Università degli Studi di Firenze

Scuola di Scienze Matematiche Fisiche e Naturali

Corso di Laurea in

Diagnostica e Materiali per la Conservazione ed il Restauro

Classe L-43

Elaborato di Prova Finale

Il rilassamento del legno: studi applicati alla conservazione dei dipinti su tavola

The relaxation of wood: studies applied to the conservation of panel paintings

Candidata: Miaomiao Dong

Relatore: Prof. Marco Fioravanti

Correlatore: Dott.ssa Paola Mazzanti

Anno Accademico 2020-2021

INDICE

1. Introduzione 1
2. Il comportamento meccanico 3
   2.1 Le Sollecitazioni di breve periodo 3
   2.2 Le Sollecitazioni di lungo periodo 6
   2.3 Il rilassamento 8
   2.4 La compressione trasversale 10
3. I dipinti su tavola 12
   3.1 La storia del legno come supporto 13
   3.2 Le tecniche costruttive dei supporti 14
      3.2.1 Supporto 14
         3.2.1.1 La scelta del legno 14
         3.2.1.2 Il taglio e l'assemblaggio delle assi 15
      3.2.2 Il sistema di trasversatura 16
   3.3 Le tecniche di esecuzione degli strati pittorici 18
      3.3.1 La preparazione 18
      3.3.2 Disegno e doratura 19
      3.3.3 Strato pittorico e vernice 20
   3.4 Il degrado dei dipinti su tavola 21
      3.4.1 Il degrado dei supporti lignei 21
      3.4.2 Il degrado della pellicola pittorica 23
   3.5 Gli interventi di restauro dei supporti lignei 24

4. Materiali e metodi 25
4.1 I provini 25
4.1.1 La scelta dei provini 25
4.1.2 La proprietà fisico-meccaniche delle specie Legnose 26
4.1.3 Dati dettagli dei provini 28
4.2 Dispositivi sperimentali 30
4.2.1 L'apparato per la compressione 30
4.2.1.1 L'errore 35
4.2.2 Vasca 36
4.3 Controllo del microclima 37
5. La prova 38
5.1 Determinazione del valore di schiacciamento 38
5.2 La taratura 40
5.3 La modalita di prova 43
6. Risultati e Discussione 45
6.1 Risultati 45
6.2 Discussione 60
7. Conclusione 65
8. Bibliografia 66

Capitolo 1
Introduzione

Nel campo della diagnostica, conservazione e restauro dei beni culturali, si è avuto un grande sviluppo della ricerca tecnico-scientifica applicata alla conoscenza dei materiali e del comportamento dei dipinti su tavola. Questo lavoro di ricerca approfondisce alcuni aspetti del comportamento meccanico del legno da applicare alla conservazione dei dipinti su tavola. In particolare, questa tesi è centrata sullo studio sperimentale del comportamento visco-elastico del legno, volto alla comprensione del fenomeno rilassamento nel settore dei dipinti su tavola.

Come è noto, i dipinti su tavola sono costituiti da un supporto ligneo, che è un materiale igroscopico, e da strati preparatori, anch'essi igroscopici, dal colore e infine dalla vernice, che è considerato generalmente come meno permeabile del legno nudo. Questa caratteristica comporta una asimmetria igroscopica, in occasione di variazioni termoigrometriche ambientali, che produce un gradiente asimmentrico nello spessore della tavola. Nel caso di desorbimento, si rileva una perdita di vapore più veloce dal retro rispetto al fronte e la tavola tenderà a imbarcarsi. A livello microscopico, durante il desorbimento accade che le cellule legnose in contatto diretto con l'ambiente esterno tendono a equilibrarsi più velocemente alle nuove condizioni climatiche

rispetto a quelle più interne. Questo comporta che le cellule legnose "più esterne" tendano a ridurre le proprie dimensioni, mentre quello più interne non ancora sollecitate dalla variazione di umidità tendano a rimanere della propria dimensione. Dato che le cellule legnose sono legate tra loro, alla tendenza a ritirarsi di quelle "più esterne" si oppone la tendenza a non cambiare dimensione di quelle "più interne". Questo meccanismo comporta l'instaurarsi di tensioni interne. Quando tali tensioni superano la resistenza meccanica a trazione o compressione trasversale del legno, si producono rispettivamente delle rotture nel materiale come le fessurazioni o delle rotture a compressione da *compression set*. In questo complesso meccanismo interviene la proprietà meccanica del rilassamento, che si manifesta ogni qual volta il legno è soggetto a una deformazione imposta. In questa condizione, nel legno si instaura una forza che nel tempo tende a ridursi. Questo stesso comportamento si manifesta nei dipinti su tavola in seguito all'instaurarsi di tensioni interne causate, ad esempio come appena spiegato, da variazioni di umidità ambientale. In questo caso, il rilassamento che si manifesta nel supporto ligneo tende a ridurre l'entità delle tensioni interne e, quindi, contenere gli eventuali danni al supporto ligneo.

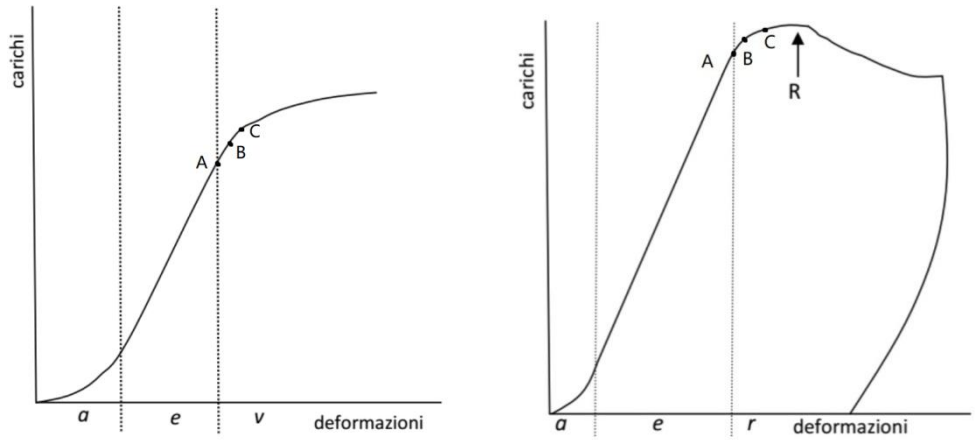
Capitolo 2

Il comportamento meccanico

In questo capitolo saranno esposti alcuni concetti sul comportamento meccanico dei materiali in seguito all'applicazione di sollecitazioni in diverse condizioni.

2.1 Le sollecitazioni di breve periodo

I comportamenti elastici e plastici possono essere osservati durante le sollecitazioni di breve periodo. I comportamenti possono essere schematicamente rappresentato su un diagramma carico-deformazione che si dividono in diverse sezioni:



(1) (2)

Fig 2.1: Diagramma generico tensioni-deformazioni nel caso della compressione trasversale (1) e assiale (2) di un provino di legno netto (Giordano, 1999).

Durante la fase *a* si riscontra l'assestamento iniziale della superficie del provino e del pressore. La fase *e* rappresenta il comportamento elastico: la deformazione cresce proporzionalmente alla sollecitazione secondo la legge di Hooke, fino al limite di proporzionalità A. Questo tratto indica una proporzionalità diretta e la legge di Hooke può essere definita:

$$\sigma = E \cdot \varepsilon \qquad (1)$$

La costante di proporzionalità E prende il nome di modulo di elasticità o modulo di Young (MPa), esprime la pendenza della curva, misura la rigidezza del materiale. Il modulo elastico dipende dalla rigidezza che caratterizza il materiale, quanto più E è elevato, quindi tanto più l'inclinazione si avvicina alla verticale, tanto più rigido sarà il legno (Bonamini, Uzielli, Zanuttini, 1993).

In questo campo una stessa sollecitazione produce sempre la stessa deformazione anche se applicata ripetutamente, una volta rimossa tale sollecitazione, la deformazione scomparirà. Quindi il simbolo comunemente usato per rappresentare l'elasticità è una molla, la deformazione in questo campo è istantanea e reversibile. All'aumentare della sollecitazione, quando supera il limite di proporzionalità A, la deformazione è più che proporzionale all'incremento della sollecitazione. Anche in questo tratto, se non supera il limite di elasticità B, la deformazione può essere recuperata, quando viene eliminato la sollecitazione. Ma dopo entrato nel tratto BC, si manifestano deformazioni permanenti e irreversibili, il punto C detto limite di plasticità. Quando si giunge al punto R, il legno tende a rottura (Bonamini, Uzielli, Zanuttini, 1993).

2.2 Le sollecitazioni di lungo periodo

Il comportamento deformativo del legno in risposta a sollecitazioni di lunga durata è illustrato nella figura 2.2 ed è definito visco-elastico e meccano-sorbitivo.

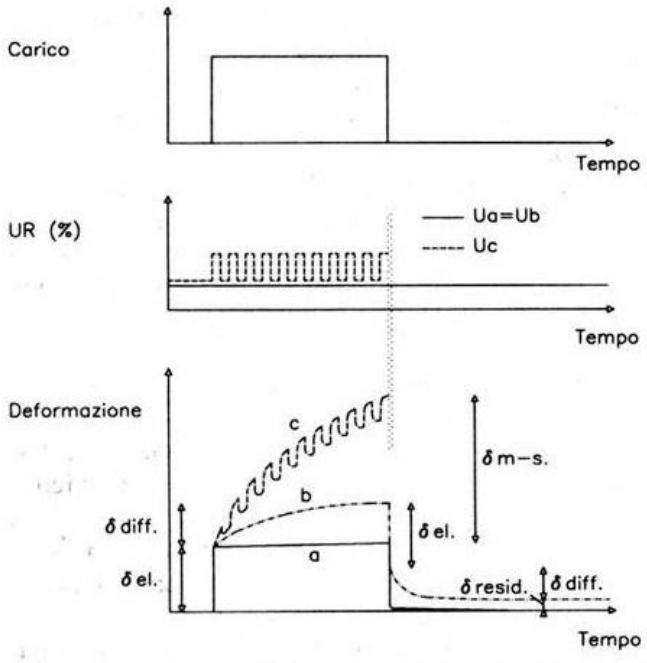


Fig 2.2: comportamento deformativo del legno sottoposto a carichi di lunga durata, secondo i tre principali schemi di comportamento: a) puramente elastico (ipotetico, a umidita costante) b) puramente visoelastico (reale, a umidità costante) c) meccano-sorbitivo (reale, in presenza di umidità variabile ciclicamente) (Uzielli, Fioravanti, 1999).

La risposta viscoelastica del legno riguarda una variazione della deformazione in funzione del tempo, in condizioni di temperatura ed umidità costanti. La viscoelasticità è caratterizzata da scorrimento e rilassamento, si tende a considerare come due aspetti dello stesso fenomeno, più che due fenomeni distinti. Lo scorrimento si traduce in un progressivo aumento delle deformazioni nel tempo sotto carico costante, che sarà maggiore quanto più sono elevate umidità e temperatura.

Invece il rilassamento prevede una diminuzione della sollecitazione del materiale progressiva sottoposto a deformazione costante.

L'andamento del comportamento viscoelastico rappresenta nella curva b, si distingue in varie fasi:

- la deformazione totale del legno è costituita da tre componenti: la deformazione elastica $\delta_{el.}$, la deformazione elastica differita $\delta_{diff.}$ e la deformazione viscosa $\delta_{resid.}$.
- La deformazione elastica $\delta_{el.}$ o deformazione istantanea, ottenuta da applicare istantaneamente un carico, si recupera immediatamente quando viene eliminato il carico.
- La deformazione differita $\delta_{diff.}$ che si svolge col passare del tempo in concomitanza con il mantenimento del carico costante, aumenta fino a rottura oppure tende verso un valore asintotico, in questo ultimo caso resta recuperabile nel tempo una volta tolto il carico.
- La deformazione viscosa $\delta_{resid.}$ resta irrecuperabile, diventa la deformazione permanente.

  (Uzielli, Fioravanti, 1999)

2.3 Il rilassamento

Il fenomeno del rilassamento si manifesta quando il legno viene sollecitato con una quantità di deformazione fissa, in ambiente controllato a temperatura e umidità relativa costante. Il legno per opporsi alla deformazione imposta, produce la tensione interna, che inizia a ridursi gradualmente col passare del tempo. Non arriverà mai allo zero ma si stabilirà con un andamento asintotico intorno ad un valore costante. Si può osservare nella Figura 2.3 il grafico di rilassamento (forza nel tempo) e deformazione costante.

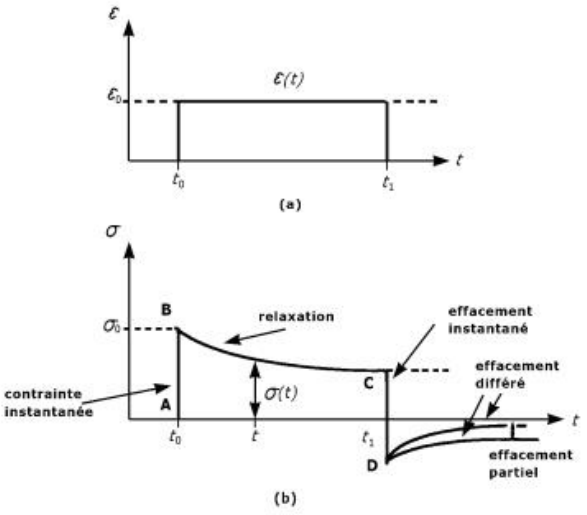


Figura 2.3: rappresentazione del rilassamento del legno soggetto ad una deformazione costante nel tempo.(Navi,Heger, 2005)

Una volta liberato il provino, la forza istantanea viene recuperata immediatamente, la forza di rilassamento viene recuperata nel tempo, a meno di una quantità non più recuperabile.

2.4 La compressione trasversale

La compressione trasversale si ottiene applicando una forza al legno in direzione perpendicolare alla fibratura. Nella figura 2.4 mostra un tratto di comportamento elastico nella compressione trasversale più breve rispetto alla compressione assiale, con una lunga fase plastica e una minore rigidezza del legno.

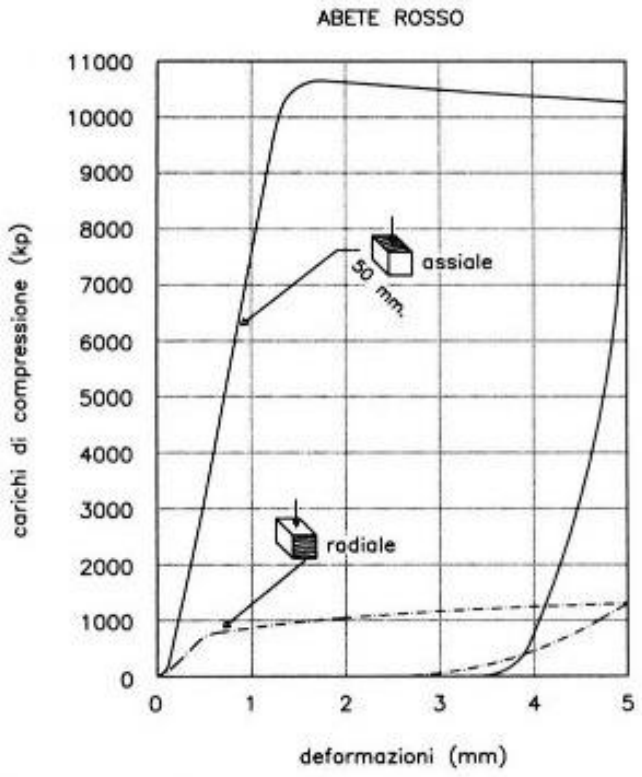


Fig 2.4: Diagramma carico-deformazione per legno di Abete rosso (provini cubici 50×50×50 mm, U=12%, densità 0,42 g/cm^3) in compressione longitudinale e trasversale, per carichi di breve durata (Giordano, 1998).

A differenza della sollecitazione in direzione perpendicolare, si noto che all’aumentare del carico non si arriva mai a una rottura netta, poiché il legno stavolta si schiaccia quasi subito e cede in modo progressivo (Bonamini, Uzielli, Zanuttini, 1993).

