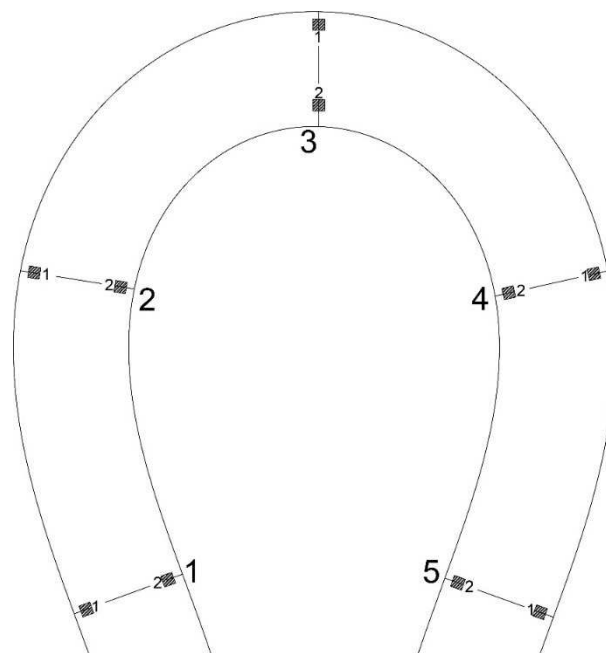


Fig.3.6: Planimetria con posizionamento delle zolle estratte

Ogni zolla è stata denominata con il numero della sezione corrispondente, seguito dal numero 1 se estratta in prossimità della sponda esterna, o dal numero 2 se estratta in prossimità della sponda interna. A titolo d'esempio, la zolla estratta dal canale in prossimità della sponda esterna della sezione 1 è stata denominata "zolla 1.1".

In Tab. 3.1 sono riepilogate le dimensioni d_x, d_y e d_z , rispettivamente lungo le direzioni x, y, z del sistema locale di riferimento della zolla con origine nell'angolo in basso della stessa, dove l'asse x è perpendicolare alla sezione relativa a ciascuna zolla, l'asse y è lungo la sezione stessa e l'asse z è verticale. In Fig.3.7a è mostrata la planimetria del canale con indicazione del sistema di riferimento x, y, z . Nella stessa figura è riportato il sistema di riferimento della sezione (X, Y, Z) con origine sulla sponda esterna (Fig.3.7a). Inoltre in Fig.3.7b è riportata, a titolo d'esempio, l'immagine della zolla 2.1 con indicazione delle dimensioni d_x, d_y e d_z .

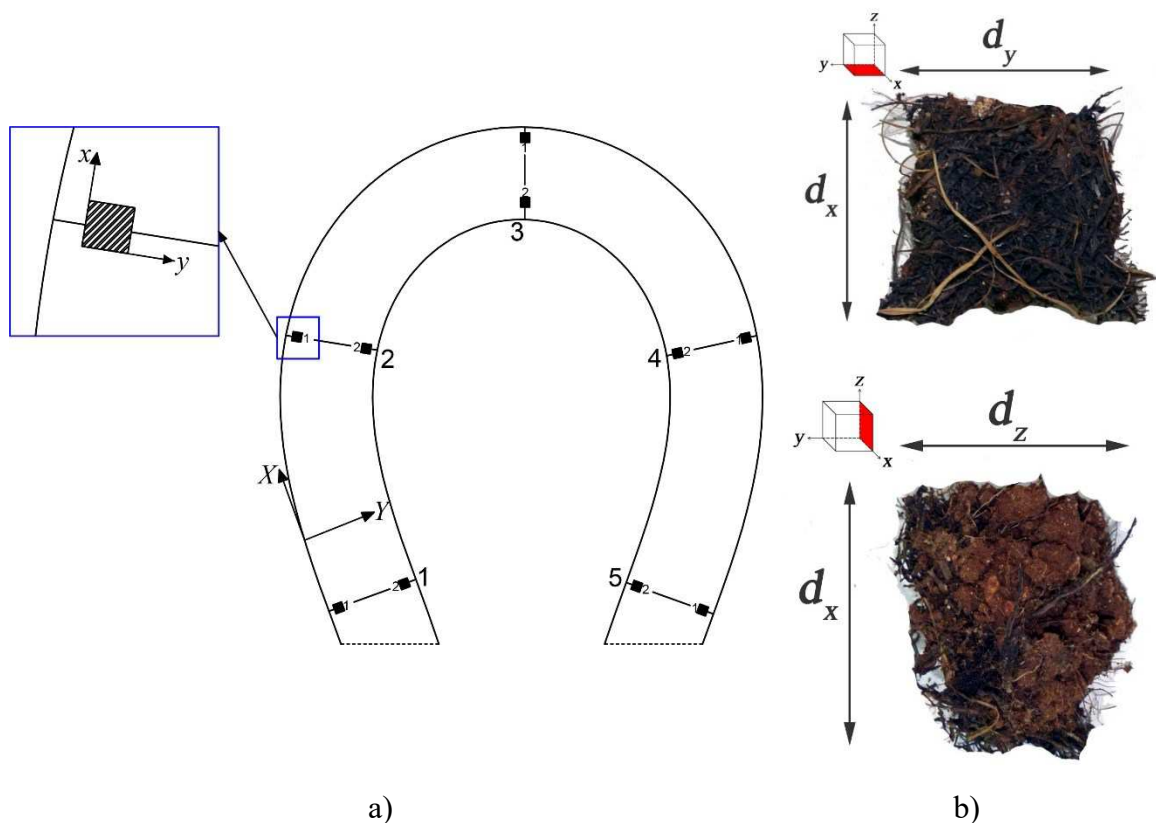


Fig.3.7: a) Planimetria del canale con indicazione delle terne di riferimento; b) Indicazione della direzione delle dimensioni d_x, d_y e d_z per la zolla 2.1

<i>Zolla</i>	$d_x (cm)$	$d_y (cm)$	$d_z (cm)$
1.1	4.5	3.5	3
1.2	5.5	4	3
2.1	5	5	4
2.2	4.5	4.5	3.5
3.1	5	3	4
3.2	3.5	4	3
4.1	4	4	4
4.2	4	4.5	4
5.1	4.5	4	4
5.2	4.5	4.5	4.5

Tab.3.1: Dimensioni delle zolle lungo le direzioni x, y, z

Successivamente, al fine di caratterizzare le radici di ciascuna zolla, sono state estratte circa dieci radici affioranti. Al fine di avere una rappresentazione spaziale delle radici per ciascuna zolla, la selezione di tali radici è stata effettuata discretizzando le singole zolle in aree di $2 \times 2 \text{ cm}^2$ e prelevando una radice rappresentativa dalle file centrali nelle due direzioni x, y del sistema di riferimento locale. Il rilievo della lunghezza delle radici è stato effettuato utilizzando una macchina fotografica Nikon con una risoluzione di 24 mp e analizzando le fotografie quotate lungo il piano $x-z$. Lo spessore delle stesse radici è stato rilevato con un calibro digitale con una tolleranza di 0.01 mm. A titolo d'esempio, in Fig. 3.8 è mostrata l'immagine quotata della zolla 4.1 (estratta dal fondo vegetato in corrispondenza della sponda esterna della sezione 4).

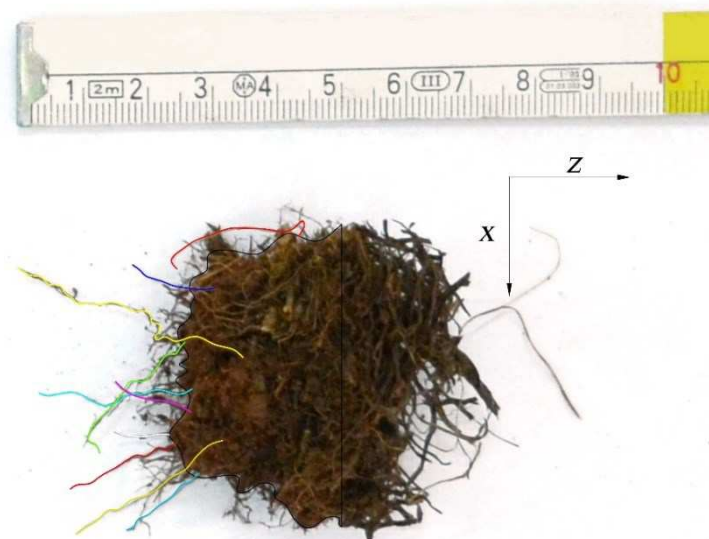


Fig. 3.8: Fotografia quotata della zolla 4.1 nel piano $x-z$

In Tab.3.2 sono riportate le lunghezze e gli spessori rilevati per ciascuna radice. Utilizzando tali valori è stato possibile valutare per ciascuna zolla il valore della lunghezza media $\overline{L_r}$ e dello spessore medio $\overline{S_r}$.

$$\overline{L_r} = \frac{\sum_{i=1}^{n_r} L_{r,i}}{n_r} \quad i = 1 \dots n_r \quad (3.1)$$

$$\overline{S_r} = \frac{\sum_{i=1}^{n_r} S_{r,i}}{n_r} \quad i = 1 \dots n_r \quad (3.2)$$

dove n_r è il numero di radici rilevate per ciascuna zolla ($n_r = 10$) e $L_{r,i}$ e $S_{r,i}$ sono i valori di lunghezza e spessore della radice i -esima.

<i>Lunghezza radici (mm)</i>										
	<i>Sponda esterna</i>					<i>Sponda interna</i>				
<i>i-esima radice</i>	<i>zolla 1.1</i>	<i>zolla 2.1</i>	<i>zolla 3.1</i>	<i>zolla 4.1</i>	<i>zolla 5.1</i>	<i>zolla 1.2</i>	<i>zolla 2.2</i>	<i>zolla 3.2</i>	<i>zolla 4.2</i>	<i>zolla 5.2</i>
1	12.854	14.168	26.725	26.992	5.109	17.858	38.511	10.138	11.043	31.509
2	12.333	8.656	23.624	13.686	7.282	16.173	15.670	15.137	19.137	17.721
3	16.900	15.636	25.175	42.947	4.913	9.805	14.606	7.578	10.334	17.271
4	15.222	17.776	24.399	25.514	6.563	8.116	20.851	10.646	6.339	12.942
5	14.778	9.880	24.787	25.208	8.423	11.485	20.354	10.029	11.266	13.399
6	14.346	14.013	24.593	12.878	18.604	18.474	11.636	12.297	16.862	14.489
7	20.219	10.053	25.520	8.936	9.074	12.171	23.232	9.122	14.604	12.585
8	9.224	8.899	25.057	18.748	5.768	10.125	22.929	7.675	20.365	14.034
9	12.694	13.562	25.288	27.558	6.253	7.772	17.042	11.659	11.937	13.597
10	10.479	18.244	26.578	14.664	13.680	14.761	22.112	8.430	15.551	22.380
$\overline{L_r} (mm)$	13.905	13.089	25.175	21.713	8.567	12.674	20.694	10.271	13.744	16.993

a)

<i>Spessore radici (mm)</i>										
	<i>Sponda esterna</i>					<i>Sponda interna</i>				
<i>i-esima radice</i>	<i>zolla 1.1</i>	<i>zolla 2.1</i>	<i>zolla 3.1</i>	<i>zolla 4.1</i>	<i>zolla 5.1</i>	<i>zolla 1.2</i>	<i>zolla 2.2</i>	<i>zolla 3.2</i>	<i>zolla 4.2</i>	<i>zolla 5.2</i>
1	0.150	0.200	0.140	0.100	0.170	0.150	0.080	0.160	0.130	0.130
2	0.160	0.210	0.160	0.050	0.290	0.190	0.125	0.250	0.120	0.170
3	0.080	0.340	0.045	0.070	0.100	0.170	0.160	0.170	0.320	0.130
4	0.090	0.090	0.048	0.110	0.280	0.080	0.140	0.090	0.190	0.170
5	0.090	0.260	0.046	0.050	0.240	0.150	0.040	0.170	0.150	0.160
6	0.140	0.240	0.030	0.060	0.240	0.060	0.060	0.280	0.190	0.260
7	0.170	0.250	0.038	0.080	0.180	0.030	0.160	0.050	0.190	0.210
8	0.110	0.053	0.044	0.090	0.137	0.160	0.140	0.040	0.140	0.240
9	0.095	0.073	0.057	0.200	0.140	0.160	0.130	0.170	0.107	0.240
10	0.152	0.182	0.052	0.140	0.126	0.260	0.220	0.160	0.108	0.190
$\overline{S_r} (mm)$	0.124	0.190	0.066	0.095	0.190	0.141	0.126	0.154	0.165	0.190

b)

Tab.3.2: Dimensioni delle radici: a) lunghezza (mm); b) spessore (mm)

Facendo riferimento a tali valori medi, per ciascuna zolla sono stati stimati gli errori della media $\delta_{L_r}^-$ e $\delta_{S_r}^-$ come:

$$\delta_{L_r}^- = \frac{\sigma_{L_r}}{L_r \sqrt{n_r}} \quad \delta_{S_r}^- = \frac{\sigma_{S_r}}{S_r \sqrt{n_r}} \quad (3.3)$$

dove σ_{L_r} e σ_{S_r} indicano le deviazioni standard rispettivamente dei valori della lunghezza e dei valori dello spessore delle radici.

In Tab.3.3 sono riportati i valori di $\delta_{L_r}^-$ e $\delta_{S_r}^-$ ottenuti per ciascuna zolla, espressi in percentuale rispetto alla lunghezza e allo spessore della radice *i-esima*. Da tale tabella si nota che, per la lunghezza media delle radici $\overline{L_r}$, i valori massimi di $\delta_{L_r}^-$ sono stati ottenuti in corrispondenza delle zolle 5.1 e 4.1, con valori rispettivamente pari al 15,28% e al 13,85%. Rispetto allo spessore medio delle radici $\overline{S_r}$, i valori maggiori di $\delta_{S_r}^-$ sono stati ottenuti in corrispondenza delle zolle 4.1 e 1.2, con valori rispettivamente pari al 14,68% e al 14,34%. Per le valutazioni effettuate in questa fase, errori di tale ordine di grandezza sono stati ritenuti accettabili.

<i>Sponda</i>	<i>Zolla</i>	$\delta_{L_r}^-$ (%)	$\delta_{S_r}^-$ (%)
<i>Esterna</i>	<i>1.1</i>	6.83	8.25
	<i>2.1</i>	8.16	10.45
	<i>3.1</i>	1.12	6.86
	<i>4.1</i>	13.85	14.68
	<i>5.1</i>	15.28	8.73
<i>Interna</i>	<i>1.2</i>	9.28	14.34
	<i>2.2</i>	10.68	12.70
	<i>3.2</i>	6.79	15.07
	<i>4.2</i>	9.48	9.36
	<i>5.2</i>	10.46	7.29

Tab.3.3: Errori $\delta_{L_r}^-$ e $\delta_{S_r}^-$ ottenuti per ciascuna zolla

Per valutare come e se la variazione di curvatura del canale in direzione longitudinale abbia influenzato la crescita della vegetazione e del suo apparato radicale, è stata analizzata la variazione delle caratteristiche geometriche medie delle radici delle zolle prelevate lungo il canale.

In Fig.3.9 è mostrato l'andamento delle grandezze $\overline{L_r}$ e $\overline{S_r}$ per le zolle prelevate lungo il canale. Tale figura mostra che l'andamento di $\overline{L_r}$ lungo la sponda esterna (Fig.3.9a) è opposto a quello ottenuto lungo la sponda interna. In particolare, lungo la sponda esterna si osserva che $\overline{L_r}$ assume valori bassi in corrispondenza della sezione 1 e della sezione 2, poi $\overline{L_r}$ cresce fino alla sezione 3, ove vi è il punto di massimo, per poi decrescere nuovamente fino alla sezione 5; lungo la sponda interna, $\overline{L_r}$ cresce fino alla sezione 2, poi decresce fino alla sezione 3, dove si ha un punto di minimo, e quindi cresce nuovamente fino alla sezione 5. Per quanto riguarda, invece, l'andamento di $\overline{S_r}$ al variare delle sezioni (Fig.3.9b), lungo la sponda esterna $\overline{S_r}$ cresce fino alla sezione 2, ove vi è un punto di massimo, per poi decrescere gradualmente fino alla sezione 4 (dove si ha un punto di minimo) e crescere nuovamente fino alla sezione 5; lungo la sponda interna l'andamento di $\overline{S_r}$ decresce gradualmente fino alla sezione 2, per poi crescere fino alla sezione 5.

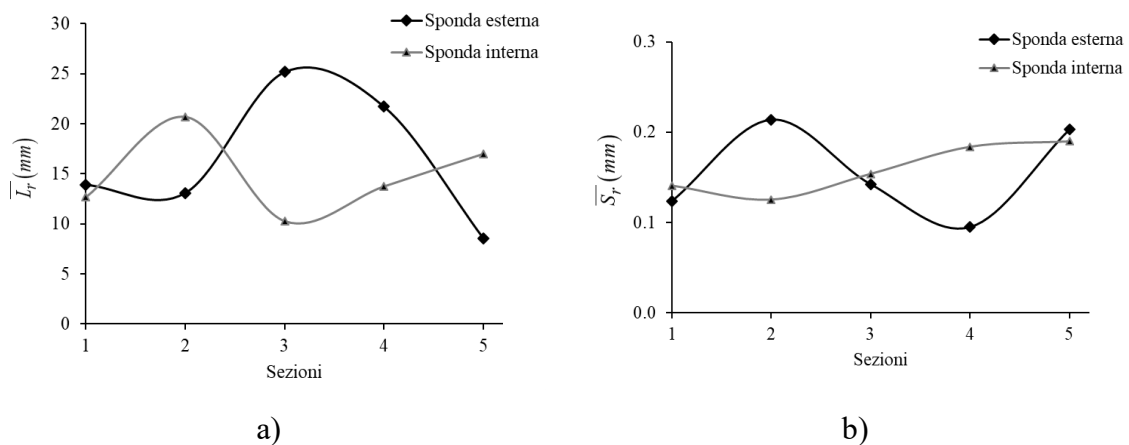


Fig.3.9: Andamento lungo il canale di: a) $\overline{L_r}$ (mm); b) $\overline{S_r}$ (mm)

Quindi $\overline{L_r}$ e $\overline{S_r}$ presentano un andamento opposto nella sponda interna e nella sponda esterna. Al fine di avere una rappresentazione planimetrica di $\overline{L_r}$ e $\overline{S_r}$, in Fig.3.10 sono riportate le mappe a curve di livello ottenute applicando, con il codice “Surfer”, il metodo di interpolazione “Kriging” (con valori di deviazione standard di 2,69 mm per la variabili $\overline{L_r}$ e 0,02 mm per la variabile $\overline{S_r}$; ai fini dell’interpretazione qualitativa della distribuzione planimetrica dei parametri geometrici rilevati, tali valori sono stati ritenuti accettabili). In tali mappe è anche indicata la curva congiungente le posizioni del canale caratterizzate da

elevati valori di $\overline{L_r}$ (Fig.3.10a) e di $\overline{S_r}$ (Fig.3.10b). Si nota che le radici tendenzialmente più lunghe sono state rilevate in corrispondenza delle posizioni 1.1, 2.2, 3.1, 4.1 e 5.2, mentre le radici più spesse (Fig.3.10b) si hanno in corrispondenza delle posizioni opposte ovvero le posizioni 1.2, 2.1, 4.2 e 5.1. Ciò conferma che, tendenzialmente, le radici più corte sono caratterizzate da più alti spessori mentre le radici più lunghe sono caratterizzate da spessori minori.

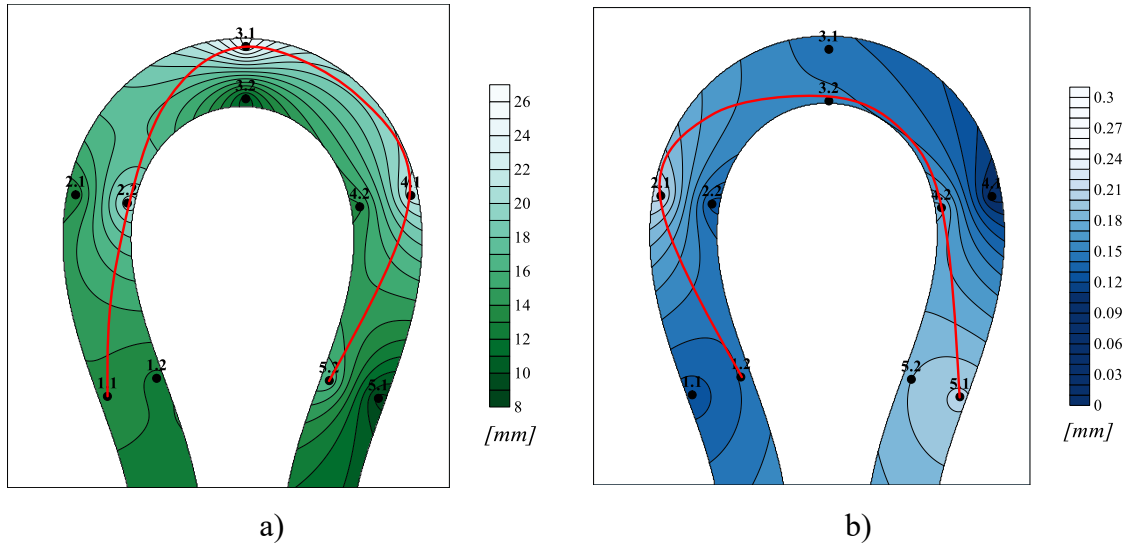


Fig.3.10: Mappe a curve di livello rispetto a: a) $\overline{L_r}$ (mm); b) $\overline{S_r}$ (mm)

Questo risultato è sintetizzato in Fig.3.11 dove sono riportati i valori dello spessore S_r rispetto alla lunghezza L_r di tutte le radici rilevate. Da tale figura si evince che lo spessore delle radici tende a diminuire all'aumentare della lunghezza.

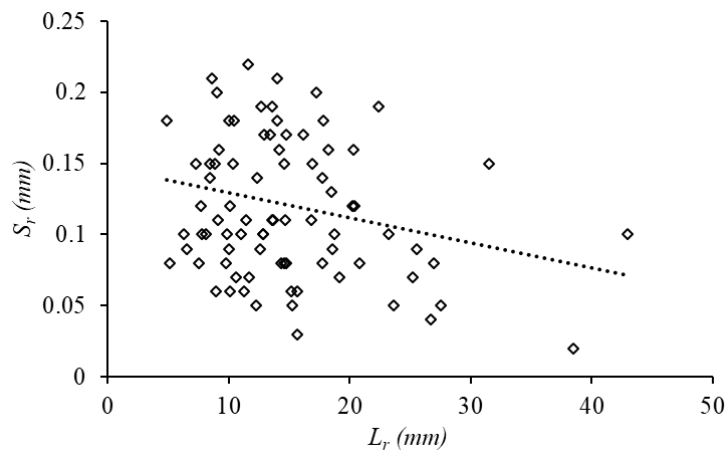


Fig. 3.11: Spessori delle radici di tutti i campioni rispetto alla lunghezza degli stessi

b) Caratteristiche meccaniche

Per valutare le caratteristiche meccaniche della vegetazione matura, le dieci radici considerate per ogni zolla sono state sottoposte a trazione. Esse, quindi, sono state disposte lungo due strisce adesive distanti 10 mm e sono state serrate alle due morse della macchina a trazione, poste ad una distanza verticale l_0 pari a 10 mm (vedi Fig. 3.12).

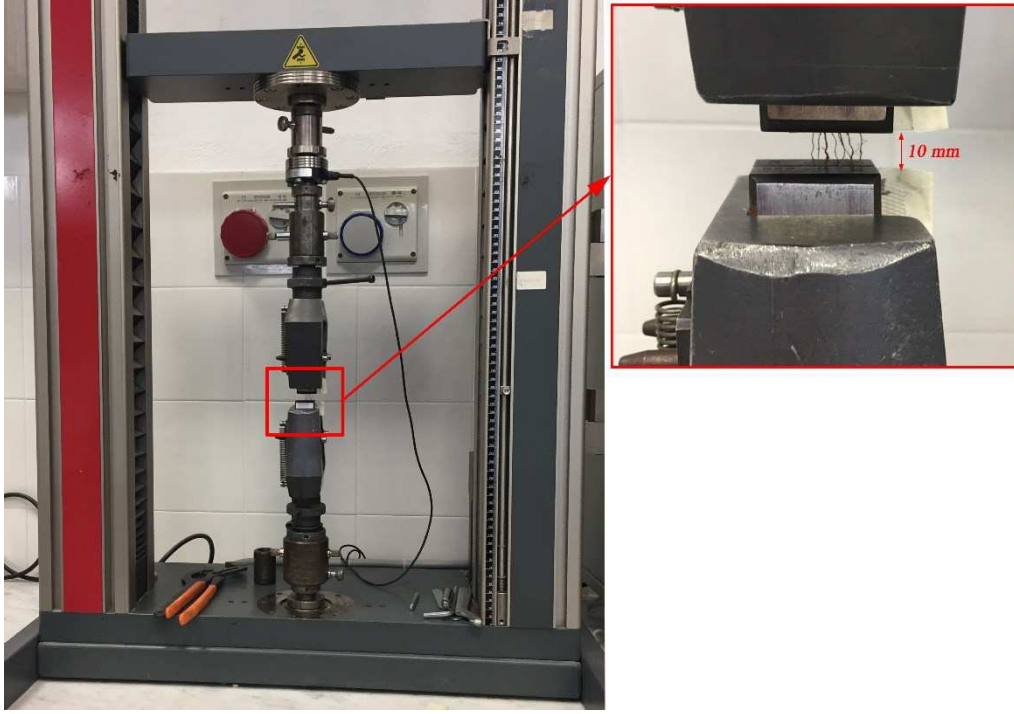


Fig. 3.12: Foto della macchina a trazione utilizzata con particolare del serraggio di un campione

La prova è stata avviata impostando una pretensione di 0.03 N ed una velocità di traslazione della morsa superiore pari ad 1 mm/min. Vista la natura filiforme dell'apparato radicale della vegetazione in esame, si è scelto di approssimare ciascuna radice ad un cilindro con diametro pari allo spessore S_r . Quindi, la sezione trasversale A_r di ciascun campione è stata ottenuta come sommatoria delle aree delle radici in esso contenute, ovvero come:

$$A_r = \sum_{i=1}^{n_r} \pi \times \frac{S_{r,i}^2}{4} \quad i = 1 \dots n_r \quad (3.4)$$

In Fig. 3.13 sono mostrati gli andamenti della tensione σ_T rispetto alla deformazione ε , ottenuti per ciascun campione durante la prova di trazione. Si osserva che in un primo tratto, la tensione σ_T cresce linearmente al variare della deformazione ε (fase elastica). Considerando le linee di tendenza dei valori $\sigma_T - \varepsilon$ di tale tratto lineare, si osserva che il coefficiente di regressione R^2 è sempre superiore a 0.96. Il coefficiente angolare delle rette interpolanti è stato quindi utilizzato per determinare il modulo di Young E per ciascun campione.

Moltiplicando la tensione σ_T per la sezione trasversale del campione A_r , è poi stata ottenuta la forza trasmessa dalla macchina F . In Fig. 3.14 è mostrato per ciascun campione l'andamento di F al variare di ε , oltre che la forza massima registrata F_{max} . Tale figura mostra che, tranne che per la sezione 2, le radici prelevate in prossimità della sponda interna sono caratterizzate da un maggior valore di F . Nella sezione 2 il valore più elevato di F_{max} si ha in prossimità della sponda esterna. In tutti i grafici si distingue la fase elastica, in cui la forza cresce linearmente al variare della deformazione. Dopo tale fase, si osserva che si ha un andamento curvilineo fino al raggiungimento della forza massima F_{max} ; successivamente si ha un andamento a salti con picchi decrescenti in valore. Come anche osservato durante le prove, i salti corrispondenti ai cali di forza corrispondono alla rottura delle singole radici costituenti il campione. Il valore di forza nulla si raggiunge nell'istante finale $(T_{t,fin})$, quando la traslazione della morsa superiore della macchina a trazione causa la rottura di tutte le radici del campione. Per individuare quindi il numero di radici resistenti in ciascun campione sono stati individuati i picchi precedenti a ciascun calo di forza. A titolo esemplificativo in Fig.3.15 è mostrato un calo di forza ed il corrispondente picco ($F_{p,i}$) per la zolla 2.1.

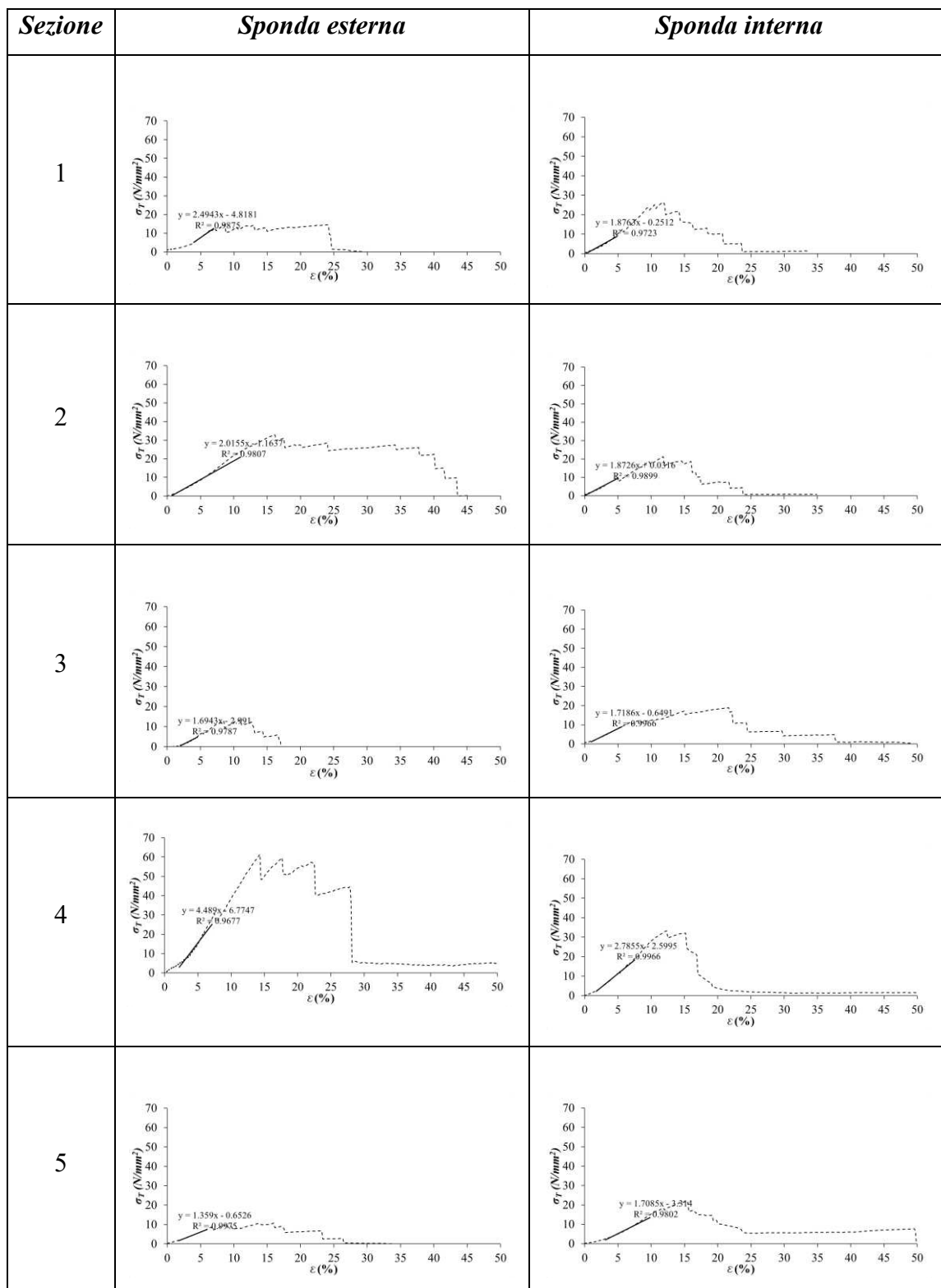


Fig. 3.13: Andamento della tensione σ_T al variare della deformazione ϵ per ciascun campione

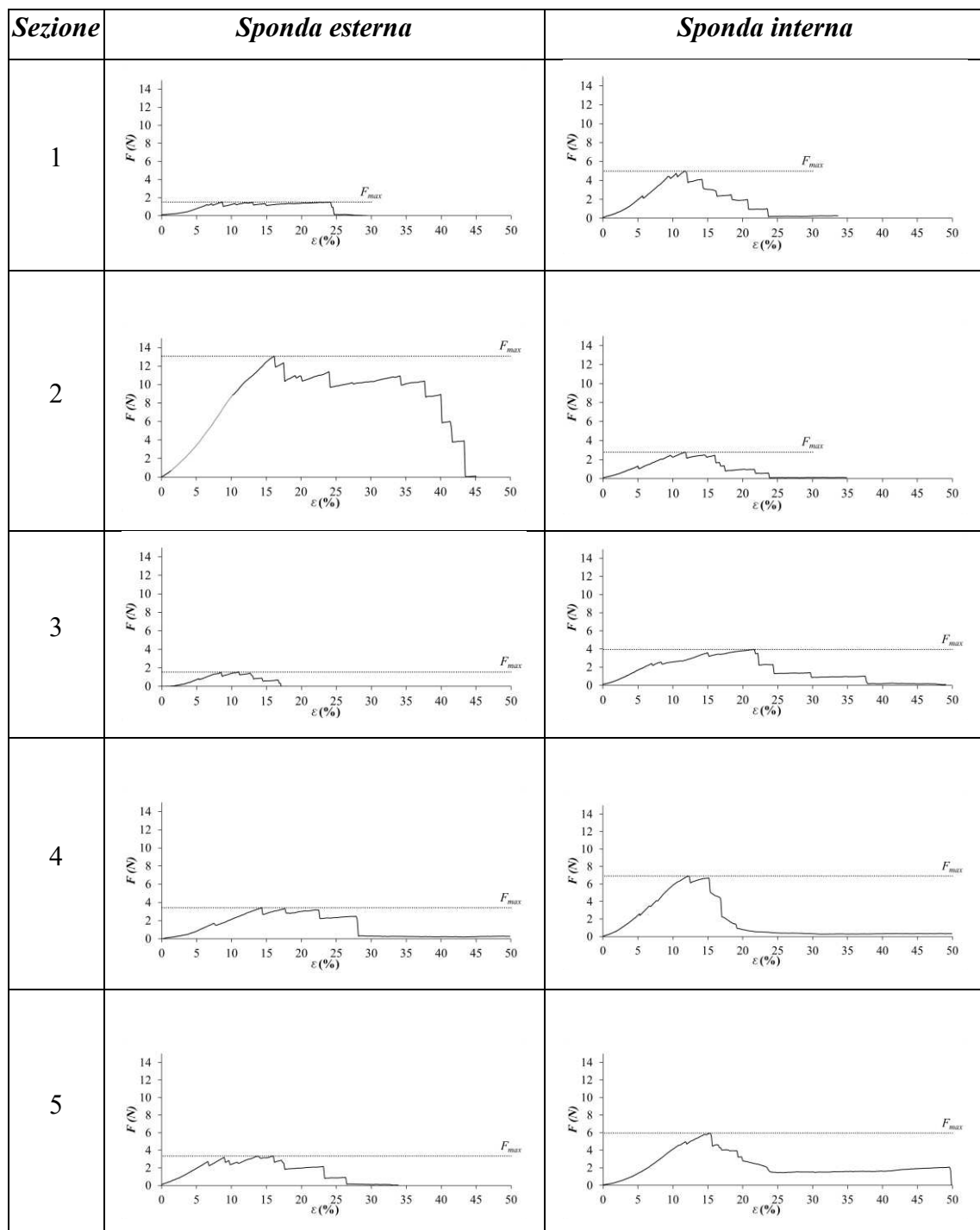


Fig.3.14: Andamento della forza F al variare della deformazione ε per ciascun campione

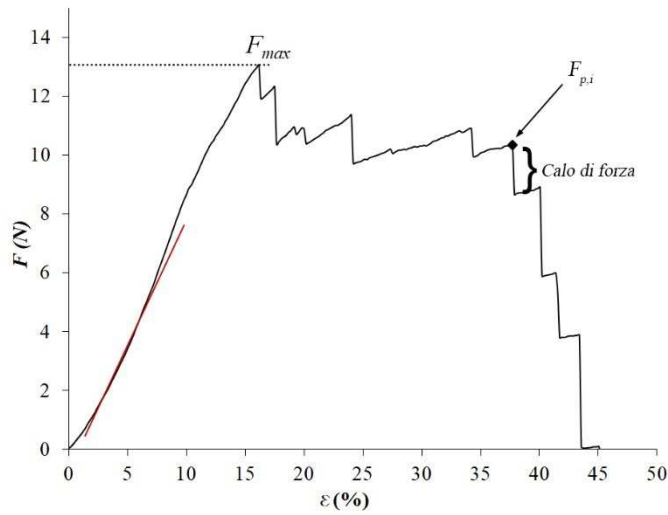


Fig. 3.15: Andamento della forza al variare della deformazione della zolla 2.1 con individuazione di un calo di forza e del corrispondente picco di forza $F_{p,i}$

Pertanto, individuato il numero dei picchi n_p e il valore della forza massima F_{max} , è stato stimato il valore $F_{max,m}$:

$$F_{max,m} = F_{max} / n_p \quad (3.5)$$

che può essere considerato come rappresentativo della resistenza a rottura delle radici esaminate.

