



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA
DIPARTIMENTO TERRITORIO E SISTEMI AGRO-FORESTALI

Corso di laurea magistrale in Scienze forestali e ambientali

**Metodo sperimentale per la stima dei carichi a
compressione su elementi strutturali lignei in opera**

Relatore:
Prof.ssa Tiziana Urso
Correlatore:
Dott. Martino Negri

Laureando:
Giandomenico Lombino
Matricola n. 1058417

ANNO ACCADEMICO 2014-2015

Ringraziamenti

Si ringrazia il Dott. Martino Negri per le indicazioni utili alla stesura di questo lavoro.

I tecnici dell'IVALSA di San Michele all'Adige, sempre disponibili nel risolvere i problemi affrontati durante le prove di laboratorio.

Il personale dell'IVALSA per l'accoglienza.

Un ringraziamento particolare va alla mia famiglia che mi ha permesso di conseguire il titolo di laurea e a Miriam, costantemente presente.

Indice

Riassunto.....	3
Abstract.....	4
1 INTRODUZIONE.....	5
1.1 Generalità.....	5
1.2 Caratteristiche del legno.....	7
1.2.1 Composizione chimica del legno.....	7
1.2.2 Caratteristiche meccaniche del legno.....	10
1.2.2.1 Composizione e deformabilità del legno.....	10
1.2.2.2 Elasticità e moduli di elasticità.....	11
1.2.3 Il comportamento longitudinale.....	14
1.2.3.1 Carichi a compressione assiale.....	14
1.2.3.2 I fattori d'influenza sulla compressione assiale.....	16
1.2.3.4 I fattori d'influenza sulla trazione assiale.....	19
1.2.4 Caratteristiche fisiche del legno.....	22
1.2.4.1 Relazione tra legno ed elettricità.....	22
1.2.4.2 Massa volumica.....	23
1.2.4.3 Ritiri e rigonfiamenti.....	24
1.2.5 Tensioni interne del legno.....	26
1.2.6 Legno di reazione.....	29
1.3. Il legno di castagno.....	30
1.4. Obiettivi del lavoro di tesi.....	32
2 MATERIALI E METODI.....	34
2.1 I provini.....	34
2.1.1 Codice identificativo dei campioni e delle prove.....	37
2.2 La strumentazione.....	39
2.2.1 Il distanziometro Keyence LK-G32.....	39
2.2.2 La Pressa idraulica.....	41
2.2.3 L'igrometro elettrico.....	42
2.2.4 Il calibro meccanico.....	44

2.3	Il rilevamento delle deformazioni.....	46
2.4	Altre prove di laboratorio: metodo alternativo di rilevamento dell'umidità del legno.....	51
2.5	Il campionamento risultante.....	54
3	RISULTATI E DISCUSSIONE.....	55
3.1	Umidità con il metodo in matrice.....	55
3.2	Le deformazioni.....	56
3.2.1	Il castagno essiccato.....	57
3.2.2	Il castagno umido.....	59
3.3	L'influenza dell'irregolarità dei campioni sulle deformazioni.....	61
3.4	I gradienti d'umidità.....	66
3.5	Confronto delle deformazioni del castagno e dell'abete rosso.....	72
4	CONCLUSIONE.....	76
5	Appendici.....	78
6	Bibliografia.....	81

Riassunto

Il legno viene frequentemente impiegato come elemento strutturale nelle opere architettoniche o negli edifici in genere.

Nelle strutture moderne, al netto di eventi imprevisi, gli stati tensionali degli elementi corrispondono alle specifiche di progetto; viceversa in strutture storiche modifiche nella destinazione d'uso, assestamenti della struttura, deformazione del terreno ed altri eventi possono determinare sia stati di sovraccarico sia stati di sottocarico nei singoli elementi. Per verificare le forze agenti sugli elementi strutturali esistono apparecchiature e metodologie non distruttive o poco invasive. Tuttavia molte di esse sono inefficaci se gli elementi presentano vincoli al contorno che ne limitano l'impiego a situazioni specifiche.

L'obiettivo della tesi è quello di verificare se generalmente le travi strutturali siano sottoposte a tensioni significative e stimare l'entità dei carichi gravanti su di esse con un metodo poco invasivo e che non presenti le limitazioni di altre metodologie.

Il metodo di determinazione delle tensioni esposto in questo lavoro si basa sulla misurazione della variazione di distanza tra due riferimenti fissati sull'elemento ligneo a seguito dell'asportazione di un piccolo volume di legno.

Le prove di laboratorio hanno consentito di mettere a punto strumenti, metodologia operativa e la taratura del metodo. Il campionamento prevede la misurazione delle deformazioni su travetti di castagno (*Castanea sativa* Miller), a diverse condizioni di umidità, sottoposti a compressione mediante una macchina idraulica. Utilizzando un distanziometro laser ad elevata risoluzione (Keyence LK-G32 con risoluzione di 1/10000 mm), è stato possibile rilevare con accuratezza le deformazioni che si determinano asportando una modesta porzione di volume di legno tra il distanziometro e un riferimento; lo stato tensionale indotto dal carico determina delle deformazioni, la cui ampiezza viene rilevata e registrata.

La sollecitazione ai provini di carichi progressivamente crescenti ha rilevato che le deformazioni indotte sono direttamente proporzionali ai carichi nominali applicati (kg/cm^2). I risultati dell'elaborazione dei dati hanno evidenziato questo comportamento del legno dove la correlazione statistica tra i carichi nominali applicati e le deformazioni micrometriche subite è lineare.

Abstract

Wood is usually used as a structural material in architectural works or in any kind of buildings.

In order to face unexpected events, the state of stress of materials in modern buildings correspond to the estimated values of the project; on the contrary, as for historical structures, changes in their function, their adjustment, the ground deformation and other incidents can be responsible of either overload or underload phenomena in every single element. Non-destructive and non-invasive testing and equipments exist to assess the forces acting on structural elements. Nevertheless, if the elements have some restrictions that limit their use lots of them will be ineffective.

The purpose of this dissertation is to analyze if structural beams undergo significant stresses and to evaluate the loads on them through a minimally invasive method, without the limits of other methodologies.

The method used to determine the stress factors is based on the calculation of the variation of distance between two reference points established on the wooden element, after removing a small wooden piece.

Laboratory tests have provided the instruments, the actual methodology and the calibration of the method. The samples consider the calculation of the deflections in some chestnut beams (*Castanea sativa* Miller), under different humidity conditions and compression through a hydraulic machine. By employing a high-resolution laser distance meter (Keyence Lk-G32 with a resolution of 1/10000 mm), the deflections created between the distance meter and a reference point after the removal of a small piece of wood can be shown accurately; the stress state caused by the load creates some deflections, whose size is revealed and recorded.

By subjecting the beams to progressively increasing loads, the study has proved that the deflections provoked are directly proportional to the nominal loads applied (kg/cm^2). The results of data processing have stressed this feature of the wood, where the statistical correlation between the nominal loads applied and the micrometric deflections is a linear one.

1 INTRODUZIONE

1.1 Generalità

L'utilizzo degli elementi strutturali nel campo delle costruzioni non può prescindere da una profonda conoscenza delle caratteristiche dei materiali stessi. Gli attuali materiali da costruzione quali calcestruzzo, malte, laterizi, acciaio sono caratterizzati dall'essere strutturalmente omogenei e coerenti. Viceversa, il legno è un materiale eterogeneo costituito da diversi tessuti aventi diversi comportamenti meccanici. Il campo di variazione dei componenti del legno sarà tanto più marcato quanto più il volume degli elementi lignei è grande (Giordano, 1999). Per questo motivo si riscontra una diminuzione di alcune proprietà meccaniche con l'aumento delle dimensioni degli elementi in legno; questo fenomeno è noto come "*effetto scala*" (Ceccotti, 1993)¹.

Una differenza che caratterizza il legno dagli altri materiali da costruzione consiste soprattutto nell'influenza dei fattori ambientali e biologici durante la vita in opera degli elementi strutturali. Essi determinano nel legno un'alterazione degradativa alla quale gli altri materiali non sono soggetti² (Giordano, 1999).

Le strutture moderne sono edificate previa verifica dei carichi massimi ammissibili dei singoli elementi strutturali con lo scopo di dare delle garanzie di sicurezza all'opera da costruire. I carichi ammissibili analizzati durante la fase progettuale sono caratterizzati ad esempio dal peso proprio degli elementi, dai carichi permanenti e dai sovraccarichi di varia natura. I carichi permanenti sono fortemente vincolati alla costruzione³ e vengono considerati non rimovibili in quanto funzionali del normale esercizio della struttura.

Le costruzioni, con il passar degli anni, possono subire dei movimenti strutturali relativi all'assestamento della struttura, all'assestamento del terreno su cui posano le fondamenta, alla manutenzione stessa della costruzione oppure al cambiamento della destinazione d'uso. Questi fattori determinano negli elementi strutturali un sovraccarico, riducendo la sicurezza strutturale verificata al momento del progetto.

Gli edifici storici, costruiti solitamente con il connubio di diversi materiali quali legno e laterizio, sono tipicamente sottoposti a stati tensionali che generano delle

¹Cit. in (Giordano, 1981).

²Questa affermazione è vera, anche se bisogna ribadire che i tipici materiali da costruzione si deteriorano con l'azione di forti sbalzi di temperatura o dell'azione di gas o di altri prodotti chimici. Questi agenti di deterioramento, se entro certi limiti, lasciano invece il legno pressoché inalterato (Giordano, 1999).

³Il D.M. LL. PP. n. 156, del 16/01/1996 sulle "*Norme tecniche relative ai Criteri generali per la verifica di sicurezza delle costruzioni e dei carichi e sovraccarichi*" definisce i carichi permanenti come: peso proprio degli elementi, tamponature esterne, divisori interni, massetti, isolamenti, pavimenti e rivestimenti del piano di calpestio, intonaci, controsoffitti, impianti, ecc.,

deformazioni (Tampone, 1996). Se tali tensioni coincidono con quelle verificate al momento della costruzione dell'edificio, quindi al tempo t_0 , non si verificherà un sovraccarico sugli elementi strutturali. Se le tensioni riscontrate al tempo t_1 sono diverse dalle tensioni al tempo t_0 la struttura sarà determinata da un *surplus* di carico che conseguentemente produrrà delle deformazioni (Marzo, 2006).

L'assestamento della struttura nel tempo influisce molto sulla formazione di sovraccarichi quando si parla di materiali da costruzione diversi dal legno. Quest'ultimo oltre alle deformazioni dovute agli assestamenti strutturali subirà un'ulteriore deformazione legata alla degradazione biologica da parte di microrganismi e dell'umidità. Inoltre, dato che il legno è un materiale semi-elastico la durata di applicazione nel tempo dei carichi sugli elementi strutturali produrrà un'ulteriore deformazione (Giordano, 1999).

Il Dott. Martino Negri, ricercatore del CNR IVALS (Consiglio Nazionale delle Ricerche, Istituto per la Valorizzazione del Legno e delle Specie Arboree), ideò un metodo di determinazione dello stato tensionale degli elementi strutturali. Esso è stato applicato sulla catena lignea della cupola del Battistero di San Giovanni Battista in Firenze previa taratura in laboratorio su travi di abete rosso. La metodologia studiata è stata in grado di determinare le tensioni sugli elementi (Negri, 2014).

Il lavoro di tesi qui esposto segue il lavoro sul Battistero con l'obiettivo principale di mettere a punto il sistema di rilevamento delle tensioni su travetti di castagno, e, successivamente, di ricavare una relazione di stima dei carichi tramite le deformazioni rilevate. La necessità di tarare il metodo su due specie differenti nasce dal fatto che le caratteristiche del legno variano da specie a specie. Ciascuna specie legnosa ha peculiarità strutturali, fisiche e meccaniche tali da generare diverse deformazioni alle sollecitazioni indotte.

1.2 Caratteristiche del legno

1.2.1 Composizione chimica del legno

Il legno è formato da un insieme di tessuti costituiti da acqua, lignina, cellulosa, emicellulosa e altre sostanze secondarie quali tannini, gomme, resine, proteine e sali minerali. Un legno perfettamente essiccato ha una composizione chimica stabile e invariabile tra le varie specie legnose. I costituenti elementari sono: il 50 % di carbonio, il 6 % di idrogeno, 43-45 % di ossigeno e pochissimo azoto, circa lo 0.1 %.

L'umidità nel legno varia a seconda dell'età e della stagionatura. Le piante giovani, rispetto alle piante adulte e senili, hanno un contenuto percentuale di umidità più alto. Dopo una lunga stagionatura il legno ha la seguente composizione media: circa l'84 % di sostanze organiche, il 15 % di acqua e l'1 % di sostanze minerali, fra le quali prevalgono il carbonato di calcio e il carbonato di potassio. All'aumentare dell'età del legno si hanno aumenti delle percentuali di carbonio e di conseguenza accresce anche il suo potere calorifico quando viene impiegato come combustibile (Bosetto, et al., 2008).

La cellulosa è il costituente più abbondante e più importante della parete cellulare. Esso è un polisaccaride, formato da un certo numero di molecole semplici disposte in modo definito. La molecola base della cellulosa è il glucosio β -piranosio. Queste molecole si aggregano fra loro, attaccandosi l'una all'altra in maniera da formare una catena filiforme (Giordano, 1981).

Le catene di cellulosa sono strettamente legate tra loro mediante legami idrogeno inter e intra molecolari che si trovano al di sopra e al di sotto degli anelli molecolari, formando in tal modo una *fibrilla elementare*. Queste sono catene filiformi molto sottili dove, lunghe catene di celle elementari o di cellulosa, si dispongono in densi pacchetti di cristalliti ai quali si alternano zone decisamente più lasse. A livello della cristallite l'idratazione è nulla dovuta alla totale mancanza di gruppi OH liberi, mentre nella zona della fibrilla a catene più lasse l'infiltrazione dell'acqua è possibile a causa dei legami ossidrilici liberi. Dunque, a livello delle *fibrilla elementare* distinguiamo una zona in cui le molecole di cellulosa sono fortemente aggregate in una struttura cristallina, e, una zona in cui la cellulosa è libera in una matrice. I cristalliti condizionano soprattutto la rigidità della parete di una fibra, mentre, le zone intercristalliti, condizionano la sua flessibilità e la sua possibilità di idratazione (Giordano, 1981). Le *fibrille elementari* tendono ad impacchettarsi costituendo in tal modo la cosiddetta *microfibrilla*. La *microfibrilla* è un'entità elementare della parete cellulare. Quest'ultima presenta degli spazi interfibrillari

cellulosici dove si vanno ad insediare altre sostanze quali cellulose amorphe, emicellulosa, acidi poliuronici.

La cellulosa pura non è solubile in acqua grazie alla rigidità della struttura filiforme e alla facilità con cui ogni catena di cellulosa si lega con un'altra mediante ponti di H, formando dei veri e propri pacchetti. La cellulosa anche se in acqua non si scioglie ha una certa tendenza a idratarsi facilmente perché i suoi gruppi H e OH⁴, oltre a reagire fra loro, reagiscono frequentemente con l'H₂O del mezzo, rivestendosi di "aloni" d'acqua (Giordano, 1981).

L'emicellulosa fa parte di un gruppo di sostanze - considerate amorphe nonostante la loro struttura cristallina - naturalmente presenti nella parete cellulare di tutte le piante superiori ed inferiori ad eccezione dei batteri. È una sostanza eterogenea dal punto di vista chimico e strutturale e comprende tutti quei polisaccaridi della parete cellulare che sono insolubili nell'acqua e che si sciolgono in alcali a caldo e a freddo. La quantità di emicellulosa presente cambia molto da specie a specie e varia anche la distribuzione spaziale nell'ambito della parete stessa. La composizione chimica delle emicellulose degli alberi varia fra due gruppi di specie, distinguendo le emicellulose delle conifere e quelle delle latifoglie. Nelle emicellulose delle conifere gli zuccheri che ricorrono in maggior quantità sono il mannosio e il galattosio, due esosi, mentre in quelle delle latifoglie lo zucchero dominante è lo xilosio, un pentoso. Una differenza tra le due specie sta anche nella qualità chimica della emicellulosa presente nei loro legni: l'emicellulosa presente nel legno di latifoglia è costituito per il 70-80 % da pentosani, mentre quella presente nel legno delle conifere ne contengono solamente il 30-35 % (Giordano, 1981).

	<i>Cellulosa</i>	<i>Lignina</i>	<i>Emicellulosa</i>	<i>Altre</i>
<i>Conifere</i>	50%	18%	26%	6%
<i>Latifoglie</i>	47%	27%	22%	4%

Tabella 1. Distribuzione di cellulosa, lignina, emicellulosa e altre sostanze nelle conifere e nelle latifoglie (Giordano, 1999).

La lignina è un polimero aromatico tridimensionale di alcuni derivati del fenilpropano. Essa è presente in tutti i tessuti delle piante superiori e non solamente, come si potrebbe erroneamente pensare, nei tessuti legnosi. Nella parete cellulare, la lignina è maggiormente localizzata nella lamella mediana per circa il 50-90 %, e decresce bruscamente di quantità passando dalla parete primaria agli strati più esterni della parete secondaria, fino a raggiungere nello strato S2 anche il 10 %. Nelle fanerogame la quantità

⁴La cellulosa è formata da molecole di glucosio; il glucosio è una molecola anulare con formula chimica C₆H₁₂O₆, dove ciascun carbonio dell'anello presenta dei gruppi ossidrilici e di idrogeno (Tonellato, 2010).

e la qualità di lignina varia dalle Gimnosperme alle Angiosperme. La quantità di lignina presente nelle Gimnosperme è superiore rispetto delle Angiosperme, con differenze anche significative⁵. La quantità di lignina è più abbondante nel legno primaticcio che in quello tardivo, sia parlando del legno delle latifoglie che in quello delle conifere (Giordano, 1981). Questo si può spiegare dalla tipologia di struttura cellulare dei due tipi di legno: nel primaticcio le cellule non sono inspessite mentre nel tardivo si osserverà un inspessimento cellulare determinato dall'aumento di spessore dello strato S2 della parete secondaria.

Le pareti cellulari lignificate hanno una struttura simile a quelle del cemento armato: le *microfibrille* di cellulosa rappresenterebbero i tondelli di ferro, mentre la lignina, che rimpiazza la vecchia matrice plastica durante la lignificazione, serve come una sostanza fondamentale elastica con un'alta resistenza alla compressione (Giordano, 1981).

Le sostanze pectiche fanno parte della famiglia chimica dei poliuronidi, così come la cellulosa fa parte di quella dei polisaccaridi. Esse sono polimeri dell'acido galatturonico⁶, cioè derivano dal galattosio, e sono composti pectici costituiti da molecole uguali; in realtà esistono anche degli acidi poliuronici eteropolimeri.

Le pectine sono il costituente principale della lamella mediana, avente una funzione collante con le cellule dei tessuti vegetali. Esse hanno la tendenza a formare dei composti più o meno solubili, dando la possibilità alle cellule di muoversi le une dalle altre, e, hanno la caratteristica di salificarsi in protopectine a formare il cemento tra le cellule di un tessuto adulto. Difatti le protopectine, che vanno a costituire sempre la parati cellulari, sono insolubili in acqua sia fredda che calda, conferendo una certa rigidità alla parete cellulare. Le pectine propriamente dette sono più facilmente solubili⁷ (Giordano, 1981).

Altre sostanze che possiamo riscontrare sia nella parete cellulare che all'interno del lume cellulare sono gli estrattivi. Queste sostanze vengono definite tali perché possono essere estratte dall'acqua o da particolari solventi inerti⁸. Gli estrattivi prima circolavano liberamente all'interno dei vasi conduttori immersi in una matrice acquosa.

Successivamente al taglio della pianta, l'acqua presente al suo interno evapora e gli elementi presenti nella soluzione si depositano nel lume cellulare, oppure si depositano sottoforma di piccoli ammassi oppure come intrusioni nella parete cellulare (Giordano,

⁵Le Gimnosperme hanno una quantità di lignina che raggiunge il 25-30% del tessuto legnoso, mentre nelle Angiosperme la quantità di lignina è di circa il 19-25% (Giordano, 1981).

⁶L'acido galatturonico deriva dall'ossidazione del gruppo carbonile sul sesto carbonio del galattosio (Wikipediahttp://it.wikipedia.org/wiki/Acido_galatturonico).

⁷La solubilità delle pectine dipende dal numero di sostituzioni dei gruppi metossilici CH₃O con le catene COOH. Le pectine con alto contenuto metossilico, dato il minor numero di COOH liberi e di ioni metallici legati, sono più facilmente solubili (Giordano, 1981).

⁸Si possono ottenere gli estrattivi attraverso: a) corrente di vapore; b) soluzione in acqua; c) soluzione in alcool o alcool-benzolo; d) soluzione in etere (Giordano, 1981).

1981). La maggior parte degli estrattivi rientra nei seguenti gruppi: terpeni, fenoli e derivati, tannini, carboidrati, composti azotati; a questi gruppi devono tuttavia ancora aggiungersi acidi grassi e steroidi (Farmer, 1967).

1.2.2 Caratteristiche meccaniche del legno

1.2.2.1 Composizione e deformabilità del legno

Il fusto arboreo è costituito essenzialmente da tre tipi di tessuto: meccanico, conduttore e parenchimatico. Il tessuto meccanico è il tessuto prevalente nel legno ed è costituito da fibre, cioè cellule a forma fusolare molto allungate disposte in fasci paralleli al midollo e all'asse longitudinale dell'albero. Le cellule così disposte formano una struttura capace di sostenere il fusto e in particolare ad opporre resistenza alle sollecitazioni interne di compressione, derivanti dal peso dell'albero, ed a quelle esterne di flessione indotte dal vento che agisce in particolar modo sulla chioma. Il tessuto conduttore nelle conifere è costituito dallo stesso tessuto meccanico, cioè dalle tracheidi, mentre nelle latifoglie la funzione di conduzione dei succhi linfatici è ascrivibile ai *vasi*⁹ (Tampone, 1996). Il tessuto parenchimatico è costituito da cellule vive contenenti citoplasma e nucleo, e ha la funzione di riserva. Nelle conifere predominano le cellule parenchimatiche che formano i raggi, andando a costituire il *parenchima radiale*: in alcune resinose quali i cipressi, i ginepri e i cedri si riscontrano anche poche cellule parenchimatiche in direzione assiale. Nelle latifoglie il tessuto parenchimatico è maggiormente rappresentato dal *parenchima assiale*, cioè da cellule di riserva frammiste ai vasi e alle fibre ed orientate in senso longitudinale nel corpo legnoso; inoltre, il legno delle latifoglie presenta anche le cellule di riserva dei raggi parenchimatici (Giordano, 1981).

Il comportamento del legno, per quanto concerne le deformazioni relativamente al carico viene definito *visco-elastico*. Durante le sollecitazioni si riscontrano varie fasi:

- le *deformazioni elastiche*, seguono all'incirca la *Legge di Hooke*, con una relazione carichi-deformazioni lineare e proporzionale e il *Modulo E* di elasticità;
- le *deformazioni anelastiche*, considerate residue permanenti;
- le *deformazioni viscose*, che avvengono nel tempo con applicazione di carichi prolungati; esse si manifestano anche con carichi di piccola entità;

⁹I vasi sono cellule a forma tubolare di maggiori dimensioni rispetto alle *fibrotracheidi*, allungate in senso parallelo all'asse del midollo.

- le *deformazioni plastiche*, sono quelle che si verificano quando la tensione tangenziale eguaglia la resistenza allo scorrimento nella direzione della forza applicata per carichi prossimi a quelli di rottura.

Tali considerazioni sono importanti per la progettazione di strutture lignee (Tampone, 1996).

1.2.2.2 Elasticità e moduli di elasticità

L'elasticità è quella proprietà posseduta da certi corpi solidi i quali, al termine delle sollecitazioni al di sotto di una certa entità, riprendono esattamente le dimensioni iniziali. Le deformazioni che un corpo di una certa lunghezza subisce sotto l'azione di una determinata sollecitazione possono essere espresse entro il campo elastico. La seguente relazione definisce tale concetto (Giordano, 1981):

$$\varepsilon = \Delta l / l = k \sigma^n$$

dove Δl sono le deformazioni che un corpo di lunghezza l subisce sotto una sollecitazione σ (N/mm^2) e k e n sono delle costanti specifiche per ogni materiale. La relazione tra carichi e deformazione può anche essere proporzionale lineare secondo quanto afferma la *Legge di Hooke*, nel caso in cui, come per esempio il legno e l'acciaio, le costanti specifiche k e n sono uguali a 1. Dunque, la relazione vista prima verrà scritta in questo modo:

$$\varepsilon = \Delta l / l = \sigma$$

Il k esprime la deformazione elastica per unità di lunghezza e unità di forza applicata all'unità di sezione:

$$k = (\Delta l / l) / \sigma = \varepsilon / \sigma$$

espresso in mm^2/N , e, l'inverso di tale grandezza ci dà il *Modulo di Elasticità di Young*, cioè la seguente espressione:

$$E = 1/k = \sigma / \varepsilon$$

espressa in N/mm^2 , corrispondente a quella forza, puramente ideale, capace di estendere il corpo di una lunghezza pari a quella iniziale, e cioè fino a quando Δl sia pari a l (Giordano, 1981).

Infine, il *Modulo di Elasticità di Young* è una grandezza caratteristica di un determinato materiale che esprime il rapporto tra tensione e deformazione nel caso di condizioni di carico monoassiale ed in caso di comportamento del materiale di tipo "elastico".

Secondo la *Legge di Hooke*, nei materiali e nelle strutture la deformazione è sempre proporzionale al carico applicato. *Hooke* considerò una notevole varietà di cavi, molle e travi di legno e le sottopose a carichi via via crescenti aggiungendo dei pesi sul piatto della bilancia. Dopo varie prove in laboratorio ottenne un grafico della deformazione in funzione del carico che in tutti i casi si dimostrò una linea retta (Grafico 1.1). Inoltre quando il carico veniva progressivamente rimosso, anche il ritorno alle condizioni iniziali era lineare e, nei margini d'errore delle sue misure, tutti gli oggetti riacquistavano la loro lunghezza originale (William, 1959).

Un materiale solido ha la capacità di resistere a una forza applicata, sia in compressione che in trazione, contraendosi o allungandosi. Quando un corpo, rispetto alla sua configurazione normale, cioè quella di riposo, cambia sia in dimensione che in forma possiamo affermare che quel corpo ha subito una deformazione (Grafico 1.2). Questo cambiamento è il risultato di una forza o di una serie di forze che agiscono sul corpo. In contemporanea, come risposta alla nuova deformazione assunta, il corpo equilibra le forze esterne attraverso delle forze interne (William, 1959).

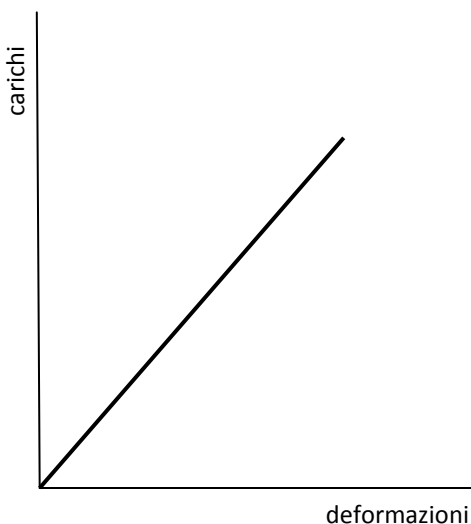


Grafico 1.1. Relazione lineare di *Hooke*.

