



Università degli studi di Cagliari

**DOTTORATO DI RICERCA  
IN INGEGNERIA STRUTTURALE  
Ciclo XXVII**

**Caratterizzazione di pannelli x-lam  
in pino marittimo sardo**

SSD: ICAR 09: Tecnica delle Costruzioni

Presentata da:	Riccardo Riu
Coordinatore Dottorato:	Prof. Francesco Ragnedda
Tutor/Relatore:	Prof. Massimo Fragiacomò

Marzo 2016

Esame finale anno accademico 2014 – 2015



La presente tesi è stata prodotta durante la frequenza del corso di dottorato in Ingegneria Strutturale dell'Università degli Studi di Cagliari, a.a. 2011/2012 - XXVII ciclo, con il supporto di una borsa di studio finanziata con le risorse del P.O.R. SARDEGNA F.S.E. 2007-2013 - Obiettivo competitività regionale e occupazione, Asse IV Capitale umano, Linea di Attività 1.3.1 "Finanziamento di corsi di dottorato finalizzati alla formazione di capitale umano altamente specializzato, in particolare per i settori dell'ICT, delle nanotecnologie e delle biotecnologie, dell'energia e dello sviluppo sostenibile, dell'agroalimentare e dei materiali tradizionali".

Riccardo Riu gratefully acknowledges Sardinia Regional Government for the financial support of his PhD scholarship (P.O.R. Sardegna F.S.E. Operational Programme of the Autonomous Region of Sardinia, European Social Fund 2007-2013 - Axis IV Human Resources, Objective 1.3, Line of Activity 1.3.1.)".

## Ringraziamenti

Ringrazio la Prof.ssa Barbara De Nicolo e il Prof. Massimo Fragiaco per la loro disponibilità e per il loro continuo incoraggiamento.

Ringrazio l'Ing. Monica Valdés senza la quale non avrei potuto effettuare i test di laboratorio.

Ringrazio l'Ing. Giovanna Concu, l'Ing. Nicoletta Trulli, l'Ing. Daniel Meloni e l'Ing. Maurizio Follesa per i loro preziosi consigli.

Ringrazio il Prof. Roberto Scotti ed i suoi Collaboratori per aver portato le loro conoscenze in questo progetto e per aver contribuito in modo importante allo sviluppo dello stesso, in particolare vorrei ringraziare il Dott. Sergio Campus per aver dato un contributo importante nella scrittura del secondo capitolo di questa tesi. Ringrazio il Dott. Micheli Brunetti ed il Personale del CNR IVALSA di Sesto Fiorentino per il loro aiuto e la loro ospitalità, in particolare ringrazio la Dott.ssa Michela Nocetti per aver dato un aiuto fondamentale nella scrittura del terzo capitolo di questa tesi.

Ringrazio Monika per la sua pazienza.

*Ai miei Genitori*

## Abstract

**Background and Purpose:** The aim of this work is to present the idea of a short procurement chain of timber as a means to provide an increased value to Sardinian forests. It is based on the evidence that timber buildings are increasingly useful for a number of reasons including sustainability, the speed of erection, and excellent structural performance. However, most of the timber currently used in Sardinia is imported from outside this area. The idea is to use the best part of locally-grown trees to produce timber boards, while all the remaining part of the tree including the production waste is used as biomass for energy production. Important issues to address are the generally low mechanical properties of timber from locally-grown Sardinia trees such as Maritime Pine, which would make some wood-based products like glue-laminated timber not technically viable. Cross-laminated timber panels seems to be a possible solution to this problem because this wood-based product is manufactured in such a way that even with low-quality timber boards it is possible to obtain a medium quality panel. The panel is made of layers of timber boards with the adjacent layers glued under pressure at a right angle. Another issue is the need to grade the local timber, for which a number of specimens must be tested on destruction in order to identify a visual or a machine stress grading procedure. Last but not least, the panels must be tested on destruction to correlate their mechanical properties to the properties of the boards.

**Materials and Method:** the research has been developed through the following steps: 1) two maritime pine plantations with stands suitable for logging and processing were identified, extensively surveyed and sampled. On selected standing trees, based on measurements taken at different heights, the first preliminary grading was applied by sorting for structural and energy use. 2) Trees were harvested by a local company and the logs were finally assorted based on their size and their external defects. 3) The logs were then transported to the local sawmill, where different boards size required to build the grading rules and to produce the CLT panels were cut. Each board was then subjected to a non-destructive measurement of the Modulus of Elasticity using acoustic tool for measuring stress wave velocity (Viscan-Microtec) 4). After kiln drying, the required boards (approximately 840) were subjected to non-destructive measurements of their physical properties (density, humidity, defects etc.) using the machine purposely developed by Microtec. The aim was the calibration of this machine in order to enable the machine strength grading of Sardinia maritime pine. 5) The required boards were visually characterized and then tested to destruction in order to measure their strength and correlate this values to the presence of defects such as knot diameters and positions, grain deviations, etc. 6) Based on the results of phases 4 and 5, the visual and machine based grading rule for Sardinia Maritime Pine have been developed. 7) By applying the newly developed grading rules, some boards

have been selected among the available ones and used for the production of some prototypes of CLT panels. 8) In order to determine the structural performance, 68 panels have been tested to destruction. Testing was carried out in accordance with EN 408 on specimens with a span to depth ratio equal to 18 to determine the bending strength and stiffness, and on specimens with span to depth ratio equal to 9 to determine the shear strength. A number of different methods exist for the analysis and design of CLT elements, including the Shear Analogy Method and the Mechanically Jointed Beams Theory (Gamma Method). These methods have been considered in this study and a relative comparison has been presented in order to determine which method is most suitable when considering CLT formed using Sardinian grown timber..

**Results:** It was found that Maritime Pine as structural material is limited by stiffness rather than strength or density. The effective bending stiffness of CLT is a measure of the material stiffness in relation to the cross sectional build-up of the panel. To be competitive on the market, a Sardinian CLT product will have to compete with imported CLT panels, which are usually made from C24 graded material (spruce). In most cases this is simply because the C24 material is widely available on the market rather than a specification from the designer. The performance of panels made of Maritime Pine boards has been compared directly with that of imported products, demonstrating that an increase in the Sardinian panel depth of just 15% is sufficient to match the stiffness of the imported panels, which is the most important design property.

**Conclusions:** This work lays the foundation for the development of a short procurement chain of wood in Sardinia. The EDENSO project developed in parallel to this doctorate study is still in progress and further tests on maritime pine CLT panels are planned. A short procurement chain of timber is a possible means to create job opportunities and reduce depopulation, particularly important in some areas of the island. By adding value to the forests by means of timber production used in prefabricated components employed in low-rise timber buildings, it is also possible to improve forest management and even extend forested areas, which have many positive effects on the environment, the landscape and the reduction of hydrogeological hazard.

**Keywords:** cross-laminated panels, timber grading, forestry, short procurement chain, wood, biomass.

## Capitolo 1: Introduzione

### 1.1 Idea alla base del progetto

Il tema della sostenibilità e dell'eco-efficienza delle costruzioni sta diventando oramai il fulcro delle politiche edilizie della maggior parte delle amministrazioni e organizzazioni pubbliche sia a livello locale sia nazionale e internazionale. Se si pensa che in Sardegna il settore dell'edilizia, uno dei meno eco efficienti in Europa, è responsabile del 30% dei consumi energetici totali della regione e del 25% delle emissioni di CO<sub>2</sub> in atmosfera, è facilmente comprensibile come le politiche volte ad incentivare l'efficienza energetica e l'utilizzo di tecnologie e materiali naturali nel settore dell'edilizia siano diventate oramai una necessità e non più solamente una scelta intellettuale o ideologica.

In questo contesto la scelta del legno come materiale da costruzione rinnovabile appare una logica conseguenza in considerazione della proprietà del legno di fissare il carbonio attraverso il processo di fotosintesi clorofilliana e dei minori consumi in termini di energia ed emissioni clima-alteranti nelle fasi di produzione e trasformazione rispetto a tutti gli altri materiali utilizzati in edilizia.

Se poi si pensa che sia gli scarti di lavorazione durante i processi di trasformazione che il materiale stesso al termine del suo ciclo di vita possono essere utilizzati per la termovalorizzazione, si comprende facilmente come i benefici ambientali che si possono ottenere dall'utilizzo di questo materiale sia come fonte energetica che come materiale da costruzione sono enormi.

Da questo punto di vista appaiono interessanti le potenzialità di un nuovo sistema per la costruzione di edifici a più piani, realizzato con struttura portante di legno di qualità certificata e caratterizzato da elevate prestazioni meccaniche e basso consumo energetico, ottimi livelli di sicurezza al fuoco e al sisma, comfort acustico e durabilità nel tempo: il sistema 'x-lam' o a pannelli in legno lamellare incrociato. Il sistema costruttivo, sviluppato in Austria nella prima metà degli anni 90, prevede la realizzazione di edifici in cui gli elementi portanti sono formati da pannelli di legno massiccio costituiti dalla sovrapposizione e incollaggio di strati ortogonali di tavole di legno massiccio. I pannelli così formati in elementi di larghezze variabili da 1,25 a 4 m e lunghezze fino a 24 m, vengono tagliati con elevata precisione mediante macchine a controllo numerico in elementi strutturali (parete, solaio o copertura) a seconda delle esigenze architettoniche completi di aperture per porte, finestre e vani scala e in seguito issati e collegati tra loro in opera con angolari metallici, chiodi a rilievi tronco-conici e viti autoforanti.

I pannelli che formano pareti e solai degli edifici, sono degli elementi costruttivi dotati di per sé di notevole stabilità dimensionale e elevati valori di resistenza e rigidità, che consentono l'utilizzo di legno classificato anche in classi di resistenza non particolarmente elevate.

La Sardegna, pur non avendo storicamente una lunga tradizione sull'utilizzo del legno come materiale da costruzione (anche se sono presenti nella tradizione costruttiva sarda l'utilizzo di quercia, ginepro e castagno nella realizzazione di coperture e solai in edifici di muratura) con circa 585.000 ha di bosco e con un indice di boscosità del 24% rappresenta, secondo i dati dell'Inventario Nazionale delle Foreste e dei Serbatoi di Carbonio del 2005, la quarta regione italiana come estensione boschiva e addirittura la prima regione come superficie forestale se si considerano le Altre terre boscate (circa 1.200.000 ha pari a circa metà della superficie totale dell'isola), ossia principalmente arbusteti e macchia mediterranea.

Il bosco dunque costituisce una risorsa importantissima per la nostra Regione, oltre che dal punto di vista ambientale, turistico e di protezione idrogeologica, anche e soprattutto dal punto di vista produttivo. In questo contesto utilizzare il legno significa quindi creare un indubbio beneficio in termini di economie locali e di occupazione, oltre che incentivare l'incremento delle zone boschive e quindi in sostanza salvaguardare la nostra Regione per le generazioni future.

In particolare le pinete di pino marittimo sono diffuse in diverse zone in Sardegna e costituiscono circa il 9% dei boschi alti in Sardegna. Il legno ricavato dalle pinete è attualmente utilizzato principalmente come combustibile non essendo una specie particolarmente pregiata. Tuttavia il pino marittimo è utilizzato con successo per usi strutturali in altre regioni italiane ed europee ed è attualmente già classificato nella norma europea EN 1912 in classe C18 per le specie provenienti dal Portogallo (classificato in classe E secondo la norma di classificazione a vista Portoghese). E' quindi una risorsa ampiamente disponibile in Regione, con qualità meccaniche non particolarmente elevate ma comunque tali da suggerirne il possibile impiego nella realizzazione di pannelli x-lam da utilizzare nella realizzazione di edifici.