In sezione trasversale, gli anelli di accrescimento è un fattore che influisce la resistenza del legno, ad esempio per la maggiore resistenza radiale grazie alla presenza dei raggi parenchimatici all’azione di irrigidimento. Altro fattore determinante per la resistenza è l'umidità, diminuisce l'umidità del legno, aumenta della resistenza meccanica (Giordano, 1999).

Capitolo 3

I dipinti su tavola

I dipinti su tavola hanno avuto un ruolo molto importante nella produzione artistica italiana, possiedono un valore storico-arstistico, come conservarli al meglio è sempre stato il tema principale da affrontare. Dal un punto di vista della conservazione e del restauro, la prima cosa è il riconoscimento dell'opera d'arte, con l'individuazione delle varie componenti dell'opera d'arte, e precisamente della componente materica naturale (Brandi, 1963). Nei dipinti su tavola, principalmente si deve capire bene il rapporto tra supporto ligneo e le altre componenti. In questo processo, si deve tener conto che l'opera d'arte è naturalmente condizionata dal contesto storico e culturale, la tecnica costruttiva ha diverse caratteristiche seconda dalle culture, le epoche e i luoghi.

3.1 La storia del legno come supporto

Il legno è usato come supporto primario per le opere d'arte fin dall'antichità. I dipinti su tavola possono essere fatti risalire sia alla Grecia antica sia alla Roma. Nella *Naturalis Historia* di Plinio, si trovano descrizioni che riguardano la pittura su tavola che fu praticata molto in Grecia da Protogene, Zeusi, Timante, Apelle ecc (Basile,1990). Le tavole dipinte degli antichi greci sono di varia tipologia, il legno veniva realizzato come supporto soprattutto nella pittura monumentale, per esempio le tavole di Pitsà sono dipinte su sottili pannelli di cipresso risalenti al VI secolo a.C. Nell'antica Roma si sono tramandate i dipinti su tavola dalla Grecia; esiste un grande numero dei ritratti su tavola delle mummie del fayyum in Egitto databile tra il I e il III d.C. (Ciatti, 1999).

Il supporto ligneo per i dipinti ha una massima diffusione dal XII al XV secolo inoltrato. In questo periodo, si riscontrano dei grandi cambiamenti nella tecnica di costruzione dei supporti lignei, le opere sono caratterizzate dalla varietà di tipologia con i dossali d'altare, le croci dipinte, le pale d'altare ecc. e le loro dimensioni diventano sempre più grandi. Nel XIV secolo, si diffondono i polittici, composti da singoli pannelli separati, con il passare del tempo la tavola si arricchisce di sempre più pannelli e cornici più complesse. A partire dal XV secolo, a Venezia si iniziò a diffondere l'uso di dipingere su tela che gradualmente si diffuse in tutta Europa il supporto ligneo fu sostituito dalla tela, perché più maneggevoli e leggere.

3.2 Le tecniche costruttive dei supporti

L'opera d'arte è vista come un insieme di materiali eterogenei. Il rapporto tra la costruzione del tavolato, modalità di funzionamento delle traverse e realizzazione degli strati preparatori è tener conto nella conservazione dei dipinti su tavola, perché queste tecniche di lavorazione rispecchiamo non soltanto il processo di creativo del dipinto, ma anche la cultura tecnologica di quel particolare contesto.
(Castelli,Ciatti,Parri,Santacesaria,1997)

.

3.2.1 Supporto ligneo

Il supporto è la struttura portante dei dipinti su tavola, su cui vengono stesi gli strati preparatori, e poi la pellicola pittorica. Può essere costituito da un'unica tavola o da più tavole incollate lungo i bordi quasi sempre con colla alla caseina.

3.2.1.1 La scelta del legno

La scelta delle specie legnose non è casuale; nei diversi contesti storici e culturali c'è sempre stata una diversa richiesta per i supporti lignei, considerando che la reperibilità nel territorio poteva incidere molto nella scelta delle specie legnose, oltre alle difficoltà di trasporto che potevano essere difficoltose anche per i costi elevati (Nardi Berti, 1983). Altre importanti considerazioni riguardano le proprietà chimico-fisiche del legno, fra cui ad esempio la lavorabilità, la densità, la stabilità dimensionale, la durabilità naturale ecc, che determinano le

caratteristiche del supporto e ne influenzeranno la conservazione. Proprio per queste ragioni, la scelta del legno era determinata dall'epoca storica, dalla scuola artistica, ma anche dalla zona di provenienza.

Nell'epoca più antica, i supporti erano costituiti principalmente da legno di conifere, in particolare di Abete (Abies alba Mil.). Successivamente, a partire dal seconda metà del XIII secolo, Pioppo (Populus alba L. e altri Populus spp.) ha iniziato ad essere utilizzato molto in tutto il centro Italia. Anche altre specie legnose sono state utilizzate come la quercia (Quercus spp.), castagno (Castanea sativa L.), il noce (Juglans regia L.), il tiglio (Tilia cordata Mill.). Per le scuole delle Fiandre, i fiamminghi preferivano la rovere (Uzielli, 1993).

3.2.1.2 Il taglio e l'assemblaggio delle assi

Con questo paragrafo si affronta la fase vera e propria di realizzazione delle tavole. I metodi di taglio del legname sono sostanzialmente due: a sezione tangenziale e a sezione radiale. Il primo metodo, si taglia i tronchi in assi longitudinalmente e parallelamente, che viene eseguito lungo l'asse del taglio passa attraverso il midollo del tronco, permette di ottenere il massimo delle tavole. Il secondo metodo, il tronco viene tagliato in quattro quarti lungo l'asse longitudinale come il primo metodo, e poi ridotti in tavole con tagli radiali. Inizialmente, gli artisti preferivano le tavole di buona qualità a sezione radiale spesso scattivate del più fragile alburno, perché più stabili non avendo un imbarcamento da ritiro. Le tavole a sezione tangenziale invece sono meno stabili alle variazioni igrometriche, mostrando il tipico imbarcamento da ritiro. Si nota che ci sono numerose tavole sono state utilizzate queste due

metodi allo stesso opera per evitare la deformazione delle tavole (Basile, 1990).

Il sistema di assemblaggio delle tavole garantisce la complanarità delle assi. Un metodo più antico sembra essere l'assemblaggio a *spigolo vivo* delle tavole, le facce delle tavole incollate con caseinato di calcio usato a *freddo*. Per unire le tavole nello spessore, si preparavano gli elementi che hanno la funzione di mantenere al corretto livello i margini fra le commettiture delle tavole al momento dell'incollaggio. Nel medioevo, Il collegamento tra le assi viene rinforzato dall'inserimento di *cavicchi* e *ranghette*, questi elementi erano in legno più duro di quello del supporto, posti in senso ortogonale alla fibratura del tavolato non incollati. Dal rinascimento venivano usati *ganci* o *perni* metallici, inseriti dal davanti o lungo le commettiture. Nel cinquecento si trova un uso prevalente delle *ranghette* rispetto ai *cavicchi*. Invece nella metà del 1500 si usano sempre di piu le *farfalle* per la congiunzione delle assi (Castelli, 1999).

3.2.2 Il sistema di traversatura

Il sistema di traversatura ha lo scopo di sostenere la tavola dipinta cioè la funzione di rinforzo utile negli spostamenti delle opere, e controlla le deformazioni delle assi. Il sistema veniva collegato al supporto mediante un ancoraggio sul retro delle tavole.

Le traverse potevano essere ancorate al supporto con svariati metodi, si distinguono le traverse fisse e scorrevoli. Prima del XIV secolo, si utilizzavano le traverse fisse, erano fissate con chiodi a testa larga, sia da retro che dal fronte, facendo rimanere la testa dei chiodi ben sotto la superficie pittorica, per isolare il metallo dallo strato preparazione

(Basile,1990). Alla fine del XIV secolo, inizia l'uso delle traverse scorrevoli, come il sistema *a "ponticello"* che fissava le traverse mediante ponticelli metallici inchiodati al supporto, permettendo i movimenti nel piano causati delle variazioni climatiche. Nel XV secolo, si diffonde il sistema di traversatura *a coda di rondine*. Le traverse hanno sezione trapezoidale e sono rastremate a un' estremità, vengono quindi incassate in una traccia profonda 1/3 dello spessore del tavolato (Castelli, 1999).

Le traverse erano di solito di un legno diverso rispetto a quello delle tavole, più rigido e anche disposto con fibratura longitudinale, in Italia nel medioevo le traverse possono essere in castagno, pioppo e spesso anche abete (Castelli, 1999).

3.3 Le tecniche di esecuzione degli strati pittorici

Nella *Naturalis Historia* di Plinio, si trovano le tecniche di esecuzione, come la pittura *a encausto* o *a tempera* riguarda la natura dei colori. Questo documento potrebbe essere il più antico a citare le tecniche di esecuzione di tavolette dipinte. Successivamente a partire dal XIV secolo, i testi relativi alle tecniche pittoriche diventano più numerosi. Il *Libro dell'arte* di Cennino Cennini, scritto alla fine del XIV secolo, tratta le tecniche dettagliate dei procedimenti da applicare per i dipinti su tavola rinascimentali (Basile, 1990).

Un dipinto su tavola è costituito da una serie di strati diversi, la preparazione (nell'epoca antica dotato di tela d'impannaggio), il disegno preparatorio, lo strato pittorico e la vernice.

3.3.1 La preparazione

Per preparazione si intendono gli strati sovrapposti che si trovano tra il supporto ligneo e la pellicola pittorica, serve a migliorare la superficie del supporto rendendola più levigata e uniforme, così da accogliere il colore. Inoltre l'imprimitura della preparazione evita che il colore venga assorbito e grazie alla tela agisce "da ammortizzatore" tra i movimenti del supporto ligneo e la pellicola pittorica (Rosati, 1991).

Gli ingredienti della preparazione sono molto variabili a seconda dell'epoca e della scuola. Però, generalmente la preparazione è costituita da una carica e da un legante cioè il gesso e la colla animale. Riferendosi nel *libro dell'arte*, Cennino Cennini riporta che la carica fosse

gesso grosso e gesso sottile, mentre il legante fosse la colla Forte (Marconi, 1993).

Ci sono tre fasi di esecuzione per fare gli strati preparatori: stesura un strato di colla animale, *incamottatura* del supporto, stesura degli strati preparatori a gesso e colla. Nella prima fase, si applica un strato di colla di coniglio diluita. Poi nella seconda fase, su quello strato talvolta si applica della tela di lino stesa su tutto il pannello, compresa la cornice, per ammortizzare le sollecitazioni prodotte dal movimento del legno. Nei secoli tra il XIII e il XIV, si ricopre la tela di lino veniva sostituita dalle strisce di tela, le strisce si stendevano solo lungo le commettiture delle assi, allo scopo di attenuare i movimenti naturali del legno. Dal XIV secolo inoltrato, l'uso della tela scompare quasi del tutto, e si ricorre alla stoppa o alle sfilacciature di canapa. Nella terza fase, la stesura del gesso e colla avviene secondo due modalità, prima si applicano alcuni strati di gesso grosso e a seguire alcuni strati di gesso sottile, così si riduce la granulometria del gesso verso la superficie per ottenere una superficie uniforme (Marconi, 1993).

Fino al XV secolo, la preparazione si riduce di spessore e si diffonde l'uso dell'*imprimitura*, era uno strato di colla animale (di solito colla di pesce, talvolta di coniglio) che veniva applicata sopra il gesso sottile come ultimo strato della preparazione. La sua funzione era di isolare il gesso e il colore in modo che il colore non venisse assorbito dal gesso.

3.3.2 Disegni e la doratura

Gli artisti attuano il disegno mediante la linea di contorno. Nel Quattrocento il disegno tradizionale veniva fatto direttamente sulla

preparazione a mano libera con carboncino di salice, come documentato nel *Libro dell'arte* di Cennino Cennini, oppure i disegni venivano realizzati su cartone, attraverso la tecnica dello *spolvero* e la tecnica del *ricalco* per trasferire i disegni dal cartone al supporto preparato. Nel cinquecento, Vasari nelle sue *Vite* indica per la prima volta le varie tipologie di disegno, soprattutto i rapidi schizzi, molto più rifiniti tramite l'uso di inchiostro per ottenere il chiaroscuro (Rosati, 1991).

Sulla base del disegno, si procede alla doratura per decorare i dipinti. La superficie da dorare richiedeva una preparazione con la stesura del bolo rosso, detto *doratura a guazzo*. Invece per le piccole zone all'interno della pittura, vaniva usata la *doratura a missione* (Rosati, 1991).

3.3.3 Strato pittorico e vernice

Terminata la doratura, si passava all'esecuzione pittorica. I colori si ottenevano mescolando i pigmenti in acqua con un legante che li fa aderire al supporto. In base al legante utilizzato, si ottenevano tempere magre o tempere grasse. Per le prime si usava un legante di origine animale, come l'uovo, la caseina di latte, le colle di animali. Per le tempere grasse si aggiungevano anche oli siccativi e resine come leganti. Queste tecniche pittoriche sono note come *tempera all' uovo* e *tempera a olio*. A partire dal 1500, i veneziani tra i primi, si cominciava a diffondere l'uso della *pittura a olio* (Rosati, 1991).

In generale, la pellicola pittorica è protetta dalla vernice, che serve sia ad aumentare la bellezza e la luminosità dei colori sia a proteggere il deterioramento delle opere da agenti ambientali come la luce (Rosati, 1991).

3.4 Il degrado dei dipinti su tavola

Un dipinto su tavola ha una struttura composita ed emerge uno stretto legame tra il supporto ligneo e la parte della pittura. Per quanto riguarda la conservazione e il restauro dei dipinti su tavola, il loro degrado dipende dal comportamento del supporto ligneo e degli strati pittorici in senso generali, nonché da fattori chimici e biologici (Mora, 1973). In questo paragrafo si analizzano separatamente il degrado dei supporti lignei e degli strati pittorici.

3.4.1 Il degrado dei supporti lignei

I danni nei supporti lignei principalmente sono causati dalle deformazioni igroscopiche e dalle sollecitazioni meccaniche conseguenti. È noto che il legno è un materiale igroscopico e anisotropo, che subisce le variazioni dimensionali, deformazioni e anche rotture a seguito di variazioni termoigrometriche ambientali (Uzielli e Casazza, 1994).

Le deformazioni possono annullarsi al cessare delle sollecitazioni (deformazioni elastiche) oppure essere permanenti. Fra le diverse tipologie di deformazione dei supporti lignei, l'imbarcamento può essere distinto a seconda dalle diverse cause:

a) Imbarcamento dovuto alla *anisotropia dei ritiri*. È una deformazione inevitabile, perché il ritiro é molto più accentuata in direzione trasversale piuttosto che in longitudinale, maggiore è la tangenzialità della tavola e più è grave la deformazione.

a) Imbarcamento dovuto alla *asimmetria meccanica* della tavola. La

superficie della tavola è rivesta gli strati di preparatori e lo strato pittorico e forniscono un'effetto di irrigidimento, la superficie tende ad apparire convessa quando il legno perde l'umidità, e concava quando il legno assorbe l'umidità.

b) Imbarcamento dovuto alla *asimmetria igroscopica* della tavola. La vernice, è considerata generalmente come impermeabile o ne riduce la permeabilità, in occasione di variazioni termoigrometriche ambientali, si genera un gradiente di umidità, la tavola tenderà ad uscire (o entrare) più facilmente da lato retro, la faccia della tavola si incurva prima dell'retro, genera l'imbarcamento. In questo caso, la deformazione è transitorio.

c) Imbarcamento dovuto a *deformazioni permanenti*. A causa del ripetersi nel tempo di gradienti di umidità asimmetrici, quando il legno si rigonfia, gli strati della superficie della tavola non rigonfiati che vincolare quelli strati rigonfiati del retro della tavola, comporta la tensione di interne di compressione trasversale, produce un accorciamento permanente, tale imbarcamento viene denominato *compression set*.

