



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA

Dipartimento Territorio e Sistemi Agro-Forestali

Corso di Laurea Magistrale in Scienze Forestali e Ambientali

Legno subfossile: caratterizzazione fisico meccanica e  
chimica di due tronchi rinvenuti nella pianura veneta

Bog Oak: Physico-mechanical and Chemical Characterization of

Two Logs from Venetian Plan

Relatrice

Prof.ssa Michela Zanetti

Correlatrice

Prof.ssa Tiziana Urso

Laureanda

Chiara Meneghello

Matricola n. 1240696

ANNO ACCADEMICO 2021-2022



*Le querce e i pini, e i loro fratelli della foresta,  
hanno visto sorgere e tramontare così tanti soli,  
e visto andare e venire così tante stagioni, e svanire nel silenzio così tante generazioni,  
che possiamo ben chiederci cosa sarebbe per noi “la storia degli alberi”,  
se questi avessero la lingua per narrarcela,  
oppure se le nostre orecchie fossero abbastanza sensibili da comprenderla*

*(Maud Van Buren)*

*A chi non c'è più ma è sempre al mio fianco*



## **Ringraziamenti**

Si ringraziano Matteo Marton e Giovanni Moro per aver donato all'Università di Padova le rotelle utilizzate nello studio dei due tronchi e aver così permesso di approfondire la conoscenza su questo raro materiale.

Ringrazio di cuore Rosa Greco, per l'instancabile aiuto e disponibilità nelle giornate di laboratorio e per il duro e poco simpatico lavoro di macinazione.

Ringrazio la mia famiglia, i miei genitori che mi hanno sempre spronata a dare il meglio e non mollare. Grazie alla mia sorellina per avermi spinto a non fermarmi, anche sotto minaccia di digiuno, quando la salita sembrava ripida e infinita.

Grazie ai miei amici per l'insostituibile supporto che ognuno di loro ha fornito nel corso degli anni ed in questi ultimi mesi. Tra tutti grazie ad Anna che mi sopporta e supporta da ormai più di 10 anni.



## Sommario

Riassunto .....	1
Abstract .....	2
1. INTRODUZIONE .....	3
1.1. Il legno subfossile.....	3
1.1.1. Generalità.....	3
1.1.2. Usi e commercio del legno subfossile di quercia .....	4
1.2. Il legno archeologico .....	7
1.2.1. Agenti di degrado del legno.....	7
1.3. Stato dell'arte .....	9
1.3.1. Ritrovamenti italiani .....	10
1.4. Obiettivi dello studio .....	11
2. MATERIALI E METODI.....	12
2.1. Studio e conservazione del legno archeologico .....	12
2.1.1. Recupero e conservazione del reperto .....	12
2.2. Descrizione delle aree di ritrovamento e dei legni oggetto di studio .....	14
2.2.1. Descrizione dell'area di ritrovamento del fiume Zero (VE).....	14
2.2.2. Tronco ritrovato nel fiume Zero .....	15
2.2.3. Descrizione dell'area di ritrovamento del canale Piavon (TV) .....	18
2.3. Tronco ritrovato nel canale Piavon .....	18
2.4. Analisi fisica.....	22
2.4.1. Densità basale, densità basale residua, contenuto idrico massimo e ritiri.....	22
2.4.2. Colore .....	26
2.5. Contenuto elementare.....	30
2.6. Resistenza meccanica .....	32
2.6.1. Resistenza a compressione .....	35
2.6.2. Durezza di Brinell.....	36
2.7. Elaborazione dei dati ottenuti.....	37

3.	RISULTATI E DISCUSSIONE.....	40
3.1.	Caratterizzazione fisica.....	40
3.1.1.	Densità basale (BD), densità basale residua (RD), contenuto idrico massimo (MWC)	40
3.1.2.	Ritiri lineari .....	45
3.1.3.	Colore .....	49
3.2.	Contenuto elementare .....	56
3.3.	Resistenza meccanica.....	64
3.3.1.	Resistenza alla compressione .....	64
3.3.2.	Durezza di Brinell .....	70
4.	CONCLUSIONI.....	74
5.	Bibliografia .....	76
6.	Sitografia.....	82
	APPENDICI.....	83
Appendice A.	Valori di peso e volume massimi (max) e minimi (0); tronco Piavon.....	83
Appendice B.	Valori di peso e volume massimi (max) e minimi (0), BD, RD e MWC; controllo .....	83
Appendice C.	Valori massimi (max) e minimi (0) delle direzioni anatomiche radiale, tangenziale e assiale; tronco Piavon.....	84
Appendice D.	Valori massimi (max) e minimi (0) delle direzioni anatomiche radiale, tangenziale e assiale e risultati dei ritiri assiali, tangenziali e radiali; controllo.....	84
Appendice E.	Risultati analisi del colore; tronco Zero .....	85
Appendice F.	Risultati analisi del colore; tronco Piavon .....	87
Appendice G.	Risultati analisi del colore; controllo .....	89
Appendice H.	Contenuto elementare; tronco Zero.....	90
Appendice I.	Contenuto elementare; tronco Piavon .....	93
Appendice J.	Contenuto elementare; controllo .....	95
Appendice K.	Variazioni percentuali del contenuto elementare rispetto al controllo .....	96
Appendice L.	Resistenza alla compressione parallela alle fibre; tronco Zero.....	98
Appendice M.	Durezza; tronco Zero .....	99



Appendice N.	Resistenza alla compressione parallela alle fibre; tronco Piavon .....	100
Appendice O.	Durezza; tronco Piavon .....	101
Appendice P.	Resistenza alla compressione parallela alle fibre; controllo .....	102
Appendice Q.	Durezza; controllo .....	104



## **Riassunto**

Il legno di quercia subfossile, o bog oak, è un materiale relativamente raro che deriva dalla permanenza per lungo periodo in condizioni anossiche ed elevata umidità.

In questo elaborato di tesi magistrale si presentano i dati relativi allo studio di due tronchi ritrovati interrati nel fiume Zero (Marcon, VE) e nel canale Piavon (Chiarano, TV), datati rispettivamente al III-V sec. d.C. e XII-XIII sec. d.C. Il legno dei due tronchi è stato caratterizzato dal punto fisico (densità basale, densità basale residua, contenuto idrico massimo, ritiri, colore), meccanico (resistenza a compressione e durezza) e chimico (analisi elementare). I valori ottenuti sono stati confrontati con quelli del legno di quercia attuale (controllo). Densità basale e contenuto idrico massimo sono risultati simili al controllo per le aree meno degradate ma molto diversi per quelle degradate. Il legno subfossile presenta ritiri più elevati in tutte le direzioni anatomiche ed è caratterizzato da un colore marrone scuro – nero. Rispetto al controllo, il contenuto elementare del legno subfossile è in generale maggiore, con alcuni rari casi (es. K) in cui è stata osservata una diminuzione. In particolare il contenuto di ferro del legno subfossile è molto superiore al controllo e responsabile del colore scuro. Dal punto di vista meccanico si osserva una minor resistenza alla compressione parallela alle fibre rispetto al controllo, come indicato anche in letteratura, ma un aumento della durezza, soprattutto in sezione trasversale, risultando in contrapposizione rispetto a quanto riportato da altri studi.

Non sembra esserci una differenza significativa delle caratteristiche sopradescritte tra i due tronchi esaminati, nonostante il diverso tempo di permanenza nel letto dei due fiumi. Risultano invece esserci differenze tra le caratteristiche delle porzioni degradate e le zone integre del legno subfossile e, come aspettato, con il legno attuale.

**Parole chiave:** legno subfossile, colore, densità basale, compressione, durezza.

## **Abstract**

The subfossil oak wood, also known as bog oak, is a rare material. It is the result of a long period of stay in anoxic and high humidity conditions

This master degree thesis analyses two subfossil logs. The first log was found buried along the Zero river (Marcon, VE) and dated back to the III-V sec. A.D. The second log was found buried inside a bend of the Piavon river (Chiarano, TV), it is dated back to the XII-XIII sec. A.D. The study of the logs is divided in physical characterization (basic density, residual basic density, maximum water content, shrinkage, colour), chemical characterization (elemental analysis) and mechanical characterization (compressive strength and hardness). The results were compared with the values of recent oak wood (control). Basic density and maximum water content are similar to the recent wood in the intact wood sector, but they are quite different in the degraded wood. The subfossil wood has higher shrinkage for all anatomic directions and it appears dark brown/black in colour. The elemental content of the logs is higher than the recent wood; in rare occasions a lower element content than the recent wood is observed (e.g. K). Ferric content is much higher in the subfossil wood and it causes a darker colour. It is noted a lower compressive strength parallel to the fibers than the recent wood, as reported in literature, but a higher hardness, especially in the transversal section.

There are not substantial differences between the two logs despite different finding areas and different permanence period in soil. As expected, greater differences are observed between degraded and non-degraded log sectors and between subfossil and recent wood.

**Key words:** bog oak, colour, basic density, compression, hardness.

# **1. INTRODUZIONE**

## **1.1. Il legno subfossile**

### **1.1.1. Generalità**

Schweingruber e Kaennel (1995) definiscono il legno subfossile come “legno non pietrificato, conservatosi per centinaia o migliaia di anni in fiumi, paludi o sedimenti morenici”.

Siti terrestri caratterizzati da suoli umidi sottostanti la falda, laghi e fiumi, paludi e torbiere forniscono un ambiente protetto dall’azione di agenti esterni e dall’azione di degradazione attuata dai funghi su materiale organico esposto (Björndal et al., 2000; van Būrck et al., 2012).

Questi siti presentano un ambiente pedologico ad elevata umidità, generalmente imbibiti, che limita la disponibilità di aria ed ossigeno, creando condizioni fortemente anaerobiche, non supportabili dalla maggioranza dei macro e microrganismi.

Sono inoltre suoli spesso ricchi di elementi minerali che, assorbiti dal legno, causano il mutamento delle caratteristiche chimiche, fisiche e meccaniche. Gli elementi possono essere accumulati sia nelle pareti che nei lumi cellulari sotto forma di cristalli.

In particolare, il ferro e i suoi composti vengono assorbiti e reagiscono con i tannini e, nel caso delle querce, conferiscono al legno tonalità dal marrone fino ad un nero intenso (Kolář and Rybníček, 2010; Mańkowski et al., 2016; van Būrck et al., 2012).

I silicati hanno invece funzione essenziale nella mineralizzazione e fossilizzazione dei tessuti legnosi (Buurman, 1972), un processo graduale che procede dalla superficie verso l’interno dei tessuti. Spesso la degradazione precede la mineralizzazione ma quest’ultima può avvenire anche senza un diretto legame con la degradazione. Negli studi condotti il materiale fossilizzato presenta solo lo 0,1-1% della materia organica originale e la fossilizzazione può avvenire come silicificazione, carbonizzazione e calcificazione (Buurman, 1972; Ghavidel et al., 2020).

I processi di degradazione, mineralizzazione e variazione delle caratteristiche del legno sono solo in parte legati alla specie. Nel determinare l’intensità dei processi hanno un ruolo principale il sito dove questi avvengono, in particolare le condizioni pedo-ambientali, le concentrazioni dei minerali presenti e l’effettiva possibilità di contatto tra le strutture organiche e gli elementi del suolo (Kolář and Rybníček, 2010; Mańkowski et al., 2016).

Il tempo di permanenza del materiale sepolto ha invece un ruolo più marginale, influenzando sulla profondità di penetrazione degli elementi nel legno, un processo lento e graduale dall'esterno (Ghavidel et al., 2020; Kolář and Rybníček, 2010).

In molti casi i ritrovamenti presentano materiale legnoso appartenente al genere *Quercus*, ritrovato spesso in tutti i territori europei (Mañkowski et al., 2016). Queste specie sono classificate come durabili (farnia e rovere) nella normativa UNI EN 350 (UNI EN, 2016). Anche il legno di quercia subfossile risulta resistente a fattori di degrado abiotici, quasi al pari del carbone (Mañkowski et al., 2016).

Oltre alla quercia, specie più frequente per il legno subfossile, si registrano ritrovamenti anche di pini, olmi, aceri, pioppi, faggi, frassini e ontani (Dvorská, 2002 in Kolář and Rybníček, 2010).

### **1.1.2. Usi e commercio del legno subfossile di quercia**

Il legno subfossile di quercia viene indicato con una grande varietà di nomi commerciali, generalmente con riferimento al suo colore o alla sua origine più comune. Il termine “*bog oak*” o “*bogwood*” (van Bürck et al., 2012) fa riferimento al fatto che spesso questo materiale viene ritrovato nelle torbiere, in inglese *bog*, mentre in riferimento al colore viene anche chiamata “quercia nera” (*black oak*) (Kolář and Rybníček, 2010). In Italia viene anche comunemente chiamata “quercia affogata” per il suo legame con i luoghi umidi, mentre antichi testi inglesi di epoca medievale vi facevano riferimento come “*wood from Ireland*” (Mahr, 1935); nei paesi balcanici è spesso riferita come “*abonos*”. Altri nomi commerciali sono “quercia morta”, “*gost oak*”, “legno/rovere di palude” etc.

L'uso del legno di quercia affogata in quanto tale è antico di secoli, già in epoca medievale e nel rinascimento questo legno veniva utilizzato per la creazione di oggetti ed arredi di lusso, soprattutto per uso ecclesiastico, come altari, sedute, statue, intarsi ed ancora porte, finestre e mobili (Mahr, 1935).

In Italia sono numerosissimi gli intarsi di quercia affogata (Figura 1), utilizzata per gli elementi più scuri, spesso al posto del più costoso ebano (Nardi Berti e Berti, 2003). Il legno di quercia affogata viene utilizzato ancora oggi per la realizzazione di nuovi intarsi e per il restauro delle opere antiche.

La quercia affogata è un materiale raro, ma molto apprezzato, sia per tavole e impiallacci che per la realizzazione di oggetti. Aziende come Telc Inc. (<http://www.teltinc.com>) lavorano e rivendono questo materiale di lusso per la realizzazione di pavimenti, mobili, infissi e la personalizzazione di yacht ed automobili di lusso o strumenti musicali (Figura 2). È un legno

molto apprezzato perché oltre al suo colore particolare risulta di ottima qualità e non interessato da attacchi parassitari, data la sua condizione “fossile”.

Nicchia particolare dove questo legno ha trovato forte riscontro è la realizzazione e il commercio di pipe da tabacco (Figura 3). Come riportato da Davorin Denovic, artigiano croato del settore (<https://davorinmortapipes.com/>), l'*abonos* è molto resistente alla combustione e la lunga imbibizione, che ha esportato la maggior parte degli estrattivi, come tannini e resine, permette di mantenere un sapore neutrale durante il suo utilizzo; è inoltre apprezzatissimo per l'aspetto estetico che conferisce alle pipe. Purtroppo è un materiale che risulta essere estremamente duro e difficile da lavorare, spesso con difetti nascosti.

Il legno di quercia subfossile si può trovare in vendita in numerosissimi siti (es. ebay, etsy, rivenditori pubblici e privati etc.) sia come oggettistica che come tavole e blocchi grezzi, con prezzi molto variabili. È necessario fare però attenzione all'autenticità del materiale, in quanto raramente gli oggetti o il materiale stesso vengono venduti con documenti certificanti la datazione del legno utilizzato.

Esistono poi tecniche e lavorazioni che sono in grado di riprodurre l'aspetto della quercia subfossile in materiale recentemente abbattuto. Viene sfruttato il processo di “affumicatura da ammoniaca” per ottenere la cosiddetta “*smoked oak*” o “quercia affumicata”. Durante il processo vengono utilizzati sali d'ammonio in autoclave per 2-3 settimane a 60°-70°, dove i vapori di ammoniaca reagiscono con i tannini presenti nel legno per conferire una colorazione più scura sia in superficie che in profondità (<https://www.lignumvenetia.com/>).

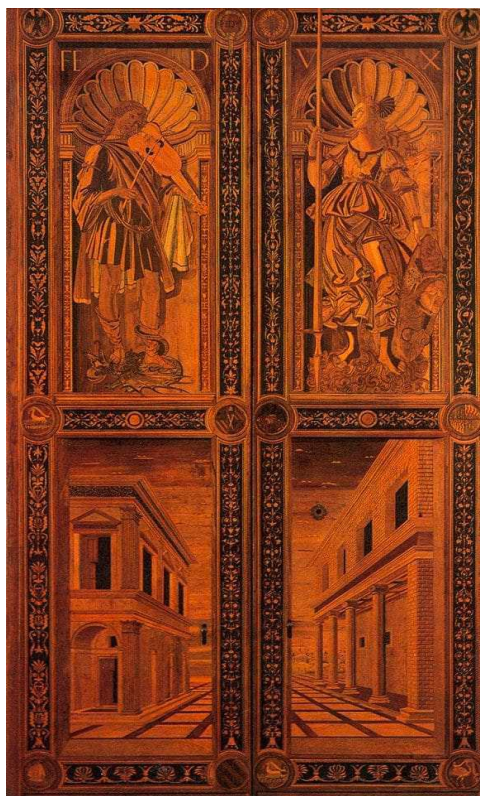


Figura 1: Tarsia proveniente dal Palazzo Ducale di Urbino, Sandro Botticelli.  
(<https://www.proantic.com/magazine/lintarsia/>)



Figura 2: Chitarra elettrica in quercia affogata (valore commerciale 4349 €) (<https://zjonsguitarstore.nl/>)



Figura 3: Pipa realizzata in quercia affogata (valore commerciale 149 €) (<https://www.pfeifen-shop-online.de>)



## 1.2. Il legno archeologico

La norma UNI 11205 (UNI, 2007a) indica come legno archeologico o archeobotanico il materiale legnoso “al quale viene riconosciuta una valenza archeologica o archeobotanica”.

La corretta caratterizzazione di questo materiale ha lo scopo di definire quantitativamente e qualitativamente il degrado subito dall'elemento e gli agenti che lo hanno comportato. La caratterizzazione è un elemento diagnostico essenziale e propedeutico per la definizione delle strategie di intervento fin dalla fase del rinvenimento (UNI, 2007a). Lo studio del materiale è inoltre strettamente legato alla conoscenza delle caratteristiche del sito di giacitura e dei parametri ambientali caratterizzanti lo scavo, come definito dalla norma UNI 11206 (UNI, 2007b).

### 1.2.1. Agenti di degrado del legno

Lo studio degli agenti di degrado che potrebbero influire sul legno archeologico è essenziale per comprendere i fattori critici per la sua conservazione e il suo trattamento.

La norma UNI 11130 (UNI, 2004a) definisce il degrado come “modificazione del legno, di diversa origine, che in qualsiasi modo ne peggiora le caratteristiche (in particolare, ma non esclusivamente, quelle meccaniche). In generale può essere causato da agenti chimici, fisici, meccanici, biotici e/o loro combinazioni” che alterano la struttura chimica dei tessuti legnosi, degradando cellulosa, emicellulose e lignine, secondo modalità diversificate tra i diversi agenti.

Nel legno in superficie il principale agente di degrado è rappresentato da funghi *Basidiomycota*, secondo processi degradativi molto rapidi, dove disponibilità di ossigeno e alti valori di umidità e temperatura risultano fattori di controllo principali (Björðal et al., 2000).

Nel processo degradativo del legno interrato o sommerso i fattori determinanti sono l'elevata umidità e presenza d'acqua libera nel legno e nell'ambiente circostante ed una disponibilità d'ossigeno minima, che costituiscono un ambiente asfittico o anaerobio, in aggiunta alla totale assenza di luce. A queste condizioni non risulta possibile la proliferazione di insetti o funghi aerobi e l'attività degradativa risulta a carico dei batteri e, limitatamente, dei pochi funghi agenti di carie maggiormente resistenti alle condizioni sfavorevoli (carie soffice).

Numerosi studi hanno indicato come i processi enzimatici di *erosion bacteria* siano la causa principale di degrado in reperti conservati in suoli umidi a condizioni anaerobiche; la componente fungina, come carie soffice, e i *tunneling bacteria* sono presenti in quantità molto ridotta e generalmente legata ad un precedente periodo in condizioni maggiormente aerobiche (Björðal et al., 2000).

Gli *erosion bacteria* sono batteri presenti in una grande varietà di ambienti e condizioni ma sono prevalenti in condizioni di minima disponibilità d'ossigeno, dove sono ancora in grado di sopravvivere e mantenere un'attività degradativa estremamente lenta ma continua, dall'esterno verso l'interno del corpo legnoso. Possono essere affiancati dai *tunneling bacteria* e carie soffici (Björdal et al., 2000).

L'ingresso del batterio avviene dalla superficie attraverso i raggi e le punteggiature verso i lumi cellulari delle tracheidi. L'erosione avviene pesantemente a carico di cellulosa e emicellulose, intaccando prevalentemente lo strato S2 della parete cellulare con disposizione dei canali di erosione paralleli alle microfibrille. L'erosione procede dal lume verso la lamella mediana che, essendo fortemente lignificata, risulta un elemento di resistenza difficilmente degradato. Nel legno degradato la tenuta della struttura è quasi totalmente a carico della lamella mediana e degli altri elementi lignificati: l'imbibizione delle pareti cellulari residue permette al legno di non collassare. Se il legno degradato viene collocato in ambiente più asciutto, in seguito al naturale ambientamento l'acqua esce dalle pareti cellulari e il legno collassa. (Björdal et al., 2000; Singh, 2012).

I *tunneling bacteria* si presentano in ambienti terrestri e acquatici, sopportando ampie variazioni di temperature ed umidità. Sono in grado di convivere sia con carie soffici che con gli *erosion bacteria*, ma richiedono disponibilità di ossigeno superiore rispetto a quest'ultimi.

L'erosione batterica avviene a carico di elementi lignificati (tracheidi, fibre, vasi), raggiunti attraversando sia gli strati S2 che S3, compresa la lamella mediana. I canali d'erosione non seguono una direzione precisa (Björdal et al., 2000; Singh, 2012).

L'attività batterica è anch'essa legata alla disponibilità di ossigeno, quindi alla profondità nel suolo e al livello di intrusione nel legno; a una diminuzione di disponibilità di ossigeno consegue una diminuzione dell'attività di degrado (Björdal et al., 2000).

La carie soffice (*Soft rot*) è causata da alcuni funghi *Ascomycota*, comuni nel suolo. Gli agenti di carie soffice sono attivi in condizioni di alta umidità, spesso in associazione con batteri agenti di degrado del legno (Kim Y.S. e Singh A.P., 2000). L'attività fungina si concentra nelle zone superficiali, interessando sia la cellulosa sia le emicellulose dello strato S2 della parete cellulare. L'attività fungina porta alla formazione di singole cavità di forma conica e a diamante che si uniscono a creare ramificazioni parallele alle microfibrille di cellulosa (Kim Y.S. e Singh A.P., 2000).

Oltre agli agenti di degrado, le caratteristiche del sito di ritrovamento sono componenti essenziali nella determinazione dell'attività e del tipo di agente di degrado. Si devono considerare quindi i processi chimici, biologici e fisici, che interagiscono tra di loro e con il materiale organico deposto, e la variabilità degli equilibri e delle interazioni nel lungo periodo.

Elementi ambientali che vengono considerati prevalenti, rispetto al tipo e al grado di degradazione del legno, sono il pH, il potenziale redox (Eh), il contenuto di ossigeno disciolto e la presenza di specie ferrose, in particolare ammoni e nitrati. In ambiente marino un ulteriore aspetto determinante è la salinità. Infine molto importante è la modalità in cui l'elemento è stato inglobato all'interno del suolo e le modalità di formazione del sito stesso (Jordan, 2001).

### **1.3. Stato dell'arte**

Lo studio del legno subfossile di interesse archeologico o archeobotanico ha assunto nei decenni sempre più importanza. Al giorno d'oggi gli studi su questo materiale sono protratti con rigoroso interesse scientifico ed archeologico, con la massima attenzione alla conservazione e allo studio di un materiale che è in grado di fornire informazioni di varia natura.

Oltre all'importanza archeologica di un elemento, il legno subfossile riporta informazioni archeobotaniche, dendrocronologiche e tecnologiche.

Il legno di quercia, soprattutto di rovere e farnia (Haneca et al., 2009), è particolarmente interessante, per la datazione dendrocronologica, in quanto presenta tutti gli elementi a questa necessari:

- anelli di accrescimento facilmente identificabili e ben definiti;
- vasto areale ecologico e geografico di distribuzione, in grado di fornire perciò dati globali;
- posizione dominante o co-dominante nella struttura del popolamento, che permette una maggior esposizione ai cambiamenti climatici e stagionali;
- durabilità per poter attuare questi studi anche dopo lungo tempo;
- utilizzazione estensiva per lunghi periodi di tempo.

Lo studio delle caratteristiche tecnologiche del legno subfossile ha sostanzialmente due scopi principali: la comprensione del processo di deterioramento e il miglioramento della conoscenza per la sua conservazione.

Gli studi si concentrano quindi principalmente sugli aspetti del degrado. Per caratterizzarlo, vengono analizzate la composizione chimica del legno degradato e la sua variazione, sia per quanto riguarda le ceneri che per il contenuto minerale elementare; l'umidità e il massimo contenuto d'acqua; le modificazioni microscopiche strutturali e le modifiche al comportamento durante l'essiccazione (ritiri); infine, i cambiamenti nella resistenza all'applicazione di forze esterne (principalmente compressione e durezza) (Florian, 1989).

Dagli studi tecnologici sulla quercia subfossile è emerso che i tessuti fossili presentano una percentuale di emicellulose fortemente ridotta rispetto al legno recente, principalmente legata alla sostituzione con carbonati di calce e silicio (Kolář and Rybníček, 2010).

Mańkowski et al. (2016) hanno osservato come il legno subfossile presenti una massa volumica maggiore rispetto alla quercia recente, proprio per l'ingresso di questi elementi. L'accumulo di elementi inorganici minerali porterebbe a pensare ad un aumento della resistenza meccanica del materiale, ma diversi studi (Bednar and Fengel, 1974; Horský and Reinprecht, 1986; Govorčín and Sinković, 1995; Kolář and Rybníček, 2010; Mańkowski et al., 2016) hanno individuato una generale riduzione delle proprietà meccaniche nel legno subfossile, con resistenza alla compressione parallela alle fibre ridotta del 30% o anche 50% rispetto al legno recente; la riduzione è più accentuata osservando il modulo elastico, con riduzione di oltre il 40%. Anche per quanto riguarda la durezza, Kolář e Rybníček (2010) hanno osservato una riduzione complessiva rispetto alla quercia recente.

Mańkowski et al. (2016) riportano che le variazioni di dimensioni (rigonfiamenti e ritiri) volumetriche aumentano da un valore medio del 13% del legno recente fino al 20,5% di quello subfossile, in relazione al livello di degradazione delle pareti cellulari, che permette un aumento nell'assorbimento di vapore ed acqua libera.

Per quanto riguarda le caratteristiche meccaniche, in generale si è osservato come la loro variazione non sia particolarmente legata al periodo di interrimento, ma principalmente dipenda da sito, condizioni di deposito, processi e stato di degradazione (Kolář and Rybníček, 2010).

Kolář and Rybníček (2010) indicano che le differenze visibili tra quercia subfossile e quercia recente possono essere attribuite a:

- degradazione biologica dei tessuti, che ha causato una modifica delle caratteristiche e delle strutture stesse del legno;
- diversa composizione chimica e mineralogica tra i due legni, anche per quanto riguarda le principali molecole strutturali, prima di tutte la cellulosa.

### **1.3.1. Ritrovamenti italiani**

Gli elementi legnosi ritrovati sepolti lungo corsi d'acqua, in zone di torbiera o vicini a centri nevralgici dell'attività umana passata sono numerosi. Solitamente i ritrovamenti sono conseguenti a lavori di modifica, manutenzione o riqualificazione di aree interessate da presenza e attività umana. Per quanto riguarda i reperti naturali, i ritrovamenti si trovano principalmente in zone umide o corsi d'acqua.

A titolo di esempio, nel 2004, durante lavori di scavo dell'area di porto della città di Napoli, sono stati scoperti 3 relitti di navi risalenti all'epoca romana, di cui rimaneva la sezione basale. Queste navi, affondate in porto, si sono insediate sul fondale permettendo la protezione della base da parte dei sedimenti; in seguito, con l'avanzamento del porto, sono state inglobate nel terreno a costituzione dell'area cittadina. Il loro ritrovamento ha fornito informazioni archeologiche sia sulla storia della città che sulla tecnica navale romana, oltre che una fonte di indagine per lo studio del degrado e della caratterizzazione del legno che le costituisce. (Capretti et al., 2008).

Nel Nord Italia, invece, nel 2009 è stata ritrovata lungo il corso del Piave una piroga monossile di quercia, risalente all'alto medioevo. La piroga si presentava divisa in due tronconi ma ben conservata dal sedimento del letto del fiume, tale da mantenere la forma caratteristica e dettagli come la seduta. Il ritrovamento risulta uno dei pochi reperti di piroga risalenti all'epoca e ha fornito essenziali informazioni per la conoscenza tecnologica del materiale (Urso et al., 2012).

Un ulteriore esempio di tronchi ritrovati lungo i fiumi, non in Italia, è quello di un tronco lungo il fiume Ticino, nella zona di Moleno (Canton Ticino). Il tronco, datato al 3800-3600 a.C., appartiene ad una farnia di circa 250 anni. A differenza dei due reperti veneti che verranno descritti in questo lavoro di tesi, il rinvenimento è dovuto ad una naturale scopertura del suolo data dalla riattivazione dell'attività di erosione fluviale nel tratto (Krebs et al., 2015; Peduzzi et al., 2020).

#### **1.4. Obiettivi dello studio**

L'obiettivo di questo studio è quello di continuare la caratterizzazione dei tronchi di quercia subfossile ritrovati nei pressi del canale Piavon e del fiume Zero, nel nord Italia.

Entrambi i tronchi sono stati datati sia al radiocarbonio che con tecniche dendrocronologiche. Inoltre sono state effettuate indagini sulla specie legnosa, sul degrado mediante caratterizzazione fisica e sul contenuto di ceneri. Sul tronco del Piavon sono stati inoltre determinati i ritiri lineali (Urso et al, 2015; Maraschin, 2019; Meneghello et al, 2022).

In questo lavoro di tesi, si è ripetuta la caratterizzazione fisica del tronco Piavon, per rendere uniformi le metodologie di analisi con quanto svolto sul tronco Zero. Per entrambi i tronchi si sono effettuate anche l'analisi chimica elementare del legno, la caratterizzazione del colore e la caratterizzazione meccanica (durezza e resistenza a compressione).

I risultati di questo studio permetteranno di ampliare la conoscenza generale sul materiale e sulle sue differenze rispetto al legno di quercia attuale che comunemente viene utilizzato.

## **2. MATERIALI E METODI**

### **2.1. Studio e conservazione del legno archeologico**

Il processo di caratterizzazione di un elemento ligneo archeologico, indicato dalla norma UNI 11205 (UNI, 2007a), si articola nelle seguenti fasi:

1. Identificazione della specie legnosa, secondo la norma UNI 11118 (UNI, 2004b)
2. Descrizione macroscopica: definizione delle caratteristiche morfometriche del legno e ricerca di elementi di carattere tecnologico o caratterizzanti l'elemento archeologico
3. Caratterizzazione anatomica: osservazione delle modificazioni morfologiche a livello microscopico per la definizione degli effetti del degrado, con identificazione degli agenti di degrado (abiotico, biotico, per organismi e/o microrganismi)
4. Caratterizzazione chimica: determinazione quantitativa e qualitativa delle componenti chimiche residue del legno, sia per le componenti organiche (cellulosa, emicellulose, lignina ed estrattivi organici) che per la componente inorganica (estrattivi acquosi e ceneri). Il quadro diagnostico viene definito con il confronto con legno recente sano
5. Caratterizzazione fisica: determinazione di umidità, massimo contenuto d'acqua e massa volumica che, in caso di materiale completamente imbibito, viene determinata come densità basale e densità basale residua.

Questo lavoro di tesi si concentra sul completamento della caratterizzazione fisica e chimica dei due tronchi rinvenuti, in quanto i primi tre punti sono già stati considerati in due precedenti lavori (Meneghello et al., 2022; Urso et al., 2015). Al fine di avere una caratterizzazione esaustiva del legno di quercia subfossile, è stata fatta anche una caratterizzazione meccanica dei due ritrovamenti in esame.

#### **2.1.1. Recupero e conservazione del reperto**

Determinante per garantire una corretta caratterizzazione tecnica dei reperti lignei, è il loro recupero e la loro conservazione e la norma UNI 11206 (UNI, 2007b) ne definisce le modalità. In primo luogo è necessario identificare il tipo di sito e caratterizzare i parametri ambientali dello

stesso, in quanto determinanti per la gestione del recupero. I siti vengono suddivisi, secondo caratteristiche ambientali, geologiche e pedologiche, in sito interrato, sito subaereo confinato e sito subacqueo. I due reperti in esame fanno riferimento ad un sito interrato ma a stretto contatto con l'acqua.

Il corretto recupero dei reperti è essenziale al loro mantenimento: fino al momento del rinvenimento, l'elemento è stato in equilibrio con l'ambiente circostante, mentre con il recupero viene disturbato questo equilibrio, e si possono innescare ulteriori processi degradativi.

La norma indica di mantenere il reperto alla stessa umidità e di ridurre la sua esposizione alla luce e alle alte temperature. Pertanto, una volta recuperato, il reperto deve essere immagazzinato temporaneamente, e per il minor tempo possibile, in situ (riseppellimento o ricopertura) o in laboratorio, con controllo costante delle condizioni di preservazione. Nel caso di legno imbibito questo deve essere mantenuto al buio, in acqua ed in ambiente refrigerato, con temperature sempre comprese tra 0° e 4°C.