## 1.2 Obiettivi generali della ricerca

Il progetto si è proposto di investigare le possibilità di avviare un processo di filiera locale in Sardegna per la realizzazione di edifici residenziali in legno sardo e il possibile sfruttamento sostenibile del patrimonio forestale in termini di produzione di energia con la biomassa prodotta.

Le fasi principali del progetto possono essere così sintetizzate (vedi Fig. 1.2.1):

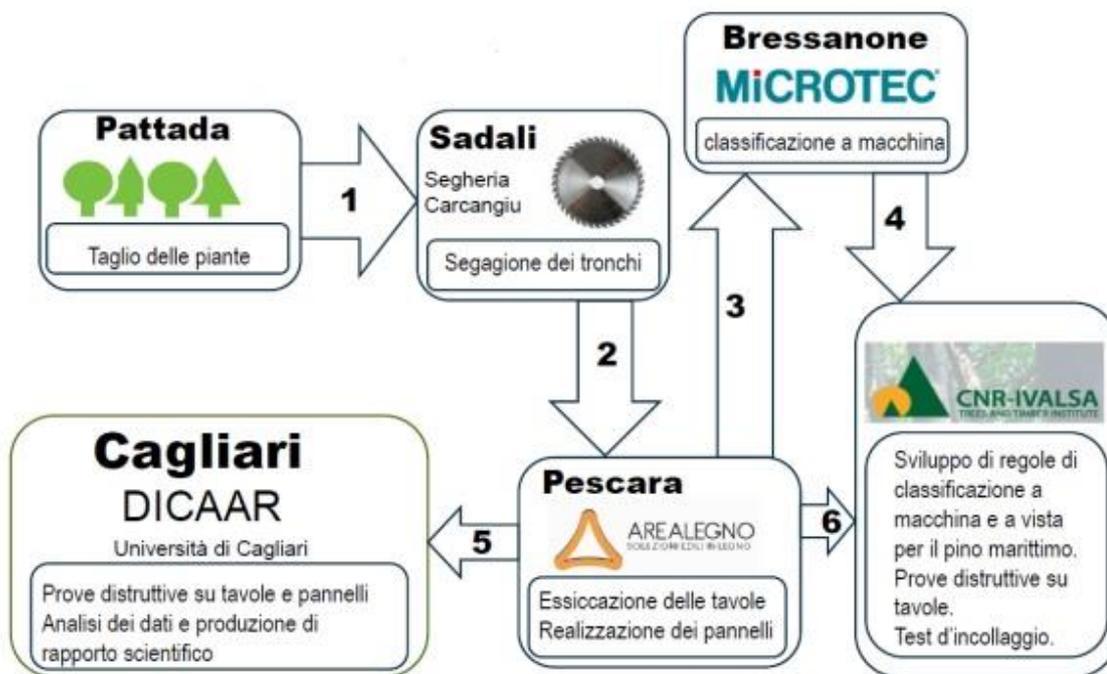


Figura 1.2.1 Diagramma delle attività

**Fase 1:** si è lavorato all’inventario delle risorse forestali delle aree campione (site nel territorio del Comune di Pattada) e nella prima qualificazione del materiale (qualificazione delle piante in piedi).

**Fase 2:** Concluso l’inventario delle risorse forestali delle suddette aree si è proceduto al taglio delle piante ritenute idonee effettuando una distinzione fra i tronchi per uso energetico e quelli per uso strutturale. In questa fase sono stati studiati gli schemi di taglio dei topi in tavole adatte alla produzione di pannelli x-lam.

È stata quindi realizzata l’essiccazione artificiale delle tavole, e quindi la classificazione per selezionare il materiale idoneo a impieghi strutturali.

Questa fase è stata molto importante per la ricerca, avendo visto la collaborazione di alcuni esperti del CNR-IVALSA che avevano già coordinato il percorso della creazione di una filiera corta e che hanno fornito la loro consulenza nella fase della classificazione del legno sardo disponibile nelle aree campione e nella predisposizione delle regole per la classificazione a vista specifica per il legno di pino marittimo sardo. Tali regole di classificazione sono state essenziali per poter effettuare una corretta caratterizzazione del materiale di base.

**Fase 3:** Ultimata la fase della classificazione e caratterizzazione della specie legnosa scelta, si è proceduto alla realizzazione di pannelli strutturali con la tecnologia x-lam i quali sono stati poi testati nel laboratorio del Dipartimento di Ingegneria Civile, Ambientale e Architettura (DICAAR)

dell'Università di Cagliari per verificarne le proprietà meccaniche. Le prove sperimentali sono state eseguite secondo le indicazioni date dalle Linee Guida per l'ottenimento del Certificato di Idoneità Tecnica all'impiego redatte dal Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici in modo da poter arrivare successivamente all'ottenimento della certificazione per impieghi strutturali dei pannelli di pino marittimo sardo.

**Fase 4:** L'ultima fase è stata dedicata all'analisi dei dati ottenuti nelle prove sui pannelli. Questi ultimi sono stati confrontati con diversi metodi analitici attualmente in uso nella pratica per individuare quello che meglio descrive il comportamento reale dei pannelli, allo scopo di ottenere uno strumento di calcolo valido per i progettisti che decideranno di usare questo nuovo materiale da costruzione.

### 1.3 Struttura e scopo della tesi

In questo capitolo sarà data una breve descrizione dei capitoli che compongono questa tesi.

In ogni capitolo, la prima parte sarà dedicata alla descrizione generale dell'argomento e quindi allo stato dell'arte.

Segue poi la descrizione delle prove sperimentali che sono state effettuate ed in fine l'analisi dei dati ottenuti con i commenti e le conclusioni.

Il Capitolo 2 e quello che descrive le attività di approvvigionamento del materiale, che viene usato in tutte le fasi del progetto (tavole e pannelli), lo studio del taglio dei topi, delle tavole e la fase di essiccazione.

Il Capitolo 3 è dedicato alla classificazione del materiale. In questo capitolo sono descritti i metodi di classificazione (classificazione a vista e a macchina) e le norme che li regolano. Sono inoltre descritte le prove di laboratorio effettuate, l'analisi dei dati ottenuti e lo sviluppo della regola di classificazione a vista ed un settaggio per la classificazione a macchina.

Il capitolo 4 è stato dedicato ai pannelli x-lam. La prima parte del capitolo è dedicata allo stato dell'arte della tecnologia del x-lam, il suo utilizzo ed il suo potenziale nel mondo delle costruzioni.

La seconda parte è stata dedicata alle prove di laboratorio effettuate su pannelli realizzati con pino marittimo. Le prestazioni di questi pannelli sono state confrontate con pannelli realizzati con solo abete e con pannelli misti abete pino marittimo. Con le suddette prove si sono potuti caratterizzare i pannelli in pino marittimo e verificare la fattibilità di pannelli misti con lo scopo di ottimizzare le prestazioni del materiale oggetto della ricerca. L'ultima parte del capitolo è dedicata alle analisi dei dati ottenuti nelle prove sperimentali ed alla comparazione di vari metodi analitici utilizzati nella pratica con lo scopo di individuare quale di questi meglio descrive i pannelli realizzati.

## 2 Approvvigionamento del materiale

### 2.1 Premessa

*L'abbattimento di alberi è la fonte di tutto il legname e la sua impronta ambientale è potenzialmente elevata. Una silvicoltura sostenibile, caratterizzata da un uso limitato di biocidi, dal rispetto della biodiversità, dalla capacità di rigenerazione ecc. è essenziale per la disponibilità e l'accessibilità nel lungo periodo di legname e prodotti derivati sostenibili.*

Questa fase della ricerca ha visto l'importante contributo del Prof. Roberto Scotti del Dipartimento di Agraria dell'Università di Sassari e dei suoi Collaboratori. Il lavoro svolto si inquadra in una prospettiva di ricerca di condizioni sostenibili (ecologiche e socio-economiche) per la promozione e pianificazione della filiera locale del legno strutturale. Nello specifico, le attività svolte sono consistite nell'approntamento, sperimentazione e valutazione di strumenti e approcci metodologici utili alla stima delle quantità di legname ricavabili in bosco. Da una parte, questi strumenti e approcci hanno consentito il completo raggiungimento dei risultati richiesti nelle prime fasi di progetto strettamente necessarie per lo sviluppo del flusso di lavoro. Dall'altra, essi presentano utilità operativa in un'ottica di ottimizzazione e razionalizzazione della gestione pianificata della filiera del legno. Ad esempio possono permettere di valutare a quale età del bosco può essere massimamente proficuo procedere alla rinnovazione del soprassuolo (che turno o ciclo produttivo adottare) per un utilizzo produttivo della risorsa territoriale, possibilmente tramite forme opportune di arboricoltura da legno.

### 2.2 Inquadramento territoriale e prima caratterizzazione dei popolamenti

L'impianto di Sa Mela de supra (sito A) si trova ad una decina di chilometri a sud-ovest dell'abitato di Pattada. È compreso tra 850 e 950 metri di quota e si sviluppa per una superficie di quasi 17 ettari fra le località di Suerzos mutigos, Solorche e Sa ucca de su truncu a sud del monte Sa muzzere. Circa 4 ettari dell'impianto (poco più del 20% sul totale) sono costituiti da popolamenti puri di pino marittimo, il 7% da pino laricio con presenza di pochi individui isolati di pino marittimo in percentuale inferiore al 10% e la restante parte, quasi 12 ettari, da popolamenti con presenza esclusiva di pino laricio. Tutta l'area è caratterizzata da un'ottima accessibilità e da moderate pendenze. Quasi tutto il soprassuolo è stato interessato in passato da interventi di diradamento eccezion fatta per alcuni lembi di popolamenti di pino laricio nella porzione più occidentale.

L'impianto di Sa mela de sutta (sito B) rappresenta una piccola parte di un corpo molto più esteso che si sviluppa lungo le pendici settentrionali del Monte Lerno fino a Badde fustes alvos tra i 500 e gli 800 metri di quota, alcuni chilometri a nord est dell'abitato di Pattada. La superficie del cantiere di rimboschimento (oltre 200 ettari) si presenta quasi interamente lavorata a gradoni fatta eccezione per

alcune limitate porzioni lavorate andantemente. A partire dal 2008 sono stati realizzati alcuni diradamenti prevalentemente a carico degli individui di conifera dominati. Nello stesso anno si è verificato un incendio che ha distrutto buona parte della superficie del soprassuolo che si è ridotto a poco più di 100 ettari. L'area percorsa è stata oggetto di interventi di taglio raso delle conifere compromesse dal fuoco e di ricostituzione delle latifoglie. Altri interventi di diradamento sono stati realizzati nel 2010 nella porzione più occidentale dell'impianto.