Il valore medio della forza a rottura è stato invece definito come media aritmetica dei valori dei picchi di forza:

$$\bar{F}_p = \frac{\sum_{i=1}^{n_p} F_{p,i}}{n_p} \quad i = 1 \dots n_p \quad (3.6)$$

Infine, al fine di verificare come incidessero le caratteristiche geometriche nella definizione della forza a rottura, sono stati calcolati anche:

- la media ponderata dei valori dei picchi di forza rispetto alla corrispondente deformazione ε_p come :

$$\bar{F}_{p,\varepsilon} = \frac{\sum_{i=1}^{n_p} F_{p,i} \times \varepsilon_{p,i}}{\sum_{i=1}^{n_p} \varepsilon_{p,i}} \times \frac{1}{n_p} \quad i = 1 \dots n_p \quad (3.7)$$

- la media ponderata dei valori dei picchi di forza rispetto ai corrispondenti spessori delle radici come:

$$\bar{F}_{p,S_r} = \frac{\sum_{i=1}^{n_p} F_{p,i} \times S_{r,i}}{\sum_{i=1}^{n_p} S_{r,i}} \times \frac{1}{n_p} \quad i = 1 \dots n_p \quad (3.8)$$

In Fig.3.16 sono confrontati gli istogrammi dei valori stimati di $F_{max,m}$, $\bar{F}_p$, $\bar{F}_{p,\varepsilon}$ e $\bar{F}_{p,S_r}$, per ogni zolla prelevata lungo il canale.

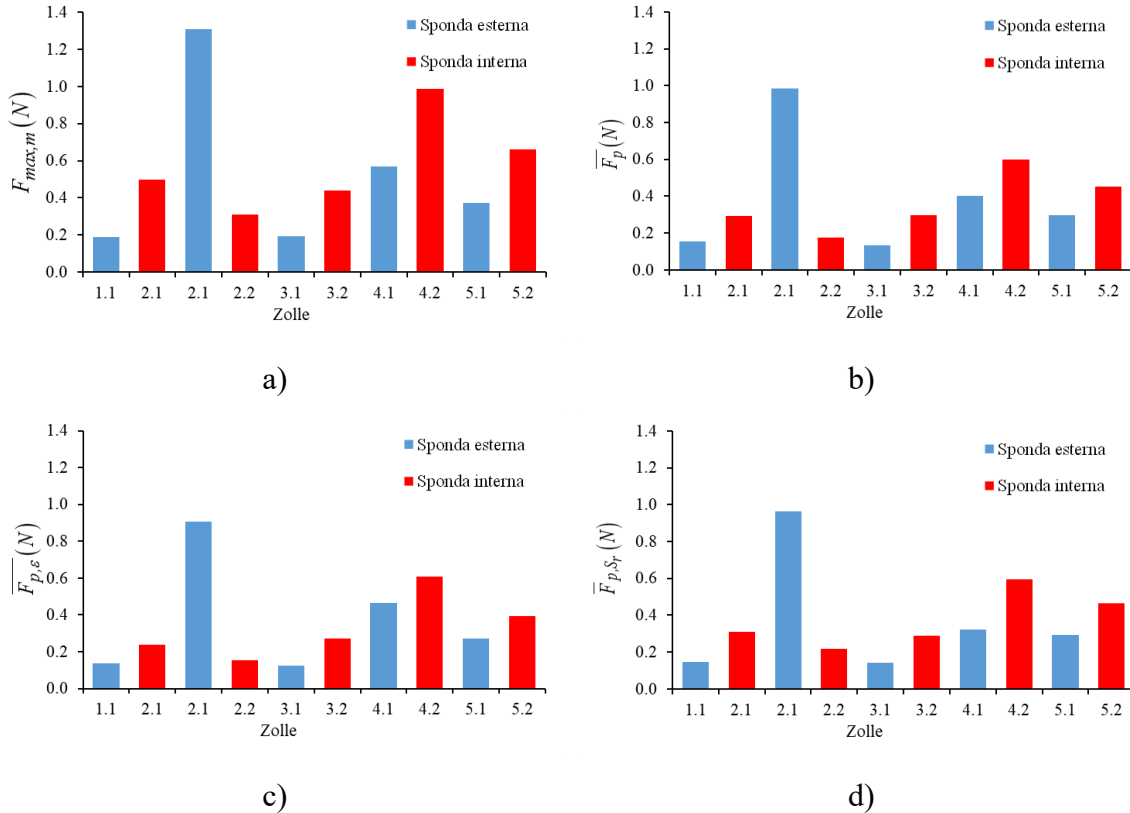


Fig.3.16: Istogrammi della resistenza a rottura rispetto alle posizioni analizzate lungo il canale: a) $F_{max,m}$ b) $\bar{F}_p$; c) $\bar{F}_{p,\varepsilon}$; d) $\bar{F}_{p,S_r}$

Si osserva che i picchi sono in corrispondenza della zolla 2.1, mentre il minimo in corrispondenza della zolla 3.1. L'andamento è analogo per tutti e quattro i parametri considerati e ciò indica che la variazione della lunghezza e dello spessore delle radici non modifica la resistenza a rottura. Pertanto, per le analisi successive si è deciso di considerare come parametro rappresentativo solo il parametro $F_{max,m}$.

In Fig.3.17 è mostrato l'andamento di $F_{max,m}$ per ciascuna sezione osservata, mentre in Fig.3.18 è riportata la distribuzione planimetrica, ottenuta applicando nel codice "Surfer" il metodo di interpolazione "Kriging" (deviazione standard di 0.18 N; per le finalità di rappresentazione di questa fase di lavoro tale valore è stato ritenuto accettabile). Si osserva in Fig. 3.18 che, lungo la sponda esterna, $F_{max,m}$ assume valori relativamente bassi in prossimità delle sezioni di inflessione (sezioni 1 e 5) e in prossimità della sezione di apice (sezione 3), mentre assume valori di picco in corrispondenza della sezione 4 e della sezione 2. Per quanto riguarda invece la sponda interna, $F_{max,m}$ decresce fino alla sezione 2, dove si ha invece un punto di minimo, per poi crescere fino alla sezione 4, dove ha un punto di massimo, e poi decrescere nuovamente fino alla sezione 5.

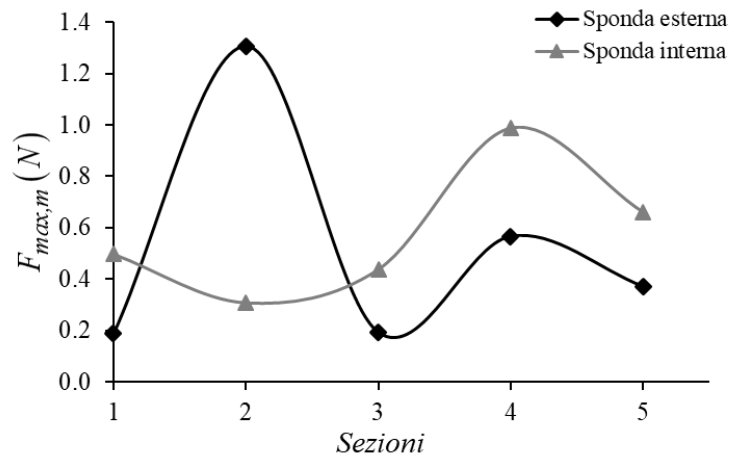


Fig.3.17: Andamento della forza di rottura $F_{max,m}$ al variare delle sezioni

Dalla Fig.3.18, si osserva un andamento simile rispetto a quello di $\overline{S_r}$ (vedi Fig.3.9b) ed opposto rispetto a quello di $\overline{L_r}$ (vedi Fig.3.9a). Ciò conferma che, in media, le radici più resistenti sono quelle caratterizzate da maggiori spessori e minori lunghezze.

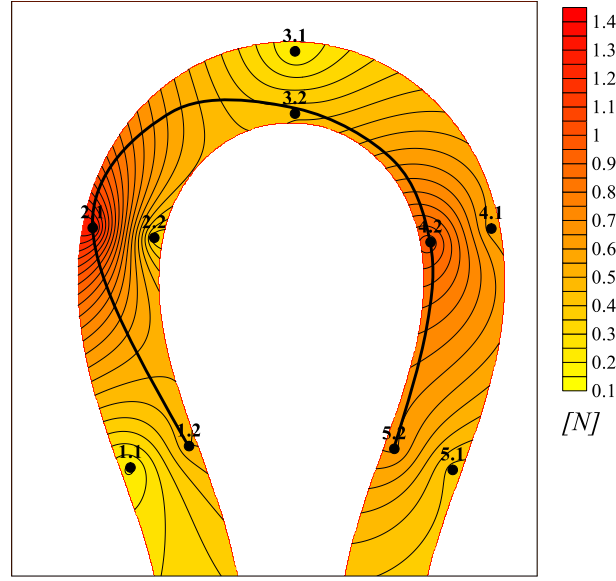


Fig. 3.18: Distribuzione planimetrica di $F_{max,m}$

Con lo scopo di analizzare la distribuzione dei valori dei picchi di forza $F_{p,i}$ per ciascuna zolla, è stata calcolata la probabilità cumulata di $F_{p,i}$, come:

$$CDF(F_{p,i}) = \int_{-\infty}^{F_{p,i}} \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\left(\frac{(F_{p,i}-\overline{F_p})^2}{2\sigma^2}\right)} \quad i = 1, \dots, n_p \quad (3.9)$$

dove σ e $\overline{F_p}$ sono rispettivamente la deviazione standard e la media aritmetica dei valori di $F_{p,i}$. In Fig.3.19 è mostrato l'andamento dei valori di $CDF(F_{p,i})$ in funzione dei corrispondenti valori di forza $F_{p,i}$. Si precisa che, in accordo ad altri lavori di letteratura (Edmaier et al., 2014; Mao et al., 2015), anche se il numero delle radici estratte non è elevato, la CDF consente di trarre informazioni sulle caratteristiche della distribuzione. Dalla Fig.3.19a si nota come in prossimità della sponda esterna, la $CDF(F_{p,i})$ del campione 2.1 sia più inclinata rispetto alle altre. Da un punto di vista meccanico ciò si traduce nel fatto che mentre nelle zolle 1.1, 3.1, 4.1 e 5.1 la vegetazione ha radici di simile resistenza a rottura, per la zolla estratta dalla posizione 2.1, le radici sono caratterizzate da un ampio range di resistenza. Questo può anche giustificare il fatto che per tale zolla il valore di $F_{max,m}$ è

maggiore, come visto in Fig.3.17. Sulla sponda interna, invece, come mostrato in Fig.3.19b, i profili di $CDF(F_{p,i})$ presentano un andamento simile tra loro, quindi le radici sono caratterizzate da valori di $F_{p,i}$ simili.

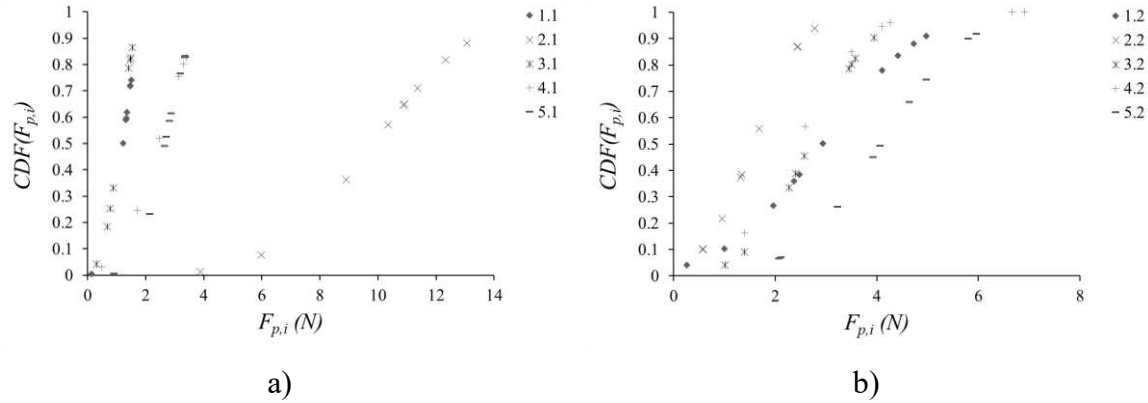


Fig. 3.19: $CDF(F_{p,i})$ rispetto ai valori $F_{p,i}$ lungo la: a) sponda esterna; b) sponda interna

Infine, al fine di analizzare la variazione del modulo di Young E lungo il canale, in Fig.3.20 è mostrato l'andamento di E determinato per ciascuna zolla. Dalla Fig.3.20, si può osservare che, contrariamente a quanto in precedenza visto per la forza $F_{max,m}$ (Fig.3.17), i valori massimi del modulo E sono ottenuti in corrispondenza della sezione 4 per entrambe le sponde, mentre si hanno valori inferiori in corrispondenza della sezione 2. Ciò significa che, in corrispondenza della sezione 2, sono presenti radici molto resistenti ma facilmente deformabili. Le radici dei campioni della sezione 4, invece, nonostante siano generalmente meno resistenti, sono risultate più rigide.

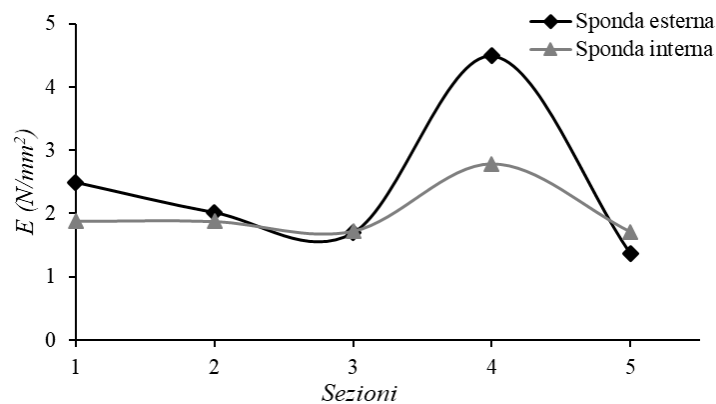


Fig.3.20: Andamento del modulo di Young E lungo la sponda esterna ed interna del canale

c) Architettura radicale

In questa fase del lavoro, l'architettura radicale delle zolle estratte lungo il canale è stata identificata applicando il software open source “Gia Roots” (Galkovskyi et. al, 2012). A tal fine, per ciascuna zolla sono stati selezionati quattro sistemi radicali ritenuti più identificativi e facilmente rilevabili. Dopo essere stati ripuliti dalla terra e da polveri in eccesso, i sistemi radicali estratti sono stati fotografati dall'alto con una telecamera Nikon ad alta risoluzione (24 Mp). Al fine di aumentare il contrasto fra l'apparato radicale e lo sfondo e quindi agevolare l'interpretazione dei dati in “Gia Roots”, le foto sono state convertite in greyscale ed è stato colorato uniformemente lo sfondo di bianco. La stima dei parametri in “Gia Roots”, infatti, avviene attraverso la trasformazione delle immagini in immagini binarie, ovvero associando ai pixels occupati dalle radici il codice 1 (colore bianco) ed ai pixels appartenenti allo sfondo il codice 0 (colore nero). A titolo d'esempio in Fig.3.21 è mostrata l'immagine migliorata degli apparati radicali estratti dalla zolla 2.1.

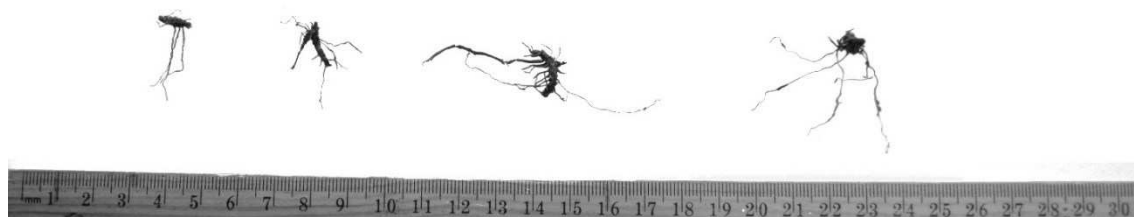


Fig.3.21: Foto quotata dei sistemi radicali estratti dalla zolla 2.1

Per ciascuna zolla, la relativa foto quotata è stata suddivisa in tante foto quanti sono i sistemi radicali in essa presenti. Queste sono state poi importate nel software “Gia Roots” e scalate secondo la scala di riferimento. “Gia Roots” consente di calcolare in modo automatico e simultaneo una serie di parametri identificativi della tipologia di apparato radicale. In particolare, come mostra il diagramma di Fig.3.22, possono distinguersi cinque classi di elementi identificativi, ciascuno dei quali viene caratterizzato da un numero di parametri variabile da 3 a 6.

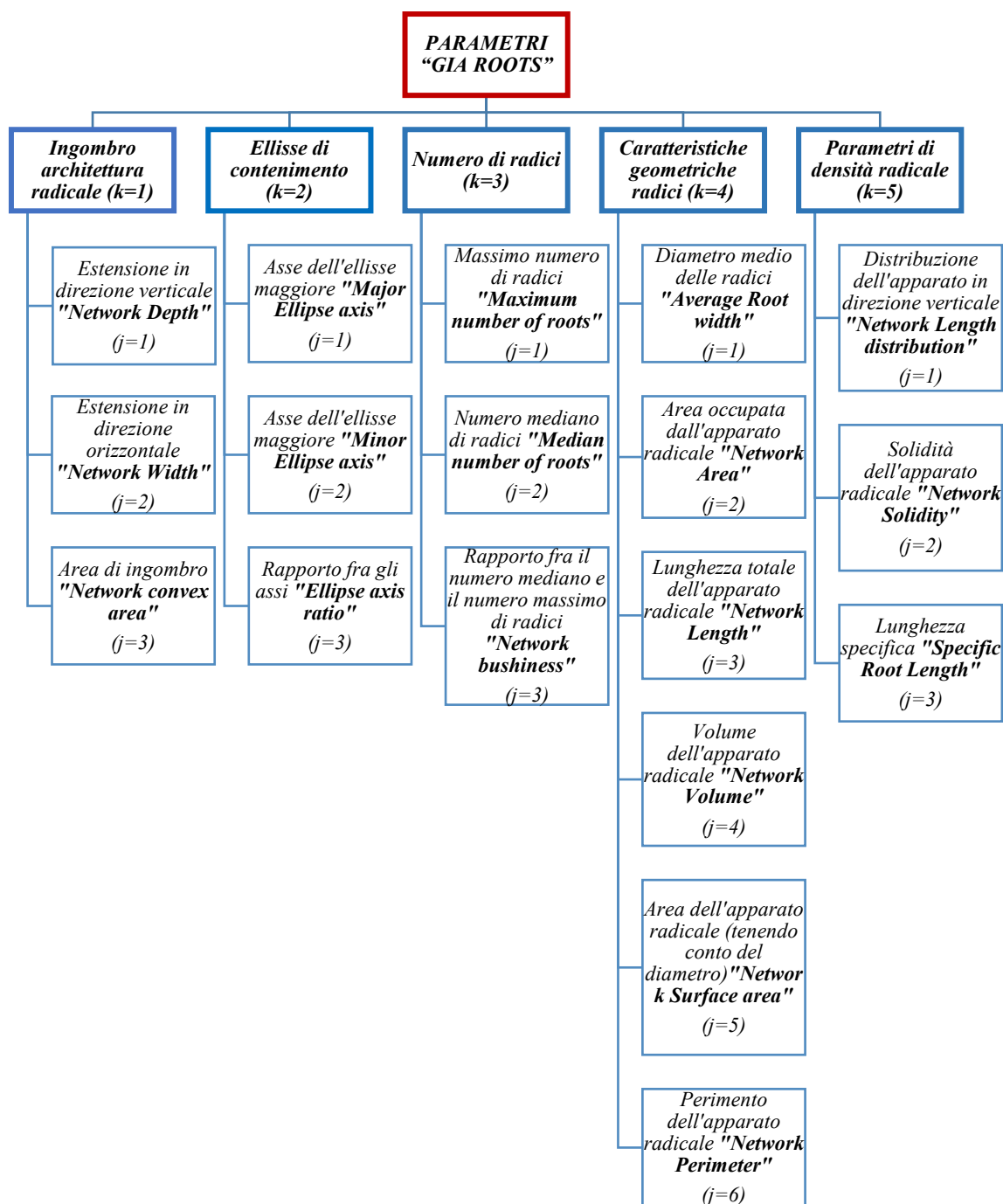


Fig.3.22: Diagramma ad albero dei parametri calcolati da "Gia Roots"

La prima classe ($k = 1$) identifica l'area di ingombro dell'apparato radicale, la quale dipende da tre parametri: l'estensione dell'apparato in direzione verticale, identificata in Fig.3.23a con "Network Depth" ($j = 1$), l'estensione in direzione orizzontale, identificata con "Network Width" ($j = 2$) e l'area dell'immagine delimitata dalla polilinea che raccorda gli estremi dell'apparato stesso, identificata con "Network Convex Area" ($j = 3$).

La seconda classe ($k = 2$) definisce la dimensione dell'ellisse di contenimento che approssima la forma dell'apparato radicale (vedi Fig.3.23b). Tale classe include tre parametri: la dimensione dell'asse maggiore, identificata in Fig.3.22 con "Major Ellipse axis" ($j = 1$), la dimensione dell'asse minore dell'ellisse, chiamata "Minor Ellipse axis" ($j = 2$), il rapporto fra l'asse minore ed il maggiore, chiamato in Fig.3.22 "Ellipse Axis Ratio" ($j = 3$).

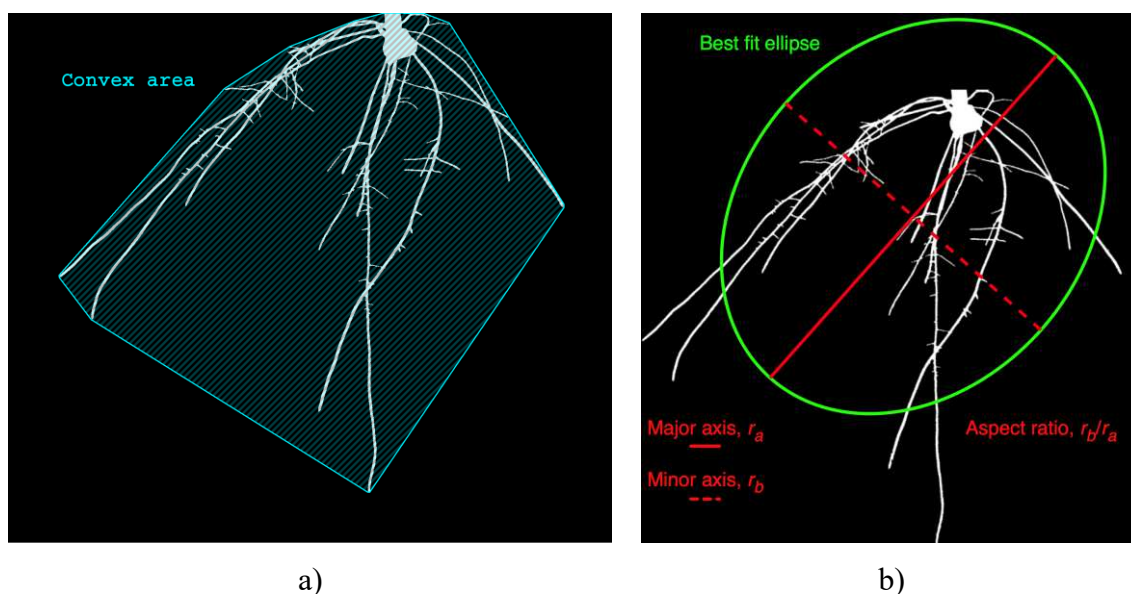


Fig.3.23: a) Polilinea che delimita l'area di ingombro dell'apparato radicale; b) Schema rappresentativo dell'ellisse di contenimento con l'indicazione degli assi maggiori e minori (da "Gia Roots" Manual)

La terza classe ($k = 3$) definisce il numero di radici principali e secondarie presenti nel sistema radicale. Anche questa classe include tre parametri, stimati discretizzando l'immagine in fasce orizzontali e individuando in automatico, per ciascuna fascia, il numero di radici che le interseca (vedi Fig.3.24). Tali parametri sono: l'84-esimo valore percentile

della distribuzione ottenuta acquisendo il numero di intersezioni al variare delle fasce orizzontali di riferimento, identificato con “Maximum Number of Roots” ($j = 1$), la mediana della stessa distribuzione, identificata con “Median Number of Roots” ($j = 2$) ed il loro rapporto, identificato come “Network Bushiness” ($j = 3$).

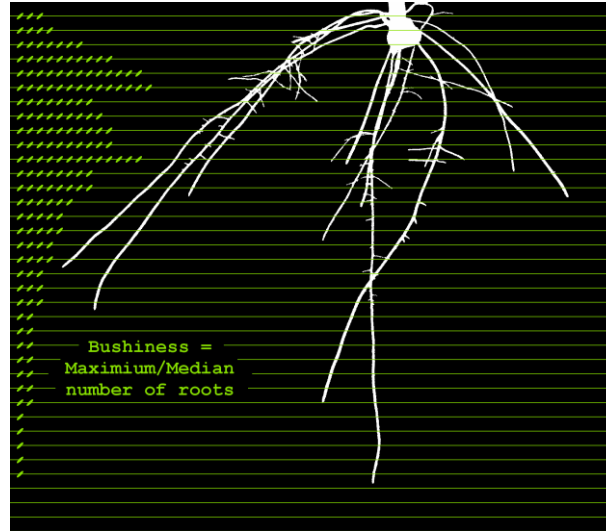


Fig.3.24: Discretizzazione dell’immagine in fasce orizzontali, mirata alla stima del numero di radici (da “Gia Roots” Manual)

La quarta classe ($k = 4$) consente di definire i parametri geometrici dell’apparato radicale. Ciò è effettuato attraverso la trasformazione delle immagini delle radici in immagini binarie in bianco e nero, estrapolando da tali immagini lo scheletro dell’apparato radicale e computando il numero di pixels appartenenti allo scheletro stesso. I parametri appartenenti alla quarta classe sono: lo spessore medio delle radici (“Average root width”, $j = 1$), la lunghezza e il perimetro dell’apparato radicale, identificati rispettivamente con “Network Length” ($j = 2$) e “Network Perimeter” ($j = 3$), e l’area dell’immagine occupata dall’apparato stesso (“Network Area”, $j = 4$). Inoltre, approssimando lo scheletro stesso ad un profilo tubolare (vedi Fig.3.25), il software stima la sommatoria delle aree dello scheletro $\sum \pi r_i^2$ (“Network Surface Area”, $j = 5$) e la sommatoria dei volumi locali $\sum \pi r_i^3$ (“Network Volume”, $j = 6$), dove r_i è il raggio nell’ i -esimo tratto di scheletro.

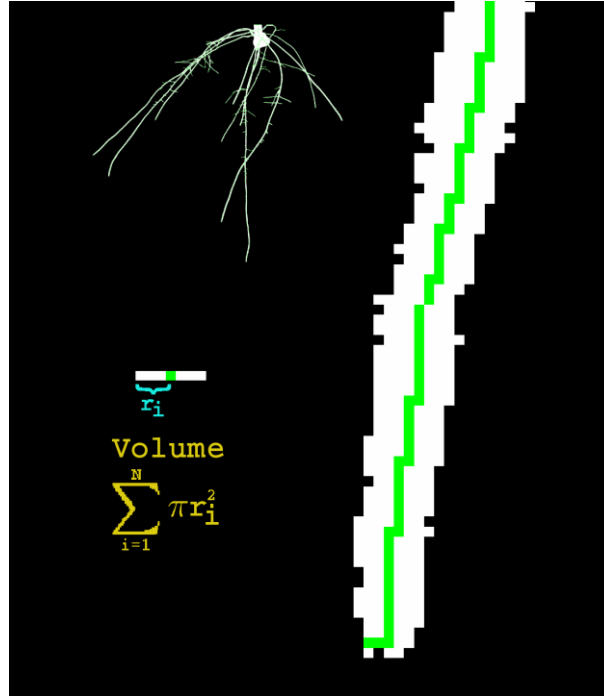


Fig.3.25: Schema di calcolo del volume “Network Volume” (da “Gia Roots” Manual)

La quinta classe ($k = 5$) identifica la densità dell'apparato radicale, che dipende da tre parametri: la lunghezza specifica dell'apparato radicale, chiamata “Specific Root Length” ($j = 3$) e pari al rapporto fra la lunghezza ed il volume dell'apparato stesso, la frazione della “Network Depth” ($k = 1, j = 1$) che contiene i 2/3 dell'intero apparato (“Network Length Distribution”, $j = 1$) ed il rapporto, chiamato “Network Solidity” ($j = 2$), fra l'area occupata dalle radici e l'area di ingombro dell'intero sistema radicale.

Al fine di valutare l'architettura radicale nelle zolle estratte dalle sezioni di riferimento, per ciascun apparato radicale è stato calcolato il j -esimo parametro $p_{k,j}$. Tenendo conto che per ciascuna zolla sono stati prelevati quattro apparati radicali, è stato calcolato il valore medio del j -esimo parametro appartenente alla classe k -esima come:

$$\bar{p}_{k,j} = \sum_{i=1}^4 \frac{p_{k,j}}{4} \quad k = 1 \dots 5 \quad j = 1 \dots n_k \quad n_1 = 3 \quad n_2 = 3 \quad n_3 = 3 \quad n_4 = 6 \quad n_5 = 3 \quad (3.10)$$

In Fig. 3.26 è mostrato il confronto fra gli andamenti dei valori medi lungo il canale dei parametri appartenenti alla prima classe ($k = 1$), e quindi l'estensione dell'apparato in direzione verticale ($\bar{p}_{1,1}$), l'estensione in direzione orizzontale ($\bar{p}_{1,2}$), e l'area di ingombro ($\bar{p}_{1,3}$). Si evince che, lungo la sponda esterna (Fig.3.26a) tali parametri crescono fino alla sezione 2, decrescono fino alla sezione 4, per poi crescere nuovamente dalla sezione 4 alla sezione 5. Tale andamento è più evidente per il parametro $\bar{p}_{1,3}$. Ciò indica che, mentre dalle zolle estratte in prossimità della sponda esterna delle sezioni 2, 3 e 5 sono stati prelevati apparati radicali di elevato ingombro, in prossimità della sponda esterna delle sezioni 1 e 4 sono stati prelevati apparati con un'estensione spaziale più contenuta.