L'imbarcamento è presente sempre nei dipinti su tavola, perché dovuto all'anisotropia dei ritiri, e quindi è inevitabile. A questo si aggiunge la presenza degli strati pittorici che ha delle conseguenza sia per la meccanica che per l'igroscopicità dei dipinti su tavola. Dal punto di vista meccanico, gli strati pittorici forniscono un effetto di irrigidimento e questo risulta ancora nell'imbarcamento. Dal punto di vista igroscopico, questi stessi strati risultano meno permeabile rispetto retro del supporto e producono un gradiente di umidità asimmetrico; in tale situazione, il retro del supporto scambia maggiormente dell'umidità con l'ambiente, e

subisce i ritiri e rigonfiamenti maggiori rispetto al fronte, risultando ancora una volta nell'imbarcamento (Uzielli e Fioravanti, 1999).

Le sollecitazioni possono essere prodotte non soltanto da azioni applicate dall'esterno, ma anche da reazioni vincolari generate dal sistema di traversatura e assemblaggio. I danni che ne conseguono dipendono dalla variazione di umidità, ma anche dalle proprietà meccaniche del legno del supporto e del sistema di contenimento (traverse e telai). Infatti, in presenza di elevate variazioni di umidità e azioni di vincolo troppo rigide, quando queste superano la resistenza del legno del supporto, si possono avere fessurazioni, sconnessioni o rotture nel supporto (Uzielli e Fioravanti, 1999).

Anche I fattori biologici possono determinare il degrado del supporto: attacco da insetti xilofagi e attacco da funghi e batteri. La presenza di umidità ne favoriscono lo sviluppo e la diffusione, possono portare un grave degrado del supporto.

3.4.2 Il degrado della pellicola pittorica

I movimenti del legno possono provocare danni al supporto (vedere 3.4.1) e anche agli strati pittorici. Quando si verificano delle variazioni dimensionali del legno dovute alle variazioni di umidità, anche la superficie pittorica è sollecitata a contrarsi o espandersi, perché coerente con il supporto ligneo. In alcuni casi lo strato pittorico non può seguire il movimento del legno, da cui ne derivano vari tipi di danno, come distacchi della preparazione o dello strato di colore, cretti, sollevamenti ecc.

3.5 Gli interventi di restauro dei supporti lignei

Il restauro fu definito solo nel XVIII secolo, è a questa data che risalgono le prime notizie e documentazioni di interventi relativi ai supporti lignei.
Nell'Ottocento il supporto ligneo può essere tolto e alterato liberamente. Si applica così il *trasporto del colore,* una tecnica che separa la pellicola pittorica dal supporto ligneo per essere applicata su un altro supporto. L'origine della pratica del trasporto è da trovarsi in Francia grazie all'attività di Robert Picault, divenne così molto famoso da diventare il restauratore dei dipinti della collezione reale, usava un adesivo segreto particolare nel processo di trasporto detto *maroufle*. Successivamente a J. Louis Hacquin fu dato l'incarico al posto del Picault, e questi era considerato come l'inventore della *parchettatura*, ottenne così un grande successo nell'ottocento. La *parchettatura* è un sistema di controllo delle tavole, molto diffuso dal1800 fino al 1900, che aveva lo scopo di mantenere piano il supporto. Ma questa tecnica oggi è considerata negativa, perché dà i gravi danni a lungo termine. Nel tardo 1800 si ha la nascita dei manuali di restauro, avvenuta prima in Francia e poi in Italia. Nel 1866 vengono pubblicati ben 2 manuali in Italia, la prima parte del *manuale ragionato per la parte meccanica dell'arte del restauratore* di Giovanni Secco Suardo, e *il manuale del pittore restauratore* di Ulisse Forni. Questi manuali documentano le modalità di ripristino della pellicola pittorica dei dipinti su tavola, ma anche gli interventi dedicati esclusivamente ai supporti (Basile, 1990).
Nel Novecento si considera il supporto ligneo come un documento storico di pari importanza dell'opera pittorica (Ciatti, 1999).

Capitolo 4
Materiali e metodi

4.1 I provini
4.1.1 La scelta dei provini

I provini scelti per effettuare le prove consistono in tre tipi di specie legnose: Pioppo (*Populus alba* L.), Abete rosso (*Picea abies* Karst.) e Rovere (*Quercus petraea* Liebl.). Come menzionato precedentemente nel paragrafo 3.2.1, la scelta delle specie legnose non è casuale, legata all'impiego proprio di queste tre specie legnose nella costruzione dei supporti lignei. Quindi in questo lavoro, si concentra principalmente su queste specie legnose che venivano spesso utilizzati come i supporti in passato.

L'obiettivo di queste prove è l'analisi del comportamento di rilassamento, comportamento che è correlato al materiale stesso, quindi anche alla specie legnosa e alla direzione anatomica. Per determinare la geometria e la dimensione dei provini, si è scelto di seguire la norma UNI EN 408:2004. Abbiamo scelto dei provini con la forma di parallelepipedo e le dimensioni circa 20x20x60 mm, orientate secondo le tre direzioni anatomiche principali, per cui possono raggruppare in tre gruppi: i provini longitudinali, i provini radiali e i provini tangenziali (Figura4.1).

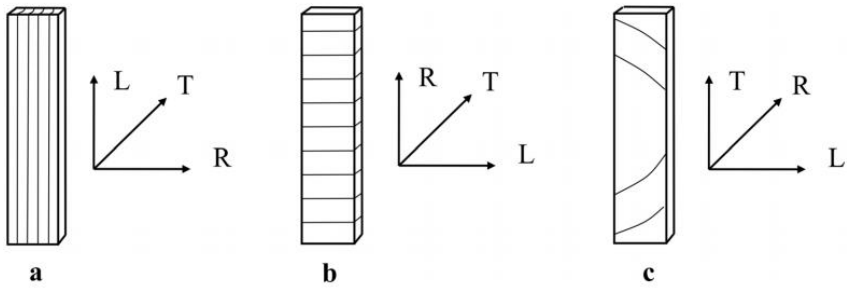


Figura 4.1 : Rappresentazione schematica dei provini in direzione ortogonale. a. Longitudinale, b. Radiale, c. Tangenziale (Zhu Li, 2018).

Tutti i provini sono netti di difetti, con fibratura orientata secondo le principali direzioni anatomiche e senza i difetti come le tasche di resine, i nodi, i cretti ecc. Poiché i difetti del legno come l'inclinazione della fibratura e i nodi riducono la resistenza e rigidezza del provino, così potrebbero interferire anche con il risultato finale della prova di rilassamento.

Prima di procedere con la prova, i provini sono stati mantenuti in un ambiente con una temperatura di 20℃ e un'umidità relativa del 65%, con l'umidità contenuto al 12%, cioè l'umidità normale. Quando il legno è equilibrato, non si ritira o si rigonfia, se viene mantenuto in condizioni climatiche sempre costanti.

4.1.2 La proprietà fisico-meccaniche delle specie legnose

Pioppo (populus alba):

Durezza molto bassa.

Densità normale: legno molto leggero circa 0,41 g/m^3 a umidità normale.
Resistenza a compressione assiale al 12% di umidità bassa mediamente 32N/mm^2.
Resistenza a flessione al 12% di umidità mediamente 56N/mm^2.
Modulo di elasticità basso: 7800N/mm^2.

Abete rosso (Picea abies Karst):
Durezza modesta.
Densità normale: 0,42/m^3 a umidità normale.
Resistenza a compressione assiale al 12% di umidità mediamente 36N/mm^2.
Resistenza a flessione al 12% di umidità mediamente 66N/mm^2.
Modulo di elasticità: 15.200N/mm^2.

Rovere(Quercus petraea Liebl.):
Durezza intermedia.
Densità normale: 0,82 g/m^3 a umidità normale.
Resistenza a compressione assiale al 12% di umidità mediamente 62N/mm^2.
Resistenza a flessione al 12% di umidità mediamente 110/mm^2.
Modulo di elasticità: 12.800N/mm^2.
(Nardi Berti, 1979)

4.1.3 Dati dettagli dei provini

La tabella1 riassume le misure di tutti i provini ottenute da usare il calibro.

I dati dei campioni legnosi									
specie	taglio	Provini	la lunghezza lungo le direzioni anatomiche (mm)			Volume (cm^3)	Massa (g)	densità (g/cm^3)	numero degli anelli
			radiale	longitudinale	tangenziale				
Pioppo	radiale	PR1	59.5	19.55	20.7	24.08	9.97	0.41	13
		PR2	60.7	20.7	20.7	26.01	9.96	0.38	12
		PR3	57.25	20.7	20.7	24.53	9.56	0.39	13
		PR4	57.8	21.05	21.35	25.98	12.51	0.48	12
	longitudinale	PL1	19.5	59.3	20.05	23.18	10.88	0.47	4
		PL2	19.45	59.5	20.05	23.2	9.81	0.42	3
		PL3	19.55	60.2	20.7	24.36	11	0.45	4
		PL4	20.7	60.3	20.8	25.96	10.96	0.42	4
		PL5	19.25	60.1	20.7	23.95	10.63	0.44	4
Abete	radiale	AR3	59.3	20.05	20.05	23.84	8.75	0.37	23
		AR4	59.3	20.35	20.9	25.22	8.68	0.34	28
		AR5	59.1	20.05	20.05	23.76	8.65	0.36	27
	longitudinale	AL1	20.15	59.35	20.8	24.87	10.61	0.43	6
		AL2	20.05	60.8	20.05	24.44	11.3	0.46	6

		AL3	19.4	59.8	19.4	22.51	10.29	0.46	7
		AL4	19.4	59.8	19.35	22.45	10.39	0.46	6
		AL5	19.4	59.05	19.6	22.45	10.86	0.48	6
	tangenziale	AT1	20.1	20.1	59.65	24.1	13.07	0.54	12
		AT2	20.25	20.25	59.65	24.46	12.85	0.53	14
		AT3	20.05	20.05	59.65	23.98	12.91	0.54	13
		AT4	20.25	20.1	59.45	24.2	12.96	0.54	14
Rovere	radiale	QR1	58.25	20.8	19.52	23.4	14.72	0.63	8
		QR3	58.05	20.8	19.55	23.6	14.68	0.62	8
		QR5	58.25	20.8	20.85	25.26	14.74	0.58	8
		QR6	58.05	20.05	20.75	24.15	14.9	0.62	12
	longitudinale	QL2	19.65	59.55	20.8	24.34	16.04	0.66	7
	tangenziale	QT4	19.55	19.6	58.3	22.34	19.28	0.86	13

4.2 Dispositivi sperimentali

4.2.1 L'apparato per la compressione

Per effettuare la prova di compressione è stato usato un apparato di prova un po' complicato. Questo apparato, denominato Rilassometro, consente di esercitare una pressione in direzione verticale. E' dotato di una cella di carico e un trasduttore di spostamento, in grado rilevare la forza espressa dal provino e la sua eventuale deformazione, le informazioni possono essere inviate direttamente al pc tramite la scheda NI-9219.

Per comprendere meglio la struttura dell'apparato, è opportuno dividerlo in varie parti, rappresentato nella figura 4.2

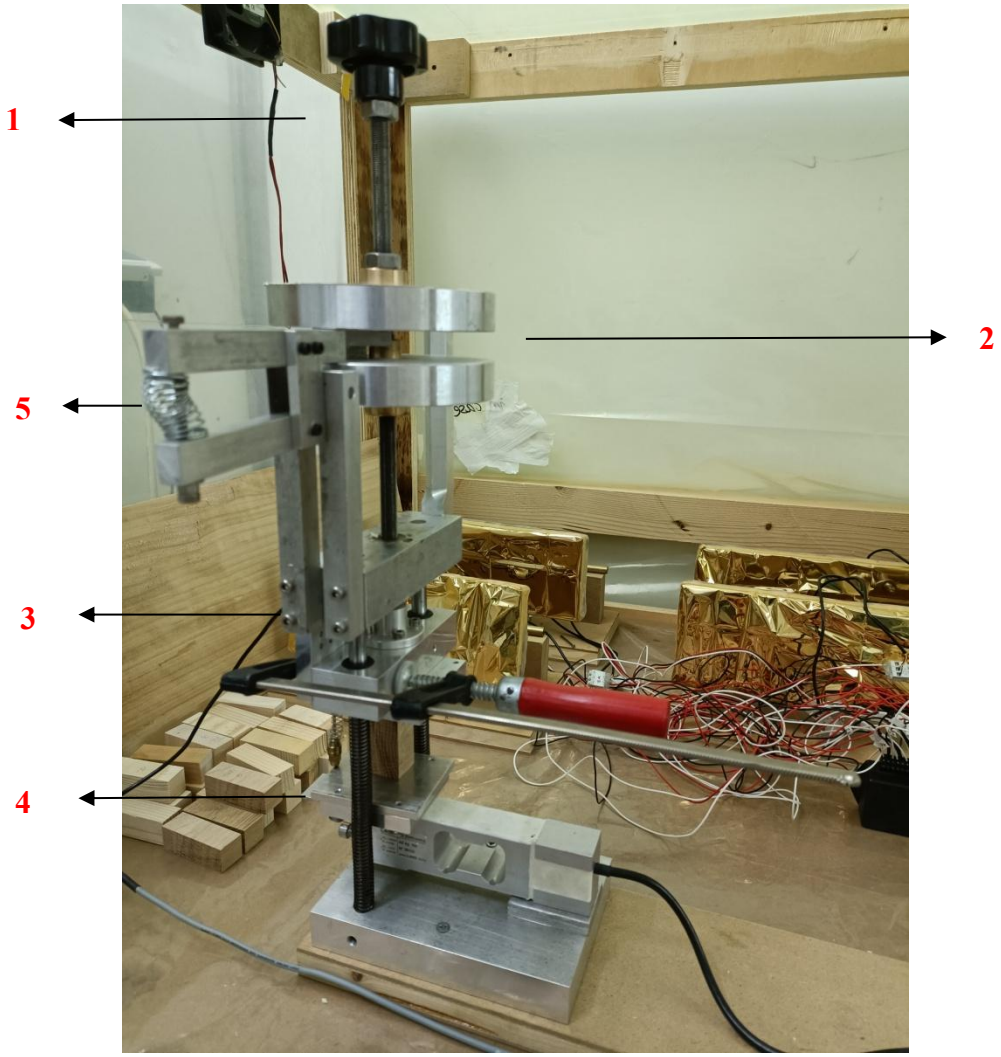


Figura4.2 : Rappresentazione schematica dell'apparato.

1. la manopola è fissata su una barra filettata coassiale con due dischi e un pressore per esercitare e controllare la una pressione scelta.
2. Tutti e due i dischi sono dotati di scala graduata circolare, hanno un foro centrale per la barra filettata, e quello inferiore ha una battuta metallica, ma le loro funzioni sono differenti. Il disco inferiore è libero di ruotare perché non è collegato con il pressore, e si usa come riferimento per il posizionamento. Il disco superiore è collegato alla manopola e al pressore, e serve per applicare lo schiacciamento.

3. Il pressore è composto da un traversino mobile controllato dalla manipola, che schiaccia il provino.
4. Una piastrina in alluminio di appoggio per il provino.
5. La pinza per fissare la posizione del disco.

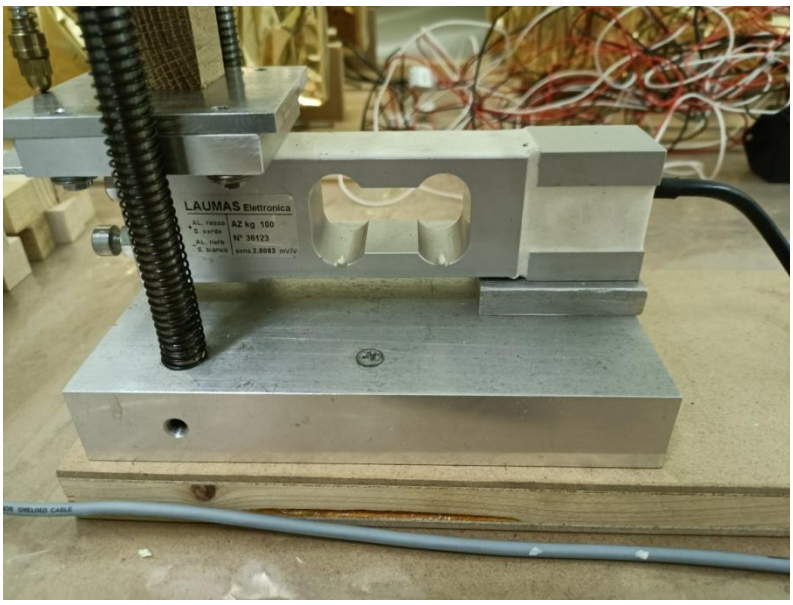


Figura4.3 : Rappresentazione schematica della cella di carico.