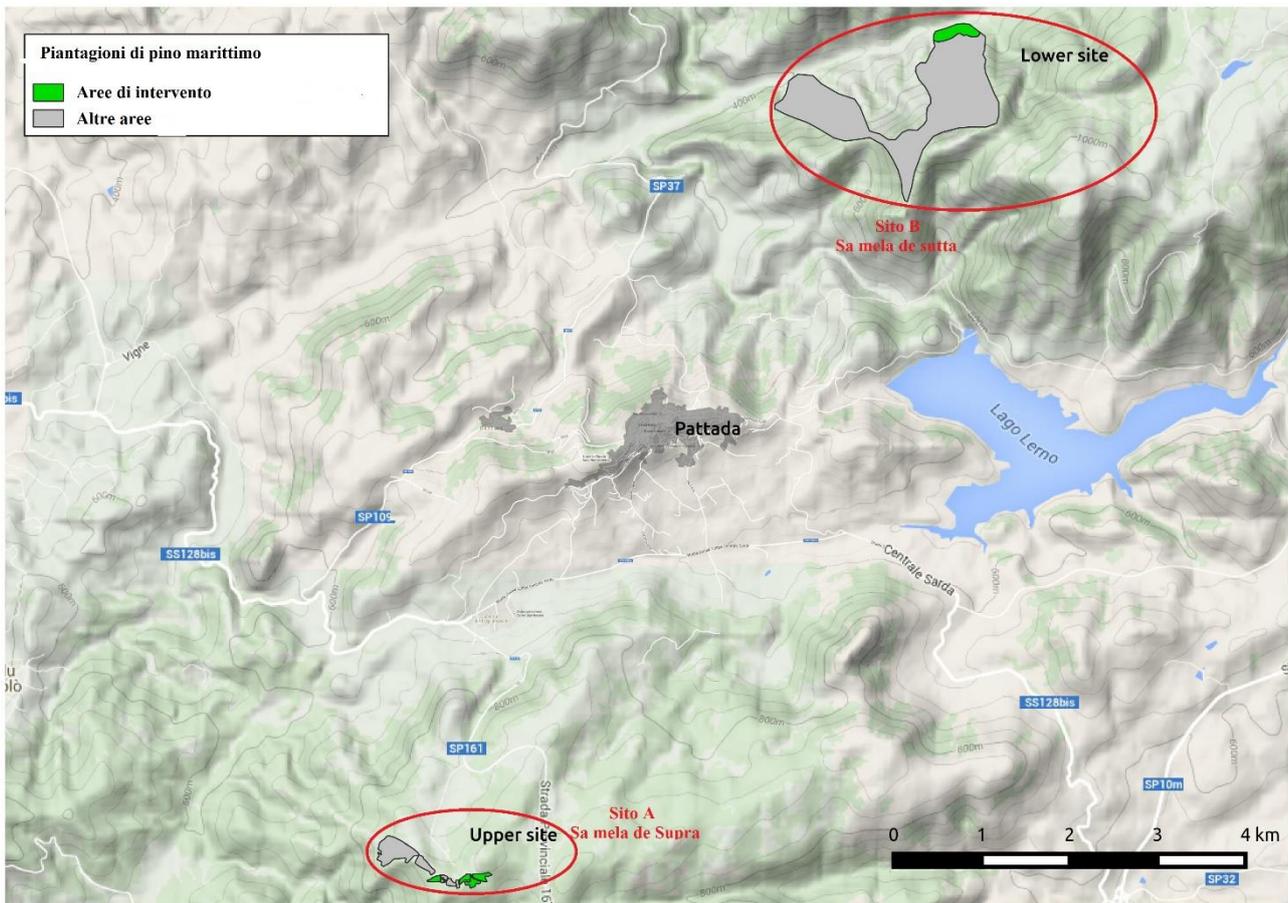


Figura 2.2.1 Piantagioni di pino marittimo- Aree di intervento

## 2.3 Attività svolte

### 2.3.1 Cavallettamento totale e mappatura dei popolamenti (sito A)

L'impostazione del lavoro in bosco è stata fatta cercando di coniugare proficuamente ed efficacemente quanto richiesto dall'obbiettivo della ricerca (coordinamento e implementazione di tutte le attività necessarie a soddisfare i quantitativi e le caratteristiche assortimentali ricercate) con l'opportunità offerta di operare in una più ampia prospettiva di ricerca scientifica e sperimentazione in ambito forestale. In quest'ottica, si è deciso di intensificare il dettaglio dello studio limitatamente al sito A effettuando una mappatura integrale dei popolamenti di pino marittimo (rilievo di tutte le posizioni) oltre al rilievo dendrometrico dei soggetti arborei censiti (misura di tutti i diametri a 1.30 metri e di un campione di altezze). In fase di rilievo è stato seguito uno schema di codifica in base al quale le posizioni sono identificate dal settore di appartenenza (settori di impianto o "blocchi" delimitati da elementi di viabilità forestale o fasce parafuoco) e dalla sequenza dei filari (Figura 2.3.1) all'interno del settore e dalle posizioni lungo il filare. In totale sono stati mappati e cavallettati 2558 fusti di pino marittimo su una superficie di 3.9 ettari (4 settori).



Figura 2.3.1 Filari sito A

Questa fase di lavoro, contribuendo nel contempo alla caratterizzazione dei popolamenti del sito A utile al fine di indirizzare la scelta definitiva dei settori in cui effettuare gli abbattimenti, ha di fatto reso disponibile una cospicua banca dati utilizzabile per finalità diverse oltre che per lo sviluppo stesso della ricerca (ad es. simulazione della selvicoltura, simulazione di schemi di campionamento, analisi della relazione tra caratteristiche strutturali del popolamento e proprietà fisico-meccaniche dei segati).

### 2.3.2 Primi test e affinamento della procedura

Il percorso di inquadramento del tema “stima della massa assortimentale in bosco” e di individuazione delle più opportune soluzioni operative da adottare (ad es. in termini di efficacia, costo del lavoro in campo e procedure di calcolo e analisi) è cominciato con una serie di test preliminari condotti nel sito A. Nello specifico, disponendo della mappa dei popolamenti e del sistema di codifica precedentemente definito, è stato effettuato un sorteggio di un campione casuale di 68 piante distribuito tra i differenti settori. I soggetti arborei sono stati quindi individuati in bosco effettuando su di essi la misura di più diametri in corrispondenza di sezioni ad altezze “non fisse” lungo il fusto e operando valutazioni quantitative e qualitative sulla concorrenza. Grazie alle informazioni raccolte in questi primi test si è potuto iniziare a maturare, per poterlo poi affinare, il concetto che risiede alla base della necessità di stimare il numero di tavole ottenibili da un fusto prima del suo abbattimento, ai fini di una razionale gestione dell'utilizzazione. Ovverosia, disponendo di più coppie di misure diametro/altezza in corrispondenza di una qualsiasi sezione lungo il fusto se ne ricostruisce il profilo e si valuta il contributo della componente assortimentale potenziale corrispondente.

In questa fase è stata operata una valutazione di massima del numero di alberi necessari per ottenere il volume di tondo richiesto.

### 2.3.3 Funzione di profilo individuale

Per procedere alla stima della massa assortimentale prima dell'abbattimento occorre quindi rappresentare quantitativamente il profilo di ciascun fusto valutando il diametro sopra corteccia presente ad una qualsiasi altezza. Il procedimento seguito per conseguire questo obiettivo è consistito nell'utilizzo del cavalletto parabolico finlandese per la lettura dei diametri “alti” (fino a 6 metri) sulle piante selezionate (si veda il paragrafo *Selezione delle piante e assortimentazione in piedi*). A differenza dei primi test si dispone ora di misure di coppie diametro/altezza più precise ad altezze fisse lungo il fusto: alla base, a 1.30 metri, a 2 metri, a 4 metri e a 6 metri, di cui le ultime due rilevate proprio con il cavalletto finlandese (Fig. 2.3.3). Questo insieme di rilievi ha riguardato tutti i fusti di

interesse. Successivamente si è proceduto alla definizione del profilo individuale utilizzando interpolazioni di tipo *spline* (Hyman, 1983) in ambiente statistico R.

A questo punto si dispone dello strumento che permette di determinare i diametri delle sezioni di testa dei topi.



Figura 2.3.2 Attività in bosco: misurazione dei diametri dei fusti.

#### 2.3.4 Algoritmo di caratterizzazione dello schema di taglio ottimale

Per effettuare la scelta e la quantificazione degli assortimenti da produrre è stato sviluppato, sempre in ambiente statistico R, un algoritmo che sfrutta proprio le stime sul profilo individuale. In base ai parametri in ingresso, attraverso una sequenza di operazioni algebriche di geometria elementare, tale funzione individua la massima sezione rettangolare utile per ricavare le tavole per un dato assortimento. Stabilita la sezione, al netto delle perdite di produzione (ritiri, refilature, ...), è

determinato il numero di tavole e l'indicatore di "resa" massima ipotizzabile (rapporto tra area della sezione rettangolare e area della sezione toppo sotto corteccia). I principali parametri in ingresso richiesti dall' algoritmo sono: (i) il diametro sopra corteccia, che si suppone valutato in corrispondenza della sezione di testa del toppo (teorico, stimato sul fusto in piedi, o reale, misurato sul fusto a terra), (ii) la sezione di testa dell'assortimento ricercato, larghezza e spessore della tavola. Vi sono poi parametri opzionali (spessore della corteccia, eventuale margine di sicurezza e strada della sega) da utilizzare per adattare la stima a condizioni specifiche.

Operativamente l'algoritmo presenta una duplice utilità. Consente di comporre tabelle da utilizzare in bosco, nel corso della stima preliminare, per scegliere tra sezioni alternative e quindi decidere in che modo utilizzare un dato fusto, in base alla "resa" prevista vuoi da assortimenti alternativi, vuoi da posizioni di taglio alternative. Nella successiva fase di elaborazione, utilizzando eventualmente misure di maggiore dettaglio, la funzione consente di tenere la contabilità delle tavole prodotte, per ciascun tipo di assortimento, nel bosco esaminato.

#### 2.3.5 Selezione delle piante e assortimentazione in piedi

Occorre qui precisare che in un primo momento, attente valutazioni sui due siti hanno portato a formulare ipotesi di intervento diversificate in relazione alle differenti caratteristiche stazionali, al diverso grado di accessibilità e alle diverse dinamiche strutturali e compositive. Tali aspetti suggerivano due diverse linee di azione: i) un approccio più "cautelativo" per il sito B dettato dalla necessità di garantire una sufficiente copertura del suolo in presenza di pendenze sensibili e favorire i processi evolutivi in atto inquadrando quindi l'intervento come "rinaturalizzazione"; ii) un approccio più "produttivistico" per il sito A impostato su una opportuna progettazione di intervento a taglio raso con rinnovazione artificiale posticipata, giustificato dalle condizioni stazionali più favorevoli, da una maggiore accessibilità e relativa facilità di cantierizzazione dei lavori.

Tuttavia, non essendo stato possibile procedere secondo questa logica si è, in conclusione, deciso di operare una selezione puntuale dei soggetti da abbattere. Le piante ritenute idonee sono state selezionate da tre diversi operatori i quali, contemporaneamente e da differenti prospettive, valutano visivamente la struttura arborea nel suo complesso e la presenza di tratti di fusto ben conformati e sufficientemente rettilinei per accomodare la lunghezza delle tavole ricercate. Operativamente, ad un determinato tratto di fusto si associa un toppo valutandone la resa con l'ausilio delle tabelle assortimentali prodotte con l'algoritmo di caratterizzazione dello schema di taglio (si veda paragrafo precedente). Questo approccio si è rivelato fondamentale e necessario per ottimizzare il lavoro, verificando in corso d'opera le quantità di tavole via via stimate e minimizzando di conseguenza il rischio di eccedere o scarseggiare.