Il recupero del materiale ligneo deve essere attuato solamente se sono assicurate tutte le condizioni necessarie di salvaguardia durante il periodo dell'intero processo, dallo studio del sito fino al restauro e alla fruizione museale. Nel caso in cui le condizioni sopra descritte non possano essere assicurate, è opportuno procedere con il riseppellimento o la ricopertura del reperto. Diversi studi hanno però stabilito come la pratica del riseppellimento non sia sempre efficace, in quanto non sempre si vengono a ricreare le condizioni anaerobiche necessarie per la conservazione del reperto, si osserva così una riattivazione delle attività microbiche e l'accelerazione del processo di degrado (Jordan, 2001).

Nel caso del recupero di legno imbibito deve essere impedita l'evaporazione dell'acqua contenuta nel legno: se si tratta di elementi di piccole dimensioni questi vengono posti in contenitori ermetici, anche con sedimento inglobante, mentre se sono reperti di grandi dimensioni questi devono essere mantenuti costantemente bagnati per tutta la fase di recupero per evitare danni irreparabili legati a ritiri ed alla proliferazione di colonie biologiche fonte di degrado. L'acqua utilizzata dovrebbe essere microbiologicamente pura o purificata e, a necessità, possono esservi aggiunti composti biocidi.

Purtroppo i due tronchi in esame sono stati trovati e recuperati in conseguenza a lavori di sistemazione e miglioramento del tratto fluviale in cui sono stati individuati. Non riconoscendo inizialmente l'importanza archeologica e archeobotanica del materiale non sono stati applicati i principi di conservazione e studio sopra indicati. Non è stato inoltre possibile effettuare uno studio del suolo e dell'ambiente di ritrovamento in quanto il sito ha subito modifiche a causa dei lavori di sistemazione.

## **2.2. Descrizione delle aree di ritrovamento e dei legni oggetto di studio**

### **2.2.1. Descrizione dell'area di ritrovamento del fiume Zero (VE)**

Il fiume Zero fa parte del consorzio di bonifica Dese-Sile. Si origina da una risorgiva nei pressi di Castelfranco Veneto (TV) e presenta un tratto di circa 43 chilometri lungo la provincia di Treviso per poi affluire nel fiume Dese a circa 3 chilometri dalla foce dello stesso (Figura 4a e 4b); fino al 1532 si immetteva invece nel fiume Sile. Il fiume Zero è sempre stato considerato poco più di un canale con poca acqua, da cui l'origine del nome, ma ha sempre rivestito un importante ruolo nell'equilibrio idraulico del bacino Dese-Sile e per la salvaguardia della laguna Veneziana (Cagnin et al., 2004).

Lungo il percorso del fiume si trovano principalmente territori antropizzati e terreni agricolo-rurali, interessati nel corso dei secoli da molteplici alluvioni, legate al tortuoso e lento percorso del fiume che ne facilita l'erosione. Per questo motivo fin dal periodo del governo veneziano sono stati programmati diffusi e continui interventi di realizzazione e manutenzione degli argini, che vengono mantenuti liberi da vegetazione (Cagnin et al., 2004). Anche la vegetazione ripariale è fortemente influenzata dalla presenza antropica, risultando fortemente limitata a poche specie, quasi esclusivamente erbacee, legate all'ambiente rurale. Il primo tratto del percorso invece interessa prati incolti e "alte siepi di querce, pioppi, platani, ontani, frassini, salici e noccioli" (Cagnin et al., 2004).

Per quanto riguarda la componente suolo dell'area di ritrovamento si fa riferimento all'area cartografica BA2.3, dove BA indica l'appartenenza alla provincia di suoli della bassa pianura antica, a valle della linea delle risorgive, con matrice calcarea e modello deposizionale a dossi sabbiosi e piane alluvionali risalenti all'ultima glaciazione. Il codice 2 indica suoli di pianura alluvionale indifferenziata di origine fluvioglaciale, con composizione limosa e componente calcarea da forte ad estrema. I suoli si presentano profondi e con alta differenziazione del profilo, con accumulo di carbonati in profondità. Le precipitazioni medie annue sono comprese tra i 650 e 1400 mm con prevalenza in primavera e autunno; le temperature medie annue sono di 12-13°C (Regione Veneto, 2005).



## 2.2.2. Tronco ritrovato nel fiume Zero

Nel 2019, in occasione di lavori di sistemazione idraulica del fiume Zero nel comune di Marcon (VE), è stato rinvenuto un tronco intero (di seguito chiamato “tronco Zero”) interrato a qualche metro di profondità, in un terreno compreso tra il corso d’acqua e un canale contiguo (Figura 4c). Rinvenuto dagli operai, è stato depositato nell’area di prato pianeggiante adiacente, senza alcuna copertura, e vi è rimasto fino al suo recupero. Le modalità di conservazione precedenti alla presa in carico dal TESAF si sono rivelate inadeguate, con una conseguente rapida disidratazione dei tessuti legnosi che ha comportato la comparsa di profonde fratture interne e la suddivisione delle rotelle in molteplici settori.

Il tronco misurava circa 6 metri in lunghezza ed era caratterizzato da una forte rastremazione. A circa 40 centimetri dall’apice era possibile individuare l’accento di un ramo, troncato alla base. Il fusto appariva fortemente danneggiato e degradato, con profonde spaccature e dall’aspetto carbonizzato, si presentava con una patina fangosa grigiastra a nascondere il colore tendente al



nero del legno (

Figura 5).

L’assenza di segni di lavorazione e le caratteristiche del fusto sono indici di un possibile schianto naturale.

A 3 metri dalla base del fusto sono state prelevate due rotelle adiacenti di 14 cm di spessore ciascuna e diametro medio di 59 cm, una conservata per l’esposizione e l’altra da utilizzare nelle analisi di caratterizzazione. Le rotelle si presentavano suddivise in 5 frammenti. La zona centrale di midollo risultava distaccata dal resto a causa di un anello interno di materiale fortemente degradato, che si espandeva per circa 5 cm in direzione centripeta e centrifuga. Altro elemento dominante era la fessurazione dall’esterno fino al centro che si allungava in direzione longitudinale al fusto, che è risultata un elemento di ingresso di marciume e degrado, come indicato dallo stato del materiale circostante, e probabilmente causa del distacco della zona centrale (Figura 6 e Figura 7).

Le rotelle si presentavano di colore molto scuro ma dopo un lavoro di levigazione e pulizia è emersa una interessante gradazione di colore tra il nero del legno esterno e della zona degradata ed una zona interna più chiara.

In uno studio precedente, il tronco è stato datato in un periodo compreso tra il 245 e il 433 d.C., e dall'analisi anatomica, è emerso che il tronco ritrovato appartiene al genere *Quercus* (*Quercus petraea* (Matt.) Liebl. o *Quercus robur* L.) (Maraschin, 2019).

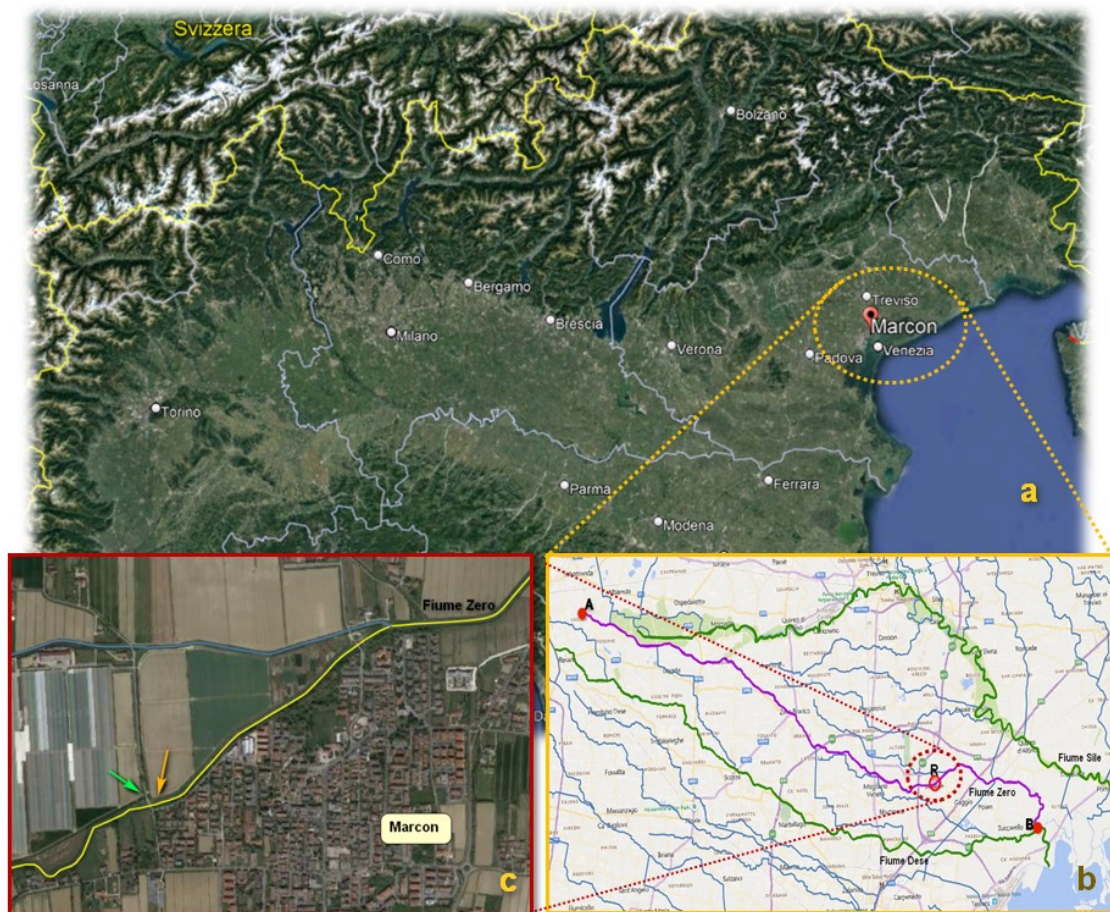


Figura 4. Immagini dell'area di ritrovamento del tronco Zero (a: immagine satellitare del Nord Italia, il segnaposto rosso indica il comune di ritrovamento; b: immagine satellitare indicante in viola il percorso del fiume Zero dalla sorgente (A) fino all'ingresso nel fiume Dese (B). Il punto del ritrovamento è cerchiato in rosso ed indicato con R; c immagine cartografica, la freccia gialla indica il punto di ritrovamento, mentre la freccia verde indica l'ansa del piccolo canale irriguo contiguo).





Figura 5. Tronco di quercia subfossile ritrovato nel fiume Zero (Foto di P. Maraschin)



Figura 6. Tronco di quercia subfossile ritrovato nel fiume Zero. Rotella usata per esposizione (la freccia gialla indica la profonda fessurazione radiale con il relativo degrado; A indica la zona anulare degradata)



*Figura 7. Tronco di quercia subfossile ritrovato nel fiume Zero. Particolare del degrado interno, con evidente scalino (freccia gialla) nel passaggio tra zona intatta e zona degradata. Il materiale degradato presenta ancora residui di fango (freccia rossa)*

### **2.2.3. Descrizione dell'area di ritrovamento del canale Piavon (TV)**

Il canale Piavon fa parte del bacino del Piave e attualmente nasce in corrispondenza di Oderzo da una diramazione del fiume Lia, prosegue per circa 17 chilometri per poi affluire nel canale Grassaga nel comune di San Donà di Piave (Figura 8a e 8b).

Il suolo dell'area di ritrovamento è compreso nel distretto di paesaggio della Pianura alluvionale del fiume Piave, bassa pianura recente di epoca olocenica, caratterizzato da suoli a parziale decarbonatazione, con accumulo di carbonati negli orizzonti profondi. In particolare il suolo di tutta l'area fluviale del canale Piavon, viene classificato come BR 2.5: bassa pianura recente e fortemente calcarea, che si trova a valle della linea delle risorgive e che presenta un modello deposizionale a dossi sabbiosi, piane e depressioni, con depositi di sabbie e limi; i suoli sono molto profondi, con moderata differenziazione del profilo (Regione Veneto, 2005). La stessa classificazione indica le precipitazioni annue comprese tra 600 e 1300 mm, con distribuzione prevalente in primavera ed autunno, mentre le temperature medie annue sono di 12-13°C.

### **2.3. Tronco ritrovato nel canale Piavon**

Il ritrovamento di una porzione di fusto nel canale Piavon è avvenuto nel 2008 in occasione di lavori di sistemazione degli argini del reticolo irriguo da parte del Consorzio di Bonifica Basso Piave. Il tronco è stato ritrovato interrato a 3 metri di profondità nell'argine del canale in corrispondenza di un'ansa nei pressi di Villa Zeno (Figura 8c), nel territorio comunale di Chiarano (TV).

La posizione e la profondità di interramento e le condizioni morfologiche di ritrovamento indicavano un lungo periodo di permanenza in loco e una possibile importanza archeologica e archeobotanica. L'area infatti è ricca di reperti di età romana e veneziana. Inoltre i segni rilevati hanno fatto presupporre che il tronco facesse parte di materiale legnoso che veniva trasportato per fluitazione dalle zone boscate a monte fino ai principali punti di lavorazione lungo l'asta del Piave (Urso et al., 2015).

A causa delle circostanze del ritrovamento il tronco è stato lasciato all'aperto senza alcuna protezione, comportando una veloce disidratazione e l'amplificazione delle fessurazioni già

presenti, oltre che il distacco della porzione esterna fortemente degradata che risultava molto fragile.

La porzione di tronco ritrovata (di seguito chiamata “tronco Piavon”) era lunga circa 15 metri, con un diametro medio di 50 cm, priva di rami o porzioni terminali ma con segni a indicarne il taglio. La superficie presentava un aspetto carbonizzato, di colore scuro quasi nero, fragile e con molte fessurazioni superficiali, mentre la corteccia risultava assente. Al di sotto di questo primo strato, il legno appariva di un marrone più chiaro e prevalentemente intatto, tranne per qualche profonda fessurazione che dall'esterno raggiungeva le porzioni più centrali del tronco (Figura 9) (Urso et al., 2015).

Dal tronco è stata ricavata una sezione trasversale di 10 cm di spessore, utilizzata successivamente per le analisi. La sezione presentava una gradazione di colore del legno dal nero della parte più esterna fino ad un marrone della zona del midollo. La rotella risultava spaccata in due sezioni separate da una profonda fessura radiale che interessava l'intero diametro passando per il midollo (Figura 10).

Dalla datazione al radiocarbonio, il tronco risulta risalire al periodo 1180-1278 d.C. L'analisi macro e microscopica dei tessuti legnosi indica la sua appartenenza al genere *Quercus* (specie *Q. petraea* (Matt.) Liebl. o *Q. robur* L.) (Urso et al., 2015).



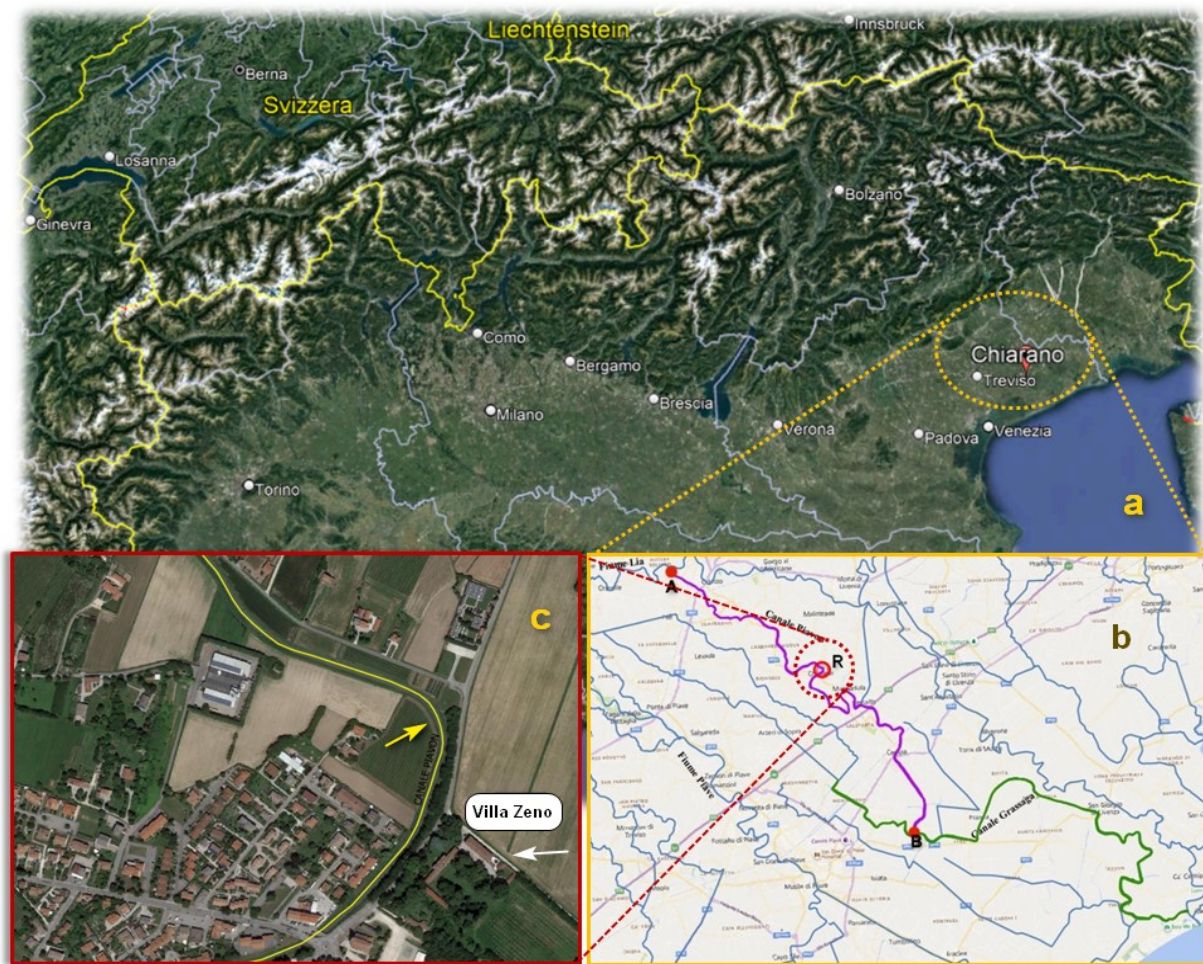


Figura 8. Immagini satellitari del luogo di ritrovamento di Chiarano (a: immagine satellitare del Nord Italia, il segnaposto rosso indica il comune di ritrovamento; b: percorso del canale Piavon in viola, i punti A e B rappresentano rispettivamente l'inizio e la fine del canale Piavon; cerchiata in rosso ed indicata con R la posizione del ritrovamento del tronco; c: la freccia gialla indica l'ansa fluviale interessata dal ritrovamento, mentre la freccia bianca indica Villa Zeno, presente nelle vicinanze del ritrovamento)



Figura 9. Tronco di quercia subfossile ritrovato nel canale Piavon (Urso et al., 2015)



*Figura 10. Tronco di quercia subfossile ritrovato nel canale Piavon. Rotella utilizzata nello studio (freccia rossa: zona con colore più chiaro; freccia blu: fessurazione del legno)*



## 2.4. Analisi fisica

La densità basale, il massimo contenuto idrico, i ritiri e il contenuto percentuale delle ceneri relativi al tronco Zero sono già stati misurati nello studio precedente (Meneghello et al., 2022).

Durante il primo studio del tronco Piavon (Urso et al., 2015) sono stati misurati la densità basale, il massimo contenuto idrico e il contenuto percentuale delle ceneri.

### 2.4.1. Densità basale, densità basale residua, contenuto idrico massimo e ritiri

La porosità, la densità dei tessuti legnosi e la capacità di assorbimento/perdita del contenuto idrico forniscono informazioni essenziali per l'identificazione del degrado del legno.

Per il tronco rivenuto nel tratto del canale Piavon sono state ripetute le analisi di densità basale (BD), densità basale residua (RD) e di contenuto idrico massimo (Maximum Water Content, MWC), al fine di uniformare le modalità di analisi con il lavoro svolto in precedenza sul tronco Zero. Sono inoltre stati osservati i ritiri radiali, trasversali e longitudinali.

La densità basale indica il rapporto tra la massa allo stato anidro ed il volume del legno imbibito, quindi quantifica la componente di tessuto legnoso del campione osservato: minore è il valore di densità basale maggiore è la porosità del legno in esame. La densità basale residua determina invece il rapporto percentuale tra la densità basale del legno in esame e la densità basale della stessa specie legnosa presa come riferimento.

Il contenuto idrico massimo rappresenta la massima quantità d'acqua che il legno può contenere, quindi il valore aumenta con l'aumentare della porosità del materiale.

Di seguito sono riportate le formule utilizzate per il calcolo dei parametri sopra citati:

- Densità basale (BD)

$$BD = \frac{P_0}{V_{\max}} \text{ [g/cm}^3\text{]}$$

- Densità basale residua (RD)

$$RD = \frac{BD}{BD_{\text{controllo}}} * 100 \text{ [%]}$$

- Contenuto idrico massimo (MWC)

$$MWC = \frac{P_{\max} - P_0}{P_0} * 100 \text{ [%]}$$

Dove:

$P_0$ : peso allo stato anidro (g)



$P_{max}$ : peso a massima imbibizione (g)

$V_{max}$ : volume a massima imbibizione ( $cm^3$ )

$BD_{controllo}$ : densità basale per legno di quercia recente ( $g/cm^3$ )

Per quanto riguarda i ritiri, vengono considerate le differenze tra dimensioni massime (imbibito) e minime (anidro) per le direzioni tangenziale, radiale e longitudinale.

➤ Ritiro tangenziale ( $\beta_T$ )

$$\beta_T = \frac{T_{max} - T_0}{T_{max}} * 100 \quad [\%]$$

➤ Ritiro radiale ( $\beta_R$ )

$$\beta_R = \frac{R_{max} - R_0}{R_{max}} * 100 \quad [\%]$$

➤ Ritiro longitudinale ( $\beta_L$ )

$$\beta_A = \frac{A_{max} - A_0}{A_{max}} * 100 \quad [\%]$$

Dove:

$T_{max}$ ,  $R_{max}$ ,  $A_{max}$  sono le dimensioni massime (stato imbibito) rispettivamente delle misure tangenziali, radiali e longitudinali (cm);

$T_0$ ,  $R_0$ ,  $A_0$  sono le dimensioni minime (stato anidro) rispettivamente delle misure tangenziali, radiali e longitudinali (cm).

Il volume del campione è stato individuato con metodo geometrico:

$$V = A * R * T \quad [cm^3]$$

dove A, R e T sono rispettivamente le dimensioni longitudinali, radiali e tangenziali (cm).

I campioni utilizzati in queste analisi sono stati prelevati secondo lo schema indicato in Figura 11. Nella scelta dei campioni sono state evitate le fessurazioni visibili ed è stata mantenuta una disposizione in settori concentrici e raggi così da permetterne un confronto.

Per l'analisi fisica, a differenza dell'analisi della resistenza meccanica, la sigla associata ad ogni campione riporta la lettera indicante il raggio di appartenenza mentre il numero riporta al settore circolare. Per distinguere i campioni del tronco Piavon dal tronco Zero, le sigle vengono precedute da "p."

Per queste analisi sono stati utilizzati 8 cubi di 5 cm di lato (p.K3, p.K2, p.K1, p.Z3, p.Z2, p.Y3, p.Y2, P.Y1. Figura 11); di questi un campione (p.Z2) non è stato utilizzato a causa di forti difetti dimensionali.

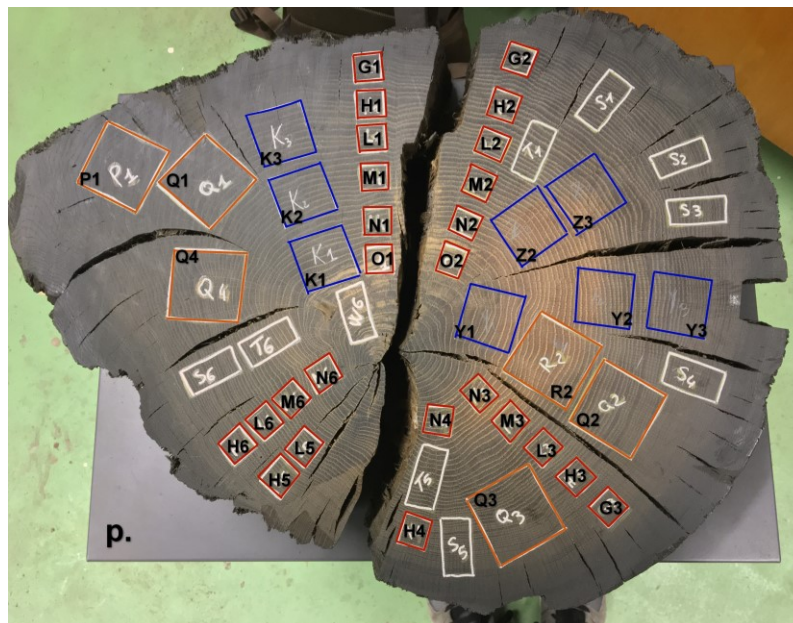


Figura 11. Tronco di quercia subfossile ritrovato nel canale Piavon. Schema di taglio dei campioni per le diverse analisi (arancio: analisi della durezza; rosso: analisi della resistenza a compressione; blu: analisi della densità basale, massimo contenuto d'acqua e ritiri; bianco: futura analisi della durabilità naturale).

La raccolta dei dati necessari, peso e misure dimensionali, è avvenuta attraverso 2 fasi principali successive:

➤ Fase di imbibizione:

1. I campioni sono stati pesati tramite bilancia a precisione 0,001 g, mentre le tre dimensioni sono state misurate utilizzando un calibro manuale a precisione 0,001 mm. Per ogni direzione misurata è stato segnato il punto esatto di misurazione così da ripetere con precisione le misure successive.
2. I campioni sono stati immersi in acqua distillata per 24 ore. Per mantenere il materiale in totale immersione sono stati utilizzati dei pesi, appoggiati sopra il legno (Figura 12).
3. I cubetti sono stati nuovamente pesati e misurati.
4. I campioni sono stati immersi per 4 ore in acqua distillata mantenuta ad ebollizione. Al termine del tempo sono stati nuovamente pesati.
5. I campioni sono stati nuovamente immersi in acqua bollente e pesati ogni ora, finché la differenza di peso registrata non è risulta inferiore a 0,1 g (considerabile nulla).

6. I campioni sono stati quindi lasciati raffreddare nell'acqua distillata per 10 ore. Al termine sono stati misurati il peso e le dimensioni allo stato imbibito.

➤ Fase di ritiro (Figura 13):

- I campioni, umidi dalla fase di imbibizione, sono stati lasciati asciugare nella stanza per 48 ore.
- I cubetti sono stati pesati e poi posizionati in stufa a  $60\pm 2^\circ\text{C}$  per 24 ore.
- I campioni sono stati quindi pesati e messi nuovamente in stufa per altre 24 ore ma aumentando la temperatura a  $103\pm 2^\circ\text{C}$ .
- Successivamente i campioni sono stati tenuti in stufa a  $103\pm 2^\circ\text{C}$  e sono stati pesati ogni ora, finché la differenza di peso registrata non è risultata inferiore a 0,1 g.
- Raggiunto lo stato anidro sono stati misurati i pesi e le dimensioni finali.

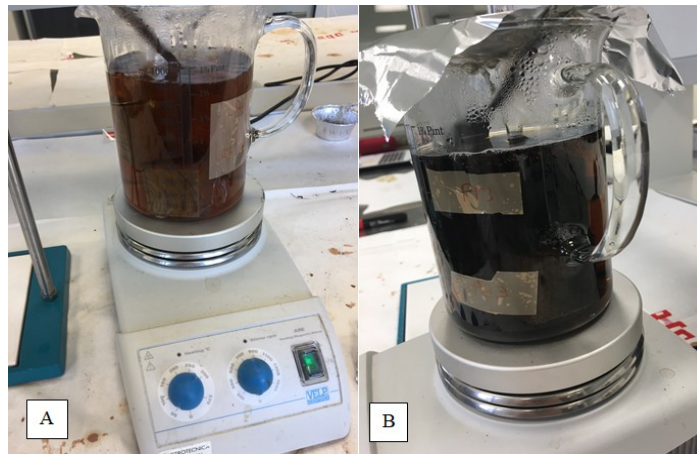


Figura 12. Fase di bollitura. Vi è una differenza di colore assunto dall'acqua tra il campioni di controllo (A) e i campioni di quercia subfossile (B), con un colore molto più scuro ed intenso, quasi nero, per quest'ultima.

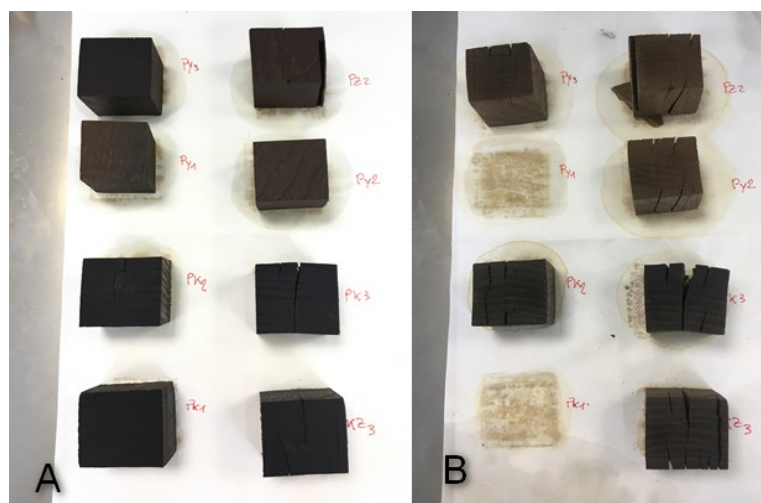


Figura 13. Tronco Piavon, particolare della faccia trasversale dei campioni. Al termine della fase di imbibizione (A) e allo stato anidro (B). P.Z2 è il campione non utilizzato per le analisi fisiche.

## 2.4.2. Colore

Il colore è una caratteristica fisica e visiva del legno. La variabilità del colore del legno è dovuta alla specie e, all'interno della stessa specie, al tipo di legno osservato (alburno durame, legno primaticcio, legno tardivo), alla faccia di osservazione, alla presenza di difetti, ecc... Il colore del legno può essere modificato in seguito a un trattamento o all'esposizione del materiale ad agenti esterni abiotici e biotici. Il colore del legno può essere influenzato anche dalla composizione del suolo sul quale la pianta cresce. Le variazioni di colore rispetto all'originale sono generalmente legate a modificazioni chimiche, come l'ossidazione, delle componenti organiche del legno (Tsoumis G., 1968).

Per la misura del colore, la superficie dei campioni di legno subfossile è stata delicatamente spazzolata al fine di togliere eventuali impurità e polveri. Successivamente sono state individuate le posizioni migliori per la completa valutazione di tutte le visibili variazioni di colore nei campioni. Per permettere la ripetizione esatta della misura del colore, è stata creata per entrambe le rotelle (Zero e Piavon) una griglia in cartoncino in cui sono stati ricavati gli spazi per la misura del colore (Figura 15). La griglia è stata fissata al legno tramite scotch di carta. Per il materiale di controllo è stata invece utilizzata una griglia in plastica realizzata appositamente per lo strumento. Le misure di colore sono state fatte solo sulle sezioni trasversali dei campioni analizzati.

Ogni misura di colore è la media di 5 rilevazioni automatiche e consecutive eseguite dallo strumento. Su ognuna delle due rotelle, sono state eseguite 2 campagne di misura in due momenti diversi, per verificare la ripetibilità delle misure. Ogni posizione è stata così descritta da 2 valori di colore, la cui media definisce il colore di ogni punto di osservazione.

Per la misura del colore del tronco Zero è stata utilizzata la rotella da esposizione; su questa sono state individuate 42 posizioni (Figura 16).

Per l'osservazione del campione del Piavon sono state individuate 39 posizioni (Figura 17).

A ogni posizione è stata associata una sigla alfanumerica: le lettere, dalla A alla F indicano il settore circolare a cui appartiene la posizione, i numeri invece indicano il raggio preso di riferimento che indica in che zona dei diversi pezzi delle rotelle si trova.

Per la misura del colore è stato utilizzato il colorimetro -194 della Eoptis, un colorimetro digitale portatile, fornito in associazione con il relativo software CLM-194 Interface. Lo strumento presenta le seguenti caratteristiche tecniche, indicate nel manuale Eoptis (2013):

- Geometria di illuminazione: 45°c: 0°, ovvero un'illuminazione circolare a 45° e osservazione del ritorno a 0°
- Illuminante: D65

- Spazio visivo: 2°
- Finestra di misurazione circolare con diametro di 12 mm
- Diametro esterno dell'elemento contenente la finestra di misurazione pari a 35 mm.

Per evitare rilevazioni errate è stato necessario che la finestra di misurazione fosse a completo contatto con la superficie da osservare così da eliminare l'influenza dell'illuminazione esterna. Sono state pertanto evitate per quanto possibile le disomogeneità della superficie (scalini, fessure, graffi, elementi metallici o riflettenti etc.). Non è stato quindi possibile osservare i valori del materiale fortemente degradato.

I sistemi di riferimento utilizzati in questo studio per la rappresentazione del colore sono stati il CIE  $L^*a^*b^*$  o CIELAB (1976) e il CIE  $L^*C^*h^\circ$ .