La cella di carico (modello AZL della LAUMAS) è un sensore di forza, in grado di rilevare la forza di un provino sottoposto a compressione. È costituita da un elemento elastico in alluminio, sul quale sono stati posizionati gli estensimetri, che sono sistemati in un circuito a ponte di Wheatstone. Quando l'elemento elastico subisce una deformazione, gli estensimetri si muovono con esso e provocano un cambiamento di resistenza, che si trasforma in una tensione attraverso un ponte di Wheatstone. Poiché la tensione è proporzionale alla forza esercitata sul provino, è possibile ottenere una variazione di forza.

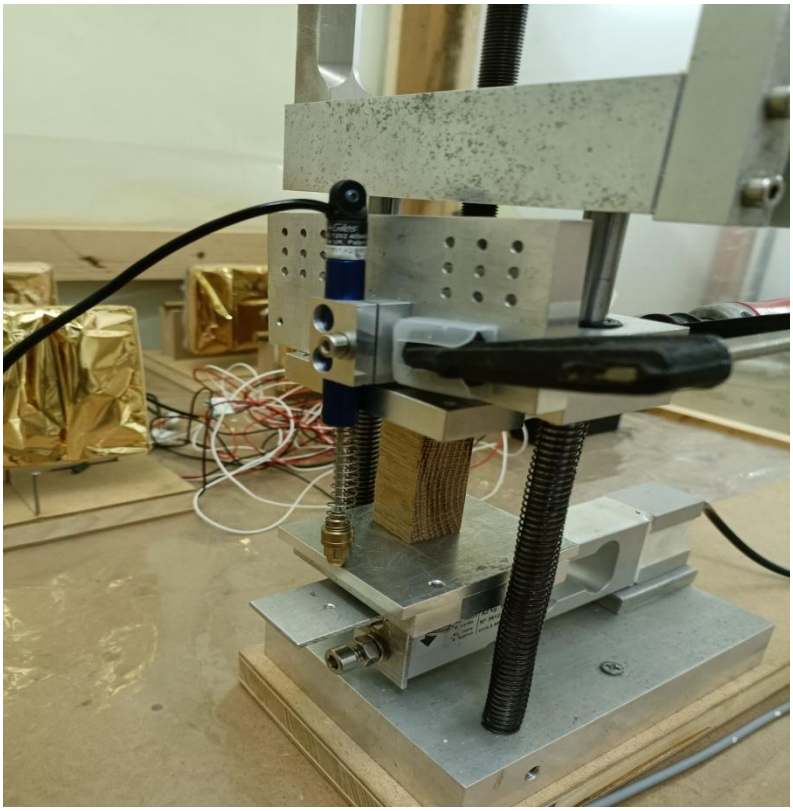


Figura4.4 : Rappresentazione schematica del trasduttore di spostamento.

Il trasduttore di spostamento (modello SLS095 della Penny & Giles) è un dispositivo elettrico lineare installato lungo la direzione di misura. È capace di misurare lo spostamento lineare del provino mediante il suo allungamento e accorciamento, fornisce una tensione di uscita che è correlata alla deformazione del provino.

Figura4.5 : Rappresentazione schematica della scheda NI-9219.

La scheda NI-9219 (della National Instruments) è un sistema di alimentazione e acquisizione di segnali elettrici. È dotata di 4 canali, ogni canale può eseguire diversi tipi di misure. In questo lavoro, la scheda è collegato con la cella di carico e il trasduttore di spostamento, i dati verranno visualizzati mediante un programma Labview e salvati sul computer a cui la scheda è connessa.

Figura4.6 : Rappresentazione schematica del data logger Hobo.

Il data logger Hobo (modello U12-013 della Oneset,) viene messo all'interno della vasca, per monitorare la temperatura e l'umidità, si possono leggere i dati tramite il software Hoboware e esportarli per ulteriori elaborazioni nel formato Microsoft Excel.

4.2.1.1 L'errore

Durante le prove, dovrebbe essere presa in considerazione le incertezze sperimentali nella lettura dei dati intrinseche nella strumentazione utilizzata.

1. Cella di carico Laumas AZL a ponte estensimetrico, alimentata con una tensione di 2 Volt: errore pari allo ±0, 02%.
2. Scheda National Instruments modello NI-9219: errore pari allo 0,03% della lettura massima.
3. L'errore di Hobo: la temperatura di ±0.35°C e l'umidità relativa del ±2.5%.

4.2.2 Vasca

La prova deve essere effettuata in ambiente termoigrotermico costante per controllare la temperatura e l'umidità relativa. Per questo si mette l'apparato di prova in una vasca, fatta in materiale termoisolante di spessore 2 cm. Una faccia è invece di plexiglas trasparente, per l'osservazione la condizione interna. Sopra la vasca è chiusa da due coperchi in modo da lasciare fuori la ruota di regolazione limitare al massimo l'apertura della vasca; su un lato del coperchio a destra c'e un foro per far uscire i fili di Hobo, trasduttore e cella di carico. I bordi su cui appoggia il coperchio sono stati coperti da nastro di neoprene e i buchi da Hannoband®, in modo da limitare lo scambio di aria con l'ambiente esterno. La vasca è posta in una cella climatica equilibrata a 65 % di umidità relativa e 20 °C di temperatura. In questo modo le condizioni climatiche all'interno della vasca sono garantite dalla cella climatica e la vasca stessa, grazie allo spessore dei pannelli e al suo isolamento, aiuta a limitare le fisiologiche oscillazioni di temperatura e umidità relativa della cella climatica. Però questa vasca non funziona ancora bene.

Figura 4.7 : Rappresentazione schematica della vasca.

4.3 Controllo del microclima

Il controllo dell'umidità nella vasca di prova, può essere effettuato inserendo la soluzione salina satura. Viene utilizzato una certa quantità di nitrato di ammonio, riempito tutto lo spazio sul fondo del contenitore e sciolto con acqua, per ottenere una soluzione satura. Il nitro di ammonio è un sale con formula chimica NH_4NO_3, molto solubile in acqua. Nel processo di evaporazione, i sali possono cristallizzare in funzione delle le condizioni microclimatiche dell'ambiente, inoltre l'evaporazione è proporzionale alla temperatura e inversamente proporzionale all'umidità relativa dell'ambiente, cioè quando la temperatura più alta e/o l'umidità relativa più bassa, incita il processo di evaporazione, tale processo avviene con acquisito di calore e perdita l'umidità ed e quindi un processo endotermico, si forma un equilibrio termoigrometrico tra la soluzione salina e il microclima ambientale, in modo di stabilire la temperatura a 20 °C e l'umidità relativa a 65%.

Capitolo 5
La prova

5.1 Determinazione del valore di schiacciamento

Il valore di schiacciamento rappresenta il numero per ruotare il disco dell'apparato del rilassometro per esercitare la forza di compressione sul provino.

Nella compressione trasversale, all'aumentare del carico F si ha lo schiacciamento della cellule legnose, fino alla chiusura del lume cellulare, e non si arriva mai ad un limite di rottura. Pertanto la resistenza trasversale non come quella del longitudinale, viene definita come la resistenza limite convenzionale $f_{c,90}$ cioè la tensione definita

dall'ordinata del punto in cui l'inclinazione della retta tangente alla curva carico-deformazione supera del 50% il valore che tale pendenza assume nella parte rettilinea della curva (Bonamini, Uzielli, Zanuttini, 1993).

Per i provini trasversali, conosciamo il carico di rottura del pioppo nella compressione trasversale attraverso la sperimentazione fisica (Mazzanti, Togni,Uzielli, 2012), è circa 3 MPa. Secondo la prova a compressione trasversale (UNI-ISO 3132) il provino ha sezione di 2×2cm e lunghezza compresa tra 5 e 6 cm. Possiamo quindi eseguire i calcoli seguenti:

$$\sigma=\frac{F}{A} \qquad (2)$$

dove:

F: il valore di forza.

A: la sezione del provino.

σ: la tensione di compressione.

Si noto: A= 400mm^2, σ= 3 MPa=3N/mm^2

Il carico su di provino pioppo è quindi 1200 N.

Si ritiene che per rimanere in campo recuperabile delle deformazioni visco-elastica, il valore massimo di forza da applicare sia il 20% del valore di rottura, quindi è 240N. Attraverso la relazione (2), si ottiene σ = 0.6 MPa, in questo caso secondo la *legge di Hooke*, la relazione tensione-deformazione può essere scritta come:

$$E=\sigma/\varepsilon \qquad (1)$$

Dove:

E: il modulo di elasticità.

σ: la tensione di compressione.

ε: la deformazione del provino.

Se σ = 0.6 MPa, e E =300 MPa

L’accorciamento relativo del provino è 0.002.

Dato che l’accorciamento relativo del provino è definito come il rapporto tra l’accorciamento assoluto e la lunghezza iniziale del provino:

$$\varepsilon=\frac{\Delta L}{L} \qquad (3)$$

dove:

ΔL: l’accorciamento assoluto

L: la lunghezza iniziale

ε: la deformazione del provino.

ε= 0.002, L=60mm

ne consegue che l’accorciamento assoluto del provino è 0.12 mm.

Sulla base dei dati del provino di pioppo, possiamo approssimare il valore di schiacciamento a un decimo di millimetro da impostare sul disco.

Per i provini longitudinali, il valore di schiacciamento è diverso da quello dei provini trasversali, perché la resistenza meccanica longitudinale e la rigidezza sono maggiori rispetto quella trasversale. Applicando lo stesso ragionamento, ma sostituendo i valori con quelli adeguati per la direzione longitudinale si ottiene l’accorciamento assoluto del provino pari a circa 0.04, quindi il valore di schiacciamento è 4 centesimi della lettura sul disco.

5.2 La taratura

La taratura ha lo scopo di determinare il coefficiente di conversione in unità tecnica di uno strumento di misura. Si verifica anche la linearità e l'accuratezza determinando la differenza tra il valore letto dallo strumento in prova e il valore noto del sistema di riferimento. In questa prova, bisogna praticare la taratura di trasduttore e cella di carico per determinare i fattori di conversione in unità tecniche.

Il trasduttore "spostamento-tensione elettrica", è alimentato da una sorgente esterna, viene stimolato da una pressione variabile e produce un corrispondente segnale elettrico. È dotato di un elemento mobile che forma un circuito con il potenziometro interno al trasduttore, spostandosi in base alla grandezza di ingresso, determina la variazione della tensione in uscita (De Lorio, 2006). L'elemento mobile viene inserito nel foro del tubo di strumento di taratura, che è collegato al disco, mentre il corpo del trasduttore è bloccato dalle due piastrine metalliche. I cavi sono collegati con il data logger registrare i dati e talvolta anche per alimentare gli strumenti di misura. Si ruota il disco, un giro del disco corrisponde a un millimetro di allungamento del trasduttore.

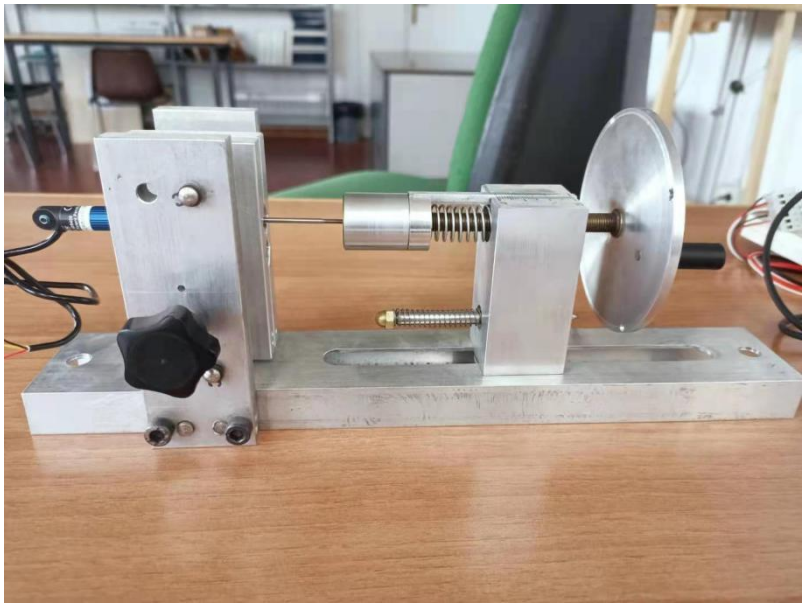


Fig 5.1 : lo strumento della taratura con il trasduttore

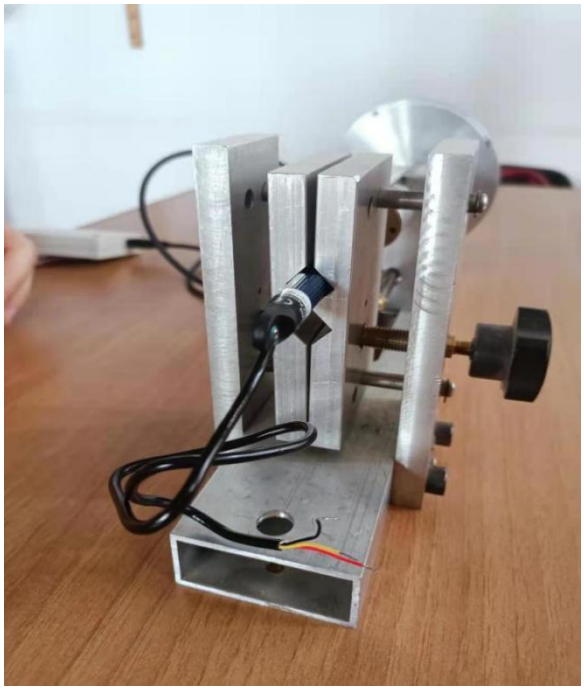


Fig 5.2 : il trasduttore è bloccato dalle due piastrine metalliche.

Fig 5.3 : Le morsetti sono collegati con il data logger

Per ogni spostamento di un millimetro si registra un dato di tensione elettrica, queste informazioni sono plottate in un grafico XY, che mostra come lo spostamento del trasduttore è proporzionale con la tensione.

La pendenza di questa curva rappresenta il fattore di taratura dello strumento di misura. Per il trasduttore si ottiene un fattore di 2.3 mm/V.

La taratura dalla cella di carico, viene applicato un carico di peso noto, può essere collegato con il data logger Hobo. Si ottiene la retta di taratura con il coefficiente angolare 392mm/V.

5.3 La modalità di prova

Un provino viene appoggiato sulla piastrina centrale del rilassometro, prima dell'inizio del test si deve abbassare il pressore finché arrivato a contatto completamente con la superficie sopra del provino ma non esercita una pressione eccessiva (stabilità in 0.06 V, circa 23.5 N), in modo da applicare la forza successivamente. Dopodiché si portano in contatto le due battute del disco di riferimento e di schiacciamento. Poi si legge la lettura del disco di riferimento e lo si ruota del valore di schiacciamento calcolato; si fissa poi questo disco con l'apposita pinza. Ruotando la manopola superiore che è collegato il disco di schiacciamento, si abbassa il pressore rapidamente più possibile fino a che le due battute venendo nuovamente a contatto. A questo punto la prova ha inizio.

Il tempo di acquisizione dei dati del Labview:

1 PTO/s per i primi 10 minuti;

1 PTO/5s per i successivi 30 minuti;

1 PTO/1min per 5 giorni;

1 PTO/15min per 14 giorni.

Capitolo 6

Risultati e discussione

6.1 Risultati

In occasione dell'analisi dei dati ottenuti per la valutazione del rilassamento, è necessario calcolare il valore percentuale di diminuzione della tensione. Come accennato nel paragrafo 5.1, dopo aver schiacciato una pressione sul provino, la tensione raggiungerà un valore di picco, per poi diminuire gradualmente il suo valore nel tempo, quindi la percentuale di caduta della tensione è la differenza tra il valore di picco della tensione e il valore asintotico della tensione per cento. Mentre la deformazione del provino rimarrà sempre a 0, cioè il provino non cambia la sua dimensione una volta che la prova è avviata. Se la deformazione aumenta durante la prova, si distingue in due fasi:

1. Quando il salto o picco della deformazione vicino a quello imposto sulla ruota, potrebbe essere gli errori sia dell'operatore che della strumentazione .
2. la variazione di deformazione nel tempo, dovuto alle variazioni climatiche che fanno variare il comportamento del provino; o perché si manifesta l'errore di creep della cella di carico, come è detto nel paragrafo 4.2, all'interno della cella di carico, è presente un ponte di Wheatstone in grado di rilevare una deformazione di un provino, questo elemento elastico potrebbe mostrare un' effetto di creep che

interferisce con la prova, anche potrebbe accadere la variazione di tensione che corrisponde a questo effetto; o dovuto al problema del trasduttore.