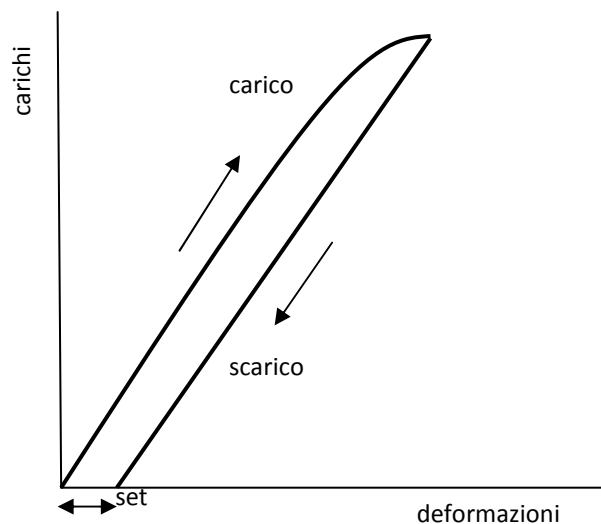


Grafico 1.2. Questo grafico mostra una perdita di forma del provino sottoposto a compressione: con carichi nulli si evidenzia una deformazione residua (set).

Qualsiasi sollecitazione venga applicata ad un corpo induce nello stesso delle deformazioni nella direzione dello sforzo, nonché ortogonalmente a quest'ultimo. Inizialmente, e per sollecitazioni modeste, le deformazioni sono piccole, proporzionali ai

valori delle forze applicate e reversibili, nel senso cioè che al cessare delle sollecitazioni esse scompaiono ed il corpo ritorna nelle condizioni iniziali: ciò significa che si è rimasti nel *campo elastico*.

Sottoponendo il legno a sollecitazioni di compressione o di trazione, l'anisotropia strutturale determina diversi moduli di elasticità E per ciascuna sezione:

- in direzione longitudinale, lungo la fibratura;
- in direzione radiale;
- in direzione tangenziale.

Date le caratteristiche di accrescimento degli alberi è possibile considerare il legno, come un materiale ortotropico, cioè come un materiale le cui caratteristiche in un punto sono semplicemente individuabili sulla base delle caratteristiche individuate per tre direzioni, conseguentemente, tre piani ortogonali (Figura 1.1) rispetto alle quali il materiale si comporta in modo simmetrico nei due versi, positivo e negativo (Giordano, 1999). Per ciascuno di questi tre piani distinguiamo tre diversi moduli di elasticità: modulo di elasticità longitudinale ovvero il *Modulo di Young*, modulo di elasticità radiale e il modulo di elasticità tangenziale.

I fattori di influenza del modulo di elasticità, e più in generale delle caratteristiche meccaniche del legno, sono la temperatura e l'umidità. Con temperature che superano i 102 - 105 °C si ha una riduzione del modulo E dovuto ad un processo di degradazione dei componenti del legno. Per valori costanti della temperatura, il modulo E si mantiene costante, anche se in realtà Giordano (1999) suggerisce di adottare un coefficiente di riduzione al modulo di 0,90 - 0,95. Mentre, si ha un leggero aumento del modulo E quando la temperatura scende al di sotto dei 0°C. Per quanto riguarda l'umidità, E aumenta all'aumentare dell'umidità nel legno fino a un valore massimo che corrisponde al punto di saturazione delle pareti cellulari (Tampone, 1996).

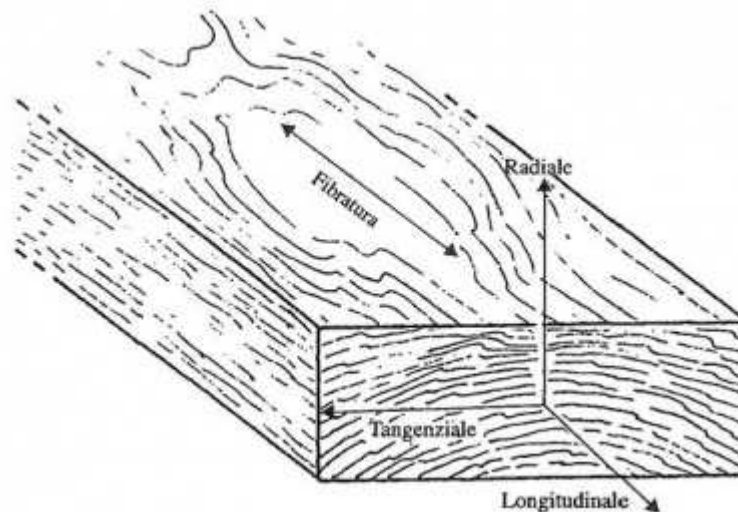


Figura 1. Trave in legno con evidenziate le direzioni dei piani ortogonali: direzione longitudinale, direzione radiale e direzione tangenziale.

1.2.3 Il comportamento longitudinale

1.2.3.1 Carichi a compressione assiale

Secondo i principi elementari delle Scienze delle Costruzioni, la sollecitazione pura a compressione si verifica quando il solido sollecitato ha una lunghezza assiale non troppo elevata rispetto alle dimensioni della base. Il limite della lunghezza si può esprimere attraverso il rapporto fra la lunghezza dell'elemento ed il raggio d'inerzia minimo, cioè il cosiddetto *grado di snellezza*, e, tale parametro, non deve essere superiore a 10. Quando l'elemento è abbastanza lungo da superare la soglia di snellezza si parla, invece, di *compressione in carico di punta* (Giordano, 1999).

Prendendo in esame il diagramma carico-deformazioni (Grafico 1.4) di un provino netto, condizionato all'umidità normale del 12 % e sottoposto alla compressione assiale semplice, il legno si comporta in modo diverso in funzione del carico applicato:

- si distingue una prima fase, dove si riscontra l'adattamento della superficie del provino con le piastre della pressa, la curva è concava verso l'alto;
- una seconda fase definita fase elastica dove è valida la *Legge di Hooke*. Durante la fase di scarico il diagramma mostra un andamento più o meno uguale alla fase di carico, e si riscontra una certa isteresi la quale allo scarico totale mostra un residuo finale di deformazione permanente (Grafico 1.2);
- si riscontra una terza fase, dove, all'aumentare delle sollecitazioni, la proporzionalità lineare finisce e inizia una fase visco-plastica, nella quale, a causa della viscosità del legno, le deformazioni si manifestano rapidamente

con applicazione di piccoli carichi, fino a raggiungere il *picco* o il *punto di rottura*;

- nell'ultima fase, dopo il *punto di rottura*, il diagramma mostra un andamento recessivo, fino ad intersecare l'asse delle x in un punto che corrisponderà alle deformazioni residue dopo lo scarico (Giordano, 1999)

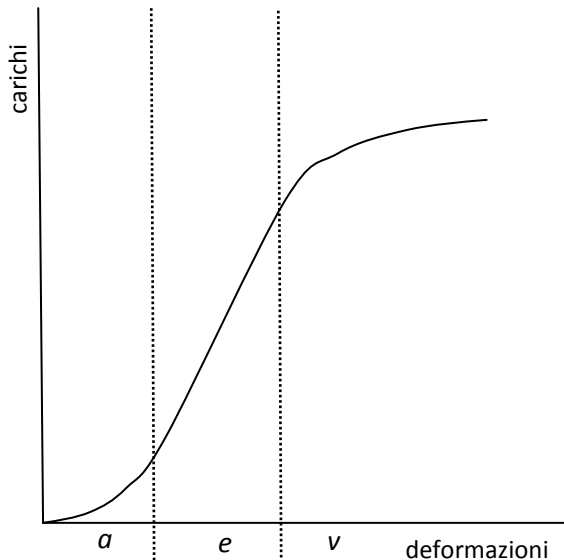


Grafico 1.3. Diagramma di un provino sottoposto a compressione trasversale. Il grafico evidenzia un comportamento elasto-plastico tipico della prova a compressione trasversale.

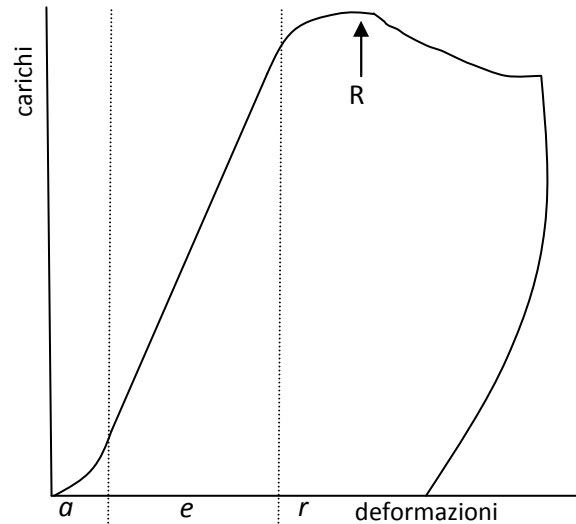


Grafico 1.4. Diagramma carichi-deformazione di un provino sottoposto a compressione assiale.

La struttura del materiale determina l'attivazione di meccanismi di resistenza differenti che implicano una resistenza in direzione radiale molto minore rispetto a quella in direzione longitudinale, soprattutto se queste sono a trazione (Nannei, 2011). Allo stesso modo, la resistenza del legno in funzione della direzione delle sollecitazioni differisce di molto: carichi applicati in senso longitudinale sono maggiormente sopportati dal legno rispetto ai carichi applicati trasversalmente. La resistenza a compressione è circa la metà di quella a trazione, a causa di fenomeni locali di imbozzamento e rottura delle pareti cellulari (Piazza, et al., 2005).

La differenza tra il comportamento a compressione longitudinale e trasversale deriva dalla struttura cellulare; nel caso della compressione assiale il carico agisce su elementi allungati, la cui tendenza a ripiegarsi è impedita dalla stretta connessione tra le fibre, che si comportano seguendo la *Legge di Poisson*¹⁰; di conseguenza, la resistenza a compressione

¹⁰La *Legge di Poisson* esprime il grado di dilatazione o di restringimento trasversale di un determinato materiale in risposta ad una sollecitazione unidirezionale in senso assiale a esso. Il rapporto tra la deformazione trasversale e la deformazione assiale al ceppo è chiamato *coefficiente di Poisson*. I *coefficienti di Poisson* variano all'interno e tra le specie e sono influenzati dall'umidità e dalla gravità specifica (USDA, 1999).

è molto influenzata dagli effetti di confinamento. Nel caso di carico trasversale si ha uno schiacciamento della cavità cellulare per instabilità delle pareti, fino alla chiusura del lume cellulare; le cellule affiancate a quelle soggette al carico oppongono solo un debole contrasto all'allargamento che si accompagna allo schiacciamento, mentre lo strato di cellule sottostanti si deforma a sua volta (Giordano, 1999).

In senso assiale, il diagramma sforzi-deformazione (Grafico 1.4) mostra un comportamento del legno di tipo elastico-lineare almeno fino ad una certa soglia, questo in funzione della specie utilizzata per le prove di compressione.

Per tensioni di compressione trasversale alle fibre il Grafico 1.3 sforzi-deformazione mostra un tratto elastico-lineare più breve rispetto alla compressione assiale, evidenziando una lunga fase plastica e una minore rigidità del legno. Un fattore che può influire significativamente, sul comportamento del legno compresso in senso ortogonale alle fibre, sono gli anelli di crescita. Si distingue un diverso comportamento quando il carico agisce su due piani differenti: il piano radiale, parallelo ai raggi parenchimatici, e il piano tangenziale agli anelli di accrescimento. Nel primo caso il collasso avviene per schiacciamento delle cellule del legno primario, mentre, all'applicazione del carico in senso tangenziale avviene uno scivolamento lungo gli anelli di accrescimento (Bodig, et al., 1982). Il maggior contributo alla resistenza del legno in senso radiale, rispetto alla resistenza tangenziale, è riconducibile all'azione irrigidente dei raggi parenchimatici (Giordano, 1999).

1.2.3.2 I fattori d'influenza sulla compressione assiale

I fattori che possono determinare una riduzione della resistenza a compressione assiale sono i difetti strutturali e le condizioni ambientali. Come è stato anticipato nel paragrafo precedente l'inclinazione della fibratura, avente un certo angolo α , influisce sensibilmente in tale riduzione. L'inclinazione delle fibre nei fusti può essere anche molto significativa compromettendo la resistenza del legno. Le travi aventi angoli α di fibratura superiori ai 45° , la prova di compressione assiale si può assimilare alla compressione trasversale (Grafico 1.5) (Giordano, 1981).

Il legno con *fibratura elicoidale* subirà un aumento dell'inclinazione delle fibre durante la fase di stagionatura, secondo una determinata legge: tanto più il legno perde l'umidità per evaporazione tanto più aumenta l'angolo α , con un rapporto tra l'angolo della fibratura a legno stagionato e l'angolo a legno fresco pari a due (Chambers, 2007).

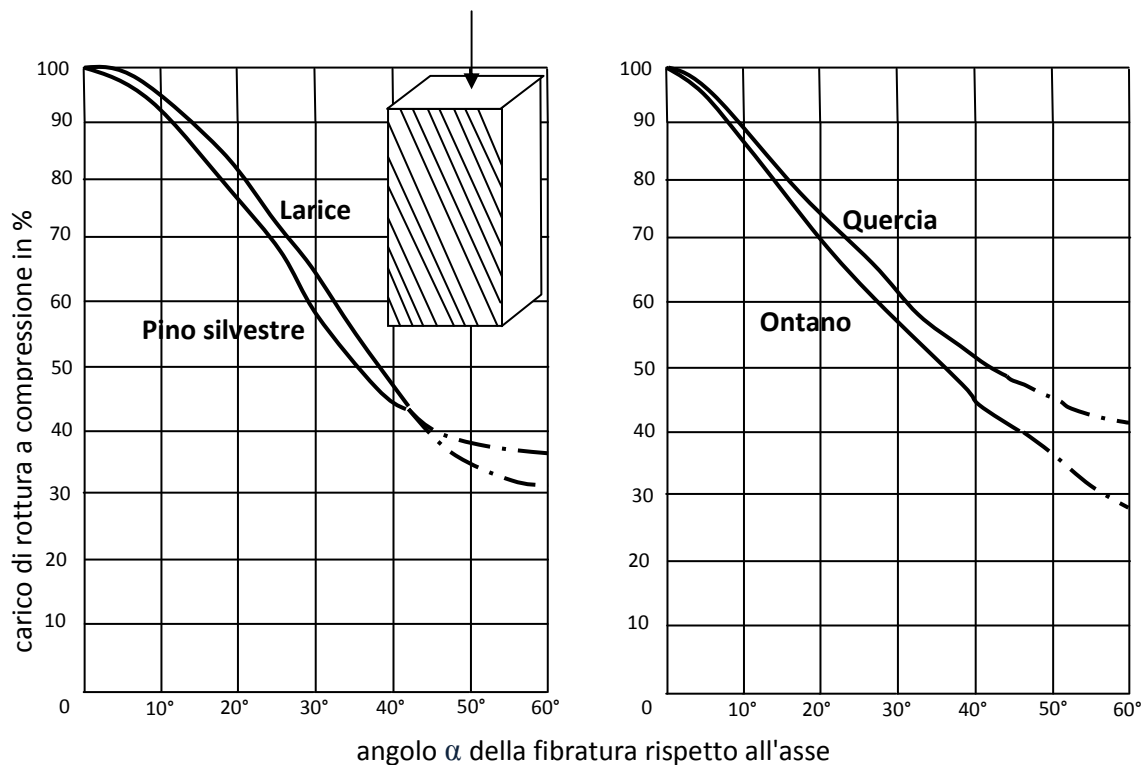


Grafico 1.5. I diagrammi mostrano la correlazione tra il carico di rottura a compressione assiale e l'inclinazione della fibratura delle specie indicate sui grafici. La curva tratteggiata indica angoli di fibratura superiori ai 45°(Giordano, 1999).

La correlazione diretta tra la resistenza a compressione assiale e la massa volumica è riconosciuta da molti autori. Giordano (1981) afferma che questa relazione si riscontra sia nell'ambito della stessa specie legnosa che in molte altre specie; nel secondo caso ci sarà una maggiore variabilità di resistenza. La fittezza e l'aliquota di legno tardivo nell'anello di accrescimento hanno sulla resistenza un'influenza evidente e ciò in funzione del diverso coefficiente di massa volumica tra il legno primaverile e il legno tardivo. L'irregolarità con cui si sussegue la zona a tessuto tardivo e primaverile è una costante nel legno e non è facilmente quantificabile, motivo per la quale, la dipendenza tra la rottura e l'aliquota di tessuto tardivo, è di difficile determinazione.

Qualsiasi legname ha il valore massimo di resistenza quando si trova allo stato secco, e, un valore minimo, quando l'umidità è pari o superiore al punto di saturazione delle pareti cellulari. La capacità di compromissione dell'umidità circa la resistenza del legno è stata sperimentalmente quantificata attraverso dei coefficienti, dove viene attribuito al valore di 12 % di umidità un coefficiente pari a 1, e, al di sopra e al di sotto di tale valore, i coefficienti applicabili alla resistenza rispettivamente diminuiscono e aumentano (Tabella 1.2). Si potrebbe anche affermare, non in modo assoluto ma in relazione alla specie, che a ogni variazione di umidità di 1 % rispetto all'umidità del 12 % corrisponde un aumento o una diminuzione del carico di rottura a compressione assiale del 5 % del carico di rottura a umidità normale (Giordano, 1981).

Umidità %	<i>Abete rosso</i>	<i>Abete bianco</i>	<i>Larice</i>	<i>Pino silvestre</i>	<i>Pioppo</i>	<i>Quercia</i>	<i>Castagno</i>
0%	1,60	1,52	1,47	1,82	1,90	1,80	1,30
5%	1,40	1,32	1,30	1,50	1,32	1,49	1,20
10%	1,12	1,10	1,10	1,13	1,07	1,10	1,08
11%	1,06	1,05	1,05	1,05	1,03	1,05	1,04
12%	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
13%	0,94	0,95	0,95	0,95	0,97	0,96	0,96
14%	0,88	0,91	0,91	0,91	0,94	0,93	0,92
15%	0,82	0,87	0,87	0,86	0,92	0,90	0,89
20%	0,62	0,65	0,71	0,67	0,80	0,75	0,68
40% e oltre (imbibizione totale)	0,42	0,48	0,46	0,46	0,55	0,65	0,57

Tabella 1.2. Variazione della resistenza a compressione assiale in funzione dell'umidità rispetto al contenuto di umidità del legno a 12 %.

L'influenza della temperatura nel pregiudicare la resistenza è di difficile determinazione, ed è complicato dire quale entità delle eventuali variazioni sia dovuta all'azione della temperatura sulle pareti legnose e quale al variare dell'umidità percentuale del legno. La difficoltà è da attribuire alla variazione dello stato igrometrico dell'aria determinato dall'innalzamento o abbassamento della temperatura, che comporta a sua volta un mutamento del contenuto di umidità del legno. La resistenza in compressione assiale del legno diminuisce al crescere della temperatura ma con velocità differente in funzione, come abbiamo detto prima, del contenuto di acqua. Il tempo di condizionamento dei provini alla temperatura indotta in laboratorio influisce, in egual modo, alla resistenza: più il tempo di condizionamento alla temperatura è alto più la resistenza alla rottura diminuisce. Questo comportamento di adattamento ambientale si avrà fino ad una certa soglia limite di tempo. I provini aventi umidità prossima al 12 % presentano una diminuzione quasi insignificante della resistenza a temperature intorno ai 100 °C, mentre, aumentando la temperatura, si avranno decrementi più importanti (Giordano, 1981). L'elevata temperatura però sembrerebbe maggiormente influire in senso negativo sul modulo di elasticità che non sul carico di rottura a compressione (Schneider, 1960).

Un altro fattore importante di interferenza con la resistenza massima del legno è la presenza di difetti quali i nodi. I tessuti che circondano il nodo presentano fibratura deviata, mentre i tessuti del nodo stesso risultano non collaboranti. Gli effetti negativi sulla resistenza sono molto più marcati nella trazione assiale che non nella compressione, a causa dell'allontanamento delle fibre generata dalla forza in trazione. In compressione

¹¹Il legno essendo un materiale poroso ha la caratteristica di reagire ai cambiamenti igroscopici e di equilibrarsi con l'ambiente.

¹²Cit. in (Giordano, 1981).

assiale le fibre tendono a scivolare sopra il corpo del nodo. Ovviamente, l'influenza sulla resistenza sarà dipendente dalla grandezza del nodo rispetto la sezione dell'elemento strutturale, dalla vitalità e dal grado di salute del tessuto nodale (Giordano, 1981).

1.2.3.3 Carichi a trazione assiale

La resistenza a trazione longitudinale, vale a dire quella parallela alle fibre, è considerata la migliore caratteristica meccanica del legno, con valori di resistenza di 2-3 volte superiori alla resistenza meccanica a compressione. Questa tipica resistenza a trazione è ascrivibile ai legami rigidi delle catene di cellulosa allungate in direzione assiale (Giordano, 1999). Queste considerazioni appena fatte sono valide per il legno netto¹³, cioè per quel legno privo di difetti. In realtà, il legno essendo un materiale eterogeneo, è costituito da numerose soluzioni di discontinuità che determinano una significativa diminuzione della resistenza, sia essa in compressione che in trazione, ma, la compromissione della resistenza si realizza maggiormente in trazione.

Dunque, la resistenza a compressione in direzione longitudinale dipende dall'azione irrigidente della lignina, che si oppone alla piegatura delle fibre, mentre la resistenza a trazione dipende dalla resistenza delle lunghe catene di cellulosa delle pareti cellulari ed è quindi notevolmente superiore sul legno netto (Giordano, 1999).

L'applicazione di uno sforzo di trazione esercitato sul legno non è affatto agevole, perché, a differenza dello sforzo a compressione dove non servono particolari artifici di collegamento, le sollecitazioni a trazione possono avvenire tramite delle connessioni tra gli elementi strutturali: bulloni, chiodature, incastri e connettori di vario tipo. Le giunture falsano un po' le verifiche di resistenza a trazione, in quanto gli sforzi non solo si distribuiranno lungo la trave ma avranno un certo effetto anche nelle connessioni. Pertanto, a causa di questi sforzi accessori, si verificheranno delle sollecitazioni diverse dalla pura trazione (Giordano, 1999).

1.2.3.4 I fattori d'influenza sulla trazione assiale

I fattori che determinano in modo piuttosto evidente un abbassamento della resistenza in trazione sono la deviazione della fibratura, l'umidità, la massa volumica, le anomalie dei tessuti, e gli attacchi di funghi ed insetti.

¹³Solitamente il legno netto è riscontrabile solamente in provini di piccole dimensioni. Negli elementi di dimensioni più grandi, invece, la probabilità di trovare dei difetti quali nodi, o deviazioni della fibratura, è maggiore rispetto a quella riscontrabile in campioni di legno di ridotte dimensioni. Per questo motivo si riscontra una diminuzione di alcune proprietà meccaniche con l'aumento delle dimensioni degli elementi in legno, fenomeno noto come "*effetto scala*" (Ceccotti, 1999).

La deviazione di fibratura, detta comunemente *fibratura elicoidale*, si verifica quando, pur conservando il fusto la sua forma esteriore di solido di rotazione, le fibre non sono verticalmente disposte secondo l'asse del fusto, ma bensì, sono inclinate con un certo angolo¹⁴ (Giordano, 1981). È constatato che i carichi a trazione determinano maggiormente la rottura dei provini quando il legno presenta una fibratura inclinata (Tabella 1). I parametri che vengono presi in considerazione - nel determinare l'influenza della *fibratura elicoidale* alla rottura - durante le prove di resistenza assiale - sono l'angolo della forza applicata e l'inclinazione della fibratura.

<i>Angolo fibratura</i>	0°	5°	10°	15°	20°	25°	30°	45°
<i>Coefficiente riduttivo</i>	1	0,91	0,70	0,46	0,35	0,28	0,24	0,14

Tabella 1. Coefficienti riduttivi del carico di rottura a trazione assiale in funzione dell'angolo tra la direzione della fibratura e la direzione della forza (Giordano, 1999).

Il legno umido, sottoposto a sollecitazioni meccaniche, presenta delle resistenze nettamente inferiori rispetto al legno ben stagionato, o, per essere più precisi, portato alle condizioni di umidità normale del 12 %. Attraverso dei coefficienti appropriati, applicati ai valori di resistenza del legno con umidità normale, si determina la resistenza del legno avente un umidità diversa dal 12 %. Per il campo di pratico impiego dei legnami da costruzione in strutture all'aria, con intervalli di umidità del legno compresi tra il 12 % e il 25 %, si può consigliare una riduzione dal 2,5 % al 3 % di resistenza per ogni 1 % di umidità del valore normale del 12 % (Giordano, 1999). Un'importante considerazione è che oltre una certa soglia di umidità percentuale non vi sono più sensibili diminuzioni di resistenza, e, la curva di decremento per umidità elevate del legno assume una tendenza orizzontale. Questa soglia si approssimerebbe al punto di saturazione delle pareti cellulari ovvero il 30 %.

Il nodi (Figura 1.2) determinano una riduzione di resistenza alla trazione assiale molto più marcata rispetto alla compressione assiale. Mentre nella compressione assiale il nodo *vivo*, anche con la fibratura ai lati fortemente deviata, offre una certa resistenza, nella trazione esso costituisce un difetto che riduce la sezione resistente, e, di conseguenza, la resistenza relativa. L'elemento di maggiore influenza sul decremento di resistenza è da riconoscere nella deviazione delle fibre perinodali che devono stabilire la continuità tra gli

¹⁴Quest'anomalia non si presenta in tutte le specie ma si riscontra con maggior frequenza su cipressi, eucalipti, etc. Secondo Giordano (1981) la frequenza di fibratura su alcune specie legnose si potrebbe attribuire addirittura a dei caratteri ereditari specifici, mentre in altre specie la presenza della fibratura elicoidale la si deve probabilmente ai fattori ambientali di stazione. Fra questi predominano il vento provocando movimenti di torsione (conifere d'alta quota), la luce (castagno e faggio sottoposti a improvvisi mutamenti nell'illuminazione), natura geologica e stratificazione, danni subiti dalle piante in età giovanile (Giordano, 1981).

anelli di accrescimento del fusto e quelli del ramo. Più il diametro del nodo è maggiore più estesa sarà la deviazione della fibratura nel fusto attorno al perimetro del nodo incluso, il quale, tuttavia, avrà pur sempre una certa resistenza quando il nodo è aderente al legno del fusto. Quest'ultime considerazioni fatte valgono per il nodo *vivo*, mentre, il nodo *morto* invece è inserito senza alcun collegamento con il legno del fusto, in una cavità che riduce l'area della sezione resistente (Giordano, 1999).