### 2.3.6 Abbattimento e assortimentazione finale (a terra)

Prima dell'inizio degli abbattimenti, su ogni pianta martellata è stato riportato un numero progressivo, su due lati opposti del fusto (per essere visibile indipendentemente dalla direzione di caduta), anche al fine di tenere traccia del codice identificativo della posizione quando presente (per il sito A).

Le operazioni post abbattimento sono state portate avanti in serrata collaborazione e sincronismo con il lavoro dei segantini, evitando di ostacolarne lo svolgimento. Sulle piante appena abbattute e successivamente sramate (Figura 2.3.3) si è rapidamente verificata la coerenza dell'assortimentazione in piedi (attraverso controlli diametrici), sono state effettuate eventuali correzioni e necessarie integrazioni di ulteriori topi non “collocabili” prima dell'abbattimento (ad es. topi ricavabili da sezioni troppo alte). Su un campione di fusti (50 per il sito A e 32 per il sito B) sono stati infine misurati i diametri ad ogni metro per ricostruire il profilo accurato. Per preparare i fusti alla depezzatura sono state apposte tacche, con vernice spray, in corrispondenza delle sezioni di taglio considerando sempre un margine di sicurezza che tenesse conto degli scarti di lavorazione. Sui topi da sega risultanti è stato quindi riportato un numero identificativo dell'assortimento indicato per la successiva fase di segagione.



Figura 2.3.3 Sramatura

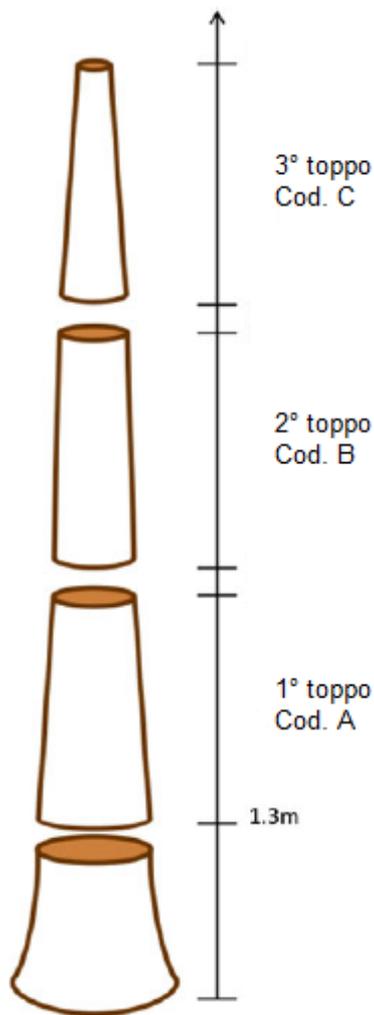


Figura 2.3.5 Codifica dei toppi



Figura 2.3.4 Sistemazione dei toppi in piazzale divisi per lunghezze.

(Le lunghezze dei toppi sono state decise in base alle lunghezze delle tavole da utilizzare nella classificazione del pino marittimo, vedi anche tabella 3.2.1)

### 2.3.7 Funzione di profilo per il pino marittimo di 40 anni di Pattada

Avendo investito nella misura accurata dei profili di fusti abbattuti è stato possibile approfondire la ricerca e sviluppare l'analisi di questo tipo di dati attraverso le cosiddette “funzioni di profilo”. Nello specifico si è adottato l'approccio recentemente sviluppato da Kublin et al. (2013a), particolarmente rigoroso ed interessante per l'analisi di rilievi di profili arborei. Il metodo si basa su un “modello regressivo B-spline ad effetti misti”. Gli autori hanno pubblicato il pacchetto di funzioni per l'ambiente R denominato “TapeR” (Kublin et al., 2013b). Questo include funzioni sia per la calibrazione del modello che per il suo impiego nelle stime. A complemento dei profili stimati il pacchetto consente anche di determinare l'accuratezza dei valori prodotti. Disponendo di tale modello è possibile procedere alla stima del numero di tavole ricavabili, con gradi di approssimazione decrescenti conoscendo i) solo il diametro a petto d'uomo, ii) diametro ed altezza totale e iii) diametro, altezza totale e almeno un diametro più in alto.

### 2.3.8 Attività in segheria

Dai tronchi processati in segheria sono stati ricavati gli assortimenti delle tavole per la classificazione (tabella 2.3.1) e quelle necessarie per la fabbricazione dei pannelli (circa 13 m<sup>3</sup>). Su tutte le tavole per la classificazione è stato riportato il codice identificativo (Figura 2.3.6) composto da una lettera (A, B o C che individua il toppo di provenienza come da figura 2.3.5) e da un numero progressivo. Il colore della scritta definisce la provenienza: rosso per il sito B e blu per il sito A.

Dimensioni (mm)			Numero di tavole		Volume (m <sup>3</sup> )	
spessore	larghezza	lunghezza	Prov 1	Prov 2	Prov 1	Prov 2
34	105	3200	140	140	1.73	1.73
48	155	3700	140	140	4.14	4.14
34	85	3200	100	100	1.01	1.01
53	180	4100	40	40	1.71	1.71
TOT			420	420	8.59	8.59

Tabella 2.3.1 Dimensioni e numero delle tavole per la classificazione



Figura 2.3.6 Codifica delle tavole

Gli schemi di taglio sono stati dettati principalmente dai diametri ridotti dei topi e dalle attrezzature a disposizione della segheria Carcangiu dove è avvenuta la segagione. Si è deciso per un primo passaggio sulla segatronchi ed un secondo sulla rifilatrice, come si può osservare in figura 2.3.7 dove i numeri indicano la sequenza dei tagli.

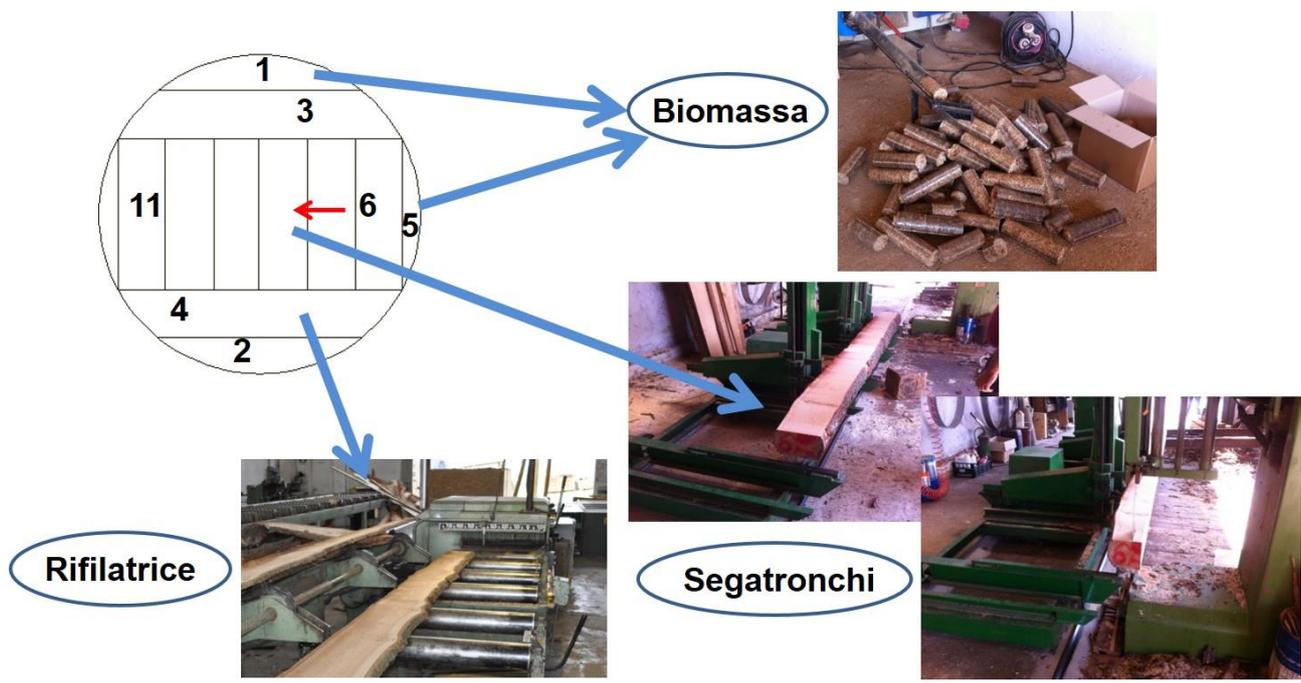


Figura 2.3.7 Ottimizzazione degli schemi di taglio

### 2.3.9 L'essiccazione.

Il materiale legnoso preparato nelle fasi precedenti della ricerca è stato essiccato presso la segheria Morandini (FI) Figura 2.3.8. Una volta conclusa questa operazione si è provveduto a preparare adeguatamente il materiale per il trasporto, mantenendo accuratamente separate le tavole destinate alle successive prove di laboratorio da quelle per la produzione di pannelli XLam.

Le prime sono state trasportate a Bressanone, presso la ditta MiCROTEC, per la valutazione qualitativa con uno scanner a raggi X, le altre a Pescara, presso la ditta AreaLegno per la realizzazione dei pannelli.



Figura 2.3.8 Tavole disposte in cataste per l'essiccazione.

## 2.4 Potenziale disponibile per uso strutturale (ed energetico)

La stima del potenziale per uso strutturale (ed energetico) è stata fatta attraverso una serie di simulazioni considerando individualmente, tra gli assortimenti richiesti per le prove di classificazione, i due appartenenti alle classi dimensionali estreme (55x190x4200 mm e 35x90x3200 mm) e, in aggiunta, l'assortimento inizialmente indicato per la produzione di pannelli (35x90x3200 mm). Si dispone quindi di una serie di stime, una per ciascun assortimento in ciascuna delle due provenienze. Le elaborazioni sono state effettuate usando il pacchetto "TapeR" congiuntamente all'algoritmo di caratterizzazione dello schema di taglio precedentemente descritti, considerando parametri noti quali spessore corteccia, strada della sega e margine di sicurezza. Tutte le stime sono presentate sotto forma di intervallo che include il valore più probabile del parametro considerato.

Dalle tabelle che seguono si osservano le significative differenze esistenti tra le due provenienze, dovute sostanzialmente alla diversa produttività stazionale, a parità di età. Ad una densità per ettaro pressoché identica (561 piante per ettaro) corrisponde una diversa organizzazione della struttura dimensionale dei popolamenti (area basimetrica e diametro medio di area basimetrica per le due provenienze "Sa mela de Supra" e "Sa mela de Sutta"). Questo aspetto è ben evidenziato dai grafici che illustrano, per ciascun assortimento considerato, il contributo in volume strutturale fornito da ciascuna classe diametrica (figure 2.4.1/2/3). Rispetto al volume utile, ossia calcolato a partire dalla classe diametrica da cui è possibile ottenere tronchi da sega capaci di fornire almeno due tavole dell'assortimento più piccolo, la provenienza "Sa mela de sutta" mostra potenzialità strutturali nettamente inferiori a cui corrisponde una proporzione energetica maggiore. In questo contesto, la carenza di diametri grandi si traduce in una minore opportunità di ottimizzare le sezioni di testa con quote di utilizzazione tendenzialmente inferiori. In generale, in entrambe le località, la quota strutturale si attesta comunque su percentuali relativamente basse (tabella 2.4.1).