Durante le prove, anche potrebbe accadere delle variazioni climatiche nella cella. In questi casi, i dati non devono essere considerati dopo il punto in cui la temperatura e umidità sono cambiate perché viene alterato il comportamento meccanico del legno.

Si è scelto di analizzare le prove 1, 5, 6 e 7 nel questo paragrafo poiché esse si presentano buone e coerenti dal punto di vista dei risultati. Nella tabella riassuntiva (Tab. 3.3) sono elencate le caratteristiche delle prove.

La prova 1

La prova 1 si è svolta dal 15/04/2021 al 06/05/2021, ha avuto una durata complessiva di circa 20 giorni, utilizzando un provino tangenziale di Quercia (QT4), di dimensioni 19.55×19.6×58.3mm.

A deformazione costante, la tensione del provino è stata diminuita del 58%, mentre la deformazione è aumentata del 37%.

Si riporta i grafici del rilassamento ottenuto da questa prova.

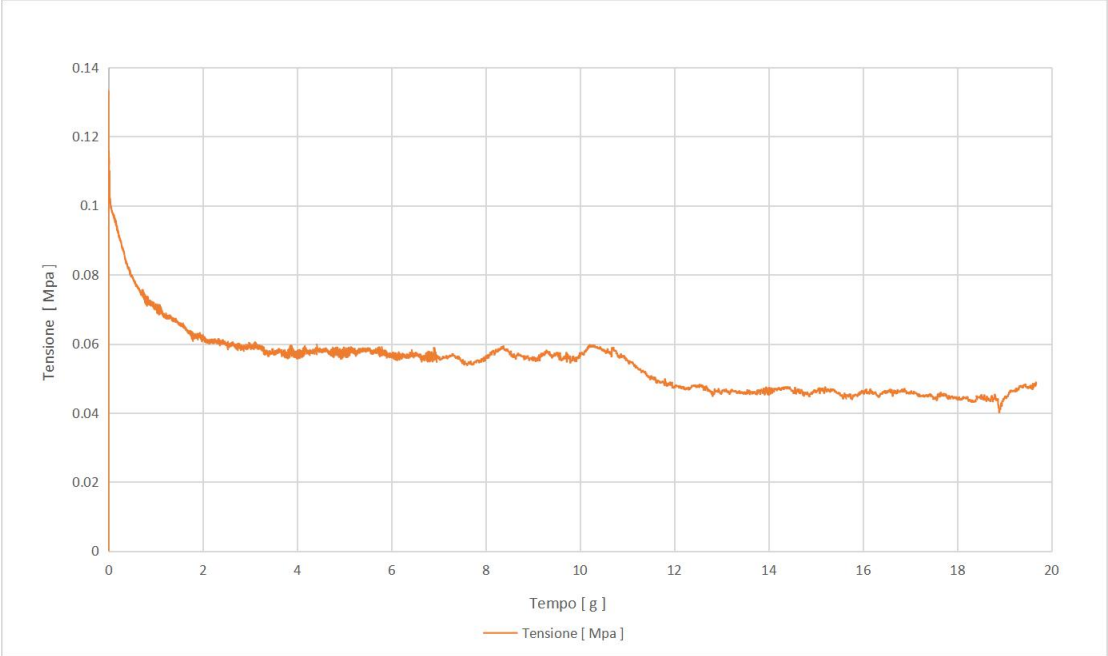


Fig 6.1 : La variazione della tensione registrata dalla cella di carico durante la prova 1.

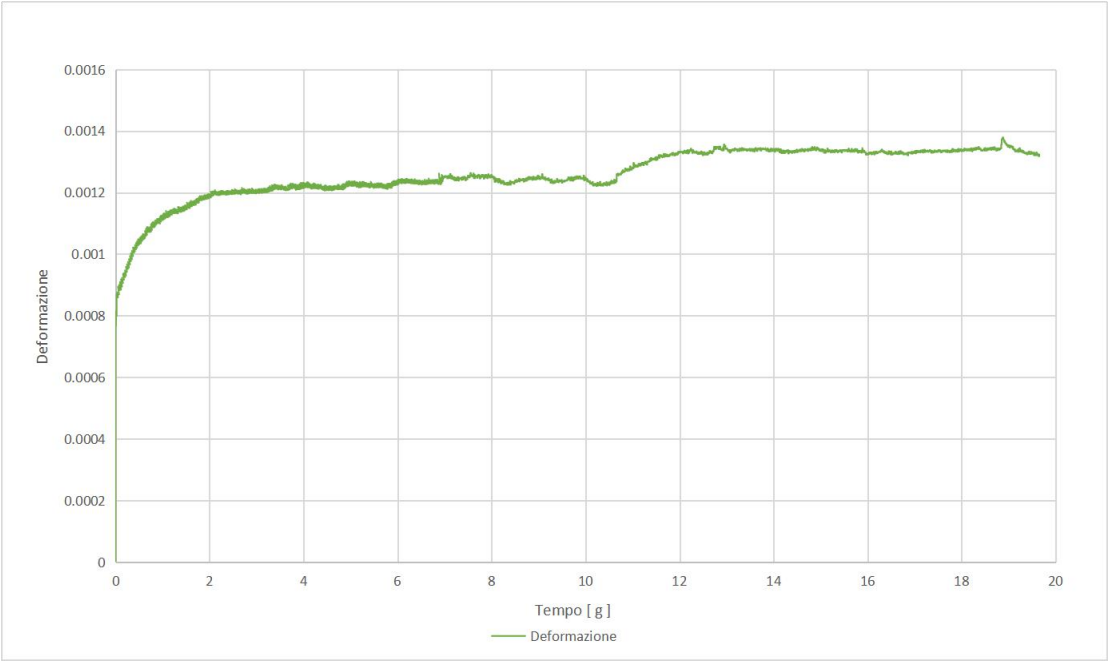


Fig 6.2 : La variazione della deformazione registrata dal trasduttore durante la prova 1.

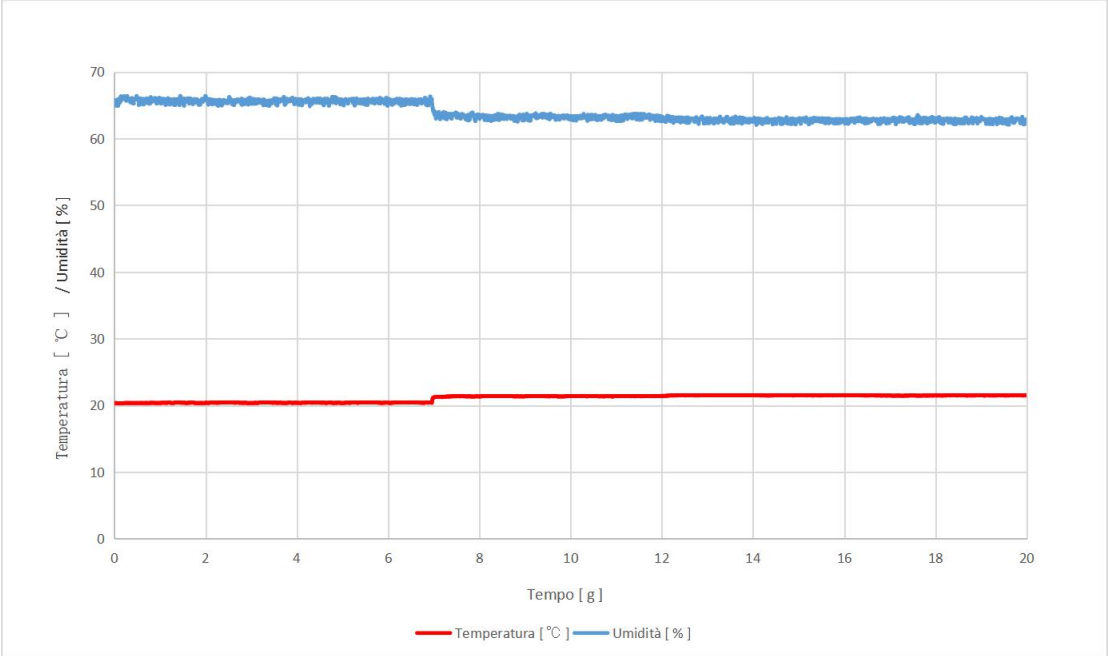


Fig 6.3 : la variazione della temperatura e umidità registrata dal Hobo durante la prova 1.

Si nota nella figura 6.3, presenta un cambiamento della temperatura e umidità nel settimo giorno, potrebbe essere Il problema di controllo climatico nella cella, quindi in questa prova dovrebbe considerarsi conclusa prima della variazione climatica.

Nella figura 6.1 mostra un rilassamento che dopo un picco di forza circa 0.13 MPa, presenti un rilassamento che comporta una caduta di tensione nel provino. La tensione dal suo valore di picco continua a diminuire asintoticamente verso 0.056 MPa. Il provino QT4 ha smorzato il 58% della tensione iniziale. Mentre il grafico della deformazione del provino mostra l'aumento del valore di deformazione dal 0.0008 al 0.00125 nel tempo, il provino ha cambiato il 37% del suo dimensione iniziale che non dovrebbe accadere, dovuto alle variazioni climatiche o si manifesta l'errore di creep della cella di carico (figura 6.2).

Prova 5

La prova 5 si è svolta dal 28/06/2021 al 12/07/2021, ha avuto una durata complessiva di circa 14 giorni, utilizzando un provino radiale di Abete (AR5), di dimensioni 59.1×20.05×20.05 mm.

A carico costante, la tensione del provino è stata diminuita del 21%, mentre la deformazione è stata aumentata del 50%.

Si riporta i grafici del rilassamento ottenuto da questa prova.

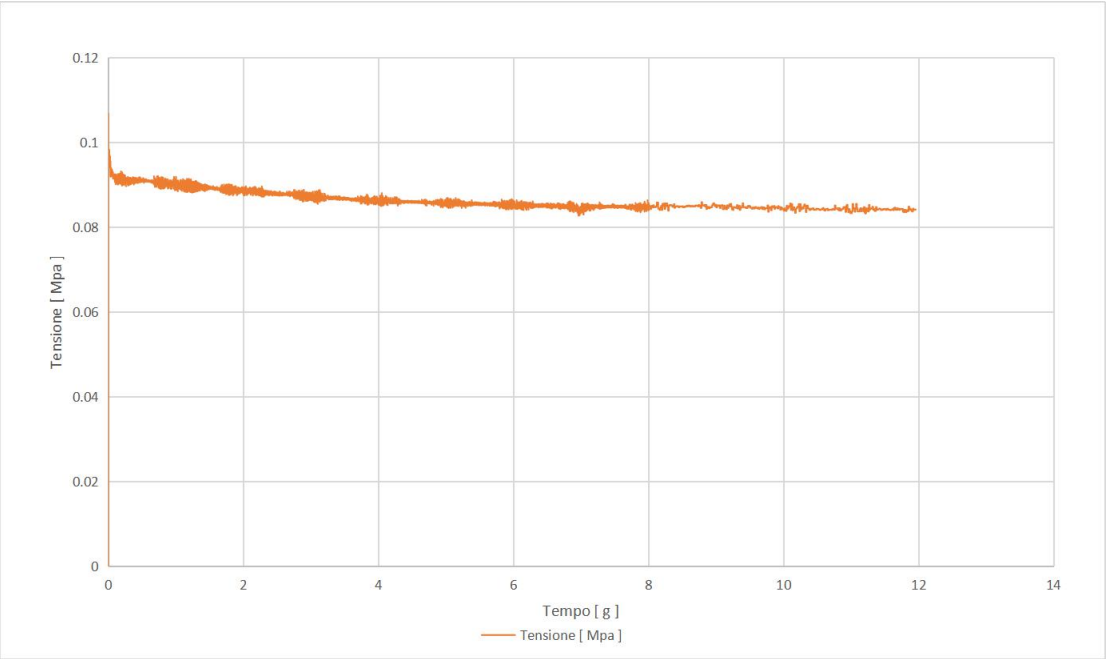


Fig 6.4 : La variazione della tensione registrata dalla cella di carico durante la prova 5.

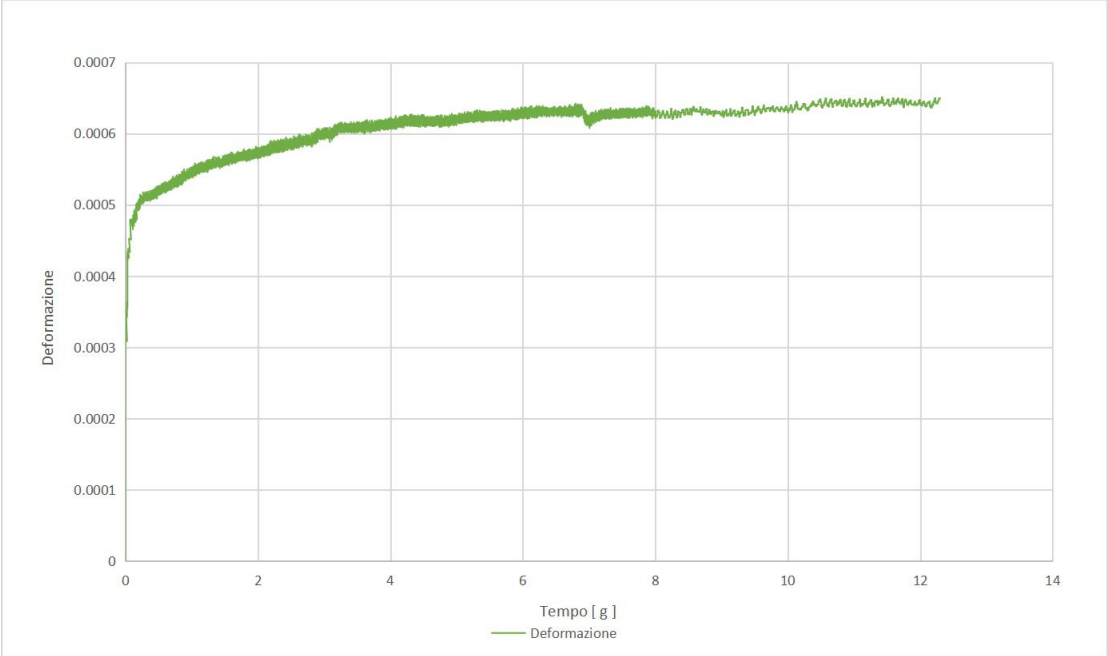


Fig 6.5 : La variazione della deformazione registrata dal trasduttore durante la prova 5.