Lungo la sponda interna (vedi Fig.3.26b) si nota che i parametri decrescono fino al raggiungimento della sezione di apice, per poi crescere fino alla sezione 4 e rimanere pressoché costanti fino alla sezione 5. Tale andamento è meno evidente per il parametro $\bar{p}_{1,1}$. Quindi, in prossimità della sponda interna delle sezioni 1, 4 e 5 sono stati prelevati apparati radicali di maggiore ingombro rispetto a quelli prelevati in prossimità delle sezioni 2 e 3.

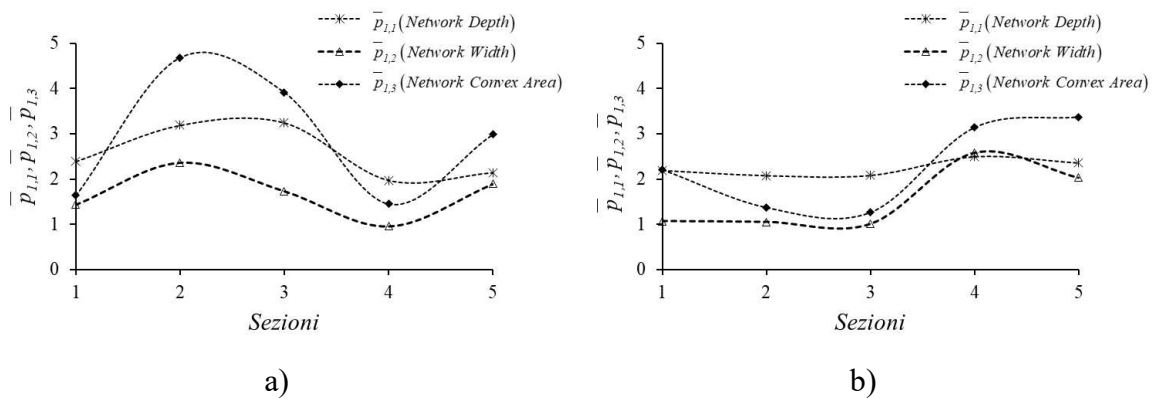


Fig.3.26: Andamento dei valori medi dei parametri appartenenti alla prima classe ($k = 1$) lungo: a) la sponda esterna; b) la sponda interna

In Fig. 3.27 sono riportati gli andamenti dei parametri che descrivono la dimensione dell'ellisse di contenimento (classe $k = 2$) ed in particolare della dimensione dell'asse

maggiore dell'ellisse ($\bar{p}_{2,1}$), della dimensione dell'asse minore ($\bar{p}_{2,2}$) e del loro rapporto ($\bar{p}_{2,3}$).

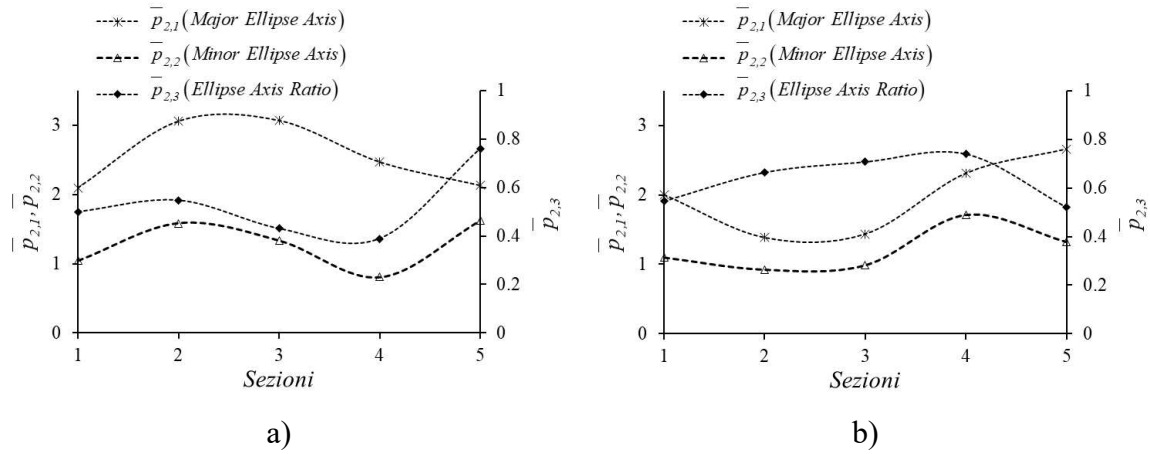


Fig.3.27: Andamento dei valori medi dei parametri appartenenti alla seconda classe ($k = 2$) lungo: a) la sponda esterna; b) la sponda interna

Dalla Fig.3.27a si nota che, lungo la sponda esterna, $\bar{p}_{2,2}$ e $\bar{p}_{2,3}$ presentano andamenti simili. Essi, infatti, crescono entrambi fino alla sezione 2, decrescono fino al raggiungimento della sezione 4, per poi crescere nuovamente dalla sezione 4 fino alla sezione 5; $\bar{p}_{2,1}$, invece, cresce fino alla sezione 2, rimane pressoché costante fino alla sezione 3, per poi decrescere fino al raggiungimento della sezione 5. Ciò conferma che, in prossimità della sponda esterna delle sezioni 2, 3 e 5, da cui sono stati prelevati apparati radicali di maggiore ingombro (vedi Fig.3.26a), sono stati ottenuti anche valori più elevati di dimensione degli assi delle ellissi di contenimento. In prossimità della sponda esterna delle sezioni 1 e 4, invece, sono stati prelevati apparati con dimensioni più ridotte.

Lungo la sponda interna (vedi Fig.3.27b) $\bar{p}_{2,1}$ e $\bar{p}_{2,2}$ decrescono entrambi fino alla sezione 3, per poi crescere nuovamente fino alla sezione 4. L'andamento di $\bar{p}_{2,3}$, invece, è caratterizzato da una graduale crescita fino alla sezione 4, poi $\bar{p}_{2,3}$ decresce fino al raggiungimento della sezione 5.

Quindi ciò conferma che in prossimità della sponda interna delle sezioni 1 e 4 sono stati prelevati apparati radicali con maggiori dimensioni dell'ellisse di contenimento rispetto a quelli prelevati in prossimità della sponda interna della sezione di apice e della sezione 2.

Per quanto riguarda il numero delle radici (classe $k = 3$), in Fig.3.28 sono mostrati gli andamenti del numero massimo e del numero mediano di radici (rispettivamente $\bar{p}_{3,1}$ e $\bar{p}_{3,2}$) e del loro rapporto ($\bar{p}_{3,3}$) lungo il canale.

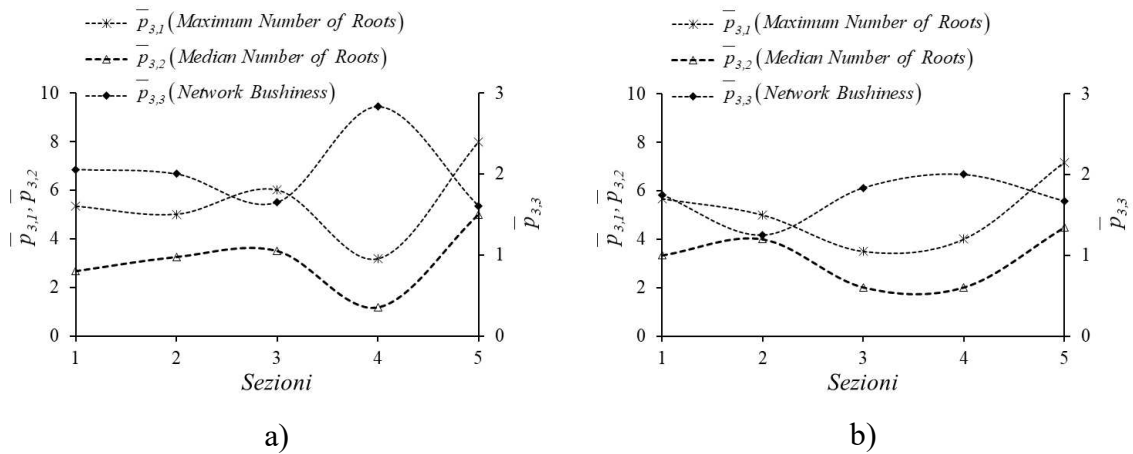


Fig.3.28: Andamento dei valori medi dei parametri appartenenti alla terza classe ($k = 3$) lungo: a) la sponda esterna; b) la sponda interna

In Fig. 3.28 si nota che lungo entrambe le sponde $\bar{p}_{3,1}$ e $\bar{p}_{3,2}$ presentano andamenti simili e $\bar{p}_{3,3}$ un andamento opposto. In particolare, lungo la sponda esterna (vedi Fig.3.28a), $\bar{p}_{3,1}$ e $\bar{p}_{3,2}$ crescono fino alla sezione 3, decrescono fino alla sezione 4, per poi crescere nuovamente dalla sezione 4 fino alla sezione 5. Ciò indica che dalle zolle prelevate in prossimità della sponda esterna delle sezioni 3 e 5 sono stati prelevati apparati radicali con un numero superiore di radici rispetto a quelli prelevati in prossimità delle sezioni 1 e 4.

Lungo la sponda interna, $\bar{p}_{3,1}$ e $\bar{p}_{3,2}$ decrescono fino alla sezione 3, dove hanno un punto di minimo, e crescono nuovamente fino alla sezione 5. Quindi, in prossimità della sponda interna delle sezioni 2 e 5 sono stati prelevati apparati radicali costituiti da un numero più elevato di radici, rispetto a quelli prelevati in prossimità delle sezioni 1, 3 e 4.

Focalizzando l'attenzione sulle caratteristiche geometriche delle radici, in Fig.3.29 è mostrato il confronto fra gli andamenti lungo le sponde del canale dei parametri appartenenti alla quarta classe ($k = 4$) ed in particolare dello spessore medio delle radici ($\bar{p}_{4,1}$), della lunghezza e del perimetro dell'apparato radicale (rispettivamente $\bar{p}_{4,2}$ e $\bar{p}_{4,3}$), dell'area dell'immagine occupata dall'apparato stesso ($\bar{p}_{4,4}$) e dell'area e del volume occupati dallo scheletro radicale (rispettivamente $\bar{p}_{4,5}$ e $\bar{p}_{4,6}$).

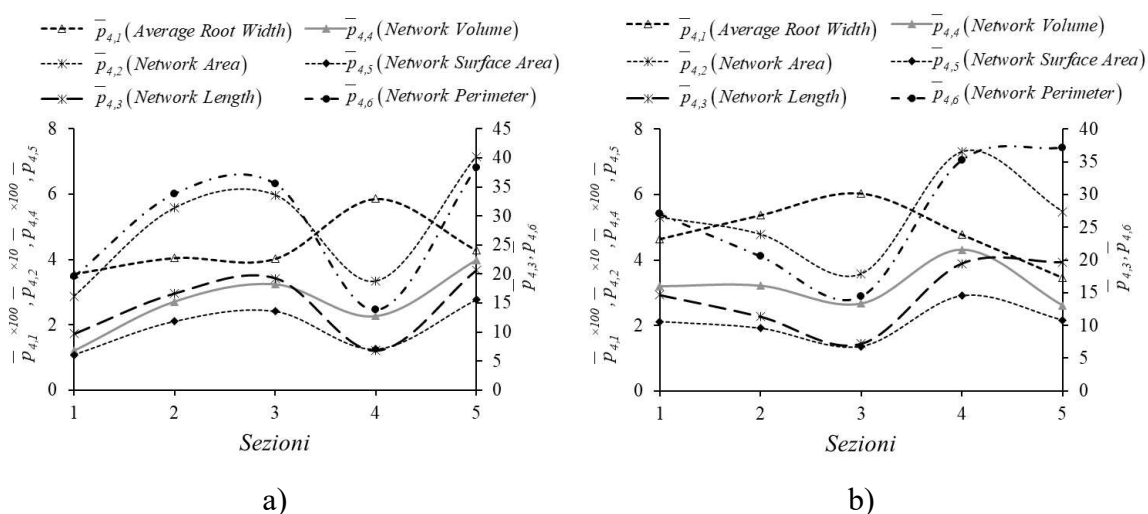


Fig.3.29: Andamento dei valori medi dei parametri relativi alle caratteristiche geometriche delle radici (classe $k = 4$) lungo: a) la sponda esterna; b) la sponda interna

Osservando Fig.3.29a si nota che lungo la sponda esterna, mentre il parametro $\bar{p}_{4,1}$ presenta un andamento pressoché costante con un picco in corrispondenza della sezione 4, i parametri $\bar{p}_{4,2}$, $\bar{p}_{4,3}$, $\bar{p}_{4,4}$, $\bar{p}_{4,5}$ e $\bar{p}_{4,6}$ presentano andamenti simili. Essi, infatti, crescono fino alla sezione di apice (sezione 3), decrescono fino alla sezione 4, per poi crescere nuovamente fino al raggiungimento della sezione 5. Ciò indica che dalle zolle 2.1, 3.1 e 5.1, in media, sono stati prelevati fitti apparati costituiti da lunghe radici; dalle zolle 1.1 e 4.1, invece, sono stati prelevati apparati radicali meno complessi e con radici meno lunghe.

Lungo la sponda interna (Fig.3.29b) $\bar{p}_{4,1}$ cresce gradualmente fino alla sezione 3, dove vi è un massimo, e decresce fino alla sezione 5; $\bar{p}_{4,2}$, $\bar{p}_{4,3}$, $\bar{p}_{4,4}$, $\bar{p}_{4,5}$ e $\bar{p}_{4,6}$ decrescono fino alla sezione di apice, dove vi è un punto di minimo, per poi crescere fino alla sezione 4.

Quindi, dalle zolle estratte in prossimità della sponda interna delle sezioni 1, 4 e 5 sono stati prelevati apparati con radici più lunghe e dall'architettura più complessa, rispetto a quelli prelevati in prossimità delle sezioni 2 e 3.

Infine, focalizzando l'attenzione sulla densità radicale, in Fig. 3.30 è mostrato il confronto fra gli andamenti dei parametri appartenenti alla quinta classe ($k = 5$) ed in particolare della lunghezza specifica ($\bar{p}_{5,1}$), della distribuzione dell'apparato ($\bar{p}_{5,2}$) e del loro rapporto

($\bar{p}_{5,3}$).

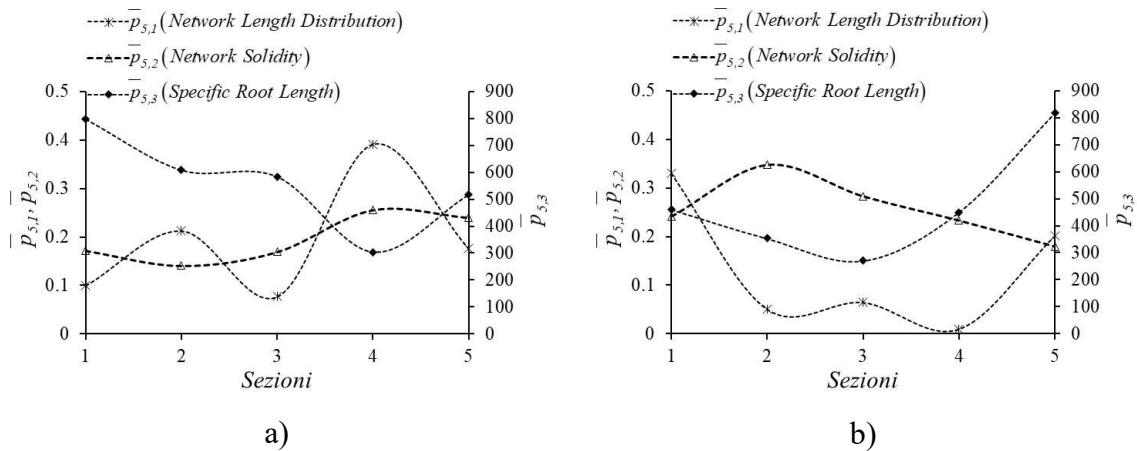


Fig.3.30: Andamento dei valori medi dei parametri di densità radicale (classe $k = 5$) lungo:
a) la sponda esterna; b) la sponda interna

Lungo la sponda esterna (Fig.3.30), l'andamento di $\bar{p}_{5,1}$ è caratterizzato da due punti di massimo in corrispondenza delle sezioni 2 e 4 e da un punto di minimo relativo in corrispondenza della sezione di apice; $\bar{p}_{5,2}$, invece, decresce fino alla sezione 2 e cresce gradualmente fino al raggiungimento della quarta sezione; $\bar{p}_{5,3}$, infine, decresce fino alla sezione 4 con un picco in corrispondenza della sezione di apice, per poi crescere fino alla sezione 5. Nonostante i tre parametri siano caratterizzati da andamenti completamente diversi, dal confronto mostrato in Fig.3.30a si può dedurre che in prossimità della sponda esterna delle sezioni 4 e 5 sono stati prelevati apparati radicali con maggiori valori di densità radicale e inferiori valori di lunghezza specifica, rispetto a quelli prelevati dalle zolle 1.1 e 2.1. Ciò indica che quest'ultimi sono costituiti da radici più lunghe e distribuite in reti meno dense rispetto a quelli prelevati in prossimità delle sezioni 4 e 5.

Lungo la sponda interna (vedi Fig.3.30b), $\bar{p}_{5,1}$ decresce fino alla sezione di apice (dove presenta un punto di minimo), per poi crescere fino alla sezione 5. L'andamento di $\bar{p}_{5,2}$ è caratterizzato da due punti di minimo in corrispondenza delle sezioni 2 e 4 e tre punti di massimo relativo in corrispondenza delle sezioni 1, 3 e 5. Infine, $\bar{p}_{5,3}$ cresce fino alla sezione 2 (dove ha un punto di massimo), per poi decrescere fino alla sezione 5. Quindi, dalle zolle estratte in prossimità della sponda interna delle sezioni 2, 3 e 4 sono stati prelevati apparati con valori inferiori di lunghezza specifica e di densità radicale rispetto a quelli prelevati dalle zolle 1.2 e 5.2.

In definitiva, sulla base di quanto osservato dalle figure 3.26÷3.30 si può concludere che le zolle 2.1, 5.1 e 5.2 sono caratterizzate da apparati radicali di maggiore ingombro, maggior numero di radici e maggior densità radicale. Tenendo conto dell'andamento della resistenza meccanica delle radici, mostrata in Fig.3.17, si può dire che tali zolle sono anche caratterizzate da un'elevata resistenza meccanica.

Di contro, gli apparati radicali caratterizzati da un minor ingombro, minor numero di radici e minor densità, appartengono alle zolle 4.1 e 3.2, caratterizzate da radici di ridotta resistenza (vedi Fig.3.17). E' necessario inoltre puntualizzare che dalla sponda esterna della sezione di apice sono stati prelevati gli apparati più voluminosi, costituiti dalle radici più lunghe e di ridotta resistenza.

3.2.2 Caratterizzazione della vegetazione utilizzata nella seconda fase

a) Caratteristiche geometriche

Per definire le caratteristiche geometriche e meccaniche della vegetazione artificiale utilizzata nella seconda fase del lavoro, è stato considerato un campione di dimensione $10 \times 10 \text{ cm}^2$. Per esso è stato valutato: il numero di steli per ciascun cespuglio (S_p), il numero di cespugli presenti (M_p), il numero di steli (M_s) e la porosità ϕ . Quest'ultima è stata calcolata come rapporto V_f/V_t dove V_f è la differenza fra il volume totale V_t (pari al prodotto fra l'area unitaria e l'altezza H_v) e V_c (pari al volume occupato dagli steli nella stessa area unitaria). Inoltre, per il generico stelo, sono stati valutati i seguenti parametri: l'altezza non piegata (H_v), la larghezza (b_v) e lo spessore (s_v).

In Tab. 3.4 sono schematizzate le caratteristiche geometriche della vegetazione così ottenute.

<i>Parametro</i>	<i>U.M.</i>	<i>Valore</i>
H_v	mm	37
b_v	mm	1.35
s_v	mm	0.2
S_p	-	18
M_p	-	98
M_s	-	1764
ϕ	-	0.952

Tab. 3.4: Riepilogo delle caratteristiche geometriche della vegetazione (dati valutati su un campione $10 \times 10 \text{ cm}^2$)

b) Caratteristiche meccaniche

La valutazione delle caratteristiche meccaniche è stata condotta, anche in questo caso, effettuando dei test a rottura. In questo caso sono stati considerati otto steli estratti casualmente dal campione di vegetazione artificiale. E' stata impostata una velocità di prova di 20 mm/min ed una distanza iniziale fra le due morse pari a 53 mm. La sezione trasversale degli steli (A_v) è stata calcolata come: $A_v = b_v \times s_v$, con b_v e s_v pari rispettivamente alla larghezza e allo spessore di ciascuno stelo.

In Fig. 3.31 è mostrato l'andamento della tensione σ_T al variare della deformazione ε per ciascuno stelo testato, oltre che l'andamento medio ottenuto per tutti gli steli del campione.

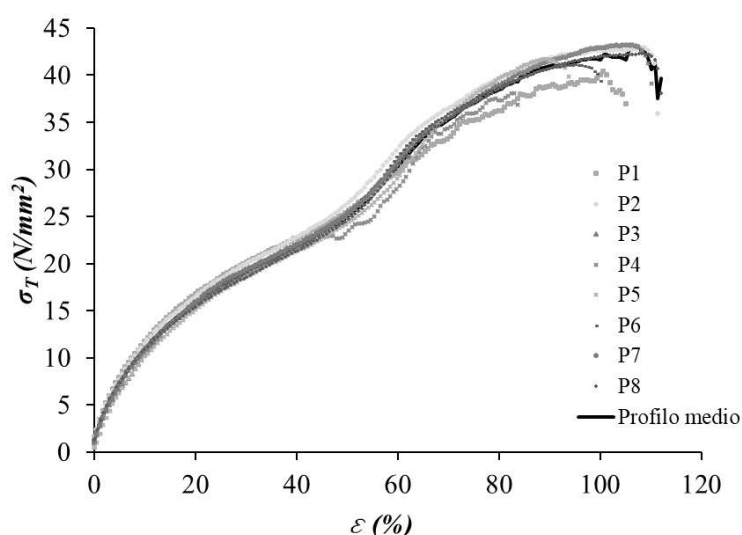


Fig.3.31: Confronto fra le curve di tensione-deformazione degli steli soggetti a trazione e andamento medio

Dalla Fig.3.33, si può notare che fino ad una deformazione del 50% (fase elastica) il profilo medio approssima molto bene le curve di tutte le prove; oltre tale soglia, le curve relative a ciascuno stelo si discostano dal profilo medio. Ciò è dovuto alla natura viscoelastica del materiale costituente gli steli della vegetazione artificiale utilizzata. Il modulo di Young E è stato quindi ottenuto come coefficiente angolare della linea di tendenza dei punti del profilo medio nel tratto corrispondente ad una deformazione compresa tra lo 0% e il 5% (vedi Fig.3.32).

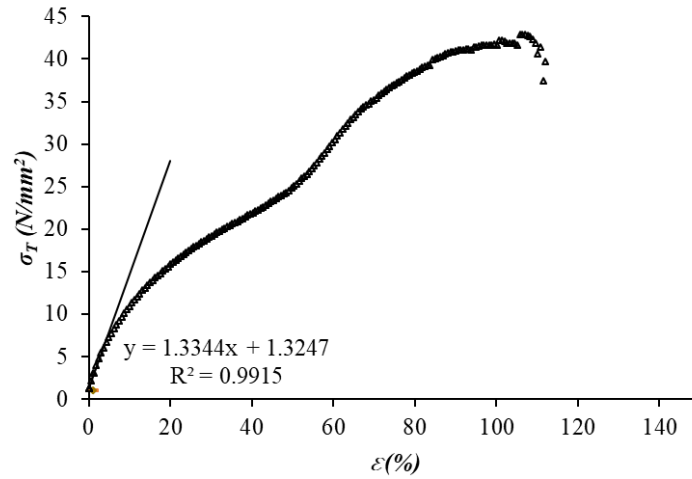


Fig.3.32: Andamento medio delle curve di tensione-deformazione degli steli soggetti a trazione

In definitiva, il modulo di Young è risultato quindi pari a $E = 1.33 \text{ N/mm}^2$.

La rigidezza flessionale dello stelo è stata trovata come:

$$K_w = E \times I_w \quad (3.11)$$

$$K_l = E \times I_l \quad (3.12)$$

dove I_w e I_l sono rispettivamente il momento di inerzia del singolo stelo di vegetazione lungo l'asse w e l'asse l (vedi Fig. 3.3).

Nello specifico è:

$$I_w = \frac{I}{12} \times b_v^3 \times s_v = 4.1 \times 10^{-2} \text{ mm}^2 \quad (3.13)$$

$$I_l = \frac{I}{12} \times b_v \times s_v^3 = 9 \times 10^{-4} \text{ mm}^2 \quad (3.14)$$

In definitiva i valori delle rigidezze flessionali, sono risultate pari a

$$K_w = 5.45 \times 10^{-2} \text{ Nmm}^2 \text{ e } K_l = 1.2 \times 10^{-3} \text{ Nmm}^2.$$

4. STUDIO SPERIMENTALE DEI PROCESSI DI INTERAZIONE CORRENTE-VEGETAZIONE

Come detto, la prima campagna sperimentale è stata condotta al fine di valutare le condizioni di degradazione della vegetazione matura uniformemente distribuita; la seconda campagna sperimentale è stata invece condotta al fine di valutare come la distribuzione della vegetazione sul fondo ad isole influenzi le caratteristiche cinematiche della corrente. In questa sezione vengono quindi illustrate le metodologie di indagine per entrambe le prove condotte.

4.1 Presenza di vegetazione matura uniformemente distribuita

4.1.1 Condizioni della prova ed osservazioni sperimentali

L'evoluzione del processo di degradazione della vegetazione matura presente sul fondo del canale è stata analizzata durante una prova sperimentale condotta per valori di portata gradualmente crescenti, a partire da un valore di 8 l/s fino ad un valore di 21 l/s. Durante la prova la portata è stata registrata ogni 30 secondi grazie ad un misuratore di portata ad effetto Doppler (Mainstream EH 7000) collocato nel tratto rettilineo di invito (vedi Fig.4.1). Tale misuratore trasmette segnali sonori nel fluido che vengono poi riflessi dalle particelle e dalle bolle d'aria presenti in sospensione; misurando il tempo di ritorno del segnale, il sensore stima la velocità media del flusso, che moltiplicata per l'area della sezione liquida, definisce il valore della portata.



Fig. 4.1: Immagine del misuratore di portata, collocato dentro il canale rettilineo di invito

Mediante una apposita utility software è possibile impostare l'esatta configurazione geometrica della sezione di misura ed è possibile acquisire le misurazioni in tempo reale. In particolare, il misuratore consente di registrare al variare del tempo t (espresso in secondi) i valori della portata Q , della velocità media v_q , dell'area bagnata A_q e del tirante h in asse alla sezione di misura (i valori di Q , v_q , A_q e h registrati durante la prova sono riportati in Fig. 4.2).

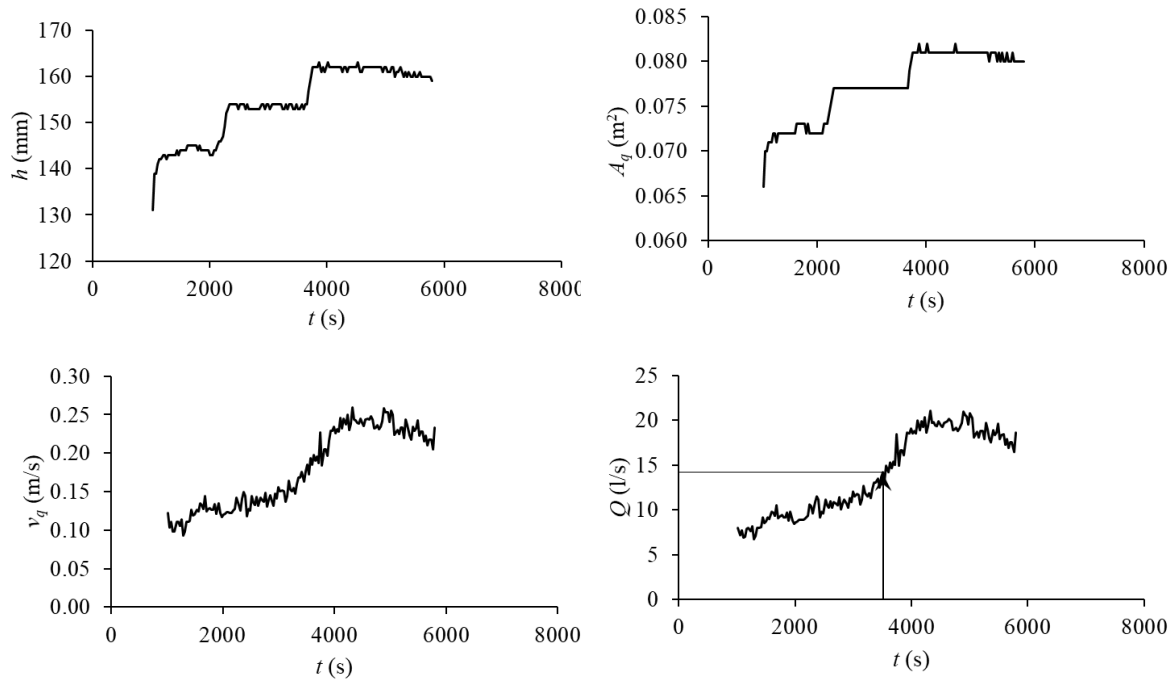


Fig.4.2: Valori del livello h , dell'area A_q , della velocità v_q e della portata Q registrati durante la prova

Inoltre, sono state utilizzate tre telecamere fisse (telecamera Nikon con risoluzione di 24 Mp), collocate come mostrato in Fig. 4.3 ed una telecamera mobile (telecamera Panasonic NG-GS120 con una risoluzione di 1.7 Mp) con lo scopo di monitorare il livello dei tiranti al variare della portata, oltre che l'evoluzione del processo di degradazione della vegetazione durante la prova. In particolare, grazie alle riprese video effettuate con la telecamera mobile, è stato possibile rilevare non solo l'andamento dei tiranti h in corrispondenza della sponda esterna (vedi Fig.4.4) al variare della portata, ma anche l'area della vegetazione estirpata nei diversi istanti temporali come descritto al successivo par.4.2.

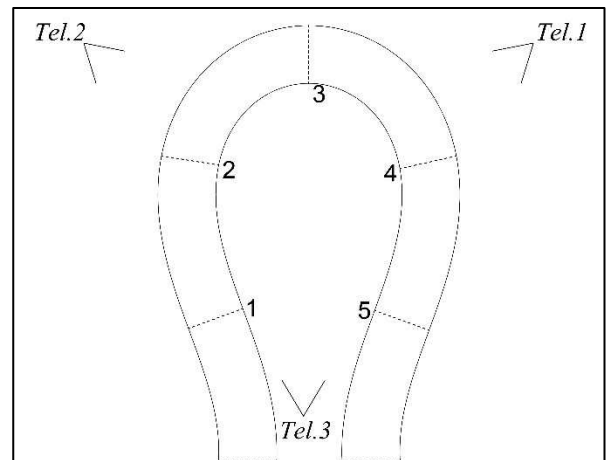
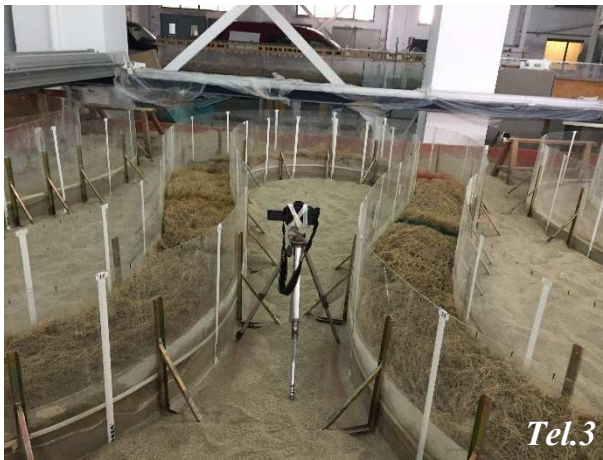


Fig.4.3: Posizioni delle tre telecamere fisse (*Tel.1*, *Tel.2* e *Tel.3*) utilizzate durante la prova

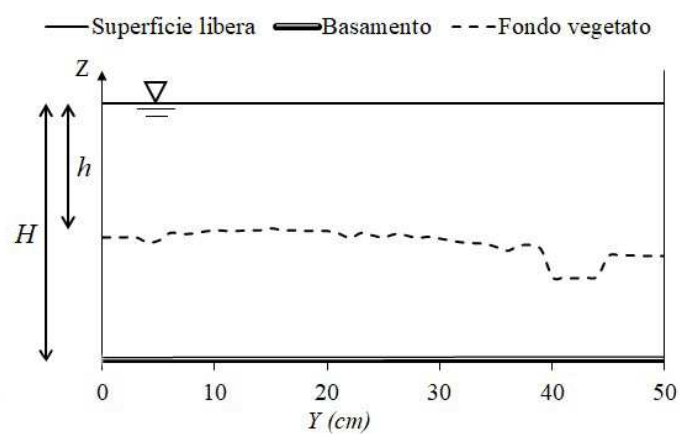


Fig.4.4: Schema sezione trasversale (h = tirante idrico; H = quota piezometrica rispetto al basamento orizzontale)

In Fig. 4.5 è mostrato l'andamento delle quote piezometriche H (Fig.4.5a) e dei tiranti h (Fig.4.5b) rilevati lungo la sponda esterna. Indicando con T il generico istante di rilievo, in Fig.4.6 si osserva un aumento graduale del tirante (h) fino all'istante $T_3 = 3510$, a cui corrisponde un valore di portata di 14.21 l/s (vedi Fig.4.2c), dopodiché il tirante h cresce molto lentamente fino a mantenersi pressoché costante.