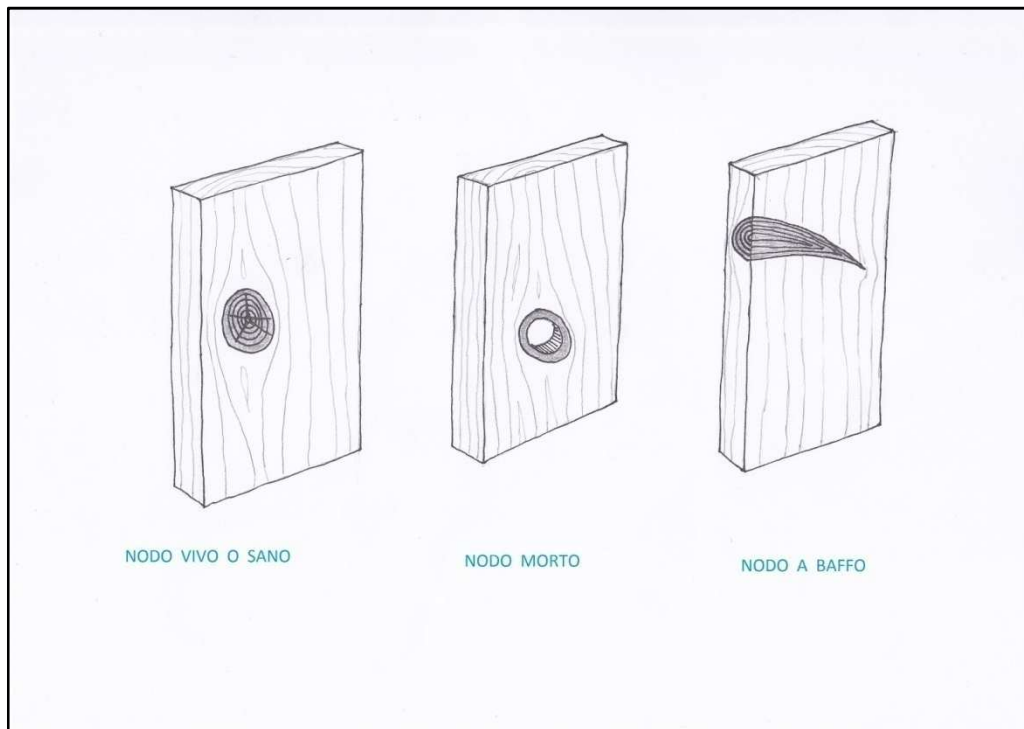


Figura 1.2 - Il nodo a sinistra è vivo e aderente al tessuto della tavola; il nodo centrale è morto e cavato; a destra abbiamo un nodo a baffo visto in sezione radiale.

L'aumento della massa volumica, è ormai constatato dalla letteratura, comporta una crescita della resistenza a trazione assiale secondo una legge lineare, o, al massimo, secondo una curva concava verso l'asse in cui sono riportate le masse volumiche (Giordano, 1999).

Gli attacchi di funghi ed insetti, in particolar modo quando infettano l'elemento strutturale nelle parti estreme, impongono l'esclusione dell'elemento da qualsiasi impiego strutturale e in particolar modo degli elementi sottoposti a trazione assiale.

1.2.4 Caratteristiche fisiche del legno

1.2.4.1 Relazione tra legno ed elettricità

Le relazioni tra legno ed elettricità riguardano principalmente la conduzione della corrente elettrica ed il comportamento dielettrico del legno. Il legno, per antonomasia, viene considerato un materiale isolante nei confronti dell'elettricità, infatti è stato da sempre impiegato come palificazione delle linee elettriche e nella fabbricazione di manici isolanti di svariati attrezzi. Nonostante questo carattere isolante, o meglio ancora semi-isolante, esso mantiene sempre una minima capacità di conduttanza nei confronti dell'elettricità.

Quando una tensione viene applicata agli estremi di un conduttore e la corrente nel conduttore risulta proporzionale alla tensione¹⁵ applicata, si dice che esso segue la *Legge di Ohm*. Nel caso questa proporzionalità sia perfettamente esatta possiamo scrivere questa relazione nel modo seguente: $\Delta V = IR$, dove V è la tensione espressa in *volt*, I la corrente in *ampère* e R la costante di proporzionalità detta *resistenza* del conduttore espressa in *ohm* (Ω). Dunque, si può parlare di resistenza elettrica in senso proprio se il rapporto V/I rimane costante al variare di E e di I , a parità ovviamente di tutte le altre condizioni. Per molti materiali, la resistenza è costante su un grande intervallo di tensioni applicate, e questa affermazione è nota come *Legge di Ohm*¹⁶ (Raymond, 1998). Il legno ha una resistenza intermedia, discostandosi in parte dalla *Legge di Ohm*, e per tale materiale viene utilizzato comunemente il concetto di resistenza elettrica del legno (Giordano, 1981). Infine, un materiale che presenta una buona conduttanza avrà di conseguenza una bassa resistenza.

Le proprietà elettriche del legno dipendono molto da svariati fattori, tra questi l'umidità, la temperatura, la specie legnosa, la massa volumica del campione, la direzione anatomica. Il contenuto di umidità influisce significativamente sulla conduttività elettrica del legno. In particolare, quando le pareti cellulari si trovano sotto il punto di saturazione la resistenza elettrica aumenta esponenzialmente. Al di sopra del punto di saturazione delle cellule la resistività continua a diminuire ma con un andamento più lento e meno regolare, fino a un punto assai limitato, dove la conduzione elettrica avverrebbe prevalentemente attraverso l'acqua libera contenuta nei lumi cellulari. Inoltre, all'aumentare della

¹⁵Tensione oppure differenza di potenziale.

¹⁶I materiali che obbediscono alla *Legge di Ohm*, e quindi che presentano una resistenza costante su un gran numero di intervalli di tensione, si chiamano *ohmici*. I materiali che non obbediscono a tale legge vengono definiti *non ohmici* (Raymond, 1998).

temperatura la resistenza elettrica diminuisce e tale effetto è tanto più sensibile quanto maggiore è l'umidità percentuale del legno.

In combinazione con l'umidità, anche la temperatura favorisce la dissociazione e la mobilità degli ioni (Tampone, 1996).

Le diverse specie legnose si comportano in modo diverso nei confronti dell'umidità e di conseguenza nella capacità di resistenza elettrica. La variabilità di conduttività tra le diverse specie legnose si deve alla qualità e quantità degli estrattivi presenti principalmente nel durame. Gli estrattivi contribuiscono sensibilmente nell'aumentare il contenuto ionico nel legno, ma non solo, altri apporti ionici possono provenire dai sali solubili presenti in acqua o da altre sostanze elettrolitiche.

Inoltre, la conduttività varia in funzione dell'andamento della fibratura e delle sezioni anatomiche: la conduttività sarà maggiore in modo assoluto lungo la direzione della fibratura rispetto alla direzione trasversale, e, in quest'ultima, sarà leggermente superiore in direzione radiale rispetto alla tangenziale (Giordano, 1981).

La determinazione dell'umidità può essere effettuato utilizzando degli igrometri elettrici in grado di rilevare la resistenza elettrica del legno e trasformare tale valore in un valore di umidità. Oppure, la determinazione può avvenire in modo indiretto attraverso il cosiddetto *metodo a doppia pesata o metodo gravimetrico*. La norma UNI EN 13183-1 (2003) dà delle indicazioni su come operare circa alla determinazione dell'umidità di un campione estratto da un segato attraverso il metodo gravimetro.

1.2.4.2 Massa volumica

La massa volumica di una sostanza, secondo la definizione fisica, è la sua massa per unità di volume, e correntemente si esprime in g per cm^3 , mentre nel caso del legno, l'espressione usuale è il kg per m^3 (Giordano, 1981).

La densità della sostanza legnosa è data dal rapporto tra la massa del legno allo stato anidro ed il volume occupato dal legno netto dai pori. Questa densità caratterizza solamente la densità delle pareti cellulari ed è una costante del materiale legnoso, attestandosi su valori di circa 1500 kg/cm^3 . Il legno, essendo una sostanza porosa, contiene al suo interno acqua, aria e altre sostanze. Dunque, a seconda dell'umidità del legno si farà distinzione tra massa volumica allo stato fresco e massa volumica allo stato anidro:

- la massa volumica allo stato fresco è data dal rapporto tra la massa umida e il volume apparente, cioè quel volume comprensivo anche dei pori presenti nel

legno ad una definita umidità del legno¹⁷. La massa volumica aumenta all'aumentare dell'umidità del legno;

- la massa volumica anidra è data dal rapporto tra la massa anidra ed il volume del legno anidro, cioè con umidità percentuale pari a zero.

Quest'ultima densità non è influenzata dal comportamento igroscopico del legno e pertanto essa può essere considerata una costante (Bernasconi, et al., 2005).

La massa volumica varia in funzione della specie legnosa, dell'ampiezza degli anelli di accrescimento e del rapporto tra il legno primaverile e il legno tardivo. Il legno primaverile possiede una densità nettamente inferiore a quella del legno tardivo. Nelle conifere la percentuale di legno primaverile aumenta ad aumentare dell'ampiezza degli anelli di accrescimento. Di conseguenza si riscontra una tendenza alla diminuzione della massa volumica all'aumentare dell'ampiezza degli anelli. Nelle latifoglie si fa distinzione tra legni a porosità zonale e legni a porosità diffusa. Le specie aventi legno poroso-zonato, come per esempio la quercia, il castagno, il frassino e la robinia, hanno la tendenza all'aumento della massa volumica all'aumentare dell'ampiezza degli anelli a causa della crescente aliquota di legno tardivo, con la larghezza del legno primaverile che rimane praticamente costante. Nella maggioranza delle specie a legno poroso diffuso, come il faggio, la betulla e altre specie ancora, l'influenza dell'ampiezza degli anelli nel determinare un aumento della massa volumica è, al contrario, irregolare (Bernasconi, et al., 2005).

1.2.4.3 Ritiri e rigonfiamenti

Il ritiro è quel fenomeno di diminuzione dimensionale che avviene nel legno fresco per effetto dell'adeguamento alle condizioni igroscopiche ambientali, mentre, i rigonfiamenti sono esattamente il fenomeno inverso, cioè l'aumento dimensionale corrispondente alla riassunzione dell'umidità da parte del legno essiccato. I movimenti del legno dovuti ai ritiri e ai rigonfiamenti si hanno all'interno di un *range* di umidità che va dal 0 % fino al contenuto di umidità corrispondente al punto di saturazione delle pareti cellulari¹⁸. Il motivo di queste deformazioni del legno durante la stagionatura sono da ricercare nella struttura della parete cellulare. L'acqua presente nelle pareti cellulari evapora lasciando spazio tra le fibrille di cellulosa; esse di conseguenza si appressano le

¹⁷L'umidità nel legno fresco supera certamente il punto di saturazione delle pareti cellulari. L'umidità del legno considerata normale è di circa il 12 % (Giordano, 1981).

¹⁸Il punto di saturazione delle pareti cellulari è quel punto massimo in cui l'acqua presente nel legno si trova tutta nella parete cellulare e non ancora all'interno del lume cellulare.

une alle altre, dando origine, oltre alla perdita di massa, anche ad una contrazione del volume del legno. Il processo prosegue, in teoria, fino a quando tutta l'umidità del legno è evaporata e si raggiunge lo stato anidro, cui corrisponde anche la condizione di massa e volume minimi per un dato pezzo di legno. Lo stato anidro è comunque raggiungibile solo essiccando il legno in stufa; in condizioni di esposizione all'aria libera, invece, il legno raggiunge uno stato di equilibrio igroscopico con l'atmosfera circostante. I movimenti, sia in ritiro che in rigonfiamento, non sono uguali in tutte le sezioni di suddivisione anatomico-strutturale del legno, ma sono differenti nelle tre direzioni anatomiche fondamentali: assiale, radiale e tangenziale. Questo fenomeno è conosciuto come *anisotropia* delle variazioni dimensionali. Le motivazioni attribuibili a tale comportamento sono, del tutto o in parte, da ricercare nell'eterogeneità strutturale dei tessuti nelle tre direzioni. I fattori influenzanti sono:

- differenza degli angoli fibrillari e diverso orientamento dei gruppi ossidrilici nelle pareti tangenziali e radiali;
- differenza nel contenuto di lignina nelle pareti tangenziali e radiali; in senso radiale le cellule sono maggiormente lignificate¹⁹;
- influenza dei raggi parenchimatici sia sul ritiro che sull'elasticità;
- diversa disposizione del legno primaverile e tardivo²⁰ in senso radiale e tangenziale.

I ritiri longitudinali sono sempre inferiori rispetto ai ritiri in senso trasversale. I ritiri radiali e tangenziali sono direttamente correlati alla massa volumica. Quest'ultima, all'interno dell'anello, è maggiore nel legno tardivo rispetto al legno primaverile, pertanto, i ritiri assiali saranno più significativi nelle zone primaverili²¹. I gradienti dei ritiri sono ascrivibili anche alla presenza nel legno di alcuni difetti: legni a fibratura elicoidale o incrociata, legni con legno di reazione, presenza di nodi (Giordano, 1981).

Questa variabilità nei ritiri del legno, a causa dei vari elementi anatomici del legno orientati in diverse direzioni e alle variazioni igrometriche, porta alla creazione di stati di tensione. Le tensioni che si vengono a creare, nel processo di stagionatura, sono dovute all'eterogeneità e alle caratteristiche anisotrope del legno²², e, anche alla non uniformità

¹⁹Per tale motivo i ritiri in senso radiale sono minori rispetto ai ritiri tangenziali.

²⁰Il legno tardivo e il legno primaverile hanno dei coefficienti di ritiri dimensionali diversi.

²¹Per dimostrare il ritiro in direzione assiale basta separare nel legno fresco una striscia comprendente una zona primaverile e una tardiva: seccandola essa si incurva dalla parte della zona primaverile, dimostrando così il suo maggior ritiro (Giordano, 1981).

²²I valori di ritiri nelle tre direzioni, in linea generale sono così riassumibili: a) ritiro assiale: 0,2% - 0,5; b) ritiro radiale: 3% - 6%; ritiro tangenziale: 6% - 12%.

della riduzione dell'umidità. Le regioni più esterne si asciugheranno prima delle regioni interne del legno e pertanto si creeranno delle deformazioni plastiche.

Un metodo sperimentale di misura delle tensioni derivanti dai processi di essiccazione è stato adottato da Allegretti et al. (2008). Il controllo e la misura delle tensioni, presenti ad una certa profondità, possono essere eseguiti direttamente inserendo una sonda in grado di misurare le deformazioni interne. Nel passato sono stati studiati dei metodi sperimentali di misura diretta delle tensioni nel legno. I problemi principali erano dovuti alla dimensione del sensore, alla difficoltà di inserimento della sonda nel legno, e, alla scarsa qualità della misura. Successivamente, con l'evoluzione tecnologia e l'innovazione di nuovi materiali, è stato possibile perfezionare sia il metodo di misura che lo strumento. La qualità di misura di tale strumento sembrerebbe abbastanza buona, fornendo dei dati corrispondenti con gli intervalli di tensione riportati in letteratura. Le variabili influenzanti la misura del sensore sono la specie legnosa, lo spessore del legname e le condizioni igrometriche al momento del rilievo (Allegretti, et al., 2008).

1.2.5 Tensioni interne del legno

I fusti degli alberi sono soggetti ad un sistema complesso di forze: alcune forze sono esterne, costituite dalla pressione del vento e della neve, ed alcune interne dell'albero stesso. Alcuni alberi, come per esempio le specie tropicali, possono presentare notevoli tensioni interne: la corona esterna risulta in trazione mentre il cuore invece in compressione, generandosi in questo modo significative sollecitazioni di segno contrario. Queste sollecitazioni sono fondamentali affinché l'albero possa contrastare le sollecitazioni esterne che tendono a destabilizzarne l'equilibrio (Giordano, 1999).

La genesi di queste sollecitazioni potrebbe essere ascrivibile anche alla crescita dei tessuti: le cellule vecchie, essendo lignificate e di conseguenza rigide, sostengono parte del tessuto, mentre, le nuove cellule che si dispongono in senso assiale generano delle tensioni longitudinali, e, quelle che sono responsabili dell'espansione del tessuto in senso trasversale vanno a formare delle tensioni a compressione tangenziale (Kubler, 1987)²³. Okuyama et al. (1994) hanno ipotizzato che le sollecitazioni della crescita dei tessuti sono generati anche dalla relazione tra la trazione delle microfibrille delle pareti cellulari in senso assiale e la sollecitazione di compressione che viene generata dalla deposizione della lignina nelle fessure delle microfibrille. Le microfibrille governano le tensioni di trazione

²³Citato in (Cassens, et al., 2004).

longitudinale sia nel legno normale²⁴ che nel legno di reazione, mentre, la lignina influenza le tensioni di compressione longitudinale nel legno di compressione e le tensioni tangenziali nel legno normale.

Quando l'albero verrà tagliato queste tensioni verranno rilasciate e, di conseguenza, avremo una parte centrale che si allungherà, mentre, la parte periferica subirà una contrazione. La conseguenza del rilascio delle tensioni sarà la formazione di spaccature sulle testate dei tronchi, e, successivamente, delle fessurazioni longitudinali più o meno estese, che, in casi estremi, possono prolungarsi per tutta la lunghezza del tronco. Il tronco verrà suddiviso in vari pezzi che si piegherà verso l'esterno. Da un tronco che presenterà delle tensioni interne importanti, difficilmente se ne potrà ricavare delle travi che potranno essere impegnati come legno da opera (Giordano, 1999).

Il controllo del cuore del tronco, subito dopo aver abbattuto l'albero, è la prima cosa da fare per accertarsi della presenza delle tensioni interne, individuando gli indicatori di tali tensioni: crepe, spaccature e cuore fragile²⁵. Un altro indicatore della presenza delle sollecitazioni interne è, durante le fasi di abbattimento dell'albero, la difficoltà nell'eseguire il taglio trasversale, dove non sono rari i casi di blocco della lama della motosega (Cassens, et al., 2004).

Oltre che nei grandi alberi tropicali, le tensioni interne sono presenti anche in molte specie arboree delle zone temperate: sono frequenti nelle latifoglie²⁶ quali pioppi, querce, faggio, frassino e, tra le specie esotiche coltivate in Italia, anche l'eucalipto. Invece, nelle conifere appaiono di rado (Giordano, 1999).

I segati del legno affetti da tensioni interne, come abbiamo detto prima, sono sostanzialmente inutilizzabili se le tensioni sono particolarmente significative. La norma UNI 8828(1986) esplica un metodo per la rilevazione delle tensioni interne di un segato trasversalmente alla fibratura, rimandando ad altra norma la determinazione delle tensioni in senso assiale. Il metodo si basa sulla misurazione delle deformazioni di più provini preparati a forma di pettine (Figura 1.3), estratti mediante segazione trasversale ad un segato. Le deformazioni si riferiscono all'allungamento e all'accorciamento dei singoli denti del pettine attraverso un calibro con precisione di 0,1 mm. Le tensioni in gioco in questo metodo di misura sono quelle appena liberate subito dopo la segazione del provino,

²⁴Per legno normale viene inteso il legno privo di legno di reazione.

²⁵In inglese chiamato *brittle heart*, è la rottura submicroscopica dei tessuti nel midollo dovuta alle forti compressioni interne che superano il limite di elasticità del legno. Il *brittle heart* costituisce un serio pericolo per gli impieghi costruttivi in quanto sul tronco non appare alcun segno, e, i segati che se ne ricavano si rompono sotto modestissime sollecitazioni (Giordano, 1999).

²⁶Giordano (1999) non elenca il castagno fra le specie che potrebbero presentare notevoli tensioni interne.

e, quelle permanenti liberate successivamente. Le prime vengono misurate subito dopo la segazione mentre le seconde dopo che i provini sono stati lasciati a condizionamento. I denti dei provini variano la loro lunghezza secondo il tipo di sollecitazioni alle quali essi sono sottoposti: si allungano quelli sollecitati a compressione mentre si accorciano quelli a trazione. Di conseguenza le estremità dei denti si dispongono a forma di arco secondo la distribuzione delle tensioni (Figura 1.3):

- concavo, se gli strati periferici sono sollecitati a compressione, e, quelli esterni a trazione;
- convesso, se gli strati periferici sono sollecitati a trazione, e, quelli centrali a compressione.

Si misura, dunque, la freccia che eventualmente verrà creata nel caso ci fossero notevoli tensioni interne (UNI 8828, 1986).

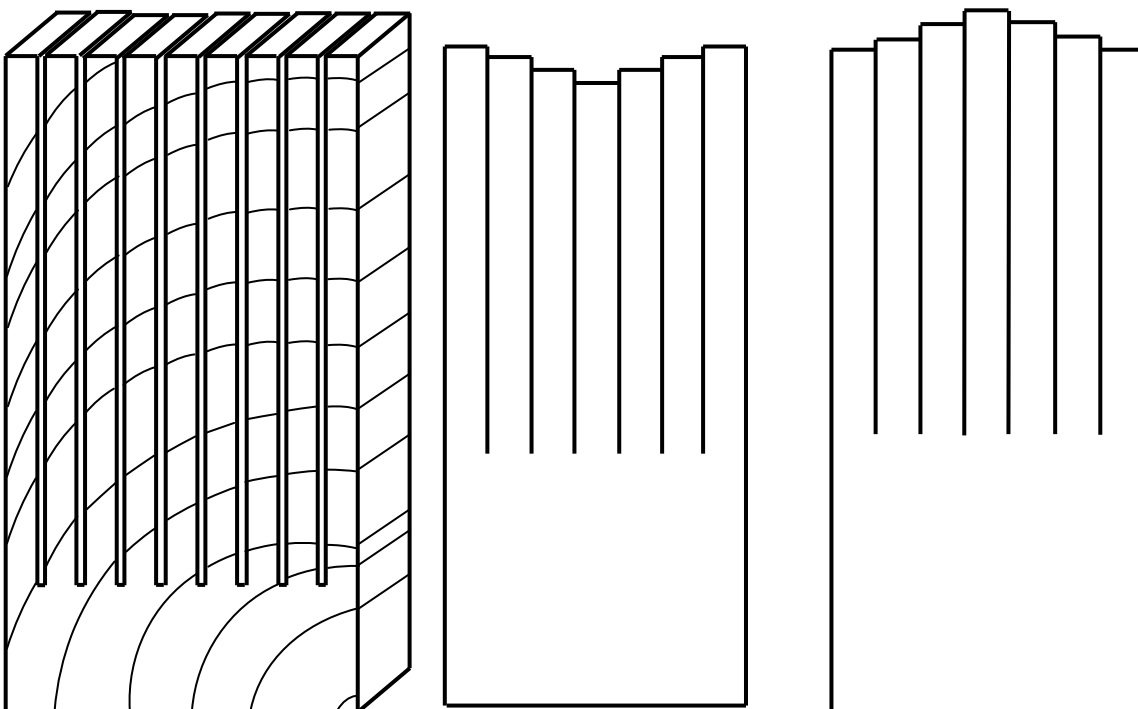


Figura 1.3. A sinistra il provino a pettine ricavato dalla segazione trasversale di un segato. In centro e a destra si noti l'arcatura rispettivamente concava e convessa generata dal rilascio delle tensioni interne: il provino centrale ha tensioni di compressione lateralmente, mentre, quello a destra li ha centralmente.

Infine bisogna ribadire, che le tensioni interne sono ben differenti, dal punto di vista fisiologico e fisico, dalle tensioni attribuibili ai ritiri e ai rigonfiamenti, al legno di reazione, al legno giovanile e alla presenza di nodi.

1.2.6 Legno di reazione

Gli alberi sollecitati asimmetricamente dalla forza di gravità possono formare dei tessuti deformati lungo il fusto e sezioni trasversali deformate. Queste sollecitazioni esterne possono essere attribuite per esempio all'asimmetria della chioma, all'inclinazione del fusto, ai venti dominanti. I difetti di forma del fusto sono generati da dei mutamenti strutturali e di costituzione chimica delle pareti cellulari, giustificando tale comportamento della pianta come una metodologia di contrasto alle sollecitazioni meccaniche di lunga durata. I tessuti anomali così formati prendono il nome di *legno di reazione* e si forma in risposta allo stimolo di gravità il quale determina una irregolare distribuzione di auxina. (Arrigoni, 1973). Nel fusto inclinato delle conifere si riscontrerà la presenza di legno di reazione lungo il lato concavo o compresso, mentre, nelle latifoglie in corrispondenza del lato teso (Uzielli, 2001). Dunque, di fronte a tali sollecitazioni, le conifere e le latifoglie si comportano in modo diverso:

- nelle conifere il legno di reazione si forma nella parte del legno sottoposto a compressione dovuto alle sollecitazioni esterne, e, per tale ragione, prende il nome di *legno di compressione* o *canastro*. Le alterazioni consistono in una modifica della forma delle cellule da sub-poligonale a sezione tondeggiante con parete più spessa a prevalenza di lignina. Qui il legno assume un colore bruno-rossastro (Figura 1.4) con una massa volumica superiore a quella del legno normale;
- nelle latifoglie il legno di reazione viene formato nella parte opposta²⁷ a quella delle conifere, cioè quella sottoposta a trazione, denominandolo *legno di tensione*. La massa volumica, anche qui, appare superiore a quella del legno normale e le lavorazioni risultano difficoltose a causa del fatto che le superfici che si ottengono sono pelose²⁸. Un'altra differenza rispetto al *canastro*, consiste sull'identificabilità del *legno di tensione* sul legno in opera, in quanto quest'ultimo non presenta una colorazione particolare come nel caso del *legno di compressione* (Giordano, 1999).

L'inconveniente tecnologico del *legno di reazione* è l'elevato ritiro in direzione longitudinale, che può raggiungere anche il 6 - 10 % rispetto ai ritiri del legno normale (0,1 - 0,5 %). Il legno di reazione induce delle tensioni tali da determinare rotture, deformazioni

²⁷Le ragioni per le quali nelle latifoglie il cambio produce più derivate dalla parte opposta rispetto alle conifere risiedono nella maggiore o minore sensibilità del cambio di queste piante al variare della concentrazione di auxina. Nelle conifere il cambio sembra essere più attivo in quella zona dove è maggiore, mentre, nelle latifoglie le iniziali cambiali sono più attive nella zona a più bassa concentrazione (Arrigoni, 1973).

²⁸Il cosiddetto *legno cotonoso*.

e instabilità di forma, e pertanto deve essere oggetto di attenta valutazione in sede di classificazione del legname strutturale in opera (Uzielli, 2001).

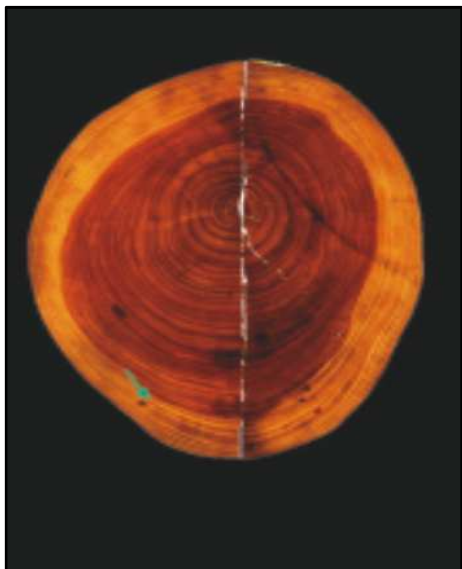


Figura 1.4. Evidenti differenze cromatiche su legno di conifera tra il legno di compressione e il legno normale (sezione trasversale)²⁹.

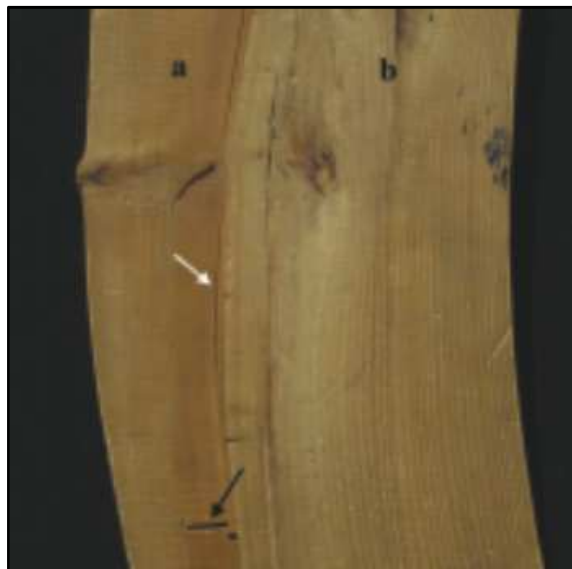


Figura 1.5. Sezione radiale di una conifera: le frecce evidenziano la differenza di legno: in *a* si ha legno di compressione mentre in *b* legno normale³⁰.