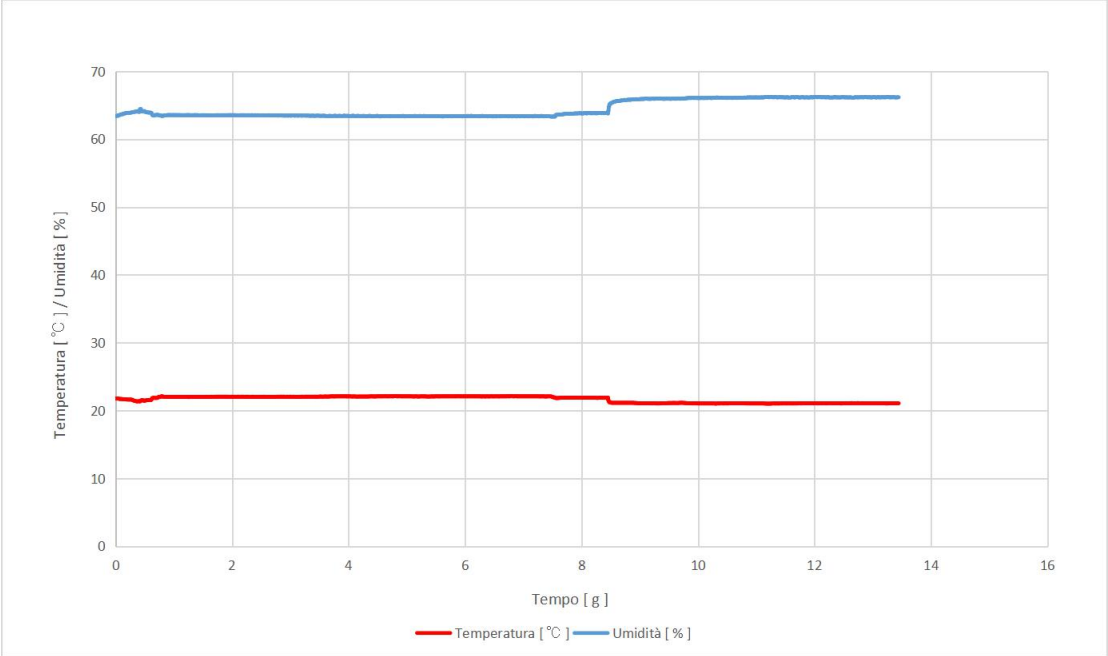


Fig 6.6 : La variazione della temperatura e umidità registrata dal Hobo durante la prova 5.

Nella figura 6.4, dopo un picco di forza circa 0.11 MPa, il provino presenti un rilassamento che comporta una caduta di tensione, che continua a diminuire asintoticamente verso 0.08 MPa, il provino AR5 ha smorzato il 21% della tensione inizialmente. Mentre il grafico della

deformazione del provino mostra l'aumento del valore di deformazione dal 0.0003 al 0.00065 circa, il provino raddoppiato il suo schiacciamento imposto che non dovrebbe accadere (figura 6.5). Si nota nella figura 6.6, presenta le variazioni della temperatura e umidità nel primo giorno e anche nel ottavo giorno, potrebbe essere Il problema di controllo climatico nella cella, ma la misura della tensione non viene disturbata, quindi il cambiamento della dimensione del provino a causa del problema del trasduttore.

Prova 6

La prova 6 si è svolta dal 12/07/2021 al 27/07/2021, ha avuto una durata complessiva di circa 17 giorni, utilizzando un provino tangenziale di Abete (AT1), di dimensioni 20.1×20.1×59.65mm.

A carico costante, la tensione del provino è stata diminuita del 22%, mentre la deformazione cambia il sua valore.

Si riporta i grafici del rilassamento ottenuto da questa prova.

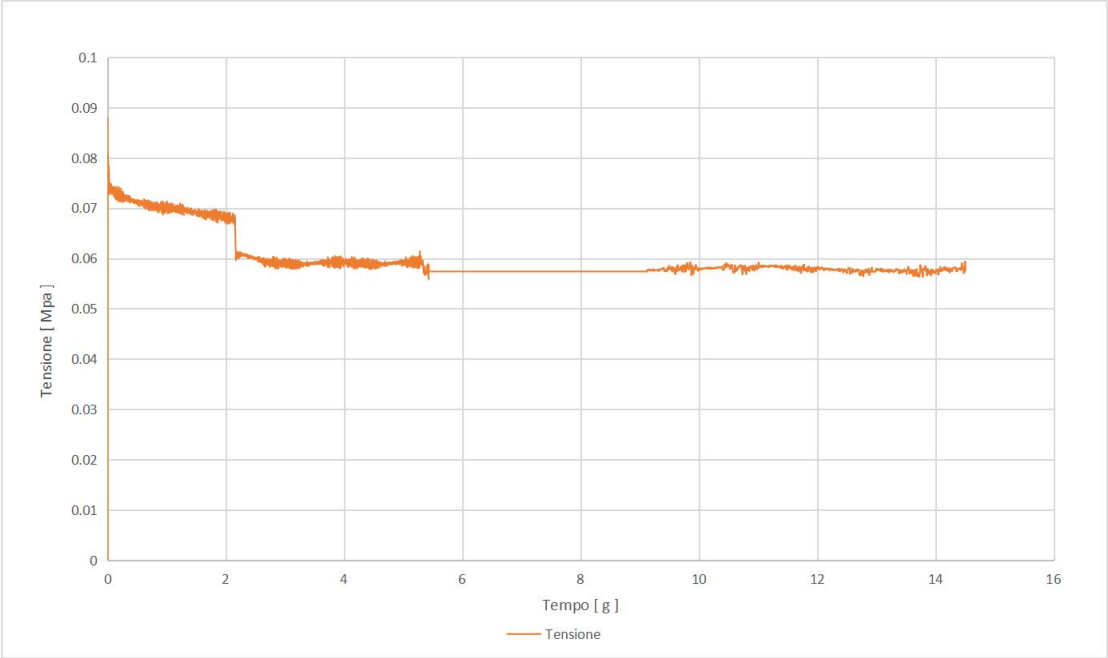


Fig 6.7 : La variazione della tensione registrata dalla cella di carico durante la prova 6.

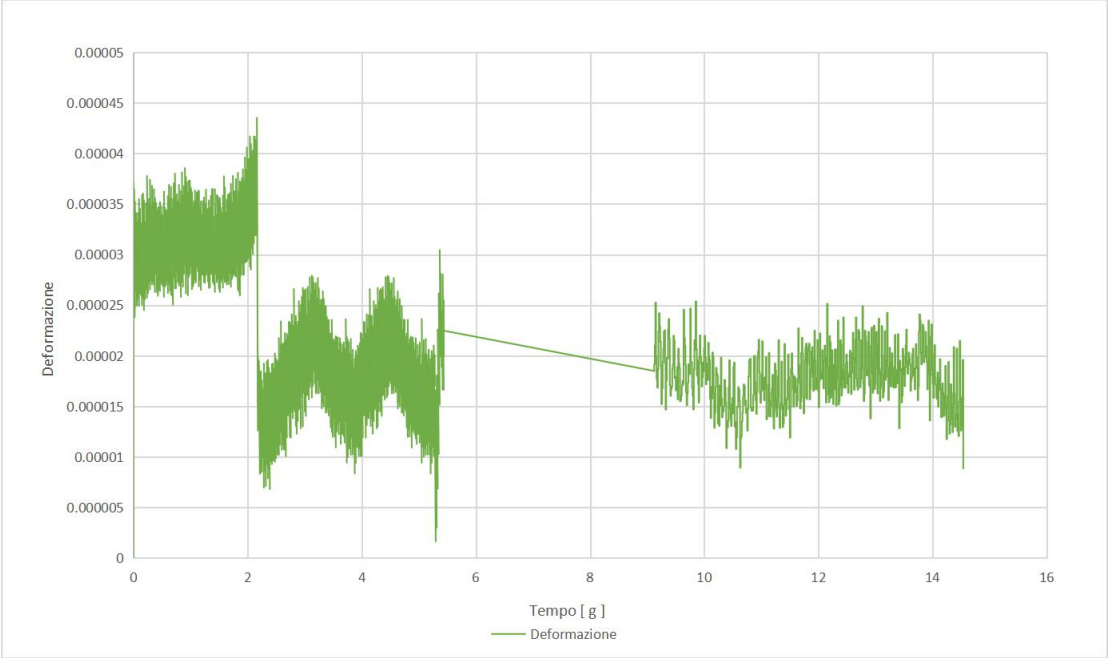


Fig 6.8 : La variazione della deformazione registrata dal trasduttore durante la prova 6.

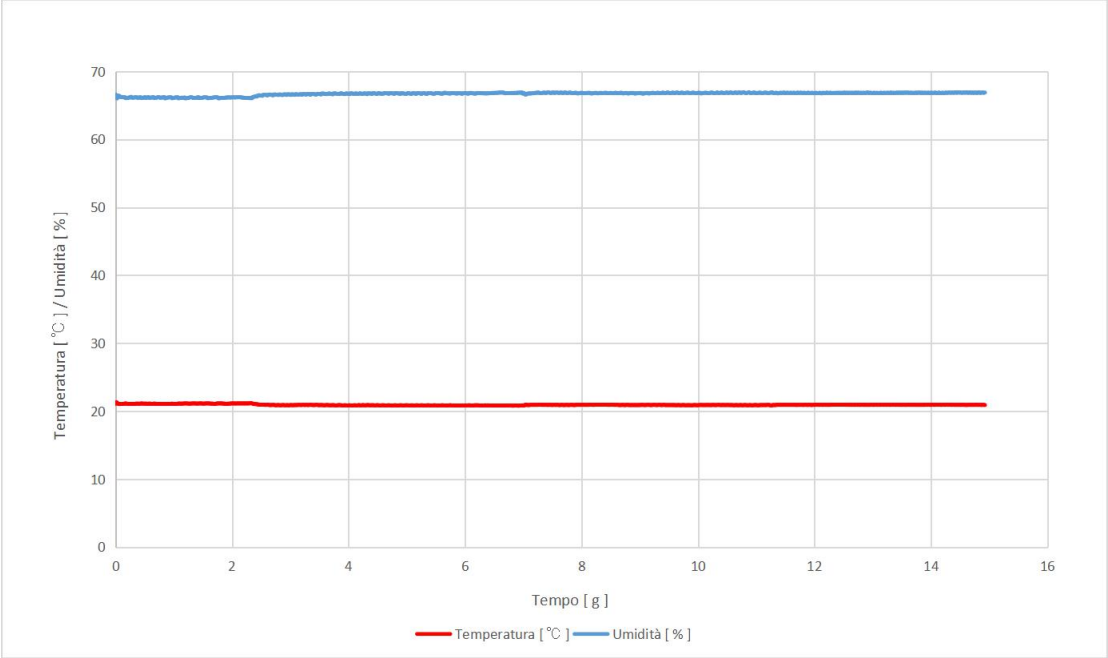


Fig 6.9 : La variazione della temperatura e umidità registrata dal Hobo durante la prova 6.

Si nota nella figura 6.9, presenta un cambiamento della temperatura e umidità nel secondo giorno, potrebbe essere Il problema di controllo

climatico nella cella, interferisce la misura di tensione e la deformazione, quindi in questa prova i dati dovrebbero considerarsi conclusa prima del secondo giorno.

Si nota dalla figura 6.7, dopo un picco di forza circa 0.088 MPa, presenti un rilassamento che comporta una caduta di tensione nel provino, la tensione nel suo valore di picco che continua a diminuire asintoticamente verso 0.0685 MPa, il provino AT1 ha smorzato il 22% della tensione inizialmente. Mentre il grafico della deformazione del provino mostra che il provino ha cambiato il suo dimensione gravemente (figura 6.8).

Prova 8

La prova 8 si è svolta dal 1/09/2021 al 13/09/2021, ha avuto una durata complessiva di circa 12 giorni, utilizzando un provino radiale di Quercia (QR1), di dimensioni 58.25×20.80×19.52mm..

La tensione imposta al provino è stata del 50%, mentre la deformazione è aumentata del 9%.

Si riporta i grafici del rilassamento ottenuto da questa pro

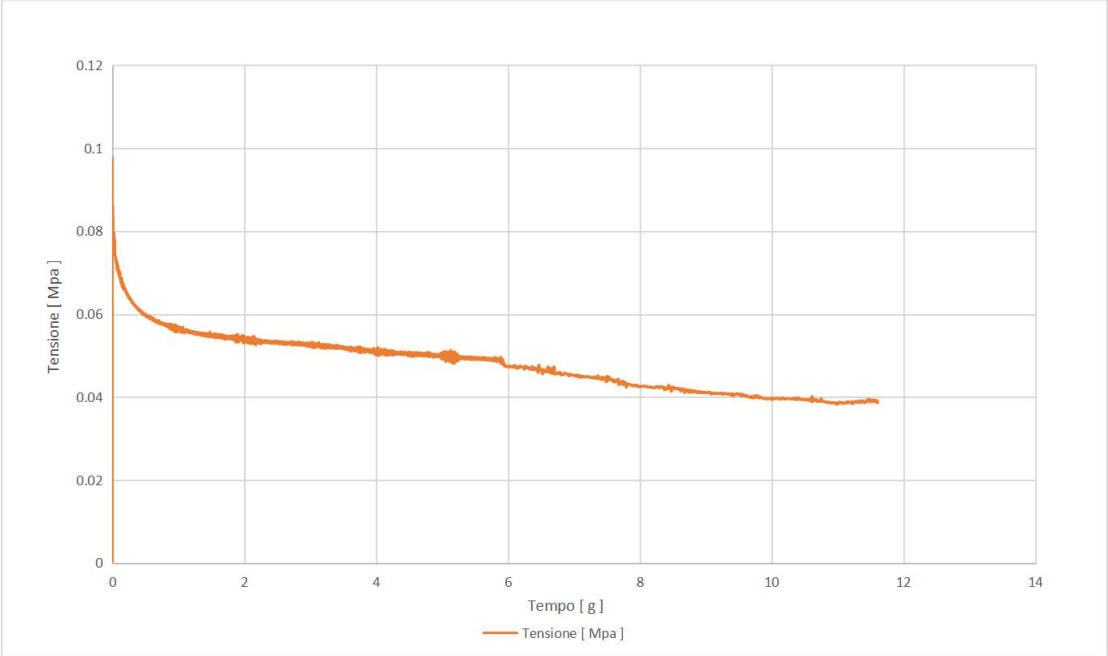


Fig 6.10 : La variazione della tensione registrata dalla cella di carico durante la prova 8.

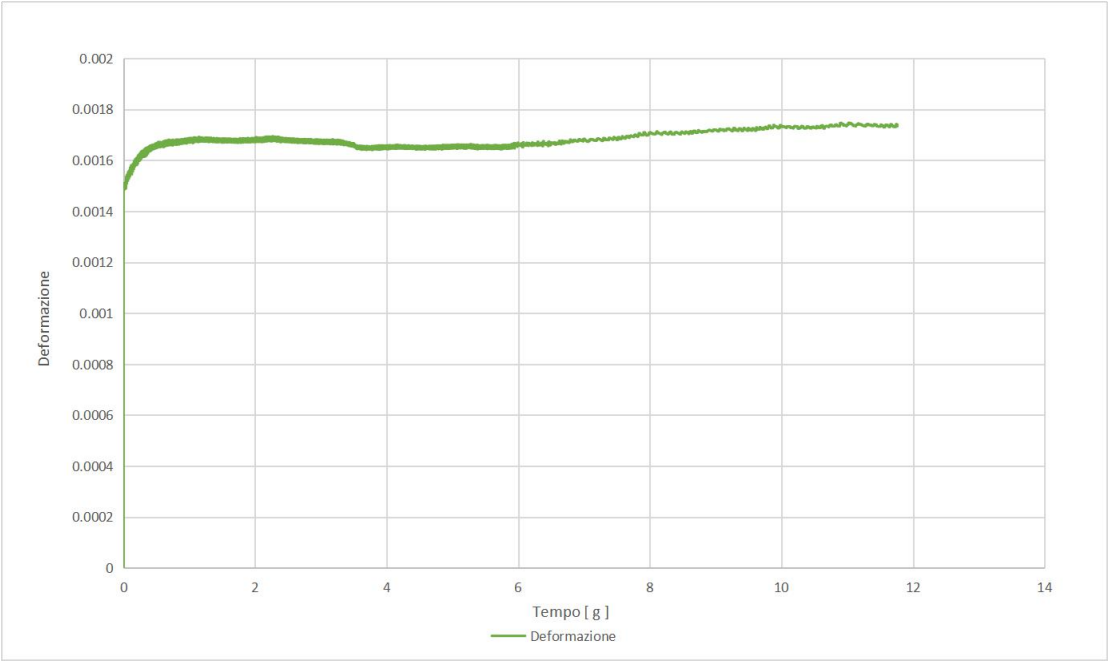


Fig 6.11 : La variazione della deformazione registrata dal trasduttore durante la prova 8.