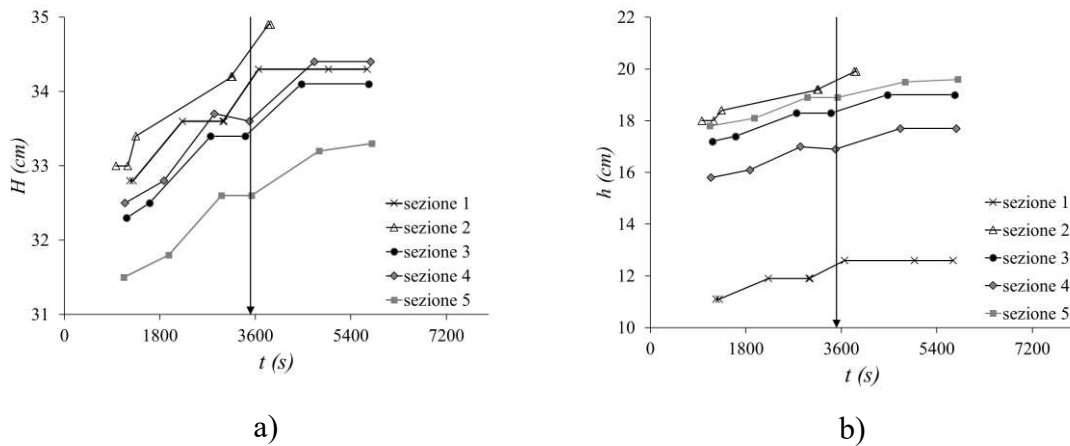


Fig.4.5: a) Variazione di H al variare della portata per ciascuna sezione; b) Andamento lungo la sponda esterna di h al variare della portata per ciascuna sezione

In Fig.4.6 è mostrato l'andamento delle quote piezometriche H e del termine $\gamma(dH/dX)h$ determinati lungo la sponda esterna nell'istante di prova $T_3 = 3510$ s. Da tale figura si osserva che entrambi i termini, H e $\gamma(dH/dX)h$, crescono fino alla sezione 2, decrescono gradualmente fino al raggiungimento della sezione 3, per poi crescere nuovamente fino alla sezione 4 e decrescere fino alla sezione 5. Quindi, i valori più elevati si ottengono nella sponda esterna della sezione 2.

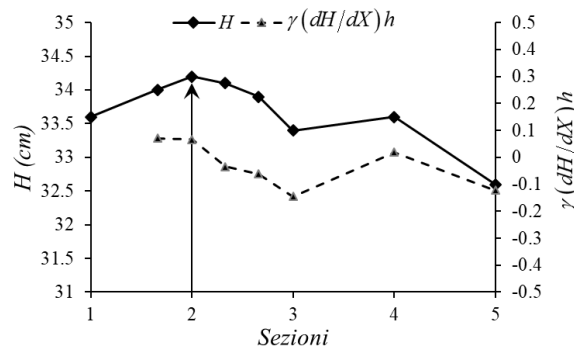


Fig.4.6: Andamento di H e di $\gamma(dH/dX)h$ lungo la curva

Al fine di identificare l'entità della vegetazione erosa nel tempo, le sezioni di interesse sono state marcate con vernici di colori diversi, come mostrato in Fig.4.7a. Inoltre a valle del canale è stata posta una griglia (vedi Fig.4.7b) per trattenere gli steli di vegetazione e le radici estirpate durante la prova e quindi identificare la corrispondenza tra gli steli raccolti e le sezioni di provenienza.

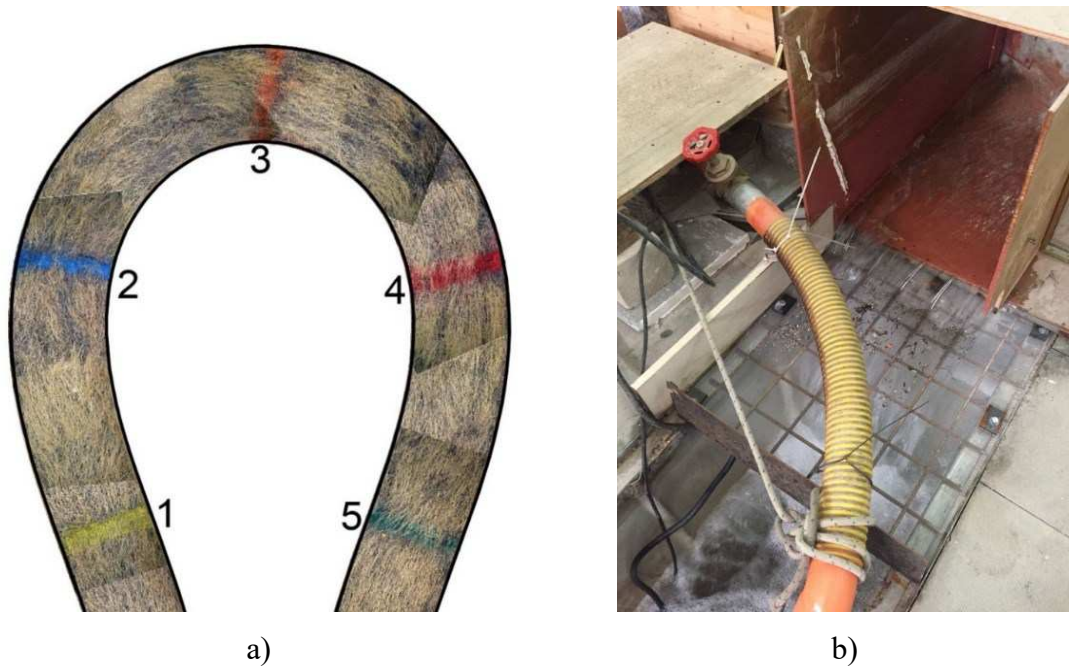


Fig.4.7: a) Planimetria del tratto di canale oggetto di studio con indicazione della marcatura delle sezioni di interesse; b) Foto della griglia utilizzata

4.1.2 Evoluzione del processo di degradazione della vegetazione matura

Prima della prova, il fondo del canale è stato rilevato utilizzando un distanziometro laser, con la precisione del millimetro. I valori di quota del fondo sono stati acquisiti lungo le sezioni di interesse con un passo di 1 cm. Quindi, per ogni misurazione acquisita, è stato possibile calcolare la quota dell' i -esimo punto del profilo del fondo discretizzato z_i ($i = 1 \dots 49$) rispetto al basamento orizzontale.

Inoltre, per analizzare l'evoluzione del processo di degradazione ed estirpamento della vegetazione durante la prova e al variare della portata, sono stati utilizzati i fotogrammi delle registrazioni effettuate dalla telecamera mobile. In particolare, utilizzando i fotogrammi delle riprese video registrate, è stato possibile effettuare la ricostruzione fotografica del fondo e la mappatura dello stato di degradazione della vegetazione in diversi istanti di tempo e per diversi valori di portata. In definitiva, sono state ottenute quattro ricostruzioni planimetriche relative agli istanti $T_1 = 1620$ s, $T_2 = 2700$ s, $T_3 = 3510$ s e $T_4 = 4110$ s.

Alla fine della prova, poi, il fondo del canale è stato di nuovo rilevato utilizzando il distanziometro laser.

Dal confronto del fondo rilevato prima e dopo la prova è stato possibile quantificare le aree complessivamente erose o di deposito della vegetazione lungo il canale. In particolare, poiché come detto ciascuna sezione è stata discretizzata in 49 tratti i -esimi di larghezza $\Delta y = 1$ cm, per ciascun tratto i -esimo è stata calcolata la dimensione dell'area A_i compresa fra il profilo del fondo rilevato prima della prova e quello rilevato dopo la prova. In Fig.4.8 è individuata l'area A_i nell' i -esimo tratto di profilo.

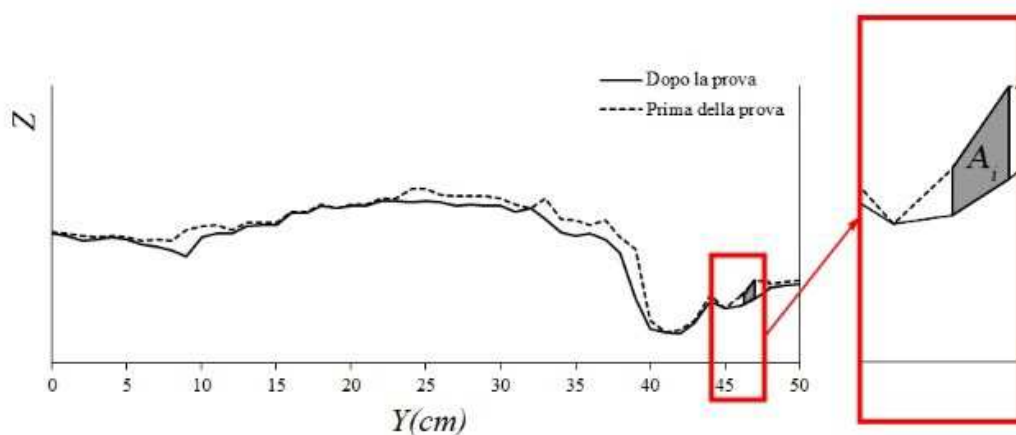


Fig.4.8: Schema di calcolo delle aree sottese ai profili

In Fig.4.9 sono riportati gli andamenti delle aree A_i per le sezioni di interesse. In tale figura, si nota come le sezioni di inflessione, ovvero le sezioni 1 e 5, sono le meno interessate dal fenomeno erosivo. Le sezioni 3 e 4, invece, sono particolarmente interessate da fenomeni erosivi soprattutto in prossimità della sponda esterna. Nella sezione 2 si evidenziano anche depositi di materiale, specialmente nella zona centrale della stessa.

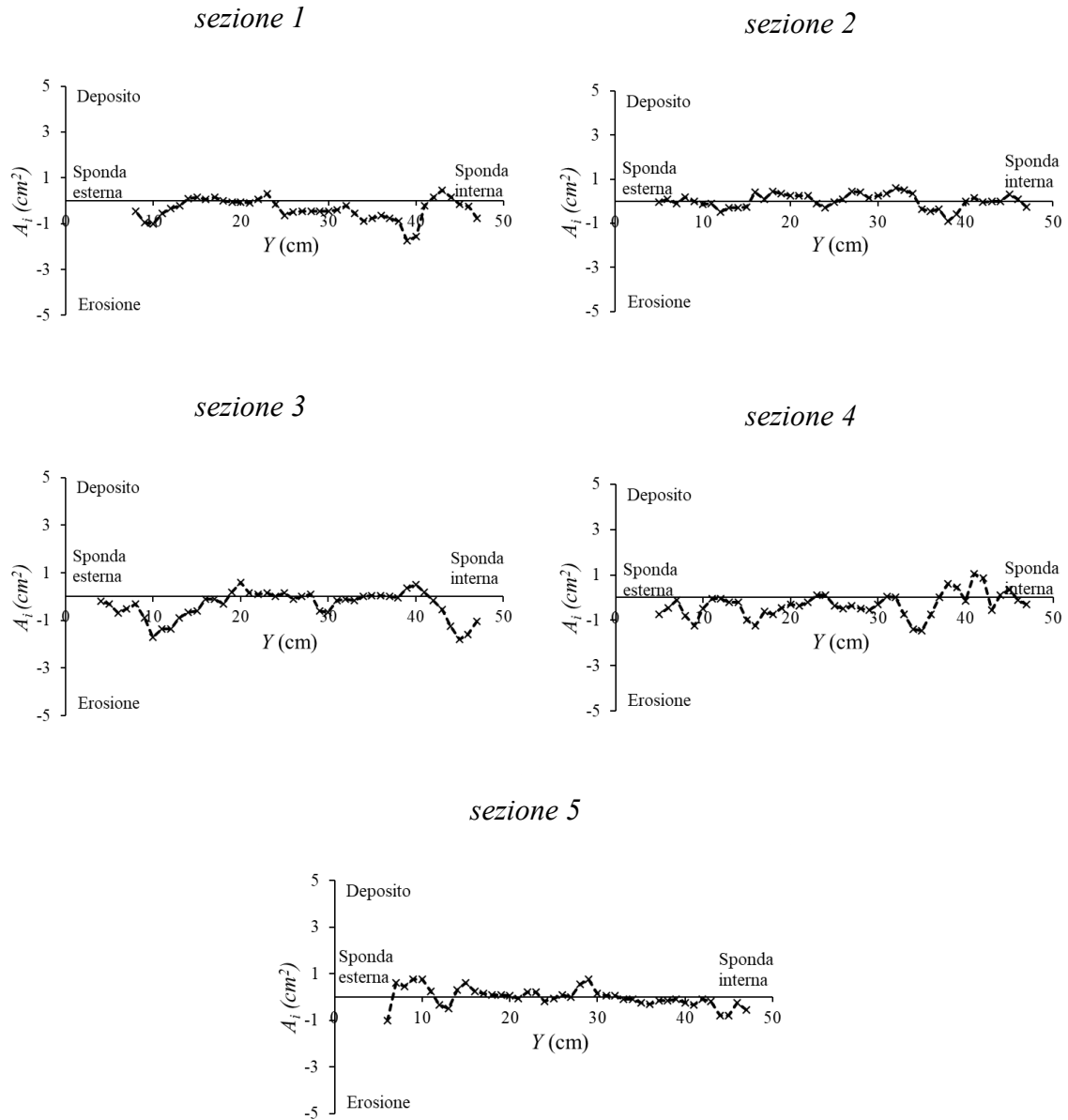


Fig.4.9: Andamento delle aree A_i per le sezioni di interesse

Utilizzando i profili misurati nelle sezioni trasversali di interesse è stato stimato un valore indicativo dei volumi complessivi ΔV_k ($k = 1, \dots, 4$) nei tratti di canale compresi tra coppie di

sezioni consecutive. A tal fine, per ciascun tratto di canale, sono stati individuati i volumi $V_{j,i}$ sottesi dai profili del fondo rilevati rispettivamente prima ($j = 1$) e dopo la prova ($j = 2$) tra la generica sezione k e la successiva $k + 1$:

$$V_{j,i} = \frac{z_{j,i,k} + z_{j,i,k+1}}{2} \times l_{i,k} \times \Delta y \quad j = 1, 2 \quad i = 1 \dots 49 \quad k = 1 \dots 4 \quad (4.1)$$

Essendo $z_{j,i,k}$ e $z_{j,i,k+1}$, rispettivamente le quote del fondo della generica sezione k e della successiva $k + 1$ ($k = 1 \dots 4$) e $l_{i,k}$ la relativa distanza nell' i -esimo punto del profilo discretizzato.

In questo modo, è stato possibile calcolare i volumi complessivi per ogni tratto i -esimo ΔV_i in cui sono discretizzate le sezioni come:

$$\Delta V_i = V_{2,i} - V_{1,i} \quad i = 1 \dots 49 \quad (4.2)$$

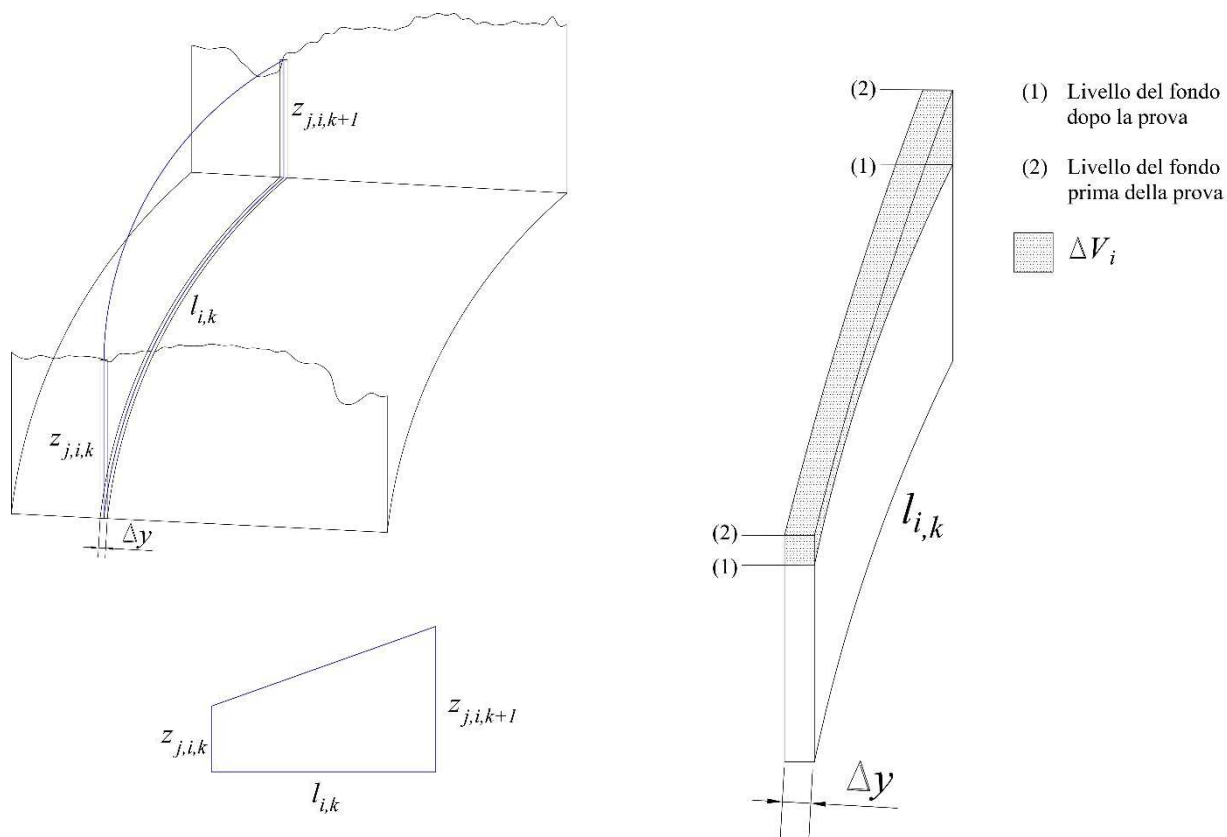


Fig.4.10: Schema di calcolo del volume ΔV_i

Quindi il volume complessivamente eroso o depositato per ogni tratto di canale compreso fra coppie di sezioni consecutive è definito come:

$$\Delta V_k = \sum_{i=1}^{49} (\Delta V_i) \quad k = 1 \dots 4 \quad (4.3)$$

I valori di ΔV_k sono riportati nella tabella 4.1. Si nota che ΔV_k è negativo per tutte le coppie di sezioni e ciò conferma che il manto vegetato è stato interessato maggiormente da processi erosivi. Si nota inoltre che il processo erosivo più evidente si ha nel tratto compreso tra la sezione 3 e la sezione 4.

Coppia di sezioni	$\Delta V_k \text{ (cm}^3\text{)}$
1-2	-425.76
2-3	-286.60
3-4	-1762.38
4-5	-744.35

Tab.4.1: ΔV_k ottenuto per ogni coppia di sezioni consecutive

Per analizzare l'evoluzione del processo erosivo del manto vegetato nel tempo sono state utilizzate le ricostruzioni planimetriche effettuate utilizzando i video registrati corrispondenti agli istanti di prova T_1 , T_2 , T_3 e T_4 riportate in Fig.4.11. Nella stessa figura è anche riportato l'andamento della portata Q nel tempo da cui si evince che i valori di portata corrispondenti agli istanti T_1 , T_2 , T_3 e T_4 sono pari a $Q_1=9,7$ l/s, $Q_2=10.67$ l/s, $Q_3=14.21$ l/s e $Q_4=20$ l/s.

La Fig. 4.11 evidenzia come l'area del canale maggiormente interessata da fenomeni erosivi è quella in prossimità della sponda esterna nella zona compresa fra la sezione 2 e la sezione 4 (e quindi nei tratti 2-3 e 3-4). Il fenomeno di degradazione è maggiormente evidente a partire dall'istante $T_3=3510$ s, a cui corrisponde una portata di 14.21 l/s. La Tab.4.1 conferma quanto osservato in Fig.4.11 per il tratto 3-4, invece per il tratto 2-3 la Tab.4.1 indica un valore complessivo eroso inferiore agli altri tratti. La ridotta quantità di materiale in tale tratto può essere dovuta alla presenza di depositi di materiale nella sezione 2, come mostra la Fig.4.9.

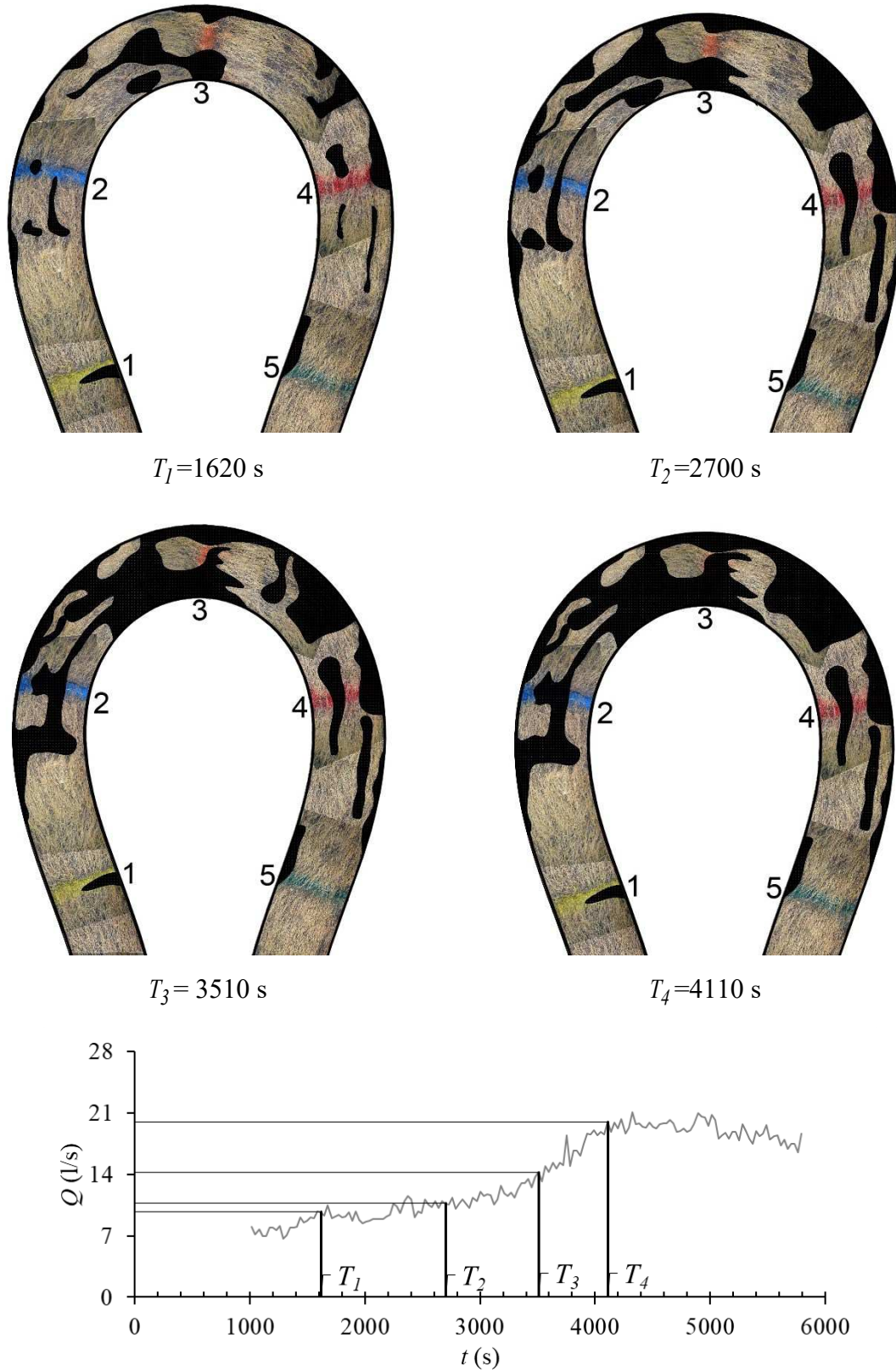


Fig. 4.11: Distribuzione planimetrica delle aree erose agli istanti di rilievo e curva $Q-t$

In Fig.4.12 è riportato il confronto tra la superficie erosa nei diversi istanti di tempo e l'andamento della portata, che consente di determinare l'evoluzione del volume totale di vegetazione erosa. Dalla figura si evince che l'area della superficie erosa aumenta rapidamente al crescere della portata fino al valore di 14,21 l/s; oltre tale valore di portata l'area erosa cresce lievemente fino a stabilizzarsi.

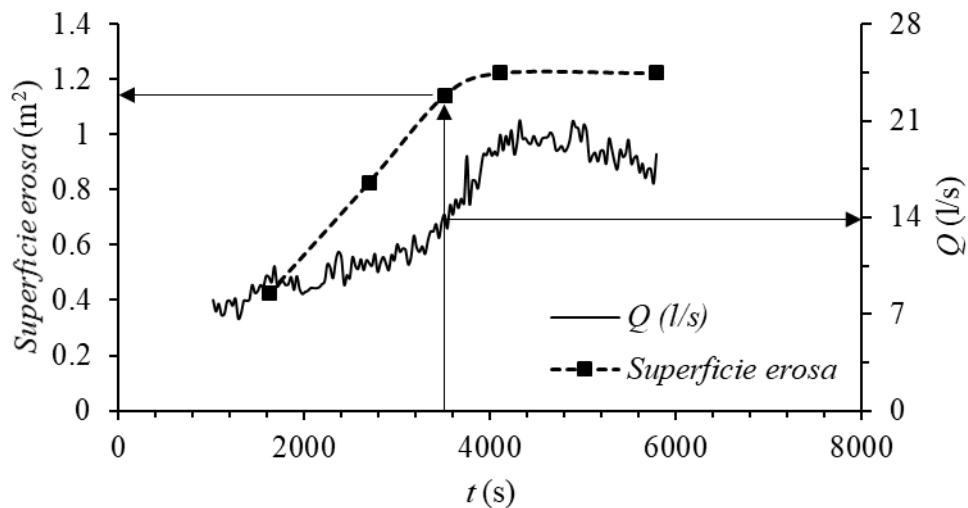


Fig.4.12: Andamento della superficie erosa rispetto alla portata

Al fine di fare un'analisi locale, per ciascuna sezione considerata, si è fatto riferimento agli steli colorati per ciascuna sezione (vedi Fig.4.5a).

Infatti, durante la prova sono stati prelevati dalla griglia posta a valle mostrata in Fig.4.5b, dei campioni di materiale organico il cui contenuto è stato poi smistato in tre categorie: steli colorati (contrassegnati con il numero della sezione corrispondente), steli non colorati (indicati con N.C) e vari residui organici scartati dal conteggio (Sc.). A titolo d'esempio in Fig.4.13 è mostrata la fotografia di uno dei campioni di materiale organico analizzato. Inoltre, tenendo conto dell'orario esatto di prelievo del materiale organico, è stata effettuata la corrispondenza fra la portata e la vegetazione erosa.



Fig. 4.13: Foto di uno dei campioni di materiale organico raccolto smistato per colore e tipologia

Per valutare la quantità di vegetazione distaccata nel tempo è stata calcolata la percentuale del numero di steli totali $n.st_{tot,T}$, pari alla somma fra i colorati e non all'istante generico di rilievo T , rispetto al numero totale di steli estirpati alla fine della prova. In Fig. 4.14 è mostrato l'andamento di $P_{n.st} = n.st_{tot,T} / n.st_{tot}$ in funzione del tempo (Fig. 4.14a) e della portata Q (Fig. 4.14b). Da tali figure risulta immediatamente evidente che la maggior parte della vegetazione matura si è estirpata dal fondo erboso durante i primi 3500 secondi, per valori di portata crescente da un valore di 8 l/s ad un valore di 14,21 l/s.

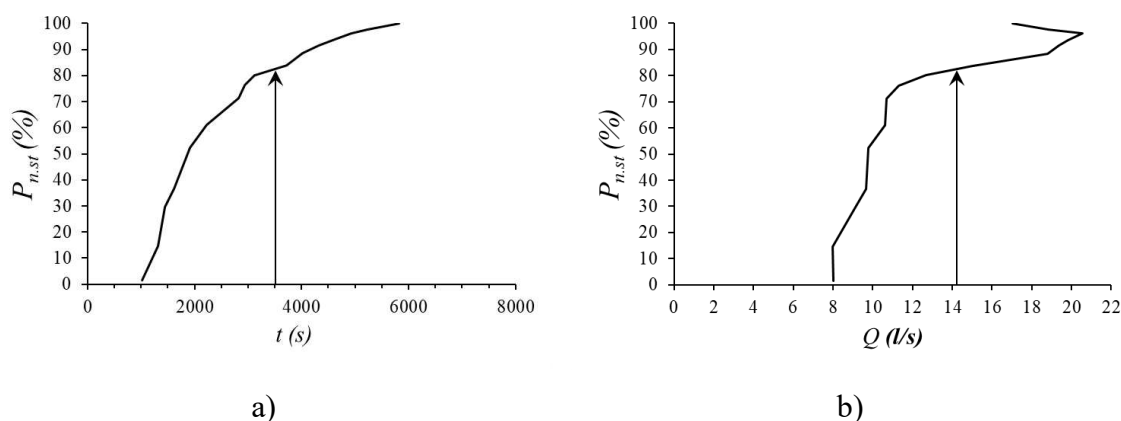


Fig.4.14: Andamento di $P_{n.st}$ al variare: a) del tempo; b) della portata

Allo stesso modo, è stata calcolata la percentuale del numero di steli colorati $n.st_{k,T}$ (del colore corrispondente alla sezione considerata) ed estirpati all'istante generico di rilievo T , rispetto al numero totale di steli dello stesso colore ed estirpati alla fine della prova $n.st_{tot,k}$. In Fig. 4.15 è mostrato l'andamento di $P_{n.st,k} = n.st_{k,T} / n.st_{tot,k}$ in funzione del tempo (Fig. 4.15a) e della portata Q (Fig. 4.15b). Si osserva in Fig.4.15 che l'evoluzione della percentuale di $P_{n.st,k}$ è simile per tutte le sezioni e anche con gli andamenti mostrati in Fig.4.14. Ciò significa che tutte le sezioni risentono in modo analogo dell'aumento di portata.

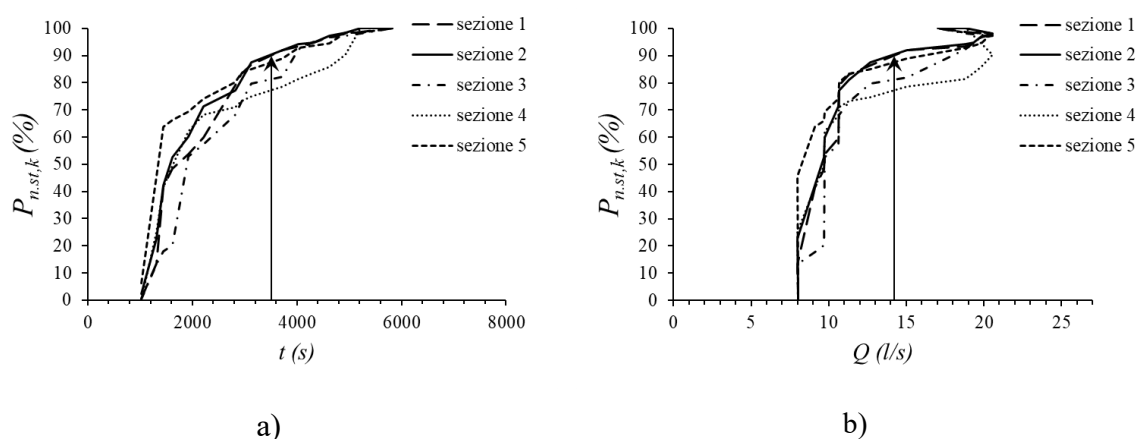


Fig.4.15: Andamento di $P_{n.st,k}$ relativo a ciascuna sezione al variare: a) del tempo; b) della portata

In Fig. 4.16 è mostrato l'istogramma del numero totale di steli colorati distaccati dal fondo vegetato ($n.st_k$) nella sezione di riferimento. Da tale figura si osserva che la sezione da cui si sono distaccati più steli è la sezione di apice, ovvero la sezione 3, seguita dalle sezioni 2, 1 e poi dalle sezioni 4 e 5.

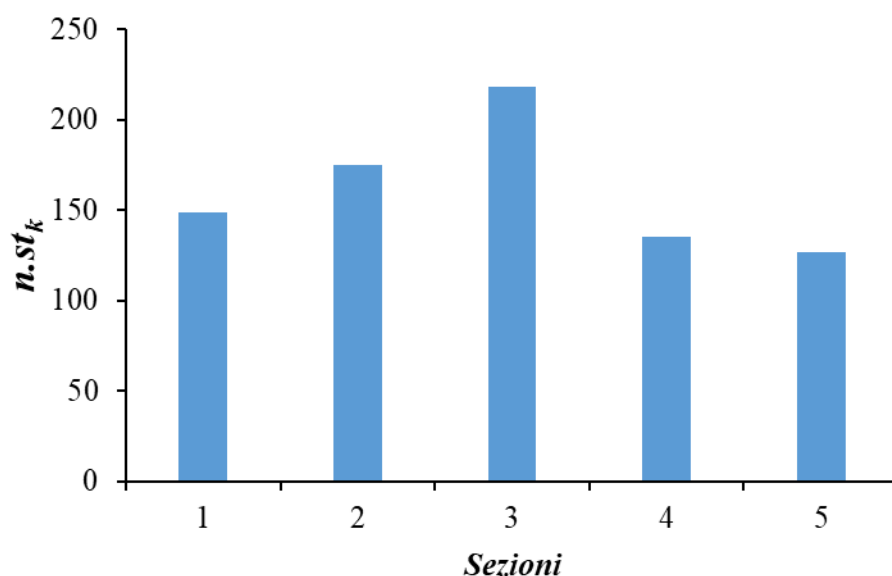


Fig.4.16: Istogramma del numero di steli distaccati dal fondo vegetato

In Fig. 4.17 è mostrato, per ciascuna sezione, il confronto tra la variazione del numero di steli estirpati ($n.st_k$) e l'andamento della portata Q nel tempo t . Da tale figura si osserva che, nella prima fase di aumento della portata, ovvero fino all'istante $T_2=2700$ s, si hanno dei picchi in $n.st_k$, corrispondenti ad un immediato sradicamento degli steli. In una seconda fase, compresa fra l'istante $T_2=2700$ s e l'istante $T_4=4110$ s, il valore dei picchi diminuisce drasticamente. Infine, a partire dall'istante T_3 , corrispondente ad un valore di portata di 14,21 l/s, si sradicano dal fondo vegetato sempre meno steli, confermando quanto già osservato dalle mappe di Fig.4.11.