1.3. Il legno di castagno

Il castagno è indubbiamente la specie italiana il cui legno presenta maggiore versatilità nell'impiego. I polloni di minima dimensione servono di sostegno nelle coltivazioni floreali, per paleria agricola e paletti da recinzione per giungere infine ai sostegni per linee elettriche o a tronchi da segare o fendere per doghe o da squadrare all'ascia per travature. Il tondame d'alto fusto – se sano e di buona forma – fornisce tavolame per falegnameria e mobili di stile rustico, infissi, dogame, tranciati per impiallacciate decorative. Inoltre, i tronchi deformi, cipollati o parzialmente guasti possono essere utilizzati per l'estrazione degli estrattivi tannici, con possibile recupero del legno esausto per pannelli di fibre (Giordano, 1988).

Le caratteristiche fisiche e meccaniche del castagno, riportate da Giordano (1988) sono le seguenti:

- *tessitura*: grossolana;
- *figatura*: per lo più diritta;
- *massa volumica allo stato fresco*: da 0,70 a 1,18 g/cm³ con valore medio di 1000 kg/m³;

²⁹Foto da <http://www.legnolegno.it/legnolegno/articolo.php?numeroanno=3/2002&id=36>.

³⁰Foto da <http://www.legnolegno.it/legnolegno/articolo.php?numeroanno=3/2002&id=36>.

- *densità basale*: valore medio di 490 kg/m³;
- *ritiro*: da basso a medio;
- *nervosità*: media;
- *resistenza a compressione assiale*: da 21,5 a 64 MPa con valore medio di 580 kg/m³;
- *resistenza a flessione*: da 50 a 140 MPa con valore medio di 106 MPa;
- *modulo di elasticità a flessione*: da 8450 a 14400 MPa con valore medio di 11380 MPa;
- *resistenza a taglio*: da 5,7 a 9,2 MPa con valore medio di 7,3 MPa;
- *resistenza ad urto*: da bassa a media;
- *fissilità*: discreta.

1.4 Obiettivi e finalità della tesi

Gli edifici storici, tipicamente costruiti impiegando materiali diversi quali legno e laterizio, sono soggetti a stati di sovraccarico sia di sottocarico nei singoli elementi strutturali a causa degli assestamenti della struttura nel tempo, dell'instabilità del terreno e ad altri eventi.

Un tentativo di stima dei carichi sugli elementi strutturali in opera potrebbe essere l'applicazione di un metodo di analisi delle vibrazioni degli elementi stessi se percossi da un martello. Gli elementi, però, se vincolati alle estremità (esempio in manufatti in pietrame o in muratura) non saranno in grado di vibrare a causa della rigidità indotta dal vincolo. In tali condizioni, tramite questo metodo non sarà possibile risalire alla causa della rigidità dell'elemento, ovvero se la rigidità dell'elemento è dovuta all'influenza del vincolo oppure ad un sovraccarico.

Attualmente non esistono metodologie di rilievo dello stato tensionale di elementi in opera. Per verificare le forze agenti sugli elementi strutturali esistono apparecchiature e metodologie non distruttive o poco invasive. Tuttavia molte di esse sono inefficaci se gli elementi presentano vincoli al contorno che ne limitano l'impiego a situazioni specifiche.

Il presente lavoro persegue l'obiettivo principale di mettere a punto un metodo di verifica degli stati tensionali degli elementi strutturali, siano essi in trazione che in compressione. La taratura è stata eseguita in laboratorio utilizzando carichi crescenti in compressione in modo tale da ottenere il diagramma *carichi-deformazione*, mettendo in luce la relazione che esiste tra i diversi carichi applicati e la deformazione conseguente.

Il secondo obiettivo del lavoro di tesi è la stima indiretta dei carichi gravanti su travi strutturali tramite le deformazioni rilevate. Il diagramma permette di valutare comodamente in cantiere i carichi di piccole entità impiegando come riferimento il diagramma *carichi-deformazione*. Dopo aver misurato la deformazione sull'elemento strutturale tramite la strumentazione e la metodologia idonea, il valore micrometrico ottenuto viene inserito nel diagramma, e, attraverso la relazione ottenuta, si ricava il corrispettivo carico (Figura 1.5).

La finalità di questo lavoro, dunque, è quella di fornire alle diverse figure professionali che si occupano di ingegneria strutturale o edile oppure di restaurazione del legno un metodo applicativo che li possa guidare nelle scelte da intraprendere nei progetti di restaurazione e di manutenzione degli edifici storici.

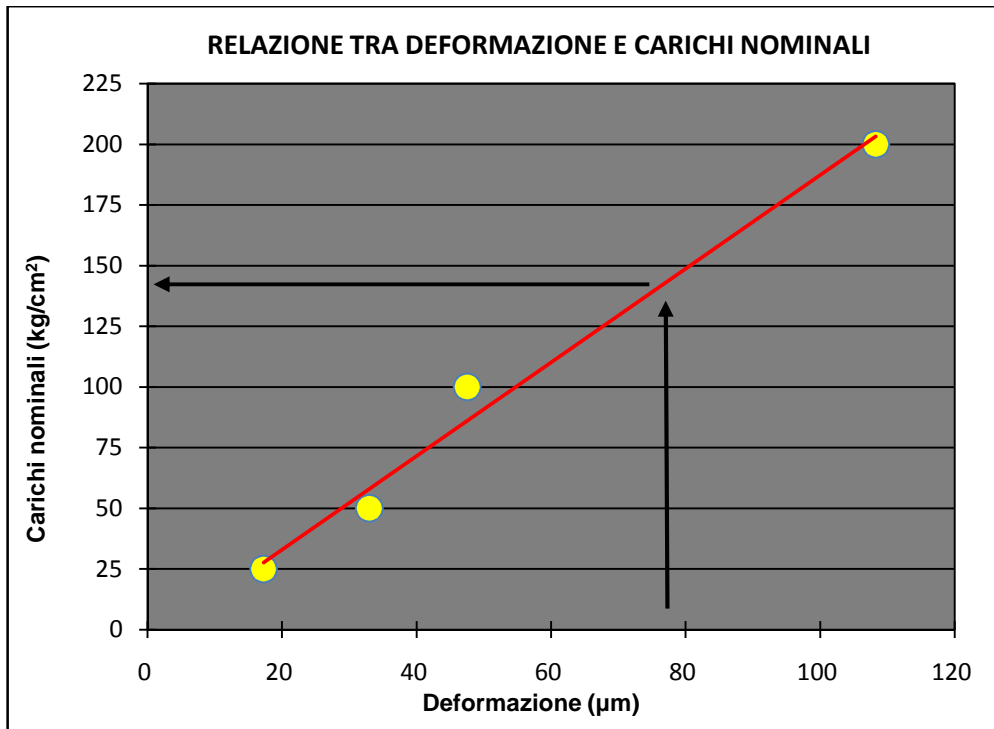


Figura 1.5. Diagramma deformazione-carico di stima dei carichi tramite le deformazioni rilevate.

2 MATERIALI E METODI

2.1 I provini

I provini messi a disposizione per effettuare le prove di laboratorio consistono in dei travetti di castagno dove la maggior parte di essi presentano una sezione di circa $10 \times 10 \text{ cm}^2$ e un'altezza di 27 cm circa (Figura 2.1 e 2.2). La trave dalla quale sono stati prelevati i campioni è stata sezionata in modo tale da estrarre dei travetti di altezze ben determinate, affinché essi possano essere inseriti con facilità tra i piani della pressa³¹. Difatti, la scelta di dividere la trave con intervalli da 27 cm non è stato un caso. Tuttavia, mantenendo un basso *coefficiente di snellezza* si è certi di non imprimere ai provini dei *carichi di punta*: il limite massimo entro il quale venga effettuata con certezza una semplice *prova a compressione assiale* è pari a 10, cioè quel valore dato dal rapporto tra la lunghezza della trave e il momento d'inerzia della sezione trasversale (Giordano, 1981).



Figura 2.1. Campione tipo di castagno essiccato condizionato in laboratorio.



Figura 2.2. Campione tipo di castagno umido ricavato dalla trave posta fuori nel deposito. In questo campione sono già state rilevate le deformazioni (fori).

Le prove principali sono state svolte in particolar modo sui provini essiccati (campioni con umidità media del 10,4 %), con lo scopo di focalizzare gli obiettivi prefissati in questo lavoro: l'intento è quello di emulare le caratteristiche ambientali della

³¹I piani della pressa hanno un'apertura massima di 30 cm circa.

maggior parte degli elementi strutturali in opera tenuti al coperto³². Inoltre, questa serie di campionamenti ha interessato i provini a geometria regolare che irregolare.

Con lo scopo di confrontare i dati con le deformazioni del castagno essiccato, sono state eseguite altre prove su travetti di legno relativamente umidi (umidità media del 19 %). I travetti sono stati ottenuti dalla sezionatura a 27 cm di una trave di castagno all'esterno dell'IVALSA. È stata appositamente scelta la trave che presentava un elevato contenuto di acqua, evidenziato visivamente dagli aloni di umidità presenti in superficie. Tramite la taratura del metodo di stima delle deformazioni sui campioni umidi, sarà possibile misurare i carichi gravanti su elementi strutturali relativamente umidi.

Altre prove ancora - effettuate sempre con l'obiettivo di confrontare i dati nelle diverse variabili - sono state svolte invece su provini essiccati di castagno appositamente modificati in modo tale da creare delle superfici irregolari. L'influenza dell'irregolarità di superficie della sezione trasversale dei campioni sulle prove effettuate è notevole. Il piano della pressa a contatto con la sezione irregolare imprime più carico là dove il campione è più alto. Nella parte opposta alla parte più alta i valori di deformazione sono tipicamente inferiori alle deformazioni del lato compresso, e, a volte, anche di segno negativo. Le deformazioni negative indicano delle tensioni del legno a trazione.

L'obiettivo di questa prova è l'osservazione e l'analisi dell'influenza della geometria sulle deformazioni rilevate. Inoltre, come detto prima, l'altro obiettivo è un confronto con le deformazioni dei provini definiti regolari, in cui l'effetto della geometria del provino è quasi nulla.

I provini di geometria irregolare sono stati prodotti eseguendo con la troncatrice un taglio diagonale. Il taglio eseguito con un certo angolo α rispetto l'asse longitudinale ha creato due facce, in posizione opposta, di differente altezza: una faccia più corta e l'altra più lunga, con una differenza tra le due facce di circa 2 mm (vedi Figure 2.3 e 2.4).

³²Questa conclusione è sempre vincolata alle condizioni climatiche.

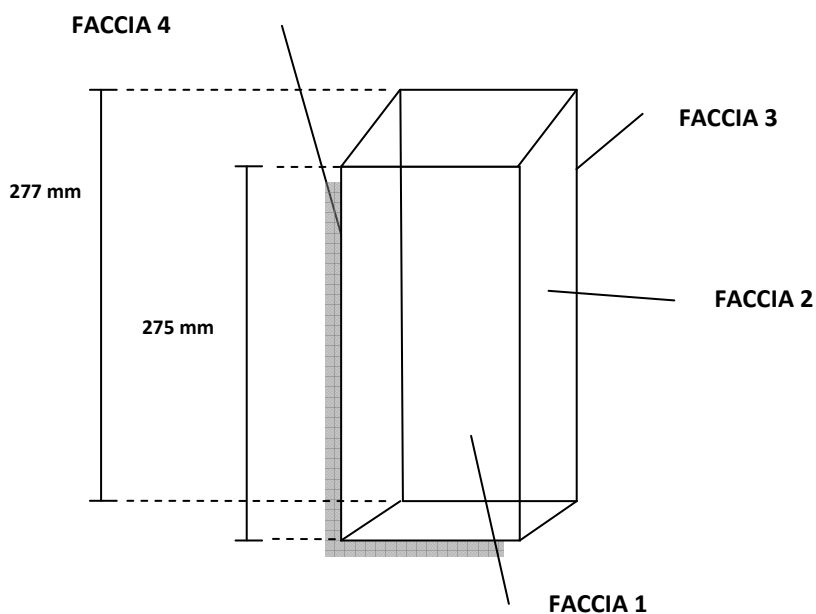


Figura 2.3. Il disegno rappresenta un *campione irregolare* visto frontalmente dove, la faccia 1 e la faccia 3, e, la faccia 2 e faccia 4 sono una opposta all'altra. A titolo d'esempio sono state indicate le quote della faccia 1 e faccia 3 per evidenziare la differenza di quota creata.

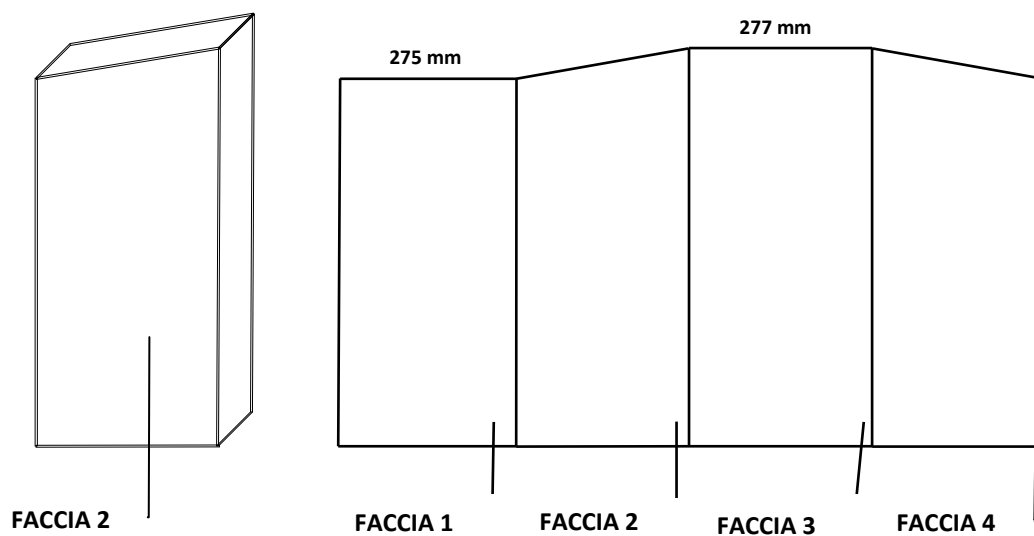


Figura 2.4. Il disegno raffigura un *campione irregolare*. A sinistra il campione è rappresentato in laterale, mentre a destra si rappresenta il campione con tutte le sezioni in un unico piano per evidenziare le differenze di quote indotte.

I campioni vengono distinti in base alla variabile umidità: una serie di campioni relativamente essiccati condizionati in ambiente al coperto, e, un'altra serie di campioni umidi, condizionati all'aperto.

Riassumendo, i provini analizzati, in funzione del contenuto di umidità e del grado di "regolarità", sono così elencati:

- a) *castagno essiccato con geometria regolare;*
- b) *castagno essiccato con geometria irregolare;*
- c) *castagno umido con geometria regolare.*

I provini campionati in totale sono 24, di cui 16 essiccati e 8 umidi. Quattordici provini essiccati presentano una sezione trasversale con lati che mediamente vanno dai 10,3 cm ai 10,7 cm, attribuendo infine a essi, per la determinazione dei carichi nominali, una sezione media di $10,6 \times 10,6 \text{ cm}^2$. Due provini essiccati a disposizione per le prove hanno invece una sezione di $12 \times 12 \text{ cm}^2$. Tutti i provini umidi hanno una sezione trasversale di $10 \times 10 \text{ cm}^2$.

L'altezza media dei tre tipi di provini, suddivisi in funzione della dimensione della sezione trasversale, sono riportate in Tabella 2.1. La determinazione delle altezze è stata possibile grazie all'uso di un calibro meccanico con corsa di 650 mm e risoluzione di 1/50 mm.

<i>Sezione (cm²)</i>	<i>10,6 x 10,6</i>	<i>12 x 12</i>	<i>10 x 10 cm²</i>
<i>Altezza media (mm)</i>	<i>275,12</i>	<i>266,75</i>	<i>269,36</i>

Tabella 2.1. Altezze medie dei tre tipi di provini suddivisi in funzione della sezione trasversale.

2.1.1 Codice identificativo dei campioni e delle prove

Le prove di laboratorio effettuate hanno richiesto l'applicazione di un metodo di numerazione dei campioni affinché essi fossero facilmente individuabili. Le variabili in gioco, come venne anticipato nel paragrafo precedente, sono: l'umidità e la regolarità dei campioni.

Il codice di identificazione è composto da una prima lettera che indica la specie utilizzata accompagnata da una seconda lettera che denota la condizione di umidità scelta, e, successivamente dopo, viene accostato al codice il numero progressivo di campionamento. Le prime due lettere indicano due caratteri qualitativi del campionamento mentre il numero esprime una caratteristica quantitativa. I campioni, assimilabili ad un parallelepipedo, hanno quattro sezioni longitudinali dove, in ciascuna di esse, onde evitare confusione, vengono segnate i numeri di ogni faccia. Infine, per ciascuna faccia sono state eseguite tre coppelle – necessarie per determinare la deformazione oggetto della misurazione – identificate anch'esse con un numero crescente da 1 a 3 dal basso verso l'alto (Figura 2.2). Parte integrante del codice di prova è costituito dal carico nominale applicato

al provino. Il carico rappresenta anch'esso un carattere distintivo della prova sotto il punto di vista qualitativo. Il codice è illustrato nell'esempio seguente:

$$\overbrace{Cd1} _ \overbrace{F1} _ \overbrace{P1} _ 50 \text{ kg/cm}^2$$

dove:

- C: castagno;
- d: il legno è stato condizionato in ambiente chiuso ovvero il castagno è essiccato;
- 1: il numero progressivo di campionamento;
- F1: faccia 1 del provino;
- P1: foro o prova numero 1;
- 50 kg/cm²: carico nominale applicato al provino.

Osservando, da sinistra a destra, l'esempio del codice di un campione e di una prova si ha che:

- la prima parentesi graffa indica il campione (nell'esempio specifico il codice *Cd1* rappresenta la prova n°1 del castagno essiccato);
- la seconda parentesi l'individuazione del foro nel campione;
- la terza parentesi il carico nominale della prova (kg/cm²).

L'identificazione del castagno umido avviene attraverso la lettera *f*, che sostituisce la lettera *d*. La *f* specifica l'ambiente – umido – di condizionamento dei campioni. Di seguito viene illustrato un esempio del codice di una prova del castagno umido:

$$Cf1_F1_P1_50 \text{ kg/cm}^2$$

Invece, nell'identificazione del *castagno con geometria irregolare* viene aggiunta la dicitura ".def" al codice del provino ovvero un campione deformato:

$$Cd1.def_F1_P1_50 \text{ kg/cm}^2$$

2.2 La strumentazione

2.2.1 Il distanziometro Keyence LK-G32

I rilievi di deformazione sono stati possibili grazie all'ausilio di un comparatore laser ad alta risoluzione, con accuratezza di 0,1 micrometri (1/10000 mm). Il modello impiegato in questo lavoro è un modello della vasta gamma di sensori prodotti dall'azienda Keyence, società specializzata nella produzione di sensori, sistemi di misurazione, microscopi, marcatori laser (Figura 2.5). I sensori laser ad alta risoluzione vengono normalmente impiegati nell'industria e nella sperimentazione scientifica. Questi misuratori laser hanno correntemente applicazione:

- nell'ispezione ottica di minuteria metallica di elevato grado di complessità, permettendo di rilevare i particolari più piccoli;
- nel controllo dei contatti elettrici sui *pad* ispezionando eventuali possibili difetti e assicurando che essi permettano il corretto flusso della corrente;
- misurazione degli spessori durante la produzione di pannelli laminati sfruttando la triangolazione laser del modello LK-G.

Dalla scala microscopica degli impieghi illustrati sopra, si intuisce che questi sistemi di rilevamento laser, in funzione del modello e della risoluzione, hanno un'elevata accuratezza di misura³³.

La serie LK-G dispone di un sensore a triangolazione laser per la misurazione a distanza su qualsiasi superficie - anche su vetro - a differenza di molti altri modelli a con rilevamento laser. Lo strumento possiede una frequenza di campionamento di 50 kHz consentendo una misurazione stabile e un feedback immediato (scheda tecnica in Appendice A).

Prima di utilizzare lo strumento è necessario mantenerlo acceso per almeno 30 minuti visto che il circuito non si stabilizza immediatamente subito dopo l'accensione, precauzione questa che deve essere adottata onde evitare la ricezione di un segnale oscillante e poco stabile. Lo strumento possiede quasi sempre una deriva del segnale che varia in funzione della frequenza di utilizzo e dell'impiego applicativo: in quiete tende ad annullare la deriva, ricevendo dei segnali piuttosto stabili in un certo intervallo di tempo, mentre se maneggiato con frequenza il segnale si destabilizza (Grafico 2.1).

³³Cit. <http://www.keyence.it/>

La lunghezza del cavo di alimentazione e di input/output dei dati, collegato ad un elaboratore, non deve essere superiore ai 30 metri onde evitare una dispersione di segnale. Un cambiamento della temperatura dell'ambiente può causare la fluttuazione di misura, e pertanto è di buona accortezza mantenere la temperatura ambientale pressoché costante.

Inoltre, altri fattori che potrebbero influenzare circa la qualità del segnale dello strumento sono la sporcizia e la polvere. Lo sporco si potrebbe depositare sul bersaglio riflettente oppure sul vetro di protezione del laser pregiudicando in tal modo l'accuratezza di misurazione³⁴.



Figura 2.5. Comparatore al laser impiegato per le prove di laboratorio (KEYENCE LK-G32).

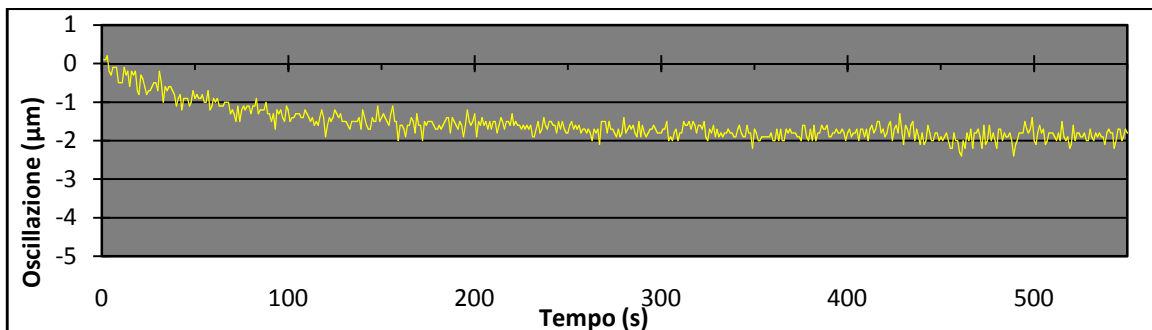


Grafico 2.1. Deriva del comparatore nell'arco temporale di 10 minuti circa (550 secondi) stabilizzato in modo oscillante intorno a $-2 \mu\text{m}$.

³⁴Cit. <http://forums.ni.com/attachments/ni/170/293773/1/lkg>.

2.2.2 La pressa idraulica

Le sollecitazioni a compressione ai campioni sono state indotte grazie all'utilizzo di una macchina idraulica appositamente adattata per lo scopo di questo lavoro. La macchina è una SIMI (Società Italiana Macchinari e Impianti) avente la capacità di imprimere un carico massimo da 65 tonnellate; essa è facilmente manovrabile attraverso dei controlli elettromeccanici, regolando sia la forza che la temperatura (Figura 2.6). I piani di pressione hanno una sezione di $50 \times 50 \text{ cm}^2$ e sono riscaldabili. La destinazione d'uso tipica della macchina è quella per la produzione di pannelli di particelle, vari tipi di compensato quali i multistrato e i compensati a liste, e anche una certa applicazione nell'incollaggio di listelli per la produzione di pannelli lamellari. L'apertura massima dei piani di pressione è di circa 30 cm, mentre, il pistone idraulico può spingere fino a quando le piastre si toccano.

La fabbricazione della macchina risale ai primi anni '80 ma nel 2008 è stata revisionata ampliandone alcune funzionalità. Tra queste, è stata introdotta una valvola di flusso dell'olio del pistone idraulico con l'obiettivo di poter manovrare con maggior sensibilità la pressione (Figura 2.6). Questa maggior sensibilità è importante quando si svolgono specifici lavori, dove, l'impiego di determinati carichi è di fondamentale importanza per la riuscita delle prove di laboratorio.



Figura 2.6. Pressa SIMI impiegata nelle prove di laboratorio: la freccia rossa indica la valvola idraulica; la freccia gialla il comando di carico e scarico; la doppia freccia nera mostra l'apertura della pressa (max 30 cm). A destra troviamo il pannello di controllo della macchina: il display in alto a sinistra fornisce la pressione in bar dell'olio del pistone, quello centrale la temperatura del piano superiore e quello a destra la temperatura del piano inferiore.

Dopo aver impostato la pressione attraverso gli appositi comandi del display digitale, si regola il passaggio dell'olio girando il comando della valvola sino a che si raggiunge la pressione desiderata. Con la leva, invece, manovriamo il carico e lo scarico della pressa: verso destra la pressa va in carico, mentre, portandola verso sinistra, la macchina va in scarico (Figura 2.6).

2.2.3 L'igrometro elettrico

Gli igrometri elettrici impiegati nella determinazione dell'umidità del legno sono degli strumenti che misurano indirettamente l'umidità attraverso la ricezione della resistenza del legno, trasformata poi, in umidità percentuale attraverso degli algoritmi. Il vantaggio dei metodi elettrici è quello di non essere invasivo e di fornire valori di umidità immediati, a differenza del *metodo gravimetrico o a doppia pesata*³⁵ eseguibile solamente in laboratorio. Il campo utile medio di misura dell'umidità del legno con il metodo elettrico va dal 6-7 % al 30-35 %. Questo campo di misura è bene o male l'intervallo di misura di tanti igrometri elettrici presenti sul mercato indipendentemente dalla qualità del modello e della precisione di rilevamento.

La perdita di precisione degli igrometri ai valori estremi del campo utile di misura è da ascrivere alla relazione resistenza-umidità del legno: l'andamento esponenziale della curva (Grafico 2.2) mette in evidenza che per valori bassi di umidità la resistenza cresce velocemente, oltrepassando il limite inferiore di misura dello strumento; per umidità del legno superiore al punto di saturazione, la variazione della resistenza con l'umidità è così piccola da non essere rilevata dallo strumento oppure viene rilevata con scarsa precisione (Uzielli, 2001).

³⁵UNI EN 13183-1. 2003. Umidità di un pezzo di legno segato. Determinazione tramite il metodo per pesata.