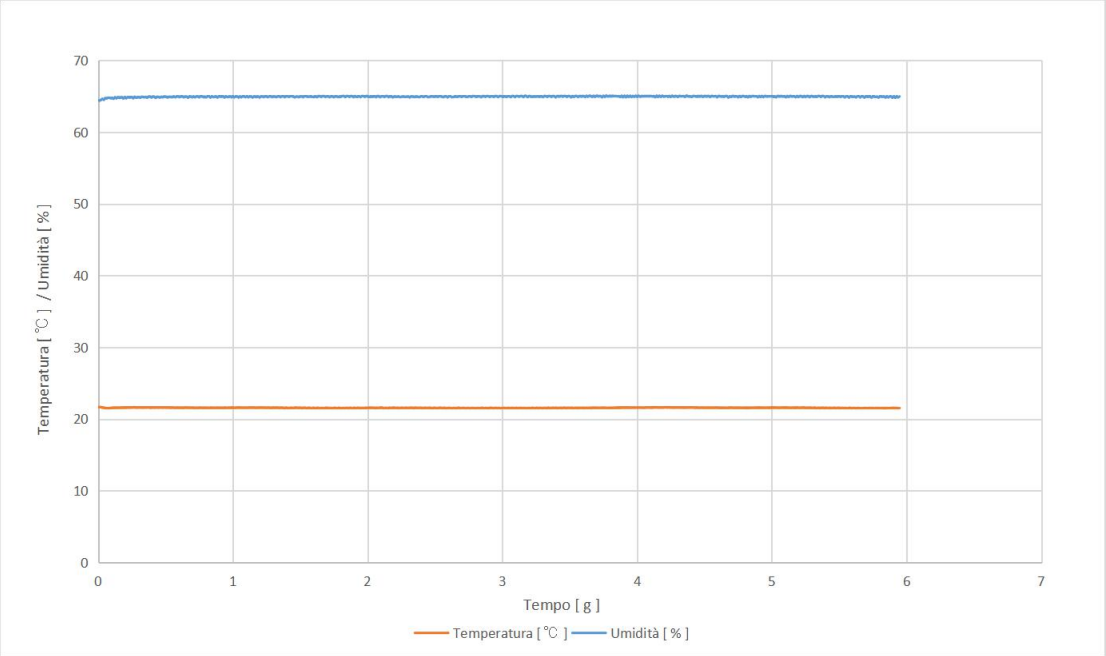


Fig 6.12 : La variazione della temperatura e umidità registrata dal Hobo durante la prova 8.

Si nota dalla figura 6.10, dopo un picco di forza circa 0.098 MPa, presenti un rilassamento che comporta una caduta di tensione nel provino, la tensione nel suo valore di picco che continua a diminuire asintoticamente verso 0.039 MPa. Nel sesto giorno, presenta un cambiamento della tensione, potrebbe essere l'errore di creep della cella di carico, perché la temperatura e umidità sono rimaste quasi costantemente (figura 6.12). quindi in questa prova dovrebbe considerarsi conclusa prima di quel giorno, il provino QR1 ha smorzato il 50% della tensione inizialmente.

Mentre il grafico della deformazione del provino mostra l'aumento del valore di deformazione dal 0.0007 al 0.0017 nel tempo, il provino ha cambiato il 9% del suo dimensione iniziale che non dovrebbe accadere, potrebbe essere il problema del trasduttore (figura 6.11).

Prova 9

La prova 9 si è svolta dal 16/09/2021 al 28/09/2021, ha avuto una durata complessiva di circa 14 giorni, utilizzando un provino longitudinale di Abete (AL3), di dimensioni 19.4×59.8×19.4 mm.

La tensione imposta al provino è stata del 20%. La deformazione resta a zero.

Si riporta i grafici del rilassamento ottenuto da questa prova.

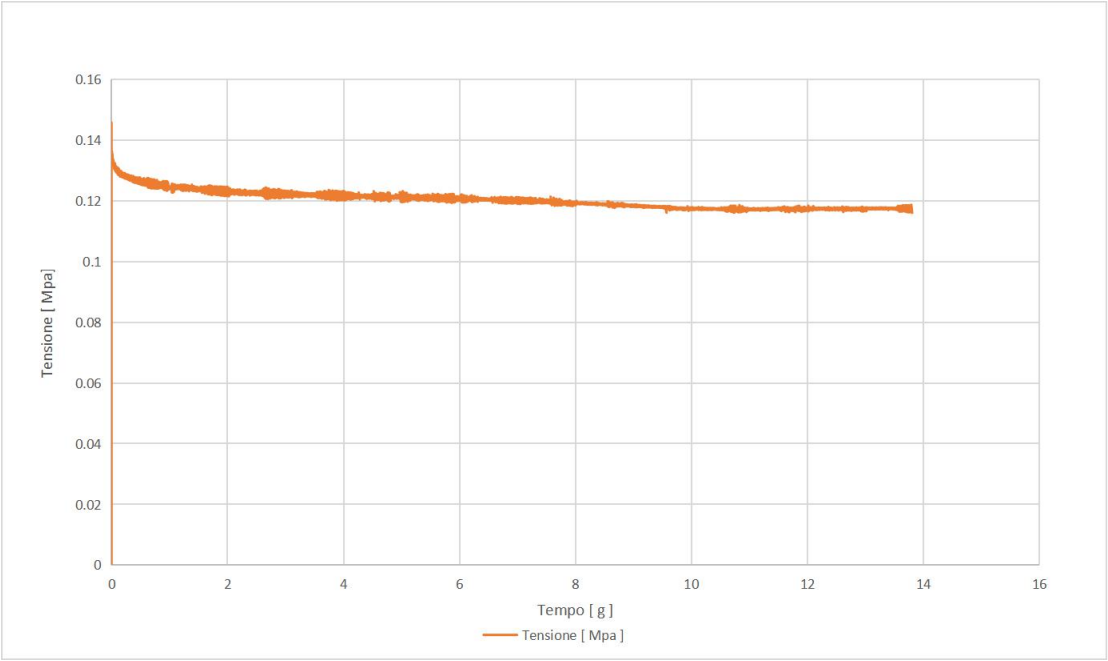


Fig 6.13 : La variazione della tensione registrata dalla cella di carico durante la prova 9.

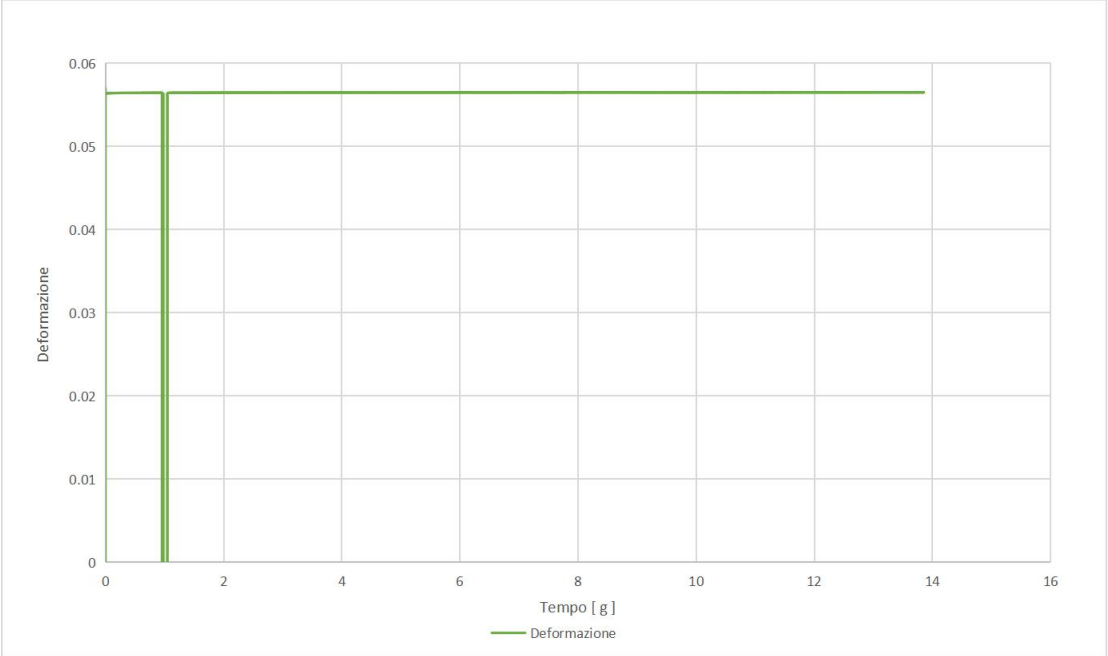


Fig 6.14 : La variazione della deformazione registrata dal trasduttore durante la prova 9.

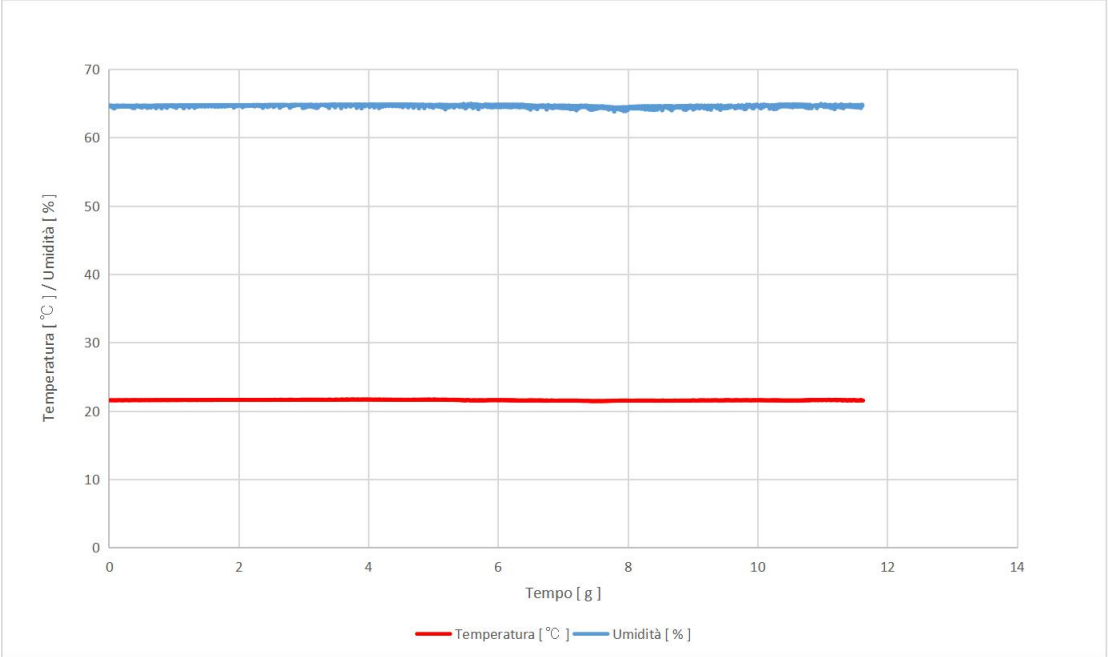


Fig 6.15 : La variazione della temperatura e umidità registrata dal Hobo durante la prova 9.

Si nota dalla figura 6.13, dopo un picco di forza circa 0.146 MPa, presenti un rilassamento che comporta una caduta di tensione nel provino, la tensione nel suo valore di picco che continua a diminuire asintoticamente verso 0.117 MPa, il provino AL3 ha smorzato il 20%

della tensione inizialmente. Mentre il grafico della deformazione del provino mostra che il provino quasi non ha cambiato il suo dimensione (figura 6.14), però esiste un intervallo dei dati nel primo giorno della prova, potrebbe essere il problema del trasduttore, perché la misura della tensione non viene disturbata, anche la temperatura e umidità sono rimaste quasi costantemente (figura 6.15).

prova	**provino**	**Durata della prova**	**La deformazione e la tensione**	**Note**
Prova 1	Querica tangenziale 4 (QT4)	Dal 15/04/2021 Al 06/05/2021	La tensione diminuisce 58%, mentre la deformazione aumenta 37%.	Il problema di controllo climatico nella cella. l'errore di creep della cella di carico.
Prova 5	Abete rosso radiale 5 (AR5)	Dal 28/06/2021 Al 12/07/2021	La tensione diminuisce 21%, mentre la deformazione aumenta 50%.	Il problema di controllo climatico nella cella. Il problema del trasduttore.

Prova 6	Abete rosso tangenziale 1 (AT1)	Dal 12/07/2021 Al 27/07/2021	La tensione diminuisce 22%, mentre la deformazione cambia il sua valore	Il problema di controllo climatico nella cella.
Prova 8	Quercia radiale 1 (QR1)	Dal 1/09/2021 Al 13/09/2021	La tensione diminuisce 50%, mentre la deformazione aumenta 9%.	L'errore di creep della cella di carico. Il problema del trasduttore.
Prova 9	Abete rosso longitudinale 2 (AL3)	dal 16/09/2021 al 28/09/2021	La tensione diminuisce 20%, mentre la deformazione resta a zero.	Il problema del trasduttore.

Tab 6.1 : Tabella riassuntiva delle caratteristiche della prova 1, 5, 6, 8 e 9.

6.2 Discussione

Come già detto nel capitolo 2, quando il legno viene sollecitato una compressione, tende a generare la tensione interna per equilibrare la forza esterna, raggiungerà prima la tensione massima, cioè il picco della curva di rilassamento, poi mano mano la diminuzione nel tempo della tensione iniziale. Nel questo processo la deformazione totale deve rimanere costante nel tempo, succede la trasformazione dalla una parte della deformazione elastica alla deformazione viscosa. Dato che la rigidità di un materiale è legata alla forza dei legami interni al materiale, proprio la capacità di opporsi alla deformazione elastica provocata da una forza esterna. Pertanto quando la tensione iniziale è maggiore, il legno mostra una rigidità migliore. Inoltre che per i provini longitudinali, il valore di schiacciamento è diverso da quello dei provini trasversali, quindi il provino AL3 non può essere confrontato con altri provini trasversali.

Prova	Provino	Tensione iniziale
Prova 1	QT4	0.13 MPA
Prova 5	AR5	0.11 MPa
Prova 6	AT1	0.088 MPa
Prova 8	QR1	0.098 Mpa

Tab 6.2 : Tabella riassuntiva delle tensione iniziale della prova 1, 5, 6,8.

Come i valori riportati in tabella 6.2, Le differenze delle tensioni iniziali dei provini sono simili. Però, i valori delle tensioni iniziali del provino AT1

e del provino QR1 sono leggermente minori rispetto agli altri provini, per i provini AT1 e QT4, mostrano una rigidezza più elevata.

Da un'altro punto di vista, Il comportamento di rilassamento dei materiali viscoelastici che comporta una caduta di tensione nel tempo. La perdita di tensione percentuale del legno mostra le caratteristiche del fenomeno di rilassamento. Si riportano i grafici ottenuti dalle prove:

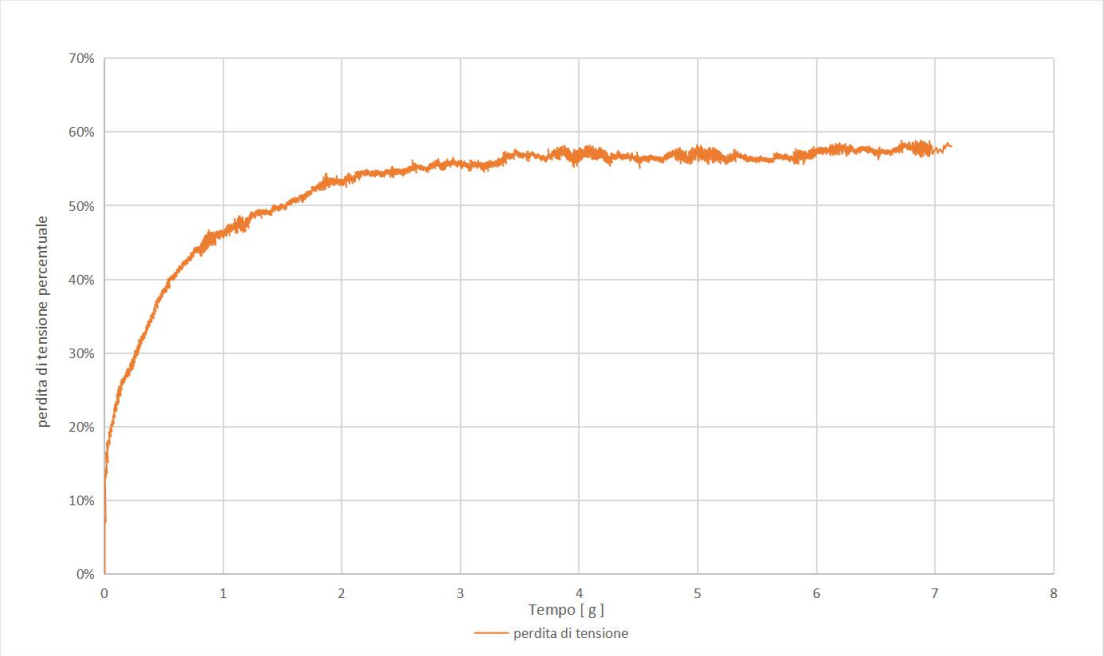


Fig 6.20: Grafico riportante la perdita di tensione percentuale del provino QT4.