Lo standard CIELAB approssima la visione umana, soprattutto per quanto riguarda la percezione della luminosità. È un sistema di assi tridimensionale dove la verticale, passante per l'origine in corrispondenza di  $L^*$  pari a 50, è rappresentata dalla luminosità  $L^*$ , il cui valore va da 0 (nero assoluto) a 100 (bianco diffuso). Le coordinate cromatiche  $a^*$  e  $b^*$  indicano la posizione bidimensionale dello specifico colore in relazione a una certa luminosità. La coordinata cromatica  $a^*$  rappresenta l'asse verde (-a) - rosso (+a), mentre la  $b^*$  l'asse blu (-b) - giallo (+b). Ogni singolo colore del sistema sarà univocamente individuato nello spazio tridimensionale tramite le 3 coordinate cromatiche  $L^*$ ,  $a^*$  e  $b^*$ . La differenza tra due colori è individuata tramite la differenza euclidea  $\Delta E$  (Baldevbhai, 2012).

Il sistema  $L^*C^*h^\circ$  riprende lo standard CIELAB (Figura 14).  $L^*$  rappresenta sempre la luminosità, con le stesse caratteristiche del sistema precedente, mentre le coordinate  $a^*$  e  $b^*$  sono sostituite dai valori  $C^*$  (*Chroma*, saturazione) e  $h^\circ$  (*hue angle*, tonalità).  $C^*$  è rappresentata dal raggio della sfera ed è variabile tra 0 (totalmente insaturo) e 100 (totalmente saturo).  $h^\circ$  viene invece individuato sulla circonferenza, perciò a massima saturazione, ottenuta dalla sezione trasversale nella sfera passando per  $L=50$ , e rappresenta l'angolo, in gradi, che individua la tonalità del singolo colore:  $0^\circ$  rappresenta il rosso puro,  $90^\circ$  il giallo,  $180^\circ$  verde ed infine blu a  $270^\circ$ , intermedie si trovano tutte le possibili variazioni di tonalità (Baldevbhai, 2012).

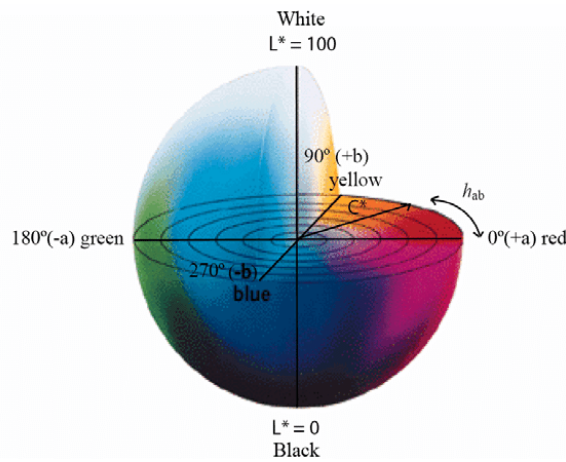


Figura 14. Grafico rappresentante i sistemi CIELAB e CIE L\*C\*h° (Jordheim, 2007)

Le formule utilizzate per calcolare le coordinate cromatiche  $C^*$  e  $h^\circ$ , la differenza di colore  $\Delta E$ , la differenza di luminosità  $\Delta L$  e la differenza di saturazione  $\Delta C$  sono:

- $C^* = \sqrt{(a^*)^2 + (b^*)^2}$
- $h^* = \arctan\left(\frac{b^*}{a^*}\right)$
- $\Delta E = \sqrt{(L_1 - L_2)^2 + (a^*_1 - a^*_2)^2 + (b^*_1 - b^*_2)^2}$
- $\Delta L = L_1 - L_2$
- $\Delta C = C^*_1 - C^*_2$

Dove 1 e 2 rappresentano i due diversi punti di osservazione da confrontare

La percezione ad occhio nudo della differenza di colore  $\Delta E$  tra due punti di colore è stata analizzata e definita tramite la classificazione indicata da Cividini et al. (2007), riportata in Tabella 1.

Tabella 1. Valori di classificazione per la variazione di colore  $\Delta E$  (Cividini et al., 2007)

$\Delta E < 0.2$	Nessuna differenza percepita
$0.2 < \Delta E < 2$	Ridotta differenza di colore
$2 < \Delta E < 3$	Differenza di colore visibile con schermo di alta qualità
$3 < \Delta E < 6$	Differenza di colore visibile anche con schermo di media qualità
$6 < \Delta E < 12$	Forte variazione di colore
$\Delta E > 12$	Colore totalmente diverso





Figura 15. Posizionamento dello strumento all'interno della griglia.

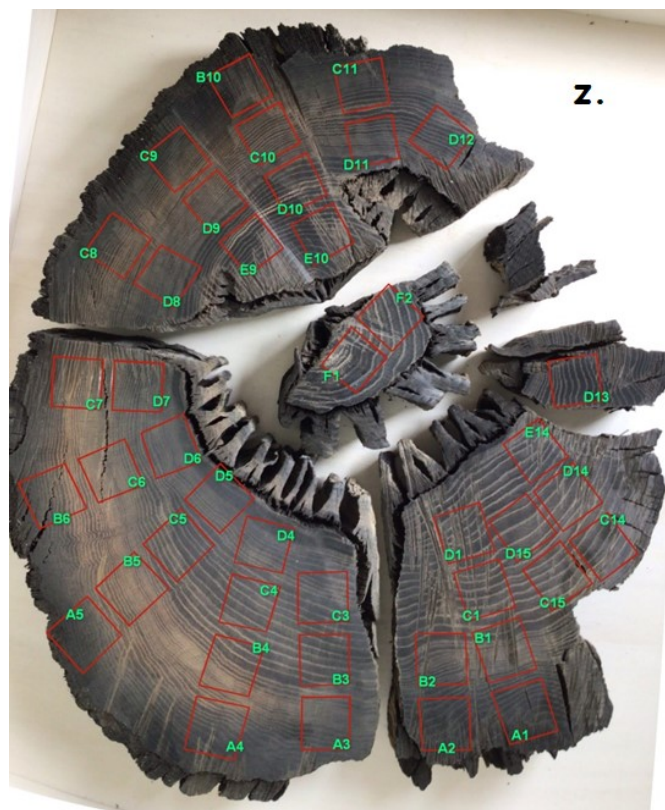


Figura 16. Tronco di quercia subfossile ritrovato nel fiume Zero. Schema dei punti per il rilevamento del colore

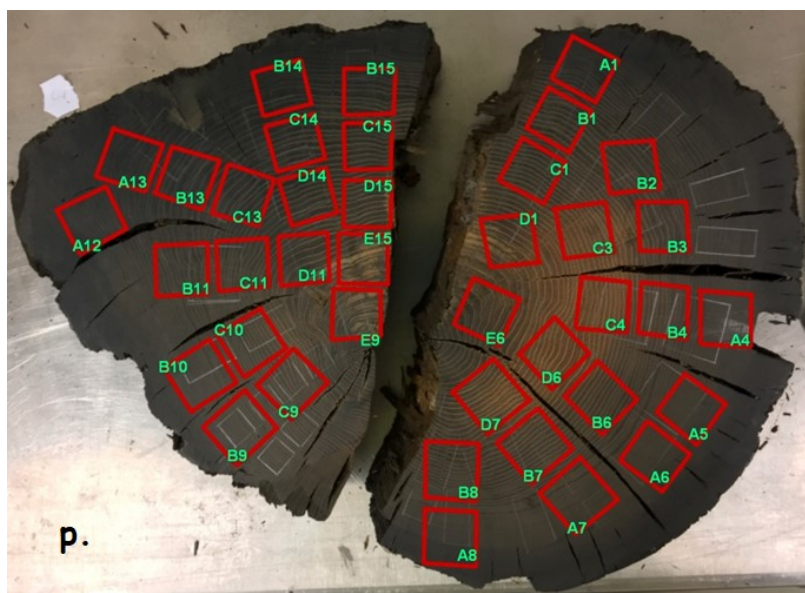


Figura 17. Tronco di quercia subfossile ritrovato nel canale Piavon. Schema dei punti per il rilevamento del colore

## 2.5. Contenuto elementare

L'analisi del contenuto elementare permette di individuare la presenza nel legno di diversi elementi minerali, la cui presenza potrebbe essere stata influenzata dalla durata del periodo di interrimento e dal contatto col suolo. L'analisi del contenuto elementare del legno dei due campioni è stata fatta perché la presenza di elementi minerali nei tessuti legnosi può influenzare le caratteristiche fisiche e meccaniche.

Per entrambi i tronchi subfossili è stato analizzato il contenuto dei seguenti elementi chimici: Ag, Al, As, B, Ba, Be, Ca, Cd, Co, Cr, Cu, Fe, Hg, K, Li, Mg, Mn, Mo, Na, Ni, P, Pb, S, Sb, Se, Si, Sn, Sr, Ti, Tl, V, Zn (in mg/kg). È stato inoltre analizzato contenuto di carbonio organico, inorganico e totale e il contenuto totale di azoto (%).

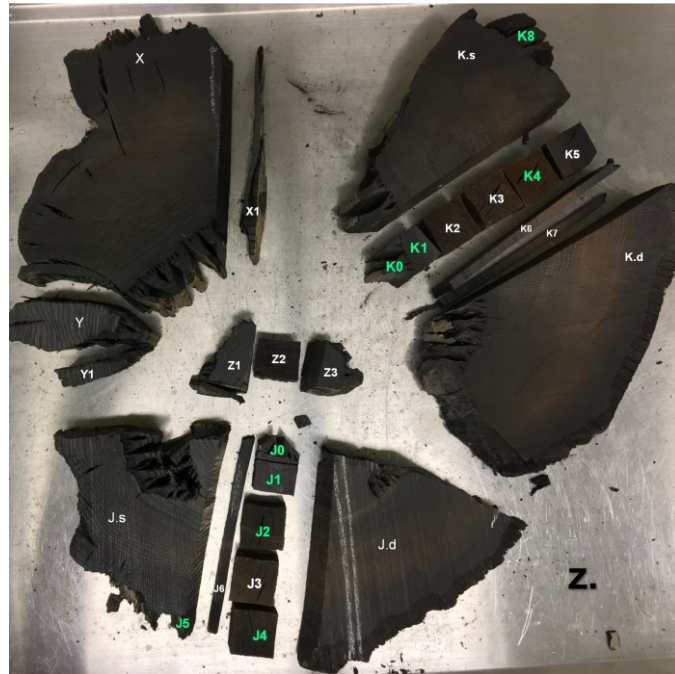
Per l'analisi del contenuto elementare sono stati selezionati diversi campioni provenienti da diverse porzioni delle sezioni, compreso il materiale fortemente degradato esterno e, nel caso dello Zero, anche quello interno.

A causa della ridotta disponibilità di materiale si è scelto di utilizzare per questa analisi alcuni dei campioni utilizzati nello studio della resistenza alla compressione, analisi che non comporta modifiche chimiche del legno.

Per quanto riguarda l'analisi del legno integro dello Zero sono stati selezionati i campioni z.G1, z.H1, z.H4, z.M1, z.N4, z.O8 (Figura 22). Per quanto riguarda il materiale degradato esterno sono stati utilizzati campioni dalle posizioni z.K8 e z.J5, mentre per il degradato interno dalle posizioni z.J0 e z.K0, derivate dal primo studio del materiale (Meneghello et al., 2022). Le posizioni considerate per il degrado sono indicate in Figura 18.



Per il tronco Piavon sono stati utilizzati i campioni p.G2, p.H6, p.M6, p.M2, p.O1, p.O2, rappresentati in Figura 11, mentre il materiale degradato è stato raccolto da diverse posizioni esterne in quanto presente in quantità esigue.



*Figura 18. Sezione Zero. Schema di posizionamento dei pezzi già esistenti precedentemente all'inizio dello studio. In questa analisi sono stati utilizzati i campioni z.J0, z.J5, z.K0, z.K8*

Una volta individuati i campioni da utilizzare, questi sono stati rotti in pezzi di ridotte dimensioni con l'aiuto dello scalpello, per permettere la loro manipolazione successiva, ed inseriti in singoli contenitori per la consegna al laboratorio. Nel caso di campioni la cui superficie presentasse segni di matita o pennarello, si è proceduto con l'asportazione della parte interessata così da non includerla nel materiale utilizzato nell'analisi.

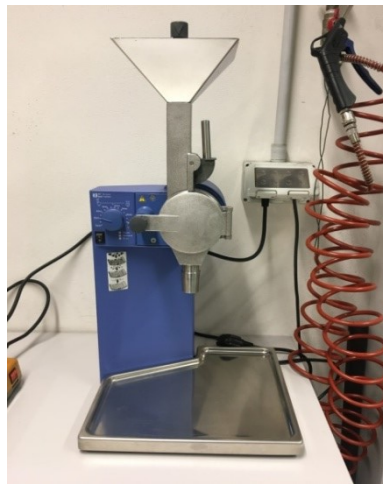
Il materiale è stato quindi macinato tramite il mulino a coltelli IKA MF10 (Figura 19), con vaglio da 1 mm, in dotazione nel laboratorio ABC (Analisi BioCombustibili) dell'Università di Padova così da ottenere almeno 4 grammi di polvere per ogni campione.

Il materiale ottenuto è stato successivamente consegnato al laboratorio La.Chi. (Laboratorio Chimico) dell'Università di Padova per la rilevazione del contenuto dei più comuni elementi minerali, oltre che per la quantificazione di azoto totale e carbonio totale, organico e inorganico.

La determinazione del contenuto minerale ha seguito il metodo ufficiale AOAC 2013.06 per biomassa vegetale (AOAC International, 2016) ICP-OES Arcos EOP.

Il materiale è stato analizzato in seguito a tre diversi trattamenti in stufa (450°C, 600°C e 800°C per 5 ore). Il materiale è stato poi mineralizzato secondo la tecnica a microonde utilizzando lo

strumento MILESTONE START D (Milestone Srl Sorisole Bergamo), con potenza a 1200 W, corredato di Rotore SK-10 a elevata pressione (100 bar), controllato con sonda di temperatura e software associato. Per ogni campione sono stati prelevati 150-250 mg e inseriti in singoli contenitori con 6 mL di acido cloridrico (concentrazione 30%) e 3 mL di acido nitrico (concentrazione 65%) della ditta Suprapur ©. Il contenuto dei contenitori è stato così sottoposto a digestione con microonde. Al termine del processo il contenuto è stato portato ad un volume di 50 mL con l'aggiunta di acqua ultrapura (UPW). Standard di calibrazione sono stati preparati utilizzando soluzioni standard a singoli e multi- elementi (Inorganic Ventures Inc. Christiansburg, VA, USA) in acido cloridrico 12% e acido nitrico 6% della ditta Suprapur ©. Per la misura del contenuto di carbonio e azoto è stata seguita una procedura modificata del metodo Dumas per vegetali, utilizzando un analizzatore elementare CN VARIO MACRO.



*Figura 19. Il mulino utilizzato nella macinazione. Il materiale è risultato estremamente difficile da macinare, comportando anche la rottura di parte dello strumento.*

## **2.6. Resistenza meccanica**

Per l'analisi della resistenza meccanica si è scelto di concentrarsi sullo studio della resistenza del materiale alla compressione parallela alle fibre e sull'analisi della durezza, in quanto elementi più importanti per gli usi tipici della quercia affogata.

La resistenza ( $R$ ) è la capacità del materiale di sostenere un carico e cambia a seconda delle dimensioni e della forma assunte dal campione e dalla direzione di carico rispetto alla fibratura (Walker, 1993); viene definita come carico per unità di superficie:

$$R = \frac{\text{forza applicata}}{\text{superficie}} \quad [\text{N/mm}^2]$$

La resistenza meccanica è influenzata dalla massa volumica del legno e a sua volta dall'umidità del legno che influenza la risposta del materiale alle sollecitazioni.

La massa volumica dei campioni di legno subfossile è stata calcolata come rapporto tra peso umido  $P_i$  e volume umido  $V_i$ :

$$D = P_i/V_i \text{ [g/cm}^3\text{]}$$

L'umidità assoluta è stata calcolata con la formula:

$$U\% = \frac{P_i - P_0}{P_0} * 100 \text{ [%]}$$

Dove  $P_i$  rappresenta il peso umido e  $P_0$  il peso allo stato anidro.

Data la disponibilità di materiale inutilizzato derivato dai vari tagli si è scelto di utilizzare queste piccole porzioni per il rilevamento dell'umidità del materiale (Figura 20).

Una volta individuati i campioni questi sono stati nominati secondo la loro posizione di origine e pesati con bilancia (0,001 g). Sono stati poi inseriti in stufa a  $103 \pm 2^\circ\text{C}$  per circa 12 ore, e successivamente pesati ogni due ore finché la variazione di peso tra pesate consecutive non è risultata nulla (inferiore a 0,1 g) ad indicare il raggiungimento dello stato anidro.



*Figura 20. Campioni dal Piavon per il controllo dell'umidità assoluta, ognuno con indicato il nome per il riconoscimento della posizione.*

Per le prove meccaniche è stata utilizzata la macchina di prova universale QUASAR della Galbandini, in grado di applicare un carico massimo di 25000 N. È dotata di due teste intercambiabili a necessità per le diverse prove: per il test di compressione sono stati utilizzati due piatti compressori, mentre per il test di durezza il piatto superiore è stato sostituito da una punta emisferica di diametro 10 millimetri, come indicato dalla norma UNI EN 1534 (UNI EN, 2020) (Figura 21). La macchina necessita di un computer di interfaccia per il rilevamento della

curva di rottura e per il calcolo dei parametri delle prove; i modelli sono basati sulle norme attualmente in vigore.



Figura 21. Macchina in fase di prova di compressione (sopra). A: piatti usati per la prova di compressione; B: punta emisferica per prova della durezza. Foto di Bolge L.

Il software utilizzato nelle due prove richiede di inserire anticipatamente alla prova alcuni dati preliminari. Per ogni campione è quindi stato calcolato:

- Volume: misurato con metodo geometrico e con l'uso di calibro (0,01 mm):

$$V = L * R * T \text{ [cm}^3\text{]}$$

Dove L, R e T sono rispettivamente le dimensioni longitudinali, radiali e tangenziali del campione.

- Peso: misurato tramite bilancia a precisione di 0,001 grammi.

A causa della difficoltà di taglio del materiale le dimensioni non sono perfette perciò si è individuato un valore medio per ognuna delle dimensioni.

Campioni con dimensioni eccessivamente discostate dalla norma o con difetti come fessurazioni o nodi non sono stati considerati nei risultati principali.

I campioni utilizzati per i test meccanici del tronco Zero sono indicati in rosso (compressione) e arancio (durezza) nello schema di Figura 22Figura 10. Sono state evitate le fessurazioni visibili e selezionato i campioni, per quanto possibile, secondo settori concentrici e lungo dei raggi principali. Le sigle associate ad ogni posizione rispecchiano il settore (lettera) ed il raggio (numero) di appartenenza; le lettere, assieme ai colori usati nello schema, sono state associate a specifiche analisi.

Per distinguere univocamente i campioni del tronco Zero da quelli del tronco Piavon, le sigle vengono precedute da “z.”

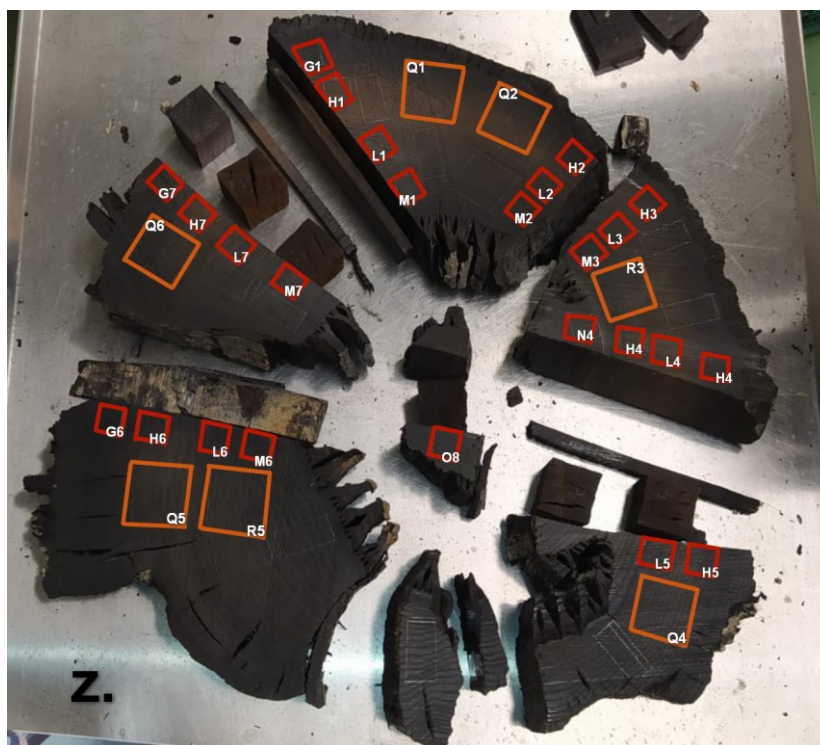


Figura 22. Sezione di quercia subfossile ritrovato nel fiume Zero. Schema di taglio per le diverse analisi meccaniche: in rosso per l'analisi di resistenza a compressione, in arancio per l'analisi della durezza

### 2.6.1. Resistenza a compressione

Per la resistenza alla compressione parallela alla fibratura è stata seguita la norma ISO 13061-17 (ISO, 2015) i campione sono parallelepipedi con faccia trasversale di dimensioni 2 x 2 cm, e altezza longitudinale di 5 cm (Figura 23). Sono stati individuati 25 campioni per ciascuna rotella (Figura 11 e Figura 22).

Una volta avviato il modello per la compressione, si procede con l'inserimento dei dati preliminari per il campione sotto prova: nome, dimensione faccia trasversale d'appoggio e altezza, massa volumica. Il campione viene quindi posizionato verticalmente tra i due piatti, i quali vengono avvicinati (il piatto superiore non deve toccare la superficie del campione).

All'avvio della prova il piatto superiore scende con velocità di 120 mm/minuto, applicando una forza di compressione crescente fino alla rottura del campione.

Il programma fornisce come risultati per ogni campione:

- Massima forza di compressione applicata,  $F_m$  [N]
- Massima resistenza alla compressione,  $R_m$  [ $N/mm^2$ ]
- Modulo elastico,  $E_T$  [ $N/mm^2$ ]



Il modulo elastico misura la rigidità del legno: a un maggior valore del modulo corrisponde una maggiore rigidità e risulta necessario un maggior carico per raggiungere la stessa deformazione (Walker, 1993).

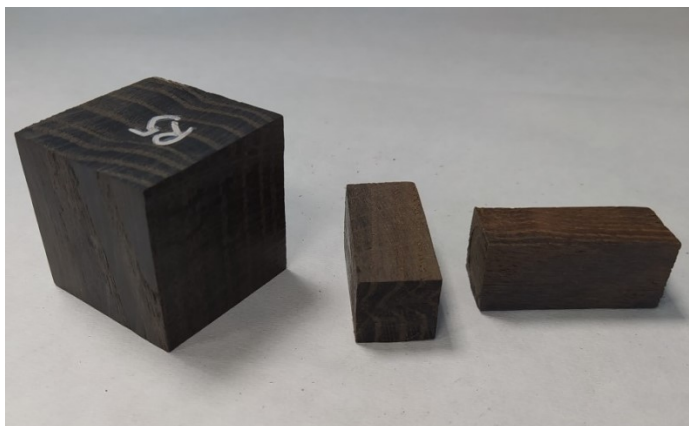


Figura 23. Esempio di campioni per la prova di durezza (sinistra) e per la prova di compressione (destra). Foto di Bolge L.

## 2.6.2. Durezza di Brinell

Per l'analisi della durezza è stata seguita la procedura indicata nella norma UNI EN 1534 (UNI EN, 2020), utilizzando il metodo di Brinell, quindi misurando l'impronta lasciata da una punta che applica un carico costante.

Il valore di durezza HB viene calcolato secondo l'equazione:

$$HB = \frac{2 * F}{\pi * 10 * \left( 10 - \sqrt{100 - \left( \frac{d_1 + d_2}{2} \right)^2} \right)} \quad [\text{N/mm}^2]$$

Dove:  $d_1$  e  $d_2$  sono i diametri perpendicolari dell'impronta lasciata dalla punta

$F$  è la forza massima applicata (1000 N)

I campioni sono costituiti da cubetti di 5 cm di lato (Figura 23).

Data la difficoltà di campionamento a causa delle numerose fessurazioni e le dimensioni dei pezzi, per il tronco Piavon sono stati individuati solo 6 campioni (p.P1, p.Q1, p.Q2, p.R2, p.Q3, p.Q4), mentre per lo Zero 7 (z.Q1, z.Q2, z.R3, z.Q4, z.Q5, z.R5, z.Q6) (Figura 11 e Figura 22 rispettivamente).

La prova è stata effettuata sulle tre sezioni anatomiche del campione per osservarne i valori di durezza secondo la diversa direzione della fibratura. Per un posizionamento centrale della punta di carico è stato individuato il centro della sezione tracciandone le diagonali.

All'avvio della prova l'elemento superiore della macchina, provvisto di punta emisferica, viene fatto scendere fino a toccare il campione. Da questo momento la punta spinge sulla superficie con una forza crescente (+120 N/s) fino al raggiungimento di 1000 N. Il carico di 1000 N viene mantenuto per 30 secondi. La prova viene interrotta al termine dei 30 secondi.

Con questo passaggio viene ottenuta l'impronta della punta emisferica. Il programma richiede di inserire la misura dei due diametri perpendicolari dell'impronta per il calcolo del valore di durezza, inteso come la profondità di incisione della punta.

I diametri perpendicolari sono stati misurati con l'utilizzo della funzione di elaborazione immagini del programma associato allo stereomicroscopio Leica M80, permettendo un'elevata precisione di individuazione dei bordi dell'impronta. Per una maggior identificazione dei bordi è stato utilizzato del gesso che, strofinato delicatamente sulla superficie della faccia, ha messo in evidenza l'affossamento (Figura 24).

Gli ingrandimenti utilizzati sono pari a x1,6 per il legno subfossile dei tronchi Piavon e Zero e x1,25 per la quercia di controllo.

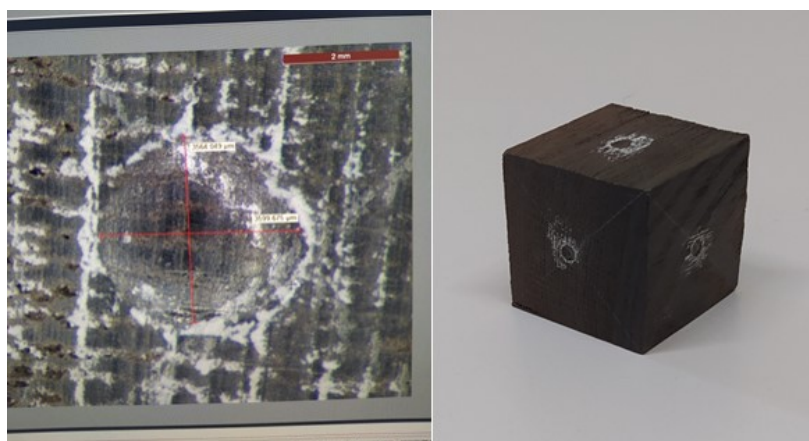


Figura 24. A sinistra foto esempio dell'elaborazione immagine per la misurazione dei diametri. A destra un campione provato nelle tre sezioni anatomiche. Foto di Bolge L.

## 2.7. Elaborazione dei dati ottenuti

Tutte le analisi precedentemente descritte sono state svolte anche su legno di quercia recente (controllo). I campioni di legno utilizzati (Figura 25) sono di rovere di Slavonia (farnia, *Quercus robur* L.) e sono stati gentilmente forniti dalla ditta "Andrighetti legnami".



Figura 25. Legno di farnia (*Quercus robur L.*) - controllo

Una volta ottenuti i dati delle diverse analisi si è proceduto con il confronto dei valori. I dati sono stati poi raggruppati per i confronti tra aree (settori o raggi, aggiungi le figure di riferimento per chiarezza), osservandone la media aritmetica, la deviazione standard e il valore massimo e minimo delle aree.

Per quantificare la differenza tra il legno di quercia subfossile e la quercia di controllo rispetto ad una specifica analisi, è stata calcolata la variazione percentuale dei risultati del legno subfossile rispetto al legno di controllo applicando la formula (microsoft.com):

$$\text{Variazione (\%)} = \frac{\text{valore subfossile} - \text{valore controllo}}{\text{valore controllo}} * 100$$

Le sezioni di tronco subfossile utilizzate sono state suddivise in tre principali settori concentrici consecutivi, indicati in Tabella 2.

Infine, utilizzando il test statistico di Pearson, si è proceduto con lo studio della correlazione tra alcune delle caratteristiche osservate:

- Densità basale e contenuto di ceneri
- Massimo contenuto d'acqua e contenuto di ceneri
- Densità basale e ritiri
- Densità basale e compressione (Modulo elastico, massima resistenza a compressione)
- Densità basale e durezza
- Contenuto di ceneri e massima resistenza a compressione
- Contenuto di ceneri e modulo elastico (compressione)
- Contenuto di ceneri e durezza
- Umidità e massima resistenza a compressione
- Umidità e modulo elastico (compressione)



- Umidità e durezza

Il coefficiente di correlazione di Pearson  $\rho_{XY}$  (Ross M.S., 2014) è un indice di correlazione lineare tra due variabili statistiche. Il coefficiente può assumere valori compresi tra -1 (correlazione lineare perfetta negativa) e 1 (correlazione lineare perfetta positiva). Un valore di correlazione pari a 0 indica l'assenza di correlazione. Il test non definisce relazioni di causa-effetto tra le due variabili osservate ma definisce come queste si relazionino.

Per la correlazione si possono distinguere 3 range di entità, o forza, della correlazione:

- [0; 0,3] e [-0,3; 0] è correlazione debole
- [0,3; 0,7] e [-0,7; -0,3] è una correlazione moderata
- [0,7; 1] e [-1; -0,7] è una correlazione forte

*Tabella 2. suddivisione dei campioni nei tre settori esterno, interno e centro secondo la posizione (lettere) dei campioni*

	<b>DB, RB, MWC, Ritiro</b>	<b>Colore</b>	<b>Contenuto elementare, resistenza meccanica</b>
<b>Esterno</b>	p.K3, p.Y3	A, B	G, H, P, Q
<b>Interno</b>	p.K2, p.Y2, p.Z3	C, D (Zero) C (Piavon)	L, M, R
<b>Centro</b>	p.K1, p.Y1	E, F (Zero) D, E (Piavon)	N, O

### 3. RISULTATI E DISCUSSIONE

#### 3.1. Caratterizzazione fisica

Come già indicato nel capitolo 2.7, i campioni analizzati per la caratterizzazione fisica del tronco Piavon sono suddivisi nei seguenti settori:

- esterno: campioni p.K3 e p.Y3
- interno: campioni p.K2, p.Y2 e p.K3
- centrale: campioni p.K1 e p.Y1

##### 3.1.1. Densità basale (BD), densità basale residua (RD), contenuto idrico massimo (MWC)

Le caratteristiche fisiche analizzate sono legate alla porosità del legno che influenza la disponibilità di spazio per l'acqua contenibile nei tessuti: maggiore è la porosità e minore è il peso della componente dei tessuti legnosi.

La densità basale di un campione quantifica la componente di tessuto legnoso in esso presente. Un valore di densità basale inferiore rispetto al controllo indica che il legno ha subito un degrado: maggiore è la diminuzione di densità basale rispetto al controllo maggiore sarà il degrado subito dal legno subfossile analizzato.

Dato che a una minor densità basale corrisponde un aumento di spazio disponibile ci si aspetta anche un aumento della quantità d'acqua massima che il materiale può assorbire.

Maggiore sarà il degrado quindi minori saranno i valori di densità basale e densità basale residua, mentre potrebbe aumentare il contenuto idrico massimo.

Analizzando i valori di BD e MWC dei campioni del Piavon, attraverso il test di Pearson, si è individuata una correlazione pari a  $-0,77$ : vi è quindi una correlazione inversa moderata, che indica che il tronco Piavon segue la tendenza sopra descritta (Figura 26).

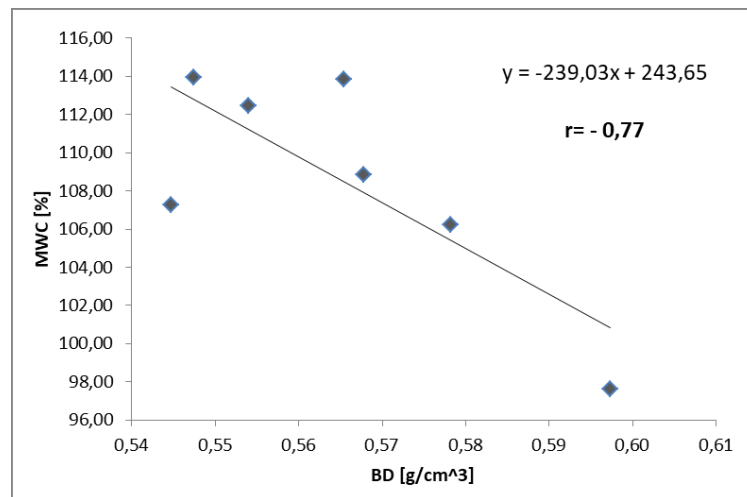


Figura 26. Correlazione lineare tra densità basale (BD) e contenuto idrico massimo (MWC) del tronco di quercia subfossile ritrovato nel canale Piavon

Per il calcolo della densità basale residua è stato utilizzato come valore di riferimento ( $BD_{\text{controllo}}$ ) la densità basale pari a  $0,58 \text{ g/cm}^3$  indicata da Dietz (Dietz, 1975), utilizzata già in Meneghello et al. (2022).