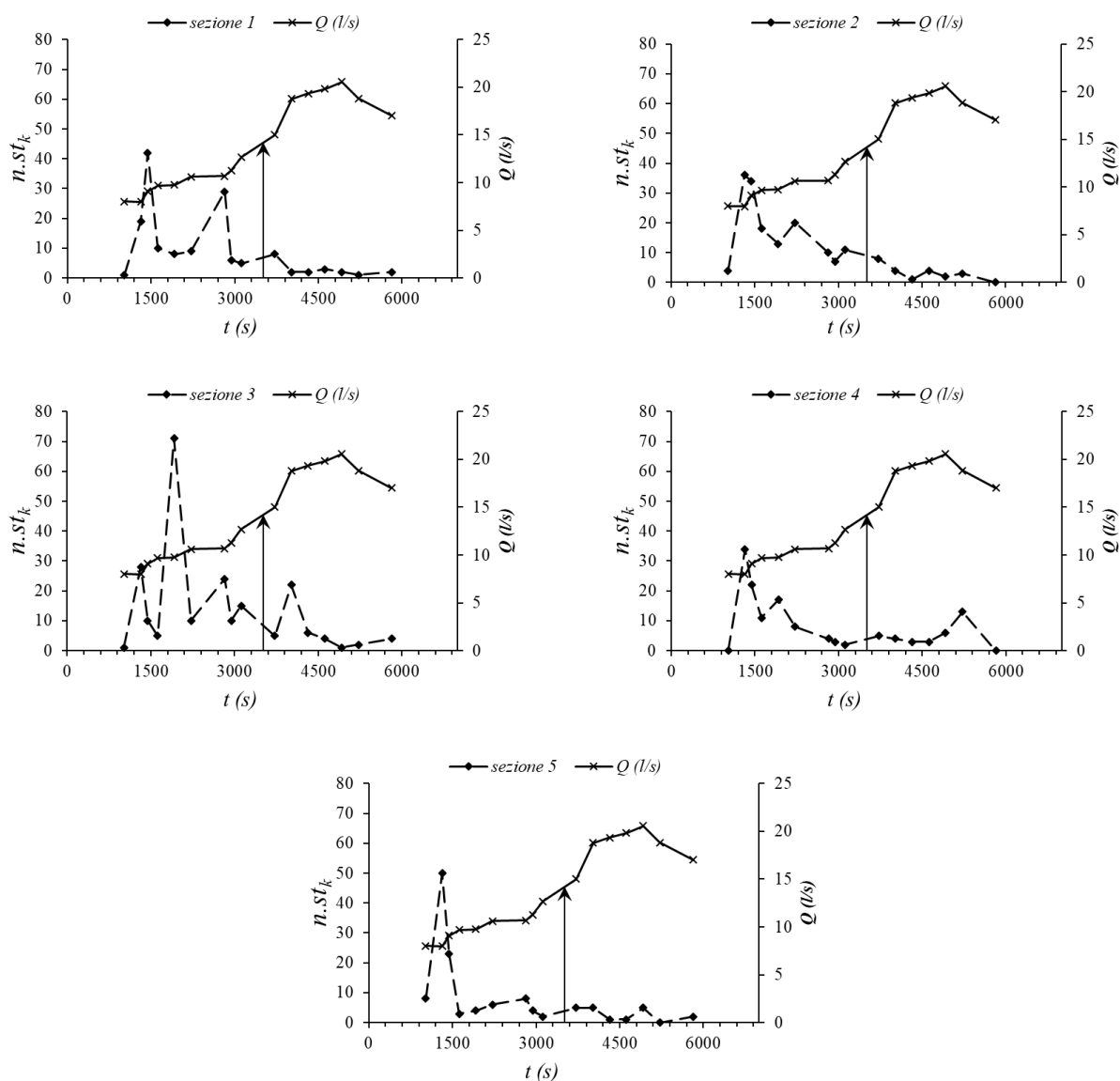


Fig. 4.17: Andamento del numero di steli raccolti nel tempo

In Fig.4.18, invece, è mostrato l'andamento del numero di steli estirpati per ciascuna sezione ($n.st_k$) in funzione della portata Q . Il fenomeno più evidente riscontrabile dai grafici di Fig.4.18 è che nell'istante in cui è stata raggiunta una portata di circa 8,5 l/s, si ha il maggior numero di steli sradicati dalle sezioni 1, 2, 4 e 5; per la sezione 3, invece, il numero maggiore di steli sradicati si ha per una portata di circa 10 l/s.

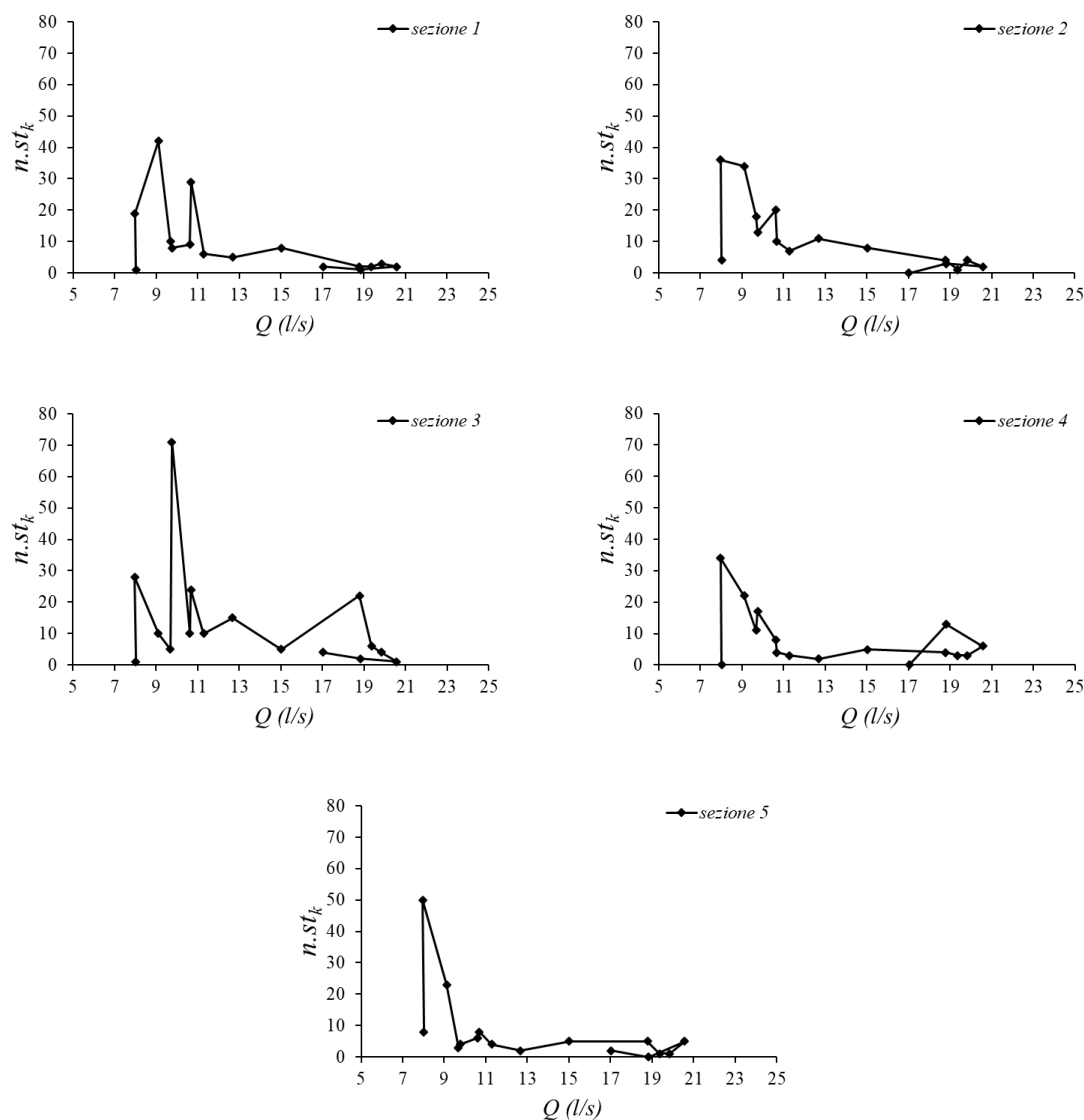


Fig. 4.18: Andamento del numero di steli raccolti al variare della portata

Dato che gli steli di vegetazione estirpati durante la prova sono caratterizzati da varie caratteristiche geometriche (diverso spessore, lunghezza, tipologia di ramificazione ecc.), si è voluto considerare anche il peso totale di materiale organico raccolto. A tal fine, i campioni degli steli raccolti sono stati pesati utilizzando una bilancia analitica ad alta precisione con risoluzione di 0,1 mg. Successivamente, è stata valutata la percentuale del peso di steli estirpati all'istante generico T , in funzione del peso totale di steli raccolti alla fine della prova ($P_{p.st}$). In Fig.4.19 è mostrato l'andamento del numero totale e del peso complessivo di steli estirpati espressi in percentuale (rispettivamente pari a $P_{n.st}$ e $P_{p.st}$) al variare del tempo. Si vede dalla Fig.4.19 che le due curve si sovrappongono e quindi è possibile

affermare che le caratteristiche geometriche degli steli non incidono in modo significativo sull'evoluzione del processo erosivo del manto vegetato.

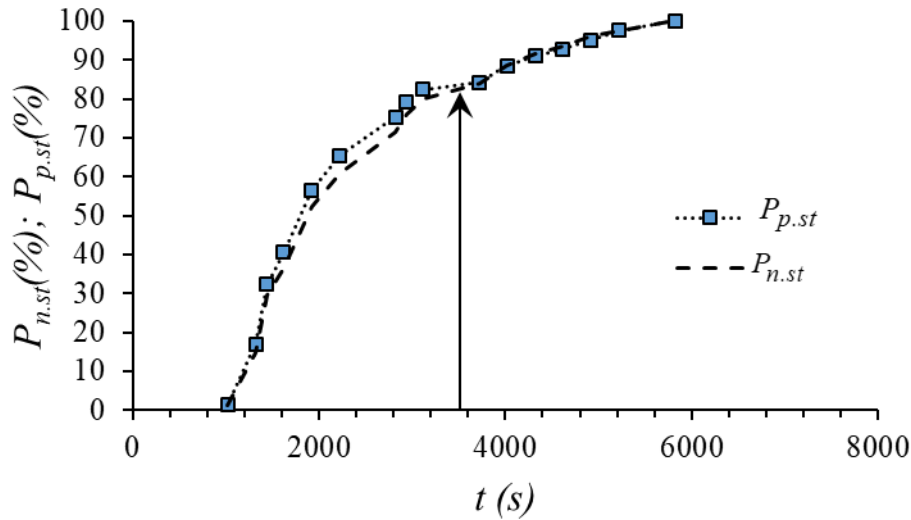


Fig.4.19: Confronto fra gli andamenti di $P_{n.st}$ e $P_{p.st}$ di tutti gli steli raccolti al variare del tempo

Allo stesso modo è stata calcolata la percentuale del peso di steli estirpati per ciascuna sezione all'istante generico T rispetto al peso totale di steli estirpati dalla stessa alla fine della prova ($P_{p.st,k}$). In Fig.4.20 sono confrontati, per ciascuna sezione, l'andamento del numero totale e del peso totale di steli colorati espressi in percentuale (rispettivamente pari a $P_{n.st,k}$ e $P_{p.st,k}$) al variare del tempo. Dalla Fig. 4.20 si può osservare che, soprattutto in corrispondenza delle sezioni 1, 2 e 4, la curva di $P_{p.st,k}$ si discosta in alcuni tratti da quella di $P_{n.st,k}$. Stimando infatti l'entità della vegetazione erosa sulla base del numero degli steli, questi vengono considerati tutti allo stesso modo a prescindere dal loro peso e dalle loro caratteristiche geometriche. Stimando, invece, l'entità dell'erosione sulla base del peso, l'incidenza per ciascuno stelo sul campione complessivo è funzione del proprio peso.

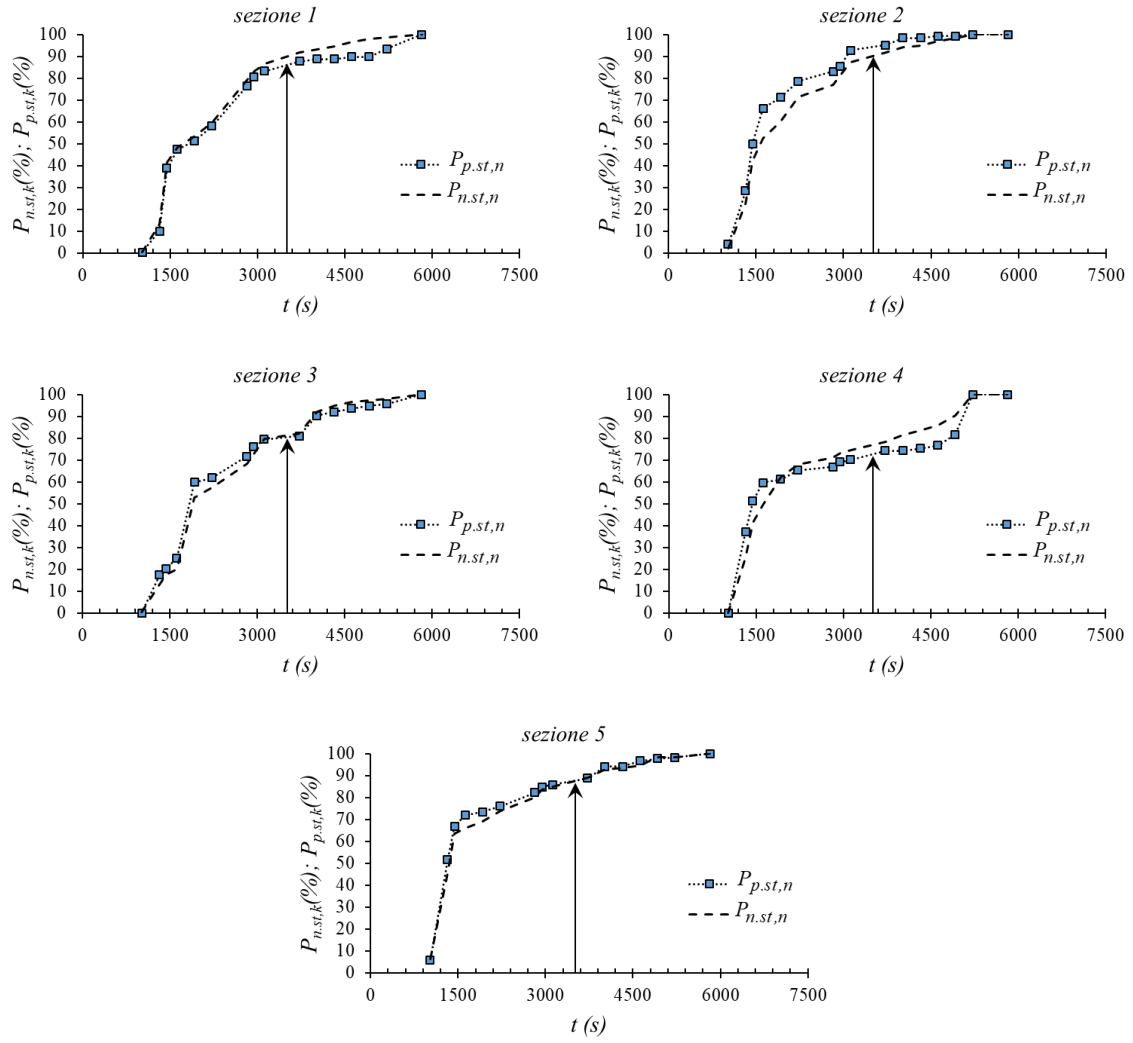


Fig.4.20: Confronto fra $P_{n.st,k}$ e $P_{p.st,k}$ per ciascuna sezione al variare del tempo

Questo concetto è ulteriormente confermato in Fig.4.21, dove è riportato l'istogramma dell'incidenza degli steli provenienti dalle sezioni rispetto agli steli totali raccolti alla fine della prova, sia in termini di numero ($I_{n.st}$) che in termini di peso ($I_{p.st}$), determinati come:

$$I_{n.st} = \frac{n.st_k}{n.st} \times 100 \quad k = 1 \dots 5 \quad (4.4)$$

$$I_{p.st} = \frac{p.st_k}{p.st} \times 100 \quad k = 1 \dots 5 \quad (4.5)$$

Infatti, dalla Fig. 4.21 si nota che $I_{n.st}$ e $I_{p.st}$ presentano una variabilità simile al variare delle sezioni, ma hanno entità diversamente variabili.

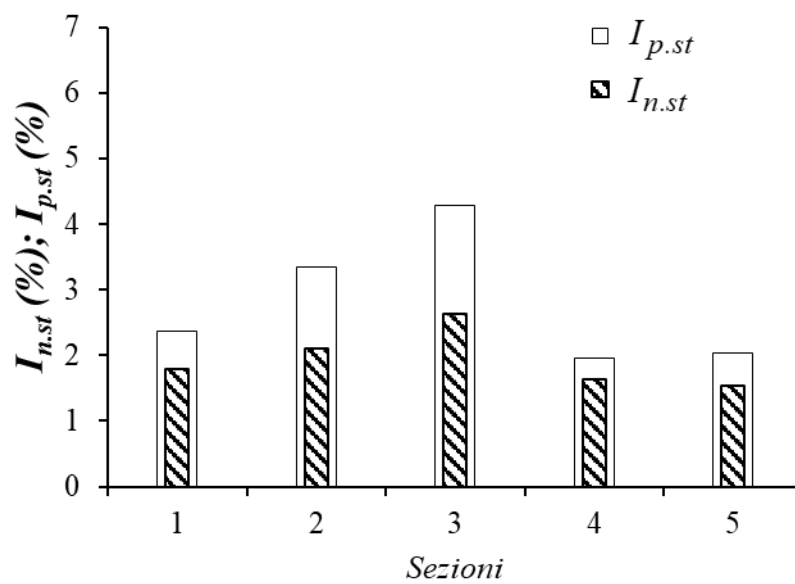


Fig.4.21: Confronto fra $I_{n.st}$ e $I_{p.st}$ al variare delle sezioni

4.2 Presenza di vegetazione distribuita ad isole

4.2.1 Generalità

Come detto in Introduzione, il “blockage factor”, o fattore di copertura, è uno dei parametri importanti da considerare per studiare gli effetti della distribuzione eterogenea di vegetazione al fondo sulle caratteristiche cinematiche della corrente.

Alla luce di ciò, prima di procedere alla sperimentazione, si è ritenuto utile analizzare le possibili configurazioni da adottare nel canale di riferimento per i diversi fattori di copertura (“blockage factor”) suggeriti in letteratura (vedi ad esempio Green, 2005; Nikora et al., 2008). Inoltre, in accordo con quanto verificato da Ming e Shen (1973) si è considerato che tali fattori di copertura possono riguardare sia isole disposte in modo allineato, sia isole disposte in modo sfalsato.

Le suddette analisi hanno in definitiva condotto ad ipotizzare gradi di copertura variabili dal 10% al 60% sia con disposizione di isole allineate che sfalsate. In Fig.4.22 sono riportati gli schemi corrispondenti agli estremi del range considerato e quindi corrispondenti a gradi di copertura pari al 10% e al 60% (computati su un tratto di canale di lunghezza pari ad 1m in asse).

Da tale figura si nota che, nella configurazione allineata con copertura del 10% le mutue distanze fra le isole sono di 300 mm lungo X in asse al canale e 100 mm lungo l’asse Y ; la disposizione sfalsata corrispondente è quella ottenuta traslando ciascuna coppia di isole che insistono sulla stessa sezione di 50 mm. La configurazione allineata con copertura del 60% invece mostra mutue distanze fra le isole di 25 mm lungo X in asse al canale e 50 mm lungo l’asse Y .

Nel presente lavoro, l’attenzione è stata focalizzata solo sulla configurazione corrispondente al grado di copertura del 10% che, per il range considerato, rappresenta una condizione in cui è più evidente il passaggio dalle zone non vegetate a quelle vegetate.

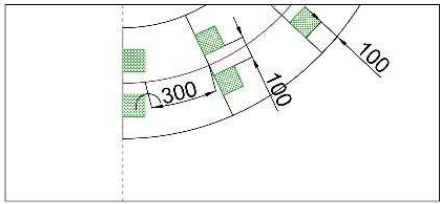
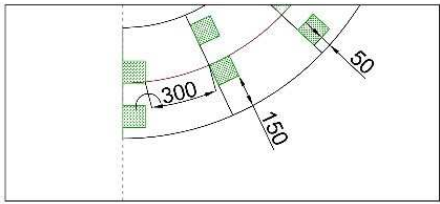
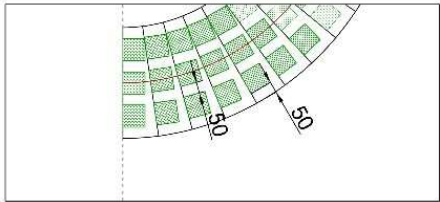
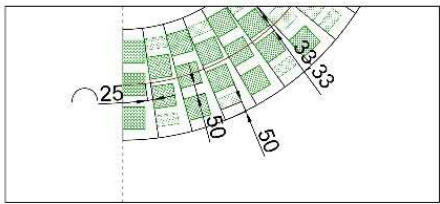
<i>Copertura (%)</i>	<i>Disposizione</i>	<i>Configurazioni</i>
10	<i>Isole allineate</i>	
	<i>Isole sfalsate</i>	
60	<i>Isole allineate</i>	
	<i>Isole sfalsate</i>	

Fig.4.22: Stralci di distribuzione planimetrica delle isole di vegetazione artificiale con grado di copertura del 10% e del 60%

4.2.2 Caratterizzazione delle prove effettuate

Come detto al precedente paragrafo, nel presente lavoro è stata esaminata la configurazione con due isole vegetate sul fondo, corrispondenti al grado di copertura del 10%. In particolare, l'analisi ha riguardato la sezione di apice (sezione 3) che rappresenta, sulla base dei risultati ottenuti nella prima fase del presente lavoro, la sezione più interessata dal processo di degradazione della vegetazione. Secondo la configurazione scelta e riportata in Fig.4.23, le due isole distano entrambe 50 mm dall'asse del canale e 100 mm dalle sponde. L'isola collocata in prossimità della sponda esterna è stata identificata con la lettera "A", quella collocata in prossimità della sponda interna con la lettera "B" (vedi Fig.4.23).



Fig.4.23: Immagine della sezione 3 con configurazione a due isole

L'obiettivo di questa fase del lavoro è quello di indagare sull'influenza delle due isole vegetate sulle caratteristiche cinematiche della corrente, focalizzando l'attenzione nelle aree di passaggio dalla porzione di sezione non vegetata a quella vegetata.

A tal fine, è stata condotta una prova sperimentale mantenendo la portata costante e pari ad un valore di 10,3 l/s, che è prossima al valore di portata per il quale il processo di degradazione osservato nella prima fase del lavoro diventava più significativo (vedi Fig.4.11). Anche in questo caso, la portata è stata registrata ogni 30 secondi grazie al misuratore Mainstream EH 7000. Durante tale prova, sono state misurate le componenti istantanee longitudinali e verticali della velocità della corrente in corrispondenza delle posizioni mostrate in Fig.4.24. Da tale figura si nota che, in prossimità del bordo esterno dell'isola A, le componenti di velocità sono state rilevate lungo sei profili identificati come

segue: uno in corrispondenza del bordo, tre esterni all'isola con mutue distanze di 0,6 cm, 2 interni all'isola e distanti 0,9 cm.

Tale criterio di disposizione dei punti di misura è stato applicato anche in prossimità del bordo interno dell'isola A e a monte dell'isola B. Inoltre, le misurazioni sono state anche effettuate in corrispondenza dell'asse del canale e al centro di ogni isola.

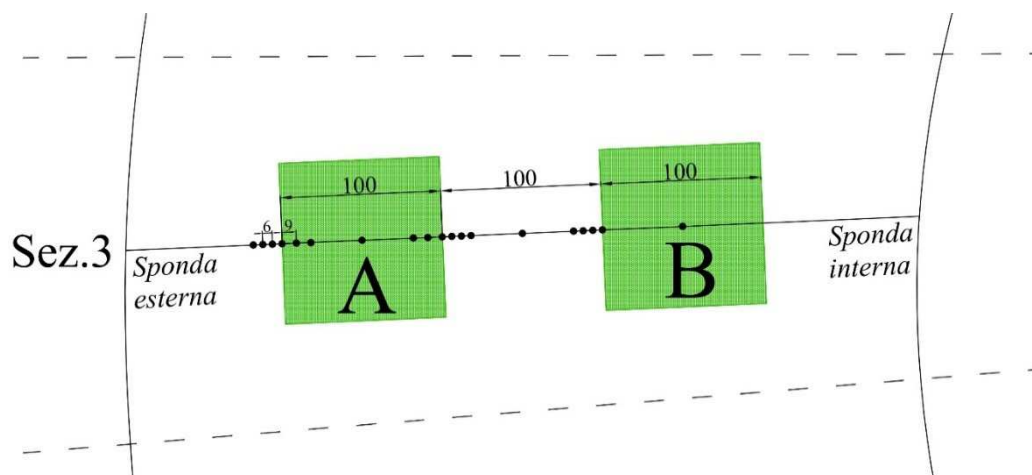


Fig.4.24: Schema planimetrico di disposizione delle isole con posizioni di misura (le misure indicate sono espresse in millimetri)

Le componenti di velocità sono state rilevate usando il misuratore ad ultrasuoni DOP2000 (Lemmin e Rolland, 1997). Tale strumento è dotato di sonde che emettono e ricevono simultaneamente segnali ultrasonori ad una determinata frequenza, permettendo di misurare istantaneamente la velocità della corrente lungo la direzione delle sonde stesse. Nel caso in esame sono state utilizzate due sonde con frequenza pari a 2 MHz ed è stata impostata una frequenza di acquisizione (F_{prf}) pari a 4125 Hz. Inoltre, per ciascun punto di rilievo sono stati acquisiti 1000 profili di velocità istantanea, con distanza fra i punti di misura in direzione delle sonde pari a 0,75 mm. La prima sonda è stata posizionata in direzione verticale, mentre la seconda è stata inclinata di 60° rispetto all'asse X , come indicato in Termini e Piraino (2011). In questo modo, per ciascun punto di misura, le componenti longitudinali e verticali della velocità ($v_X(t)$ e $v_Z(t)$) sono state ottenute dalla composizione vettoriale dei vettori di velocità acquisiti da ciascuna sonda (vedi Fig.4.25). In particolare, indicando con $v_{R1}(t)$ e $v_{R2}(t)$ le velocità istantanee acquisite rispettivamente dalla sonda verticale e da quella inclinata, le componenti di velocità istantanee sono state ottenute applicando le seguenti relazioni:

$$v_Z(t) = -v_{RI}(t) \quad v_X(t) = -\frac{v_{R2}(t) + v_{RI}(t)}{\cos(\alpha)} \quad (4.6)$$

Al fine di consentire il rilievo delle componenti della velocità fino al fondo, per ciascuna posizione di misura mostrata in Fig.4.24, la sonda inclinata è stata traslata lungo la direzione ortogonale alla sezione con un passo di 2 mm. In questo modo, è stato possibile ottenere una distanza mutua tra i punti di misura lungo il profilo verticale pari a 3.5 mm. In Fig. 4.25 è mostrato lo schema di rilievo di un profilo di velocità, con indicazione delle componenti di velocità misurate al generico punto P.

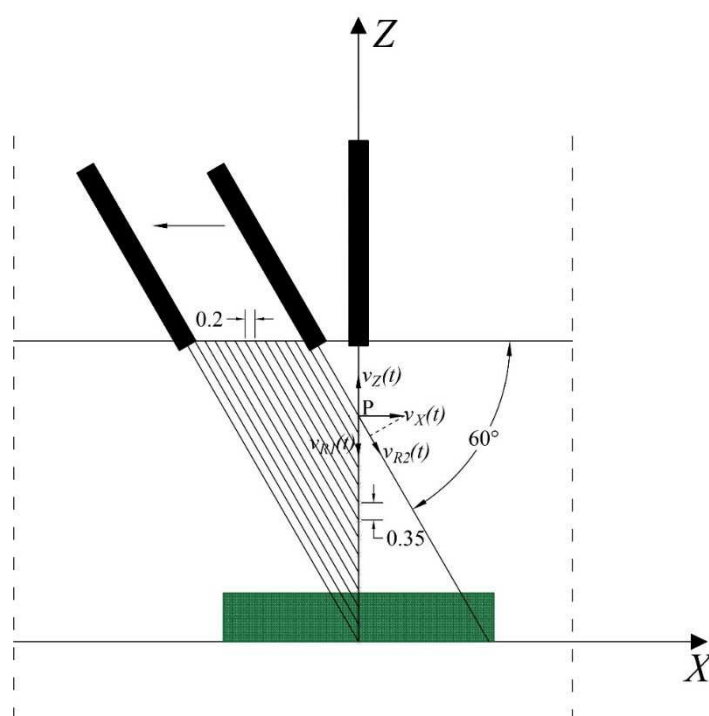


Fig.4.25: Schema della griglia di misura lungo il profilo verticale

Le due sonde sono state fissate ad un supporto che, a sua volta, è collocato in un sistema di posizionamento automatico chiamato “Coordinatometro” grazie al quale è possibile spostare da remoto la posizione dello stesso in qualsiasi punto all’interno del canale con la precisione dell’ordine del millimetro. Inoltre, grazie ad un software connesso alla piattaforma hardware Arduino appositamente realizzato, è stato possibile comandare la rotazione del supporto delle sonde da remoto con una risoluzione di 0.014° , utilizzando un telecomando ad infrarossi.

5. DISCUSSIONE ED ANALISI DEI RISULTATI

5.1 Generalità

Nel presente capitolo vengono mostrati e descritti i risultati ottenuti nelle due campagne sperimentali condotte.

In particolare, utilizzando i dati raccolti nella prima fase del lavoro, relativi alla valutazione delle caratteristiche geometriche e meccaniche della vegetazione matura (vedi capitolo 3) e al processo di degradazione osservato durante la prova sperimentale (vedi capitolo 4), in questo capitolo si è voluto valutare come essi possano essere messi in relazione tra loro.

Utilizzando, invece, i dati di velocità istantanea raccolti nella seconda fase del lavoro, si è proceduto all'esame dei profili medi temporali delle componenti di velocità e delle tensioni di Reynolds nelle zone di passaggio tra le aree non vegetate e quelle vegetate.

5.1 Vegetazione matura uniformemente distribuita

La relazione fra le caratteristiche geometriche e meccaniche delle radici della vegetazione matura può essere analizzata in Fig.5.1, dove è riportato l'andamento del valore sintetico di resistenza a rottura $F_{max,m}$, (Eq.3.4) al variare dello spessore medio $\overline{S_r}$ (Fig.5.1a) e della lunghezza media $\overline{L_r}$ delle radici (Fig.5.1b). La Fig.5.1 conferma che la forza di rottura $F_{max,m}$ tende ad aumentare all'aumentare dello spessore medio $\overline{S_r}$ ed a diminuire all'aumentare della lunghezza media $\overline{L_r}$.

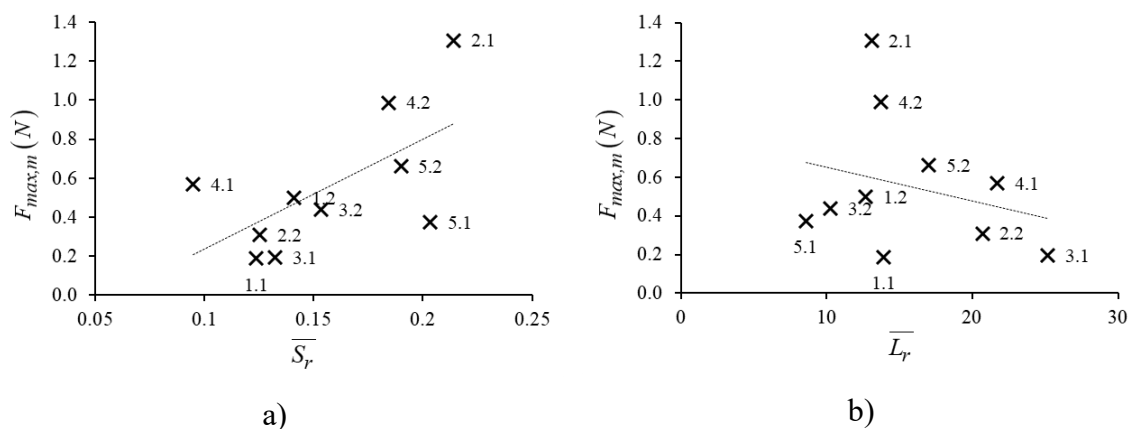


Fig.5.1: Variazione di $F_{max,m}$: a) variazione in funzione dello spessore medio delle radici $\overline{S_r}$; b) variazione in funzione della lunghezza media delle radici $\overline{L_r}$.

Tra l'altro, confrontando l'andamento della forza massima a rottura $F_{max,m}$, ottenuto nelle varie sezioni di interesse in prossimità delle sponde, con la relativa variazione della lunghezza media delle radici $\overline{L_r}$ (vedi Fig.5.2) e dello spessore medio delle radici $\overline{S_r}$ (vedi Fig.5.3), si nota che, per entrambe le sponde, l'andamento di $F_{max,m}$ è opposto rispetto a quello di $\overline{L_r}$, mentre è concorde a quello di $\overline{S_r}$.