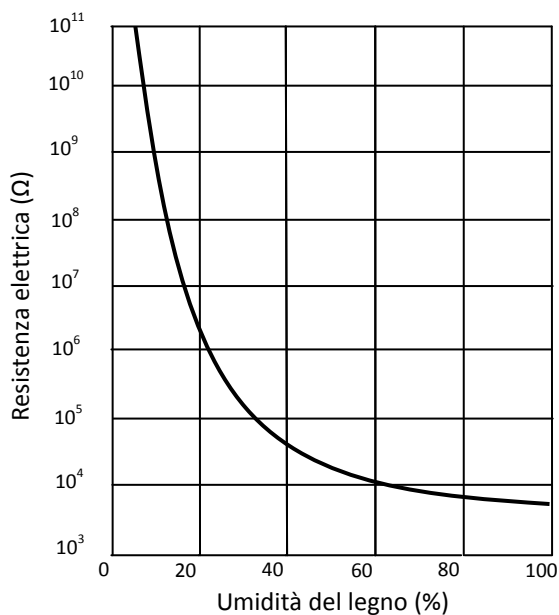


Grafico 2.2. Curva illustrativa della relazione esponenziale tra resistenza e umidità (Uzielli, 2001).



Figura 2.7. L'igrometro elettrico impiegato in laboratorio (GANN Hydromette blu H 40).

L'igrometro usato in questo lavoro per la misurazione dell'umidità dei provini è il GANN Hydromette serie blu H 40 (Figura 2.7). Il GANN H 40 è un igrometro idoneo per travi, pannelli truciolari, pannelli sfogliati per impiallaccature con profondità massima di 180 mm. Il campo di misura igrometrica va dal 5 % al 40 % consentendo la regolazione della temperatura dell'apparecchio e dell'ambiente (-10 °C - 40 °C) in modo tale da ottimizzare la misurazione. Lo strumento possiede la funzione di correzione di misura in funzione della specie (oltre 300 specie) sulla quale viene utilizzato adottando sette livelli. Inoltre, si ha la possibilità di registrare gli ultimi 5 valori misurati, utile quando si effettuano misure dove non si ha la possibilità di annotare i valori di umidità rilevati³⁶ (scheda tecnica in Appendice B).

La serie blu H 40 è corredata anche degli accessori indispensabili per la determinazione dell'umidità. Fondamentale è stata l'accoppiata all'igrometro, ai fini della determinazione dell'umidità nel legno, di una serie di elettrodi a chiodi. Nel caso specifico sono stati impiegati gli elettrodi a battente M18-3500. L'impugnatura a battente e l'asse di scorrimento sono in acciaio determinando una rilevante resistenza agli urti e alla corrosione, mentre, il supporto degli elettrodi è costituito da una plastica speciale³⁷ (scheda tecnica in Allegato C).

La determinazione dell'umidità viene eseguita infiggendo nel legno gli elettrodi a chiodi misurando in tal modo la resistenza attraverso di essi. Gli elettrodi d'acciaio

³⁶Cit. Scheda tecnica dell'igrometro GANN Hydromette blu H 40.

³⁷Cit. Scheda tecnica degli elettrodi M20-M18.

impiegati in questo lavoro sono ricoperti da un velo di ceramica lasciando scoperta la parte metallica delle punte; con tali caratteristiche il passaggio della corrente elettrica si verifica in corrispondenza delle punte, concretizzando la possibilità di misurare l'umidità anche in profondità. Difatti, lo strato impermeabile dei chiodi impedisce il passaggio della corrente sullo strato superficiale del legno. Tuttavia, occorre prestare attenzione alla presenza di acqua sulla superficie del legno che le punte potrebbero trascinare con sé all'interno del foro, determinando un aumento falsato del valore d'umidità reale (Uzielli, 2001).

Un'altra accortezza da adottare, durante la misurazione, è quella di accertare che i chiodi entrino parallelamente senza alcuna inclinazione. L'allontanamento delle punte a contatto diretto col legno potrebbe avere una minima influenza nell'umidità rilevata, dato che, all'aumentare della distanza degli elettrodi la resistenza elettrica aumenta.

2.2.4 Il calibro meccanico

La determinazione delle misure di altezza, larghezza e profondità dei campioni è stata possibile utilizzando un calibro meccanico (Figura 2.8). Il modello impiegato in questo lavoro è un calibro a scorsoio in acciaio inox su asta da 700 mm, con possibilità di misura fino a 650 mm e becchi da 300 cm. L'asta ha uno spessore di 6 mm e ha inciso sopra due graduazioni: una inferiore espressa in millimetri e una superiore espressa in pollici. Lo strumento è dotato di due nonii cinquantesimali per entrambe le scale e di due viti: una per il bloccaggio del becco a scorsoio e l'altra per tener fermo il supporto per la regolazione di precisione comandata da una vite micrometrica.

L'uso del calibro ha permesso di rilevare i gradienti di altezza di ciascun provino determinando otto quote in corrispondenza di otto punti specifici del campione: quattro misure effettuate agli spigoli e quattro alla mediana di ciascun lato della sezione trasversale (Figura 2.9).

In funzione dei gradienti di quota rilevati e del loro grado differenziale si è introdotto il concetto di regolarità: i provini con valori sommariamente omogenei e con piccole differenze minime tra il valore più alto e quello più basso sono stati definiti regolari. Il parametro che ha permesso di definire i provini regolari è la differenza tra i valori massimi e minimi di altezze di ciascun provino. Quando questo parametro in un travetto assume un valore inferiore o al massimo pari a 1 mm allora esso viene definito *regolare*. Viceversa, quando la differenza massimi-minimi di altezze misurate in un provino è superiore a 1 mm esso viene inserito tra i *campioni con geometria irregolare*. Le differenze possono essere

anche molto importanti (superiori a 4 mm) come ad esempio i provini appositamente modificati per creare l'irregolarità.



Figura 2.8. Misurazione dell'altezza di uno spigolo di un provino attraverso il calibro meccanico.

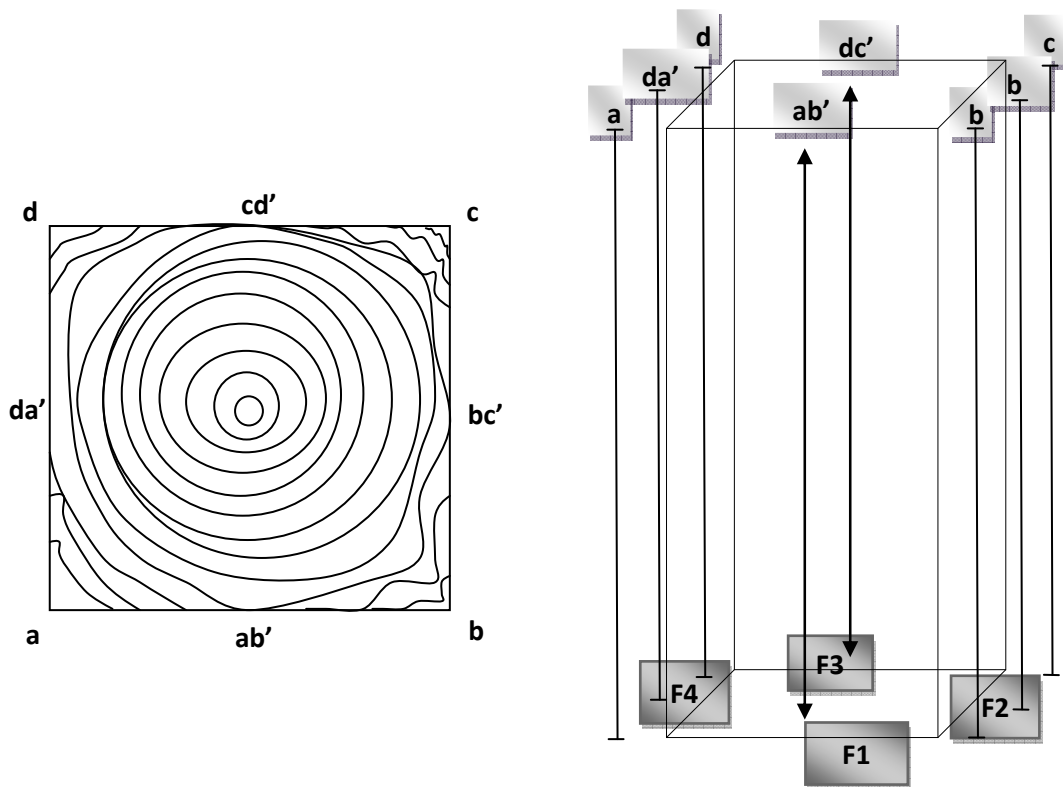


Figura 2.9. L'immagine a sinistra mostra la sezione trasversale di un provino dove sono raffigurati gli otto punti di misura. A destra è raffigurato il provino con le quote misurate.

2.3 Il rilevamento delle deformazioni

La determinazione delle deformazioni si concretizza attraverso la registrazione delle tensioni con gli strumenti messi a disposizione dall'IVALSA. I provini, in questo lavoro vengono sollecitati a compressione. Le sollecitazioni a compressione sono state indotte ai provini attraverso la pressa idraulica, la quale, ha permesso di modulare i carichi consentendo l'applicazione di determinate sollecitazioni grazie alla regolazione di pressione. Le prove di laboratorio sono procedute con l'applicazione di carichi progressivamente crescenti con un rapporto pari a 2, impiegando infine quattro carichi nominali per ciascuna tipologia di provini:

- carico unitario nominale di 25 kg/cm^2 ;
- carico unitario nominale di 50 kg/cm^2 ;
- carico unitario nominale di 100 kg/cm^2 ;
- carico unitario nominale di 200 kg/cm^2 .

Sono state effettuate anche delle prove scariche, con l'intento di osservare le deformazioni legate alla presenza di tensioni interne e ai gradienti d'umidità.

Il carico totale da imprimere ai provini è funzione della sezione degli stessi, il quale sarà di maggior entità all'aumentare della superficie nel caso in cui si volesse imprimere un definito carico nominale (forza/sezione). Per comprendere meglio questo concetto appena esposto viene fatto un esempio: se viene applicato uno stesso carico su due campioni aventi sezioni differenti, il carico nominale applicato sarà diverso. Pertanto, prima di eseguire le prove, viene impostata la forza totale della pressa in funzione della sezione trasversale dei campioni affinché venga applicato lo stesso carico nominale.

La pressa SIMI dispone di un display dove viene riportata la pressione dell'olio espressa in *bar*³⁸. Quest'unità di misura è riferita all'unità di superficie pertanto, per risalire all'effettiva spinta esercitata dal pistone idraulico, si è moltiplicato il valore di pressione in bar letto sul display per la superficie del pistone espressa in cm^2 . Il pistone cilindrico ha un diametro di 20 cm e una superficie pari a 314 cm^2 . Un bar della pressione dell'olio è equivalente ad una forza di 1 kg/cm^2 , che sulla sezione del pistone si totalizza in 314 kg.

³⁸Il bar è un'unità di misura della pressione nel sistema CGS (Centimetro - Grammo - Secondo). Esso non appartiene al Sistema Internazionale dell'unità di misura ma viene abitualmente usato in tante applicazioni pratiche. L'unità di misura della pressione nel SI è il Pascal (Pa). Il bar è uguale a 10^5 Pa ovvero a 10 N/cm^2 ovvero a 0,986 atmosfere. Una sottomisura del bar molto usata in meteorologia è il millibar (mbar) corrispondente al millesimo di bar ovvero a 10^{-3} bar (http://it.wikipedia.org/wiki/Bar_%28unit%C3%A0_di_misura%29).

Pertanto, secondo l'assioma in cui una pressione unitaria è uguale alla forza diviso la superficie, si avrà che il carico nominale sarà uguale al carico totale espresso in kilogrammi suddiviso la superficie agente del carico, che, nel caso specifico di questo lavoro, corrisponde alla sezione trasversale dei travetti (Tabella 2.2):

$$\text{carico unitario} = \text{carico totale (kg)} / \text{superficie trasversale del provino}$$

Carico nominale	Pressione dell'olio (bar)			Carichi effettivi in tonnellate (t)		
	<i>Kg/cm²</i>	<i>10 x 10 cm²</i>	<i>10,6 x 10,6 cm²</i>	<i>12 x 12 cm²</i>	<i>10 x 10 cm²</i>	<i>10,6 x 10,6 cm²</i>
25	8	9	11	0,25	0,265	0,3
50	16	18	23	0,5	0,53	0,6
100	32	34	46	1	1,06	1,2
200	64	68	92	2	2,12	2,4

Tabella 2.2. Vengono riportati i bar della pressione dell'olio in funzione della sezione dei campioni a disposizione ($10 \times 10 \text{ cm}^2$, $10,6 \times 10,6 \text{ cm}^2$, $12 \times 12 \text{ cm}^2$) e dei carichi nominali. La colonna a destra elenca i carichi effettivi applicati.

Dopo questa fondamentale digressione tecnica sui carichi si entra nel merito della metodologia di acquisizione delle deformazioni. Il campione viene posto tra le piastre della pressa e precisamente al centro dei piani in modo tale che il carico venga distribuito con baricentro centrale al travetto. Successivamente, dopo aver regolato la giusta pressione dell'olio in funzione della superficie del campione e del carico nominale (Tabella 2.2.), viene azionata la pressa attraverso l'interruttore di avvio in modo tale da imprimere al campione il carico prescelto. In seguito si monta il distanziometro al campione attraverso il set metallico di supporto dello strumento appositamente realizzato per la determinazione delle deformazioni in travi di legno (Figura 2.10). Il distanziometro è collegato tramite un cavo di input ad un pc portatile utilizzato per il *datalogger* attraverso l'uso del programma di acquisizione dati.

Prima di iniziare la sessione di prova è sempre bene, onde evitare dimenticanze, immettere il percorso di salvataggio dei dati e il codice del campione e della prova nell'apposito campo. Il Keyence LK-G32 ha un intervallo di misura speculare di $\pm 5 \text{ mm}$ dove, al di fuori di tale intervallo, il segnale diventa inesistente. Tale caratteristica dello strumento si rinviene quando il bersaglio laser metallico viene posizionato sul campione: mettendo il bersaglio troppo vicino allo strumento o troppo lontano dalla sorgente del laser si riscontra un'assenza di segnale. Dopo aver trovato la giusta distanza (tipicamente 40 mm circa), il bersaglio metallico viene avvitato al campione mantenendolo in una posizione

orizzontale³⁹. Infine, attraverso il programma di acquisizione, viene portato il segnale allo zero, reiterando questa operazione fino a quando il segnale è costante⁴⁰. Da questo momento, una volta accertata la stabilità del segnale, viene avviato il *datalogger*.



Figura 2.10. Campioni con distanziometro Keyence, posizionati al centro delle piastre della pressa. Nella foto a destra si può notare il laser riflettere nel bersaglio metallico.

Il rilevamento delle tensioni indotte al provino avviene attraverso un foro, di un centimetro di profondità, realizzato fra il distanziometro e la placchetta riflettente. Il foro viene eseguito con un trapano avvitatore a batteria il quale monta una punta da legno di 18 mm di diametro. L'asportazione del legno comporta una deformazione con il conseguente avvicinamento della parte del legno subito sopra e sotto il foro. La sessione di registrazione dura all'incirca 10-15 minuti, cioè fino a quando il segnale si stabilizza su un valore di deformazione più o meno costante.

Le curve ricavate dai dati di deformazione nella maggior parte dei casi mostrano tipicamente, subito dopo il foro e per circa due minuti, un andamento concavo verso l'alto. I due punti di riferimento dopo il foro si avvicinano nel caso di deformazioni positive, mentre, dopo un paio di secondi incominciano ad allontanarsi fino ad un punto limite (in corrispondenza dell'estroffessione della curva verso il positivo), e, dopo, si riavvicinano fino a un valore di deformazione costante (Grafico 2.3). La stabilizzazione del segnale avviene tipicamente dopo circa 10-15 minuti dalla realizzazione del foro. Nel Grafico 2.3 sono rappresentate le deformazioni di un campione umido sottoposto a 50 kg/cm^2 di carico nominale. In esso possiamo constatare che le deformazioni - nonostante la compressione - sono di segno negativo testimoniando delle tensioni a trazione; questa caratteristica tipica

³⁹Aumentando l'inclinazione del bersaglio il laser riflesso non verrà ricevuto dallo strumento.

⁴⁰Proprietà intrinseca dello strumento quella di produrre una minima deriva del segnale.

si è riscontrata con una certa frequenza nei provini umidi. La curva del Grafico 2.3, prodotta dal *datalogger*, viene descritta nel seguente modo:

1. subito dopo l'avvio del *datalogger* si riscontra per una decina di secondi un andamento costante del segnale a zero deformazioni;
2. il picco verso l'alto corrisponde al momento in cui viene effettuato il foro;
3. fra i 25 e i 100 secondi si rinviene la concavità: i punti di riferimento si allontanano ma in seguito si riavvicinano;
4. intorno agli 800 secondi (circa 15 minuti) le deformazioni si stabilizzano a 10 micrometri.

La flessione concava della curva è riscontrabile nel caso vengano impiegati carichi di lieve entità, mentre nel caso di carichi notevoli la curva molto spesso non presenta la tipica concavità, o, al massimo, possiede una leggera estroflessione (Grafico 2.4).

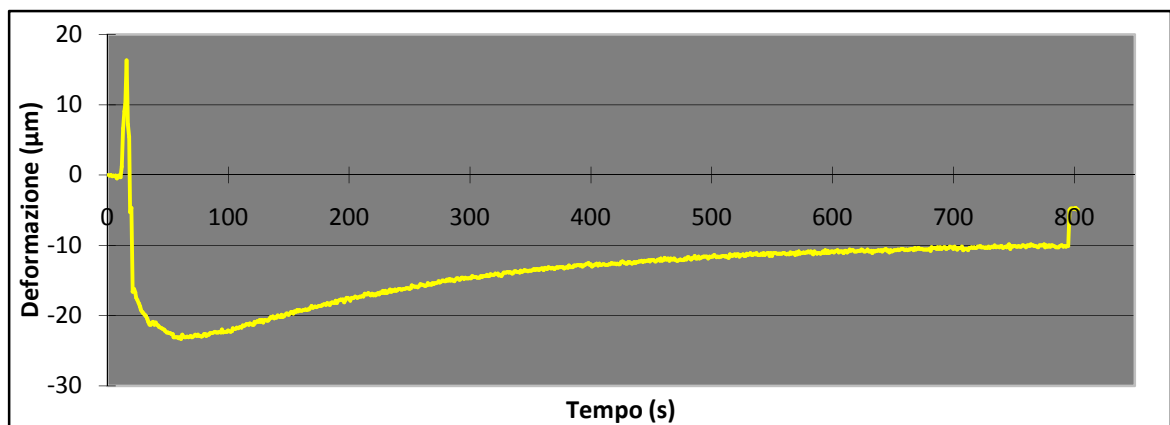


Grafico 2.3. Andamento delle deformazioni di un campione umido sottoposto a 50 kg/cm^2 di carico nominale.

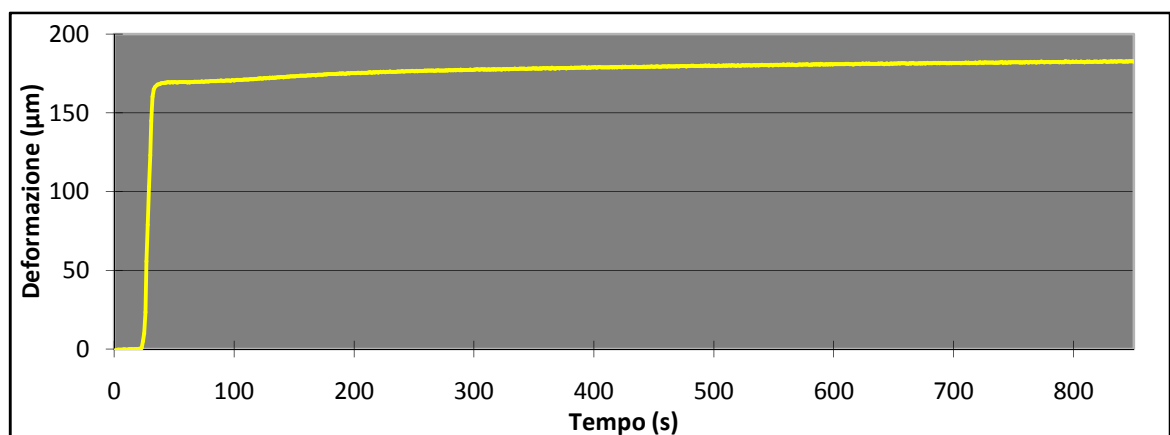


Grafico 2.4. Andamento delle deformazioni di un campione essiccato sottoposto a 200 kg/cm^2 di carico nominale.

Le tensioni di compressione vengono accertate, nel diagramma deformazioni-tempo, quando il grafico si trova sopra l'ascissa ovvero per valori di deformazione positive. Invece, quando il grafico si trova al di sotto dello zero, cioè per deformazioni negative, le tensioni sono a trazione. In alcuni casi sono state registrate tensioni a trazione nonostante i provini fossero caricati a compressione. Questo comportamento del legno è imputabile alla presenza di gradienti di umidità e di tensioni interne, dovuto alla presenza di legno di tensione o anche all'irregolarità di forma dei provini che determina la distribuzione dei carichi sul provino.

Conclusa la registrazione delle deformazioni in un foro, si reitera il procedimento sullo stesso provino. In corrispondenza di ciascuna sezione longitudinale del provino sono state eseguite un numero di coppelle pari a tre. Le coppelle sono state eseguite in modo sfalsato evitando la sovrapposizione verticale degli stessi onde limitare l'influenza, dei fori eseguiti precedentemente, sulle deformazioni dei fori da eseguire ancora sulla stessa sezione. Le linee rosse sul provino della Figura 2.11 indicano che i fori sono stati eseguiti scorrettamente, evidenziando la sovrapposizione verticale. Invece, le linee rosse sul campione della figura 2.12 indicano che i fori si trovano in tre piani verticali distinti. Infine, si è prestata particolare attenzione nell'eseguire i fori sul legno privo di difetti, rappresentati dalle spaccature e dai nodi, in quanto questi potrebbero influire sulla deformazione effettiva.

Un principio fondamentale che si è cercato di applicare è stato la uniformità delle prove di laboratorio, tentando di ridurre al minimo l'errore statistico dei dati dovuto all'imprecisione procedurale del metodo.

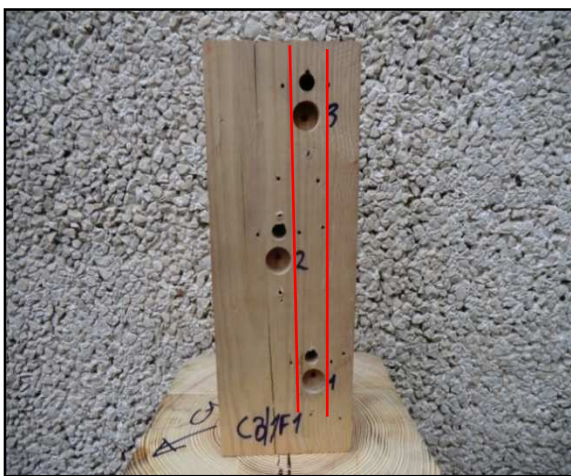


Figura 2.11. Le linee rosse mettono in evidenza che i fori sono stati eseguiti in modo scorretto.

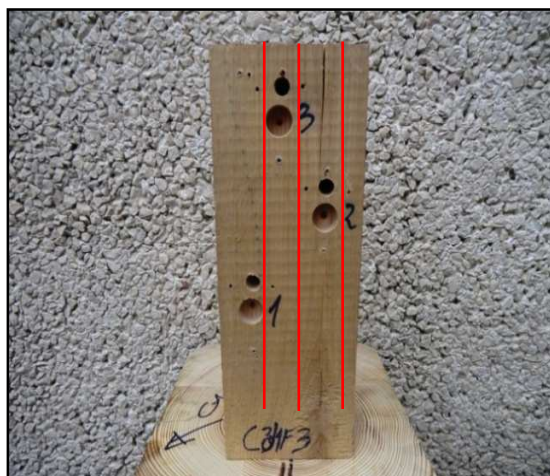


Figura 2.12. I fori in questo campione sono stati eseguiti correttamente. Le linee rosse evidenziano i tre piani verticali.

2.4 Altre prove di laboratorio: metodo alternativo di rilevamento dell'umidità del legno

Il rilevamento dei gradienti di umidità del legno è stato di fondamentale importanza in quanto ha fornito valori utili alla comprensione degli stati di tensionali definiti "anomali". L'igrometro elettrico è in grado di misurare l'umidità con accuratezza vicina al reale valore di umidità del legno, ma il metodo più accurato di misura di umidità è il *metodo gravimetrico* o *metodo a doppia pesata*.

La norma UNI EN 13183-1 (2002)⁴¹ sulla determinazione dell'umidità del legno attraverso il metodo gravimetrico esplica nella parte del procedimento⁴² che i campioni da sottoporre al metodo devono avere determinate dimensioni o quanto meno essere cubiformi. Il prelievo superficiale di un campione di forma cubica da un elemento strutturale in opera determina sicuramente un peggioramento qualitativo dell'elemento stesso sotto il punto di vista estetico. Quando invece la determinazione dei gradienti di umidità avviene in profondità, l'applicazione di questo metodo diventa tecnicamente impossibile in quanto si pregiudica la funzionalità portante.

Un metodo alternativo di determinazione dell'umidità è quello di prelevare dei campioncini di segatura dalla trave e, successivamente, applicare il *metodo a doppia pesata*. Utilizzando una piccola punta da legno vengono ricavati dei campioni di truciolo a profondità crescente di un centimetro. L'attendibilità del metodo è stata verificata attraverso la correlazione dell'umidità dei trucioli con i valori di umidità dei cubi.

Da un travetto di castagno di 10 x 10 cm² di sezione trasversale viene asportata una "fetta" di legno di 2 cm di altezza circa (Figura 2.13). La sezione prelevata viene segata suddividendola in 36 cubi formando una matrice di 6 x 6 (Figura 2.16). I cubi, segnati col codice matriciale, vengono pesati con una bilancia (Figura 2.15) con risoluzione al millesimo di grammo (1/1000 g) e, subito dopo, vengono posti in stufa di essiccazione portandoli in tal modo allo stato anidro. Successivamente, dopo circa 48 ore si ripesano, determinando l'umidità percentuale attraverso la seguente relazione:

⁴¹Norma UNI EN 13183-1 (2002) Umidità di un pezzo di legno segato. Determinazione tramite il metodo per pesata.

⁴²Il procedimento è riportato testualmente come segue: "ricavare uno strato campione di sezione trasversale massima e dimensioni minime di 20 mm, tagliandolo nella direzione della fibratura a una distanza di 0,3 m da una estremità o dall'altra del pezzo (o in posizione intermedia del pezzo che presenta una lunghezza minore di 0,6 m). Lo strato campione deve essere costituito da legno non resinoso e privo di corteccia, nodi o tasche di resina. In presenza di simili caratteristiche, ricavare lo strato campione dall'area libera più vicina verso la parte centrale del provino".

$$\omega = (m_1 - m_0) / m_0 * 100$$

dove:

- m_1 = massa allo stato relativamente umido;
- m_0 = massa allo stato anidro.