I valori di BD, RD e MWC ottenuti dai campioni del tronco Piavon sono riportati in Tabella 3. Per quanto riguarda il controllo i valori ottenuti sono indicati in Appendice B.

In media il tronco Piavon è caratterizzato da valori di densità basale, densità basale residua e contenuto idrico massimo simili alla quercia di controllo; sia la quercia subfossile che il controllo presentano valori inferiori rispetto al valore di densità basale presentato da Dietz (1975).

Considerando anche la naturale variabilità del legno, in generale non si osserva quindi particolare differenza tra il legno integro del tronco Piavon e il controllo.

I campioni presentano valori variabili sia superiori che inferiori rispetto al controllo (Tabella 3). La densità basale risulta essere la caratteristica più stabile tra le tre osservate, con deviazione standard pari a  $0,02 \text{ g/cm}^3$ . Il contenuto idrico massimo presenta invece una deviazione standard di quasi il 6% ma tutti i campioni del Piavon, tranne p.Y2, presentano valori al di sopra del controllo.

Tabella 3. Densità basale (BD), densità basale residua (RD) e contenuto idrico massimo (MWC) del tronco di quercia subfossile ritrovato nel fiume Piavon

		<b>BD</b> [g/cm <sup>3</sup> ]	<b>RD</b> [%]	<b>MWC [%]</b>
Esterno	<b>p.K3</b>	0,57	97,48	113,87
	<b>p.Y3</b>	0,54	93,92	107,27
Interno	<b>p.K2</b>	0,58	99,69	106,21
	<b>p.Y2</b>	0,60	103,00	97,60
	<b>p.Z3</b>	0,57	97,90	108,84
Centro	<b>p.K1</b>	0,55	95,52	112,45
	<b>p.Y1</b>	0,55	94,39	113,95
<b>Media</b>		0,57	97,41	108,60
<b>Dev. St. (<math>\sigma</math>)</b>		0,02	3,20	5,77
<b>Max</b>		0,60	103,00	113,95
<b>Min</b>		0,54	93,92	97,60
<b>Media Controllo</b>		0,55	95,27	104,13
<b>Dev. St. Controllo</b>		0,01	1,71	1,44
<b>Max Controllo</b>		0,56	96,90	105,38
<b>Min Controllo</b>		0,54	93,50	102,09

Il tronco Piavon è stato poi confrontato con il tronco Zero secondo i tre settori individuati (Tabella 4).

I settori integri (esterno, interno, centro) dei due tronchi presentano valori di BD, RD e MWC variabili ma simili al legno di controllo. Per quanto riguarda la densità basale, rispetto al controllo, il tronco Zero presenta valori minori in tutti e tre i settori (variazione massima -5%), il tronco Piavon presenta un aumento del 5% per il settore interno mentre negli altri è pressoché nullo. Questa variabilità è presente anche per la densità basale residua. I settori centrali sono quelli che presentano valori di densità basale e residua più simili al legno di controllo, anche se nel tronco Zero è adiacente al legno degradato interno.

La differenza di MWC tra i due tronchi è maggiore rispetto alla differenza di BD: si osserva un aumento di MWC del 10-13% rispetto al controllo per il tronco Zero mentre nel tronco Piavon l'aumento rispetto al controllo è ridotto nell'ordine del 6÷8%; solo il settore interno del Piavon, che ha il maggior aumento di BD, non presenta un aumento di MWC (Tabella 4).

BD, RD e MWC del legno degradato del tronco Zero sono diversi rispetto al legno integro dei due tronchi e al legno di controllo (Tabella 4). Le caratteristiche del legno degradato esterno e interno del tronco Zero presentano delle differenze che si ripercuotono nei valori di BD, RD e MWC: il legno degradato esterno è caratterizzato dalla diminuzione della densità basale e residua ed un forte aumento del contenuto idrico massimo (+60%), mentre il legno degradato interno presenta un aumento del 26÷28% di BD e RD e una diminuzione del 26% per MWC.

Kolář and Rybníček (2010) hanno trovato che nel legno subfossile di quercia la densità basale è simile al legno di quercia attuale e che valori maggiori si potrebbero trovare nel settore più esterno, dovuto ad uno stato di pietrificazione più avanzato del legno. Questo ultimo concetto non pare applicabile ai tronchi oggetto di questo studio, in quanto non si è notato un aumento di densità basale nel settore esterno dei due tronchi. Un altro risultato riportato in Kolář and Rybníček (2010) riguarda il fatto che la massa volumica del legno subfossile non sembra particolarmente legata all'età del legno, ma piuttosto alla località di ritrovamento e alle condizioni fisiche e chimiche del suolo, oltre che allo stato di degrado.

Tabella 4. Densità basale (BD), densità basale residua (RD) e contenuto idrico massimo (MWC) dei settori esterno, interno e centro e le aree degradate (Deg.) del tronco Piavon (P.), del tronco Zero (Z.) e del controllo, e valori medi del legno integro (esterno, interno e centro) del tronco Zero \* (\*Meneghello et al., 2022). Viene indicata anche la variazione percentuale dei valori osservati rispetto al controllo

	BD [g/cm <sup>3</sup> ]	RD [%]	MWC [%]	Variazione % rispetto al controllo		
				BD	RD	MWC
<b>P. Esterno</b>	0,56	95,70	110,57	+0,5%	+0,5%	+6,2%
<b>P Interno</b>	0,58	100,20	104,21	+5,2%	+5,2%	+0,1%
<b>P. Centro</b>	0,55	94,95	113,20	-0,3%	-0,3%	+8,7%
<b>Z. Esterno</b>	0,53	92,98	115,41	-4,1%	-2,4%	+10,8%
<b>Z. Interno</b>	0,52	92,08	117,93	-5,0%	-3,3%	+13,3%
<b>Z. Centro</b>	0,55	96,79	116,10	-0,2%	+1,6%	+11,5%
<b>Z. Deg. Esterno</b>	0,44	76,44	167,20	-21,1%	-19,8%	+60,6%
<b>Z. Deg. Interno</b>	0,70	122,72	77,12	+26,6%	+28,8%	-25,9%
<b>Zero integro</b>	0,53	93,81	116,33	-3,2%	-1,5%	+11,7%
<b>Piavon</b>	0,57	97,41	108,60	+2,3%	+2,3%	+4,3%
<b>Controllo</b>	0,55	95,27	104,13	0%	0%	0%

È stato ipotizzato che il comportamento dei campioni assunto per la densità basale potesse essere ricollegato al contenuto di ceneri. Il contenuto di ceneri è stato già analizzato nei due studi precedenti sui tronchi subfossili Zero e Piavon (Meneghello et al., 2022; Urso et al., 2015), dove

è stato preso come valore di riferimento per il controllo un contenuto di ceneri di 0,48 % (Bednar e Fengel, 1974).

Il contenuto in ceneri dei tronchi Piavon e Zero è sempre superiore al controllo (Figura 27), mentre il contenuto di ceneri del legno integro dei due tronchi è simile (1,46% P. e 1,49% Z.) e circa tre volte maggiore rispetto al controllo. Nel legno degradato si osserva un aumento del contenuto di ceneri in entrambi i tronchi, con un contenuto maggiore di ceneri nel tronco Piavon (legno degradato esterno) ed un contenuto minore nel legno degradato interno del tronco Zero rispetto agli altri settori degradati (Meneghello et al., 2022; Urso et al., 2015).

Nella zona degradata del tronco Piavon e in quella degradata interna del tronco Zero si osserva una densità basale superiore rispetto al controllo (Tabella 4), in concomitanza con un forte aumento di ceneri (Figura 27). Non c'è questa relazione invece nella parte degradata esterna del tronco Zero.

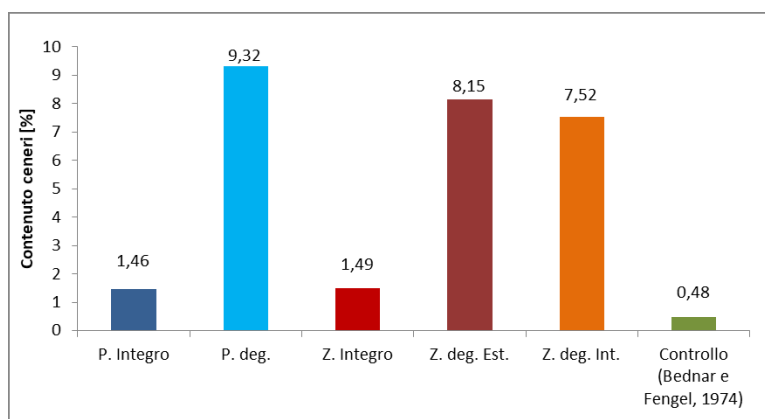


Figura 27. Contenuto percentuale di ceneri del legno integro del tronco Piavon<sup>1</sup> (P.) e Zero<sup>2</sup> (Z.), del legno degradato esterno (Est.) e interno (Int.) del tronco Zero<sup>2</sup> e del legno di controllo (<sup>1</sup> Urso et al., 2015; <sup>2</sup> Meneghello et al., 2022)

È stata analizzata la correlazione tra densità basale e contenuto di ceneri dei settori esterno, interno, centro e legno degradato dei tronchi subfossili e del controllo (Figura 28).

I settori esterno, interno e centro dei due tronchi e il controllo presentano tutti un ridotto contenuto di ceneri (1÷3%) e densità basale simile (0,52 ÷ 0,58 g/cm<sup>3</sup>). Il legno degradato del tronco Zero presenta invece un alto contenuto di ceneri (8%) e valori di densità basale minore (esterno = 0,44 g/cm<sup>3</sup>) o maggiore (interno = 0,70 g/cm<sup>3</sup>) rispetto agli altri settori (Figura 28).

Non è presente una relazione tra la variazione della densità basale e il contenuto di ceneri, come indicato anche dall'indice di correlazione r di Pearson (r= +0,06).

È però da considerare che il legno ha effettivamente assorbito materiale minerale esterno (capitolo 3.2), con conseguente aumento del contenuto di ceneri, che ha presumibilmente

occupato lo spazio derivato dal degrado e influenzato così il valore della densità basale del legno subfossile “integro”, che si presenta quindi simile al controllo.

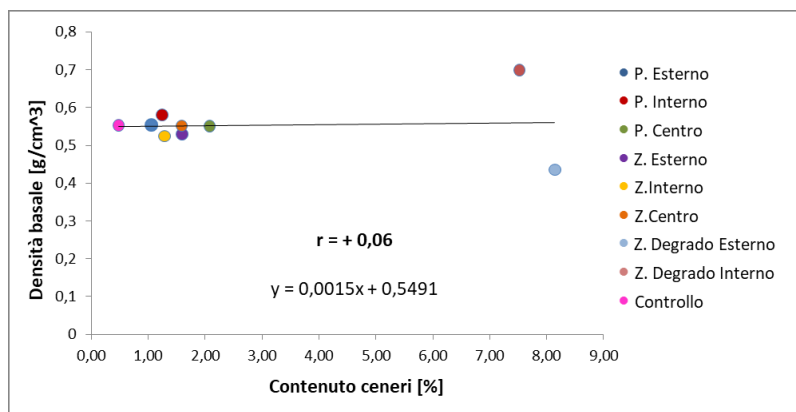


Figura 28. Correlazione tra contenuto di ceneri e densità basale dei settori del tronco Piavon, dei settori del tronco Zero e del controllo. Il valore di contenuto di ceneri del controllo è preso da Bednar e Fengel (1974); i valori di contenuto di ceneri e di densità basale dei settori degradati del tronco Zero sono presi da Meneghello et al. (2022)

### 3.1.2. Ritiri lineari

Il legno è un materiale anisotropo e le sue variazioni dimensionali (rigonfiamento e ritiro) sono diverse a seconda delle direzioni anatomiche (assiale, radiale e tangenziale) considerate. Le variazioni dimensionali sono generalmente maggiori in direzione tangenziale e minori in direzione assiale (Tsoumis G., 1968). Per l'analisi sono stati selezionati campioni con fibratura il più possibile dritta, così da diminuire l'influenza della deviazione della fibratura sui ritiri.

In Appendice D sono riportati i valori di ritiro del legno di controllo, mentre in Tabella 5 sono riportati i dati ottenuti dall'analisi dei ritiri sulla rotella del tronco Piavon (Figura 11).

In media il tronco Piavon presenta valori di ritiro superiori rispetto al controllo in tutte le direzioni anatomiche. Per quanto riguarda il ritiro assiale, il ritiro minore rispetto al controllo dei campioni (p.K3, p.Y3, p.Y2, p.Z3, Tabella 5) è controbilanciato dal valore dei campioni p.K2 (1,08 %), p.K1 (1,82%) e p.Y1 (2,11%), risultando in un ritiro medio pari a 1,02%.

Tutti i campioni presentano invece ritiro tangenziale superiore rispetto al controllo (Tabella 5), di questi i ritiri minori si osservano in p.Y3 e p.Y1 (13,77% e 13,97% rispettivamente).

Infine tutti i campioni sono caratterizzati da un aumento contenuto nel ritiro radiale (Tabella 5), ad eccezione del campione p.Y1, che presenta un valore di ritiro inferiore (3,27%) rispetto al controllo (6,51%).

I campioni presenti lungo la stessa corona (3, 2 e 1, Figura 11) hanno valori di ritiro diversi, con maggiore variabilità nella corona 1, corrispondente al settore centrale ( $\sigma = 3,01$  ritiro radiale e  $\sigma = 2,75$  ritiro tangenziale).

Osservando secondo i raggi K e Y (Figura 11, Tabella 5) il ritiro assiale aumenta gradualmente dall'esterno verso l'interno per entrambi i raggi. Il ritiro radiale e il ritiro trasversale invece presentano valore maggiore nel settore interno rispetto sia all'esterno sia al centro per entrambi i raggi.

Tabella 5: Ritiro ( $\beta$ ) radiale (R), trasversale (T) e assiale (A) del tronco di quercia subfossile ritrovato nel fiume Piavon

		$\beta_R$	$\beta_T$	$\beta_A$
		[%]	[%]	[%]
<b>Esterno</b>	<b>p.K3</b>	8,50	16,92	0,48
	<b>p.Y3</b>	7,31	13,77	0,24
<b>Interno</b>	<b>p.K2</b>	10,50	17,62	1,08
	<b>p.Y2</b>	9,88	16,20	0,58
	<b>p.Z3</b>	9,30	21,17	0,29
<b>Centro</b>	<b>p.K1</b>	7,52	17,86	1,82
	<b>p.Y1</b>	3,27	13,97	2,11
<b>Media</b>		7,96	16,77	1,02
<b>Dev. St. (<math>\sigma</math>)</b>		2,63	2,77	0,80
<b>Max</b>		10,50	21,17	2,11
<b>Min</b>		3,27	13,77	0,24
<b>Media Controllo</b>		6,51	8,86	0,69
<b>Dev. St. (<math>\sigma</math>) Controllo</b>		0,65	0,74	0,52
<b>Max Controllo</b>		7,48	9,64	1,28
<b>Min Controllo</b>		6,07	7,95	0,20

Il tronco Piavon è stato quindi confrontato con il tronco Zero e con il legno di controllo, considerando i settori esterno, interno e centro dei due tronchi (Tabella 6).

Nel tronco Piavon il ritiro assiale risulta superiore al controllo solamente per il settore centrale, per l'interno risulta invece con valore simile, mentre per l'esterno diminuisce del 48%. La tendenza non si ripresenta nello Zero dove i ritiri assiali aumentano per tutti e tre i settori, in particolare nel settore esterno (+249% rispetto al controllo).

Per quanto riguarda il ritiro tangenziale si osserva un aumento in tutti i settori dei due tronchi (Tabella 6). Nel tronco Piavon l'aumento è simile tra i settori, con valori 2 volte maggiori rispetto al controllo. Nello Zero si osserva un aumento di circa tre volte rispetto ai valori del



controllo. Per il tronco Piavon il ritiro radiale è simile al controllo, con aumenti < 50% per i settori esterno e interno, mentre nel settore centrale si osserva una diminuzione inferiore rispetto ai precedenti (-17%). Osservando il tronco Zero invece si osserva un importante aumento per tutti e tre i settori, minore nel centrale, con ritiri generalmente doppi rispetto al controllo.

Il tronco Zero presenta quindi ritiri maggiori rispetto sia al controllo che al tronco Piavon in tutti i settori (Tabella 6).

*Tabella 6: Valori medi di ritiro percentuale del tronco Piavon (P.), del tronco Zero (Z.) e del controllo, secondo i settori esterno, interno e centro, e variazione percentuale dei ritiri dei settori dei tronchi subfossili rispetto al corrispondente ritiro del controllo (\* Meneghello et al., 2022).*

	$\beta_R$	$\beta_T$	$\beta_A$	Variazione % rispetto al controllo		
	[%]	[%]	[%]	$\beta_R$	$\beta_T$	$\beta_A$
<b>P. Esterno</b>	7,90	15,34	0,36	+21,37%	+73,26%	-47,85%
<b>P. Interno</b>	9,89	18,33	0,65	+51,89%	+106,99%	-6,34%
<b>P. Centro</b>	5,40	15,92	1,97	-17,10%	+79,75%	+183,44%
<b>Z. Esterno</b>	14,52	26,85	2,42	+123,01%	+203,15%	+248,69%
<b>Z. Intero</b>	14,61	26,52	1,22	+124,34%	+199,52%	+75,74%
<b>Z. Centro</b>	11,54	23,30	1,25	+77,29%	+163,15%	+80,13%
<b>Piavon</b>	8,04	16,79	0,94	+23,46%	+89,57%	+36,02%
<b>Zero *</b>	13,70	25,74	1,74	+110,32%	+190,68%	+151,12%
<b>Controllo</b>	6,51	8,86	0,69	0%	0%	0%

I ritiri medi complessivi del legno dei due tronchi di quercia subfossile sono rappresentati in Figura 29. Non considerando la suddivisione in settori, entrambi i tronchi presentano ritiri superiori rispetto al legno di controllo.

Considerando sia l'intera sezione che i settori, per entrambi i tronchi i ritiri maggiori si osservano nella direzione trasversale, mentre la direzione assiale presenta valori generalmente più simili al controllo.

I valori di ritiro del legno subfossile del tronco Piavon e del tronco Zero sono coerenti con quanto indicato da Kolář and Rybníček (2010), i quali hanno confrontato 5 campioni di quercia subfossile di differente origine ed età (Rowell e Barbour, 1990; Reinprecht et al, 1988; Govorčin e Sinković, 1995; Horský e Reinprecht, 1986; Wagenführ, 2000).

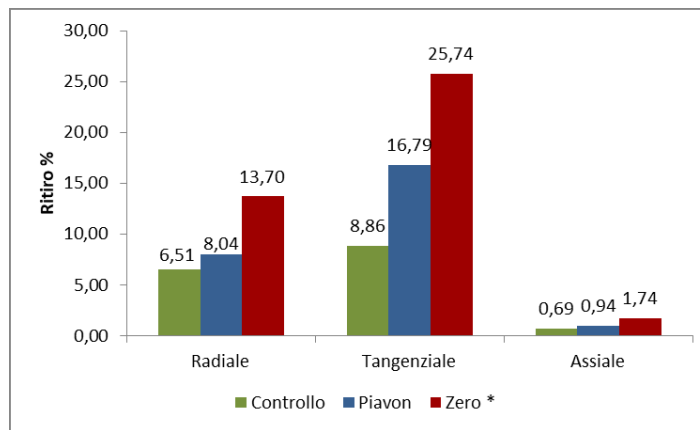


Figura 29: Ritiri percentuali nelle direzioni radiale, tangenziale e assiale del tronco Piavon, del tronco Zero e del legno di controllo (\* Meneghello et al., 2022)

Avendo a disposizione i valori di ritiro e di densità basale (BD) per tutti i campioni del tronco Piavon si è ricercata una correlazione tra queste variabili tramite il test statistico di Pearson, con l'obiettivo di analizzare la variazione dei ritiri lineari al variare della densità basale.

Il ritiro radiale ha forte correlazione positiva con la BD ( $r = +0,74$ , Figura 30), mentre per il ritiro tangenziale questa è positiva, ma moderata ( $r = +0,37$ ). Al contrario, tra il ritiro assiale e la BD c'è una correlazione moderata negativa ( $r = -0,33$ ).

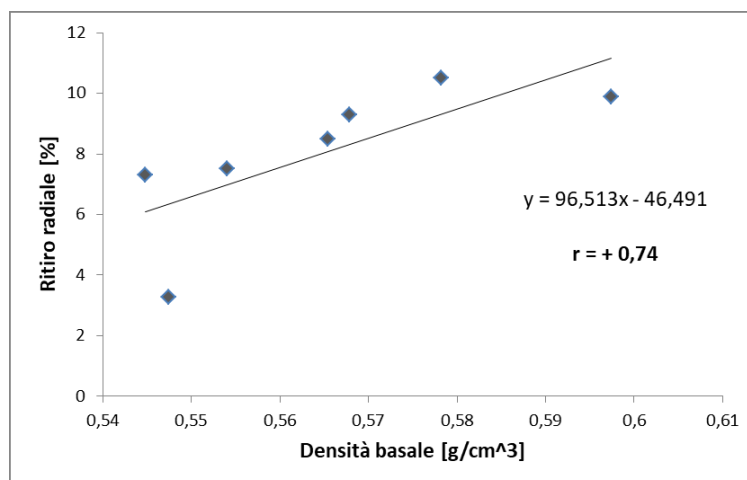


Figura 30. Correlazione tra densità basale (BD) e ritiro radiale dei settori del tronco Piavon

Sempre attraverso l'analisi della correlazione di Pearson si è cercata una correlazione tra i ritiri e il contenuto di ceneri (considerando i valori ottenuti per i settori dei due tronchi subfossili).

Per tutti i ritiri si osserva una correlazione diretta con il contenuto di ceneri:

- il ritiro radiale è debolmente correlato ( $r = +0,14$ );
- il ritiro tangenziale è caratterizzato da correlazione moderata ( $r = +0,52$ );
- il ritiro assiale presenta una correlazione forte ( $r = +0,72$ ) (Figura 31).

I ritiri sono quindi almeno in parte influenzati dal contenuto di ceneri. È interessante osservare come i valori di correlazione maggiori tra ritiro e contenuto di ceneri corrispondano a correlazioni più deboli tra il ritiro e la densità basale, soprattutto in riferimento al ritiro radiale.

L'assenza di coerenza tra le correlazioni con la densità basale e il contenuto di ceneri può essere legata all'assenza di correlazione tra densità basale e contenuto di ceneri.

Si è ipotizzato che un maggior contenuto di ceneri (dovuto all'assorbimento nel legno di elementi minerali dall'ambiente esterno) implichi una minor capacità di assorbimento e di conseguenza un minor ritiro, ma la correlazione positiva risultata dal test di Pearson indica il contrario. Presumibilmente il processo per ottenere il massimo rigonfiamento ha causato la perdita di parte del contenuto inorganico idrosolubile e degli estrattivi presenti nel legno (confermato anche dalla modifica del colore dell'acqua, Figura 12), permettendo un maggior assorbimento di acqua e conseguente maggior rigonfiamento.

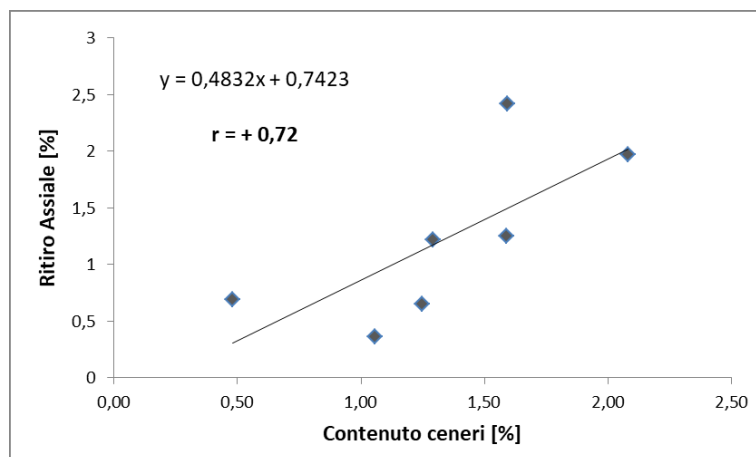


Figura 31. Correlazione tra contenuto di ceneri e ritiro assiale del tronco Piavon

### 3.1.3. Colore

Come indicato nel capitolo 2.4.2, il colore è una caratteristica fisica del legno caratterizzata da forte variabilità. Il colore infatti è influenzato da numerosi aspetti (specie, tipo di legno, difetti, trattamento ed esposizione del legno, assorbimento di elementi minerali etc.). L'analisi del colore del legno subfossile ed il confronto con il legno di controllo possono perciò dare ulteriori informazioni sulle modifiche subite dal legno subfossile.

Tsoumis G. (1968) ha notato come il legno di quercia diventi di colore scuro, quasi nero, quando rimane per lungo tempo immerso in acqua; ciò è stato riscontrato anche nei tronchi di quercia subfossile in analisi. L'intensità ed il colore assunto dipenderebbero sia dalla durata del tempo di deposizione del legno nel suolo che dal contenuto minerale del suolo stesso (Kolář and Rybníček, 2010).

Il colore delle rotelle subfossili del tronco Zero e del tronco Piavon è stato analizzato secondo lo schema di misura riportato rispettivamente in Figura 16 e Figura 17. Le aree di rilevamento del colore sono state suddivise in settori secondo la corona circolare di appartenenza:

- Esterno: corone A e B
- Interno: corona C, per il tronco Zero si considera anche la corona D
- Centro: per il tronco Zero sono considerate le corone E e F, per il tronco Piavon si considerano le corone D ed E.

I valori delle coordinate cromatiche per ogni punto di colore rilevato sono riportati in Appendice E (tronco Zero), Appendice F (tronco Piavon) e Appendice G (controllo).

Il legno subfossile di entrambi i tronchi presenta valori inferiori rispetto al controllo (Tabella 7); l'unico fattore in cui sono equiparabili è la tonalità, con valori compresi tra 70° e 75,50° (giallo-arancio). Il legno di controllo attuale presenta un legno più chiaro ( $L > 50$ ) con colori più saturi ( $C^*$ ), mentre i tronchi sono caratterizzati da un legno scuro ( $L = 30-32$ ) e un colore poco saturo. In particolare il tronco Zero presenta valori medi leggermente inferiori rispetto al tronco Piavon. Per quanto riguarda la tonalità, tutti i legni osservati si inseriscono nell'area di colore arancio-giallo, in quanto sono caratterizzati da un angolo  $h^\circ$  tra i 45° e 90° (Tabella 7). Le coordinate cromatiche delle rotelle subfossili sono simili ai valori osservati da Barcík et al. (2015) in querce subfossili datate tra il I e il IV secolo D.C., anche se queste presentavano una luminosità di poco superiore ( $L_{max} = 38,38$ ). Utilizzando i valori medi di  $a^*$  e  $b^*$  forniti da Barcík et al. (2015) si è potuto risalire alla tonalità dei campioni da loro utilizzati: i valori  $h^\circ$  ottenuti (77°÷79° campioni subfossili, 71° controllo) sono in linea con il legno analizzato in questo studio.

Tabella 7. Valori medi di luminosità  $L$ , delle coordinate colorimetriche  $a^*$  e  $b^*$ , della croma  $C^*$  e della tonalità  $h^\circ$  del legno di controllo, del tronco Zero e del tronco Piavon (<sup>1</sup> Meneghello et al., 2022)

	<b>L</b>	<b>a*</b>	<b>b*</b>	<b>C*</b>	<b>h°</b>
<b>Controllo</b>	58,43	4,43	17,01	17,58	75,41
<b>Zero</b> <sup>1</sup>	30,34	1,01	3,36	3,53	70,59
<b>Piavon</b>	32,57	1,95	6,81	7,12	75,16

Osservando la disposizione spaziale (Figura 32) dei campionamenti avvenuti sui due tronchi subfossili e sulla quercia di controllo si può notare che:

- Il legno di controllo presenta un colore uniforme, in cui la luminosità  $L$  è compresa nella metà superiore dell'asse  $L$  ( $56,01 < L < 61,03$ ), con una deviazione standard  $\sigma = 1,46$  (Appendice G). Anche le coordinate  $a^*$  e  $b^*$  si presentano uniformi, con  $\sigma$  rispettivamente di 0,30 e 0,58.
- I tronchi subfossili presentano una maggiore variabilità nelle coordinate colorimetriche e le maggiori deviazioni si osservano nella luminosità e nella coordinata  $b^*$ , mentre la coordinata  $a^*$  ha minor variabilità.
- I valori delle coordinate cromatiche  $a^*$  e  $b^*$  del tronco Zero sono bassi ( $a^* < 2,2$  e  $b^* < 8,7$ ). Vi sono poi 3 rilevamenti (z.B4, z.B5, e z.C7, Figura 16) che corrispondono alla zona visivamente più chiara della rotella, con valori che si discostano dagli altri rilevamenti ( $2,83 < a^* < 3,80$  e  $10,49 < b^* < 10,66$ ).
- Il tronco Piavon (Appendice F), come il tronco Zero, presenta valori di  $a^*$  e  $b^*$  bassi ( $a^* < 3,1$  e  $b^* < 8,8$ ). Anche in questo caso si osservano due gruppi di valori che si discostano degli altri. Il gruppo isolato composto da due elementi (p.E9 e p.E15) corrisponde alla zona midollare della rotella (Figura 17), visivamente caratterizzata da venature di diverso colore, mentre il gruppo con valori  $a^*$  e  $b^*$  maggiori (p.C3, p.C4, p.D1, p.D6, p.D7) corrisponde ad una fascia più chiara nella zona più interna (Figura 17).

In Figura 33 si vede che le coordinate  $L$ ,  $a^*$  e  $b^*$  del tronco Zero presentano una variazione simile lungo le corone circolari (A-F, Figura 16), rispecchiando la presenza di zone con colore più chiaro attraverso i picchi, soprattutto nelle corone B e C (Figura 34). In particolare si osserva che l'area chiara è limitata nel blocco K (Figura 18), in particolare nelle posizioni z.B4, z.B5, z.C6 e z.C7 (Figura 16). È presente anche un secondo picco, in corrispondenza di z.C10, indicante una seconda zona più chiara meno evidente nel blocco J (Figura 18).

Nel tronco Piavon si osserva invece un graduale aumento dei valori di  $L$ ,  $a^*$  e  $b^*$  (Figura 35), fino a un valore massimo nella corona D, e una diminuzione verso la corona E.

Sono state analizzate le corone C, D, E:

- la corona D presenta i valori maggiori di  $L$ ,  $a^*$  e  $b^*$  nei punti p. D1, p.D6 e p.D7 (Figura 17, Figura 36b)
- la corona E (Figura 36c) presenta un aumento nel valore  $L$  in corrispondenza dei punti p.E9 e p.E15 (Figura 17), mentre  $a^*$  e  $b^*$  diminuiscono in p.E9 e aumentano nuovamente in p.E15. p.E15 corrisponde all'unico punto nel pezzo sinistro della rotella a presentare un colore visivamente diverso e disomogeneo (Figura 17).

- Anche nella corona C si può osservare una zona di picco di tutte e tre le coordinate nei punti p.C3 e p.C4 (Figura 17, Figura 36a).

I punti osservati si trovano nella parte destra della rotella in corrispondenza di una zona più chiara o con colore disomogeneo (Figura 17).