Provenienza	Volume (classi 25-50) [m <sup>3</sup> ha <sup>-1</sup> ]	Tipo assort	N tavole [n ha <sup>-1</sup> ]	Volume tavole [m <sup>3</sup> ha <sup>-1</sup> ]	Potenziale strutturale [% vol]	Potenziale per energia [% vol]
Sa mela de sutta	151.8	<i>piccolo</i>	2006-3083	20.2-31.1	13.3-20.5	79.5-86.7
		<i>grande</i>	61-81	2.7-3.6	1.8-2.3	97.7-98.2
		<i>pannello</i>	898-1082	12.3-14.8	8.1-9.7	90.3-91.9
Sa mela de supra	368.0	<i>piccolo</i>	7668-10703	77.3-107.9	21.0-29.3	70.7-79.0
		<i>grande</i>	440-576	19.3-25.3	5.2-6.9	93.1-94.8
		<i>pannello</i>	4438-5558	60.6-75.9	16.5-20.6	79.4-83.5

Tabella 2.4.1 Potenziale strutturale ed energetico delle due zone di prelievo

La tabella 2.4.2 mostra, per ciascun assortimento, una stima della ripartizione del potenziale energetico tra la quota potenziale ricavabile in segheria (scarti di lavorazione) e la quota potenziale non strutturale di fusto.

Provenienza	Tipo	Potenziale per energia [% volume]	
		segheria	bosco
Sa mela de sutta	<i>piccolo</i>	14.7-18.7	64.9-68.0
	<i>grande</i>	1.7-2.2	95.9-96.0
	<i>pannello</i>	7.2-10.3	83.0-81.6
Sa mela de supra	<i>piccolo</i>	18.1-23.7	52.6-55.3
	<i>grande</i>	5.1-6.6	88.0-88.1
	<i>pannello</i>	15.5-22.3	63.9-61.3

Tabella 2.4.2

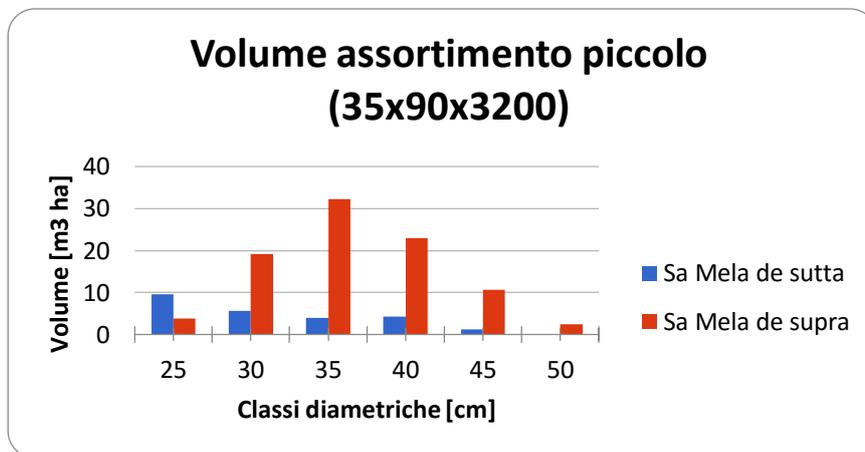


Figura 2.4.1 Volumi ricavabili per l'assortimento piccolo

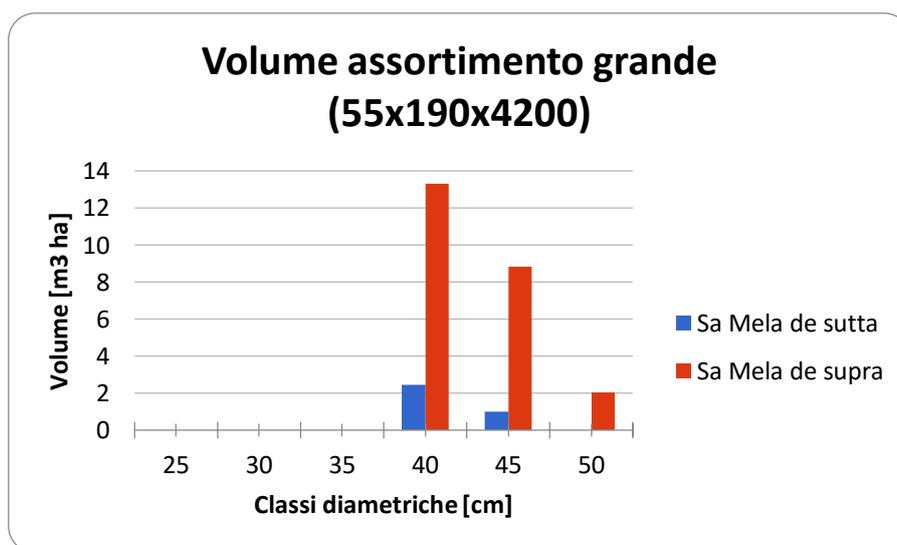


Figura 2.4.2 Volumi ricavabili per l'assortimento grande

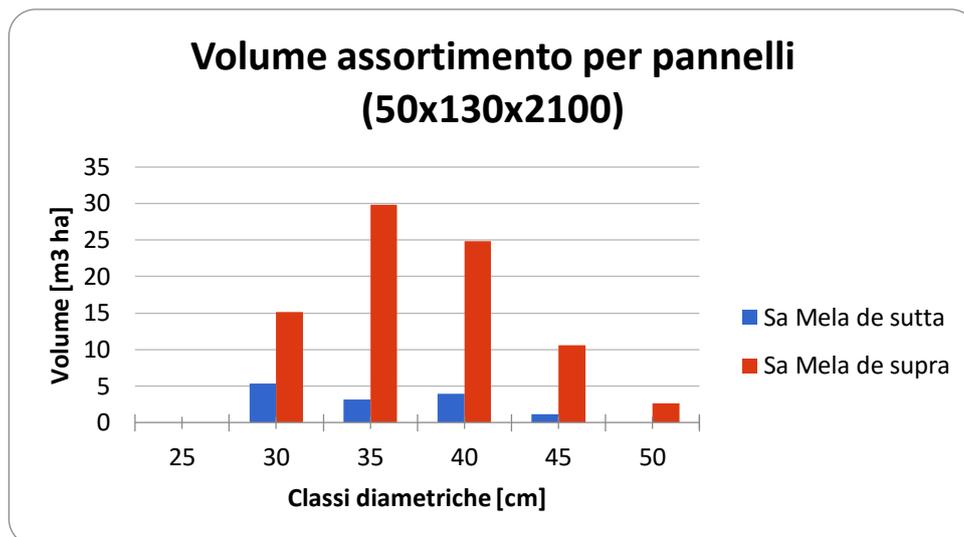


Figura 2.4.3 Volumi ricavabili per l'assortimento pannelli

Si riportano infine (tabella 2.4.3) le rese divise per zone di provenienza e per dimensione del segato richiesto. Per entrambe le provenienze nel caso si vogliano ricavare solo tavole per la realizzazione di pannelli xlam la resa si attesta intorno al 50 %.

Provenienza	Assortimento	Vol tondo [m³ ha <sup>-1</sup> ]	Vol tav [m³ ha <sup>-1</sup> ]	Resa
Sa mela de sutta	<i>piccolo</i>	50.28	24.52	0.49
	<i>grande</i>	6.15	3.43	0.56
	<i>pannello</i>	<b>27.15</b>	<b>13.71</b>	<b>0.50</b>
Sa mela de supra	<i>piccolo</i>	169.14	91.34	0.54
	<i>grande</i>	44.08	24.16	0.55
	<i>pannello</i>	<b>136.38</b>	<b>69.82</b>	<b>0.51</b>
<b>Totali e medie</b>		433.18	226.98	0.52

Tabella 2.4.3 Rese da tondo a segato per le due provenienze

#### 2.4.1 Bibliografia

Kublin E., Breidenbach J., 2013 - TapeR - Flexible tree taper curves based on semiparametric mixed models. R-package version 0.3.0.

Available on CRAN: <http://cran.r-project.org/web/packages/TapeR/>

Kublin E., Breidenbach J., Kaendler G., 2013 - A flexible stem taper and volume prediction method based on mixed-effects B-spline regression. *European Journal of Forest Research*, 132: 983-997.

Scotti R., Mura M., Piredda I., Campus S., Lovreglio R., 2014 - Gestione forestale sostenibile in Sardegna: dal legno al legname, le funzioni di profilo. *Atti del Secondo Congresso Internazionale di Selvicoltura*, Firenze, 26-29 Novembre 2014, Vol II, 1056-1061.

## 3 La classificazione

### 3.1 Introduzione

Il legno è un materiale di origine biologica e presentando un'alta variabilità intrinseca necessita di essere qualificato affinché possa diventare un prodotto idoneo all'uso strutturale. Questa classificazione deve essere condotta da personale esperto ed adeguatamente formato, oppure da macchine certificate secondo rigorosi protocolli sperimentali. L'essere classificato "secondo la resistenza" è un requisito obbligatorio per l'uso strutturale del legname, questo è sancito dalle Norme Tecniche per le Costruzioni (NTC, 2008) e dal Regolamento Prodotti da Costruzione dell'UE (CPR 305/2011). Questo requisito riguarda sia il legno massiccio che viene utilizzato in ambito strutturale tale e quale, sia il materiale che viene invece impiegato per la realizzazione di prodotti trasformati, siano essi ad esempio semplici travi lamellari o prodotti più complessi come pannelli di tavole.

Il processo di classificazione (secondo la resistenza) seleziona ogni singolo elemento di legno che viene assegnato ad una classe (o categoria) strutturale, così da attribuirgli valori affidabili di resistenza e rigidità. Le caratteristiche fisiche e meccaniche del legno presentano una elevata variabilità naturale (legata alle diverse specie legnose, alle provenienze geografiche, alle condizioni pedoclimatiche di crescita degli alberi, all'età delle piante ecc.). Le regole e i criteri per la selezione devono essere perciò oggettivi e ripetibili, al fine di soddisfare al meglio le esigenze progettuali ed i requisiti di sicurezza richiesti alle strutture portanti. Il produttore (o trasformatore) ha la responsabilità di assegnare i valori meccanici al legname, ovvero è colui che trasforma il "legno" in "legname da costruzione" e dovrà assumersene la responsabilità.

Per quanto riguarda il mondo delle costruzioni in legno l'Italia ha attraversato un lungo periodo di incertezze per quel che riguarda il quadro normativo applicabile, con un susseguirsi di Ordinanze, Norme e Circolari Ministeriali.

Dal luglio del 2009 le Norme Tecniche per le Costruzioni, già emanate con DM del 14.01.08, insieme alla Circolare esplicativa n.617 del 2 febbraio 2009, sono diventate l'unico riferimento normativo applicabile dai progettisti italiani. Questo decreto ha stabilito una par condicio tra i materiali da costruzione, definendo per ognuno di essi specifici iter di certificazione così come prescritto all'interno del par. 11.1 ("Materiali e prodotti ad uso strutturale") delle stesse NTC.