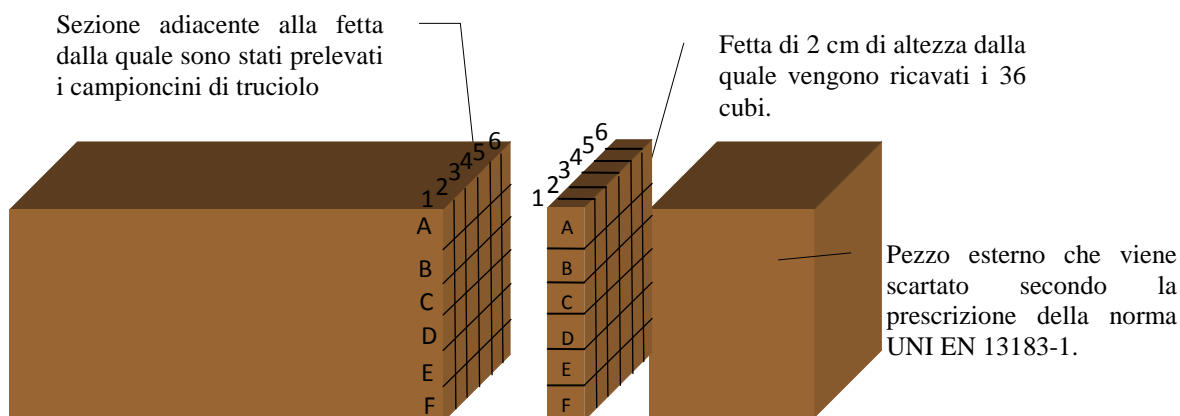


Figura 2.13. Particolare della fetta estratta dal travetto e della sezione dalla quale si ricavano i campioni di truciolo in matrice.

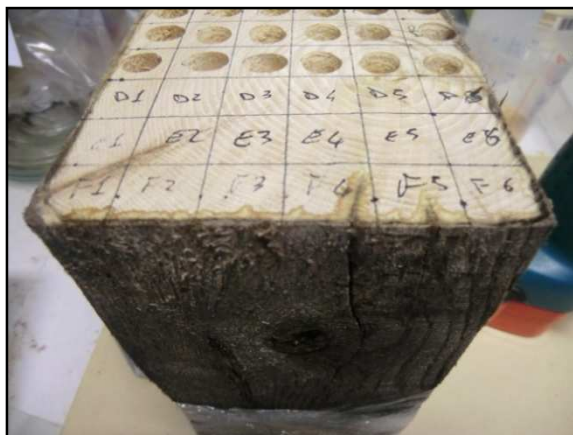


Figura 2.14. Sezione del campione dalla quale vengono prelevati i campioni di truciolo seguendo la matrice (si notino i fori eseguiti col trapano).



Figura 2.15. Bilancia con risoluzione di 1/1000 g impiegata per pesare i campioni.

Contemporaneamente sono stati ricavati i campioncini di truciolo nella sezione del travetto che fiancheggiava la “fetta” prima che venisse effettuato il taglio (Figura 2.17). I trucioli ricavati, sempre seguendo la matrice, vengono pesati e posti su piccoli contenitori in carta stagnola segnando ovviamente la corrispondente posizione matriciale (Figura 2.18). I trucioli dopo averli essiccati in stufa, come è stato fatto con i cubi della matrice, vengono ripesati ricavando così i valori di umidità.



Figura 2.16. Sezione segata in 36 cubi.



Figura 2.17. Campioncini di truciolo pronti a essere essiccati. I trucioli sono stati prelevati mantenendo la corrispondente posizione matriciale dei cubi.



Figura 2.18. Contenitori di carta stagnola con la corrispettiva posizione in matrice.

2.5 Il campionamento risultante

In totale i campioni di castagno utilizzati sono 24, tra cui 16 di questi relativamente essiccati e 8 campioni decisamente umidi. Il metodo della determinazione dei carichi, attraverso le deformazioni subite dai campioni, ha richiesto l'applicazione di carichi nominali via via crescenti. Ciascun campione è stato sottoposto ad un determinato carico nominale, rilevando in esso un totale di 12 deformazioni corrispondenti alle 12 coppelle (tre per ciascuna sezione longitudinale del provino). Il campionamento risultante, in funzione dei carichi applicati e al tipo di campione, è così elencato:

- 9 campioni essiccati con geometria regolare;
- 7 campioni essiccati con geometria irregolare;
- 6 campioni umidi con geometria regolare.

Nella Tabella 2.3 viene elencato il campionamento finale indicando il numero di campioni impiegati per ciascuna categoria di provino e per ciascun carico nominale applicato. Si evince dalla tabella che per i carichi nominali da 25 kg/cm², 50 kg/cm² e 100 kg/cm² sono state eseguite due ripetizioni di prova per i tre tipi di campione. Altre due ripetizioni sono state eseguite sul castagno essiccato con geometria regolare a 200 kg/cm² di carico nominale. Nelle altre prove è stata effettuata una sola ripetizione, mentre, non è stata eseguita la prova scarica sul castagno essiccato con geometria irregolare. Il motivo per la quale non sono state effettuate due ripetizioni per tutte le prove è da attribuire alla limitata disponibilità dei travetti di castagno. La prova scarica è servita per evidenziare solamente la presenza o meno di tensioni interne del legno per cui, in funzione della disponibilità dei provini si è data priorità alle prove cariche.

	<i>scarico</i>	25 kg/cm ²	50 kg/cm ²	100 kg/cm ²	200 kg/cm ²
<i>Castagno essiccato regolare</i>	1	2	2	2	2
<i>Castagno essiccato irregolare</i>	-	2	2	2	1
<i>Castagno umido regolare</i>	1	2	2	2	1

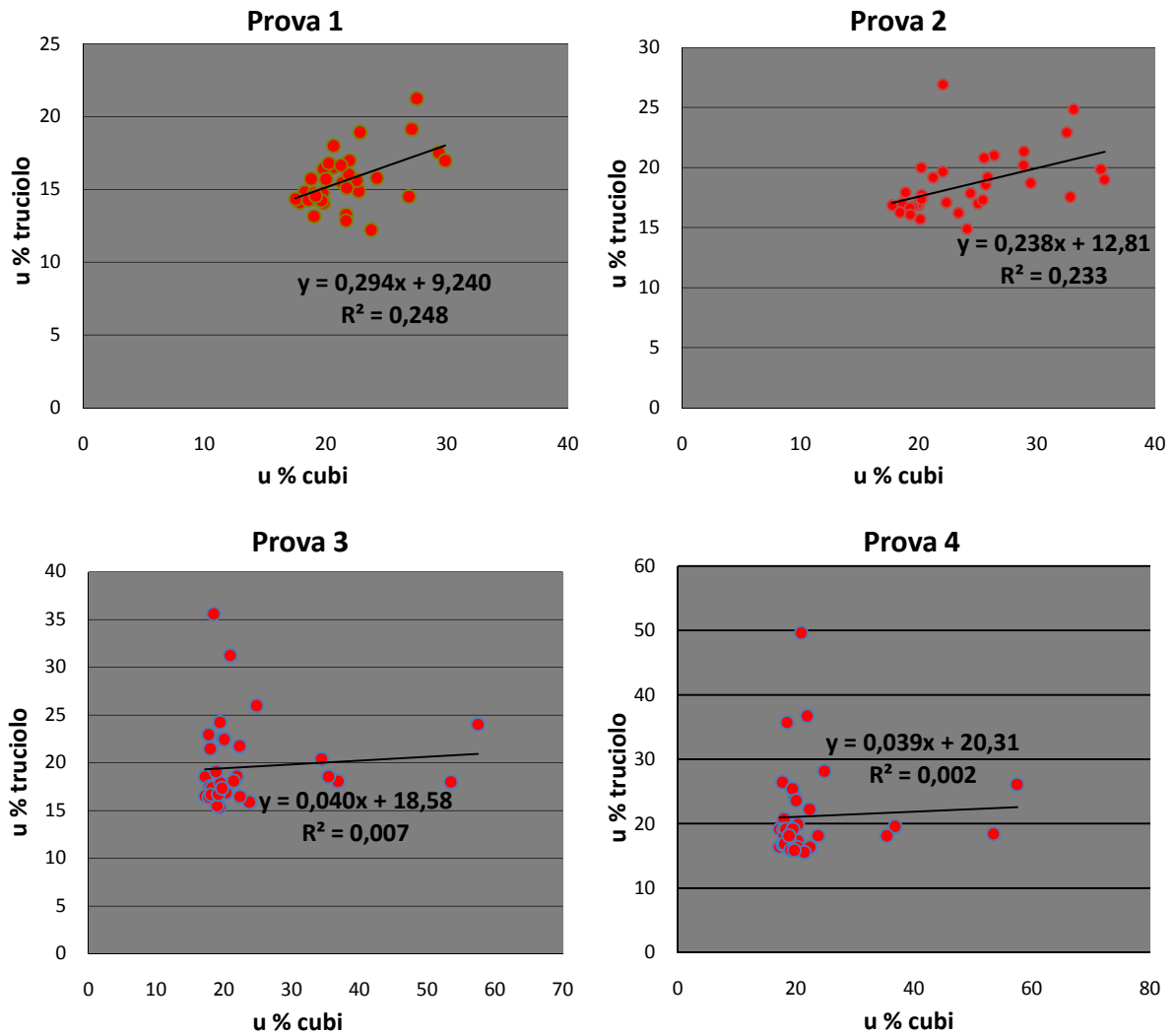
Tabella 2.3. Tabella riassuntiva del campionamento finale.

3 RISULTATI E DISCUSSIONE

3.1 Umidità con il metodo in matrice

L'esperimento non ha portato ai risultati attesi riscontrando sempre coefficienti di determinazione R^2 bassi. Nei Grafici 3.1 si riportano alcune prove effettuate. I valori di umidità dei trucioli sono più bassi di quelli dei cubi. Probabilmente il calore sviluppato dall'attrito della punta del trapano col legno ha influito nell'evaporazione dell'umidità riducendone il peso. Quindi, la differenza di umidità fra la pesata allo stato fresco e la pesata allo stato umido è decisamente inferiore rispetto alla reale umidità del campione.

Il tentativo di determinazione dei gradienti di umidità dei provini di questo lavoro, attraverso il metodo della doppia pesata del truciolo, può ritenersi accantonato.



Grafici 3.1. Vengono riportati i risultati di quattro prove di correlazione.

3.2 Le deformazioni

I dati delle prove sono stati inseriti in Excel ed elaborati utilizzando i comuni parametri usati in statistica descrittiva quali, media, deviazione standard e coefficiente di variazione. Le deformazioni, in una sessione di registrazione, mediamente si stabilizzano dopo circa 10-15 minuti dalla realizzazione della coppella. La deformazione presa come riferimento col fine dell'analisi dei dati è stata quella rilevata a 800 secondi ovvero a 13 minuti e 20 secondi. La deformazione rilevata subito dopo l'esecuzione del foro, e, precisamente, in corrispondenza del picco della concavità della curva del Grafico 2.3 tempo-deformazione, è quasi sempre più bassa come valore relativo rispetto a quella acquisita a 800 secondi. La differenza di deformazione registrata fra i due punti si aggira in media sugli $8,5 \mu m$ sul castagno essiccato e $5,1 \mu m$ sul castagno umido. Invece, i valori massimi differenziali riscontrati nei due castagni sono rispettivamente $30,9 \mu m$ e $18,6 \mu m$.

Questo *gap* è da attribuirsi all'assestamento del legno dovuto alle nuove condizioni igrometriche che si vengono a creare subito dopo l'esecuzione del buco, esponendo così gli strati di legno in profondità a diverse condizioni ambientali. Un'altra spiegazione della differenza di deformazione tra i due momenti sopra citati, potrebbe anche essere la deriva di segnale del distanziometro; tuttavia le verifiche effettuate per constatare la deriva del distanziometro nell'arco temporale di circa 15 minuti, non hanno mai evidenziato un allontanamento del segnale dallo zero di oltre $2 - 3 \mu m$ (Grafico 2.1 nel Paragrafo 2.2.1). Queste verifiche sono state condotte in condizioni di quiete su provini scarichi, senza disturbi né sullo strumento né sul provino.

I *gap* tra le deformazioni al picco della concavità e le deformazioni agli 800 secondi riscontrati durante le prove sono superiori ai *gap* registrati durante la verifica del segnale del distanziometro. Questa differenza è imputabile probabilmente ai fattori di disturbo dovuti all'esecuzione del foro, ai trucioli asportati dalla punta del trapano che cascavano sulla sorgente del laser, e indirettamente, alle tensioni generate dalla pressa idraulica.

La correlazione statistica dei dati è stata possibile grazie all'uso del programma di elaborazione dati Excel 2007. Il programma ha permesso di mettere a confronto i carichi nominali e le corrispettive deformazioni generate da essi mettendo in un sistema di assi cartesiani i due tipi di dati. La verifica della correlazione statistica è stata eseguita per i due tipi di campione, castagno essiccato e castagno umido, evidenziando le differenze di deformazione dovute all'influenza dell'irregolarità di forma e dei gradienti di umidità dei campioni.

3.2.1 Il castagno essiccato

Il provini essiccati sono l'insieme dei campioni essiccati sia regolari che irregolari (sedici in tutto). Le deformazioni dei due tipi di provino sono stati analizzati insieme ricavando i parametri inseriti nella Tabella 3.1. Il Grafico 3.2 riporta le deformazioni dei provini essiccati in funzione del carico nominale applicato. Aggiungendo la linea di tendenza delle medie delle deformazioni, viene messo in luce che le medie hanno una buona correlazione lineare e un coefficiente di determinazione R^2 quasi all'unità ovvero 0,98. Le singole deformazioni registrate, però, presentano una forte dispersione rispetto alla media, questa testimoniata dai coefficienti di variazione relativamente alti. Pertanto, le medie delle deformazioni corrispondenti a un determinato carico nominale sono poco rappresentative rispetto alle singole deformazioni misurate.

La dispersione dei dati è graficamente individuabile osservando sempre il Grafico 3.2 sulla correlazione statistica dei campioni essiccati. Il Grafico mostra un'ottima correlazione lineare tra i valori medi evidenziata dalla linea rossa, ma, un'elevatissima differenza tra i massimi e i minimi, in particolar modo per le prove effettuate a carichi nominali da 100 kg/cm². La barra arancione indica il *gap* dei valori massimi e minimi, estendendosi da 335 μm di deformazioni positive fino a -152 μm di deformazioni negative per carichi da 100 kg/cm².

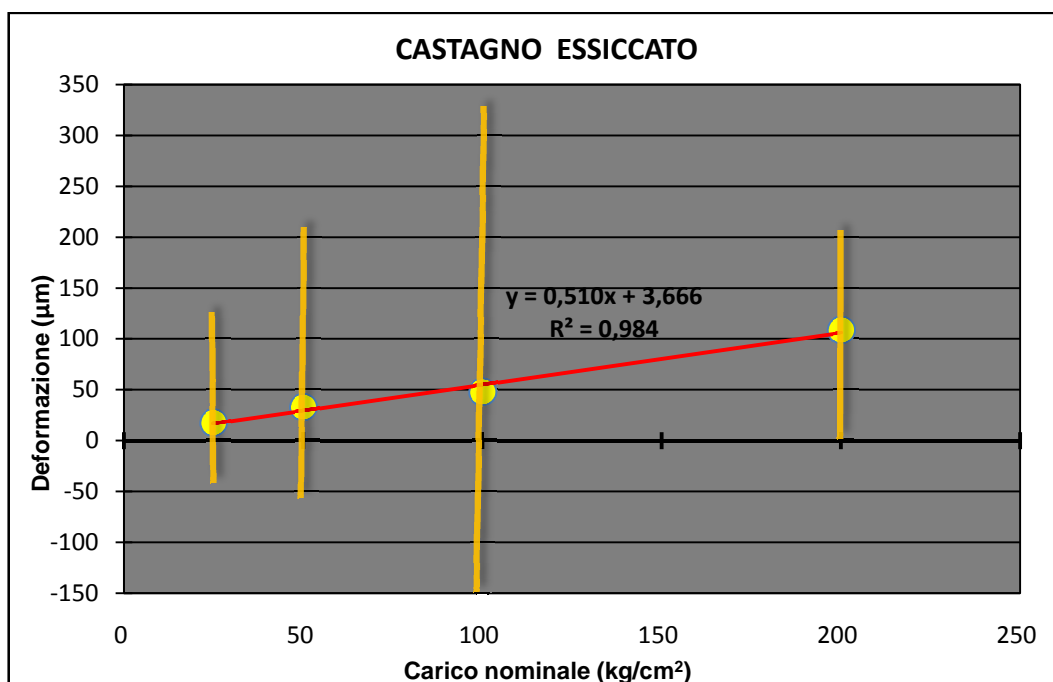


Grafico 3.2. Correlazione lineare delle medie delle deformazioni sul castagno essiccato in funzione dei carichi nominali applicati. La retta rossa è la linea di tendenza, i punti gialli sono le medie delle deformazioni e le barre arancioni rappresentano i massimi e i minimi.

CASTAGNO ESSICCATO					
<i>Carichi nominali (kg/cm²)</i>	<i>Media (μm)</i>	<i>Dev.St (μm)</i>	<i>Cv (%)</i>	<i>Max (μm)</i>	<i>Min (μm)</i>
25	17,3	31,2	180,8	123,0	-46,5
50	33,0	82,8	251,2	207,5	-58,4
100	47,5	82,8	174,3	335,8	-152,7
200	108,3	68,4	63,2	216,7	0,5

Tabella 3.1. Deformazioni e parametri del castagno essiccato in funzione dei carichi nominali applicati.

Osservando la Tabella 3.1, le deformazioni maggiormente disperse attorno alla media sono quelle riconducibili ai carichi nominali da 50 kg/cm², dove il coefficiente di variazione raggiunge il valore di 250 % di dispersione rispetto alla media. Questo significa che una singola misurazione ha elevate probabilità di essere poco significativa, quando non fuorviante. Questo concetto si può comprendere facilmente facendo un esempio: impiegando in cantiere il metodo di determinazione dei carichi tramite le deformazioni su un elemento strutturale, si riscontrerà con molta probabilità un elevato rischio di ricavare un valore del carico che non corrisponde all'effettivo carico gravante sull'elemento.

La variabilità delle misurazioni è in linea con le attese, vista l'elevata anisotropia del legno e la presenza di numerose soluzioni di discontinuità quali fessurazioni da ritiro, nodi, deviazioni della fibratura e altri difetti ancora (Giordano, 1981). Dunque, a causa dell'elevata variabilità delle deformazioni, si rammenta che vi è un errore statistico intrinseco che è legato alle proprietà del legno e alla dimensione del campionamento.

Quest'ultimo è strettamente legato, nel caso specifico di questo lavoro, alla dimensione dei campioni in quanto per ogni campione possono essere eseguiti un numero massimo di dodici misurazioni. Un altro fattore limitante è la quantità di campioni a disposizione.

Secondo la statistica inferenziale, gli errori di campionamento casuale sono gli errori che si possono commettere nell'assunzione dei dati mediante la rilevazione su campione e in relazione alla grandezza sia del fenomeno da osservare che del campione. Gli errori casuali tendono comunque a diminuire, in media, all'aumentare della grandezza del campione (Di Bianca, 2006).

La media delle deformazioni qui calcolata, non corrisponde al valore atteso ovvero a quel valore che si prevede di ottenere in un gran numero di prove. Aumentando il numero delle prove, allora, si potrebbe avvicinare la media al valore atteso di deformazione, e di conseguenza, ridurre la variabilità dei dati intorno a essa.

Inoltre, i coefficienti alti di variazione potrebbero essere attribuibili ad errori sperimentali casuali, cioè quegli errori che dipendono da cause tendenzialmente fortuite e non prevedibili (Di Bianca, 2006).

L'applicazione del metodo esposto in questo lavoro ha rinvenuto sui provini sollecitati a compressione delle tensioni a trazione, evidenziate dai valori negativi di deformazione. La Tabella 3.1 e il Grafico 3.2 mostrano la distribuzione di questi valori negativi: essi si rinvennero sui campioni sottoposti a 25 kg/cm², 50 kg/cm² e 100 kg/cm² di carico nominale. Le tensioni a trazione qui rinvenute sono dovute con assoluta certezza all'irregolarità indotta ai provini. La genesi di tali tensioni è dovuta al baricentro decentrato delle compressioni generate dalla pressa conseguentemente alla geometria irregolare della sezione trasversale dei provini.

3.2.2 Il castagno umido

Il Grafico 3.3 sulla correlazione tra le deformazioni dei provini umidi e i corrispettivi carichi nominali mostra che esiste una certa correlazione statistica lineare fra i due tipi di dati. Il coefficiente di determinazione R^2 è pari a 0,93. Questo valore dimostra una correlazione; tuttavia se si osservano anche gli altri parametri statistici, in particolare la dispersione dei valori intorno alla media, si potrebbe ritenere che la correlazione tra carichi e deformazione non possa considerarsi è significativa.

Inoltre, paragonando le medie delle deformazioni per carichi da 50 kg/cm² e 100 kg/cm² si constata che essi sono pressoché uguali (5,1 μm a 50 kg/cm² e 5,9 μm a 100 kg/cm²). La relazione causa-effetto tra carico applicato e deformazione misurata viene disturbata da un fattore terzo, che identifichiamo nelle deformazioni indotte dal gradiente di umidità.

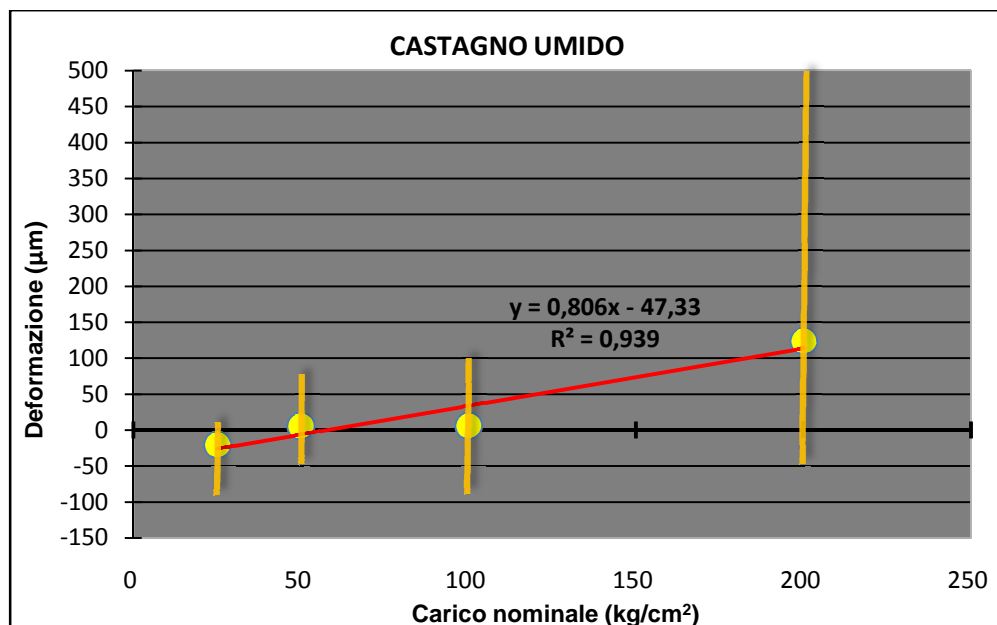


Grafico 3.3. Correlazione lineare delle medie delle deformazioni sul castagno umido in funzione dei carichi nominali applicati. La retta rossa è la linea di tendenza, i punti gialli sono le medie delle deformazioni e le barre arancioni rappresentano i massimi e i minimi.

La Tabella 3.2 riporta i parametri statistici delle deformazioni del castagno umido. I coefficienti di variazione sono esageratamente elevati in particolar modo per le deformazioni a carichi da 50 kg/cm² e 100 kg/cm², assumendo valori rispettivamente di 752 % e 841 %. Dunque, la sensibile dispersione dei dati testimonia che la media delle deformazioni non è rappresentativa delle singole deformazioni.

Osservando invece i valori massimi e minimi delle deformazioni a carichi da 200 kg/cm², si constata che esiste una notevole differenza tra tali estremi. Il *gap* è di circa 555 µm, con massimi di 505,1 µm e minimi di -50,1 µm. Per di più, il Grafico 3.3 mostra che la media ha un baricentro decisamente sbilanciato rispetto all'estensione dei dati registrati rappresentata nel Grafico dalla barra arancione.

CASTAGNO UMIDO					
Carichi nominali (kg/cm ²)	Media (µm)	Dev.St (µm)	Cv (%)	Max (µm)	Min (µm)
0	-48,6	42,7	-87,9	18,7	-125,0
25	-20,4	35,5	-173,6	7,0	-87,8
50	5,1	38,6	752,0	76,8	-48,4
100	5,9	49,4	841,7	100,8	-79,8
200	123,9	150,7	121,6	505,1	-50,1

Tabella 3.2. Deformazioni e parametri del castagno umido in funzione dei carichi nominali applicati.

Le deformazioni dei provini sollecitati a compressione con 25 kg/cm^2 di carico nominale hanno segno negativo. Nonostante il provino sia sottoposto a compressione le tensioni prevalenti sono a trazione. Queste tensioni, come verrà meglio specificato nel Paragrafo 3.4, sono probabilmente generate dai gradienti di umidità tipicamente riscontrati nei campioni umidi. La presenza di deformazioni a segno negativo misurate testimonia che le forze a trazione sono preponderanti rispetto alle forze a compressione, e, che quest'ultime, non sono sufficienti ad annullare le tensioni a trazione. Si deve ricorrere a carichi nominali da 50 kg/cm^2 , cioè un carico totale 5 tonnellate su un provino con sezione trasversale di $10 \times 10 \text{ cm}^2$, affinché le sollecitazioni a compressione annullino le forze a trazione.

Osservando le Tabelle 3.1 e 3.2, si può constatare che le medie delle deformazioni del castagno umido e di quello essiccato sono diverse. È sorprendente però che le deformazioni a carichi nominali da 200 kg/cm^2 sono più o meno simili. Il castagno essiccato si deforma mediamente di $108 \mu\text{m}$ mentre il castagno umido di $123 \mu\text{m}$ rilevando, addirittura, una maggior deformazione nel castagno umido.

La spiegazione che si potrebbe dare al fenomeno è la significativa umidità determina una maggiore plasticità dei campioni. Quindi, superando un certo limite di carico, le deformazioni plastiche diventano più significative (Giordano, 1981).

Inoltre, i coefficienti angolari delle linee di tendenza sono diversi. La linea di tendenza dei dati del castagno essiccato ha un coefficiente angolare di 0,51, mentre il coefficiente angolare della retta di correlazione del castagno umido è di 0,80. Si intuisce da questo confronto che la velocità di crescita delle deformazioni in funzione dei carichi nominali applicati è superiore nel castagno umido e inferiore nel castagno essiccato.

3.3 L'influenza dell'irregolarità dei campioni sulle deformazioni

La difformità di contatto della sezione trasversale del provino con il piano della pressa ha permesso di imprimere più compressione là dove il provino è più alto. Sui provini irregolari (sette provini in tutto) la sezione longitudinale più alta è sempre stata assegnata per convenzione alla *faccia 3*, mentre, la sezione longitudinale più bassa è la faccia opposta ovvero la *faccia 1*. Il lato della sezione trasversale, corrispondente ad un lato della faccia longitudinale più alta, è direttamente a contatto con la piastra della pressa, mentre, gli altri tre lati sono distaccati dal piano (Figura 3.1). Queste caratteristiche determinano lungo la *faccia 3* delle tensioni a compressione, mentre, nella *faccia 1* le tensioni determinate sono a trazione.

L'irregolarità di appoggio del piano della pressa con la sezione trasversale del campione provoca probabilmente una parziale flessione longitudinale del legno con estroflessione verso la *faccia 1*, generando le sopracitate tensioni (Figura 3.2).