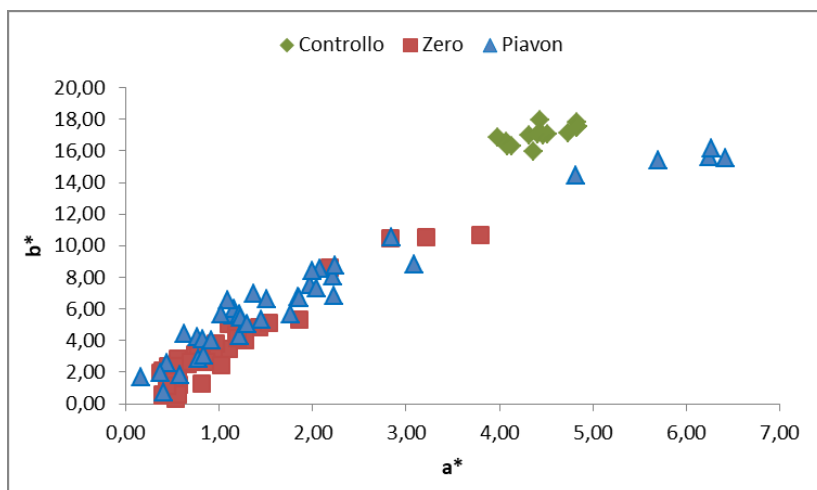


Figura 32. Rappresentazione in due dimensioni delle coordinate colorimetriche  $a^*$  e  $b^*$  delle rilevazioni sul tronco Piavon, sul tronco Zero<sup>1</sup> e sul legno di controllo (<sup>1</sup> Meneghello et al., 2022)

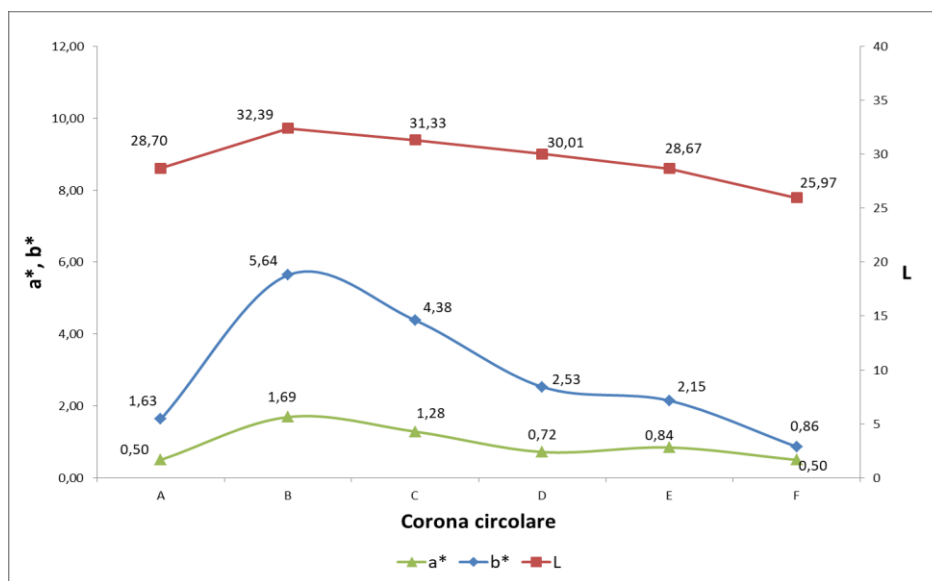


Figura 33. Variazione delle coordinate cromatiche (medie)  $L$ ,  $a^*$  e  $b^*$  lungo le corone circolari concentriche individuate sulla rotella in esame del tronco di quercia subfossile ritrovato lungo il fiume Zero (Meneghello et al., 2022)

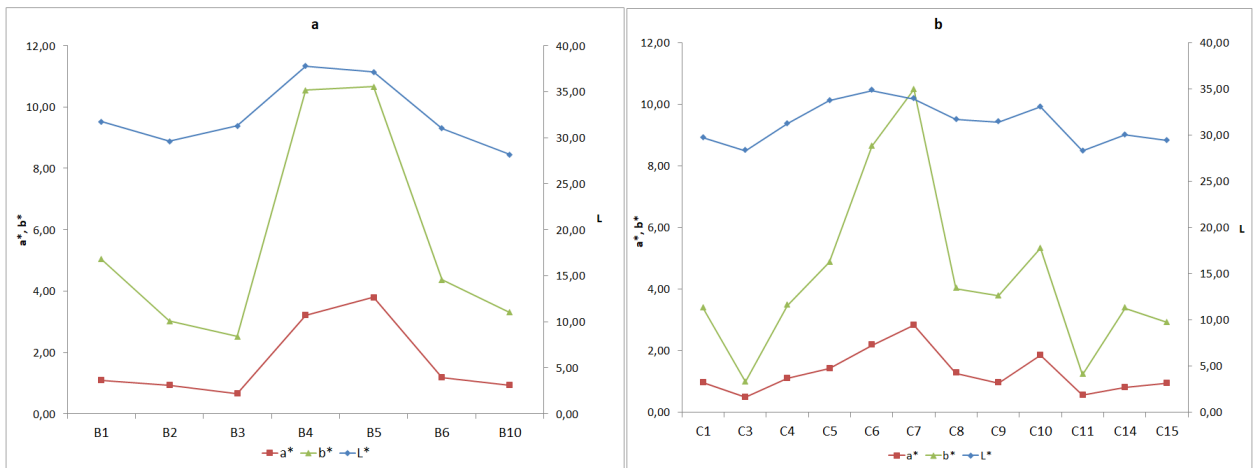


Figura 34: Variazione delle coordinate cromatiche L, a\* e b\* lungo le corone del tronco di quercia subfossile ritrovato lungo il fiume Zero (a: corona B; b: corona C)

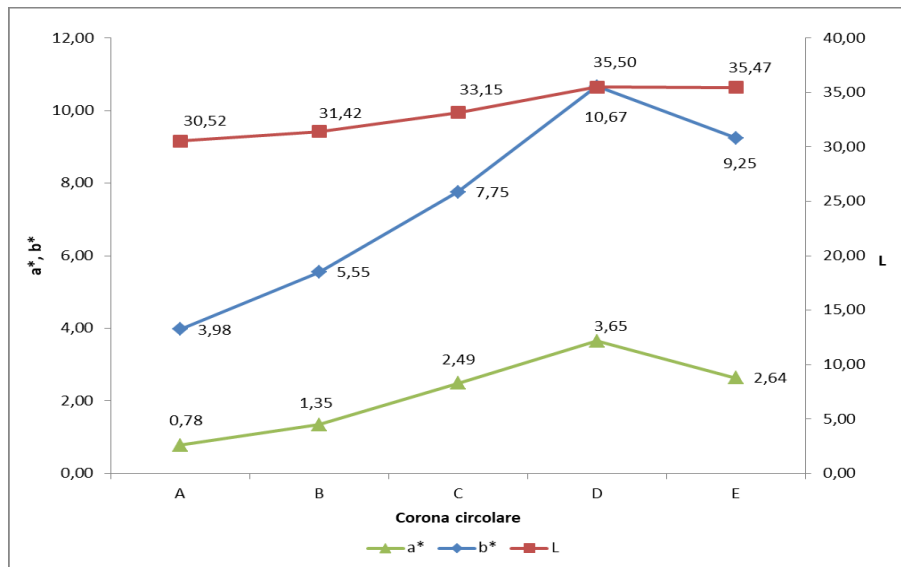


Figura 35: Variazione delle coordinate cromatiche L, a\* e b\* lungo le corone circolari concentriche individuate sulla rotella del tronco di quercia subfossile ritrovato lungo il canale Piavon

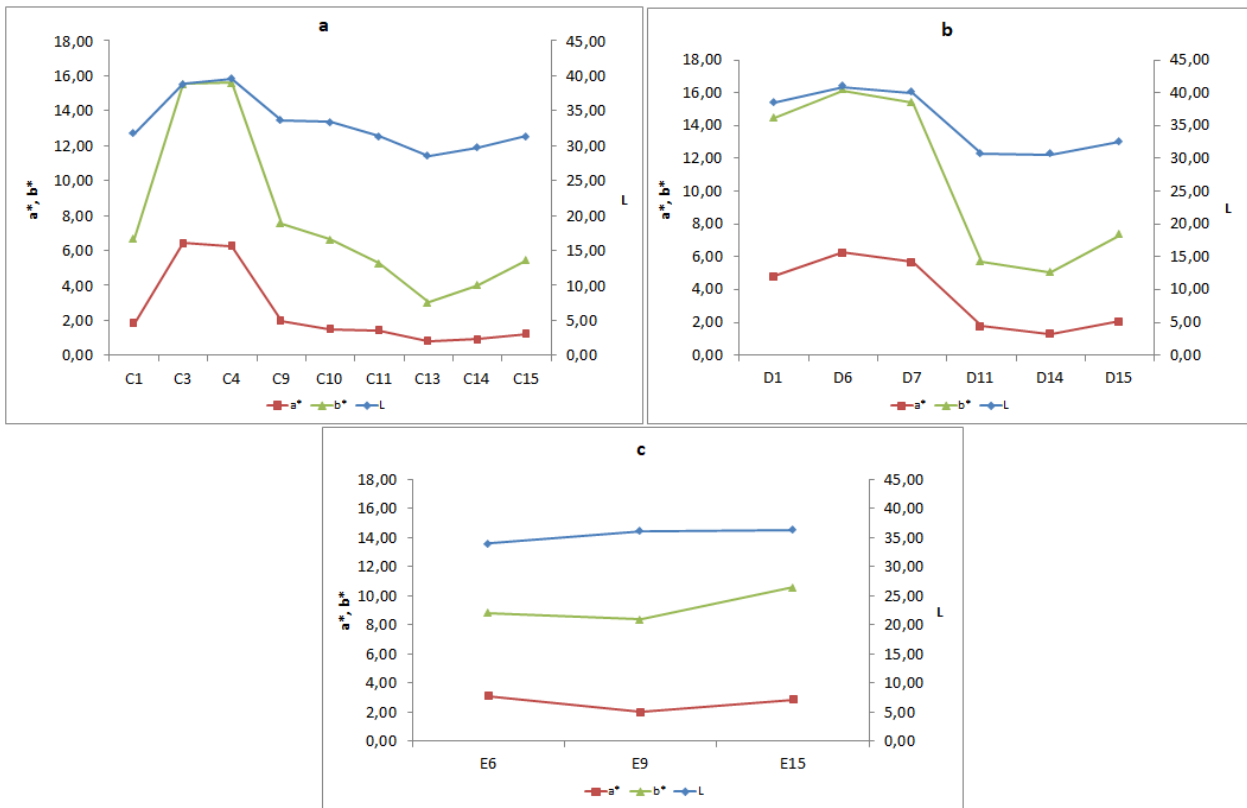


Figura 36. Variazione delle coordinate cromatiche L, a\* e b\* lungo le corone circolari concentriche individuate sulla rotella del tronco di quercia subfossile ritrovato lungo il canale Piavon (a: corona C; b: corona D; c: corona E)

I valori medi per i settori vengono indicati in Tabella 8. Sono stati quindi confrontati i settori tra i due tronchi e con il legno di controllo (Tabella 9).

La differenza di colore tra i settori esterni è minima e non percettibile ad occhi nudo ( $\Delta E = 1,01$ ). Tra i settori interni la differenza di colore è percettibile ad occhio nudo ( $\Delta E = 5,23$ ), soprattutto per la comparsa di zone di colore diverso all'interno dello stesso settore. La variazione di colore è ancora più evidente tra i settori centrali ( $\Delta E = 11,94$ ), in quanto il tronco Piavon ha una variazione di colore interno non presente nello Zero. Mentre il tronco Piavon è caratterizzato da un colore più chiaro ( $\Delta L_{(est. - centro)} = 3,26$ ) e più saturo ( $\Delta C_{(est. - centro)} = 2,35$ ) andando dall'esterno all'interno della rotella, il tronco Zero diventa più scuro ( $\Delta L_{(est. - centro)} = -4,41$ ) e meno saturo ( $\Delta C_{(est. - centro)} = -5,66$ ). La tonalità presenta invece una variabilità simile tra i due, con una diminuzione verso l'interno, ma i valori sono differenti: nel tronco Piavon il valore di tonalità del centro è simile al valore del settore esterno del tronco Zero.

Il colore del legno di controllo e quello del legno subfossile sono diversi e le differenze sono chiaramente percettibili ad occhio nudo ( $\Delta E$  variabile tra 23,96 e 34,66). Per quanto vi siano aree di colore più chiaro nel tronco subfossile, il loro colore è ancora diverso dal colore di un legno di quercia attuale (controllo).



Tabella 8: Valori medi di L, a\*, b\*, C\* e h° secondo i settori Esterno, Interno e Centro del tronco Piavon e del tronco Zero e i valori medi per il legno di controllo

	<b>L</b>	<b>a*</b>	<b>b*</b>	<b>C*</b>	<b>h°</b>
<b>Z. Esterno</b>	30,85	1,19	3,97	4,15	72,41
<b>Z. Interno</b>	30,65	0,99	3,42	3,57	71,17
<b>Z. Centro</b>	27,59	0,71	1,63	1,80	63,29
<b>P. Esterno</b>	31,08	1,13	4,95	5,10	76,65
<b>P. Interno</b>	33,15	2,49	7,75	8,19	74,13
<b>P. Centro</b>	35,49	3,31	10,20	10,76	72,71
<b>Controllo</b>	58,43	4,43	17,01	17,58	75,41

Tabella 9. Differenza di colore ( $\Delta E$ ) tra i settori analizzati (Est = esterno, Int = interno) delle rotelle del tronco Piavon (P.) e del tronco Zero (Z.) e rispetto al legno di controllo (Contr.), secondo la classificazione indicata in Cividini et al. (2007)

<b>Settori considerati</b>	<b><math>\Delta E</math></b>	<b>Significato</b>
<b>Z. Est - P. Est</b>	1,01	Ridotta differenza di colore, non percettibile a occhio nudo
<b>Z. Int -P. Int</b>	5,23	Differenza di colore percettibile
<b>Z. Centro - P. Centro</b>	11,94	Variazione di colore percettibile ad occhio nudo
<b>Contr. – Z. Est.</b>	30,68	Colore diverso, ben percettibile ad occhio nudo
<b>Contr. – Z. Int.</b>	31,12	Colore diverso, ben percettibile ad occhio nudo
<b>Contr. – Z. Centro</b>	34,66	Colore diverso, ben percettibile ad occhio nudo
<b>Contr. – P. Est.</b>	30,07	Colore diverso, ben percettibile ad occhio nudo
<b>Contr. – P. Int.</b>	26,99	Colore diverso, ben percettibile ad occhio nudo
<b>Contr. – P. Centro</b>	23,96	Colore diverso, ben percettibile ad occhio nudo
<b>Contr. - Zero</b>	31,42	Colore diverso, ben percettibile ad occhio nudo
<b>Contr. - Piavon</b>	27,91	Colore diverso, ben percettibile ad occhio nudo

Sono presenti in entrambi i tronchi aree con colore in generale più chiaro. Queste aree si trovano nelle parti interne della rotella, lontane dal legno degradato e dalle parti a contatto con il suolo. Per il tronco Piavon si trovano nel settore interno e centrale, isolate dall'ambiente esterno, mentre nel tronco Zero si trovano limitate nel settore interno nelle porzioni di legno integro con maggior superficie, dove gli elementi chimici che possono essere causa della modifica del colore (es. ferro, Capitolo 3.2) potrebbero avere più difficoltà a raggiungere i tessuti. Il settore centrale, a causa della fessura e dell'anello centrale degradati, risulta invece esposto agli agenti causanti la modifica.

## 3.2. Contenuto elementare

Lo studio del contenuto elementare permette di individuare quali elementi chimici sono presenti nel legno in esame. Il confronto tra il controllo e il legno subfossile consente poi di osservare come cambia il loro contenuto in seguito all'interramento.

È stato analizzato il contenuto (in mg/kg) di argento (Ag), alluminio (Al), arsenico (As), boro (B), bario (Ba), berillio (Be), calcio (Ca), cadmio (Cd), cobalto (Co), cromo (Cr), rame (Cu), ferro (Fe), mercurio (Hg), potassio (K), piombo (Pb), zolfo (S), antimonio (Sb), selenio (Se), silicio (Si), stagno (Sn), stronzio (Sr), titanio (Ti), tallio (Tl), vanadio (V) e zinco (Zn).

È stato inoltre analizzato contenuto di carbonio (C) organico, inorganico e totale e il contenuto di azoto (N) totale (%).

Il contenuto elementare di ogni campione viene riportato in Appendice H (tronco Zero), Appendice I (tronco Piavon) e Appendice J (controllo).

Durante la fase di analisi il materiale macinato è stato diluito. La diluizione può rendere più difficile il rilevamento preciso del contenuto di un elemento (limite di determinazione). In questi casi lo strumento usato per il rilevamento conferisce un valore massimo di contenuto dell'elemento ( $< x_1$ ): l'effettivo valore non è conosciuto ma è certamente pari o inferiore al massimo indicato.

Per alcuni elementi (argento - Ag, mercurio - Hg, stagno- Sn e tallio- Tl) non è stato possibile rilevare il contenuto preciso all'interno di nessun campione:

- Ag  $< 0,15$  mg/kg
- Hg  $< 0,08 \div 0,1$  mg/kg ( $< 0,5$  in controllo)
- Sn  $< 0,8 \div 1$  mg/kg
- Tl  $< 0,8 \div 1$  mg/kg

Anche nel controllo il contenuto di questi elementi è al di sotto dei valori riportati sopra, pertanto non sono stati ulteriormente considerati.

Per quanto riguarda gli altri elementi, i limiti di determinazione individuati sono variabili e legati alla diluizione del materiale durante il processo di analisi, è quindi possibile osservare che per lo stesso elemento, misurato su campioni diversi, si possano trovare limiti di determinazione diversi (es.  $0,08 \div 0,1$  per Be e Cd;  $0,8 \div 1$  per As e Se;  $0,08 \div 0,2$  per Co e Cr,  $0,15 \div 0,5$  per Mo e V). Ci sono poi alcuni elementi che all'interno dello stesso settore presentano dei valori per alcuni campioni mentre per altri campioni viene indicato il valore del limite di determinazione. Per

questi casi non è possibile trovare il valore medio del settore per cui viene indicato come “ND” (non determinabile).

Nello specifico si tratta del settore interno Piavon (p.M2, p.M6, Figura 11) per gli elementi Li, Ni, Pb, il settore esterno del Piavon (p.G2, p.H6, Figura 11) per Cr e il legno degradato interno del tronco Zero (z.K0, z.J0, Figura 18) per Pb. Per quanto riguarda i campioni sopraccitati del tronco Piavon, questi si trovano in posizioni spazialmente opposte all'interno della rotella (Figura 11), con p.M2 adiacente alla zona interna di colore più chiaro e p.G2 molto vicino al legno degradato. Anche i due campioni dello Zero si trovano in posizioni diverse all'interno della rotella (K e J, Figura 18) ma senza apparente differenza che ne possa spiegare il motivo di questa variazione (<1 e 1,21 mg/kg).

In generale le differenze tra il contenuto dei vari elementi dello stesso settore possono essere attribuite alla normale variabilità del legno (EN ISO, 2021).

Per quanto riguarda gli elementi Be, Cd, Co, Cr, Li, Mo, Pb, Sb, Se, V il limite di determinazione è stato superato solo in 3 campioni, corrispondenti al materiale degradato (Tabella 10). Questi elementi sono quindi contenuti in quantità molto ridotte o sono assenti sia nel legno di controllo che nel legno integro dei due tronchi, mentre un contenuto rilevabile si può trovare nel legno degradato. Il maggior contenuto nel legno degradato può essere legato alla sua maggior disponibilità di assorbimento e ad una maggior facilità di filtrazione attraverso tessuti degradati (tra cui anche la frattura nel tronco Zero, vedi Figura 6). Questi elementi sono sicuramente di origine estranea al legno (contenuti nel suolo).

La presenza di Li e Sb è stata rilevata anche nel il legno di controllo (Li = 0,49 mg/kg; Sb = 0,85 mg/kg), superando i limiti di determinazione individuati nei settori di legno integro dei tronchi subfossili (Tabella 10). Si osserva che il legno degradato del tronco Zero presenta valori di antimonio (Sb) doppi rispetto al controllo. Il contenuto di litio (Li) nel legno degradato del tronco Zero risulta inferiore al controllo, mentre il legno degradato del tronco Piavon presenta un valore superiore, quasi doppio.

Il contenuto di cromo (Cr) è stato rilevato nei settori degradati di entrambi i tronchi e nel controllo, a cui si aggiunge il settore centrale del tronco Piavon. Il contenuto di Cr è variabile tra i settori, presentando, rispetto al controllo, una diminuzione (-42%) nel settore centrale e un aumento nei settori del legno degradati (+ 97% Z. degradato interno, + 4.639% Z. degradato esterno, +522% Piavon degradato).

Tabella 10. Valori medi del contenuto elementare per gli elementi Be, Cd, Co, Li, Mo, Pb, Sb, Se, V secondo i settori individuati (Est = esterno, Int = interno, Deg = degradato) nei tronchi Piavon (P.) e Zero (Z.) e nel controllo (Contr.). ND (non determinabile) indica l'impossibilità di ottenere un valore medio per il settore

	Be [mg/kg]	Cd [mg/kg]	Co [mg/kg]	Cr [mg/kg]	Li [mg/kg]	Mo [mg/kg]	Pb [mg/kg]	Sb [mg/kg]	Se [mg/kg]	V [mg/kg]
<b>Z. Est.</b>	<0,08	<0,08	<0,08	<0,08	<0,08	<0,15	<0,8	<0,8	<0,8	<0,15
<b>Z. Int.</b>	<0,08	<0,08	<0,08	<0,08	<0,08	<0,15	<0,8	<0,8	<0,8	<0,15
<b>Z. Centro</b>	<0,08	<0,08	<0,08	<0,08	<0,08	<0,15	<0,8	<0,8	<0,8	<0,15
<b>Z. Deg. Int</b>	<0,08	<0,08	0,52	0,78	0,29	0,96	ND	1,56	<1	1,66
<b>Z. Deg. Est.</b>	<0,08	<0,08	1,29	18,87	0,34	0,86	1,58	1,60	<1	1,49
<b>P. Est.</b>	<0,08	<0,08	<0,08	ND	<0,08	<0,15	<0,8	<0,8	<0,8	<0,15
<b>P. Int.</b>	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	<0,8	ND	ND
<b>P. Centro</b>	<0,08	<0,08	<0,08	0,23	<0,08	<0,15	<0,8	<0,8	<0,8	<0,15
<b>P. Deg.</b>	0,24	0,11	1,93	2,48	1,30	1,09	7,83	<0,8	1,76	4,77
<b>Contr.</b>	<0,1	<0,1	<0,2	0,40	0,49	<0,5	<1	0,85	<1	<0,5

In Appendice K vengono riportate le variazioni percentuali del contenuto degli elementi minerali dei settori del tronco Piavon e tronco Zero rispetto al controllo. Gli elementi chimici finora presentati (Ag, Be, Cd, Cr, Hg, Li, Mo, Pb, Sb, Se, Sn, Tl, V) non sono stati inseriti in quanto, per alcuni campioni, hanno valori inferiori al limite di determinazione che non rendono possibile il calcolo della variazione rispetto al controllo. Per gli elementi di cui si è calcolata la variazione rispetto al controllo, è stato riportato “ND” (non determinabile) nel caso in cui non fosse possibile calcolare il valore per lo specifico settore.

Elementi quali arsenico (As) e stronzio (Sr) non sono rilevabili nel legno di quercia, infatti il controllo presentava un loro contenuto <1 mg/kg.

Invece, l'arsenico è stato rilevato nel tronco Zero in tutti i settori osservati, dove il legno integro contiene in media 1-2 mg/kg mentre i settori di legno degradato contengono 30,86 mg/kg (esterno) e 33,66 mg/kg (interno). Il tronco Piavon invece presenta un contenuto rilevabile di arsenico solo nel settore degradato (15,99 mg/kg) (Tabella 11). Il maggior contenuto di As nel tronco Zero potrebbe essere legato alla diversa località d'origine. Un'altra possibilità è che la frattura e il degrado interno presenti nel tronco Zero abbiano facilitato l'ingresso del metallo anche nei tessuti più interni.

Lo stronzio è stato rilevato in tutti i settori del legno subfossile. Lo stronzio diminuisce dal settore esterno verso il centro del legno integro in entrambi i tronchi subfossili. Nel settore centrale si trova il contenuto minore (10,04 mg/kg nel tronco Zero e 9,56 mg/kg nel tronco Piavon), mentre il contenuto maggiore si riscontra nel legno degradato (Tabella 11).

Tabella 11. Contenuto di arsenico (As) e stronzio (Sr) nei settori (Deg = degradato) del tronco Zero (Z.), del tronco Piavon (P.) e nel controllo. ND (non definibile) indica l'impossibilità di ottenere un valore medio

	<b>As</b> [mg/kg]	<b>Sr</b> [mg/kg]
<b>Z. Centro</b>	2,04	19,61
<b>Z. Interno</b>	2,24	15,46
<b>Z. Esterno</b>	1,24	10,04
<b>Z. Deg. Interno</b>	33,66	35,78
<b>Z. Deg. Esterno</b>	30,86	64,45
<b>P. Deg. Esterno</b>	15,99	62,81
<b>P. Esterno</b>	<0,8	16,77
<b>P. Interno</b>	ND	11,51
<b>P. Centro</b>	<0,8	9,56
<b>Controllo</b>	<1	<1

Per quanto riguarda gli elementi riportati in Appendice K (Al, B, Ba, Ca, Cu, Fe, K, Mg, Mn, Na, Ni, P, S, Si, Ti, Zn), Si osserva una forte variabilità tra i settori in tutti gli elementi considerati.

In generale gli elementi sono contenuti in maggiore quantità nel legno subfossile rispetto al controllo, ma 5 elementi (Al, K, Ni, P, Ti) presentano generalmente diminuzioni inferiori al -100% nei settori di legno integro dei due tronchi, mentre il legno degradato è caratterizzato da un aumento del contenuto rispetto al controllo dell'ordine del  $+10^3$ . Per quanto riguarda il nichel (Ni) gli aumenti sono più ridotti ( $+10^2$ ).

Il potassio (K) è l'unico elemento ad aver subito una diminuzione del contenuto nel legno subfossile in tutti i settori. La diminuzione rimane contenuta tra -23% (Piavon degradato) e -95% (Zero degradato esterno ed interno). La maggior riduzione si osserva nel legno integro (interno, esterno e centro) con valori molto simili tra i due tronchi, mentre il legno degradato presenta riduzioni minori e contenuti di potassio più vicini al controllo. La perdita di potassio è più forte nel legno integro, perciò non sembra essere legata ad un effetto di dilavamento durante il periodo di immersione e sepoltura.

L'alluminio presenta valori molto variabili, più simili al controllo nel legno integro, e con forte aumento nel legno degradato. In particolare l'aumento maggiore si osserva nel legno degradato esterno del Piavon (+32,23 %), mentre il legno degradato dello Zero ha aumenti inferiori ma sempre nell'ordine del  $+10^3$ .

Il Bario (Ba) presenta valori negativi solo nei settori interno e centro del tronco Piavon.

In generale il legno degradato presenta gli aumenti maggiori, che possono essere molto diversi rispetto agli altri settori (anche uno/due ordini di grandezza) o essere in linea con gli aumenti degli altri settori (Appendice K). Gli elementi che presentano maggiori variazioni rispetto al controllo sono Al, Mn e S nel legno degradato, mentre gli elementi Ca, Fe, Mg, Si presentano aumenti più omogenei tra i settori (Figura 37).

Tra tutti spicca il ferro, con aumento molto elevati in tutti i settori di entrambi i tronchi (Figura 38). L'aumento più contenuto si osserva nel settore centrale del Piavon con 310,97 mg/kg, rispetto a 2,5 mg/kg del controllo. Il massimo contenuto di ferro si presenta nel legno degradato del Piavon con 36367 mg/kg, seguito dal legno degradato esterno dello Zero con 22699 mg/kg. Il legno degradato interno del tronco Zero si assesta invece sull'ordine di grandezza degli altri settori ( $10^3$ ).

Secondo alcuni studi (Kolář and Rybníček, 2010; van Bürck et al., 2012) il legno di quercia subfossile è ricco di ferro assorbito dal suolo: il ferro contenuto nel suolo come  $Fe^{2+}$  penetrerebbe nel legno sommerso e interrato e reagirebbe con i polifenoli dei tannini, di cui le querce sono naturalmente ricche, per poi ossidare e rendere il legno di un colore molto scuro, anche nero.

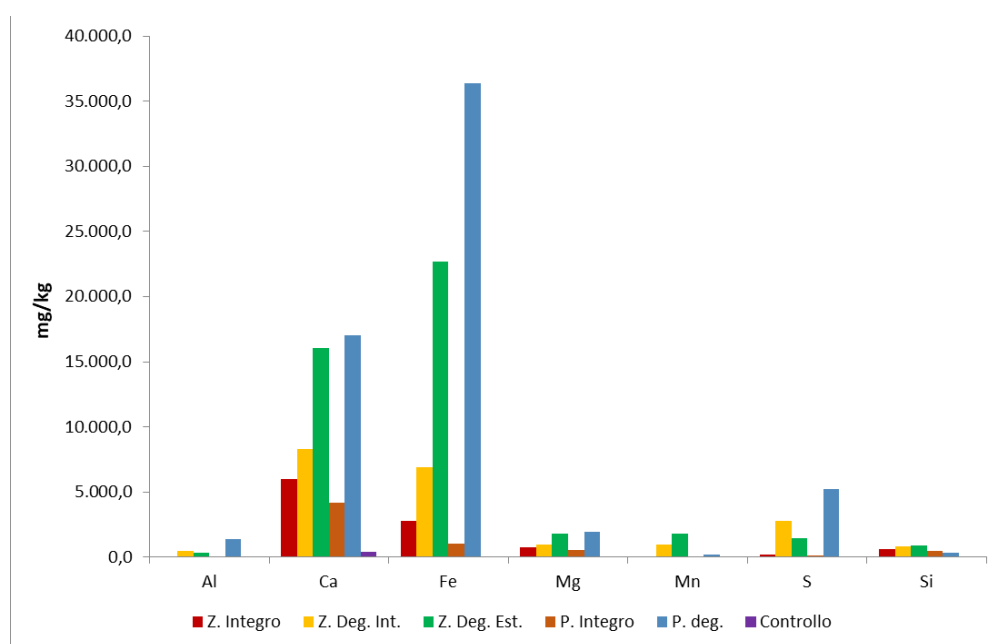


Figura 37. Contenuto elementare medio di Al, Ca, Fe, Mg, Mn, S, Si nel legno integro (esterno, interno e centro) e degradato (Deg., Int = interno, Est = esterno) del tronco Piavon (P.), del tronco Zero (Z.) e nel controllo

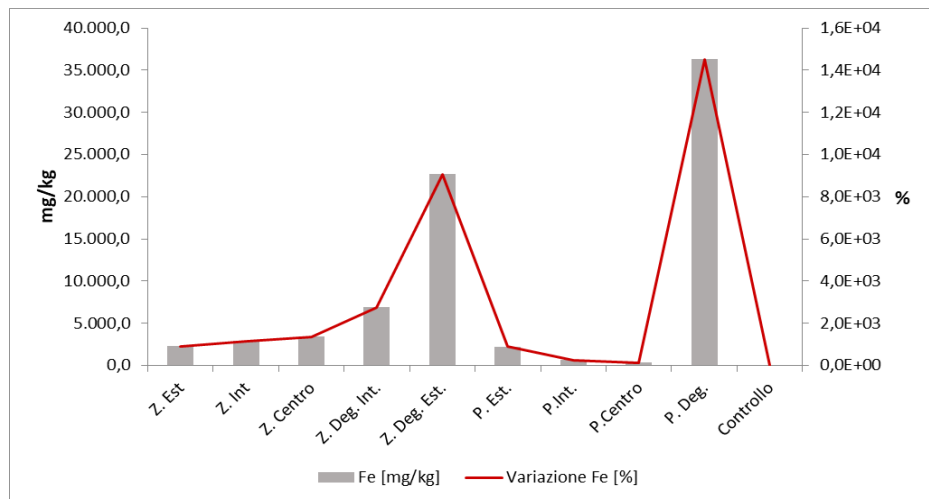


Figura 38. Contenuto di ferro (Fe) nei settori del tronco Zero (Z.), del tronco Piavon (P.) e nel controllo e variazione % del ferro nei settori del legno subfossile rispetto al controllo (Est = esterno, Int = interno, Deg = degradato). E+00 indica la notazione scientifica in cui E rappresenta la base 10 e 00 il suo esponente.

Confrontando i dati di contenuto elementare ottenuti in questo studio con la tabella B dei valori tipici di contenuto elementare indicata nella norma EN ISO 17225 -1 (EN ISO, 2021) si può osservare una differenza di scala nel contenuto di alcuni elementi tra l'indicazione data nella norma e il controllo utilizzato. Il contenuto di Al, Ca, Fe, Mg, Na, Si, e Zn del controllo è inferiore rispetto alla norma, mentre per gli altri elementi il controllo rientra nei valori più bassi dei range indicati nella norma. La causa di questa differenza è probabilmente legata al fatto che la norma indica valori generici per le latifoglie nel loro complesso.

Per quanto riguarda il legno subfossile la maggioranza degli elementi si trova oltre i range indicati. Il potassio risulta inferiore anche al range dato, mentre il ferro supera fortemente il limite massimo dato per le latifoglie, pertanto l'ipotesi che sia stato assorbito dall'ambiente circostante sembra plausibile e confermata dalla letteratura (Kolář and Rybníček, 2010; van Būrck et al., 2012).

Il carbonio e l'azoto sono stati osservati come percentuale totale, comprendente sia la componente organica che inorganica del carbonio (Appendice H Appendice I e Appendice J). In Tabella 12 sono riportati i valori di C e N secondo i settori esterno, interno, centro e settori degradati dei due tronchi subfossili.

Il carbonio totale corrisponde alla metà del tessuto legnoso analizzato (45÷47%) in tutti i campioni osservati. Di questo la componente organica è molto limitata, non superando lo 0,21%, se non nel legno degradato esterno dello Zero; gli altri settori degradati sono in linea con il legno integro dei due tronchi.

Il carbonio totale presenta una variabilità contenuta tra i settori, ma con valori sempre superiori rispetto al controllo, ad eccezione del legno degradato del tronco Piavon: il legno degradato del tronco Piavon presenta una diminuzione del contenuto di carbonio totale del -6%. Il legno

degradato interno dello Zero presenta l'aumento maggiore tra i settori (+7%), mentre il legno degradato esterno dello stesso tronco ha un aumento pari agli altri settori (+2-4%). Le variazioni di carbonio totale si riflettono anche nel carbonio organico (Tabella 13). La variabilità del legno subfossile rispetto al legno attuale può essere in parte legata alla naturale variabilità del legno.

Le maggiori variazioni si osservano per il carbonio inorganico, in particolare nel tronco Zero, con valori variabili tra i settori. Nel tronco Zero l'aumento di carbonio inorganico passano dal +52 % nel settore esterno al + 7% nel settore interno. Il legno degradato dello Zero ha un comportamento diverso tra l'esterno e l'interno, con un aumento del carbonio inorganico nel legno degradato esterno pari a +757%, mentre il legno degradato interno presenta un incremento del +36% (Tabella 13).

Nel tronco Piavon si osserva invece una diminuzione del contenuto di carbonio inorganico nel settore esterno (-11%) e un aumento del contenuto verso l'interno del tronco (centro +14%). Il legno degradato presenta un aumento di carbonio inorganico del 21%.