La classificazione secondo la resistenza del legname a sezione rettangolare (cioè con smusso inferiore a 1/3 delle dimensioni della sezione), a livello europeo fa riferimento alla EN 14081 che si divide in quattro parti: la 14081-1 indica i requisiti generali sia per quanto riguarda la classificazione a vista che quella a macchina (spiegate nel dettaglio più avanti), le 14081-2/4 forniscono il quadro di

riferimento nello specifico per la classificazione a macchina. Riferendosi alla classificazione a vista, ogni nazione ha recepito all'interno delle proprie norme le indicazioni generali contenute nella EN 14081, sviluppando specifiche regole di classificazione che consentono di attribuire ad un singolo elemento strutturale una determinata categoria qualitativa. La norma EN 1912 riporta poi l'assegnazione di queste categorie qualitative alle classi di resistenza, ovvero gruppi di legname con proprietà fisico-meccaniche definite dalla EN 338. L'assegnazione ad una classe di resistenza contenuta nella norma EN 1912 costituisce un requisito essenziale per la marcatura CE del legname a sezione rettangolare; in alternativa, il produttore può disporre di un rapporto di prova specifico redatto in conformità alla EN 384.

Per la progettazione strutturale è necessario avere un profilo di resistenza che descriva le proprietà meccaniche del materiale che si vuole utilizzare. I criteri di classificazione garantiscono all'elemento prestazioni meccaniche minime determinate statisticamente, senza necessità di ulteriori prove sperimentali e verifiche.

Il sistema di classi di resistenza, che permette di realizzare un collegamento tra le proprietà del legno e i valori di resistenza, è stabilito dalla norma UNI EN 338, la quale definisce i valori caratteristici delle proprietà di resistenza, di rigidità e di massa volumica per ciascuna classe. Quindi, per assegnare ad una classe di resistenza un elemento di legno, è necessario avere i valori di tre caratteristiche: la resistenza a flessione (Modulus of Rupture: MOR), il modulo di elasticità (Modulus Of Elasticity: MOE) e la massa volumica (MV). Ogni tipo di legno può essere assegnato ad una classe di resistenza se i suoi valori caratteristici risultano essere superiori ai valori corrispondenti alla rispettiva classe.

La norma UNI EN 338 attualmente stabilisce dodici classi di resistenza per le conifere e otto classi per le latifoglie (Figura 3.1.1). Il codice della classe è designato da una lettera, che identifica la specie come conifera "C" o come latifoglia "D", e da un numero, che si riferisce al valore caratteristico della resistenza a flessione (in MPa o N/mm<sup>2</sup>).

Secondo quanto riportato nella norma UNI EN 384, il valore caratteristico, identificato dalla lettera k, è il valore del frattile della distribuzione statistica assunta da una proprietà meccanica del legno e nel caso delle caratteristiche meccaniche questo è rappresentato dal 5° percentile.

		Softwood species													Hardwood species						
		C14	C16	C18	C20	C22	C24	C27	C30	C35	C40	C45	C50	D18	D24	D30	D35	D40	D50	D60	D70
<b>Strength properties (in N/mm<sup>2</sup>)</b>																					
Bending	$f_{m,k}$	14	16	18	20	22	24	27	30	35	40	45	50	18	24	30	35	40	50	60	70
Tension parallel	$f_{t,0,k}$	8	10	11	12	13	14	16	18	21	24	27	30	11	14	18	21	24	30	36	42
Tension perpendicular	$f_{t,90,k}$	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6
Compression parallel	$f_{c,0,k}$	16	17	18	19	20	21	22	23	25	26	27	29	18	21	23	25	26	29	32	34
Compression perpendicular	$f_{c,90,k}$	2,0	2,2	2,2	2,3	2,4	2,5	2,6	2,7	2,8	2,9	3,1	3,2	7,5	7,8	8,0	8,1	8,3	9,3	10,5	13,5
Shear	$f_{v,k}$	3,0	3,2	3,4	3,6	3,8	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0	3,4	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0	4,5	5,0
<b>Stiffness properties (in kN/mm<sup>2</sup>)</b>																					
Mean modulus of elasticity parallel	$E_{0,mean}$	7	8	9	9,5	10	11	11,5	12	13	14	15	16	9,5	10	11	12	13	14	17	20
5 % modulus of elasticity parallel	$E_{0,05}$	4,7	5,4	6,0	6,4	6,7	7,4	7,7	8,0	8,7	9,4	10,0	10,7	8	8,5	9,2	10,1	10,9	11,8	14,3	16,8
Mean modulus of elasticity perpendicular	$E_{90,mean}$	0,23	0,27	0,30	0,32	0,33	0,37	0,38	0,40	0,43	0,47	0,50	0,53	0,63	0,67	0,73	0,80	0,86	0,93	1,13	1,33
Mean shear modulus	$G_{mean}$	0,44	0,5	0,56	0,59	0,63	0,69	0,72	0,75	0,81	0,88	0,94	1,00	0,59	0,62	0,69	0,75	0,81	0,88	1,06	1,25
<b>Density (in kg/m<sup>3</sup>)</b>																					
Density	$\rho_k$	290	310	320	330	340	350	370	380	400	420	440	460	475	485	530	540	550	620	700	900
Mean density	$\rho_{mean}$	350	370	380	390	410	420	450	460	480	500	520	550	570	580	640	650	660	750	840	1080
<p>NOTE 1 Values given above for tension strength, compression strength, shear strength, 5 % modulus of elasticity, mean modulus of elasticity perpendicular to grain and mean shear modulus, have been calculated using the equations given in Annex A.</p> <p>NOTE 2 The tabulated properties are compatible with timber at a moisture content consistent with a temperature of 20 °C and a relative humidity of 65 %.</p> <p>NOTE 3 Timber conforming to classes C45 and C50 may not be readily available.</p> <p>NOTE 4 Characteristic values for shear strength are given for timber without fissures, according to EN 408. The effect of fissures should be covered in design codes.</p>																					

Figura 3.1.1: Classi EN 338

Per assegnare un campione alla classe di resistenza riportata nella UNI EN 338, il valore caratteristico della resistenza e della massa volumica deve essere uguale o superiore al valore indicato nella classe, mentre il valore caratteristico medio del MOE ( $E_{mean}$ ) deve essere uguale o superiore del 95% del valore indicato. I valori di tutte le proprietà sono riferiti a provini aventi umidità tale da risultare in equilibrio con ambiente ad una temperatura di 20 °C e un'umidità relativa del 65%.

Uno degli aspetti positivi della classificazione secondo la resistenza del legno per uso strutturale è l'ottimizzazione del suo impiego, ovvero la possibilità di separare il legname in base alla resistenza e utilizzarlo in parti della struttura diversamente sollecitate (Figura 3.1.2). Inoltre il riferimento univoco attraverso un codice di resistenza è di facile utilizzo da parte dei progettisti, portando così all'aumento della diffusione del legno come materiale per uso strutturale.

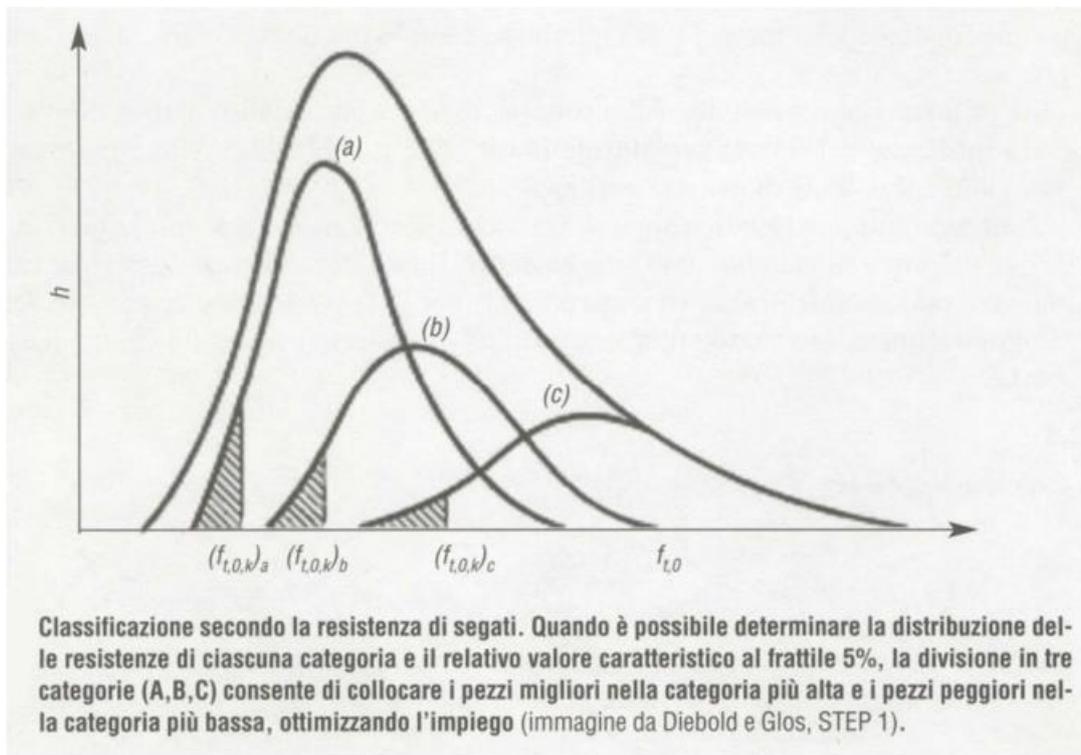


Figura 3.1.2: Divisione del materiale in classi

Secondo la UNI EN 14081-1, esistono due metodi per la classificazione secondo la resistenza: “classificazione a vista”, conformemente alle regole indicate in apposite norme nazionali e armonizzate, e la “classificazione a macchina”, tramite metodi non distruttivi, in base alle prescrizioni riportate nella stessa norma. La suddetta norma contiene alcuni requisiti generali per la classificazione:

- la classificazione rimane valida per lavorazioni che asportano fino a 5 mm di materiale per segati di dimensione minore o uguale a 100 mm e fino a 10 mm per segati di dimensioni superiori. Se le lavorazioni eccedono tali limiti, l'elemento deve essere riclassificato;
- prima della classificazione deve essere eseguita la misura dell'umidità, con metodo elettrico secondo la UNI EN 13183-2;
- le regole di classificazione a vista devono essere conformi all'allegato A della 14081-1, che fissa i limiti per le varie caratteristiche;
- il classificatore deve essere professionalmente qualificato e la sua competenza deve essere verificata almeno annualmente.

Il progettista che vuole utilizzare il legno nelle strutture ha quindi a disposizione, tramite la EN338, per ogni classe di resistenza un profilo prestazionale rappresentato da un insieme di valori medi e

caratteristici con i quali può dimensionare gli elementi strutturali. Le tipologie di legname sono vaste ed è quindi evidente che non possano essere tutte comprese all'interno della EN1912. Molti lavori sono stati dedicati di recente alla classificazione di nuove specie con lo scopo di inserirle all'interno delle normative vigenti per consentirne l'uso strutturale.

Il progetto EDENSO descritto in questa tesi, ha come primo obiettivo quello di classificare il Pino Marittimo e renderlo utilizzabile nelle costruzioni.

Per quanto riguarda la classificazione del materiale questo progetto presenta tre diverse fasi. Una fase di pre-classificazione che ha lo scopo di indagare se sia possibile sviluppare un metodo valido per selezionare il materiale quando è ancora sotto forma di toppo. Una seconda fase dove si sono utilizzate due macchine classificatrici: Il Viscan ed il Golden Eye (entrambe della Microtec) con lo scopo di sviluppare un settaggio adatto al Pino Marittimo ed una terza dove si sono sviluppate le regole per la classificazione a vista.