Le *facce 2 e 4* avranno invece delle tensioni sia a compressione che a trazione. Suddividendo idealmente le due facce, le tensioni a compressione si rilevano con maggior frequenza nella metà delle sezioni longitudinali del provino che fiancheggiano la *faccia 3*, mentre, quelle a trazione nella metà facente spigolo con la *faccia 1*. La figura 3.1 mostra in sezione trasversale la distribuzione delle tensioni in relazione al comportamento descritto sopra. Il rosso più intenso indica la parte direttamente a compressione mentre il celeste la parte del provino a trazione. La zona sfumata tra il rosso e il celeste corrisponde ad una zona intermedia in cui le tensioni sono in parte a compressione ed in parte a trazione.

Osservando sempre la Figura 3.1, dunque, la sezione del provino a destra della linea tratteggiata è relativamente a compressione, mentre, la sezione a sinistra della linea tratteggiata è a trazione.

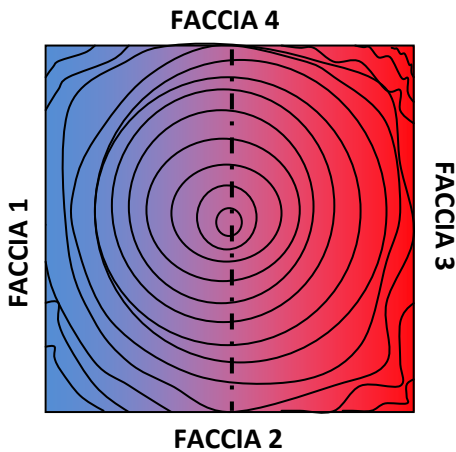


Figura 3.1. Baricentro delle tensioni a compressione (in rosso) spostato verso la faccia 3 del provino. Viceversa, le tensioni a trazioni (celesti) si rinven-gono in corrispondenza della faccia 1.

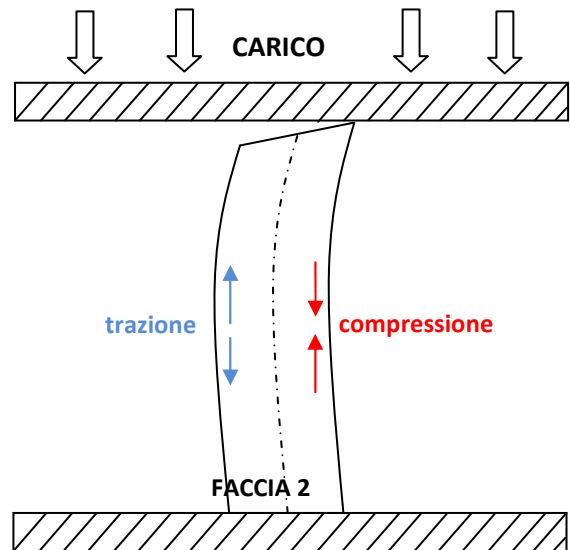


Figura 3.2. Il campione irregolare, visto in laterale, tra i piani della pressa, viene disegnato leggermente piegato in modo tale da evidenziare il fenomeno delle tensioni in gioco.

La Tabella 3.3 riporta i valori medi delle deformazioni misurate nelle sezioni longitudinali dei provini irregolari in relazione ai carichi nominali applicati mettendo a confronto le deformazioni della *faccia 1*, della *faccia 3* e la media delle *facce 2 - 4*. Dal confronto si evince che le deformazioni sono nettamente positive e di gran lunga superiori nella *faccia 3*. La media delle deformazioni delle *facce 2 - 4* assume dei valori intermedi, nella maggior parte dei casi, tra i valori delle deformazioni della *faccia 1* e della *faccia 3*.

Questa tendenza è confermata, inoltre, dalla media delle medie delle deformazioni registrate nelle sezioni longitudinali in funzione dei carichi nominali applicati. Solamente per carichi nominali da 25 kg/cm^2 , la media delle deformazioni rinvenute nelle *facce 2 - 4* è inferiore alle deformazioni della *faccia 1* ($-7,8 \mu\text{m}$). Questa "anomalia" è imputabile probabilmente all'applicazione di carichi di piccola entità che non risaltano le differenze di deformazione distribuite nel provino dovute all'irregolarità indotta. Viceversa, carichi più importanti determinano non solo un aumento dei valori di deformazione positiva della *faccia 3* ma un aumento delle deformazioni positive delle sezioni longitudinali 2 e 4.

Questo andamento è facilmente intuibile osservando il Grafico 3.4, dove, le deformazioni medie delle due facce prima citate crescono con velocità superiore rispetto alle deformazioni della *faccia 3*. Osservando la posizione percentuale delle deformazioni medie delle *facce 2 - 4* rispetto al *gap* di deformazione tra la *faccia 1* e 3, si intuisce la

quantità di crescita di tale deformazione. Elenchiamo questa crescita percentuale, rispetto al *gap* di deformazione *faccia 1 - faccia 3*, delle deformazioni medie delle *facce 2 - 4* in base a quanto detto prima:

- a carichi nominali da 25 kg/cm², come già citato prima, le deformazioni sono inferiori rispetto alle altre due facce;
- a carichi nominali da 50 kg/cm², la deformazione si attesta a circa il 13 % del *gap*;
- a carichi nominali da 100 kg/cm², la deformazione si attesta al 25,4 % del *gap*;
- a carichi nominali da 200 kg/cm², la deformazione si attesta a circa il 50 % del *gap*.

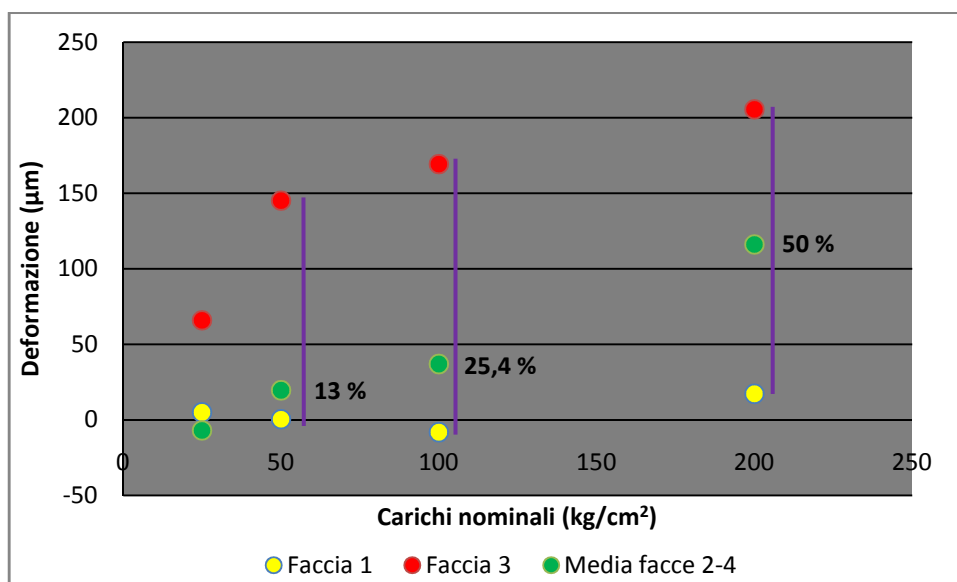


Grafico 3.4. Deformazione media della faccia 1, la faccia 2 e la media di deformazione della faccia 1 e 2. Si evidenzia la posizione percentuale delle medie di deformazione delle facce 2-4 all'interno dell'intervallo tra le deformazioni delle facce 1 e 3.

<i>Carichi nominali</i> (kg/cm ²)	<i>Faccia 1</i> <i>in trazione</i> (µm)	<i>Faccia 3</i> <i>in compressione</i> (µm)	<i>Media facce 2-4</i> <i>tensioni intermedie</i> (µm)
25	4,9	65,8	-7,08
50	0,4	145,0	19,48
100	-8,3	169,2	36,83
200	17,2	205,4	115,93
<i>MEDIA</i>	3,5	146,4	41,29

Tabella 3.3. Deformazione (µm) tra la faccia 1, la faccia 2 e la media di deformazione della faccia 1 e 2. Viene riportata anche la media di tali deformazioni.

Andando ad applicare un carico nominale da 200 kg/cm², le compressioni presenti nella metà del campione in senso longitudinale, e in corrispondenza della metà delle *facce* 2 e 4 adiacenti alla *faccia* 3 (Figura 3.2), vengono annullate circa del 50 % dalle tensioni a trazione (Grafico 3.4). Aumentando il carico, le tensioni in compressione diventano sempre più importanti, mentre, l'influenza delle tensioni a trazione diventano sempre meno significative nel controbilanciare le tensioni a compressione (evidenziato dalle percentuali crescenti). Pertanto, secondo questa legge di crescita, aumentando i carichi le deformazioni medie delle *facce* 2 - 4 tendono ad avvicinarsi alle deformazioni della *faccia* 3 ma in modo asintotico.

Il comportamento del legno all'applicazione dei carichi non è facilmente prevedibile. Il legno, essendo un materiale eterogeneo, presenta numerose soluzioni di discontinuità costituite dai nodi, dalle spaccature, dal legno di reazione, dall'umidità e da altri difetti ancora. L'esperienza empirica ha dimostrato che il concetto illustrato sopra non è stato sempre veritiero. Le coppelle, effettuate nelle *facce* 2 e 4, hanno determinato la registrazione di deformazioni non sempre in linea con le aspettative.

Osservando la Figura 3.2, i fori eseguiti a destra della linea tratteggiata, ovvero, nell'ipotetica zona a compressione, hanno spesso rilevato valori di deformazione contrastanti e al di sotto dei valori attesi. Lo stesso concetto, ma all'opposto, si può estendere sui fori eseguiti a sinistra della linea tratteggiata, dove, si sono riscontrati dei valori di deformazione a compressione più alti rispetto al semi lato a compressione.

L'effetto di tale comportamento è riassumibile con le medie delle deformazioni delle *facce* 2 - 4. Un esempio, è il valore medio di deformazione delle *facce* 2 - 4 a 25 kg/cm² citato precedentemente, che assume un valore negativo (-7,8 μ m) e più basso rispetto al valore di deformazione della *faccia* 1⁴³.

Questo comportamento "anomalo", come si è detto precedentemente, potrebbe essere attribuibile alla diversa posizione delle coppelle sui provini. È stata fatta una valutazione di coerenza dei dati con l'ipotesi dell'influenza della geometria irregolare dei provini attraverso un confronto delle deformazioni in relazione alla posizione dei fori e alle otto quote dei provini. Attraverso una verifica vera o falsa dell'ipotesi, si è ottenuto che per il 75 % dei casi le deformazioni sono coerenti con la posizione dei fori e le altezze dei provini irregolari (Tabella 3.4).

Si rammenta che la necessità di effettuare delle prove sui campioni irregolari è nata dal fatto di dover comprendere il fenomeno che sta dietro alle deformazioni "anomale"

⁴³Si rammenta che la *faccia* 1, non presentando alcun punto di contatto col piano della pressa, dovrebbe essere sottoposta a trazione, o al massimo, avere valori di deformazione inferiori alle altre facce.

registrate sui provini regolari. Quest'ultimi provini non sono perfettamente regolari presentando scostamenti massimi tra il valore minimo e il massimo di altezza di 1 mm. Questa differenza, anche se di piccola entità, ha prodotto in egual modo una diversa distribuzione del baricentro del carico sul provino determinando zone a trazione e zone a compressione. Questo comportamento è stato poi dimostrato dalle prove eseguite sui campioni irregolari.

La verifica di coerenza svolta sui provini regolari, infatti, ha evidenziato una buona percentuale di coerenza delle deformazioni in funzione della posizione delle coppelle e delle quote. L'80 % delle misurazioni è risultata coerente con l'ipotesi, mentre, il 20 % incoerente.

La verifica di coerenza delle deformazioni, in relazione alla locazione delle coppelle e alle quote, è stata attuata anche sui provini umidi. Il risultato non è molto confortante in quanto circa il 58 % delle misurazione è coerente con i fattori determinanti le deformazioni. La spiegazione di un basso valore di coerenza è da attribuire ai notevoli gradienti di umidità riscontrati nei campioni umidi. Si può affermare che l'influenza dei gradienti di umidità a produrre dei valori "anomali" di deformazione è superiore all'influenza della geometria del provino.

	<i>Coerenza (%)</i>	<i>Incoerenza (%)</i>
<i>Castagno essiccato regolare</i>	80,2	19,8
<i>Castagno essiccato irregolare</i>	75,0	25,0
<i>Castagno umido regolare</i>	58,5	41,5
<i>Tutti i campioni</i>	74,6	25,4

Tabella 3.4. Valori di coerenza e incoerenza all'ipotesi dell'influenza della geometria irregolare dei provini nei tre tipi di campione.

3.4 I gradienti d'umidità

Per gradiente igrometrico si intende il rapporto tra la differenza di umidità e la differenza di profondità di due punti del provino considerato, $[(U \%_{\max} - U \%_{\min}) / \text{distanza}]$. Le umidità sono state misurate a profondità crescenti attraverso l'igrometro elettrico GANN collegato agli elettrodi a chiodi con penetrazione a battente. Le profondità di rilevamento sono: lo strato superficiale del legno, la profondità a 1 cm, a 2 cm, a 3 cm e a 4 cm. La determinazione dei gradienti ha interessato la zona circostante le coppelle di tutti i campioni umidi e di una parte dei campioni essiccati. Questi dati sono poi stati trattati statisticamente ricavando la media dell'umidità e la media dei gradienti di umidità.

Dall'analisi statistica è risultato che i campioni umidi hanno un'umidità media del 19 %, con valore minimo di 7,5 % registrato a un centimetro di profondità e uno massimo di circa 30 % rilevato a due centimetri di profondità (Tabella 3.5).

Il gradiente del legno umido risulta 1,58 U %/cm.

	VALORI MEDI DI UMIDITÀ DEI PROVINI	
	<i>Provini umidi</i>	<i>Provini essiccati</i>
<i>Media (%)</i>	19	10,3
<i>Dev.st. (%)</i>	2,9	1
<i>Cv %</i>	15,5	10,1
<i>Valori massimi (%)</i>	29,7	12,7
<i>Valori minimi (%)</i>	7,5	7,6

Tabella3.5. Valori generali medi di umidità dei due provini con i corrispettivi parametri statistici.

I campioni essiccati presentano un'umidità media del 10,3 %, un valore minimo di 6,2 % misurato in superficie e un valore massimo di 14,9 % rilevato a quattro centimetri. Osservando le Tabelle 3.6 e 3.7, le differenze di umidità in profondità sono più significativi nel castagno umido che nel castagno essiccato, con un *gap* medio, tra l'umidità superficiale e quella a 1 cm del 3,9 %.

Il gradiente del legno essiccato risulta 0,85 U %/cm.

	CASTAGNO UMIDO				
	<i>Superficie</i>	<i>1 cm</i>	<i>2 cm</i>	<i>3 cm</i>	<i>4 cm</i>
<i>Umidità media dei provini (%)</i>	14,8	18,7	19,8	20,6	21,1
<i>Differenze medie (%)</i>	-	3,9	1,2	0,8	0,5
<i>Massimi di differenza (%)</i>	-	9,2	11,6	3,2	1,6
<i>Cv % delle differenze</i>	-	52	135,3	161,8	92,7

Tabella 3.6. Parametri statistici dell'umidità sul castagno umido in relazione alla profondità di misura.

	CASTAGNO ESSICCATO				
	<i>Superficie</i>	<i>1 cm</i>	<i>2 cm</i>	<i>3 cm</i>	<i>4 cm</i>
<i>Umidità media dei provini (%)</i>	8,5	10,5	11,2	11,6	11,9
<i>Differenze medie (%)</i>	-	1,9	0,8	0,4	0,3
<i>Massimi di differenza (%)</i>	-	4,1	3,1	2,2	1,7
<i>Cv % delle differenze</i>	-	36,2	105,7	143,4	169,4

Tabella 3.7. Parametri statistici dell'umidità sul castagno essiccato in relazione alla profondità di misura.

I Grafici 3.5 e 3.6 mostrano l'andamento dei gradienti nei due tipi di provino: in tutte e due i casi viene evidenziato che l'umidità è più elevata in profondità e che, il gradiente va progressivamente diminuendo. Il passo di decrescita delle differenze in funzione della

profondità crescente è evidenziato dall'equazione della curva di tendenza. Il coefficiente angolare della linea di tendenza (3,63) sul castagno umido è superiore al coefficiente angolare della linea di tendenza del castagno essiccato (2,01). Questa tendenza dimostra che le differenze di umidità sono più significative nel castagno umido.

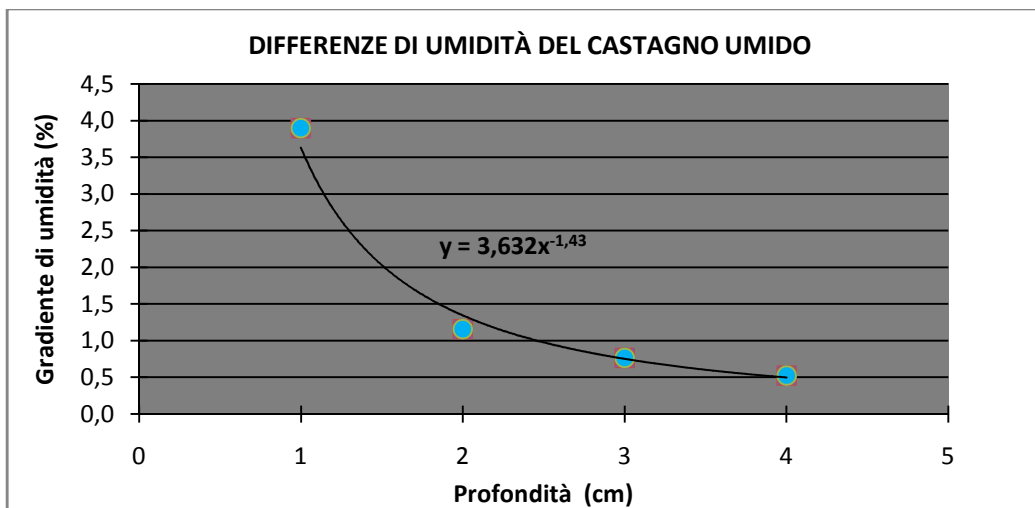


Grafico 3.5. Andamento dell'umidità nel castagno umido in relazione alla profondità.

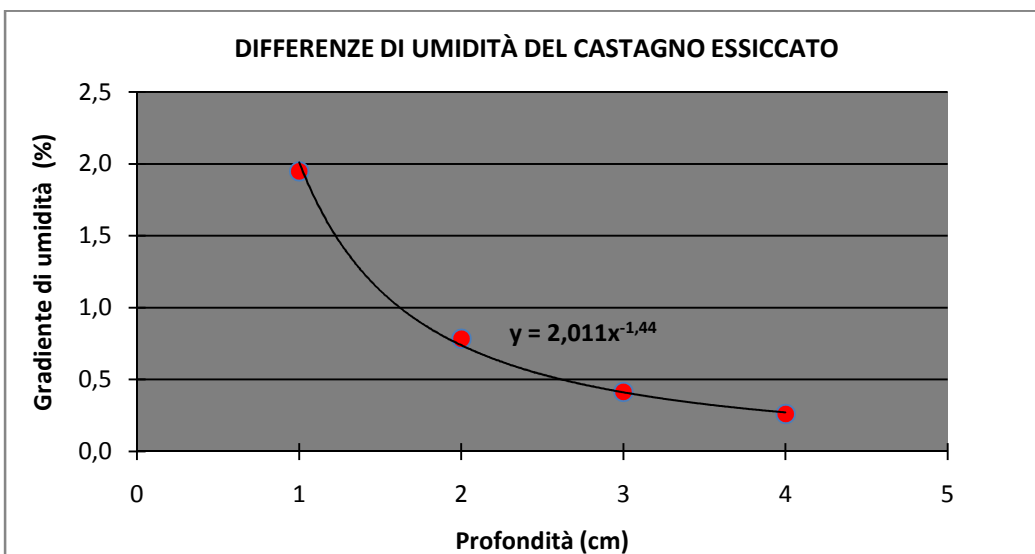


Grafico 3.6. Andamento dell'umidità nel castagno essiccato in relazione alla profondità.

I dati esposti precedentemente sono dei valori medi delle singole misurazioni. Se si analizzano invece i singoli valori si riscontrano dei massimi e dei minimi. Nel castagno essiccato i massimi e i minimi delle differenze di umidità non si discostano particolarmente dalla loro media (Tabella 3.7). Il coefficiente di variazione ad un centimetro non è particolarmente alto (36,2 %), mentre, per profondità crescenti il coefficiente di variazione aumenta arrivando a 169,4 % a quattro centimetri. Viceversa, nel castagno umido, si rinvengono valori massimi di differenze d'umidità decisamente più importanti,

riscontrando una differenza massima tra superficie e un centimetro di 9,2 %, e, una differenza tra un centimetro e due centimetri di 11,6 % (Tabella 3.6). Tale variabilità intorno alla media a questa profondità, infatti, è testimoniata da coefficienti di variazione relativamente alti, rispettivamente 52 % a 1 cm e 135 % a 2 cm.

La presenza dei gradienti incide sulle deformazioni, in particolar modo sono quelli più importanti ad essere decisivi nello stato tensionale del castagno umido. Le deformazioni rilevate sono generate da tensioni contrastanti del legno che si verificano tra la superficie del provino e i tessuti legnosi in profondità.

L'influenza dei gradienti di umidità sulle deformazioni può essere agevolmente spiegata prendendo come esempio i ritiri e i rigonfiamenti che si verificano generalmente nel legno al variare delle condizioni igrometriche. Le variazioni dimensionali, determinate dall'assorbimento e desorbimento dell'acqua da parte del legno, si hanno quando l'umidità del legno è quella corrispondente al campo igroscopico (0 % - 30 %). Il limite inferiore del campo igroscopico corrisponde al punto in cui le pareti cellulari presentano la minor quantità di acqua. Si parla di minor quantità di acqua perché le pareti cellulari non perdono mai, tutta l'acqua ma, rimane sempre una piccola quota di umidità trattenuta dai legami - OH delle catene cellulose ed emicellulose. Il limite superiore, invece, corrisponde al punto di saturazione delle pareti cellulari u_{sat} , dove, al di sopra di tale limite⁴⁴ non si riscontrano più movimenti dimensionali (Giordano, 1981).

Il ritiro dimensionale, conseguente all'essiccazione, sarà tanto più marcato quanto più l'umidità del legno è prossima a quella del limite superiore del campo igroscopico. La velocità di essiccazione e dei ritiri dimensionali si riducono progressivamente al diminuire dell'umidità del legno, fino a stabilizzarsi su valori bassi di umidità (Giordano, 1981).

I provini di questo lavoro si trovano tutti all'interno del campo igroscopico, pertanto in essi si registrano ancora relativi movimenti dimensionali dovuti all'equilibramento del legno con le condizioni ambientali. La superficie esterna, come si è dimostrato precedentemente, contiene meno umidità rispetto agli strati interni. Questo dimostra che la superficie si equilibra con le condizioni igrometriche dell'ambiente con più facilità, generando dei gradienti.

La conseguenza della presenza dei gradienti è la determinazione nel legno di stati tensionali. Le tensioni che vengono generate saranno tipicamente a trazione dove l'umidità è inferiore, dovuto ad un maggior ritiro dimensionale, mentre, dove l'umidità è maggiore le

⁴⁴Al di sopra del punto di saturazione delle pareti cellulari l'acqua si trova anche all'interno delle cavità cellulari. Soltanto sotto il punto di saturazione delle pareti cellulari si verificano i movimenti dimensionali dovuti alla variazione di umidità (Giordano, 1981).

trazione saranno, in contrapposizione ai tessuti meno umidi, in compressione. La differenza di tensione sarà enfatizzata maggiormente da differenze di umidità significative.

Viceversa, una distribuzione uniforme dell'umidità nel legno non determina stati di tensioni interne.

Sono state eseguite due prove sui provini senza l'applicazione di alcun carico con l'intento di rilevare le tensioni determinate dalla distribuzione non omogenea dell'umidità. I fori eseguiti sui provini hanno esposto lo strato sottosuperficiale fino a un centimetro, generando un vuoto tra gli strati in compressione e quelli a trazione. Questa discontinuità ha determinato la liberazione delle tensioni, rilevate tramite il distanziometro montato in superficie, cioè in corrispondenza della zona a trazione. Tipicamente, in condizioni siffatte si riscontra un allontanamento della sorgente del laser con il bersaglio metallico.

Questa caratteristica è particolarmente evidente osservando le deformazioni a prova scarica di un campione di castagno umido (Tabella 3.8). I valori negativi di deformazione misurati sul campione scarico, sono dovuti, con tutta probabilità, a degli stati di tensione superficiale a trazione. Ma non solo, anche nelle prove a carichi nominali di 25 kg/cm^2 , 50 kg/cm^2 e 100 kg/cm^2 si sono riscontrati dei valori negativi di deformazione. Solamente nella prova con carichi nominali 200 kg/cm^2 le tensioni preponderanti risultano a compressione.

La spiegazione di tali valori negativi è da ricondurre alle notevoli tensioni a trazione determinate dai gradienti d'umidità. I carichi a compressione di lieve entità non sono sufficienti a creare degli stati di tensione a compressione, in quanto, prevalgono quelle a trazione dei gradienti. Bisogna ricorrere a carichi nominali notevoli (200 kg/cm^2) per "annullare" le deformazioni derivanti dalle tensioni generate dal grado di disomogeneità dell'umidità nei campioni umidi. Osservando la Tabella 3.8, i valori medi delle deformazioni sui provini caricati con carichi nominali da 50 kg/cm^2 e 100 kg/cm^2 sono prossimi al neutro ($5,1 \mu\text{m}$ a 25 kg/cm^2 e $5,9 \mu\text{m}$ a 50 kg/cm^2). Mediamente, le tensioni a compressione di quest'ultime prove, generate dall'applicazione dei carichi nominali, hanno "annullato" le tensioni a trazione determinate dai gradienti di umidità. Questo gioco di forze fa presupporre che i valori medi di deformazione, misurati su provini scarichi e privi di gradienti di umidità e tensioni interne eventuali, tendono mediamente a zero.

<i>Carichi nominali</i> (kg/cm ²)	<i>Deformazione del castagno umido</i> (μm)	<i>Deformazione del castagno essiccato</i> (μm)
0	-48,58	20,4
25	-20,43	17,3
50	5,13	33,0
100	5,87	47,5
200	123,92	108,3

Tabella 3.8. Confronto delle deformazioni nei due tipi di campioni contenenti umidità diverse.

Per quanto riguarda la prova scarica eseguita sul campione essiccato, vengono rilevati invece dei valori positivi di deformazione ovvero degli stati di tensione a compressione. La motivazione di un comportamento "anomalo" del legno essiccato potrebbe essere ricercata nella presenza di stati di tensioni interne, oppure, a delle tensioni determinate dalla presenza di legno di reazione o di nodi. Il campione analizzato presenta un grosso nodo nello spigolo tra la *faccia 2* e la *faccia 3* (Figura 3.3). Le deformazioni rilevate (media di 20,4 μm) potrebbero essere attribuite alla presenza di questo nodo.