L'azoto totale, invece, è presente in percentuali basse ma variabili tra i settori, con un minimo di 0,10% nel centro dello Zero e un massimo di 0,97% nel settore degradato del Piavon.

A differenza del carbonio, l'azoto totale è caratterizzato da una generale diminuzione del contenuto rispetto al controllo. L'aumento si osserva solo nei settori degradati: il legno degradato del tronco Zero presenta aumenti equiparabili tra interno ed esterno (+160% e +144% rispettivamente). Nel legno degradato del Piavon l'aumento è pari al +230%.

Il contenuto di azoto dei settori integri del tronco Zero decresce dall'esterno verso l'interno (da -60% a -68%). I contenuti di azoto nel tronco Piavon sono più bassi all'esterno (N = 0,13%, variazione dal controllo del -57%) e aumentano fino ad una variazione del -39% al centro (N = 0,18%) (Tabella 13).

Nei due tronchi subfossili non si evidenzia una tendenza all'aumento o alla diminuzione del contenuto di carbonio e azoto dal settore esterno verso il settore centrale. In generale si rileva un aumento del contenuto di carbonio, soprattutto nel legno degradato.

Rispetto ai valori forniti dalla norma EN ISO 17225 -1 (EN ISO, 2021), il contenuto di carbonio totale del legno subfossile e del controllo sono inferiori, ma vicini, al valore minimo del range indicato dalla norma. L'azoto totale è invece coerente con il range dato dalla norma, superiore solo nei settori di legno degradato.



Tabella 12. Valori percentuali del contenuto di azoto (N) totale, carbonio (C) totale, organico e inorganico nei settori individuati nel tronco Zero (Z.), nel tronco Piavon (P.) e nel controllo.

	<b>N Totale</b> [%]	<b>C Totale</b> [%]	<b>C Organico</b> [%]	<b>C Inorganico</b> [%]
<b>Z. Esterno</b>	0,12	46,78	46,57	0,21
<b>Z. Interno</b>	0,11	47,08	46,92	0,16
<b>Z. Centro</b>	0,10	46,52	46,37	0,15
<b>Z. Deg. Int.</b>	0,76	48,86	48,67	0,19
<b>Z. Deg. Est.</b>	0,72	47,37	46,17	1,20
<b>P. Esterno</b>	0,13	46,84	46,72	0,13
<b>P. Interno</b>	0,21	46,32	46,16	0,16
<b>P. Centro</b>	0,18	47,63	47,47	0,16
<b>P. Degradato</b>	0,97	43,12	42,95	0,17
<b>Controllo</b>	0,29	45,78	45,64	0,14

Tabella 13. Variazione percentuale dei valori di azoto (N) totale, carbonio (C) totale, organico e inorganico dei settori dei tronchi Piavon (P.) e Zero (Z.) rispetto al controllo

	<b>N Totale</b> [%]	<b>C Totale</b> [%]	<b>C Organico</b> [%]	<b>C Inorganico</b> [%]
<b>Z. Esterno</b>	-60%	2%	2%	52%
<b>Z. Interno</b>	-62%	3%	3%	14%
<b>Z. Centro</b>	-68%	2%	2%	7%
<b>Z. Deg. Int.</b>	160%	7%	7%	36%
<b>Z. Deg. Est.</b>	144%	3%	1%	757%
<b>P. Esterno</b>	-57%	2%	2%	-11%
<b>P. Interno</b>	-29%	1%	1%	11%
<b>P. Centro</b>	-39%	4%	4%	14%
<b>P. Degradato</b>	230%	-6%	-6%	21%
<b>Controllo</b>	0%	0%	0%	0%

L'accumulo di elementi minerali nei tessuti legnosi renderebbe il legno più duro e difficile da tagliare, inoltre conferirebbe al legno un colore più scuro (Tsoumis G., 1968). Durante la fase di preparazione dei campioni si è notata infatti una maggiore difficoltà di taglio e macinazione per il legno subfossile.

### 3.3. Resistenza meccanica

La riduzione di cellulosa, lignina ed emicellulose nei tessuti degradati può comportare una diminuzione drastica della resistenza meccanica del legno (Tsoumis G., 1968). Il legno subfossile sia caratterizzato da una forte diminuzione delle emicellulose, causato dalla solubilità di queste in ambienti umidi (Bednar e Fengel, 1974; Kolář and Rybníček, 2010).

La resistenza meccanica è influenzata anche dalla presenza di difetti, come nodi e fessura, dalla massa volumica del legno e dall'umidità del legno. Pertanto i campioni con fessurazioni pre-esistenti sono stati scarti dai test di resistenza meccanica:

- Tronco Zero: z.G7, z.G1 (Figura 22)
- Tronco Piavon: p.H5, p.L5, p.H6, p.L6, p.M6 (Figura 11)

I test di resistenza meccanica (compressione parallela alle fibre e durezza di Brinell) sono stati svolti assieme al tesista Luca Bolge, il quale ha approfondito lo studio dei singoli tronchi Piavon e Zero (Bolge L., 2021).

#### 3.3.1. Resistenza alla compressione

La conoscenza della resistenza alla compressione parallela alle fibre (assiale) risulta essenziale per i principali utilizzi del legno (soprattutto uso strutturale). Come altre proprietà del legno, anche la resistenza alla compressione ha comportamento anisotropo e, in generale, la resistenza assiale risulta molto superiore rispetto alla resistenza trasversale.

Nello studio della resistenza alla compressione del legno vengono considerati in particolare 2 elementi caratteristici:

- Massima resistenza alla compressione  $R_m$  [ $N/mm^2$ ], che definisce il carico massimo applicabile per unità di superficie prima che avvenga la rottura del campione;
- Modulo elastico  $E_T$  [ $N/mm^2$ ], che misura la rigidità del legno e la sua resistenza alla deformazione.

I valori di massa volumica (MV), massima forza di compressione ( $F_m$ ), modulo elastico (ET), massima resistenza a compressione ( $R_m$ ) e umidità assoluta (U) dei campioni sono riportati in Appendice L (tronco Zero) Appendice N (tronco Piavon) e Appendice P (controllo).

Durante la prova alcuni campioni hanno superato senza rottura il carico massimo applicabile dalla macchina di prova (25.000 N). Questi campioni non sono stati considerati nelle successive elaborazioni in quanto i valori ottenuti potrebbero non essere attendibili. I campioni non considerati sono:

- Tronco Zero: z.L1, z.G6, z.L6, z.M6, z.H7, z.L7, z.O8 (Figura 22. 2 esterni, 4 interni, 1 centrale. 29% del totale dei campioni). Tutti i campioni dei raggi 6 e 7, tranne z.H6, non si sono rotti durante la prova. Mentre il raggio 6 è in prossimità della fessura degradata, il raggio 7 si trova in posizione interna al pezzo K. z.O8 corrisponde all'area midollare del tronco.
- Tronco Piavon: p.H1, p.L1, p.M1, p.M3, p.N1, p.N3, p.N4 (Figura 11. 1 esterno, 3 interni, 3 centrali. 28% del totale dei campioni). Non tutti campioni dei raggi 1 e 3 hanno resistito al carico.
- Controllo: 21 campioni, 38% dei campioni utilizzati.

Ad una rapida osservazione delle percentuali di non rottura, il legno di controllo risulta più resistente alla compressione, mentre i due tronchi si equivalgono.

Nell'analisi della resistenza a compressione secondo i settori interno, esterno e centro, sono stati quindi considerati solo i campioni che non hanno superato il carico massimo della macchina. Dalla Tabella 14 si può osservare come i valori di  $F_m$ ,  $E_t$  e  $R_m$  del controllo siano superiori rispetto ai settori dei due tronchi; l'unico valore che risulta inferiore è la massa volumica ( $MV = 0,70 \text{ g/cm}^3$ ). Nel tronco Zero, il maggior valore di  $R_m$  (massima resistenza a compressione) si presenta nel settore interno ( $19,67 \text{ N/mm}^2$ ), mentre i settori esterno e centro hanno valori di  $R_m$  simili. Il valore di massima forza di compressione più alto si presenta nel settore interno ( $20010,67 \text{ N}$ ), mentre il modulo elastico del settore interno è minore rispetto agli altri settori ( $852 \text{ N/mm}^2$ ).

Il settore interno del tronco Piavon è caratterizzato dal maggior modulo elastico ( $1469 \text{ N/mm}^2$ ), ma resistenza  $R_m$  e forza  $F_m$  minori rispetto agli altri settori del tronco (Tabella 14). Nel tronco Piavon il settore esterno presenta valori superiori rispetto al settore centrale, ma inferiore al settore interno.

La correlazione tra il modulo elastico  $E_t$  e la massima resistenza a compressione  $R_m$  risulta forte e positiva ( $r = +0,80$ ) (Figura 39).

In Tabella 15 sono riportate le variazioni percentuali dei valori osservati ( $MV$ ,  $F_m$ ,  $E_t$ ,  $R_m$ ,  $U$ ) rispetto al controllo. Si nota la diminuzione delle variabili caratterizzanti dei tronchi subfossili rispetto al controllo, l'unico valore che aumenta è la massa volumica. Si può inoltre notare come  $E_t$  sia la variabile che più è diminuita rispetto al controllo.

Il legno subfossile risulta quindi meno resistente alla compressione rispetto alla quercia attuale, confermando quanto detto da Kolář e Rybníček (2010), sia per la massima resistenza che per il modulo elastico (

Tabella 16). Questo comportamento potrebbe essere dato dal fatto che il degrado riduce la presenza di cellulosa, emicellulose e lignine nel legno, rendendolo maggiormente propenso alla rottura.

Tra i due tronchi, il Piavon presenta la maggior resistenza alla compressione ( $R_m$  media = 19,54  $N/mm^2$ ), sopportando in media un carico massimo  $F_m$  di 20150,46 N. Il tronco Zero ha sopportato in media un carico massimo di 19050,56 N, con un valore medio di resistenza massima alla compressione pari a 18,63  $N/mm^2$ . Il modulo elastico è maggiore nel tronco Piavon ( $ET$  medio Piavon = 1375,08  $N/mm^2$ ).

Tabella 14. Valori di massa volumica ( $MV$ ), Forza di compressione ( $F_m$ ), Modulo elastico ( $ET$ ), massima resistenza a compressione ( $R_m$ ) e umidità assoluta ( $U$ ) dei settori del tronco Zero (Z.) e Piavon (P.) e del controllo. Sono stati considerati solo i campioni che non hanno superato il limite di carico della macchina

	<b>MV</b> [g/cm <sup>3</sup> ]	<b>F<sub>m</sub></b> [N]	<b>ET</b> [N/mm <sup>2</sup> ]	<b>R<sub>m</sub></b> [N/mm <sup>2</sup> ]	<b>U</b> [%]
<b>Z. Esterno</b>	0,87	17.842,83	958,67	17,17	10,63
<b>Z. Interno</b>	0,84	20.010,67	852,00	19,67	10,51
<b>Z. Centro</b>	0,89	17.656,00	910,00	18,00	10,55
<b>P. Esterno</b>	0,75	20.673,33	1.455,50	19,83	11,56
<b>P. Interno</b>	0,81	22.382,33	1.469,33	21,67	11,05
<b>P. Centro</b>	0,73	17.692,25	1.183,75	17,50	10,92
<b>Controllo</b>	0,70	23.165,65	2.179,38	22,53	13,14

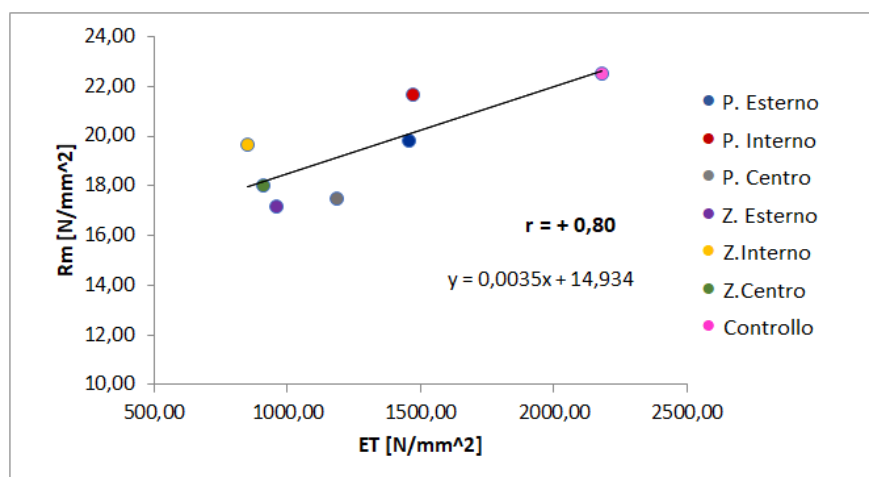


Figura 39. Correlazione tra modulo elastico ( $ET$ ) e massima resistenza alla compressione ( $R_m$ ) dei settori del tronco Piavon (P.), dei settori del tronco Zero (Z.) e del controllo

Tabella 15. Variazione % di massa volumica (MV), Forza di compressione (Fm), Modulo elastico (ET), massima resistenza a compressione (Rm) e umidità assoluta (U) dei settori del tronco Zero (Z.) e Piavon (P.) rispetto ai valori di controllo. Sono stati considerati solo i campioni che non hanno superato il limite di carico della macchina.

	<b>MV</b> [g/cm <sup>3</sup> ]	<b>Fm</b> [N]	<b>ET</b> [N/mm <sup>2</sup> ]	<b>Rm</b> [N/mm <sup>2</sup> ]	<b>U</b> [%]
<b>Z. Esterno</b>	24,22%	-22,98%	-56,01%	-23,80%	-19,14%
<b>Z. Interno</b>	20,05%	-13,62%	-60,91%	-12,71%	-20,04%
<b>Z. Centro</b>	26,91%	-23,78%	-58,25%	-20,10%	-19,75%
<b>P. Esterno</b>	6,05%	-10,76%	-33,22%	-11,97%	-12,07%
<b>P. Interno</b>	15,28%	-3,38%	-32,58%	-3,83%	-15,94%
<b>P. Centro</b>	3,21%	-23,63%	-45,68%	-22,32%	-16,93%
<b>Controllo</b>	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%

Tabella 16. Valori medi di massa volumica (MV), Forza di compressione (Fm), Modulo elastico (ET), massima resistenza a compressione (Rm) e umidità assoluta (U) del tronco Zero (Z.) e Piavon (P.) e del controllo. Sono stati considerati solo i campioni che non hanno superato il limite di carico della macchina.

	<b>MV</b> [g/cm <sup>3</sup> ]	<b>Fm</b> [N]	<b>ET</b> [N/mm <sup>2</sup> ]	<b>Rm</b> [N/mm <sup>2</sup> ]	<b>U</b> [%]
<b>Zero</b>	0,86	19050,56	895,63	18,63	10,57
<b>Piavon</b>	0,75	20150,46	1375,08	19,54	11,24
<b>Controllo</b>	0,70	23165,65	2179,38	22,53	13,14

Secondo Kolář e Rybníček (2010) la resistenza alla compressione non è direttamente correlata alla massa volumica del legno e nemmeno alla sua età. Analizzando la relazione tra umidità dei campioni e resistenza a compressione del legno, si è trovato che l'umidità influenza la resistenza del legno a compressione. Con i test di correlazione di Pearson è stata osservata una correlazione positiva forte tra umidità assoluta e modulo elastico (Figura 40,  $r = +0,97$ ) e tra umidità assoluta e massima resistenza alla compressione (Figura 41,  $r = +0,73$ ). Osservando infatti la

Tabella 16 si può notare che sia ET che Rm sono maggiori nel legno a maggior umidità (massimi nel controllo).

Considerando la natura degradata del legno subfossile, si è ricercata la correlazione del modulo elastico e la massima resistenza alla compressione anche con la densità basale e il contenuto di ceneri. ET (Figura 42) e Rm (Figura 43) presentano entrambe una correlazione moderata positiva con la densità basale ( $r = +0,50$ ). La maggior densità basale conferisce una maggior resistenza alla compressione. La correlazione di ET (Figura 44) e Rm (Figura 45) con il contenuto di ceneri è forte e negativa ( $r = -0,76$  per ET;  $r = -0,86$  per Rm). Un aumento delle ceneri corrisponde a una minor resistenza alla compressione assiale: la resistenza alla compressione potrebbe quindi

essere diminuita anche a causa dell'ingresso di elementi minerali, che potrebbero aver reso la struttura maggiormente fragile e quindi meno resistente all'applicazione di un carico.

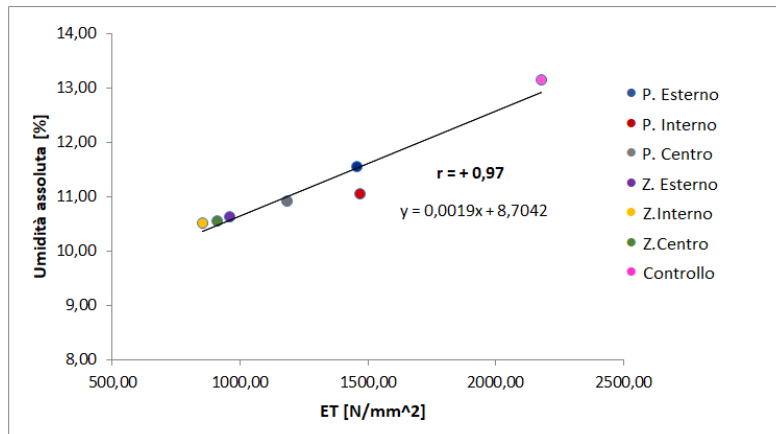


Figura 40. Correlazione tra modulo elastico (ET) e umidità assoluta dei settori del tronco Piavon (P.), dei settori del tronco Zero (Z.) e del controllo

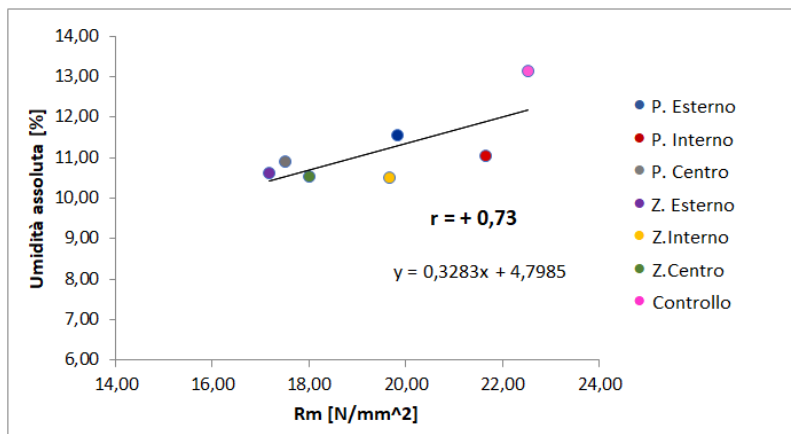


Figura 41. Correlazione tra umidità assoluta e massima resistenza a compressione (Rm) dei settori del tronco Piavon (P.), dei settori del tronco Zero (Z.) e del controllo

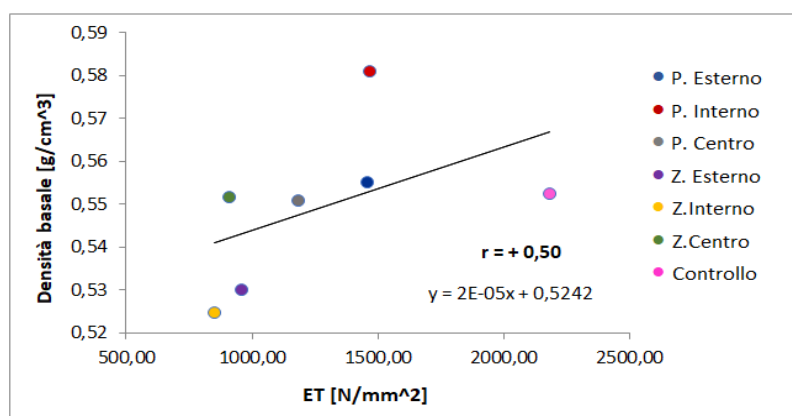


Figura 42. Correlazione tra densità basale e modulo elastico (ET) dei settori del tronco Piavon (P.), dei settori del tronco Zero (Z.) e del controllo

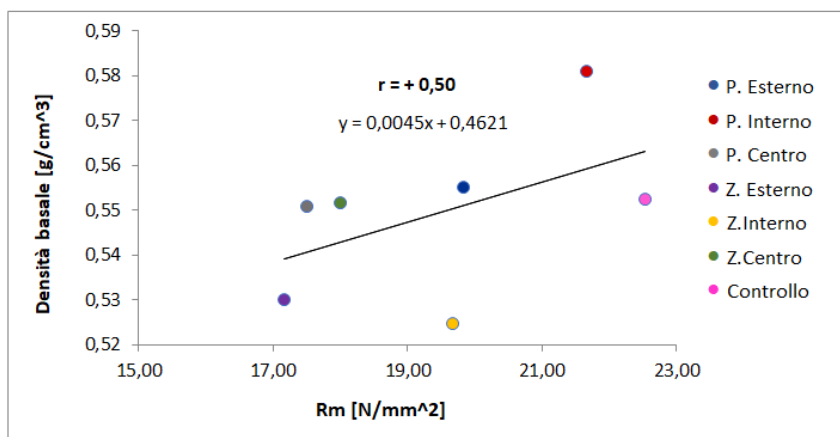


Figura 43. Correlazione tra densità basale e massima resistenza a compressione ( $R_m$ ) dei settori del tronco Piavon (P.), dei settori del tronco Zero (Z.) e del controllo

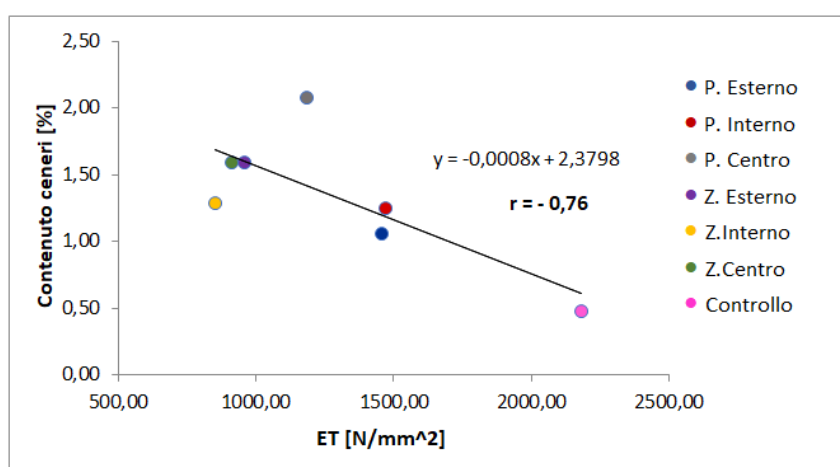


Figura 44. Correlazione tra contenuto di ceneri e modulo elastico (ET) dei settori del tronco Piavon (P.), dei settori del tronco Zero (Z.) e del controllo

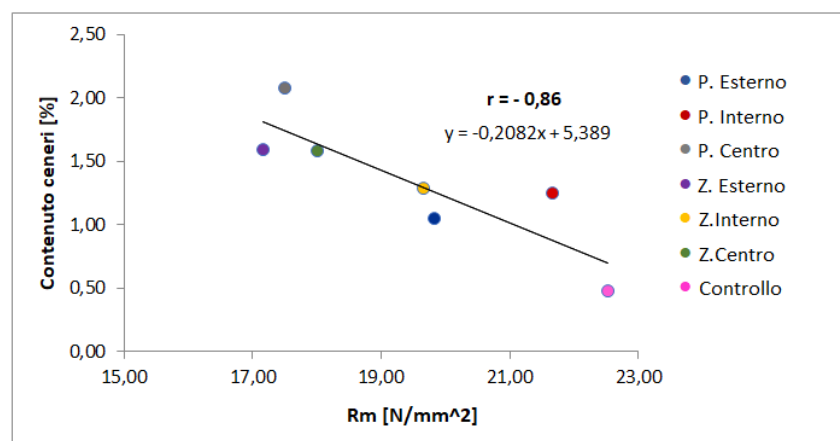


Figura 45. Correlazione tra contenuto di ceneri e massima resistenza a compressione ( $R_m$ ) dei settori del tronco Piavon (P.), dei settori del tronco Zero (Z.) e del controllo

### 3.3.2. Durezza di Brinell

Il legno di quercia subfossile viene generalmente utilizzato per oggetti, mobili e in creazioni artistiche. È quindi importante conoscerne la durezza per evitare di utilizzare questo materiale in ambiti in cui potrebbe essere danneggiato con la pressione di un oggetto. L'analisi della durezza permette di sapere la forza necessaria per penetrare il materiale in esame.

L'umidità del legno influisce fortemente sulla sua durezza: un legno caratterizzato da maggior umidità presenta minor durezza, perciò è più facilmente penetrabile. La durezza cambia poi a seconda della sezione anatomica e la relativa disposizione e direzione delle fibre (Tsoumis G., 1968). Il test di correlazione di Pearson, fatto tra l'umidità dei settori e la durezza nelle tre diverse sezioni anatomiche, indica una correlazione negativa forte in sezione tangenziale e trasversale, moderata in sezione radiale, confermando il comportamento opposto tra umidità assoluta e durezza (Figura 46).

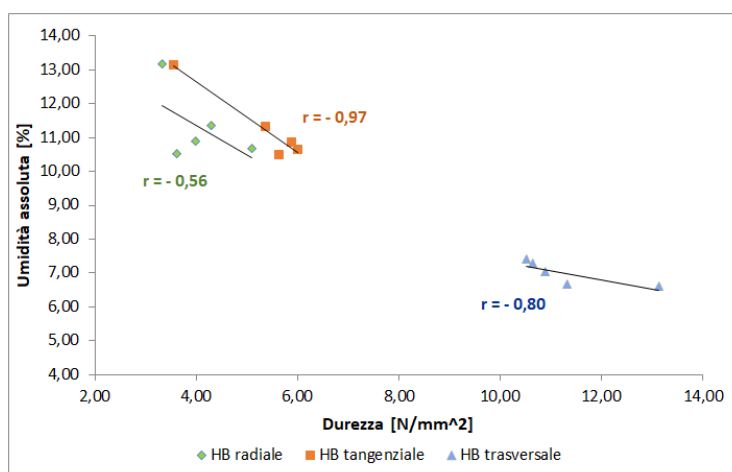


Figura 46. Correlazione tra umidità assoluta e durezza di Brinell (HB) del tronco Piavon, del tronco Zero e del controllo

I dati del diametro di impronta (D1 e D2) e durezza (HB) misurati sui campioni del tronco Zero, del tronco Piavon e del controllo sono riportati rispettivamente in Appendice M, Appendice O, 0. A causa delle dimensioni dei campioni e del ridotto materiale residuo non è stato possibile ottenere campioni dai settori centrali ma solo dai settori esterno e interno.

I campioni presentano in tutti i settori una ridotta variabilità. In generale il tronco Zero (Appendice M) presenta la maggiore variazione, con una deviazione standard  $\sigma$  massima di 1,90 nella sezione trasversale. Nel legno di controllo si osserva la minor variabilità di valori di durezza dei campioni ( $\sigma = 0,49$ ). In generale il legno di controllo è caratterizzato da valori di durezza meno variabili.



Non è presente una tendenza all'aumento o alla riduzione di durezza dal settore esterno verso il settore centrale.

Nel tronco Piavon, in corrispondenza dei campioni p.Q2, p.Q3 (settore esterno, Figura 11) si osservano valori di durezza radiale inferiori rispetto agli altri campioni esterni dello stesso tronco. La durezza radiale di p.Q3 e p.Q2 è più simile alla durezza radiale dei campioni interni del tronco Piavon (Appendice M) e del tronco Zero (Appendice O). La posizione dei due campioni all'interno della rotella di origine non sembra giustificare in qualche modo questo comportamento.

In Figura 47 sono riportati i valori di durezza medi delle sezioni anatomiche secondo i settori individuati nei due tronchi. La sezione trasversale è caratterizzata sempre dalla maggiore durezza ( $6,5 \div 7,5 \text{ N/mm}^2$ ), seguita poi dalla sezione tangenziale. La sezione radiale ha la minor durezza ( $3 \div 5 \text{ N/mm}^2$ ).

La durezza trasversale è simile in tutti i settori del legno subfossile, con aumenti rispetto al controllo intorno al +10% (Tabella 17). Solo il settore esterno del tronco Piavon presenta una durezza paragonabile al controllo. La sezione trasversale del settore esterno del tronco Piavon presenta quindi i valori di durezza più alti, ma la minor variazione rispetto al controllo.

Le altre sezioni anatomiche del settore esterno del tronco Piavon invece si discostano dal valore di controllo: +51% per la sezione tangenziale e +29% nella sezione radiale, in linea con gli altri settori (Tabella 17).

Nei due tronchi la sezione trasversale presenta aumenti del +50÷70% rispetto al controllo, mentre la sezione radiale ha aumenti più variabili. Il tronco Piavon presenta aumenti della durezza radiale del +20÷30%, mentre nel tronco Zero la durezza radiale varia dal +53% esterno a solo +9% interno (Tabella 17).

In generale la sezione trasversale è la più dura e difficile da scalfire, mentre la radiale risulta la più facilmente penetrabile. La causa è imputabile alla direzione delle fibre, che risultano più resistenti quando la forza è applicata in direzione parallela, come si osserva anche con la maggior resistenza alla compressione parallela alle fibre rispetto alla compressione perpendicolare (Walker, 1993).

La durezza radiale e quella tangenziale del controllo presentano valori simili, mentre nei tronchi subfossili si nota una maggiore differenza tra le due sezioni (Figura 48). Dalla Figura 48 è inoltre evidente come in generale il tronco Zero sia caratterizzato da maggior durezza in tutte le sezioni rispetto al Piavon, e che entrambi i tronchi abbiano durezza maggiore rispetto al controllo. Kolář and Rybníček (2010) per la quercia subfossile hanno individuato invece durezza maggiore per la sezione radiale rispetto alla tangenziale. Gli autori hanno osservato inoltre una durezza del legno

subfossile inferiore rispetto al legno attuale, in opposizione rispetto ai risultati ottenuti durante questo studio.

La causa della diminuzione delle caratteristiche meccaniche viene associata all'ingresso di elementi minerali contenuti nel suolo e alla silicizzazione dei tessuti legnosi (Kolář and Rybníček, 2010).

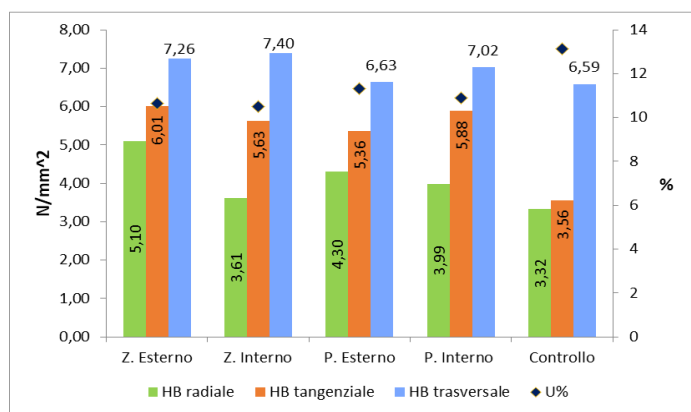


Figura 47. Durezza di Brinell (HB) delle sezioni radiali, tangenziali e trasversali e umidità assoluta (U%) dei settori del tronco Zero (Z.), Piavon (P.) e controllo

Tabella 17. Variazione % di durezza (HB) radiale tangenziale e trasversale e umidità assoluta (U) dei settori esterno e interno del tronco Zero (Z.) e Piavon (P.) rispetto al controllo

	HB radiale [N/mm <sup>2</sup> ]	HB tangenziale [N/mm <sup>2</sup> ]	HB trasversale [N/mm <sup>2</sup> ]	U [%]
<b>Z. Esterno</b>	+53%	+69%	+10%	-19%
<b>Z. Interno</b>	+9%	+58%	+12%	-20%
<b>P. Esterno</b>	+29%	+51%	+1%	-14%
<b>P. Interno</b>	+20%	+65%	+7%	-17%
<b>Controllo</b>	0%	0%	0%	0%

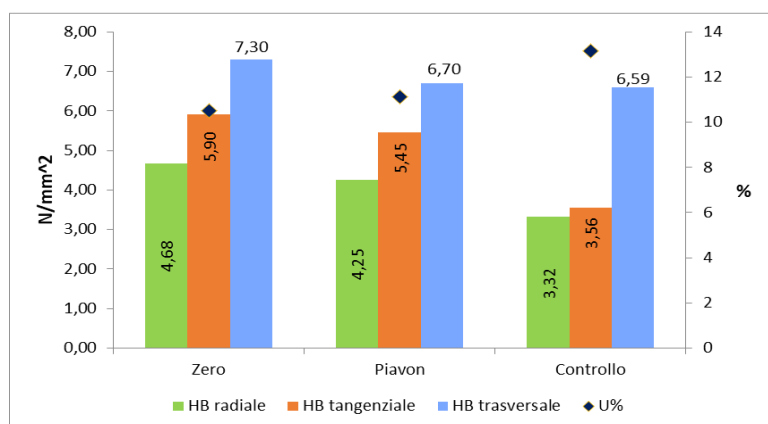


Figura 48. Valori medi di durezza di Brinell (HB) delle sezioni radiali, tangenziali e trasversali e umidità assoluta (U%) del tronco Zero, del tronco Piavon e del controllo

Si è cercato di trovare una possibile spiegazione all'aumento di durezza ricercando la correlazione con il contenuto di ceneri e con la densità basale.