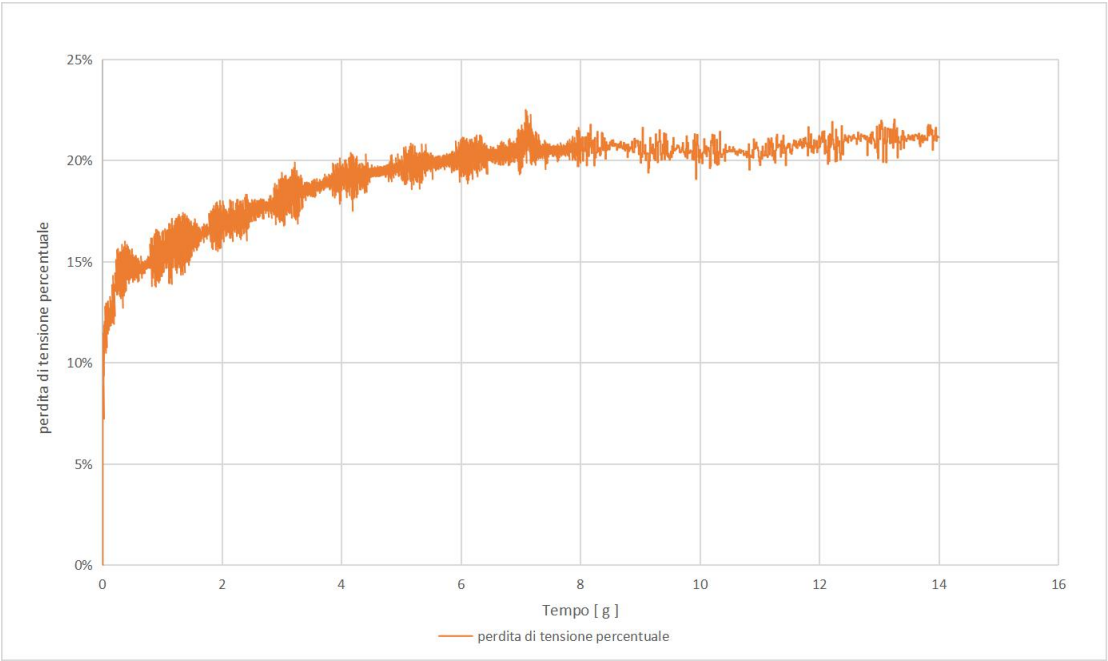


Fig 6.21: Grafico riportante la perdita di tensione percentuale del provino P5 (AR5).

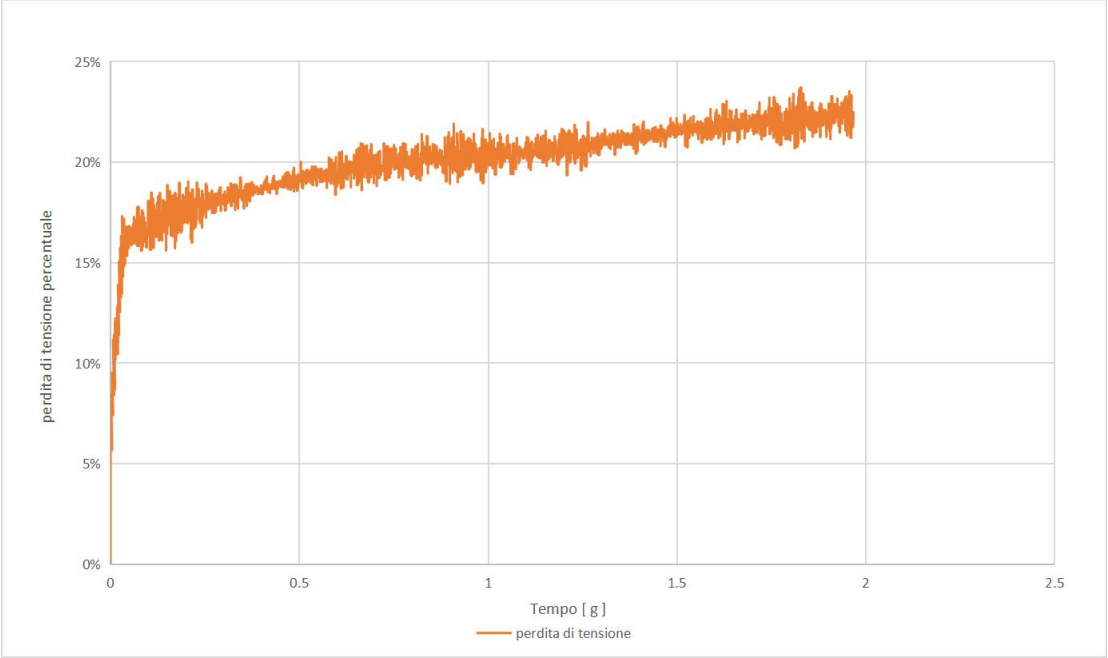


Fig 6.22: Grafico riportante la perdita di tensione percentuale del provino P6 (AT1).

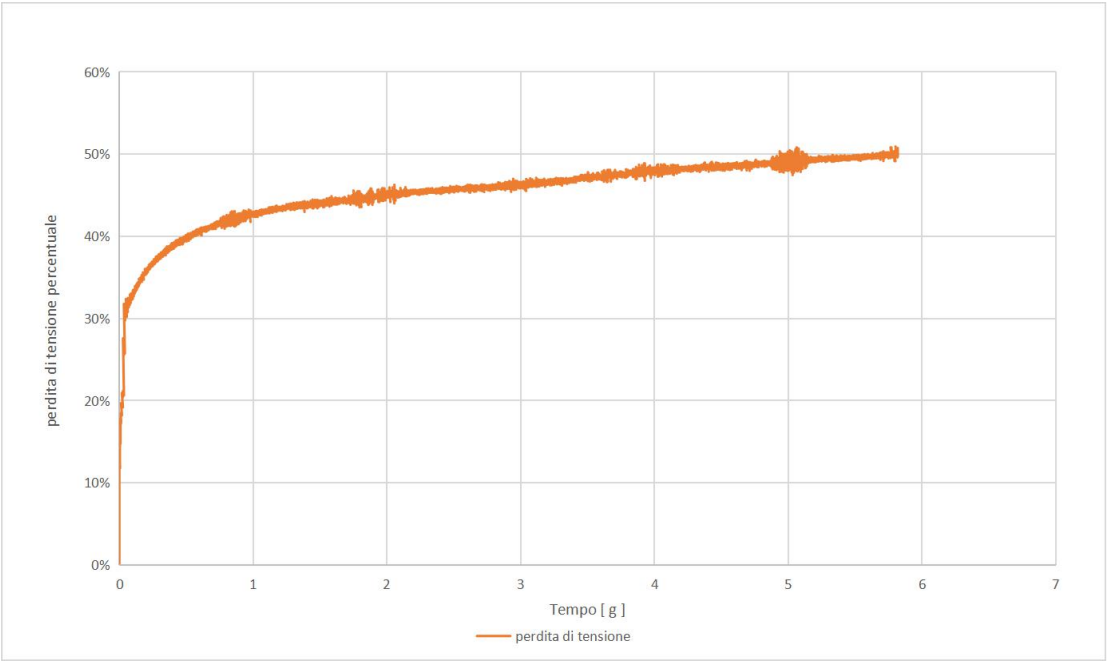


Fig 6.23: Grafico riportante la perdita di tensione percentuale del provino P8 (QR1).

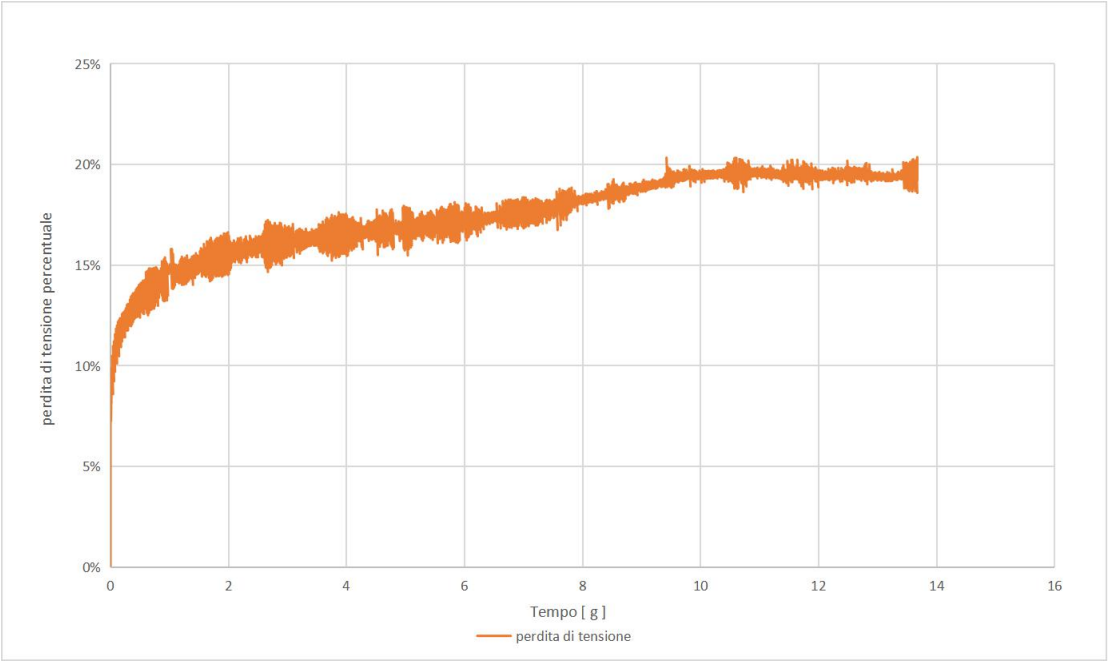


Fig 6.24: Grafico riportante la perdita di tensione percentuale del provino P9 (AL3).

Prova	Provino	la perdita di tensione percentuale	Tempo
Prova 1	QT4	58%	Circa 7 giorni
Prova 5	AR5	21%	Circa 14 giorni
Prova 6	AT1	22%	Circa 2 giorni
Prova 8	QR1	50%	Circa 6 giorni
Prova 9	AL3	20%	Circa 14 giorni

Tab 6.3 : Tabella riassuntiva della perdita tensione percentuale della prova 1,5,6,8,9.

Confrontando questi provini, si nota la prova 1 (QT4) e la prova 8 (QR1) risultano uno smorzamento delle tensioni iniziali del 58% e 50%. La prova 5 (AR5), la prova 6 (AT1) e la prova 9 (AL3) mostrano uno smorzamento delle tensioni iniziali del 21%, 22% e 20%. Dalla tabella (Tab. 6.3) e dai grafici (Fig. da 6.20 a 6.24) si possono trarre un conclusione riguardo il comportamento di rilassamento, cioè esso è caratterizzato dalla specie legnosa: in queste prove, la Quercia ha mostrato un rilassamento più evidente rispetto all' Abete rosso.

Capitolo 7
Conclusione

Le prove sono state effettuate su provini posizionati sull'apparto di rilassometro, per osservare il comportamento di rilassamento quando i provini vengono schiacciati a compressione di un valore costante. I risultati di laboratorio hanno permesso di conoscere il rilassamento è strettamente correlato alla specie legnosa, alla direzione anatomica e alla condizione climatica. In questo lavoro non è stata considerato l'influenza della temperatura e l'umidità, mantiene sempre una temperatura 20℃ e un'umidità relativa al 65%.

La serie di problemi riscontrati durante la procedura delle prove: come le condizioni climatiche sono difficili da controllare, il problema di trasduttore e l'errore di creep della cella di carico. Tutte le cose potrebbero interferire il risultato della prova.

Dopo la osservazione dei dati e dei grafici delle prove, è possibile notare che la Quercia ha mostrato un comportamento di rilassamento marcato rispetto quello dell'Abete rosso. Poiché il fenomeno di rilassamento permette di smorzare le tensioni interni, e contenere gli danni meccanici come *compression set*, è possibile considerarlo come un'azione per conservare i dipinti su tavola. Per le tavole in Quercia, può avere un'effetto significativo.

Biografia

Bonamini G., Uzielli L., Zanuttini R., Elementi di tecnologia del legno e utilizzazioni forestali, 1993.

Brandi C., Teoria del restauro. Editore di Storia e Letteratura, 1963.

Castelli C., Ciatti M., Parri M., e Santacesaria A., Considerazioni e novità sulla costruzione dei supporti lignei nel quattrocento, 1997.

Ciatti M., Castelli C., Santacesaria A., Dipinti su tavola: la tecnica e la conservazione dei supporti, Edifir, Firenze, 1999.

Ciatti M., Dipinti su tavola: riflessioni sulla storia della produzione e della conservazione dei supporti, in Dipinti su tavola: la tecnica e la conservazione dei supporti, a cura di Ciatti M., Castelli C., Santacesaria A., Edifir, Firenze, 1999.

De Lorio B., Metodologie di valutazione dell'incertezza di misura, 2006.

Ingrid Basile E., Supporti lignei, in Supporti parietali per graffiti e dipinti, mosaici e tarsie, supporti lapidei e vitrei, supporti metallici, gli smalti, supporti lignei, 1990.

Giordano G., Le prove ed i legnami di più frequente impiego, in Tecnologia del legno,Torino: Unione Tipografico - Editrice Torinese, 1988.

Giordano G., Tecnica delle costruzioni in legno. Milano: Ulrico Hoepli Editore, 1999.

Li Z., Jiang L., Lu X., Moisture-dependent orthotropic viscoelastic properties of Chinese fir wood in low temperature environment, 2018.

Marconi S., Preparazioni e imprimiture dei dipinti su tavola e tela: materiali, metodi e storia. in Preparazione e finitura delle opere pittoriche: materiali e metodi: Preparazione e imprimiture, leganti, vernici, cornici. a cura di Corrado Maltese, 1993.

Mora P., Dipinti su tavola-legno, in Problemi di conservazione, a cura di G.Urbani, Editrice Compositori, Bologna, 1973.

Mazzanti P., Togni M., Uzielli L., Drying shrinkage and mechanical properties of poplar wood (Populus alba L.) across the grain, 2012.

Nardi Berti R., La struttura anatomica del legno ed il riconoscimento dei legnami italiani di più corrente impiego, 1979.

Nardi Berti R., Berti S., Principali specie legnose impiegate nelle strutture e nei manufatti del passato e criteri per il loro riconoscimento, In Legno nel restauro e restauro del legno, 1983.

Navi P., Heger F., Comportament thermo-hydroméanique du bois, Presses polyte hiniques et universitaires romandes, Lausanne, 2005

Uzielli L., Casazza, O., Conservazione dei dipinti su tavola, 1994.

Uzielli L., Fioravanti M., Il comportamento fisico-meccanico del legno nei dipinti su tavola, in Dipinti su tavola: la tecnica e la conservazione dei supporti, a cura di Ciatti M., Castelli C., Santacesaria A., Edifir, Firenze, 1999.

Uzielli L., Historical Overview of Panel-Making Techniques in Central Italy. Part Three: History of the Structural Conservation of Panel Paintings. In the book of The Structural Conservation of Panel Paintings: Proceedings of a Symposium at the J. Paul Getty Museum, 1993.

Rosati C., Tecniche pittoriche e restauro dei dipinti. Edizioni scientifiche A.Cremonese, 1991.