## 3.2 La pre-classificazione

### 3.2.1 L'importanza della pre-classificazione

Se si considera l'energia necessaria ai vari processi che compongono la filiera del legno strutturale, dal bosco all'utilizzatore finale, appare subito evidente con l'ottimizzazione di essi sia importante per mantenere sostenibile l'uso di questo materiale. Il passaggio in segheria e soprattutto l'essiccazione sono tra i processi più energivori di tutta la filiera se includiamo anche il trasporto verso i luoghi dove avvengono queste lavorazioni. La ricerca di un metodo che ci consenta di portare fino all'essiccazione solo il materiale utilizzabile per impieghi strutturali appare subito molto importante. La qualità del legno strutturale è molto variabile e la possibilità di selezionare il materiale nelle prime fasi della filiera migliora l'efficienza della filiera stessa. Si va quindi alla ricerca di quei parametri che possano essere facilmente misurabili e che possano essere usati per selezionare il materiale idoneo. Per il legno utilizzato nelle costruzioni sono discriminanti parametri come resistenza a flessione o trazione, il modulo di elasticità longitudinale e la densità. Negli ultimi anni si è iniziato a classificare il legno già prima di essere trasformato in tavole cioè già dalla pianta in piedi. Recenti studi hanno dimostrato che una pre-classificazione sulla pianta in piedi non è attendibile - se si ricerca una correlazione con le tavole essiccate si trova un  $Rsq=0,17$  (Rais at al.2012). Sembra quindi ragionevole indagare il materiale a partire dal tronco o dal toppe. Dato che il processo di essiccazione può richiedere fino al 50% dell'energia spesa nel passaggio da tronco alla tavola (Edlund et al. 2006) è evidente il vantaggio che si ricaverebbe nel portare fino a questo passaggio solo il materiale di buona qualità.

Se viene utilizzato un metodo non distruttivo sui tronchi o sui toppe per predire le caratteristiche meccaniche delle tavole essiccate che se ne ricaveranno, si ottiene un importante risparmio di tempo e denaro (Jang 2000). Le proprietà fisiche e meccaniche possono essere predette con strumenti acustici. Misurare il modulo di elasticità dinamico (MOEdyn) del legno è ormai un metodo conosciuto e molto utilizzato nella classificazione a macchina. La misura del MOEdyn tramite le frequenze proprie del materiale non è influenzata dall'umidità del legno se questo si trova la di sopra del punto

di saturazione delle fibre, ovvero allo stato fresco (Unterwiser e Shickhofer 2007), mentre vengono influenzate dal contenuto di umidità le misure fatte per mezzo di onde ultrasoniche. Quindi le misure del MOEdyn effettuate tramite l'analisi delle frequenze proprie è sicuramente interessante e adatto allo scopo (Ross et al. 1997; Tsehaye et al. 2000; Yin et al. 2000). Gli studi fatti sulle piante in piedi non hanno portato ad importanti risultati. Molti lavori fatti sui tronchi mostrano invece risultati interessanti (Carter et al. 2006; Rais et al. 2012).

I suddetti lavori hanno esaminato le correlazioni tra i topi e le tavole da essi ricavate. Ad esempio Ross et al. (1997) hanno ottenuto una regressione lineare tra i MOEdyn sui topi e quelle sulle tavole con un  $Rsq=0.82$  per l'abete bianco e  $Rsq=0.50$  per la Douglasia.

In questo progetto è stata indagata la possibilità di usare questi metodi per pre-classificare il pino marittimo già dai topi disposti in piazzale. Le domande a cui si è cercato di rispondere erano le seguenti:

- che tipo di correlazione si ha tra i MOEdyn misurati sui topi e quelli misurati sulle tavole fresche, tra le tavole fresche e quelle essiccate e tra i topi e le tavole già essiccate.
- Come questo tipo di classificazione potesse migliorare la resa del segato essiccato.

### 3.2.2 Materiale e metodo

Il materiale utilizzato è quello descritto nei capitoli precedenti e cioè i topi di pino marittimo prelevato da due zone differenti e le tavole da essi ricavate. Gli strumenti utilizzati sono il Director HM200 visibile in figura 3.2.2/3/4. ed il Viscan-Portable della Microtec visibile in figura 3.2.1



Figura 3.2.3 Director HM200



Figura 3.2.1 ViSCAN-Portable



Figura 3.2.2 Utilizzo del Director



Figura 3.2.4 Display Director

Lo strumento acustico DIRECTOR HM200 è stato sviluppato da Carter Holt Harvey in Nuova Zelanda. Specifiche tecniche ed esempi di uso si possono trovare alla <http://www.fibregen.com> facendo riferimento alle schede 'Prodotti'. Il Director HM200 fornisce un mezzo per selezionare il legno secondo le sue proprietà non visibili sia esso in forma di tronco o topo che in forma di tavole. Un tronco o topo può essere valutato da una persona in meno di 30s. Fondamentalmente lo strumento misura come il tronco entra in risonanza quando è colpito da un martello. Il riverbero acustico dell'impulso del martello si comporta come un'onda piana che viaggia avanti ed indietro lungo la lunghezza del tronco, ed amplificando il segnale man mano che esso decade, è possibile osservare molti passaggi, in alcuni casi più di cento riflessioni (Harris et al. 2002). L'accelerometro del Director, che viene tenuto a contatto con l'estremità del tronco dall'operatore durante la misurazione, rileva la

velocità con la quale l'onda si propaga. Lo strumento e il suo funzionamento sono mostrati in Fig. 3.2.5

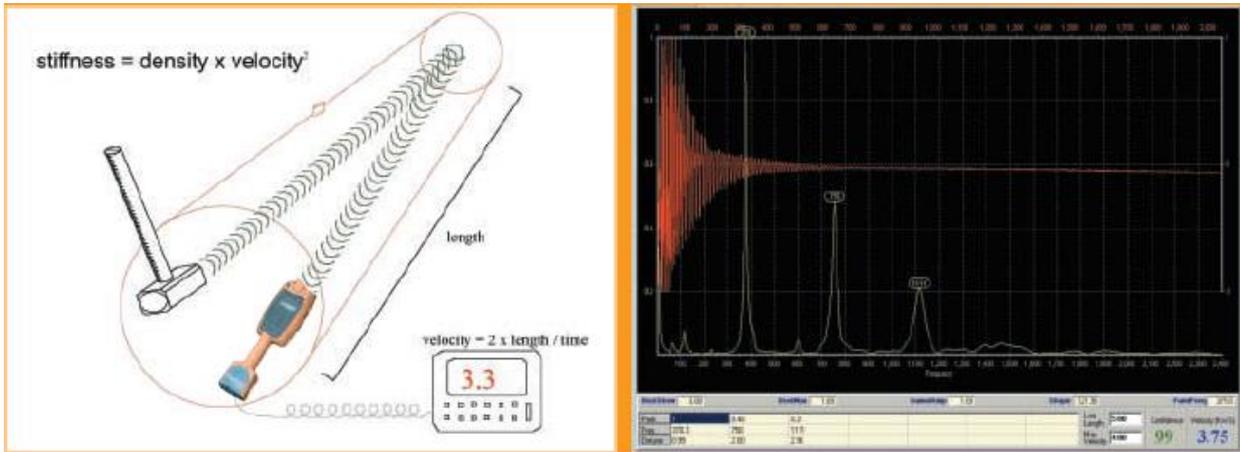


Figura 3.2.5: principio di funzionamento del Director

Conoscendo la frequenza fondamentale (f) ed il fatto che la sua lunghezza d'onda ( $\lambda$ ) è il doppio della lunghezza del tronco (L) cioè  $\lambda=2L$ , la velocità dell'onda è presto calcolata

$$V = f\lambda = 2Lf$$

E per la n.esima armonica

$$V = f_n \lambda_n = (2L/(n))f_n$$

In pratica la velocità riportata dal Director HM200 deriva dalla seconda frequenza armonica.

Il MOEdyn è calcolato dalla velocità nominale al tempo della misura usando l'equazione

$$MOEdyn = \rho V^2 = \text{densità} \times \text{velocità dell'onda al quadrato}$$

Il sistema VISCAN misura, attraverso l'interferometro laser senza contatto, la frequenza delle vibrazioni indotte sul materiale da una percussione longitudinale. In seguito, attraverso equazioni statistiche<sup>8</sup>, il programma, restituisce lo spettro delle frequenze (Hz), dal quale è estratto il primo picco massimo (Figura 3.2.6).

Quest'ultimo è il valore considerato nelle successive elaborazioni matematiche per ottenere il modulo di elasticità dinamico, secondo l'equazione

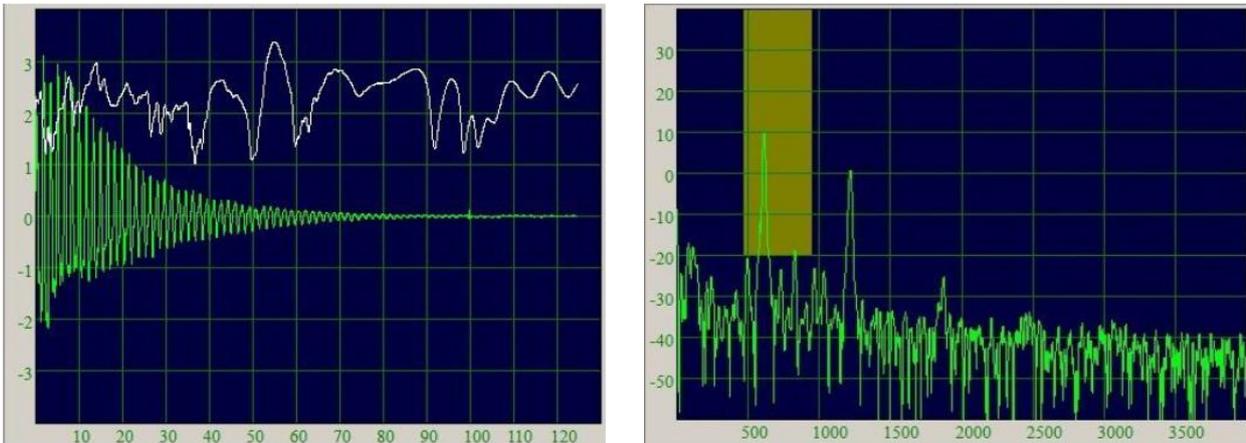


Figura 3.2.6: Viscan - spettro delle frequenze

$$E_{dyn} (N/mm^2) = 4l^2 f^2 MV$$

l: lunghezza della tavola

f: frequenza naturale

MV: massa volumica

La MV è determinata dal rapporto tra il peso (misurato con l'utilizzo di una bilancia) e il volume della tavola:

$$MV = (kg/m^3) = \text{peso}/bhl$$

b: larghezza della tavola

h: spessore della tavola

Il modulo elastico dinamico costituisce la proprietà indicatrice dello strumento (Indicating Propert, IP), parametro con il quale è possibile poi effettuare la classificazione del materiale da parte della macchina. L'IP dello strumento deve essere strettamente collegato con una caratteristica meccanica del materiale (grade determining property) e per la verifica di questa correlazione sono necessarie specifiche prove sul materiale.