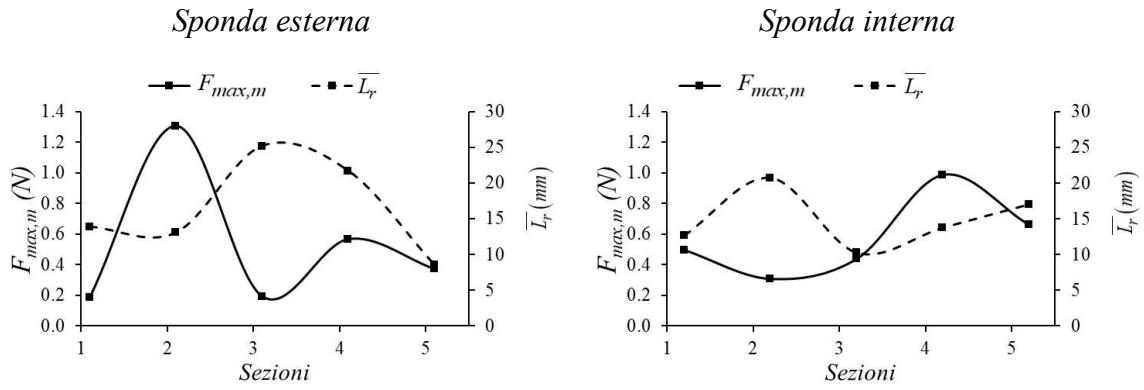


Fig.5.2: Confronto fra l'andamento di $F_{max,m}$ e l'andamento di $\overline{L_r}$ al variare delle sezioni di riferimento

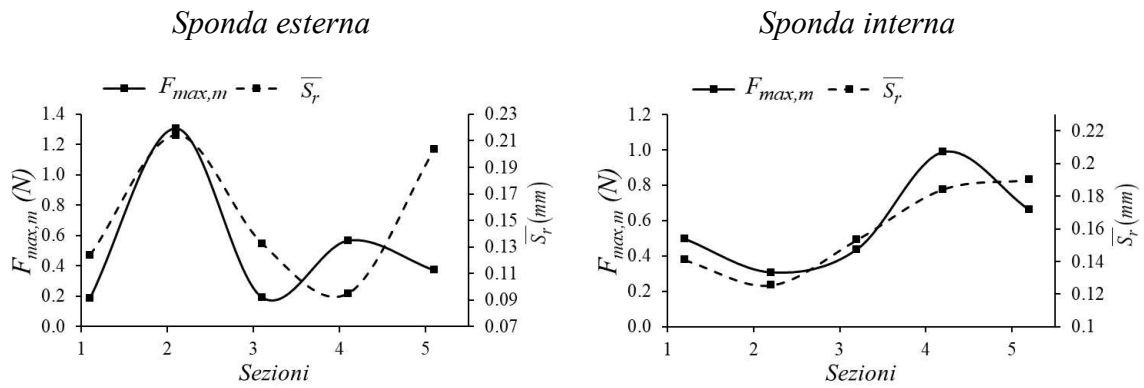


Fig.5.3: Confronto fra l'andamento di $F_{max,m}$ e l'andamento di $\overline{S_r}$ al variare delle sezioni di riferimento

I risultati ottenuti hanno suggerito di valutare il lavoro a rottura delle radici, che rappresenta un parametro significativo per caratterizzare le stesse dal punto di vista meccanico (Edmaier et. al, 2011). Il lavoro a rottura delle radici nell' i -esimo istante (W_i) è stato quindi definito come:

$$W_i = F_i \times \varepsilon_i \times l_0 \quad i=1, \dots, T_{t,fin} \quad (5.1)$$

dove si ricorda che l_0 è la distanza fra i due morsetti di serraggio a riposo (pari a 1 cm), $T_{t,fin}$ è l'istante finale della prova a trazione (ovvero quando è avvenuta la rottura di tutte le radici), F_i è la forza trasmessa dalla macchina a trazione nell' i -esimo istante (vedi Fig.2.14) e ε_i è la deformazione in percentuale rispetto a l_0 nell' i -esimo istante.

In Fig. 5.4 è mostrato l'andamento del lavoro a rottura al variare della deformazione per le zolle estratte dal fondo vegetato in prossimità della sponda esterna (Fig. 5.4a) e in prossimità della sponda interna (Fig. 5.4b). Il valore massimo ottenuto per ciascuna zolla è indicato con W_{max} .

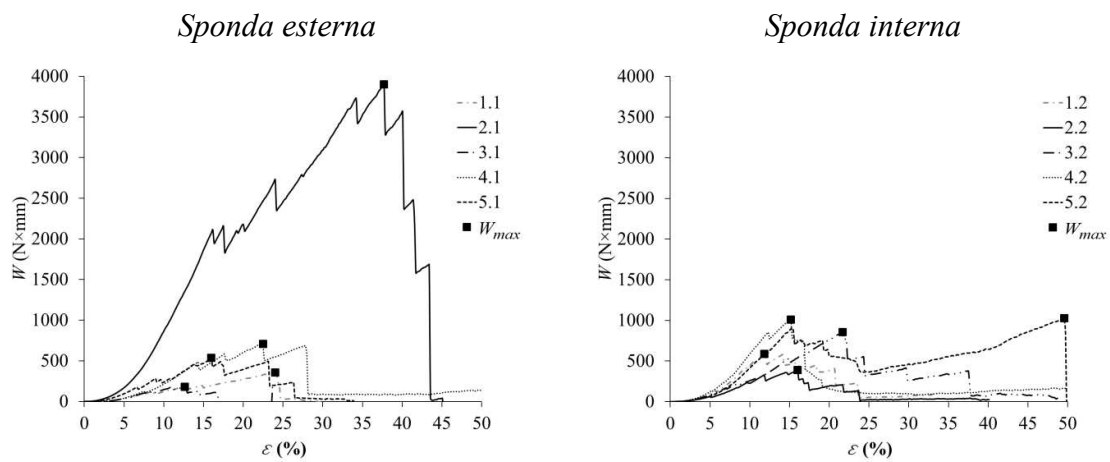


Fig.5.4: Andamento del lavoro di rottura W al variare della deformazione ε

Dalla Fig.5.4 si può notare che i profili di W presentano andamenti pressoché simili tranne che per il campione 2.1, dove il lavoro a rottura è caratterizzato da valori nettamente più elevati.

Anche in questo caso, al fine di definire un valore rappresentativo del lavoro a rottura per ciascuna zolla, è stato stimato il parametro $W_{max,m}$ come:

$$W_{max,m} = \frac{W_{max}}{n_p} \quad (5.2)$$

dove, si ricorda, n_p è il numero di picchi della forza F ottenuti dai grafici di Fig.3.16.

In Fig.5.5 è mostrato l'andamento di $W_{max,m}$ in funzione della lunghezza media $\overline{L_r}$ e dello spessore medio $\overline{S_r}$ delle radici. Tale figura mostra che, come osservato per $F_{max,m}$ (Fig.5.1),

anche il parametro $W_{max,m}$ tende ad aumentare con lo spessore medio e a diminuire all'aumentare della lunghezza media delle radici.

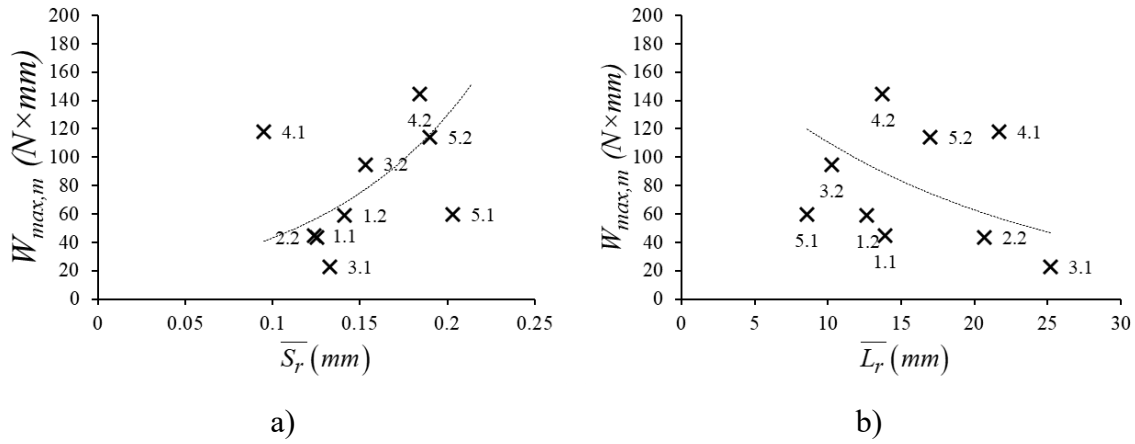


Fig.5.5: $W_{max,m}$ in funzione: a) dello spessore medio delle radici; b) della lunghezza media delle radici

Al fine di valutare come l'elasticità delle radici vari in funzione delle loro caratteristiche geometriche, in Fig.5.6 sono riportati i grafici del modulo di Young E (ottenuto per ciascuna zolla sulla base della corrispondente curva $\sigma_T - \varepsilon$, come descritto al paragrafo 3.2.1) in funzione della lunghezza media $\overline{L}_r$ e dello spessore medio $\overline{S}_r$ delle radici. In questo caso si osserva un trend opposto rispetto a quello mostrato per $W_{max,m}$ e $F_{max,m}$ (vedi Fig.5.1 e Fig.5.5). Infatti, in questo caso il modulo di Young E aumenta all'aumentare della lunghezza media delle radici e al diminuire dello spessore medio. Ciò conferma che le radici più deformabili e meno resistenti sono tendenzialmente quelle più lunghe e più spesse.

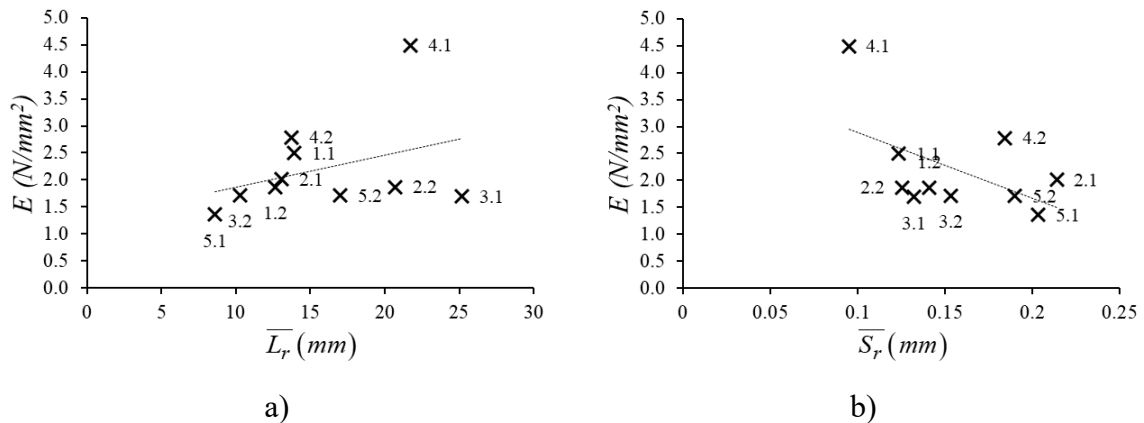


Fig.5.6: Modulo di Young E in funzione: a) dello spessore medio delle radici; b) della lunghezza media delle radici

A questo punto si è voluto analizzare come la variazione della resistenza a rottura delle radici lungo il canale possa influenzare l'evoluzione del processo erosivo del manto vegetato. Pertanto, in Fig.5.7 la variazione di $F_{max,m}$ lungo il canale è sovrapposta con quella del numero totale di steli estirpati da ciascuna sezione $n.st_k$, alla fine della prova. Da tale figura si evince che, per entrambe le sponde, le zolle caratterizzate da un alto valore di resistenza a rottura (come ad esempio le zolle prelevate in prossimità della sponda esterna della sezione 2 e in prossimità della sponda interna della sezione 4), sono meno interessate dal fenomeno di sradicamento degli steli (valore minore di $n.st_k$). Invece, le zolle in cui si hanno radici più fragili (valore minore di $F_{max,m}$) sono maggiormente interessate dal fenomeno erosivo (cioè caratterizzate da maggiori valori di $n.st_k$). D'altra parte dalle mappe riportate in Fig.3.10 è stato osservato che le aree maggiormente interessate dal fenomeno erosivo sono quelle in cui si hanno radici più fragili (cioè con un basso valore di $F_{max,m}$)

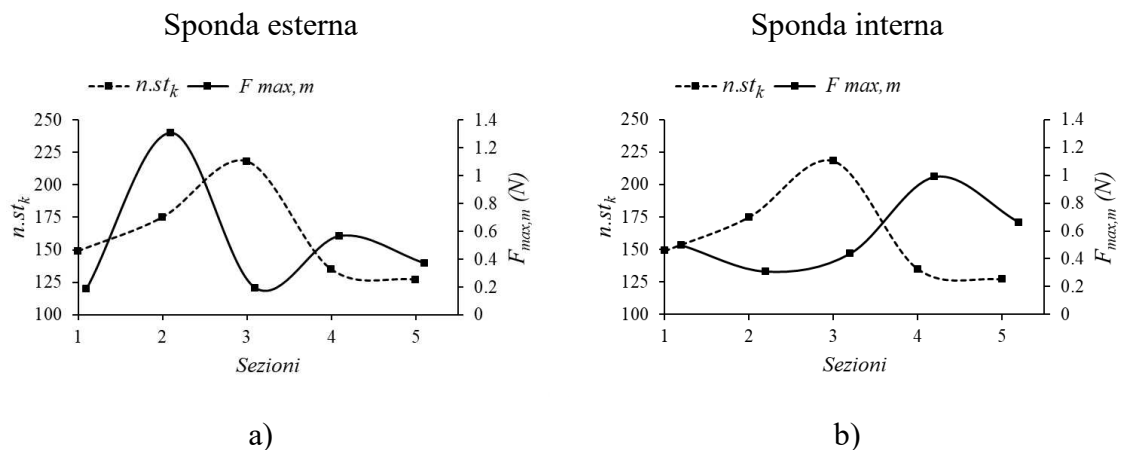


Fig.5.7: Confronto fra $F_{max,m}$ e il numero di steli distaccati: a) Sponda esterna; b) Sponda interna

Infine, in Fig. 5.8, si è voluto sovrapporre l'andamento della percentuale del numero totale di steli estirpati nei vari istanti di tempo, $P_{n.st}$ (espresso in percentuale rispetto al numero totale ottenuto alla fine della prova), con l'andamento della superficie complessiva erosa lungo la curva (valutata dalle mappe di Fig.3.10) al variare della portata Q . La Fig.5.8 conferma che il processo di erosione è più evidente nella prima fase della prova, quando la portata aumenta da un valore di 8 l/s ad un valore di 14,21 l/s (a cui corrisponde una superficie erosa di 1,14 m² e un valore percentuale di numero totale di steli estirpati $P_{n.st}$ pari all'82%); dopo tale fase il processo erosivo è notevolmente limitato.

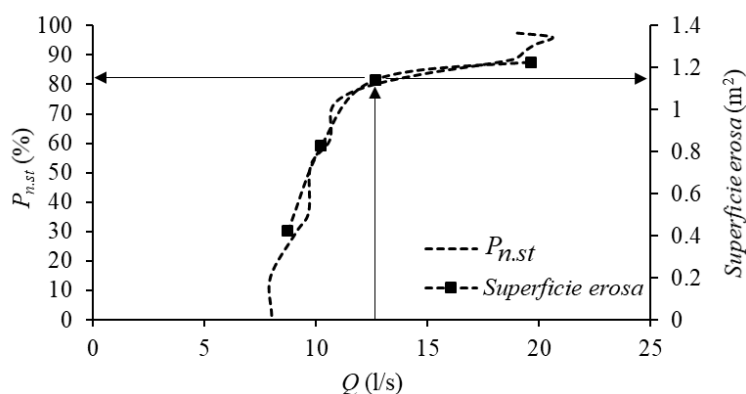


Fig.5.8 Confronto fra il numero degli steli e l'area della superficie erosa lungo la curva al variare della portata

Con lo scopo di valutare in che modo l'architettura radicale influenzi le caratteristiche meccaniche delle radici e la loro erodibilità, si è proceduto ad effettuare un confronto fra il valore sintetico di resistenza a rottura $F_{max,m}$, (Eq.4) ed i parametri $\bar{p}_{i,k}$ più significativi per classificare l'architettura radicale, come descritto al paragrafo 3.2.1.

In particolare, per valutare la relazione tra la resistenza meccanica delle radici e l'ingombro degli apparati radicali (classe $k = 1$), in Fig.5.9 è mostrato il confronto fra $F_{max,m}$ ed i parametri $\bar{p}_{1,1}$, $\bar{p}_{1,2}$ e $\bar{p}_{1,3}$ (rispettivamente relativi all'estensione dell'apparato radicale in direzione verticale ("Network Depth"), all'estensione in direzione orizzontale ("Network Width") e all'area di ingombro ("Network Convex Area")). Dal confronto, si nota come lungo la sponda esterna (vedi Fig.5.9a) $F_{max,m}$ ha un andamento concorde a quello di $\bar{p}_{1,1}$, $\bar{p}_{1,2}$ e $\bar{p}_{1,3}$ fino alla sezione 3; oltre tale sezione gli andamenti risultano opposti. Lungo la sponda interna (vedi Fig.5.9b), invece, la variazione di $F_{max,m}$ risulta simile a quella di $\bar{p}_{1,1}$, $\bar{p}_{1,2}$ e $\bar{p}_{1,3}$ lungo tutta la curva in esame. Quindi, in generale si può asserire che dove sono stati prelevati apparati radicali di elevato ingombro sono stati ottenuti alti valori di resistenza a rottura $F_{max,m}$, invece, dalle zolle da cui sono stati estratti apparati di ingombro più contenuto sono stati ottenuti valori inferiori di resistenza a rottura. Fanno eccezione gli apparati radicali estratti dalla zolla 3.1, i cui elevati ingombri probabilmente sono correlati agli alti tiranti rilevati in corrispondenza della sponda esterna della sezione di apice (vedi Fig.4.7b). Infatti, come suggeriscono gli autori (Hussner et al., 2009), elevati tiranti possono

contribuire a creare le condizioni per la crescita di apparati radicali di elevato ingombro e di elevata densità delle radici.

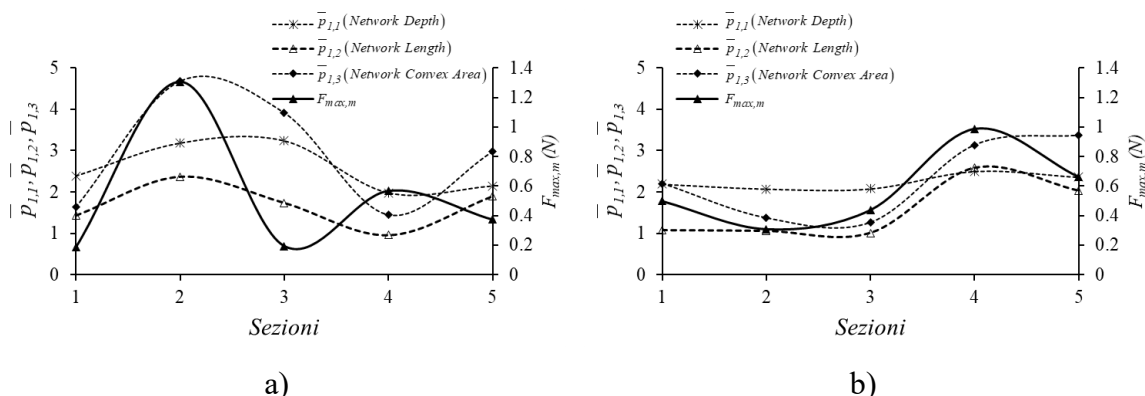


Fig.5.9: Confronto fra l'andamento di $F_{max,m}$ e quelli di $\bar{p}_{l,1}$, $\bar{p}_{l,2}$ e $\bar{p}_{l,3}$ lungo: a) la sponda esterna; b) la sponda interna

Hussner et al. (2009) hanno infatti verificato che elevati tiranti consentono di aumentare l'apporto di sostanze nutritive e quindi di favorire la crescita di radici di elevata resistenza allo sradicamento e con una densa architettura radicale.

Alla luce di ciò, per verificare come il valore del tirante abbia contribuito a determinare una differenza di ingombro fra le radici rilevate in prossimità delle sponde esterne ed interne lungo il canale, si è voluto confrontare l'andamento di $F_{max,m}$, ottenuto lungo la sponda esterna, con quello dei tiranti h , rilevati lungo la stessa sponda (Fig.5.10a) al variare della portata. Tale confronto è riportato in Fig.5.10a, nella Fig.5.10b è riportato il confronto fra l'andamento di $F_{max,m}$ con l'andamento del termine $\gamma(dH/dX)h$.

Osservando Fig.5.10a, si nota che gli andamenti dei tiranti h risultano concordi all'andamento di $F_{max,m}$ solo fino alla sezione 3, oltre la quale gli andamenti risultano opposti. Osservando Fig.5.10b, invece, si nota che l'andamento di $F_{max,m}$ è concorde con quello di $\gamma(dH/dX)h$ lungo tutta la sponda esterna. Ciò conferma che, la variabilità della resistenza a rottura delle radici è influenzata dalla variabilità delle caratteristiche idrodinamiche della corrente. In particolare, fino alla sezione 2 nelle aree in cui sono stati rilevati i tiranti più alti si sono sviluppati gli apparati radicali più resistenti (vedi ad esempio la sezione 2).

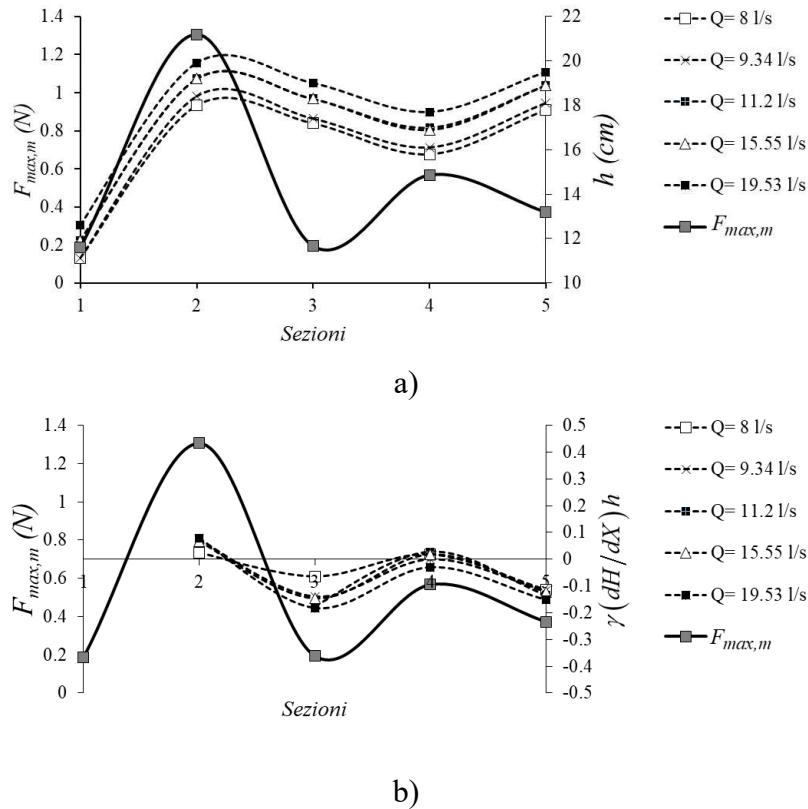


Fig.5.10: Confronto fra l'andamento di $F_{max,m}$ e gli andamenti, al variare della sezione di riferimento e al variare della portata, di: a) h ; b) $\gamma(dH/dX)h$

In Fig.5.11 la variazione di $F_{max,m}$ lungo il canale è sovrapposta a quella dei parametri che descrivono le caratteristiche geometriche dell'apparato radicale (appartenenti alla quarta classe di parametri stimati con "Gia Roots"), ed in particolare dei parametri $\bar{p}_{4,2}$, $\bar{p}_{4,3}$, $\bar{p}_{4,4}$, $\bar{p}_{4,5}$ e $\bar{p}_{4,6}$ relativi: all'area occupata dalle radici ("Network Area"), alla loro lunghezza totale ("Network Length"), al loro volume ("Network Volume"), alla loro estensione spaziale tenendo conto del loro diametro ("Network Surface Area") ed al loro perimetro totale ("Network Perimeter"). In Fig.5.11 si osserva che, lungo la sponda esterna la variazione di $F_{max,m}$ è concorde a quella dei parametri appartenenti alla quarta classe solo fino alla sezione 2, oltre la quale la variazione di $F_{max,m}$ risulta opposta. Lungo la sponda interna, invece, le variazioni risultano concordi.

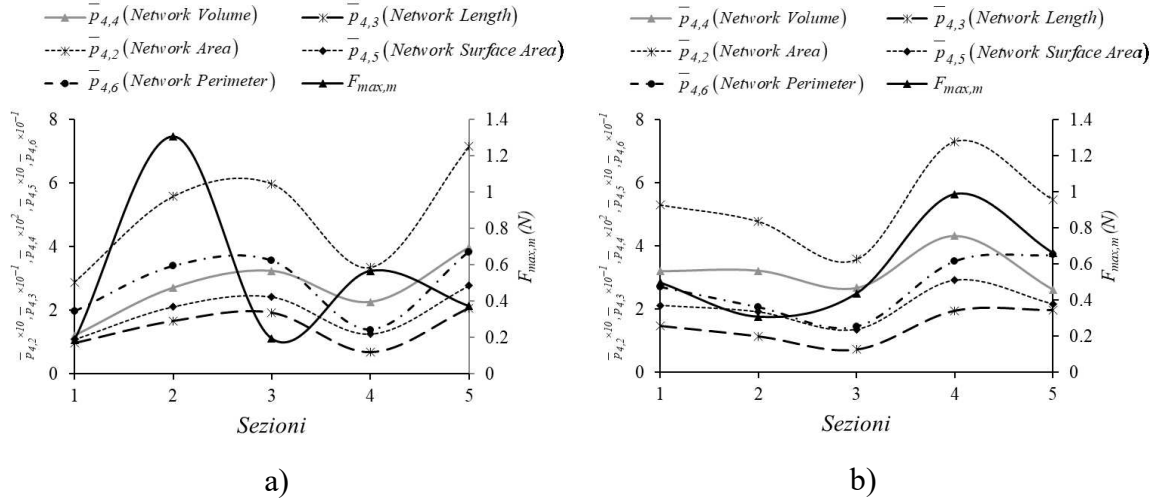


Fig.5.11: Confronto fra l'andamento di $F_{max,m}$ e quelli di $\bar{p}_{4,2}, \bar{p}_{4,3}, \bar{p}_{4,4}, \bar{p}_{4,5}$ e $\bar{p}_{4,6}$ lungo: a) la sponda esterna; b) la sponda interna

Con lo scopo di individuare una relazione fra il numero di radici degli apparati radicali con la resistenza a rottura delle stesse, in Fig.5.12 è mostrato il confronto fra la variazione di $F_{max,m}$ lungo il canale con i parametri della classe relativa al numero di radici ($k = 3$), ed in particolare con il numero massimo ($\bar{p}_{3,1}$) ed il numero mediano ($\bar{p}_{3,2}$) di radici, stimati con "Gia Roots". Sia lungo la sponda esterna (vedi Fig.5.12a), che lungo la sponda interna (vedi Fig.5.12b), si nota che la variazione di $F_{max,m}$ è opposta rispetto a quella di $\bar{p}_{3,1}$ e $\bar{p}_{3,2}$. Ciò indica che, le radici più resistenti sono state estratte da apparati radicali costituiti da un numero inferiore di radici.

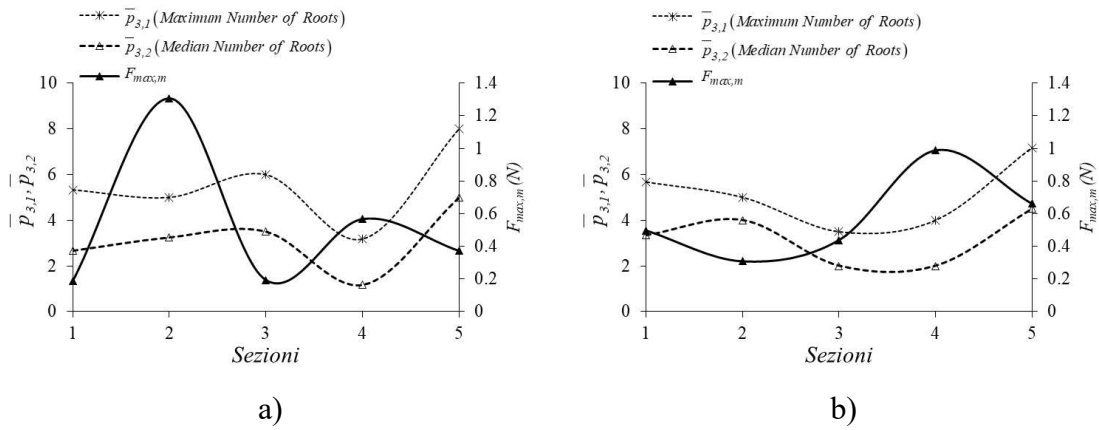


Fig.5.12: Confronto fra l'andamento di $F_{max,m}$ e quelli di $\bar{p}_{3,1}$ e $\bar{p}_{3,2}$ lungo: a) la sponda esterna; b) la sponda interna

Infine, si è analizzata la relazione fra la densità resistenza media a trazione delle radici $F_{max,m}$ e la densità degli apparati radicali (classe $k = 5$), e quindi con il parametro $\bar{p}_{5,2}$ ("Network Solidity"), pari al rapporto fra l'area occupata dalle radici e l'area di ingombro dell'intero sistema radicale.

Dalla Fig.5.13a, dove è mostrato il confronto fra $F_{max,m}$ e $\bar{p}_{5,2}$ lungo la sponda esterna, si nota che $F_{max,m}$ ha un andamento opposto rispetto a quello di $\bar{p}_{5,2}$ fino alla sezione 2; dalla sezione di apice in poi i due andamenti risultano simili. Dalla Fig.5.13b, invece, si nota che lungo la sponda interna l'andamento di $F_{max,m}$ risulta opposto rispetto a quello di $\bar{p}_{5,2}$. Ciò indica che, in genere, le radici più resistenti sono state prelevate dalle zolle da cui sono stati prelevati apparati radicali meno densi di radici.

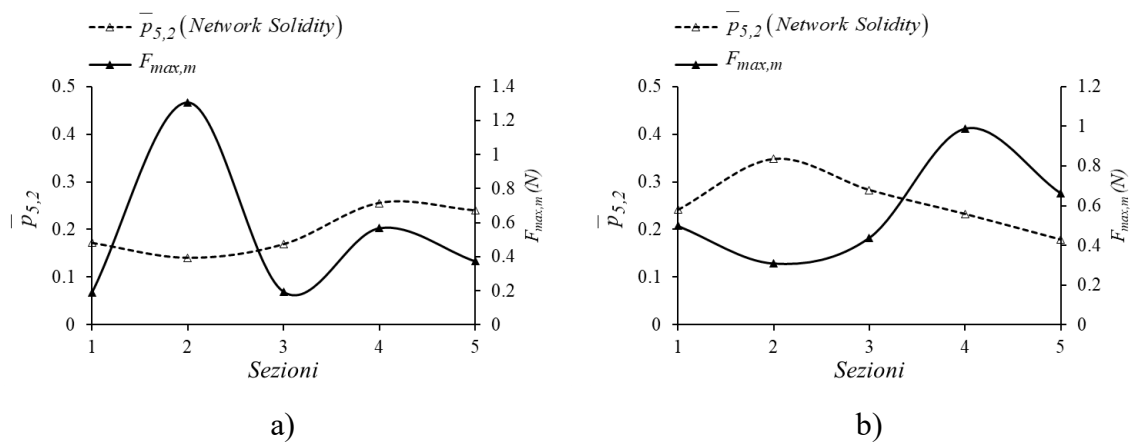


Fig.5.13: Confronto fra l'andamento di $F_{max,m}$ e quelli di $\bar{p}_{3,1}$ e $\bar{p}_{3,2}$ lungo: a) la sponda esterna; b) la sponda interna

Quindi in definitiva, mettendo in relazione i parametri identificativi dell'architettura radicale con la resistenza a rottura delle radici $F_{max,m}$, si è evinto che dove sono stati prelevati apparati radicali di elevato ingombro, ma minor numero di radici e minor densità radicale sono stati ottenuti alti valori di resistenza a rottura, viceversa dalle zolle da cui sono stati estratti apparati di ingombro più contenuto ma caratterizzati da una più elevata densità radicale sono stati ottenuti valori inferiori di resistenza a rottura. Inoltre, dal confronto della resistenza meccanica delle radici con la variazione dei tiranti lungo la curva, si è evinto che la variabilità della resistenza a rottura delle radici è influenzata dalle caratteristiche idrodinamiche della corrente, infatti, dove sono si sono sviluppati gli apparati radicali più resistenti sono stati rilevati i tiranti più alti.

5.3 Vegetazione distribuita a isole

Tenendo conto degli obiettivi della seconda fase del lavoro, i valori delle componenti istantanee di velocità misurati come descritto al paragrafo 4.2.2, sono stati utilizzati per determinare la media temporale delle componenti di velocità longitudinale $\overline{v_X}$ e verticale $\overline{v_Z}$, per ciascun punto misura, come:

$$\overline{v_X} = \frac{\sum v_X(t)}{n_{pr}} \quad \overline{v_Z} = \frac{\sum v_Z(t)}{n_{pr}} \quad (5.3)$$

dove n_{pr} è il numero di profili di velocità acquisiti per ciascun punto di misura.