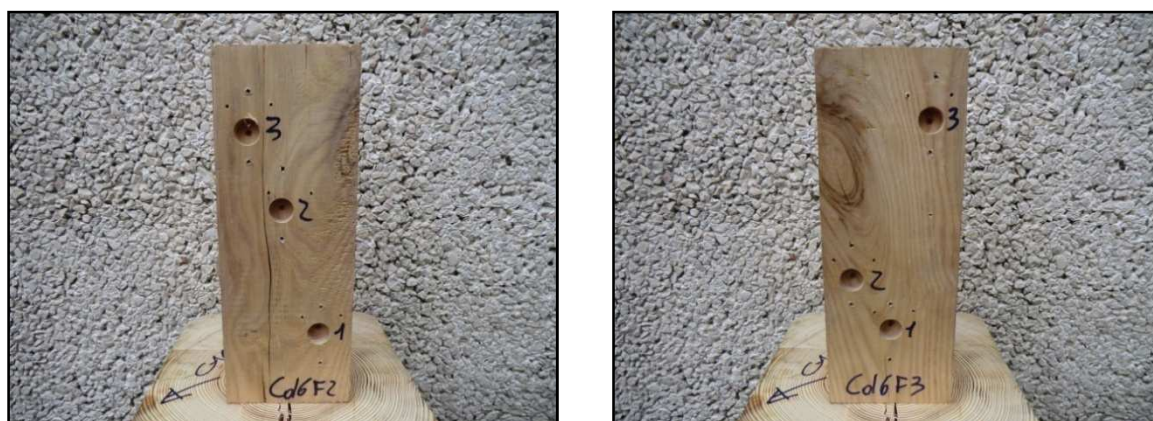


Figura 3.3. Le foto mostrano la faccia 2 e la faccia 3 di un campione di castagno essiccato (campione Cd6_scarico). Il campione ha un nodo in uno spigolo.

Le deformazioni a trazione e a compressione rilevate nella prova scarica presuppongono un errore intrinseco del metodo. I risultati delle prove cariche sono condizionati in minima parte dall'errore derivante dall'influenza dei gradienti sulle deformazioni. Pertanto, la deformazione misurata in laboratorio non corrisponde effettivamente ai carichi applicati.

L'errore è attribuito al condizionamento del legno alle variabili ambientali quali umidità relativa e temperatura. L'esposizione dei tessuti legnosi interni tramite l'esecuzione del foro, implica un equilibramento del legno con l'umidità relativa del laboratorio e in funzione della temperatura. L'umidità di equilibramento del legno - valida generalmente

per il legno di molte specie - a temperatura ambientale di 20 °C e umidità relativa del 65 % è di 12 % (Giordano, 1981). Le condizioni ambientali del laboratorio sono tali da poter affermare che i provini tendono ad equilibrarsi al 12 %.

La tendenza di assorbimento e desorbimento di acqua da parte dei due tipi di provini è opposta: i provini umidi hanno la propensione ad essiccarsi dato che hanno umidità media del 19 %, mentre, i provini essiccati al 10,9 % di umidità tendono ad assorbire umidità (Tabella 3.5). L'intensità di equilibramento sarà tanto più marcata quanto più è notevole la differenza di umidità dei campioni rispetto al valore di 12 % (Figura 3.4).

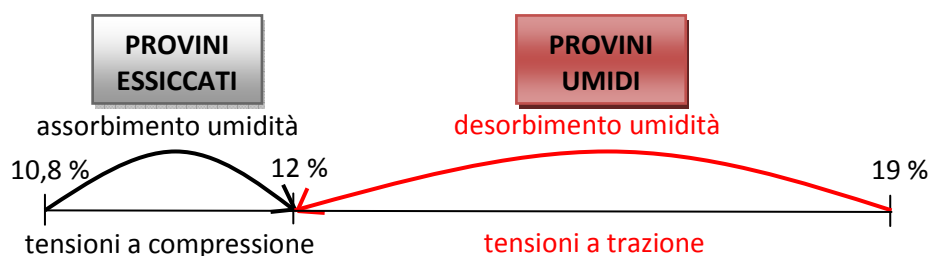


Figura 3.4. Differenza di umidità tra i provini essiccati e l'umidità di equilibramento e differenza di umidità tra i provini umidi e il 12 %.

La media delle deformazioni in provini privi di tensioni interne, di gradienti e nulli da carichi dovrebbe essere pari a zero. Al contrario, nelle prove scariche si rinviene una tensione residua che si attesta a $-48,58 \mu m$ sul provino umido e $20,4 \mu m$ sul provino essiccato. Le tensioni a trazione sono più rilevanti nel castagno umido a causa della maggior differenza di umidità rispetto all'umidità di equilibramento (Grafico 3.4). Questo è confermato dalle misurazioni delle deformazioni nei due tipi di provino.

L'errore tensionale attribuibile all'umidità si manifesta anche sulle prove cariche falsando la relazione tra carichi e deformazione. Considerati i valori medi di deformazione delle prove scariche come parametri di errore, si potrebbero costruire delle curve di correzione in funzione dell'umidità dei campioni rilevati. L'errore sarà più considerevole nel legno umido rispetto al legno prossimo al 12 %.

3.5 Confronto delle deformazioni del castagno e dell'abete rosso

In questo paragrafo si farà un confronto tra le deformazioni dell'abete rosso e le deformazioni del castagno. Ricordiamo che le prove di deformazione sull'abete rosso sono state eseguite col fine di verificare se gli elementi strutturali di legno in opera nel Battistero di San Giovanni a Firenze siano sottoposti a carico. Tali prove, eseguite preliminarmente al lavoro in cantiere, hanno consentito di mettere a punto la taratura del metodo, in modo da poter trasferire successivamente la metodologia in cantiere.

Le prove sono state effettuate sempre a carichi crescenti:

- carico unitario nominale da 22,5 kg/cm² su provino di 22,5 x 22,5 cm² di sezione trasversale;
- carico unitario nominale da 45 kg/cm² su provino di 18 x 18 cm²;
- carico unitario nominale da 90 kg/cm² su provino di 18 x 18 cm²;
- carico unitario nominale da 180 kg/cm² su provino di 18 x 18 cm².

La procedura metodologica è la stessa adottata in questo lavoro. La differenza riguarda solamente i carichi nominali applicati e le dimensioni in sezione trasversale dei provini. Affinché il confronto dei dati delle due specie possa essere attuato, è stato necessario riferire le deformazioni dell'abete rosso ai carichi nominali applicati nelle prove sul castagno: carico nominale da 25 kg/cm², da 50 kg/cm², da 100 kg/cm² e da 200 kg/cm². Ipotizzando un aumento delle deformazioni perfettamente lineare all'aumentare del carico nominale si sono ricavate, attraverso una proporzione, le deformazioni dell'abete rosso ai carichi applicati in questo lavoro (Tabella 3.8).

ABETE ROSSO			
<i>DATI ORIGINALI</i>		<i>DATI MODIFICATI</i>	
<i>Carichi nominali (kg/cm²)</i>	<i>Deformazione media (μm)</i>	<i>Carichi nominali (kg/cm²)</i>	<i>Deformazione media (μm)</i>
22,5	15,3	25	17
45	32,3	50	35,9
90	59,2	100	65,8
180	144,3	200	160,3

Tabella 3.9. Sotto la colonna "dati originali" vengono elencate le deformazioni ricavate dai carichi applicati sull'abete rosso nel lavoro originale. La colonna "dati modificati" riporta le deformazioni precedenti modificate attraverso una proporzione lineare.

Il Grafico 3.7 riporta le correlazioni delle deformazioni delle due specie. Tutte e due le prove hanno fornito degli ottimi risultati di correlazione tra i carichi nominali e le medie delle deformazioni conseguenti. Il coefficiente di determinazione R² della correlazione statistica è buono in tutte e due i casi (0,99 dell'abete rosso e 0,98 e del castagno). Il coefficiente angolare della retta di tendenza delle due specie è diverso. La linea di tendenza dei dati dell'abete rosso ha una pendenza maggiore (coefficiente angolare di 0,81) rispetto alla retta di correlazione dei dati del castagno (coefficiente angolare di 0,51).

Questo sta a significare che all'aumentare dei carichi sull'abete rosso, le deformazioni conseguenti saranno sempre più significative ed importanti rispetto alle deformazioni del castagno.

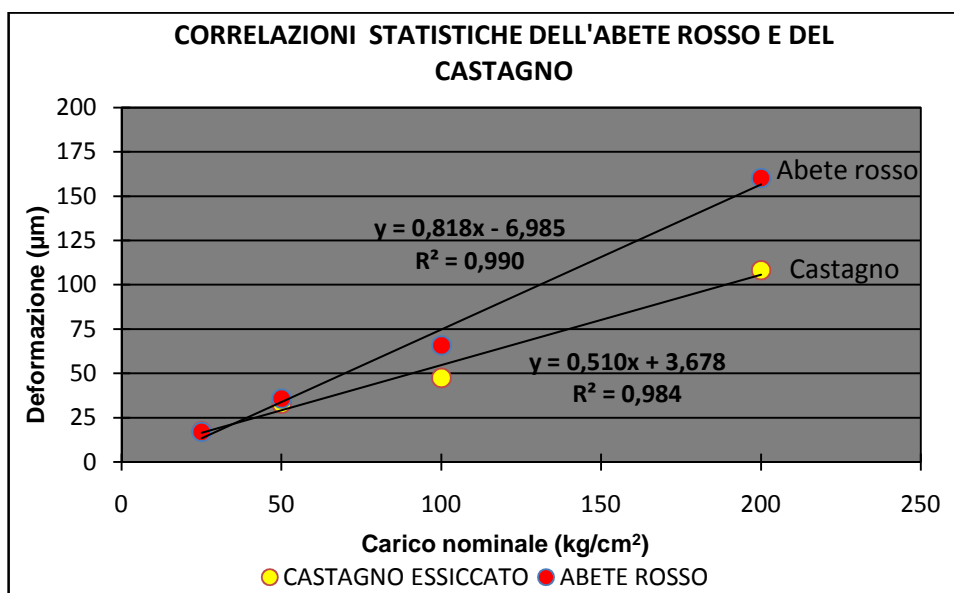


Grafico 3.7. Grafico delle correlazioni statistiche tra le medie di deformazione e i carichi nominali applicati nel castagno e nell'abete rosso.

Il Grafico 3.8 riporta le differenze di deformazione tra le due specie in funzione dei carichi nominali applicati enucleando ciò che è stato riferito prima. La linea di tendenza mette in evidenza, ovviamente, una buona correlazione delle differenze delle due specie. Se le deformazioni in funzione dei carichi crescono linearmente, sia per l'abete che per il castagno, anche le differenze di deformazioni tra le due specie aumenteranno di conseguenza in modo lineare.

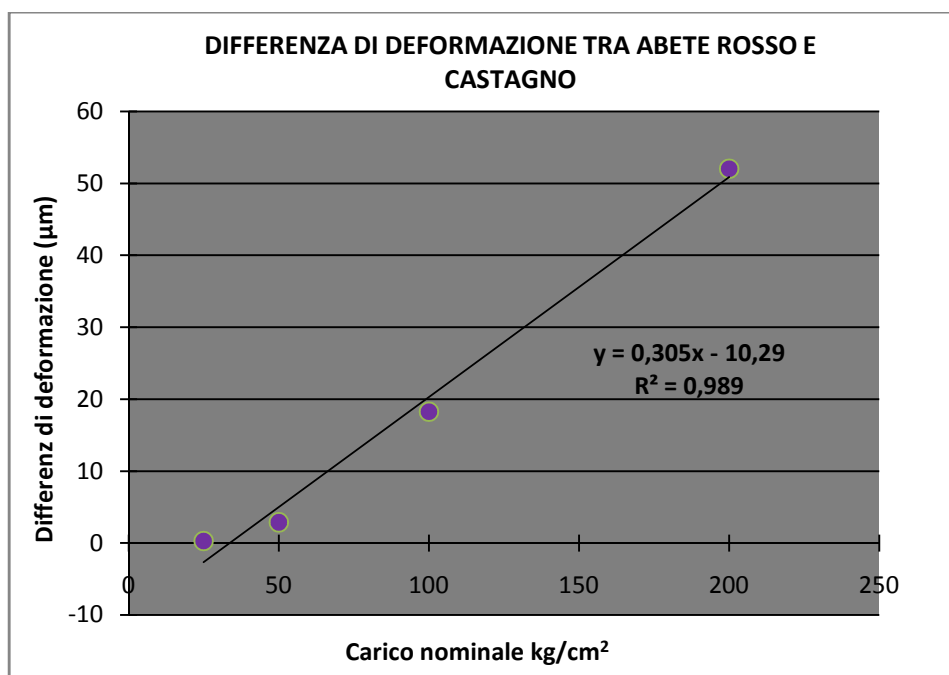


Grafico 3.8. Differenze di deformazione, a parità di carico nominale, tra l'abete rosso e il castagno.

I risultati delle prove delle due specie sono soddisfacenti se vengono prese in considerazione solamente le correlazioni. Analizzando invece la dispersione dei dati intorno alla media delle deformazioni si rinvencono, come già descritto nel Paragrafo 3.1, dei coefficienti di variazione alti. Osservando la Tabella 3.10, si denotano coefficienti di variazione superiori nel castagno essiccato rispetto ai coefficienti nell'abete rosso. Le differenze maggiori si riscontrano per carichi nominali da 50 kg/cm² e 100 kg/cm², dove, la dispersione in percentuale dei dati intorno alla media del castagno è, rispettivamente per i due carichi, 3 volte e 2 volte più alta della dispersione dell'abete rosso. Quindi, le medie delle deformazioni nell'abete rosso sono maggiormente rappresentative delle singole deformazioni, conferendo al metodo una maggior robustezza.

<i>Carichi nominali</i> (kg/cm ²)	ABETE ROSSO			CASTAGNO ESSICCATO		
	<i>Media</i>	<i>Dev.St.</i>	<i>Cv</i>	<i>Media</i>	<i>Dev.St.</i>	<i>Cv</i>
	(μm)	(μm)	(%)	(μm)	(μm)	(%)
25	17,0	18,6	109,2	17,3	31,2	180,8
50	35,9	30,4	84,8	33	82,8	251,2
100	65,8	53,9	81,9	47,5	82,8	174,3
200	160,3	94,8	59,1	108,3	68,4	63,2

Tabella 3.10. Confronto di media, deviazione standard e coefficiente di variazione delle deformazioni dell'abete rosso e del castagno essiccato.

4 CONCLUSIONE

Le prove di laboratorio hanno permesso di tarare il metodo di determinazione delle tensioni dei travetti di castagno e dei carichi a compressione gravanti su di essi tramite le deformazioni rilevate.

Il comportamento elastico del legno è stato in parte avvalorato dai risultati di questo lavoro. Le correlazioni lineari tra carichi nominali e deformazioni, sia del castagno che dell'abete rosso, hanno enucleato la linearità delle relazioni tra i carichi nominali di piccola entità e le deformazioni. Tuttavia, secondo quanto afferma Giordano (1981), inducendo elevati carichi a *compressione assiale* si osserverà che la linea fletterà verso l'asse delle ascisse, dove la correlazione tra le due specie assumerà un andamento non ben definito.

Le medie delle deformazioni delle due essenze confrontate sono pressoché simili. Una delle differenze riscontrate riguarda i coefficienti angolari delle rette di tendenza delle medie di deformazione delle due specie legnose. La retta di correlazione dell'abete rosso ha un coefficiente angolare più alto rispetto al castagno dimostrando una deformabilità maggiore in funzione di medesimi carichi nominali applicati.

Le considerazioni appena fatte presuppongono un comportamento diverso del legno di varie specie. Difatti, il metodo esposto in questo lavoro presenta delle limitazioni dovute al fatto che i risultati sono strettamente legati alla specie legnosa esaminata in laboratorio. L'applicazione del metodo su elementi strutturali di altre essenze legnose è vincolata ad una preventiva taratura in laboratorio col fine di ricavare la relazione *carichi-deformazione* idonea.

Tuttavia, analizzando ipotetici punti deboli, il metodo presenta delle limitazioni che dovranno essere tenute in considerazione. Le prove sono state effettuate su elementi caricati per poche ore, mentre, non si conosce il comportamento del legno applicando sollecitazioni prolungate nel tempo. Questo tipo di sollecitazione viene studiato sotto il nome di "resistenza a fatica" (Giordano, 1981).

Il risultato è influenzato dai gradienti di umidità, dall'irregolarità di forma dei campioni, dai difetti vari e dall'anisotropia del legno. Inoltre, la dimensione del campionamento unitamente alla dispersione dei risultati pone questa metodologia al di fuori della significatività statistica, delimitandone l'impiego nel campo empirico. Infatti l'incertezza statistica è risultata alta.

Il metodo si può ritenere efficace e in grado di verificare gli stati tensionali a trazione e a compressione sugli elementi strutturali di legno e di stimare, almeno in parte, l'entità dei carichi. L'affidabilità del metodo di stima dei carichi si può reputare sufficiente per

carichi di lieve entità. Essa va migliorata prendendo in considerazione dei coefficienti correttivi da applicare alle deformazioni dopo aver analizzato i fattori di disturbo. La deformazione corretta, inserita nel diagramma carichi-deformazione, permette di perfezionare la stima dei sovraccarichi strutturali e di migliorare l'affidabilità del sistema di misura.

5 Appendici

Appendice A

Data Sheet		KEYENCE
		LK-G32 Testina sensore di tipo a spot, laser Classe 2 CE
SPECIFICHE		
Modello		LK-G32
Distanza di riferimento		30 mm (Riflessione diffusa), 23,5 mm (Riflessione speculare)
Range di misura		±5 mm (Riflessione diffusa), ±4,5 mm (Riflessione speculare)
Sorgente luminosa	Tipo	Laser a semiconduttore rosso
	Lunghezza d'onda	655nm (luce visibile) Classe 2 (JIS C6802)
Sorgente luminosa	Classe Laser	Classe II (FDA (CDRH) Part 1040.10), Classe 2 (IEC 60825-1)
	Output di controllo	0,95 mW massimo
Diametro dello spot (alla distanza di riferimento)		Circa ø30 µm
Linearità		±0,05% di F.S. (F.S. = ±5 mm) ¹
Ripetibilità		0,05 µm ^{2,3}
Ciclo di campionamento		20/50/100/200/500/1.000 µs (6 livelli selezionabili)
Display LED		Vicino al centro della misura: Luce verde All'interno dell'area di misura: Luce arancione Fuori dell'area di misura: Luce arancione lampeggiante
Caratteristiche termiche		0,01% di F.S./°C (F.S. = ±5 mm)
Resistenza ambientale	Grado di protezione	IP67 (IEC60529)
	Temperatura ambiente operativa	Da 0 a +50°C
	Umidità dell'ambiente operativo	da 35 a 95% UR (senza condensa)
	Luce ambiente	Lampada incandescente o lampada fluorescente: 10.000 lux max
Vibrazioni		Da 10 a 55 Hz, doppia larghezza di ampiezza 1,5 mm; due ore in ciascuna delle direzioni X, Y e Z
Materiale		Alluminio pressofuso
Peso		Circa 280 g (cavo incluso)
¹ Questo valore è stato preso misurando un target KEYENCE standard (ceramico) in modalità standard. ² Rivolgetevi al rappresentante KEYENCE di zona per il tipo di classe III con risoluzione maggiorata. ³ Questi valori sono stati presi misurando un target standard KEYENCE (SUS) a una distanza di riferimento e con il numero di misurazioni della media impostato a 4096		

Appendice B

GANN HYDROMETTE SERIE BLU H 40



Misuratore elettronico dell'umidità del legno, per misure precise singole prima e dopo la lavorazione di tavolame, pannelli truciolari e sfogliati per impiallaccature. L'apparecchio è dotato di amplificatore di misura d'alta qualità e d'indicatore LCD a 3 righe. Commutazione del tipo di legno, per la correzione automatica del valore misurato per oltre 300 specie legnose, nonché compensazione in base alla temperatura del legno.

Caratteristiche importanti e dati tecnici:

- Campo di misura: umidità del legno da 5 sino 40% con correzione a 7 posizioni delle specie legnose
- Funzione di min/max e hold
- Indicazione della temperatura dell'apparecchio e dell'ambiente
- Compensazione in base alla temperatura del legno, manuale oppure automatica attraverso la misura della temperatura dell'apparecchio e dell'ambiente nel campo da -10 a +40°C
- Disinserimento automatico dell'apparecchio
- Memorizzazione degli ultimi 5 valori misurati
- In opzione: 2 linee caratteristiche programmabili su specifica del cliente

Appendice C



ELETTRODI M 20 | M 18



ELETTRODI A INFSSIONE M 20 3300

- Per la misurazione dell'umidità del legno in base alla resistenza
- Materiale: plastica resistente agli urti
- Con 10 punte degli elettrodi ciascuna da 16/23 mm [L]
- Per misurazioni dell'umidità in legni fino allo spessore di 50 mm circa

KIT DI MODIFICA M 20-DS 16 4310

- Per la misurazione dell'umidità in legni con spessore massimo di 30 mm con punte particolarmente fini (1,6 mm [Ø])
- Punti di infissione a malapena visibili nel materiale (ad esempio in battiscopa o impiallacciati)

TASTATORI PER MISURE SUPERFICIALI

M 20-OF 15 4315

- Per misurare l'umidità su superfici e impiallacciati senza danneggiarli
- Effetto di profondità circa 2 - 5 mm

ELETTRODI A BATTENTE M 18 3500

- Per la misurazione dell'umidità del legno in base alla resistenza
- Materiale: acciaio V2A resistente alla corrosione e plastica speciale
- Con 10 punte degli elettrodi ciascuna da 40/60 mm [L]
- Per misure in profondità in legni duri e forti (spessi fino a 180 mm)

INFORMAZIONE SUL PRODOTTO

M 25	BL H 40	MT 05	BL MT 70	MT 85 T	M 2050
HB 30	BL E	MM 1	MM 2	MTU 600	M 4050



Opzionale:
punte degli elettrodi
isolati in teflon
(v. pagina 72)

6 Bibliografia

- Allegretti O. e Ferrari S. 2008. A sensor for direct measurement of internal stress in wood during drying: experimental tests toward industrial application. *Drying technology: an international journal* 26 (9), 1150 - 1154
- Arrigoni O. 1973. *Elementi di biologia vegetale*. Milano: Casa Editrice Ambrosiana
- Bernasconi A., Schickhofer G., Frühwald K. e Traetta G. 2005. Il materiale legno, corso sull'uso strutturale del legno. <http://www.promolegno.com/>
- Bodig J. e Jayne B. 1982. *Mechanics of wood and wood composites*. New york: Van Nostrand Reinhold Company
- Bosetto M. e Lozzi I. 2008. *Chimica del legno*. Roma: Aracne Editrice
- Cassens D. e Serrano J.R. 2004. Growth stress in hardwood timber. In proceedings of the 14th central hardwood forest conference. Ed. D. Yaussy, D. M. Hix, P. C. Goebel, R. P. Long, 106 - 115, Wooster (Ohio), Usda Forest Service, USA, 16 - 19 March
- Ceccotti A. 1993. Dimensionamento e verifica delle strutture di legno secondo il metodo semiprobabilistico agli stati limite, in Giordano G.. *Tecnica delle costruzioni in legno*. Milano: Ulrico Hoepli Editore. Cit.
- Chambers R. W. 2007. Spiral grain - The inside story. *Log Building News* (63): 6-8
- Clair B., Almeras T. e Sugiyama J. 2006. Compression stress in opposite wood of angiosperms: observations in chestnut, mani and poplar. *Annals of Forest Science*, 63 (5): 507-510
- Crivellaro P. 2013. *Guida alle case di legno*. Firenze: Terra Nuova Edizioni
- Di Bianca R. 2006. *Dispense di elementi di statistica descrittiva ed inferenziale*. Palermo
- Farmer R. 1967. *Chemistry in the utilization of wood*. Oxford: Pergamon Press
- Giordano G. 1999. *Tecnica delle costruzioni in legno*. Milano: Ulrico Hoepli Editore
- Giordano G. 1981. *Tecnologia del legno, volume I. La materia prima*. Torino: Unione Tipografico - Editrice Torinese
- Giordano G. 1988. *Tecnologia del legno, volume III. Seconda parte: le prove ed i legnami di più frequente impiego*. Torino: Unione Tipografico - Editrice Torinese

- Kubler H. 1987. Growth stresses in trees and related wood properties. In proceedings of the 14th central hardwood forest conference. Ed. D. Yaussy, D. M. Hix, P. C. Goebel, R. P. Long, 131 - 189, Wooster (Ohio), Usda Forest Service, USA, 16 - 19 March
- Marzo A. 2006. Analisi e recupero di strutture lignee antiche. Relatore Federico M. Mazzolini, Facoltà di Ingegneria, Università degli studi di Napoli, Napoli
- Nannei V. M. 2011. Studio sperimentale sul comportamento reologico delle travi in legno e delle travi miste legno-calcestruzzo. Relatore Ezio Giurani, Facoltà di Ingegneria, Università degli Studi di Trento, Trento
- Natterer J, Herzog T. e Volz M. 1996. Atlante del legno. Torino: Unione Tipografico - Editrice Torinese
- Negri M. e Fellin M. 2004. Relazione sullo stato di conservazione e tensionale di alcuni elementi lignei della cupola del Battistero di San Giovanni Battista in Firenze. San Michele All'adige: CNR - IVALSIA Laboratorio Qualità del Legno
- Okuyama T., Yamamoto H., Yoshida M., Hattori Y. e Archer R. 1994. Growth stresses in tension wood: role of microfibrils and lignification. *Annals of Forest Science*, 51 (3): 291-300
- Piazza M. Tomasi R. e Modena R. 2005. Strutture in legno. Materiale, calcolo e progetto secondo le nuove normative europee. Milano: Ulrico Hoepli Editore
- Raymond A. S. 1998. Principi di fisica, II edizione. Napoli: Edises
- Schneider A. 1960. Neue iagramme zur bestimmung der relativen luftfeuchtigkeit über gesättigten wassering salzlösungen und wasserig schwefelsäurelösungen bei verschiedenen temperaturen. Berlino: Holz Als Roh - Und Werkstoff
- Tampone G. 1996. Il restauro delle strutture in legno. Milano: Ulrico Hoepli Editore.
- Tonellato M. 2010. Chimica dei carboidrati. <http://www.pianetachimica.it/>
- UNI 8828. 1986. Segati di legno. Determinazione delle tensioni interne
- UNI 8829. 1986. Segati di legno. Determinazione del gradiente di umidità
- UNI EN 335.2013. Durabilità del legno e dei prodotti a base di legno. Classi di utilizzo: definizioni, applicazione al legno massiccio e prodotti a base di legno
- UNI EN 13183-1. 2003. Umidità di un pezzo di legno segato. Determinazione tramite il metodo per pesata

- David E. K. 1999. Stress grades and design properties for lumber, round timber, and ties wood handbook, in Wood Handbook - Wood as an engineering material. Madison (Wisconsin): USDA Forest Service - Forest Products Laboratory. Cit.
- Uzielli L. 2001. Il manuale del legno strutturale, volume I, valutazione tecnologica. Roma: Mancosu Editore
- Uzielli L 2004. Il manuale del legno strutturale, volume IV, interventi sulle strutture. Roma: Mancosu Editore
- William S. C. 1959. Creep of small wood beams under constant bending load. Madison (Wisconsin): USDA forest service - Forest Products Laboratory
1996. Decreto del Ministero dei Lavori Pubblici n.156, 16.01.1996. Espletazione della procedura di cui alla legge 21 giugno 1986, n. 317. Norme tecniche relative ai Criteri generali per la verifica di sicurezza delle costruzioni e dei carichi e sovraccarichi. Gazzetta Ufficiale n. 29, 5 febbraio 1996