Analizzando il contenuto di ceneri si registra per tutte le sezioni una forte correlazione diretta tra la durezza e il contenuto di ceneri (Figura 49), correlazione più forte per la sezione tangenziale ( $r = +0,96$ ) e più debole ma pur sempre forte per la sezione radiale ( $r = +0,76$ ). Si può quindi concludere che la durezza è fortemente legata all'aumento delle ceneri contenute.

Il test di Pearson tra la durezza e la densità basale (Figura 50) non ha evidenziato correlazioni lineari importanti. La maggior correlazione (moderata) si osserva per la sezione trasversale ( $r = -0,53$ ), mentre le altre sezioni presentano correlazione debole (radiale  $r = -0,20$ ; tangenziale  $r = -0,096$ ). Tutti gli indici individuati hanno valore negativo, delineando quindi una leggera tendenza alla diminuzione della durezza all'aumentare della densità basale (minor degrado).

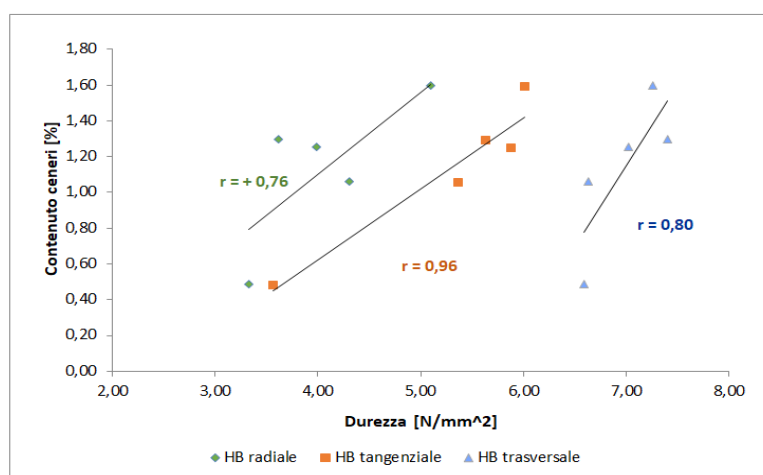


Figura 49. Correlazione tra contenuto di ceneri e durezza di Brinell (HB) del tronco Piavon, del tronco Zero e del controllo

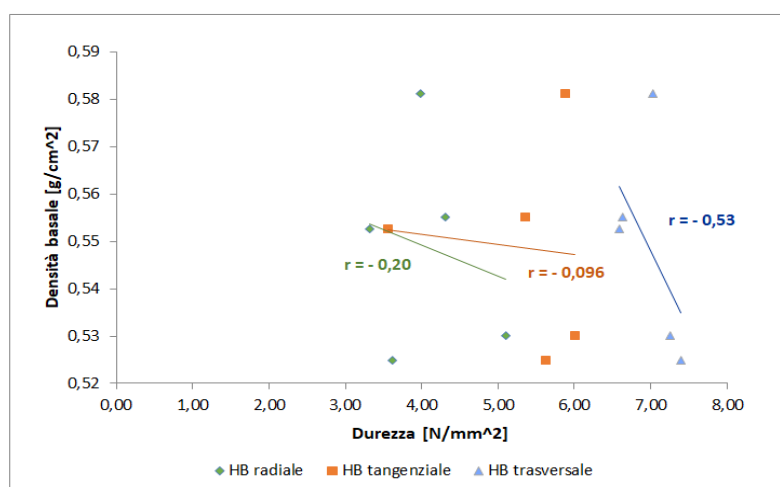


Figura 50. Correlazione tra densità basale e durezza di Brinell (HB) del tronco Piavon, del tronco Zero e del controllo

## 4. CONCLUSIONI

In questo lavoro di tesi, vengono studiati due tronchi di quercia caducifolia subfossili. Il primo tronco, datato 245-433 d.C., è stato ritrovato lungo il fiume Zero, nel comune di Marcon (VE). Il secondo tronco è stato ritrovato in un'ansa del canale Piavon, nel comune di Chiarano (TV), e datato 1180-1278 d.C. Il legno dei due tronchi è analizzato con caratterizzazione fisica, chimica e meccanica e confrontato con legno di controllo di rovere attuale. Le due rotelle presentano uno spesso settore di legno apparentemente integro, accompagnato da una sottile corona esterna degradata nel tronco Piavon e due corone degradate, una esterna e una centrale, di interessante spessore nel tronco Zero. Per quanto possibile nello studio sono analizzate tutte queste aree diversificate.

Le proprietà osservate sono influenzate da molteplici fattori, tra cui la variabilità naturale del legno, che portano a una forte complessità di caratterizzazione ed a una difficoltà di definizione della relazione causa-effetto.

Il legno subfossile apparentemente integro dei due tronchi presenta valori di densità basale (DB), densità basale residua (RB) e contenuto idrico massimo (MWC) simili al legno di controllo. I risultati ottenuti per il legno integro della due rotelle sono coerenti con quanto riportato da altri studi in letteratura.

Invece, il legno degradato del tronco Zero ha caratteristiche diverse rispetto alla parte integra e al legno di controllo. La differenza è dovuta al forte degrado riscontrato nella parte esterna.

L'analisi anatomica del legno dei singoli tronchi (Meneghelli et al., 2022; Urso et al., 2015) ha rilevato la presenza di cellule degradate anche nei settori apparentemente integri e con densità basale simile al controllo. Quest'ultimo aspetto è dovuto all'ingresso di materiale estraneo nel legno, la cui presenza è stata confermata da valori maggiori del contenuto elementare.

Per quanto riguarda i ritiri lineari, è stato osservato un aumento generale significativo del ritiro rispetto al legno di controllo in tutte e tre le direzioni anatomiche. L'aumento maggiore rispetto al legno di controllo si osserva per il ritiro tangenziale. Tra i due tronchi subfossili, il tronco Zero presenta sempre i ritiri maggiori.

Per quanto riguarda il colore, le due rotelle di legno subfossile presentano coordinate cromatiche simili. In particolare, la bassa luminosità e i valori di saturazione e di tonalità definiscono il colore come marrone scuro. Il legno di controllo presenta una tonalità simile al legno subfossile ma con luminosità e saturazione maggiori. All'interno delle rotelle sono state osservate delle aree caratterizzate da un colore più chiaro, più simile al colore del legno di controllo; queste aree si trovano nelle parti più interne e distanziate dal legno degradato. È probabile che il colore sia legato all'ingresso di elementi minerali che, reagendo chimicamente con le sostanze contenute

nel legno, ne hanno modificato le caratteristiche cromatiche. In futuro sarà interessante indagare la relazione tra coordinate cromatiche e contenuto elementare del legno subfossile al fine di determinare quali elementi influiscono di più sulla variazione di colore misurata.

Infatti, rispetto al controllo, certi elementi sono abbondantemente presenti nel legno subfossile. L'elemento più abbondante nel legno subfossile è il ferro (contenuto massimo di 36.37 mg/kg contro i 2,5 mg/kg del controllo) che è considerato in letteratura la principale causa della modifica del colore nella quercia subfossile.

La presenza di elementi minerali e la graduale fossilizzazione possono essere la causa della diversa resistenza meccanica rispetto al controllo. Il legno subfossile è risultato meno resistente alla compressione rispetto al controllo. È stato notato come all'aumentare della umidità il legno risultasse più resistente e rigido, mentre era atteso il comportamento opposto. Non è stata osservata una forte correlazione tra la resistenza alla compressione e la densità basale. Si è registrata invece una correlazione negativa con il contenuto di ceneri, per cui si considera che la presenza di materiale minerale estraneo abbia reso il legno subfossile meno resistente alla compressione.

Un risultato anomalo rispetto a quanto riportato da altri studi, riguarda la durezza del legno subfossile. Il legno subfossile dei due tronchi è infatti più duro rispetto al controllo. La durezza pare diminuire con l'aumentare dell'umidità, come era atteso, mentre risulta poco correlata con la densità basale. È presente invece una forte correlazione positiva tra durezza e il contenuto di ceneri. In generale, la durezza è maggiore in sezione trasversale e minore in quella radiale; maggiori valori di durezza rispetto al controllo si registrano nella sezione tangenziale (+50÷70%). Il tronco Zero è più duro rispetto al Piavon. Il tronco Piavon risulta tra i due il meno resistente sia per compressione che per durezza.

In conclusione tra i due tronchi subfossili non sono state osservate differenze di caratterizzazione tali da poterle associare alla differenza di datazione e alla diversa durata dell'interramento. Le parti costituite da legno apparentemente integro presentano valori equiparabili tra i due tronchi. Come aspettato, le maggiori differenze si riscontrano tra il legno apparentemente integro ed il legno degradato e tra il legno degradato ed il controllo.

Una completa caratterizzazione del legno subfossile, in vista di un possibile uso del legno subfossile per prodotti da esterno, comprende anche lo studio della sua durabilità naturale che non è stato affrontato in questo progetto ma che potrà essere oggetto di studi futuri.

## 5. Bibliografia

AOAC International. 2016. Official methods of analysis of AOAC International. 20th edition

Baldevbhai P. J. 2012. Color Image Segmentation for Medical Images using L\*a\*b\* Color Space. *IOSR Journal of Electronics and Communication Engineering*, 1(2): 24–45

Barcík Š., Gašparík M. e Razumov E. Y. 2015. Effect of thermal modification on the colourchanges of oak wood. *Wood Research*, 60 (3): 385–396

Bednar H. e Fengel D. 1974. Physikalische, chemische und strukturelle Eigenschaften von regentem und subfossilem Eichenholz. *Holz als Roh und Werkstoff*, 32: 99–107

Björdal C. G., Daniel G. e Nilsson T. 2000. Depth of burial, an important factor in controlling bacterial decay of waterlogged archaeological poles. *International Biodeterioration and Biodegradation*, 45(1–2): 15–26

Bracco F., Marchiori S., Mason F. e Zanetti A. 2001. Le foreste della Pianura Padana - Un labirinto dissolto. *Quaderni habitat (3)*. Ministero dell'ambiente e della tutela del territorio. Museo friulano di storia naturale. Comune di Udine

Buurman P. 1972. Mineralization of fossil wood. *Scripta Geol.*, 12: 1-43

Bolge L. 2021. Bog oak: caratteristiche e caratterizzazione fisico-meccanica. Relatore Urso T., Correlatore Zanetti M. Dipartimento Territorio e sistemi agro-forestali, Facoltà di Agraria, Università degli Studi di Padova, Legnaro

Cagnin G., Nicoletti G., Pitteri M., Rubinato L., Scroccaro L. e Svalduz E. 2004. Storie di terra e di acque. Zero, Sant'Alberto e Scandolara attraverso i secoli. 175-181. Comune di Zero Branco. Canova

Capretti C., Galotta G., Giachi G., Giampaola D., Macchioni N. e Pizzo B. 2008. The characterization of waterlogged archaeological wood: The three roman ships found in Naples (Italy). *Archaeometry* 50 (5): 855–876

Cividini R., Travan L. e Allegretti O. 2007. White beech: A tricky problem in the drying process. In Proceedings International Scientific Conference on Hardwood Processing (ISCHP), ed. P. Blanchet, 135- 140. Québec City, Canada, September 24-26

Dietz P. 1975. Dichte und Rindengehalt von Industrieholz Density and bark content of industrial raw wood. Holz als Roh-Werkst, 33 (4): 135–14

Dvorská J. e Vít J. 2002. Dendrochronologické a radiometrické zpracování subfosilních kmenů z Mohelnice. In: 8. Kvartér 2002. Brno, in Anonymus (ed.). p. 22–25. (Citato da Kolář T.e Rybníček M. 2010. Physical and mechanical properties of Subfossil Oak (*Quercus*, SP.) wood. Acta Universitatis Agriculturae et Silviculturae Mendelianae Brunensis, 58(4): 123–134)

EN ISO 17225 -1. 2021. Solid biofuels. Fuel specifications and classes Part 1: General requirement. Geneva

Eoptis. 2013. CLM-194 digital handheld colorimeter. User guide Rev. 1.01-09/2013

Florian M-L.E. 1989. Scope and History of Archaeological Wood. Archeological Wood, 3-32. American Chemical Society

Ghavidel A., Hofmann T., Bak M., Sandu I. e Vasilache V. 2020. Comparative archaeometric characterization of recent and historical oak (*Quercus* spp.) wood. Wood Science and Technology, 54 (5): 1121–1137

Govorčin S. e Sinković T. 1995. Some physical and mechanical properties of the Bednja abonos. Drvna–Industrija, 46 (1): 9–14. ISSN 0012- 6772 (Citato da Kolář T.e Rybníček M. 2010. Physical and mechanical properties of Subfossil Oak (*Quercus*, SP.) wood. Acta Universitatis Agriculturae et Silviculturae Mendelianae Brunensis, 58(4): 123–134)

Haneca K., Čufar K. e Beeckman H. 2009. Oaks, tree-rings and wooden cultural heritage: a review of the main characteristics and applications of oak dendrochronology in Europe. Journal of Archaeological Science, 36(1): 1–11

Horský D. e Reinprecht L. 1986. Štúdiá subfosílného dubového dreva. Zvolen: Vysoká škola lesnícka a drevárska (Citato da Kolář T.e Rybníček M. 2010. Physical and mechanical properties

of Subfossil Oak (*Quercus*, SP.) wood. *Acta Universitatis Agriculturae et Silviculturae Mendelianae Brunensis*, 58(4): 123–134)

ISO 13061-17. 2015. Physical and mechanical properties of wood. Test methods for small clear wood specimens. Part 17: Determination of compression parallel to grain. DRAFT

Jordan B. A. 2001. Site characteristics impacting the survival of historic waterlogged wood: A review. *International Biodeterioration and Biodegradation*, 47: 47–54

Jordheim M. 2007. Isolation, identification and properties of pyranoanthocyanins and anthocyanin forms. Department of Chemistry, University of Bergen, Bergen

Kim Y.S. e Singh A.P. 2000. Micromorphological characteristics of wood biodegradation in wet environments: A review. *International Association of Wood Anatomists Journal*, 21 (2): 135–155

Kolář T.e Rybníček M. 2010. Physical and mechanical properties of Subfossil Oak (*Quercus*, SP.) wood. *Acta Universitatis Agriculturae et Silviculturae Mendelianae Brunensis*, 58(4): 123–134

Krebs P., Biondina D., Bonardi M. e Bertogliati M. 2015. Rinvenimento a Moleno nella Svizzera sudalpina di un tronco di quercia vecchio di oltre quattro millenni, *Bollettino della Società ticinese di scienze naturali*, 103: 53–56

Mahr A. 1935. On the Former Use of Irish Bog Oak Wood by Continental Craftsmen. *The Journal of The Royal Society of Antiquaries of Ireland*, 7th series, 5 (1): 150-152. Royal society of Antiquaries of Ireland

Mańkowski P., Kozakiewicz P. e Drodek M. 2016. The selected properties of fossil oak wood from medieval burgh in Pfoňsk. *Wood Research*, 61(2): 287–298

Maraschin P. 2019. Caratterizzazione del legno di un tronco subfossile rinvenuto nel letto del fiume Zero (VE). Relatore Urso T., Correlatore Zanetti M. Dipartimento Territorio e sistemi agro-forestali, Facoltà di Agraria, Università degli Studi di Padova, Legnaro

Meneghello C., Maraschin P., Zanetti M., Urso T. 2022. Bog oak : Characteristics and



characterization of a log from the Venetian Plain ( Italy ). *Journal of Archaeological Science: Reports* (43)

Nardi Berti R. e Berti S. 2003. Principali specie legnose impiegate nelle strutture e nei manufatti del passato e criteri per il loro riconoscimento. In *Atti Congresso Nazionale Legno nel Restauro e Restauro del Legno*. Vol. 2: 45-55. Firenze, 30 novembre - 3 dicembre 1983. Milano: Palutan Editrice

Peduzzi S., Putelli T., Krebs P. e Scapozza C. 2020. Ritrovamento di un tronco di quercia subfossile (5755-5640 cal BP) nel quadro della rivitalizzazione del fiume Ticino in Riviera: cronaca e prime annotazioni. *Bollettino della Società Ticinese di scienze naturali*, (108): 103–112

Regione Veneto. 2005. *Carta dei Suoli del Veneto alla scala 1:250,000*, 3 volumi. ARPAV—Osservatorio Regionale Suolo, Castelfranco Veneto

Reinprecht L., Kúdela J. e Čunderlík I. 1988. Vlastnosti subfosílného dubového dreva z oblasti Zelená voda. *Drevársky výskum*, 117: 79– 90. (Citato da Kolář T.e Rybníček M. 2010. Physical and mechanical properties of Subfossil Oak (*Quercus*, SP.) wood. *Acta Universitatis Agriculturae et Silviculturae Mendelianae Brunensis*, 58(4): 123–134)

Ross S. M. 2014. *Introduzione alla statistica*. 2ª edizione. Maggioli Editore

Rowell R. M. e Barbour R. J. 1990. *Archaeological Wood: Properties, Chemistry, and Preservation*. Oxford University press. ISBN-13: 9780841216235 (Citato da Kolář T.e Rybníček M. 2010. Physical and mechanical properties of Subfossil Oak (*Quercus*, SP.) wood. *Acta Universitatis Agriculturae et Silviculturae Mendelianae Brunensis*, 58(4): 123–134)

Schweingruber F. H. e Kaennel M. 1995. *Multilingual Glossary of Dendrochronology. Terms and Definitions in English, German, French, Spanish, Italian, Portuguese and Russian*. Birmensdorf, Swiss Federal Institute for Forest, Snow and Landscape Research. Berne, Stuttgart, Vienna, Haupt

Singh A. P. 2012. A review of microbial decay types found in wooden objects of cultural heritage recovered from buried and waterlogged environments. *Journal of Cultural Heritage*, 13

(suppl. 3): 16–20. <https://doi.org/10.1016/j.culher.2012.04.002>

Tsoumis G. 1968. Wood as raw material. Source, structure, chemical composition, growth, degradation and identification. Pergamon press Inc, New York

UNI 11130. 2004. Beni culturali. Manufatti lignei. Terminologia del degradamento del legno

UNI 11118. 2004 b. Beni culturali. Manufatti lignei. Criteri per l'identificazione delle specie legnose

UNI 11205. 2007 a. Beni culturali. Legno di interesse archeologico ed archeobotanico. Linee guida per la caratterizzazione

UNI 11206. 2007 b. Beni culturali. Legno di interesse archeologico ed archeobotanico. Linee guida per il recupero e prima conservazione

UNI EN 350. 2016. Durabilità del legno e dei prodotti a base di legno. Prove e classificazione della durabilità agli agenti biologici del legno e dei materiali a base di legno

UNI EN 1534. 2020. Wood flooring. Determination of resistance to indentation. Test method.

Urso T., Crivellaro A. e Fuser M. 2012. La piroga monossile del Piave: caratterizzazione fisico-anatomica del legno. In atti VII Convegno Nazionale Di Archeometria (AIAR). Modena, Italia, 22 -24 febbraio

Urso T., Martinelli N., Pignatelli O. e Scortegagna T. 2015. The subfossil trunk of Chiarano (TV). *Conservation Science in Cultural Heritage*, 15(2): 41–52

Wagenführ R. 2000. *Holzatlas*. 5. edition. München: Fachbuchverlag Leipzig im Carl Hanser Verlag. 707 p. ISBN 3-446-21390-2 (Citato da Kolář T. e Rybníček M. 2010. Physical and mechanical properties of Subfossil Oak (*Quercus*, SP.) wood. *Acta Universitatis Agriculturae et Silviculturae Mendelianae Brunensis*, 58(4): 123–134)

Walker J. C. F., Butterfield B. G., Langrish T. A. G., Harris J. M. e Uprichard J. M. 1993. *Primary Wood Processing. Principles and practice*. Chapman e Hall, London

Van Bürck U., Wagner F. E. e Lerf A. 2012. Mössbauer studies of subfossil oak. *Hyperfine Interact* 208: 105–110

## 6. Sitografia

<https://davorinmortapipes.com/> Ultima consultazione il 04/02/2022

<https://support.microsoft.com/it-it/office/calcolare-le-percentuali-6b5506e9-125a-4aba-a638-d6b40e603981> Ultima consultazione il 30/06/2022

<https://zjongsuitarstore.nl/product/patrick-james-eggle-oz-t-carve-top-bog-oak/>  
Ultima consultazione il 04/02/2022

<https://www.lignumvenetia.com/il-colore-unico-del-legno-affumicato-parquet-di-pregio-da-tecniche-antiche> Ultima consultazione il 04/02/2022

<https://www.pfeifen-shop-online.de/Rattrays-Bog-Oak-4-smooth-V>  
Ultima consultazione il 04/02/2022

<https://www.proantic.com/magazine/lintarsia/> Ultima consultazione il 04/02/2022

<http://www.teltinc.com/> Ultima consultazione il 04/02/2022

## APPENDICI

### Appendice A. Valori di peso e volume massimi (max) e minimi (0); tronco Piavon

	<b>P<sub>max</sub></b> [g]	<b>V<sub>max</sub></b> [cm <sup>3</sup> ]	<b>P<sub>0</sub></b> [g]	<b>V<sub>0</sub></b> [cm <sup>3</sup> ]
<b>p.K3</b>	109,12	90,24	51,02	68,27
<b>p.Y3</b>	96,62	85,57	46,62	68,23
<b>p.K2</b>	105,18	88,22	51,01	64,34
<b>p.Y2</b>	100,06	84,77	50,64	63,65
<b>p.Z3</b>	102,39	86,34	49,03	61,55
<b>p.K1</b>	106,11	90,15	49,95	67,23
<b>p.Y1</b>	96,67	82,53	45,18	62,96
<b>Media</b>	102,31	86,83	49,06	65,18
<b>Dev. St. (σ)</b>	4,80	2,86	2,31	2,71
<b>Max</b>	109,12	90,24	51,02	68,27
<b>Min</b>	96,62	82,53	45,18	61,55

### Appendice B. Valori di peso e volume massimi (max) e minimi (0), BD, RD e MWC; controllo

	<b>P<sub>max</sub></b> [g]	<b>V<sub>max</sub></b> [cm <sup>3</sup> ]	<b>P<sub>0</sub></b> [g]	<b>V<sub>0</sub></b> [cm <sup>3</sup> ]	<b>BD</b> [g/cm <sup>3</sup> ]	<b>RD</b> [%]	<b>MWC</b> [%]
<b>C.R1</b>	83,80	75,15	41,03	62,95	0,55	94,12	104,25
<b>C.R3</b>	86,62	75,25	42,29	62,94	0,56	96,90	104,80
<b>C.R4</b>	84,36	76,97	41,74	66,33	0,54	93,50	102,09
<b>C.R5</b>	84,73	73,67	41,26	62,55	0,56	96,55	105,38
<b>Dev. St. (σ)</b>	1,22	1,35	0,56	1,77	0,01	1,71	1,44
<b>Media</b>	84,88	75,26	41,58	63,69	0,55	95,27	104,13
<b>Max</b>	86,62	76,97	42,29	66,33	0,56	96,90	105,38
<b>Min</b>	83,80	73,67	41,03	62,55	0,54	93,50	102,09

**Appendice C. Valori massimi (max) e minimi (0) delle direzioni anatomiche radiale, tangenziale e assiale; tronco Piavon**

	<b>R<sub>max</sub></b> [cm]	<b>T<sub>max</sub></b> [cm]	<b>A<sub>max</sub></b> [cm]	<b>R<sub>0</sub></b> [cm]	<b>T<sub>0</sub></b> [cm]	<b>A<sub>0</sub></b> [cm]
<b>p.K3</b>	4,40	4,95	4,14	4,03	4,12	4,12
<b>p.Y3</b>	4,27	4,82	4,16	3,96	4,16	4,15
<b>p.K2</b>	4,40	4,91	4,08	3,94	4,05	4,04
<b>p.Y2</b>	4,33	4,70	4,16	3,91	3,94	4,13
<b>p.Z3</b>	4,32	4,89	4,08	3,92	3,86	4,07
<b>p.K1</b>	4,41	5,04	4,06	4,08	4,14	3,98
<b>p.Y1</b>	4,22	4,81	4,07	3,90	4,02	4,02
<b>Media</b>	4,33	4,86	4,10	3,95	4,03	4,06
<b>Dev. St. (σ)</b>	0,07	0,11	0,05	0,07	0,11	0,07
<b>Max</b>	4,41	5,04	4,16	4,08	4,16	4,15
<b>Min</b>	4,22	4,70	4,06	3,90	3,86	3,98

**Appendice D. Valori massimi (max) e minimi (0) delle direzioni anatomiche radiale, tangenziale e assiale e risultati dei ritiri assiali, tangenziali e radiali; controllo**

	<b>R<sub>max</sub></b> [cm]	<b>T<sub>max</sub></b> [cm]	<b>A<sub>max</sub></b> [cm]	<b>R<sub>0</sub></b> [cm]	<b>T<sub>0</sub></b> [cm]	<b>A<sub>0</sub></b> [cm]	<b>β<sub>R</sub></b> [%]	<b>β<sub>T</sub></b> [%]	<b>β<sub>A</sub></b> [%]
<b>C.R1</b>	4,28	4,27	4,12	3,96	3,90	4,08	7,48	8,58	0,97
<b>C.R3</b>	4,20	4,40	4,07	3,94	3,98	4,02	6,24	9,64	1,28
<b>C.R4</b>	4,25	4,30	4,21	3,99	3,96	4,20	6,07	7,95	0,33
<b>C.R5</b>	4,22	4,26	4,10	3,96	3,86	4,09	6,26	9,25	0,20
<b>Media</b>	4,24	4,31	4,13	3,96	3,92	4,10	6,51	8,86	0,69
<b>Dev. St. (σ)</b>	0,03	0,07	0,06	0,02	0,05	0,08	0,65	0,74	0,52
<b>Max</b>	4,28	4,40	4,21	3,99	3,98	4,20	7,48	9,64	1,28
<b>Min</b>	4,20	4,26	4,07	3,94	3,86	4,02	6,07	7,95	0,20

**Appendice E. Risultati analisi del colore; tronco Zero**

	<b>L</b>	<b>a*</b>	<b>b*</b>	<b>C*</b>	<b>h°</b>
<b>z.A1</b>	26,68	0,46	1,00	1,10	65,30
<b>z.A2</b>	27,11	0,39	0,62	0,73	57,83
<b>z.A3</b>	30,04	0,37	1,96	1,99	79,39
<b>z.A4</b>	30,63	0,73	2,80	2,89	75,39
<b>z.A5</b>	29,03	0,55	1,78	1,86	72,80
<b>z.B1</b>	31,72	1,10	5,04	5,16	77,73
<b>z.B2</b>	29,63	0,94	3,02	3,16	72,69
<b>z.B3</b>	31,27	0,66	2,52	2,61	75,34
<b>z.B4</b>	37,78	3,21	10,55	11,03	73,06
<b>z.B5</b>	37,14	3,80	10,66	11,32	70,40
<b>z.B6</b>	31,02	1,18	4,36	4,52	74,83
<b>z.B10</b>	28,15	0,94	3,31	3,44	74,20
<b>z.C1</b>	29,76	0,98	3,40	3,54	73,99
<b>z.C3</b>	28,34	0,49	0,99	1,11	63,74
<b>z.C4</b>	31,24	1,10	3,48	3,65	72,47
<b>z.C5</b>	33,77	1,43	4,88	5,08	73,69
<b>z.C6</b>	34,86	2,18	8,65	8,92	75,83
<b>z.C7</b>	33,96	2,83	10,49	10,87	74,89
<b>z.C8</b>	31,73	1,27	4,03	4,22	72,45
<b>z.C9</b>	31,46	0,96	3,78	3,90	75,76
<b>z.C10</b>	33,06	1,86	5,33	5,64	70,78
<b>z.C11</b>	28,32	0,57	1,23	1,35	65,26
<b>z.C14</b>	30,03	0,81	3,39	3,48	76,55
<b>z.C15</b>	29,45	0,94	2,93	3,07	72,19
<b>z.D1</b>	29,02	0,75	3,12	3,21	76,56
<b>z.D4</b>	31,31	0,56	2,85	2,91	78,96
<b>z.D5</b>	30,45	0,46	2,36	2,40	79,05
<b>z.D6</b>	29,75	0,39	2,11	2,15	79,44
<b>z.D7</b>	30,45	0,53	2,38	2,43	77,51
<b>z.D8</b>	31,09	0,82	2,87	2,98	74,12

Continua a pag. 85

<b>z.D9</b>	34,74	1,54	5,13	5,36	73,33
<b>z.D10</b>	33,84	1,20	4,13	4,30	73,81
<b>z.D11</b>	28,62	0,52	1,43	1,52	69,97
<b>z.D12</b>	26,67	0,39	0,50	0,64	51,81
<b>z.D13</b>	25,09	0,54	0,30	0,62	29,48
<b>z.D14</b>	29,33	0,86	2,65	2,78	72,06
<b>z.D15</b>	29,81	0,78	3,03	3,12	75,61
<b>z.E9</b>	28,60	0,81	1,30	1,54	58,03
<b>z.E10</b>	28,27	1,02	2,46	2,66	67,39
<b>z.E14</b>	29,15	0,69	2,68	2,77	75,48
<b>z.F1</b>	24,85	0,55	0,59	0,81	46,84
<b>z.F2</b>	27,10	0,44	1,14	1,22	68,69
<b>Dev. St. (<math>\sigma</math>)</b>	2,85	0,76	2,57	2,66	9,61
<b>Media</b>	30,34	1,01	3,36	3,53	70,59
<b>Max</b>	37,78	3,80	10,66	11,32	79,44
<b>Min</b>	24,85	0,37	0,30	0,62	29,48



## Appendice F. Risultati analisi del colore; tronco Piavon

	<b>L</b>	<b>a*</b>	<b>b*</b>	<b>C*</b>	<b>h°</b>
<b>p.A1</b>	28,24	0,44	2,57	2,65	79,79
<b>p.A4</b>	29,12	1,22	4,30	4,44	73,93
<b>p.A5</b>	33,04	1,15	5,57	5,67	78,39
<b>p.A6</b>	32,80	1,16	6,03	6,16	78,76
<b>p.A7</b>	35,26	1,09	6,55	6,66	80,75
<b>p.A8</b>	32,10	0,63	4,41	4,55	81,66
<b>p.A12</b>	28,64	0,17	1,71	1,73	85,35
<b>p.A13</b>	24,99	0,41	0,70	0,82	56,50
<b>p.B1</b>	31,29	1,22	5,68	5,79	77,43
<b>p.B2</b>	31,55	1,85	6,76	7,09	74,87
<b>p.B3</b>	30,74	2,23	6,81	7,29	71,94
<b>p.B4</b>	33,81	2,22	8,09	8,36	74,82
<b>p.B6</b>	35,58	2,24	8,73	9,07	75,04
<b>p.B7</b>	34,92	2,08	8,52	8,77	77,42
<b>p.B8</b>	33,38	1,37	6,99	7,14	78,86
<b>p.B9</b>	33,18	1,03	5,67	5,76	79,80
<b>p.B10</b>	31,66	0,76	4,20	4,21	79,73
<b>p.B11</b>	30,32	0,82	4,07	4,17	78,80
<b>p.B13</b>	26,61	0,58	1,84	1,91	72,99
<b>p.B14</b>	27,37	0,37	2,00	2,01	79,42
<b>p.B15</b>	28,11	0,78	2,83	2,88	73,45
<b>p.C1</b>	31,75	1,86	6,69	6,96	74,77
<b>p.C3</b>	38,86	6,42	15,53	16,89	67,34
<b>p.C4</b>	39,63	6,25	15,60	16,90	68,11
<b>p.C9</b>	33,63	1,97	7,54	7,85	75,54
<b>p.C10</b>	33,44	1,51	6,64	6,81	77,27
<b>p.C11</b>	31,39	1,45	5,29	5,46	74,92
<b>p.C13</b>	28,57	0,84	3,05	3,14	75,61
<b>p.C14</b>	29,73	0,92	4,03	4,14	76,74
<b>p.C15</b>	31,37	1,23	5,44	5,59	76,86

Continua a pag. 87

<b>p.D1</b>	38,44	4,82	14,45	15,21	71,89
<b>p.D6</b>	40,90	6,27	16,15	17,17	68,58
<b>p.D7</b>	39,97	5,70	15,39	16,26	69,85
<b>p.D11</b>	30,64	1,76	5,70	6,08	72,97
<b>p.D14</b>	30,55	1,30	5,04	5,18	74,68
<b>p.D15</b>	32,49	2,05	7,32	7,70	74,79
<b>p.E6</b>	33,99	3,09	8,80	9,44	70,45
<b>p.E9</b>	36,09	1,99	8,38	8,70	76,36
<b>p.E15</b>	36,33	2,84	10,57	11,06	74,86
<b>Dev. St. (<math>\sigma</math>)</b>	3,76	1,68	4,00	4,31	4,92
<b>Media</b>	32,57	1,95	6,81	7,12	75,16
<b>Max</b>	40,90	6,42	16,15	17,17	85,35
<b>Min</b>	24,99	0,17	0,70	0,82	56,50