Nelle figure 5.14 ÷ 5.15 sono riportati i profili della velocità longitudinale $\overline{v_X}$ per diverse distanze Y dalla sponda esterna. In tali figure, per ciascun profilo è indicata la corrispondente distanza dalla sponda esterna oltre che l'altezza della vegetazione inflessa $Z_v = 1,8$ cm nelle isole vegetate; per semplicità di lettura, l'altezza Z_v è anche indicata nei profili al di fuori delle isole vegetate. Da tali figure si osserva che, spostandosi dalla sponda esterna alla sponda interna della sezione considerata, le distribuzioni verticali di $\overline{v_X}$ presentano nella zona di passaggio dall'area non vegetata all'isola vegetata (profili $Y = 8,2 \div 9,4$), picchi con valori variabili e localizzati sia sotto che sopra l'altezza Z_v . Ciò è probabilmente causato dal fatto che in tale zona di passaggio si ha l'interferenza della fluttuazione degli steli di vegetazione. All'interno dell'isola A (profili $Y = 10 \div 20$), le distribuzioni verticali mostrano valori di $\overline{v_X}$ molto bassi nella zona prossima allo strato vegetato, presentando lievi picchi al di sotto di Z_v . A valle dell'isola A (profili $Y = 20,6 \div 21,8$), si osserva un comportamento simile a quello nella zona di transizione a monte dell'isola A (profili $Y = 8,2 \div 9,4$).

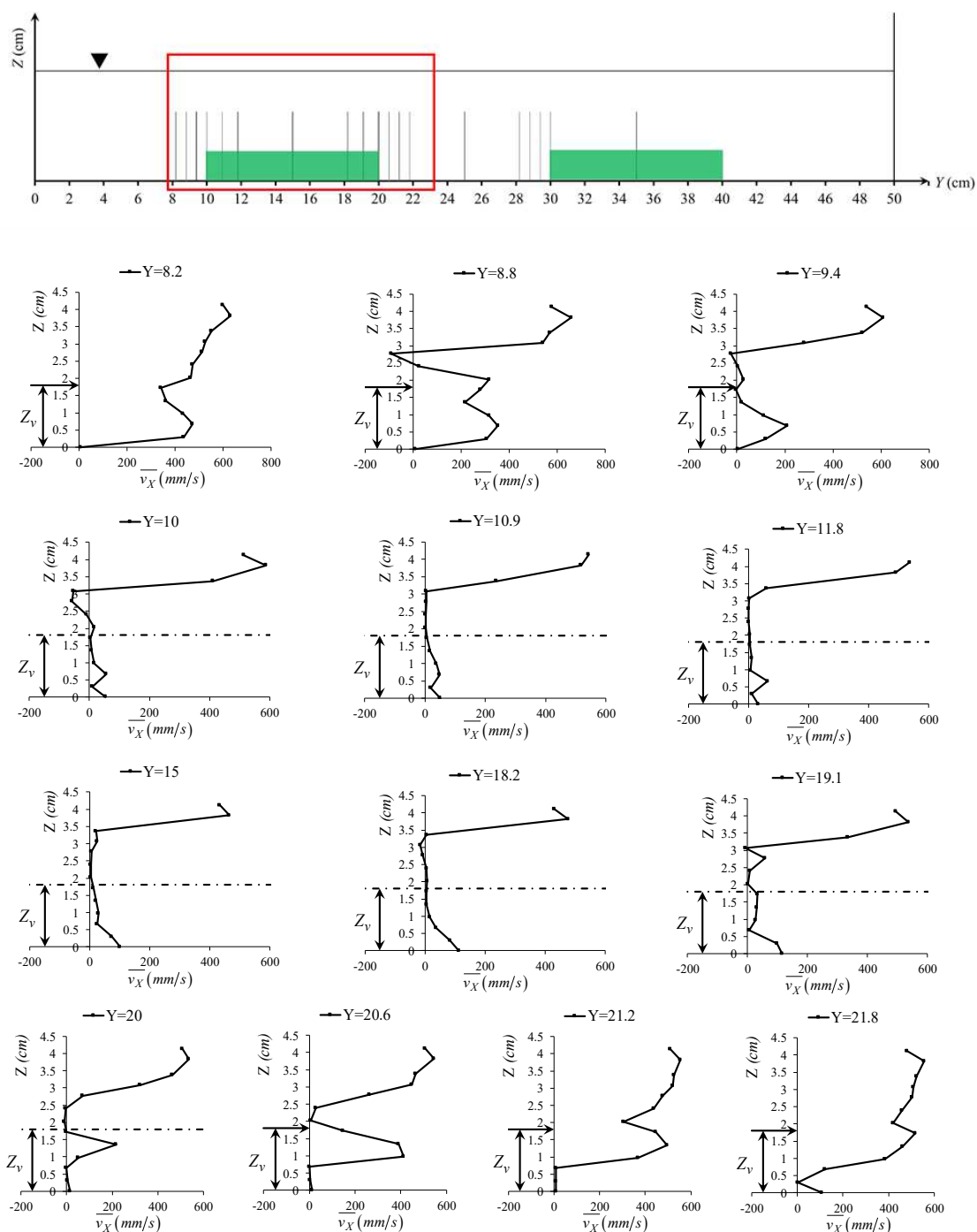


Fig.5.14: Profili di velocità v_X rilevati fino al bordo interno dell'isola A.

In asse al canale (vedi Fig.5.15), e quindi in assenza di vegetazione (profilo $Y=25$), il profilo assume un andamento crescente dal fondo alla superficie libera. Si osserva poi che, nella zona subito a monte dell'isola B (profili $Y=28,2 \div 30$), le distribuzioni di v_X mostrano andamenti simili a quelli osservati a monte dell'isola A, assumendo picchi anche al di sotto

di Z_v . Infine, all'interno dell'isola B (profilo $Y=35$), si ha un comportamento simile a quello osservato all'interno dell'isola A.

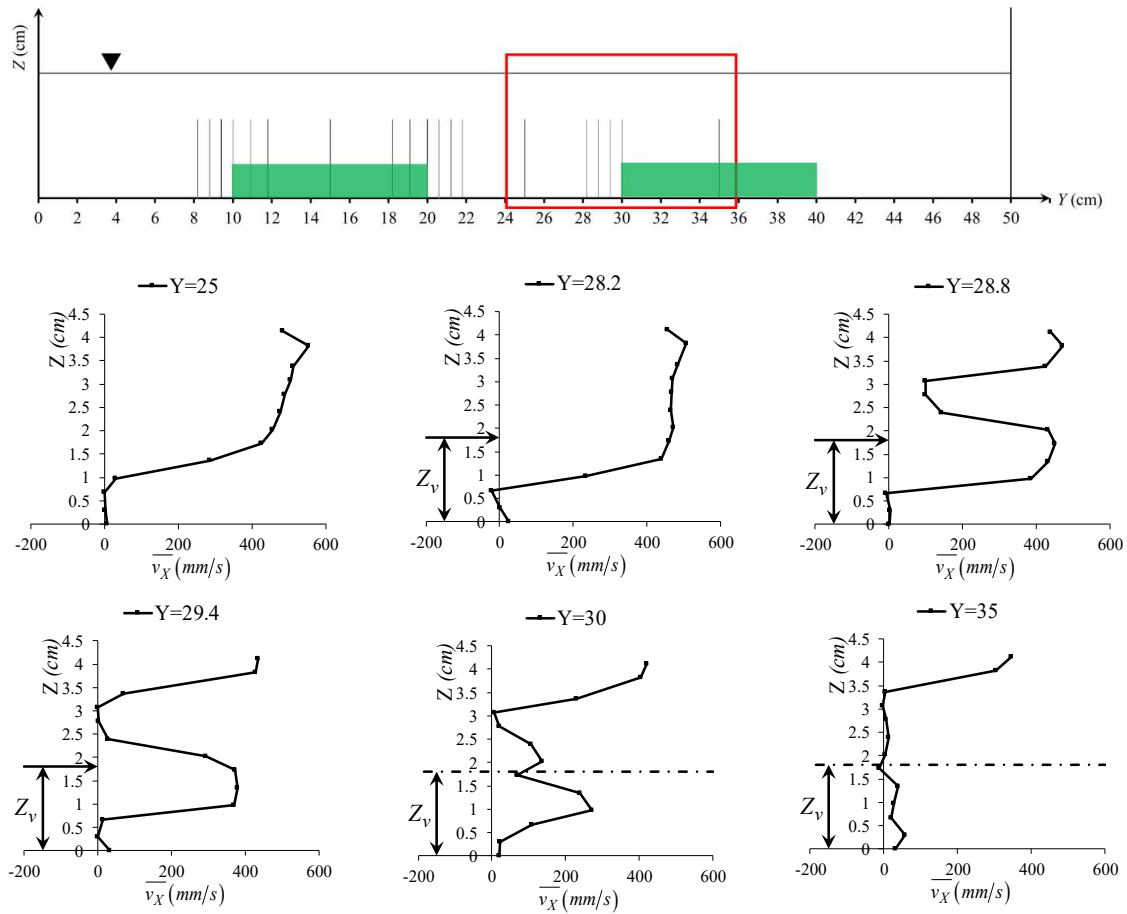


Fig.5.15: Profili di velocità v_X rilevati dal bordo interno dell'isola A fino al centro dell'isola B

Nelle figure 5.16 ÷ 5.17 sono riportati i profili della componente verticale della velocità v_Z . Da tali figure si osserva che, spostandosi dalla sponda esterna alla sponda interna, le distribuzioni verticali di v_Z a monte dell'isola A (profili $Y = 8,2 \div 9,4$) presentano picchi con valori negativi sia sotto che sopra l'altezza Z_v . All'interno dell'isola A (profili $Y = 10 \div 20$), le distribuzioni verticali, anche in questo caso, sono caratterizzate da valori di v_Z molto bassi nella zona prossima allo strato vegetato, presentando lievi picchi al di sotto di Z_v . A valle dell'isola A (profili $Y = 20,6 \div 21,8$), le distribuzioni di v_Z presentano un

comportamento simile a quello relativo alla zona di transizione a monte dell'isola A, in questo caso però i picchi assumono alternativamente valori positivi o negativi.

In asse al canale (vedi Fig.5.17), e quindi in assenza di vegetazione (profilo $Y = 25$), il profilo assume valori alternativamente negativi e positivi passando dal fondo alla superficie libera, con valori via via crescenti. Si osserva poi che, nella zona subito a monte dell'isola B (profili $Y = 28,2 \div 29,4$), le distribuzioni di $\overline{v_Z}$ assumono andamenti simili a quelli osservati a monte dell'isola A, con picchi variabili in valore e segno. Infine, all'interno dell'isola B (profili $Y = 35$), si ha un comportamento simile a quello osservato all'interno dell'isola A.

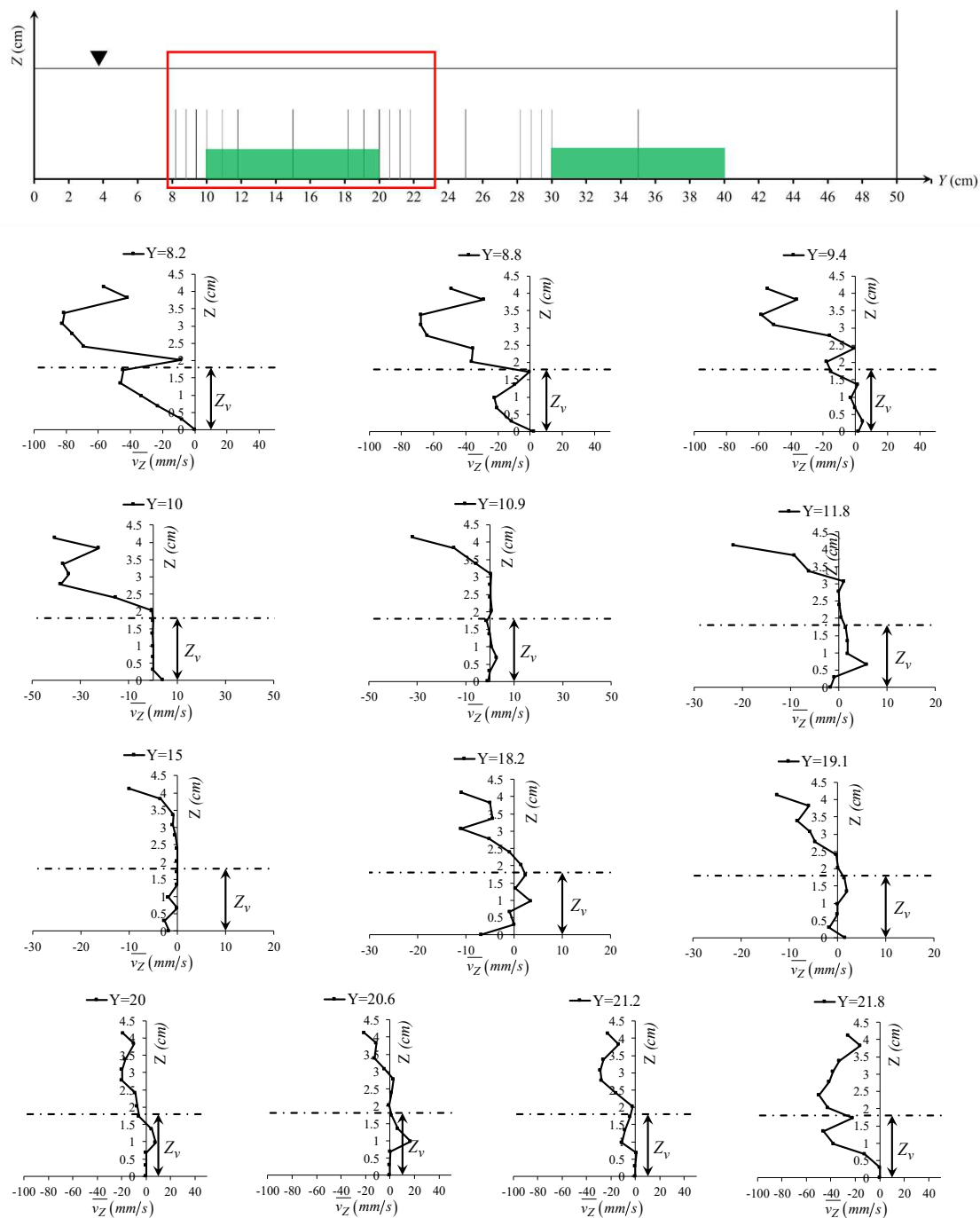


Fig.5.16: Profili di velocità v_Z rilevati fino al bordo interno dell'isola A

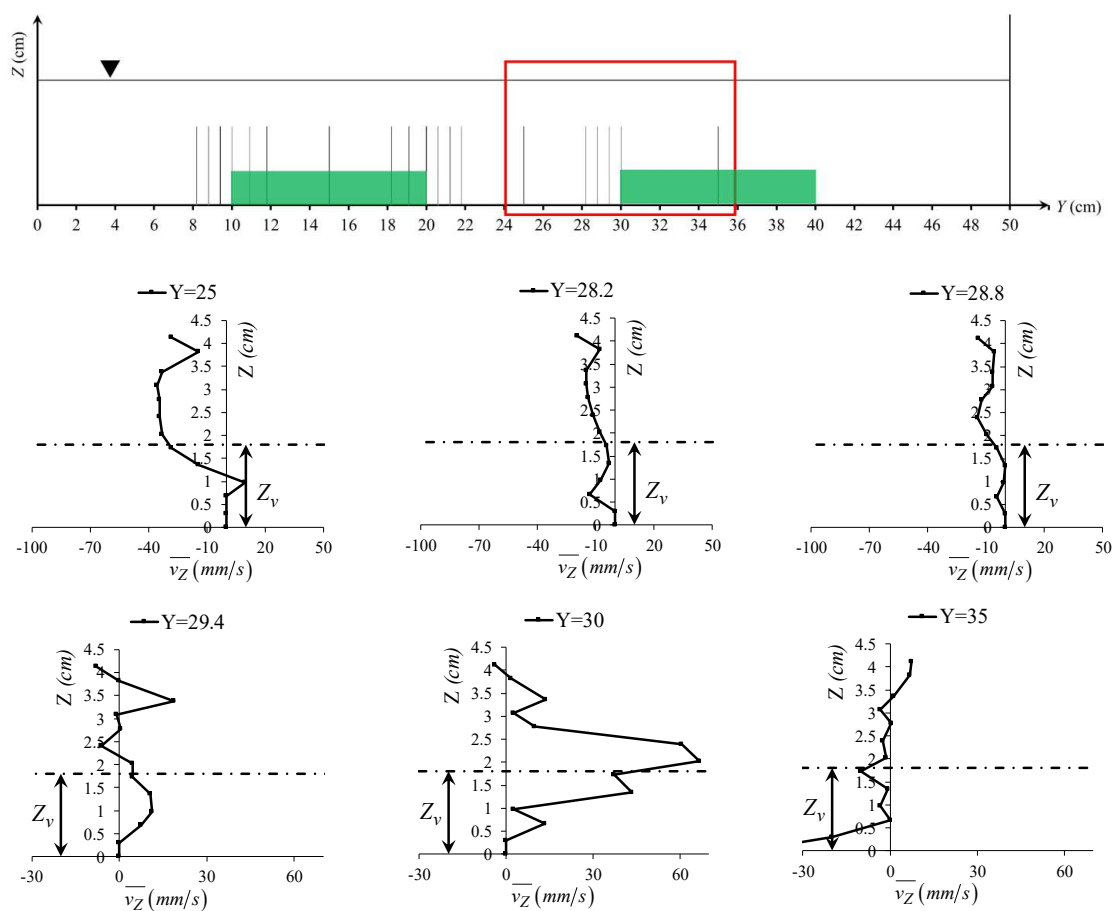


Fig.5.17: Profili di velocità $\overline{v_Z}$ rilevati dal bordo interno dell'isola A fino al centro dell'isola B

I profili riportati nelle Fig.5.14 ÷ Fig.5.17 mostrano quindi che le fluttuazioni degli steli di vegetazione influenzano notevolmente le caratteristiche cinematiche della corrente già nelle aree di passaggio dalle zone non vegetate a quelle vegetate. In particolare, in tali aree, le suddette fluttuazioni determinano valori di picco delle componenti di velocità sia al di sotto che sopra la quota Z_v . All'interno delle isole, le componenti di velocità assumono valori molto bassi nella zona prossima allo strato vegetato, con lievi picchi sotto Z_v .

Alla luce del risultato ottenuto, si è voluto verificare come varia il flusso di massa longitudinale per i profili misurati. Quindi, il flusso di massa $m_X = \rho h_Y \delta_Y \widehat{v}_X$ (dove ρ è la densità dell'acqua, h_Y è il tirante locale e $\widehat{v}_X$ è la velocità longitudinale verticalmente mediata) è stato determinato dopo aver discretizzato la sezione in tratti di lunghezza $\delta_Y = 0,3$ cm. In Fig. 5.18 è mostrato il flusso di massa longitudinale stimato nei profili misurati.

Da tale figura, si nota che m_X diminuisce notevolmente all'interno delle isole vegetate, mentre nella zona non vegetata di passaggio, m_X assume valori via via crescenti. Quindi, il flusso di massa longitudinale è chiaramente maggiore nell'area non vegetata.

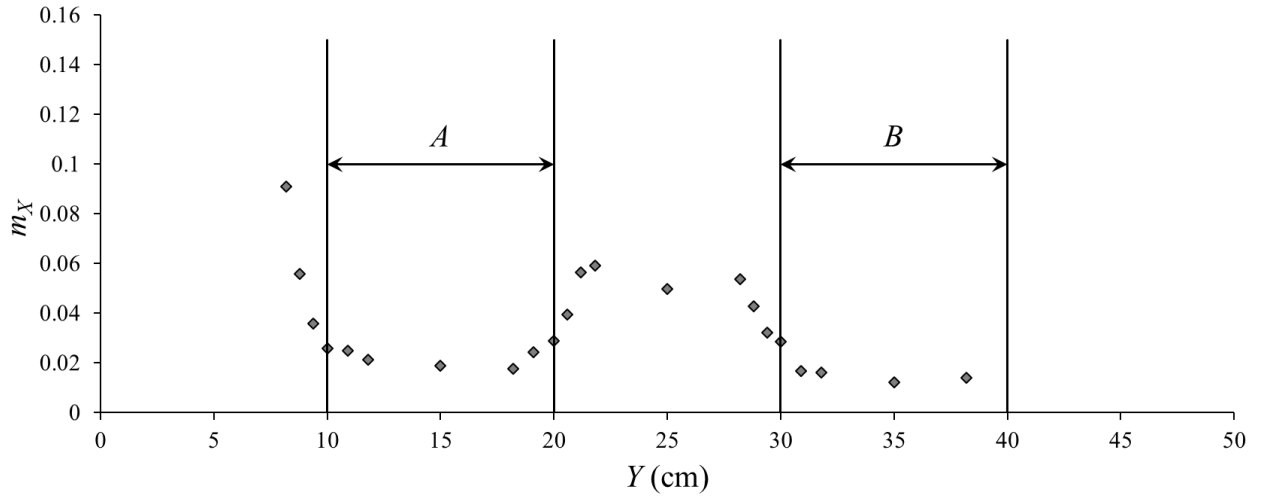


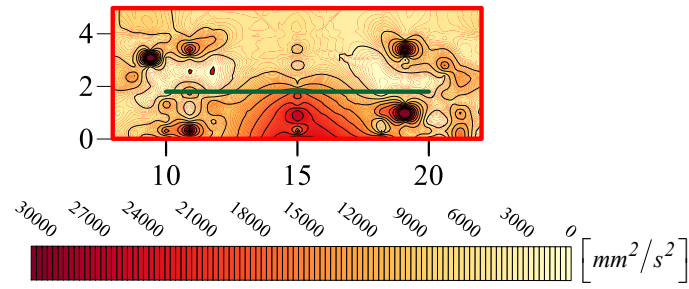
Fig.5.18: Andamento lungo la sezione del flusso di massa longitudinale $m_X \left[kg \cdot s \cdot m^{-1} \right]$

Successivamente, per ciascun punto di misura sono state calcolate le componenti di fluttuazione turbolenta come:

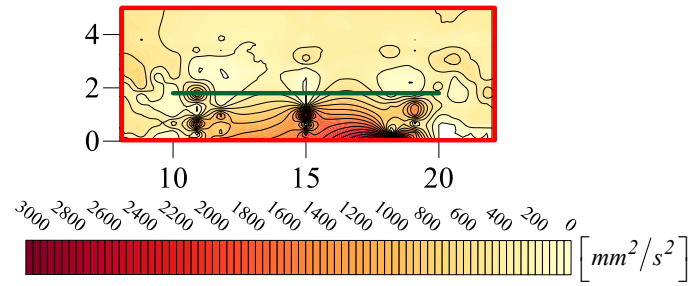
$$v'_X(t) = v_X(t) - \overline{v_X} \quad v'_Z(t) = v_Z(t) - \overline{v_Z} \quad (5.4)$$

Utilizzando le suddette componenti di fluttuazione turbolenta sono state determinate le componenti delle tensioni di Reynolds $\overline{v'_X v'_X}$, $\overline{v'_Z v'_Z}$ e $\overline{v'_X v'_Z}$ (il sopra segno indica la media temporale). In Fig. 5.19 sono mostrate le mappe a curve di livello delle tensioni di Reynolds $\overline{v'_X v'_X}$ (Fig.5.19a), $\overline{v'_Z v'_Z}$ (Fig.5.19b) e $\overline{v'_X v'_Z}$ (Fig.5.19c) nell'intorno dell'isola A. Da tali figure si nota che nella zona di passaggio dall'area non vegetata all'area vegetata si hanno valori elevati delle suddette componenti delle tensioni di Reynolds in prossimità della superficie libera e, soprattutto per la componente $\overline{v'_X v'_X}$, si ha anche un lieve picco in prossimità del fondo. Questo comportamento conferma che nella zona di passaggio dall'area non vegetata all'area vegetata si risente dell'interferenza delle fluttuazioni degli steli. Nell'area vegetata, i picchi delle tensioni di Reynolds sono localizzati

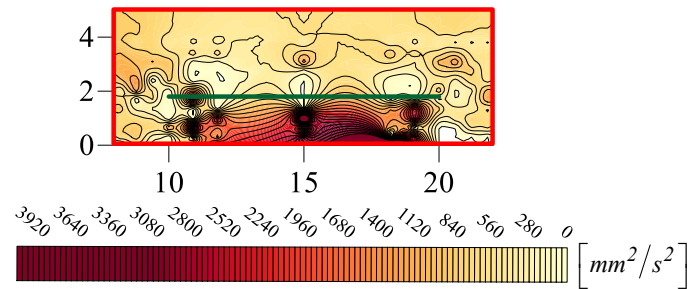
al di sotto dello strato vegetato. Ciò è in accordo a precedenti ricerche di letteratura effettuate in canali vegetati (vedi ad esempio in Termini, 2016, 2017).



a)



b)



c)

Fig.5.19: Mappe a curve di livello di: a) $\overline{v'_X v'_X}$; b) $\overline{v'_Z v'_Z}$; c) $\overline{v'_X v'_Z}$

6. CONCLUSIONI

Nel presente lavoro si è focalizzata l'attenzione su due aspetti fondamentali che caratterizzano i processi di interazione fra la corrente e la vegetazione. Il primo aspetto è legato alla valutazione dell'evoluzione del processo di degradazione della vegetazione matura presente sul fondo, quando essa è sottoposta al deflusso della corrente. Il secondo aspetto è legato all'effetto dovuto all'eterogenea distribuzione della vegetazione sul fondo sulle caratteristiche cinematiche della corrente. L'analisi di tali aspetti è stata effettuata sulla base di campagne sperimentali condotte in un canale meandriforme di laboratorio realizzato presso il Dipartimento di Ingegneria Civile, Ambientale, Aerospaziale, dei Materiali (DICAM) dell'Università degli Studi di Palermo.

Per analizzare il primo aspetto, si è considerato il fondo del canale ricoperto da vegetazione reale e uniformemente distribuita che, al momento della prova, si trovava nella condizione “matura” dopo aver subito il deflusso della corrente con una portata costante. Dall'analisi delle caratteristiche geometriche e meccaniche di tale vegetazione matura è stato possibile verificare come la variazione di curvatura del canale in direzione longitudinale influenzi sia la tipologia di crescita della vegetazione stessa che lo sviluppo del suo apparato radicale. In particolare, i risultati hanno mostrato che le radici più corte sono caratterizzate da spessori maggiori mentre le radici più lunghe sono caratterizzate da spessori minori. Inoltre, sottoponendo le radici di tale vegetazione a prove di trazione, è stato possibile verificare che, in genere, le radici più resistenti sono quelle caratterizzate da maggiori spessori e minori lunghezze. Ciò è in accordo a precedenti risultati di letteratura (Yang et al., 2016; Cheng et al., 2004; De Baets et al., 2008; Zhang et al., 2012). L'architettura radicale delle stesse radici è stata analizzata anche applicando il codice “GiA Roots”, che è open-source e disponibile sul web. I risultati ottenuti hanno messo in evidenza che gli apparati radicali di minor ingombro sono caratterizzati da minor numero di radici e minor densità radicale. Per questi apparati radicali sono stati ottenuti elevati valori di resistenza a rottura. Viceversa, gli apparati radicali di ingombro più contenuto sono caratterizzati da una più elevata densità radicale e ad essi corrispondono valori inferiori di resistenza a rottura. Infine, dall'analisi del modulo di Young E , anch'esso ottenuto dai risultati dei test a trazione, è stato possibile verificare che le radici più resistenti sono quelle più rigide, mentre le radici più deformabili sono quelle più fragili.

Definite le caratteristiche geometriche, meccaniche e degli apparati radicali della vegetazione matura presa in esame, si è cercata l'esistenza di una possibile relazione tra la

loro variabilità lungo il canale e l'evoluzione del processo di degradazione osservato durante la prova sperimentale, quando cioè tale vegetazione viene sottoposta a valori crescenti di portata defluente. L'analisi condotta ha messo in luce che le aree limitrofe alla sponda esterna e in prossimità della sezione di apice sono quelle maggiormente interessate dal fenomeno erosivo. D'altra parte, proprio in prossimità della sponda esterna della sezione di apice, l'apparato radicale della vegetazione è caratterizzato da una resistenza meccanica inferiore rispetto a quella delle sezioni di inflessione. Il comportamento osservato in prossimità della sponda esterna della sezione di apice può essere legato al fatto che in tale area si registrano valori elevati del tirante idrico. Infatti, in accordo con precedenti lavori di letteratura (Hussner et al., 2009), gli apparati radicali più resistenti sono quelli rilevati in corrispondenza dei tiranti più elevati.

Il secondo aspetto investigato ha riguardato lo studio degli effetti idrodinamici della distribuzione a isole di vegetazione sul fondo. In particolare, in questa fase si è fatto riferimento alla configurazione a due isole (corrispondente ad un fattore di copertura del 10%), poiché rappresenta la condizione in cui è più evidente il passaggio dalle zone non vegetate a quelle vegetate. Sono state quindi considerate due isole di geometria quadrata ($10 \times 10 \text{ cm}^2$), poste ad una distanza di 10 cm dalle sponde e realizzate con vegetazione artificiale di caratteristiche flessionali paragonabili a quelle della "condizione giovane" della vegetazione reale utilizzata nella prima fase del lavoro.

Con tale configurazione delle isole vegetate, è stata condotta quindi una prova sperimentale con valore di portata prossimo al valore per quale il processo di degradazione osservato nella prima fase del lavoro diventava più significativo. Durante tale prova, sono state rilevate le componenti longitudinali e verticali della velocità lungo profili di misura opportunamente scelti. L'analisi dei profili verticali delle medie temporali delle componenti di velocità longitudinale e verticale ha messo in evidenza che, nelle zone di passaggio dall'area non vegetata all'area vegetata, le componenti della velocità presentano valori di picco sia sotto che sopra la quota della vegetazione inflessa, dimostrando che in tali zone si risente dell'effetto delle fluttuazioni degli steli vegetati. All'interno delle isole vegetate, le suddette componenti di velocità assumono valori molto bassi nella zona prossima allo strato vegetato, con lievi picchi al di sotto della vegetazione inflessa. Conseguentemente, nelle aree vegetate si è ottenuto un valore di flusso di massa longitudinale molto più ridotto rispetto a quello ottenuto nelle aree non vegetate.

Dopo aver determinato le componenti longitudinali e verticali di fluttuazione turbolenta, sono state anche analizzate le tensioni di Reynolds $\overline{v'_X v'_X}$, $\overline{v'_Z v'_Z}$ e $\overline{v'_X v'_Z}$. Tale analisi ha messo in evidenza che, nella zona di passaggio fra l'area non vegetata e quella vegetata si hanno valori elevati delle suddette componenti delle tensioni di Reynolds in prossimità della superficie libera e, soprattutto per la componente $\overline{v'_X v'_X}$, si hanno anche lievi picchi in prossimità del fondo. Nella porzione di sezione vegetata, invece, i valori più elevati delle componenti delle tensioni di Reynolds sono localizzati al di sotto dello strato vegetato.

Il comportamento osservato ha quindi confermato che, nelle aree di passaggio dalle zone non vegetate a quelle vegetate le caratteristiche cinematiche della corrente sono fortemente influenzate dalla fluttuazione delle cime degli steli vegetati causata dal deflusso della corrente. Ciò suggerisce che le successive indagini devono essere focalizzate all'individuazione della dinamica di fluttuazione degli steli vegetati.

7. BIBLIOGRAFIA

- Ali F., 2013. *The Influences of Root Branching Patterns on Pullout Resistance*, EJGE, Vol.18, pp. 3968-3977.
- Arsenault J.-L., Pouleur S., Messier C. & Guay R., 1995. *WinRHIZO, a root-measuring system with a unique overlap correction method*, HortScience, Vol. 30, pp. 906.
- Bailey P., Currey J. & Fitter A., 2002. *The role of root system architecture and root hairs in promoting anchorage against uprooting forces in allium cepa and root mutants of arabidopsis thaliana*, Journal of Experimental Botany, Vol. 53, pp.333-340.
- Bertin C., Yang X., & Weston L., 2003. *The role of root exudates and allelochemicals in the rhizosphere*, Plant and Soil, Vol. 256, pp. 67-83.
- Bhembé S. S., Pandey S. V. G., 2006. *Composite roughness in open-channel flow*, Investigational Project Report, School of Civil & Environmental Engineering, University of the Witwatersrand, South Africa.
- Bouma T. J., Nielsen K. L., Van Hal J., & Koutstaal B., 2001. *Root system topology and diameter distribution of species from habitats differing in inundation frequency*, Functional Ecology, Vol. 15(3), pp. 360-369.
- Bucksch A., Burridge J., York L. M., Das A., Nord E., Weitz J. S. & Lynch J. P., 2014. *Image-Based High-Throughput Field Phenotyping of Crop Roots*, Plant Physiology, Vol. 166 (2), pp. 470-486
- Camporeale C., Perucca E., Ridolfi L. & Gurnell A., 2013. *Modeling the interaction between river morphodynamics and riparian vegetation*, Reviews of Geophysics, Vol. 51(3), pp.379-414.
- Cannon W., 1949. *A tentative classification of root systems*, Ecology, Vol. 30 (4), pp. 542-548.
- Carollo F.G., Ferro V. & Termini D., 2005. *Flow resistance law in channels with flexible submerged vegetation*, Journal of Hydraulic Engineering, Vol.131(7), pp. 554-564.
- Cheng H., Yang X., Liu A., Fu H.C., & Wan M., 2004. *A Study on the Performance and Mechanism of Soil-reinforcement by Herb Root System*.
- Commandeur P., Pyles M., 1991. *Modulus of elasticity and tensile-strength of douglas-fir roots*, Canadian Journal of Forest Research, Vol. 21, pp. 48-52.