**Appendice G. Risultati analisi del colore; controllo**

	<b>L</b>	<b>a*</b>	<b>b*</b>	<b>C*</b>	<b>h°</b>
<b>C1</b>	57,30	4,52	17,04	17,63	75,16
<b>C2</b>	60,33	4,44	17,98	18,52	76,13
<b>C3</b>	57,64	4,37	15,98	16,57	74,71
<b>C4</b>	58,07	4,47	16,99	17,57	75,26
<b>C5</b>	57,27	4,83	17,84	18,48	74,86
<b>C6</b>	57,77	4,85	17,56	18,22	74,58
<b>C7</b>	56,91	4,83	17,47	18,12	74,56
<b>C8</b>	59,21	4,09	16,28	16,78	75,89
<b>C9</b>	58,20	4,07	16,61	17,10	76,23
<b>C10</b>	59,44	4,13	16,32	16,83	75,80
<b>C11</b>	58,60	4,32	16,99	17,52	75,75
<b>C12</b>	60,29	4,41	17,08	17,64	75,52
<b>C13</b>	56,01	4,74	17,12	17,76	74,52
<b>C14</b>	61,03	3,98	16,86	17,32	76,71
<b>Media</b>	58,43	4,43	17,01	17,58	75,41
<b>Dev. St. (<math>\sigma</math>)</b>	1,46	0,30	0,58	0,62	0,71
<b>Max</b>	61,03	4,85	17,98	18,52	76,71
<b>Min</b>	56,01	3,98	15,98	16,57	74,52

**Appendice H. Contenuto elementare; tronco Zero**

	<b>Ag</b> [mg/kg]	<b>Al</b> [mg/kg]	<b>As</b> [mg/kg]	<b>B</b> [mg/kg]	<b>Ba</b> [mg/kg]	<b>Be</b> [mg/kg]	<b>Ca</b> [mg/kg]
<b>Z.O8</b>	<0,15	4,66	2,21	5,59	27,02	<0,08	4866,16
<b>Z.G1</b>	<0,15	3,62	0,86	9,00	64,23	<0,08	7166,446
<b>Z.H1</b>	<0,15	1,46	1,66	5,03	28,29	<0,08	5780,584
<b>Z.H4</b>	<0,15	4,90	1,20	9,05	52,90	<0,08	7428,43
<b>Z.M1</b>	<0,15	3,65	2,24	5,11	25,73	<0,08	5869,78
<b>Z.N4</b>	<0,15	4,73	1,88	5,71	21,74	<0,08	5016,103
<b>Z.K0</b>	<0,1	437,13	47,31	17,45	39,07	<0,08	8374,269
<b>Z.K8</b>	<0,15	439,47	44,37	31,51	152,07	<0,08	15767,72
<b>Z.J0</b>	<0,15	554,42	20,01	13,93	37,39	<0,08	8243,615
<b>Z.J5</b>	<0,15	258,25	17,35	24,80	142,45	<0,08	16388,33
	<b>Cd</b> [mg/kg]	<b>Co</b> [mg/kg]	<b>Cr</b> [mg/kg]	<b>Cu</b> [mg/kg]	<b>Fe</b> [mg/kg]	<b>Hg</b> [mg/kg]	<b>K</b> [mg/kg]
<b>Z.O8</b>	<0,08	<0,08	<0,08	2,34	3461,67	<0,08	30,40
<b>Z.G1</b>	<0,08	<0,08	<0,08	1,90	2906,21	<0,08	20,64
<b>Z.H1</b>	<0,08	<0,08	<0,08	1,84	25,91	<0,08	30,67
<b>Z.H4</b>	<0,08	<0,08	<0,08	1,99	3915,76	<0,08	29,78
<b>Z.M1</b>	<0,08	<0,08	<0,08	1,97	2877,34	<0,08	32,14
<b>Z.N4</b>	<0,08	<0,08	<0,08	1,80	3421,90	<0,08	36,96
<b>Z.K0</b>	<0,08	0,65	0,60	6,25	7230,02	<0,1	171,73
<b>Z.K8</b>	<0,08	1,49	37,10	7,40	24714,57	<0,1	248,43
<b>Z.J0</b>	<0,08	0,38	0,96	7,48	6538,31	<0,1	185,27
<b>Z.J5</b>	<0,08	1,10	0,64	4,42	20684,10	<0,1	333,90

Continua a pag. 90

	<b>Li</b> [mg/kg]	<b>Mg</b> [mg/kg]	<b>Mn</b> [mg/kg]	<b>Mo</b> [mg/kg]	<b>Na</b> [mg/kg]	<b>Ni</b> [mg/kg]	<b>P</b> [mg/kg]
<b>Z.O8</b>	<0,08	709,68	61,47	<0,15	118,14	0,31	14,87
<b>Z.G1</b>	<0,08	806,64	49,21	<0,15	128,80	0,29	11,64
<b>Z.H1</b>	<0,08	672,35	28,53	<0,15	135,29	0,34	9,68
<b>Z.H4</b>	<0,08	822,64	64,82	<0,15	124,22	0,36	13,41
<b>Z.M1</b>	<0,08	716,05	51,87	<0,15	127,43	0,19	8,55
<b>Z.N4</b>	<0,08	681,16	51,29	<0,15	123,19	0,24	23,99
<b>Z.K0</b>	0,31	1007,80	1007,80	0,98	52,57	1,21	1491,23
<b>Z.K8</b>	0,40	1631,89	1631,89	1,28	83,96	17,09	1707,68
<b>Z.J0</b>	0,28	925,15	925,15	0,94	48,32	1,94	1155,21
<b>Z.J5</b>	0,27	1959,76	1959,76	0,44	69,66	2,35	1385,31
	<b>Pb</b> [mg/kg]	<b>S</b> [mg/kg]	<b>Sb</b> [mg/kg]	<b>Se</b> [mg/kg]	<b>Si</b> [mg/kg]	<b>Sn</b> [mg/kg]	<b>Sr</b> [mg/kg]
<b>Z.O8</b>	<0,8	381,69	<0,8	<0,8	458,53	<0,8	22,22
<b>Z.G1</b>	<0,8	98,25	<0,8	<0,8	715,82	<0,8	10,82
<b>Z.H1</b>	<0,8	94,29	<0,8	<0,8	885,54	<0,8	8,20
<b>Z.H4</b>	<0,8	120,11	<0,8	<0,8	663,87	<0,8	11,11
<b>Z.M1</b>	<0,8	185,79	<0,8	<0,8	526,96	<0,8	15,46
<b>Z.N4</b>	<0,8	276,17	<0,8	<0,8	433,17	<0,8	16,99
<b>Z.K0</b>	<1	3328,46	1,86	<1	752,92	<1	37,53
<b>Z.K8</b>	1,57	1562,99	1,75	<1	973,62	<1	35,31
<b>Z.J0</b>	1,21	2242,63	1,27	<1	848,23	<1	34,03
<b>Z.J5</b>	1,59	1394,37	1,45	<1	878,27	<1	93,60

Continua a pag. 91

	<b>Ti</b> [mg/kg]	<b>Tl</b> [mg/kg]	<b>V</b> [mg/kg]	<b>Zn</b> [mg/kg]
<b>Z.O8</b>	0,14	<0,8	<0,15	3,89
<b>Z.G1</b>	0,09	<0,8	<0,15	3,79
<b>Z.H1</b>	0,14	<0,8	<0,15	3,57
<b>Z.H4</b>	0,06	<0,8	<0,15	3,87
<b>Z.M1</b>	0,08	<0,8	<0,15	3,88
<b>Z.N4</b>	0,11	<0,8	<0,15	3,84
<b>Z.K0</b>	8,67	<1	1,01	1,87
<b>Z.K8</b>	11,00	<1	2,08	4,01
<b>Z.J0</b>	11,71	<1	2,31	3,09
<b>Z.J5</b>	8,19	<1	0,90	4,52
	<b>N Tot.</b> [%]	<b>C Tot.</b> [%]	<b>C Org.</b> [%]	<b>C Inorg.</b> [%]
<b>Z.O8</b>	0,09	46,24	0,16	46,40
<b>Z.G1</b>	0,13	46,18	0,21	46,39
<b>Z.H1</b>	0,11	47,12	0,19	47,31
<b>Z.H4</b>	0,11	46,40	0,24	46,64
<b>Z.M1</b>	0,11	46,92	0,16	47,08
<b>Z.N4</b>	0,10	46,50	0,14	46,64
<b>Z.K0</b>	0,76	49,66	49,43	0,23
<b>Z.K8</b>	0,77	47,63	47,49	0,14
<b>Z.J0</b>	0,76	48,46	48,29	0,17
<b>Z.J5</b>	0,67	47,1	44,84	2,26

**Appendice I. Contenuto elementare; tronco Piavon**

	<b>Ag</b> [mg/kg]	<b>Al</b> [mg/kg]	<b>As</b> [mg/kg]	<b>B</b> [mg/kg]	<b>Ba</b> [mg/kg]	<b>Be</b> [mg/kg]	<b>Ca</b> [mg/kg]
<b>P.M2</b>	<0,15	2,09	<1	4,20	10,32	<0,1	3702,49
<b>P.O1</b>	<0,15	24,64	<0,8	4,93	8,09	<0,08	3643,79
<b>P.O2</b>	<0,15	10,62	<0,8	4,96	6,91	<0,08	3450,26
<b>P.G2</b>	<0,15	3,58	<0,8	4,53	10,84	<0,08	3962,61
<b>P.H6</b>	<0,15	5,34	<0,8	7,07	40,86	<0,08	5925,43
<b>P.M6</b>	<0,15	2,55	<0,8	5,19	14,32	<0,08	4368,70
<b>P. Deg.</b>	<0,15	1387,91	15,99	22,84	187,98	0,24	17041,46
	<b>Cd</b> [mg/kg]	<b>Co</b> [mg/kg]	<b>Cr</b> [mg/kg]	<b>Cu</b> [mg/kg]	<b>Fe</b> [mg/kg]	<b>Hg</b> [mg/kg]	<b>K</b> [mg/kg]
<b>P.M2</b>	<0,1	<0,2	<0,2	2,08	373,53	<0,08	33,58
<b>P.O1</b>	<0,08	<0,08	0,20	2,68	338,68	<0,08	53,67
<b>P.O2</b>	<0,08	<0,08	0,27	3,11	283,27	<0,08	43,81
<b>P.G2</b>	<0,08	<0,08	0,13	1,85	1034,08	<0,08	36,73
<b>P.H6</b>	<0,08	<0,08	<0,08	1,63	3470,37	<0,08	38,37
<b>P.M6</b>	<0,08	<0,08	<0,08	2,07	886,76	<0,08	40,43
<b>P. Deg.</b>	0,11	1,93	2,48	5,14	36366,83	<0,08	461,17
	<b>Li</b> [mg/kg]	<b>Mg</b> [mg/kg]	<b>Mn</b> [mg/kg]	<b>Mo</b> [mg/kg]	<b>Na</b> [mg/kg]	<b>Ni</b> [mg/kg]	<b>P</b> [mg/kg]
<b>P.M2</b>	0,29	398,10	16,46	<0,5	56,27	<0,5	9,09
<b>P.O1</b>	<0,08	578,32	17,77	<0,15	140,61	0,42	29,26
<b>P.O2</b>	<0,08	570,65	16,30	<0,15	147,40	0,28	19,52
<b>P.G2</b>	<0,08	585,70	19,44	<0,15	136,50	0,25	9,60
<b>P.H6</b>	<0,08	661,62	26,80	<0,15	136,48	0,16	16,89
<b>P.M6</b>	<0,08	608,53	17,00	<0,15	140,74	0,17	8,87
<b>P. Deg.</b>	1,30	1941,32	199,40	1,09	121,22	2,45	1177,09

Continua a pag. 93

	<b>Pb</b> [mg/kg]	<b>S</b> [mg/kg]	<b>Sb</b> [mg/kg]	<b>Se</b> [mg/kg]	<b>Si</b> [mg/kg]	<b>Sn</b> [mg/kg]	<b>Sr</b> [mg/kg]
<b>P.M2</b>	1,46	108,13	<0,8	<1	156,45	<0,8	10,16
<b>P.O1</b>	<0,8	228,30	<0,8	<0,8	517,08	<0,8	9,90
<b>P.O2</b>	<0,8	177,04	<0,8	<0,8	505,60	<0,8	9,22
<b>P.G2</b>	<0,8	92,65	<0,8	<0,8	509,60	<0,8	13,65
<b>P.H6</b>	<0,8	106,52	<0,8	<0,8	616,68	<0,8	19,89
<b>P.M6</b>	<0,8	91,12	<0,8	<0,8	570,29	<0,8	12,85
<b>P. Deg.</b>	7,83	5209,07	<0,8	1,76	335,56	<0,8	62,81
	<b>Ti</b> [mg/kg]	<b>Tl</b> [mg/kg]	<b>V</b> [mg/kg]	<b>Zn</b> [mg/kg]			
<b>P.M2</b>	0,69	<0,8	<0,5	0,32			
<b>P.O1</b>	1,13	<0,8	<0,15	4,11			
<b>P.O2</b>	0,70	<0,8	<0,15	4,73			
<b>P.G2</b>	0,62	<0,8	<0,15	3,87			
<b>P.H6</b>	0,34	<0,8	<0,15	3,72			
<b>P.M6</b>	0,24	<0,8	<0,15	3,84			
<b>P. Deg.</b>	21,43	<0,8	4,77	10,28			
	<b>N Tot.</b> [%]	<b>C Tot.</b> [%]	<b>C Org.</b> [%]	<b>C Inorg.</b> [%]			
<b>P.M2</b>	0,30	45,77	45,59	0,18			
<b>P.O1</b>	0,2	47,75	47,56	0,19			
<b>P.O2</b>	0,16	47,50	47,37	0,13			
<b>P.G2</b>	0,12	46,76	46,65	0,11			
<b>P.H6</b>	0,13	46,92	46,78	0,14			
<b>P.M6</b>	0,12	46,86	46,73	0,13			
<b>P. Deg.</b>	0,97	43,12	42,95	0,17			



**Appendice J. Contenuto elementare; controllo**

	<b>Ag</b> [mg/kg]	<b>Al</b> [mg/kg]	<b>As</b> [mg/kg]	<b>B</b> [mg/kg]	<b>Ba</b> [mg/kg]	<b>Be</b> [mg/kg]	<b>Ca</b> [mg/kg]
C	<0,1	4,29	<1	2,75	13,54	<0,1	374,26
	<b>Cd</b> [mg/kg]	<b>Co</b> [mg/kg]	<b>Cr</b> [mg/kg]	<b>Cu</b> [mg/kg]	<b>Fe</b> [mg/kg]	<b>Hg</b> [mg/kg]	<b>K</b> [mg/kg]
C	<0,1	<0,2	0,40	1,61	2,51	<0,5	598,21
	<b>Li</b> [mg/kg]	<b>Mg</b> [mg/kg]	<b>Mn</b> [mg/kg]	<b>Mo</b> [mg/kg]	<b>Na</b> [mg/kg]	<b>Ni</b> [mg/kg]	<b>P</b> [mg/kg]
C	0,49	38,32	14,66	<0,5	19,27	0,49	90,03
	<b>Pb</b> [mg/kg]	<b>S</b> [mg/kg]	<b>Sb</b> [mg/kg]	<b>Se</b> [mg/kg]	<b>Si</b> [mg/kg]	<b>Sn</b> [mg/kg]	<b>Sr</b> [mg/kg]
C	<1	83,33	0,85	<1	11,83	<1	<1
	<b>Ti</b> [mg/kg]	<b>Tl</b> [mg/kg]	<b>V</b> [mg/kg]	<b>Zn</b> [mg/kg]			
C	0,46	<1	<0,5	0,83			
	<b>N Tot.</b> [%]	<b>C Tot.</b> [%]	<b>C Org.</b> [%]	<b>C Inorg.</b> [%]			
C	0,29	45,78	45,64	0,14			

**Appendice K. Variazioni percentuali del contenuto elementare rispetto al controllo**

	<b>Al</b> [mg/kg]	<b>As</b> [mg/kg]	<b>B</b> [mg/kg]	<b>Ba</b> [mg/kg]	<b>Ca</b> [mg/kg]	<b>Cu</b> [mg/kg]
<b>Z. Centro</b>	+9%	ND	+105%	+80%	+1220%	+29%
<b>Z. Interno</b>	-15%	ND	+85%	+90%	+1468%	+23%
<b>Z. Esterno</b>	-22%	ND	+179%	+258%	+1715%	+19%
<b>Z. Deg. Int.</b>	+11448%	ND	+470%	182%	+2120%	+327%
<b>Z. Deg. Est.</b>	+8026%	ND	+923%	+987%	+4196%	+268%
<b>P. Deg. Est.</b>	+32229%	ND	+730%	+1288%	+4453%	+220%
<b>P. Esterno</b>	+4%	ND	+111%	+91%	+1221%	+8%
<b>P. Int.</b>	-46%	ND	+71%	-9%	+978%	+29%
<b>P. Centro</b>	+311%	ND	+80%	-45%	+848%	+80%
<b>Controllo</b>	0%	ND	0%	0%	0%	0%
	<b>Fe</b> [mg/kg]	<b>K</b> [mg/kg]	<b>Mg</b> [mg/kg]	<b>Mn</b> [mg/kg]	<b>Na</b> [mg/kg]	<b>Ni</b> [mg/kg]
<b>Z. Centro</b>	+137163%	-94%	+1715%	+285%	+526%	-43%
<b>Z. Interno</b>	+114652%	-95%	+1769%	+254%	+561%	-61%
<b>Z. Esterno</b>	+90934%	-95%	+1902%	+224%	+572%	-32%
<b>Z. Deg. Int.</b>	+274449%	-70%	+2422%	+6494%	+162%	+222%
<b>Z. Deg. Est.</b>	+905179%	-51%	+4587%	+12152%	+299%	+1894%
<b>P. Deg. Est.</b>	+1450257%	-23%	+4966%	+1260%	+529%	+403%
<b>P. Esterno</b>	+89722%	-94%	+1528%	+58%	+608%	-58%
<b>P. Int.</b>	+25031%	-94%	+1213%	+14%	+411%	ND
<b>P. Centro</b>	+12302%	-92%	+1399%	+16%	+647%	-29%
<b>Controllo</b>	0%	0%	0%	0%	0%	0%

Continua a pag. 96

	<b>P</b> <b>[mg/kg]</b>	<b>S</b> <b>[mg/kg]</b>	<b>Si</b> <b>[mg/kg]</b>	<b>Sr</b> <b>[mg/kg]</b>	<b>Ti</b> <b>[mg/kg]</b>	<b>Zn</b> <b>[mg/kg]</b>
<b>Z. Centro</b>	-78%	295%	3669%	ND	-73%	364%
<b>Z. Interno</b>	-91%	123%	4354%	ND	-84%	366%
<b>Z. Esterno</b>	-87%	25%	6283%	ND	-79%	350%
<b>Z. Deg. Int.</b>	1370%	3243%	6667%	ND	2096%	198%
<b>Z. Deg. Est.</b>	1618%	1674%	7727%	ND	1968%	411%
<b>P. Deg. Est.</b>	1207%	6151%	2736%	ND	4519%	1133%
<b>P. Esterno</b>	-85%	20%	4660%	ND	3%	355%
<b>P. Int.</b>	-90%	20%	2972%	ND	0%	149%
<b>P. Centro</b>	-73%	143%	4222%	ND	96%	431%
<b>Controllo</b>	0%	0%	0%	ND	0%	0%

**Appendice L. Resistenza alla compressione parallela alle fibre; tronco Zero**

	<b>MV</b> [g/cm <sup>3</sup> ]	<b>Fm</b> [N]	<b>ET</b> [N/mm <sup>2</sup> ]	<b>Rm</b> [N/mm <sup>2</sup> ]
<b>z.H1</b>	0,92	23271,00	1215,00	22,00
<b>z.H2</b>	0,84	17298,00	764,00	16,00
<b>z.H3</b>	0,88	17119,00	842,00	16,00
<b>z.H4</b>	0,89	15402,00	639,00	14,00
<b>z.H5</b>	0,82	14629,00	724,00	15,00
<b>z.G6</b>	0,96	>25000,00	947,00	25,00
<b>z.H6</b>	0,90	19338,00	1568,00	20,00
<b>z.H7</b>	0,89	>25000,00	676,00	23,00
<b>z.L1</b>	0,89	>25000,00	1105,00	25,00
<b>z.M1</b>	0,88	22289,00	696,00	22,00
<b>z.L2</b>	0,76	11285,00	514,00	13,00
<b>z.M2</b>	0,82	15328,00	744,00	16,00
<b>z.L3</b>	0,85	22289,00	916,00	21,00
<b>z.M3</b>	0,82	22417,00	719,00	21,00
<b>z.L4</b>	0,82	20884,00	934,00	19,00
<b>z.M4</b>	0,95	20261,00	1383,00	22,00
<b>z.L5</b>	0,86	20558,00	962,00	20,00
<b>z.L6</b>	0,93	>25000,00	1896,00	25,00
<b>z.M6</b>	0,92	>25000,00	1648,00	25,00
<b>z.L7</b>	0,95	>25000,00	911,00	24,00
<b>z.M7</b>	0,83	24785,00	800,00	23,00
<b>z.N4</b>	0,89	17656,00	910,00	18,00
<b>z.O8</b>	0,90	>25000,00	1095,00	26,00
<b>Media (rotti)</b>				
	0,86	19359,65	923,00	18,94
<b>Dev. St. <math>\sigma</math> (rotti)</b>				
	0,05	3807,40	292,22	3,38
<b>Max (rotti)</b>				
	0,95	24785,00	1568,00	24,00
<b>Min (rotti)</b>				
	0,76	11285,00	514,00	13,00

## Appendice M. Durezza; tronco Zero

	RADIALE			TANGENZIALE			TRASVERSALE		
	D1 [mm]	D2 [mm]	HB [N/mm <sup>2</sup> ]	D1 [mm]	D2 [mm]	HB [N/mm <sup>2</sup> ]	D1 [mm]	D2 [mm]	HB [N/mm <sup>2</sup> ]
<b>z.Q1</b>	4,48	4,72	5,68	4,63	4,43	5,86	3,98	4,08	7,51
<b>z.Q2</b>	5,62	5,31	3,92	5,55	5,79	3,61	3,61	3,89	8,72
<b>z.Q4</b>	4,36	4,78	5,75	4,95	4,53	5,32	3,70	3,64	9,12
<b>z.Q5</b>	4,49	4,94	5,39	3,75	4,50	7,15	4,60	4,79	5,44
<b>z.Q6</b>	5,48	4,52	4,76	3,87	3,90	8,11	5,77	3,57	5,50
<b>z.R3</b>	5,58	5,83	3,56	4,80	4,74	5,26	4,76	4,83	5,20
<b>z.R5</b>	5,70	5,56	3,67	4,23	4,74	6,00	3,56	3,60	9,59
<b>Media</b>	5,10	5,09	4,68	4,54	4,66	5,90	4,28	4,06	7,30
<b>D. S. (<math>\sigma</math>)</b>	0,62	0,48	0,96	0,64	0,57	1,44	0,81	0,54	1,90
<b>Max</b>	5,70	5,83	5,75	5,55	5,79	8,11	5,77	4,83	9,59
<b>Min</b>	4,36	4,52	3,56	3,75	3,90	3,61	3,56	3,57	5,20

**Appendice N. Resistenza alla compressione parallela alle fibre; tronco Piavon**

	<b>MV</b> [g/cm <sup>3</sup> ]	<b>Fm</b> [N]	<b>ET</b> [N/mm <sup>2</sup> ]	<b>Rm</b> [N/mm <sup>2</sup> ]
<b>p.G1</b>	0,77	22235,00	788,00	21,00
<b>p.G2</b>	0,77	22920,00	1786,00	22,00
<b>p.G3</b>	0,73	20723,00	1483,00	20,00
<b>p.H1</b>	0,82	>25000,00	1534,00	24,00
<b>p.H2</b>	0,76	22333,00	1882,00	22,00
<b>p.H3</b>	0,76	23162,00	1662,00	22,00
<b>p.H4</b>	0,69	12667,00	1132,00	12,00
<b>p.L1</b>	0,83	>25000,00	1637,00	24,00
<b>p.L2</b>	0,81	21404,00	1349,00	21,00
<b>p.L3</b>	0,80	24320,00	1942,00	23,00
<b>p.M1</b>	0,82	>25000,00	2084,00	24,00
<b>p.M2</b>	0,82	21423,00	1117,00	21,00
<b>p.M3</b>	0,84	>25000,00	2421,00	24,00
<b>p.N1</b>	0,80	>25000,00	3270,00	24,00
<b>p.N2</b>	0,77	20409,00	816,00	20,00
<b>p.N3</b>	0,86	>25000,00	2145,00	24,00
<b>p.N4</b>	0,85	>25000,00	2189,00	24,00
<b>p.N6</b>	0,85	15914,00	1194,00	16,00
<b>p.O1</b>	0,61	17063,00	1712,00	17,00
<b>p.O2</b>	0,68	17383,00	1013,00	17,00
<b>Media (rotti)</b>				
	0,75	17932,67	1222,67	17,33
<b>Dev. St. <math>\sigma</math> (rotti)</b>				
	0,06	4734,34	442,56	4,58
<b>Max (rotti)</b>				
	0,85	24320,00	1942,00	23,00
<b>Min (rotti)</b>				
	0,61	9335,00	413,00	9,00

**Appendice O. Durezza; tronco Piavon**

	RADIALE			TANGENZIALE			TRASVERSALE		
	D1 [mm]	D2 [mm]	HB [N/mm2]	D1 [mm]	D2 [mm]	HB [N/mm2]	D1 [mm]	D2 [mm]	HB [N/mm2]
<b>p.P1</b>	5,70	4,99	4,12	4,65	4,74	5,44	4,14	4,20	6,98
<b>p.Q1</b>	5,11	4,86	4,78	4,22	4,70	6,06	3,97	3,96	7,77
<b>p.Q4</b>	4,42	4,45	6,13	4,22	4,45	6,43	4,22	4,45	6,43
<b>p.Q2</b>	5,51	5,48	3,87	5,51	5,48	3,87	4,46	4,50	6,00
<b>p.R2</b>	5,60	5,24	3,99	4,45	4,61	5,88	4,04	4,28	7,02
<b>p.Q3</b>	6,46	6,60	2,62	4,59	5,16	5,02	4,59	4,39	5,98
<b>Media</b>	5,47	5,27	4,25	4,61	4,86	5,45	4,24	4,30	6,70
<b>D. S. (<math>\sigma</math>)</b>	0,68	0,74	1,16	0,48	0,39	0,92	0,24	0,20	0,69
<b>Max</b>	6,46	6,60	6,13	5,51	5,48	6,43	4,59	4,50	7,77
<b>Min</b>	4,42	4,45	2,62	4,22	4,45	3,87	3,97	3,96	5,98

**Appendice P. Resistenza alla compressione parallela alle fibre; controllo**

	<b>MV</b> [g/cm <sup>3</sup> ]	<b>Fm</b> [N]	<b>ET</b> [N/mm <sup>2</sup> ]	<b>Rm</b> [N/mm <sup>2</sup> ]
<b>CC1</b>	0,71	>25000,00	3022,00	24,00
<b>CC2</b>	0,70	22650,00	1157,00	22,00
<b>CC3</b>	0,70	24392,00	2982,00	24,00
<b>CC4</b>	0,70	>25000,00	2620,00	24,00
<b>CC5</b>	0,70	23018,00	1720,00	22,00
<b>CC6</b>	0,68	23365,00	2405,00	23,00
<b>CC7</b>	0,75	>25000,00	3049,00	24,00
<b>CC8</b>	0,73	>25000,00	3064,00	24,00
<b>CC9</b>	0,68	23535,00	2301,00	23,00
<b>CC10</b>	0,70	23550,00	1911,00	23,00
<b>CC11</b>	0,73	>25000,00	1647,00	25,00
<b>CC12</b>	0,67	23216,00	2177,00	23,00
<b>CC13</b>	0,68	21764,00	2459,00	22,00
<b>CC14</b>	0,75	>25000,00	3144,00	24,00
<b>CC15</b>	0,70	22460,00	2358,00	22,00
<b>CC16</b>	0,75	>25000,00	2799,00	24,00
<b>CC17</b>	0,74	24963,00	2944,00	25,00
<b>CC18</b>	0,70	23041,00	2228,00	23,00
<b>CC19</b>	0,68	19828,00	972,00	19,00
<b>CC20</b>	0,72	>25000,00	2835,00	24,00
<b>CC21</b>	0,74	>25000,00	2713,00	24,00
<b>CC22</b>	0,67	22460,00	2464,00	22,00
<b>CC23</b>	0,72	23889,00	2378,00	23,00
<b>CC24</b>	0,71	>25000,00	2897,00	24,00
<b>CC25</b>	0,71	>25000,00	2818,00	24,00
<b>CC26</b>	0,70	21888,00	1825,00	21,00
<b>CC27</b>	0,75	24426,00	3119,00	24,00
<b>CC28</b>	0,68	22875,00	2233,00	22,00
<b>CC29</b>	0,73	23822,00	2562,00	23,00

Continua a pag. 102



<b>CC30</b>	0,71	22531,00	1176,00	22,00
<b>CC31</b>	0,71	19919,00	1567,00	19,00
<b>CC32</b>	0,73	23418,00	2511,00	23,00
<b>CC33</b>	0,73	23949,00	2240,00	23,00
<b>CC34</b>	0,71	24803,00	2799,00	24,00
<b>CC35</b>	0,73	>25000,00	2898,00	24,00
<b>CC36</b>	0,74	24180,00	1131,00	24,00
<b>CC37</b>	0,69	21886,00	981,00	21,00
<b>CC38</b>	0,70	20742,00	2154,00	20,00
<b>CC39</b>	0,74	>25000,00	3213,00	24,00
<b>CC40</b>	0,70	24604,00	2837,00	24,00
<b>CC41</b>	0,73	>25000,00	3262,00	24,00
<b>CC42</b>	0,73	>25000,00	2971,00	24,00
<b>CC43</b>	0,75	>25000,00	2966,00	24,00
<b>CC44</b>	0,70	>25000,00	2331,00	24,00
<b>CC45</b>	0,73	24814,00	2739,00	24,00
<b>CC46</b>	0,72	>25000,00	2863,00	24,00
<b>CC47</b>	0,69	23632,00	1945,00	23,00
<b>CC48</b>	0,73	>25000,00	3101,00	24,00
<b>CC49</b>	0,74	>25000,00	2919,00	24,00
<b>CC50</b>	0,67	23487,00	1974,00	22,00
<b>CC51</b>	0,68	22307,00	1987,00	22,00
<b>CC52</b>	0,74	>25000,00	2707,00	24,00
<b>CC53</b>	0,69	24121,00	2693,00	23,00
<b>CC54</b>	0,73	23931,00	2454,00	23,00
<b>CC55</b>	0,74	24166,00	2716,00	23,00
<b>Media (rotti)</b>	0,70	23165,65	2179,38	22,53
<b>Dev. St. <math>\sigma</math> (rotti)</b>	0,02	1289,93	587,58	1,35
<b>Max (rotti)</b>	0,75	24963,00	3119,00	25,00
<b>Min (rotti)</b>	0,67	19828,00	972,00	19,00

## Appendice Q. Durezza; controllo

	RADIALE			TANGENZIALE			TRASVERSALE		
	D1 [mm]	D2 [mm]	HB [N/mm <sup>2</sup> ]	D1 [mm]	D2 [mm]	HB [N/mm <sup>2</sup> ]	D1 [mm]	D2 [mm]	HB [N/mm <sup>2</sup> ]
<b>CD1</b>	7,40	5,96	2,49	5,20	5,50	4,10	4,44	4,26	6,39
<b>CD2</b>	5,82	5,87	3,37	6,53	6,51	2,63	4,02	4,11	7,37
<b>CD3</b>	6,13	5,86	3,19	6,06	6,93	2,66	4,03	3,91	7,75
<b>CD4</b>	5,70	6,15	3,27	5,61	6,35	3,21	3,99	4,28	7,11
<b>CD5</b>	6,01	5,46	3,52	5,68	6,05	3,35	4,42	4,73	5,75
<b>CD6</b>	5,93	5,50	3,55	6,25	5,63	3,26	4,42	4,28	6,39
<b>CD7</b>	6,21	6,50	2,79	5,36	4,76	4,63	4,08	4,22	7,06
<b>CD8</b>	6,72	5,78	2,90	6,33	6,28	2,85	4,58	4,47	5,88
<b>CD9</b>	5,85	5,72	3,46	4,67	4,92	5,20	4,39	4,23	6,53
<b>CD10</b>	5,40	5,73	3,76	4,84	5,45	4,47	4,20	4,26	6,77
<b>CD11</b>	6,12	6,17	3,02	6,19	6,33	2,89	4,47	4,31	6,28
<b>CD12</b>	5,35	5,07	4,35	5,68	4,67	4,41	4,32	4,26	6,59
<b>CD13</b>	5,97	5,41	3,58	5,91	6,09	3,19	4,31	4,43	6,33
<b>CD14</b>	6,66	6,71	2,48	5,54	5,93	3,53	4,28	4,27	6,62
<b>CD15</b>	5,77	6,05	3,29	5,43	6,53	3,21	4,27	4,55	6,21
<b>CD16</b>	4,81	5,83	4,16	5,41	5,33	4,06	4,44	4,44	6,12
<b>CD17</b>	6,17	6,12	3,02	5,61	5,78	3,58	4,12	4,38	6,70
<b>CD18</b>	5,78	6,48	3,04	6,37	6,19	2,87	4,12	4,08	7,24
<b>CD19</b>	5,66	5,98	3,40	6,52	6,10	2,84	4,52	4,41	6,05
<b>CD20</b>	5,53	5,52	3,83	4,80	5,70	4,28	4,35	4,20	6,63
<b>Media</b>	5,95	5,89	3,32	5,70	5,85	3,56	4,29	4,30	6,59
<b>D. S. (<math>\sigma</math>)</b>	0,55	0,40	0,49	0,57	0,61	0,75	0,18	0,18	0,52
<b>Max</b>	7,40	6,71	4,35	6,53	6,93	5,20	4,58	4,73	7,75
<b>Min</b>	4,81	5,07	2,48	4,67	4,67	2,63	3,99	3,91	5,75