- De Baets S., Poesen J., Reubens B., Wemans K., De Baerdemaker J., & Muys B., 2008. *Root tensile strength and root distribution of typical Mediterranean plant species and their contribution to soil shear strength*, Plant Soil, Vol. 305, pp. 207-226.
- Dube E. D. N., Madanzi T., Kapenzi A., & Masvaya E., 2014. *Root Length Density in Maize/Cowpea Intercropping under a Basin Tillage System in a Semi-Arid Area of Zimbabwe*, American Journal of Plant Sciences, Vol. 5, pp. 1499-1507.
- Dupuy L., Fourcaud T. & Stokes A., 2005. *A numerical investigation into factors affecting the anchorage of roots in tension*, European Journal of soil Science, Vol. 56(3), pp.319-327.
- Edmaier, K.; Burlando, P. & Perona, P., 2011. *Mechanisms of vegetation uprooting by flow in alluvial non-cohesive sediment*, Hydrology and Earth System Sciences, Vol. 15(5), pp. 1615-1627.
- Edmaier K., Crouzy B., Ennos R., Burlando P. & Perona P., 2014. *Influence of root characteristics and soil variables on the uprooting mechanics of Avena sativa and Medicago sativa seedlings*, Earth Surf. Process. Landforms Vol. 39, pp. 1354–1364.
- Ennos A. R., 1989. *The mechanics of anchorage in seedlings of sunflower, helianthus annuus L.*, The New Phytologist, Vol. 113(2), pp.185-192.
- Ennos A. R., 1990. *The anchorage of leek seedlings: The effect of root length and soil strength*, Annals of Botany, Vol. 65, pp. 409-416.
- Ennos, A. R., 1993. *The scaling of root anchorage*, Journal of Theoretical Biology, Vol. 161(1), pp. 61-75.
- Ennos A., Pellerin S., 2000. *Root methods: A handbook*, Cap. Plant Anchorage, pp.545-565, Springer.
- Fisher K. R., 1993. *Spatial variations of in-bank hydraulic roughness in channels*, Report SR 357, HR Wallingford, UK.
- Fitter H., 1987. *An architectural approach to the comparative ecology of plant root systems*, New Phytologist, Vol.106, pp. 61-77.
- Galkovskyi T., Mileyko Y., Bucksch A., Moore B., Symonova O., Price C. A., Topp C. N., Iyer-Pascuzzi A. S., Zurek P. R., Fang S., Harer J., Benfey P. H., & Weitz J. S., 2012. *GiA Roots: software for the high throughput analysis of plant root system architecture*, BMC Plant Biology 12:116

- Genet M., Stokes A., Salin F., Mickovski S. B., Fourcaud T., Dumail J.-F., Beek R., 2005. *The influence of cellulose content on tensile strength in tree roots*, Plant and Soil, Vol. 278(1-2), pp.1-9.
- Goodman A. M., 2005. *Mechanical Adaptations of Cleavers (Galium aparine)*, Annual of Botany, Vol. 95, pp. 475-480.
- Green J. C., 2005. *Comparison of blockage factors in modelling the resistance of channels containing submerged macrophytes*, River Research and Applications, Vol. 21, pp.671-686.
- Gregory P., 2006. *Plant roots, Growth, activity and interaction with soils*, Blackwell Publishing Ltd.
- Gurnell A., 2013, *Plants as river system engineers*, Earth Surface Processes and Landforms, Vol. 39(1), pp.4-25
- Hussner A. , Meyer C & Busch J., 2009. *The influence of water level and nutrient availability on growth and root system development of Myriophyllum aquaticum*, Weed Research, Vol. 49, pp.73-80.
- James C. S., Birkhead A. L., Jordanova A. A., Kotschy K. A., Nicolson C. R. & Mako, M. J., 2001. *Interaction of reeds, hydraulics and river morphology*, Report No. 856/1/01, Water Research Commission, Pretoria.
- James C. S., Makoa M. J., 2006. *Conveyance estimation for channels with emergent vegetation boundaries*, Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Water Management, Vol. 159(4), pp 235-243.
- Karrenberg S., Blaser S., Kollmann J., Speck T. & Edwards P., 2003. *Root anchorage of saplings and cuttings of woody pioneer species in a riparian environment*, Functional Ecology, Vol. 17(2), pp. 170-177.
- Köstler J-N, Brueckner E & Bibelriether H, 1968. *Die Wurzeln der Waldbäume. Untersuchung zur Morphologie der Waldbäume in Mitteleuropa*, Paul Parey, Hamburg
- Kouwen N., Unny T. E., 1973. *Flexible roughness in open channels*, Journal of the Hydraulics Division, Vol. 99(5), pp. 1085-1103.
- Lee J.-T., Tsai S.-M. & Lee M.-J, 2017. *Uprooting resistance of two tropical tree species for sand dune stabilization*, Academic Journal, Vol. 12(45), pp. 3214-3220.
- Lemmin U, Rolland T, 1997. *Acoustic velocity profiler for laboratory and field studies*, Journal of Hydraulic Engineering, Vol. 123(12), pp. 1089–1092.

- Li Y., Xianmo Z., & Jiying T., 1991. *Effectiveness of plant roots to increase the anti-scourability of soil on the Loess Plateau*, Chinese Science Bulletin, Vol. 36 (24), pp. 2077-2082.
- Liu Y., Gao J., Lou H., Zhang J. & Q. Cui, 2011. *The root anchorage ability of Salix alba var. tristis using a pull-out test*, African Journal of Biotechnology, Vol. 10(73), pp. 16501-16507.
- Lobet G., Pagès L., Draye X., 2011, *A Novel Image-Analysis Toolbox Enabling Quantitative Analysis of Root System Architecture*, Plant Physiology, Vol. 157(1), pp. 29-39.
- Mao Z, Saint-André L, Bourrier F, Stokes A, Cordonnier T., 2015. *Modelling and predicting the spatial distribution of tree root density in heterogeneous forest ecosystems*, Annals of Botany. Vol. 116(2), pp. 261-277.
- Mickovski S., Hallett P., Bransby M., Davies M., Sonnenberg R. & Bengough A., 2009. *Mechanical reinforcement of soil by willow roots: impacts of root properties and root failure mechanism in controlled laboratory tests*, Soil Science Society of America Journal, Vol. 73(4), pp. 1276-1285.
- Ming R.H., Shen H.W., 1973. *Effect of tall vegetations on flow and sediment*, Journal of the Hydraulics Division, Vol.99(5), pp. 793–814.
- Normaniza O., Mohamad N. A. & Che H. A., 2011. *Pull-Out and Tensile Strength Properties of Two Selected Tropical Trees*, Sains Malaysiana, Vo. 40(6), pp. 577–585.
- Nikora V., Larned S., Nikora N., Debnath K., Cooper G & Reid M., 2008. *Hydraulic resistance due to aquatic vegetation in small streams: field study*, Journal of Hydraulic Engineering, Vol. 134(9), pp. 1326-1332.
- Nikora N., Nikora V. & O' Donoghue, T., 2013. *Velocity profiles in vegetated open-channel flows: combined effects of multiple mechanisms*, Journal of Hydraulic Engineering, Vol. 139(10), pp. 1021-1032.
- Nye P., Tinker P., 1969. *The concept of a root demand coefficient*, Journal of Applied Ecology, Vol. 6, pp.293-300.
- Pace J., Lee N., Naik H. S., Ganapathysubramanian B. & Luebberstedt T., 2014. *Analysis of Maize (Zea mays L.) Seedling Roots with the High-Throughput Image Analysis Tool ARIA (Automatic Root Image Analysis)*, PloS ONE, Vol. 9(9), e108255.

- Perona P., Molnar P., Crouzy B., Perucca E., Jiang Z., McLelland S., Wuthrich D., Edmaier K., Francis R., Camporeale C. & Gurnell A., 2012. *Biomass selection by floods and related timescales: Part 1- experimental observations*, Advances in Water Resources, Vol.39, pp.85-96.
- Pollen N., 2007. *Temporal and spatial variability in root reinforcement of streambanks: Accounting for soil shear strength and moisture*, Catena, Vol. 69(3), pp.197-205.
- Popova L., van Dusschoten D., K. A. Nagel, Fiorani F., & Mazzolai B., 2016. *Plant root tortuosity: an indicator of root path formation in soil with different composition and density*, Annals of Botany, Vol. 118, pp. 685-698.
- Schwarz M., Preti F., Giadrossich F., Lehmann P., Or D., 2010. *Quantifying the role of vegetation in slope stability: A case study in Tuscany (Italy)*, Ecological Engineering, Vol. 36(3), pp. 285-291.
- Schwarz M., Cohen D., Or D., 2011. *Pullout tests of root anchorage and natural bundles in soil: Experiments and modeling*, Journal of Geophysical Research, Vol. 116, F02007.
- Stone B. M., Shen H. T., 2002. Hydraulic Resistance of Flow in Channels with Cylindrical Roughness, Journal of Hydraulic Engineering, Vol. 128 (5), pp. 500-506.
- Tanaka N., Yagisawa J., 2009. *Effects of tree characteristics and substrate condition on critical breaking moment of trees due to heavy flooding*, Landscape and Ecological Engineering, Vol. 5(1), pp. 59-70.
- Termini D., Piraino M. 2011. *Experimental analysis of cross-sectional flow motion in a large amplitude meandering bend*, Earth Surface Processes and Landforms, Vol. 36(2), pp. 244–256.
- Termini D., 2016. *Experimental analysis of the effect of vegetation on flow and bed shear stress distribution in high curvature bends*, Geomorphology, Vol. 274, pp. 1-10.
- Termini D., 2017. *Vegetation effects on cross-sectional flow in a large amplitude meandering bend*, Journal of Hydraulic Research, Vol. 55(3), pp. 423-429.
- Waisel Y., Eshel A., & Kafkafi U., 2002. *Plant roots: the hidden half*, Marcel Dekker.
- Yang Y., Chen L., Li N. & Zhang Q., 2016. *Effect of Root Moisture Content and Diameter on Root Tensile Properties*. PLoS ONE, Vol. 11(3): e0151791.

- Zhang C., Chen L., Jiang J., & Zhuo S., 2012. *Effects of gauge length and strain rate on the tensile strength of tree roots*, Trees, Vol. 26, pp. 1577-1584.

LISTA DEI SIMBOLI

Simbolo	Unità di misura	Significato
A	-	Numero di tratti in cui può essere suddiviso il percorso radicale più lungo (Altitude)
A_i	cm^2	Area compresa fra il profilo del fondo rilevato prima della prova e quello rilevato dopo la prova
A_q	mm^2	Area bagnata misurata dal misuratore di portata Mainstream EH 7000
A_r	mm^2	Sezione trasversale del campione di radici sottoposto a trazione
A_v	mm^2	Sezione trasversale di un generico stelo di vegetazione artificiale, pari a $b_v \times s_v$
$CDF(F_{p,i})$	-	Probabilità cumulata del valore dei picchi di forza
B	m	Larghezza del canale di laboratorio meandriforme
B^{SA}	-	Fattore di copertura della superficie
b_v	mm	Larghezza dello stelo di vegetazione artificiale
$\overline{L}$	N	Azione di trascinamento della corrente
dH/dX	-	Gradiente piezometrico
d_x	mm	Dimensione della zolla lungo l'asse x
d_y	mm	Dimensione della zolla lungo l'asse y
d_z	mm	Dimensione della zolla lungo l'asse z
E	N/mm^2	Modulo di Young, necessario per definire l'elasticità del sistema radicale e dello stelo di vegetazione artificiale
F	N	Variabile della forza trasmessa dalla macchina a trazione
F_i	N	Forza trasmessa dalla macchina a trazione nell' i -esimo istante
F_{max}	N	Forza massima registrata per ciascun campione di radici sottoposto a trazione
$F_{max,m}$	N	Rapporto, per ciascun campione di radici, fra F_{max} e il numero di numero di picchi di forza n_p rilevati nel corrispondente grafico $F - \varepsilon$
$F_{p,i}$	N	Forza del picco i -esimo nei grafici $F - \varepsilon$
$\overline{F}_p$	N	Media aritmetica dei valori dei picchi di forza $F_{p,i}$
$\overline{F}_{p,\varepsilon}$	N	Media ponderata dei valori dei picchi di forza in base alle corrispondenti deformazioni $\varepsilon_{p,i}$
$\overline{F}_{p,S_r}$	N	Media ponderata dei valori dei picchi di forza in base ai corrispondenti spessori delle radici $S_{r,i}$
F_{prf}	Hz	Frequenza di acquisizione delle sonde del misuratore di velocità ad ultrasuoni DOP2000

F_r	N	Resistenza a rottura di un sistema radicale di n radici e diametro D_r
h	cm	Tirante rilevato, pari alla distanza fra il fondo e la superficie libera
h_Y	cm	Tirante locale
H	cm	Quota piezometrica rilevata, pari alla distanza fra il basamento del canale e la superficie libera
H_v	mm	Altezza dello stelo di vegetazione artificiale non piegato
I_l	mm^4	Momento di inerzia del singolo stelo di vegetazione artificiale lungo l'asse l
$I_{n.st}$	$\%$	Incidenza del numero degli steli provenienti dalle sezioni rispetto al numero totale di steli raccolti
$I_{p.st}$	$\%$	Incidenza del peso degli steli provenienti dalle sezioni rispetto al peso totale di steli raccolti
I_w	mm^4	Momento di inerzia del singolo stelo di vegetazione artificiale lungo l'asse w
K_l	Nmm^2	Rigidezza dello stelo di vegetazione artificiale lungo l'asse l
K_w	Nmm^2	Rigidezza dello stelo di vegetazione artificiale lungo l'asse w
l	-	Asse parallelo all'altezza dello stelo di vegetazione artificiale
$l_{i,k}$	cm	Distanza fra sezioni consecutive nell' i -esimo tratto di profilo
l_0	mm	Distanza iniziale fra le due morse della macchina a trazione
L_r	mm	Parametro che indica la lunghezza delle radici
$\overline{L_r}$	mm	Lunghezza media delle dieci radici contenute in ciascuna zolla
$L_{r,i}$	mm	Lunghezza della i -esima radice
M	-	Parametro che indica il numero di radici esterne (Magnitude)
M_p	-	Numero di cespugli in 10 cm^2
M_s	-	Numero di steli in 10 cm^2
m_X	$kg \cdot s \cdot m^{-1}$	Flusso di massa longitudinale, ovvero lungo l'asse X
$N.C$	-	Indica quella parte dei campioni di materiale organico, raccolti durante la prova, costituita da steli non colorati
n_k	-	Numero di classi k -esime di architettura radicale considerate
n_p	-	Numero di picchi di forza rilevati nei grafici $F - \varepsilon$
n_{pr}	-	Numero di profili di velocità acquisiti per ciascun punto di misura
n_r	-	Numero di radici rilevate per ciascuna zolla
$n.st_k$	-	Numero totale di steli colorati distaccati dal fondo vegetato nella sezione di riferimento

$n.st_{k,T}$	-	Numero di steli colorati (del colore corrispondente alla $k-esima$ sezione) ed estirpati all'istante T
$n.st_{tot}$	-	Numero totale di steli distaccati dal fondo vegetato alla fine della prova
$n.st_{tot,k}$	-	Numero totale di steli colorati e distaccati dal fondo vegetato alla fine della prova
$n.st_{tot,T}$	-	Numero totale di steli distaccati dal fondo vegetato all'istante T
$\overline{p_{1,1}}, \overline{p_{1,2}}, \overline{p_{1,3}}$	-	Valori medi della zolla dei parametri relativi all'ingombro dell'architettura radicale (classe $k = 1$)
$\overline{p_{2,1}}, \overline{p_{2,2}}, \overline{p_{2,3}}$	-	Valori medi della zolla dei parametri relativi alla dimensione dell'ellisse di contenimento (classe $k = 2$)
$\overline{p_{3,1}}, \overline{p_{3,2}}, \overline{p_{3,3}}$	-	Valori medi della zolla dei parametri relativi al numero di radici (classe $k = 3$)
$\overline{p_{4,1}}, \overline{p_{4,2}}, \overline{p_{4,3}}$	-	Valori medi della zolla dei parametri relativi alle caratteristiche geometriche delle radici (classe $k = 4$)
$\overline{p_{4,4}}, \overline{p_{4,5}}, \overline{p_{4,6}}$		
$\overline{p_{5,1}}, \overline{p_{5,2}}, \overline{p_{5,3}}$	-	Valori medi della zolla dei parametri relativi alla densità radicale (classe $k = 5$)
$p_{k,j}$	-	Valore del $j-esimo$ parametro appartenente alla classe $k-esima$ del generico apparato radicale esaminato
$\overline{p_{k,j}}$	-	Valore medio della zolla del $j-esimo$ parametro appartenente alla classe $k-esima$
$P_{n.st}$	%	Percentuale del numero totale di steli distaccati nel tempo
$P_{n.st,k}$	%	Percentuale del numero di steli colorati ed estirpati all'istante T
$P_{p.st}$	%	Percentuale del peso totale di steli distaccati nel tempo
$P_{p.st,k}$	%	Percentuale del peso di steli estirpati per ciascuna sezione all'istante generico T rispetto al peso totale di steli estirpati dalla stessa alla fine della prova
Q	l/s	Variabile che indica la portata misurata durante la prova
Q_1, Q_2, Q_3, Q_4	l/s	Valori di portata rilevati agli istanti T_1, T_2, T_3 e T_4
$\overline{\alpha}$	N	Azione di ancoraggio della radice al suolo
R^2	-	Coefficiente di regressione delle linee di tendenza dei valori $\sigma_T - \varepsilon$ nel tratto lineare
RAR		Indica il parametro di architettura radicale "Root Area ratio"
r_i	-	Raggio dell' $i-esimo$ tratto di scheletro dell'apparato radicale
RLD		Indica il parametro di architettura radicale "Root length density"

$Sc.$	-	Indica i residui organici scartati nella fase di smistamento dei campioni di materiale organico raccolti durante la prova
S_p	-	Numero di steli per ciascun cespuglio
S_r	mm	Parametro che indica lo spessore delle radici
$\overline{S_r}$	mm	Spessore medio delle radici contenute in ciascuna zolla
$S_{r,i}$	mm	Spessore della i –esima radice
s_v	mm	Spessore dello stelo di vegetazione artificiale
t	s	Variabile che indica il tempo della prova
T	s	Generico istante di rilievo
T_1, T_2, T_3, T_4	s	Istanti corrispondenti alle ricostruzioni planimetriche 1, 2, 3 e 4
t_b	s	Tempo di maturazione della vegetazione necessario affinché l'apparato radicale resista all'evento di piena
t_h	s	Tempo compreso fra due eventi di piena
$T_{t,fin}$	s	Istante finale della prova a trazione, ovvero quello in cui la traslazione della morsa superiore della macchina a trazione causa la rottura di tutte le radici del campione
V_c	mm^3	Volume occupato dagli steli di vegetazione artificiale
V_f	mm^3	Differenza fra il volume totale del campione di vegetazione artificiale (V_t) e il volume occupato dagli steli della stessa (V_c)
$V_{j,i}$	cm^3	Volume sotteso all' i –esimo tratto di profilo del fondo della sezione prima ($j = 1$) o dopo la prova ($j = 2$)
v_q	m/s	Velocità istantanea della corrente stimata con il misuratore di portata
$v_{R1}(t)$	mm/s	Velocità istantanea acquisita dal misuratore di velocità ad effetto doppler DOP 2000 in direzione della sonda verticale
$v_{R2}(t)$	mm/s	Velocità istantanea acquisita dal misuratore di velocità ad effetto doppler DOP 2000 in direzione della sonda inclinata
V_t	mm^3	Volume totale pari al prodotto fra la dimensione planimetrica dell'isola di vegetazione e H_v
$v_X(t)$	mm/s	Componente longitudinale della velocità istantanea
$v'_X(t)$	mm/s	Componente longitudinale di fluttuazione turbolenta
$\overline{v_X}$	mm/s	Media temporale della componente longitudinale della velocità
v_x	m/s	Velocità longitudinale verticalmente mediata
$v_Z(t)$	mm/s	Componente verticale della velocità istantanea
$v'_Z(t)$	mm/s	Componente verticale di fluttuazione turbolenta
$\overline{v_Z}$	mm/s	Media temporale della componente verticale della velocità
$\overline{v'_X v'_X}$	mm^2/s^2	

$\overline{v'_X v'_Z}$	mm^2/s^2	Componenti delle tensioni di Reynolds, dove il sopra
$\overline{v'_Z v'_Z}$	mm^2/s^2	segno indica la media temporale
$V_{1,i}$	mm^3	Volume sotteso all' i –esimo tratto di profilo del fondo della sezione prima della prova
$V_{2,i}$	mm^3	Volume sotteso all' i –esimo tratto di profilo del fondo della sezione dopo la prova
w	-	Asse parallelo alla larghezza dello stelo di vegetazione artificiale
W	Nmm	Lavoro a rottura delle radici
W_i	Nmm	Lavoro a rottura delle radici nell' i –esimo istante
W_{max}	Nmm	Valore massimo di lavoro a rottura delle radici ottenuto per ciascuna zolla
$W_{max,m}$	Nmm	Rapporto fra W_{max} e n_p
x	-	Asse perpendicolare alla sezione (sistema di riferimento della zolla)
X	-	Asse perpendicolare alla sezione (sistema di riferimento della sezione)
y	-	Asse parallelo alla sezione (sistema di riferimento della zolla)
Y	-	Asse parallelo alla sezione (sistema di riferimento della sezione)
z	-	Asse verticale (sistema di riferimento della zolla)
Z	-	Asse verticale (sistema di riferimento della sezione)
z_i	cm	Quota dell' i –esimo punto del profilo del fondo ($i = 1...49$) rispetto al basamento orizzontale
$z_{j,i,k}$	cm	Quota del fondo della generica sezione k nell' i –esimo tratto del profilo, rilevata prima ($j = 1$) o dopo la prova ($j = 2$)
$z_{j,i,k+1}$	cm	Quota del fondo della generica sezione $k+1$ nell' i –esimo tratto del profilo, rilevata prima ($j = 1$) o dopo la prova ($j = 2$)
Z_v	cm	Altezza della vegetazione artificiale inflessa
α	$gradi$	Angolo di inclinazione della sonda verticale rispetto al basamento orizzontale
γ	g/cm^3	Peso specifico dell'acqua
$\overline{\delta_{Lr}}$	$\%$	Errore della lunghezza media delle radici
$\overline{\delta_{Sr}}$	$\%$	Errore dello spessore medio delle radici
δ_Y	m	Lunghezza dei tratti in cui è stata discretizzata la sezione per il calcolo del flusso di massa
ΔV_i	cm^3	Volume complessivo nel tratto i –esimo per ogni coppia di sezioni consecutive
ΔV_k	cm^3	Volume complessivo di erosione/deposito nei tratti di canale compresi tra coppie di sezioni consecutive
Δy	cm	Larghezza di ciascuno dei 49 tratti in cui è stata discretizzata la sezione (pari quindi ad 1 cm)

ε	-	Deformazione in percentuale subita dal provino rispetto a l_0
ε_i	%	Deformazione subita dal campione nel generico istante T
$\varepsilon_{p,i}$	%	Deformazione del picco i –esimo
θ_0	gradi	Angolo di deflessione della curva del canale
ρ	kg/m^3	Densità dell'acqua
σ	N	Deviazione standard dei valori dei picchi di forza
σ_{L_r}	mm	Deviazione standard dei valori della lunghezza delle radici
σ_{S_r}	mm	Deviazione standard dei valori dello spessore delle radici
σ_r	N/mm^2	Tensione a rottura di un apparato radicale
σ_T	N/mm^2	Tensione a cui è sottoposto in provino, pari al rapporto fra la forza e la sezione della stesso
ϕ	-	Porosità dell'isola di vegetazione artificiale, pari al rapporto V_f/V_t

LISTA DELLE FIGURE

- Fig.1.1** Schematizzazione tipi di rottura (Edmaier et. al, 2011) della: a) vegetazione giovane; b) vegetazione matura
- Fig.2.1** Illustrazione di un esempio di: a) taproots; b) plate roots; c) heart roots
- Fig.2.2** Classificazione di radici secondo Cannon (1949): a) Sistemi “Primary roots”: da I a VI; b) Sistemi “Adventitious roots”: da VII a X
- Fig.2.3** Schematizzazione delle tipologie di ramificazione: a) “Herringbone branching”; b) “Dichotomous branching” (Bouma et al., 2001)
- Fig.3.1** Planimetria del canale sperimentale
- Fig.3.2** a) Tratto di canale studiato nella prima fase del presente lavoro; b) Particolare della vegetazione matura presente
- Fig.3.3** Vegetazione artificiale utilizzata per le prove: a) foto del campione; b) foto del singolo cespuglio con indicazione degli assi di riferimento del singolo stelo
- Fig.3.4** Tratto di canale studiato preso in esame nella seconda fase sperimentale
- Fig.3.5** Immagine della macchina a trazione utilizzata
- Fig.3.6** Planimetria con posizionamento delle zolle estratte
- Fig.3.7** a) Planimetria del canale con indicazione delle terne di riferimento; b) Indicazione della direzione delle dimensioni d_x, d_y e d_z per la zolla 2.1
- Fig.3.8** Fotografia quotata della zolla 4.1 nel piano $x-z$
- Fig.3.9** Andamento lungo il canale di: a) $\overline{L_r}$ (mm); b) $\overline{S_r}$ (mm)
- Fig.3.10** Mappe a curve di livello rispetto a: a) $\overline{L_r}$ (mm); b) $\overline{S_r}$ (mm)
- Fig.3.11** Spessori delle radici di tutti i campioni rispetto alla lunghezza degli stessi
- Fig.3.12** Foto della macchina a trazione utilizzata con particolare del serraggio di un campione
- Fig.3.13** Andamento della tensione σ_T al variare della deformazione ε per ciascun campione
- Fig.3.14** Andamento della forza F al variare della deformazione ε per ciascun campione
- Fig.3.15** Andamento della forza al variare della deformazione della zolla 2.1 con individuazione di un calo di forza e del corrispondente picco di forza $F_{p,i}$
- Fig.3.16** Istogrammi della resistenza a rottura rispetto alle posizioni analizzate lungo il canale: a) $F_{max,m}$ b) $\overline{F_p}$; c) $\overline{F_{p,\varepsilon}}$; d) $\overline{F_{p,S_r}}$
- Fig.3.17** Andamento della forza di rottura $F_{max,m}$ al variare delle sezioni
- Fig.3.18** Distribuzione planimetrica di $F_{max,m}$
- Fig.3.19** $CDF(F_{p,i})$ rispetto ai valori $F_{p,i}$ lungo la: a) sponda esterna; b) sponda interna
- Fig.3.20** Andamento del modulo di Young E lungo la sponda esterna ed interna del canale
- Fig.3.21** Foto quotata dei sistemi radicali estratti dalla zolla 2.1

- Fig.3.22** Diagramma ad albero dei parametri calcolati da “Gia Roots”
- Fig.3.23** a) Polilinea che delimita l’area di ingombro dell’apparato radicale; b) Schema rappresentativo dell’ellisse di contenimento con l’indicazione degli assi maggiori e minori (da “Gia Roots” Manual)
- Fig.3.24** Discretizzazione dell’immagine in fasce orizzontali, mirata alla stima del numero di radici (da “Gia Roots” Manual)
- Fig.3.25** Schema di calcolo del volume “Network Volume” (da “Gia Roots” Manual)
- Fig.3.26** Andamento dei valori medi dei parametri appartenenti alla prima classe ($k = 1$) lungo: a) la sponda esterna; b) la sponda interna
- Fig.3.27** Andamento dei valori medi dei parametri appartenenti alla seconda classe ($k = 2$) lungo: a) la sponda esterna; b) la sponda interna
- Fig.3.28** Andamento dei valori medi dei parametri appartenenti alla terza classe ($k = 3$) lungo: a) la sponda esterna; b) la sponda interna
- Fig.3.29** Andamento dei valori medi dei parametri relativi alle caratteristiche geometriche delle radici (classe $k = 4$) lungo: a) la sponda esterna; b) la sponda interna
- Fig.3.30** Andamento dei valori medi dei parametri di densità radicale (classe $k = 5$) lungo: a) la sponda esterna; b) la sponda interna
- Fig.3.31** Confronto fra le curve di tensione-deformazione degli steli soggetti a trazione e andamento medio
- Fig.3.32** Andamento medio delle curve di tensione-deformazione degli steli soggetti a trazione
- Fig.4.1** Immagine del misuratore di portata, collocato dentro il canale rettilineo di invito
- Fig.4.2** Valori del livello h , dell’area A_q , della velocità v_q e della portata Q registrati durante la prova
- Fig.4.3** Posizioni delle tre telecamere fisse (*Tel.1*, *Tel.2* e *Tel.3*) utilizzate durante la prova
- Fig.4.4** Schema sezione trasversale (h = tirante idrico; H = quota piezometrica rispetto al basamento orizzontale)
- Fig.4.5** a) Variazione di H al variare della portata per ciascuna sezione; b) Andamento lungo la sponda esterna di h al variare della portata per ciascuna sezione
- Fig.4.6** Andamento di H e di $\gamma(dH/dX)h$ lungo la curva
- Fig.4.7** a) Planimetria del tratto di canale oggetto di studio con indicazione della marcatura delle sezioni di interesse; b) Foto della griglia utilizzata
- Fig.4.8** Schema di calcolo delle aree sottese ai profili
- Fig.4.9** Andamento delle aree A_i per le sezioni di interesse
- Fig.4.10** Schema di calcolo del volume ΔV_i
- Fig.4.11** Distribuzione planimetrica delle aree erose agli istanti di rilievo e curva $Q-T$

- Fig.4.12** Andamento della superficie erosa rispetto alla portata
- Fig.4.13** Foto di uno dei campioni di materiale organico raccolto smistato per colore e tipologia
- Fig.4.14** Andamento di $P_{n.st}$ al variare: a) del tempo; b) della portata
- Fig.4.15** Andamento di $P_{n.st}$ relativo a ciascuna sezione al variare: a) del tempo; b) della portata
- Fig.4.16** Istogramma del numero di steli distaccati dal fondo vegetato
- Fig.4.17** Andamento del numero di steli raccolti nel tempo
- Fig.4.18** Andamento del numero di steli raccolti al variare della portata
- Fig.4.19** Confronto fra gli andamenti di $P_{n.st}$ e $P_{p.st}$ di tutti gli steli raccolti al variare del tempo
- Fig.4.20** Confronto fra $P_{n.st,k}$ e $P_{p.st,k}$ per ciascuna sezione al variare del tempo
- Fig.4.21** Confronto fra $I_{n.st}$ e $I_{p.st}$ al variare delle sezioni
- Fig.4.22** Stralci di distribuzione planimetrica delle isole di vegetazione artificiale con grado di copertura del 10% e del 60%
- Fig.4.23** Immagine della sezione 3 con configurazione a due isole
- Fig.4.24** Schema planimetrico di disposizione delle isole con posizioni di misura (le misure indicate sono espresse in millimetri)
- Fig.4.25** Schema della griglia di misura lungo il profilo verticale
- Fig.5.1** Variazione di $F_{max,m}$: a) variazione in funzione dello spessore medio delle radici $\overline{S_r}$; b) variazione in funzione della lunghezza media delle radici $\overline{L_r}$
- Fig.5.2** Confronto fra l'andamento di $F_{max,m}$ e l'andamento di $\overline{L_r}$ al variare delle sezioni di riferimento
- Fig.5.3** Confronto fra l'andamento di $F_{max,m}$ e l'andamento di $\overline{S_r}$ al variare delle sezioni di riferimento
- Fig.5.4** Andamento del lavoro di rottura W al variare della deformazione ε
- Fig.5.5** $W_{max,m}$ in funzione: a) dello spessore medio delle radici; b) della lunghezza media delle radici
- Fig.5.6** Modulo di Young E in funzione: a) dello spessore medio delle radici; b) della lunghezza media delle radici
- Fig.5.7** Confronto fra $F_{max,m}$ e il numero di steli distaccati: a) Sponda esterna; b) Sponda interna
- Fig.5.8** Confronto fra il numero degli steli e l'area della superficie erosa lungo la curva al variare della portata
- Fig.5.9** Confronto fra l'andamento di $F_{max,m}$ e quelli di $\overline{p}_{I,1}$, $\overline{p}_{I,2}$ e $\overline{p}_{I,3}$ lungo: a) la sponda esterna; b) la sponda interna
- Fig.5.10** Confronto fra l'andamento di $F_{max,m}$ e gli andamenti, al variare della sezione di riferimento e al variare della portata, di: a) h ; b) $\gamma(dH/dX)h$

- Fig.5.11** Confronto fra l'andamento di $F_{max,m}$ e quelli di $\overline{p_{4,2}}, \overline{p_{4,3}}, \overline{p_{4,4}}, \overline{p_{4,5}}$ e $\overline{p_{4,6}}$ lungo: a) la sponda esterna; b) la sponda interna
- Fig.5.12** Confronto fra l'andamento di $F_{max,m}$ e quelli di $\overline{p_{3,1}}$ e $\overline{p_{3,2}}$ lungo: a) la sponda esterna; b) la sponda interna
- Fig.5.13** Confronto fra l'andamento di $F_{max,m}$ e quelli di $\overline{p_{3,1}}$ e $\overline{p_{3,2}}$ lungo: a) la sponda esterna; b) la sponda interna
- Fig.5.14** Profili di velocità $\overline{v_X}$ rilevati fino al bordo interno dell'isola A
- Fig.5.15** Profili di velocità $\overline{v_X}$ rilevati dal bordo interno dell'isola A fino al centro dell'isola B
- Fig.5.16** Profili di velocità $\overline{v_Z}$ rilevati fino al bordo interno dell'isola A
- Fig.5.17** Profili di velocità $\overline{v_Z}$ rilevati dal bordo interno dell'isola A fino al centro dell'isola B
- Fig.5.18** Andamento lungo la sezione del flusso di massa longitudinale
 $m_Y [kg \cdot s \cdot m^{-1}]$
- Fig.5.19** Mappe a curve di livello di: a) $\overline{v'_X v'_X}$; b) $\overline{v'_Z v'_Z}$; c) $\overline{v'_X v'_Z}$

LISTA DELLE TABELLE

- Tab.3.1** Dimensioni delle zolle lungo le direzioni x, y, z
- Tab.3.2** Dimensioni delle radici: a) lunghezza (mm); b) spessore (mm)
- Tab.3.3** Errori δ_{Lr}^- e δ_{Sr}^- ottenuti per ciascuna zolla
- Tab.3.4** Riepilogo delle caratteristiche geometriche della vegetazione (dati valutati su un campione $10 \times 10 \text{ cm}^2$)
- Tab.4.1** ΔV_k ottenuto per ogni coppia di sezioni consecutive