L'innovazione della nuova macchina portatile ViSCAN-Portable risiede nel aver trasferito la tecnologia del sistema ViSCAN, in uno strumento portatile di dimensioni ridotte (30x40cm), nel quale è stato inserito, in aggiunta all'interferometro, un telemetro e una linea Wi-Fi. Il telemetro consente di posizionare l'elemento alla corretta distanza dalla macchina classificatrice, in modo da

avere la migliore distanza focale per effettuare la lettura della misura. In questo caso è stato impostato preventivamente ad una distanza di 30 cm.

Nell'istante in cui viene attivato, il telemetro emette un raggio laser e un cronometro ad alta precisione misura il tempo intercorso tra l'emissione ed il ritorno del raggio riflesso. In questo modo, indirizzando correttamente il raggio, è possibile misurare la distanza dello strumento dall'elemento ligneo.

Prima di effettuare le misure, quindi, occorre posizionare l'elemento alla corretta distanza dallo strumento facendo in modo che le proiezioni dei due laser, dell'interferometro e del telemetro, siano sovrapposte. Inoltre è necessario verificare che la qualità del segnale sia sufficientemente alta. Infine si applica, ad un'estremità dell'elemento, una percussione, con un martello, tale che questa venga registrata all'estremità opposta dalla macchina.

### 3.2.3 Le misure sui topi e sulle tavole.

Sia le misure fatte sui topi con il Director HM200 che quelle fatte sulle tavole fresche con il ViSCAN-Portable si sono svolte negli spazi della segheria Carcangiu dove è avvenuta la segazione dei topi.

Sono state effettuate le misure delle velocità su 120 topi ricavati dal taglio delle piante. I topi erano stati codificati al momento del taglio per mantenere la tracciabilità del materiale lungo tutto il processo di filiera. Il codice indicava la provenienza (tramite il colore), il numero della pianta e la posizione del tronco nel topo (Figura 3.2.7 e tabella 3.2.1) Per ogni topo sono state prese le misure delle circonferenze in tre punti diversi e la lunghezza totale.



Figura 3.2.7: Topi codificati

Provenienza	Numero pianta	Posizione topo	Colore	Esempio Codice
Sa mela e sutta	1 - 140	A -B- C	Rosso <b>R</b>	<b>R140A</b>
Sa mela e supra	1 - 200	A -B- C	Blu <b>B</b>	<b>B087C</b>

Tabella 3.2.1 Codifica dei topi

Prima della misurazione con il ViSCAN-Portable sulle tavole fresche, si è provveduto a:

- codificare ogni pezzo: il codice scritto in rosso o blu a seconda della provenienza (vedi tabella 3.2.1) da una lettera dell'alfabeto, denominante la posizione del toppe nel tronco e da un numero progressivo di tre cifre.
- misurare le tre dimensioni del segato: spessore, larghezza e lunghezza.
- pesare ogni pezzo con l'utilizzo di una bilancia con l'accuratezza dello 0,1%.

In aggiunta, sono stati registrati i seguenti dati:

- temperatura del legno, generalmente 20 °C;
- umidità del legno, per il legno fresco si è impostata al 30%.

Una volta registrate queste misure, si è proceduto alla misurazione di ogni singolo pezzo con ViSCAN-Portable, secondo quanto indicato nella descrizione della macchina.

### 3.2.3 Analisi dei dati e conclusioni.

Si è cercata una correlazione tra le velocità misurate con il Director HM200 e quelle misurate con il ViSCAN-Portable, sulle tavole fresche e su quelle essiccate. Si è poi proceduto a confrontare la velocità del Director direttamente con la resistenza ed il modulo elastico ottenuto con la prova di flessione. Nelle figure 3.2.8 e 3.2.9 si possono osservare le distribuzioni delle velocità nei toppe e nelle tavole. Nella figura 3.2.12 si può osservare la correlazione tra le velocità misurate sui toppe e quelle misurate sulle tavole fresche. Con un  $R^2 = 0.39$  si può pensare, perfezionando il metodo di misura di poter selezionare i toppe individuando magari una velocità minima. Nelle figure 3.2.10 e 3.2.11 si può osservare la correlazione tra le velocità misurate sui toppe ed i moduli elastici misurati sulle tavole fresche ed essiccate (per entrambe  $R^2 = 0.26$ ). Si può quindi notare che nel caso degli MOEdyn la correlazione si indebolisce. Nelle figure 3.2.13 e 3.2.14 sono illustrate le correlazioni tra le velocità misurate sui toppe con il Director e le caratteristiche meccaniche ottenute con la prova di flessione. Nel caso del confronto con il MOR ottenuto con le prove di flessione, con un  $R^2 = 0.04$ , possiamo affermare che non vi è nessuna correlazione. Alla luce dei dati sperimentali ottenuti si può affermare che, al contrario di quanto visto in letteratura, per il pino marittimo sardo con la sola lettura della velocità ricavate sui tronchi con il Director HM200 non si riescono a selezionare i toppe dai quali produrre solo tavole di buona qualità. La correlazione potrebbe sicuramente migliorare misurando il MOEdyn direttamente sui toppe (Ross et al.1997).

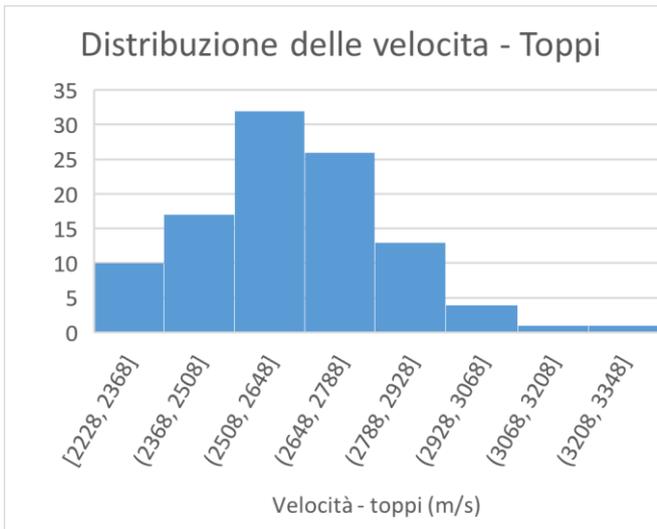


Figura 3.2.8 Distribuzione delle velocità DIRECTOR HM

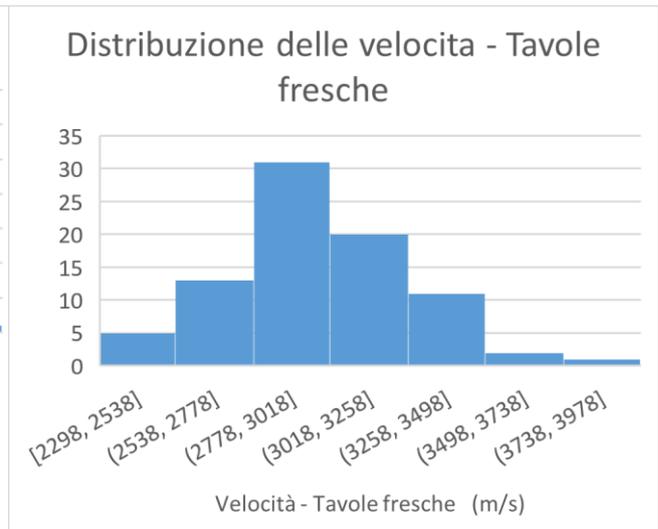


Figura 3.2.9 Distribuzione delle velocità VISCAN

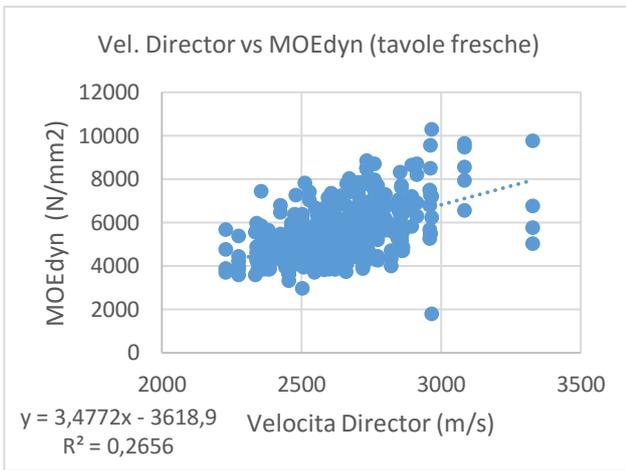


Figura 3.2.10 Velocità Director vs MOE dyn - tavole fresche

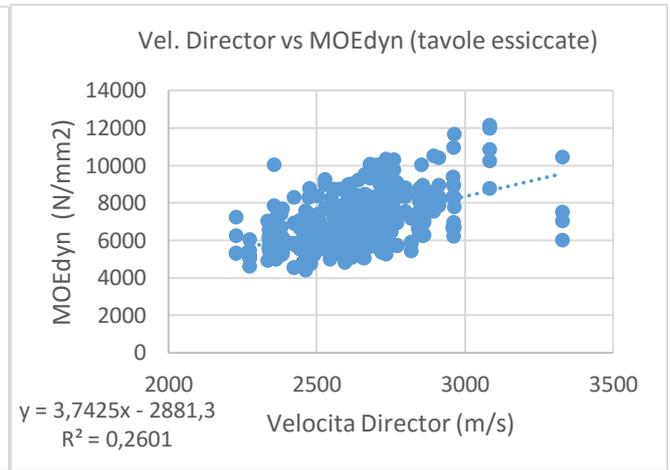


Figura 3.2.11 Velocità Director vs MOE dyn - tavole essiccate

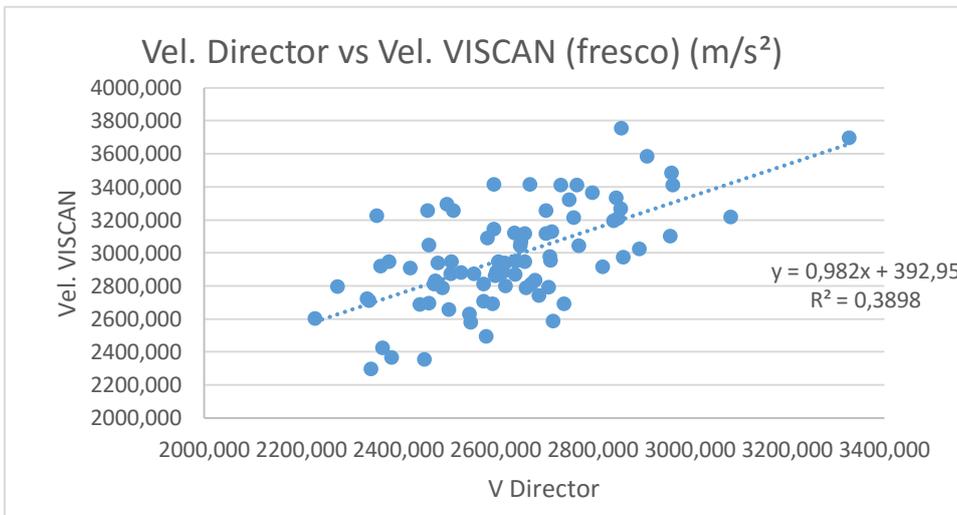


Figura 3.2.12 Correlazione tra velocità

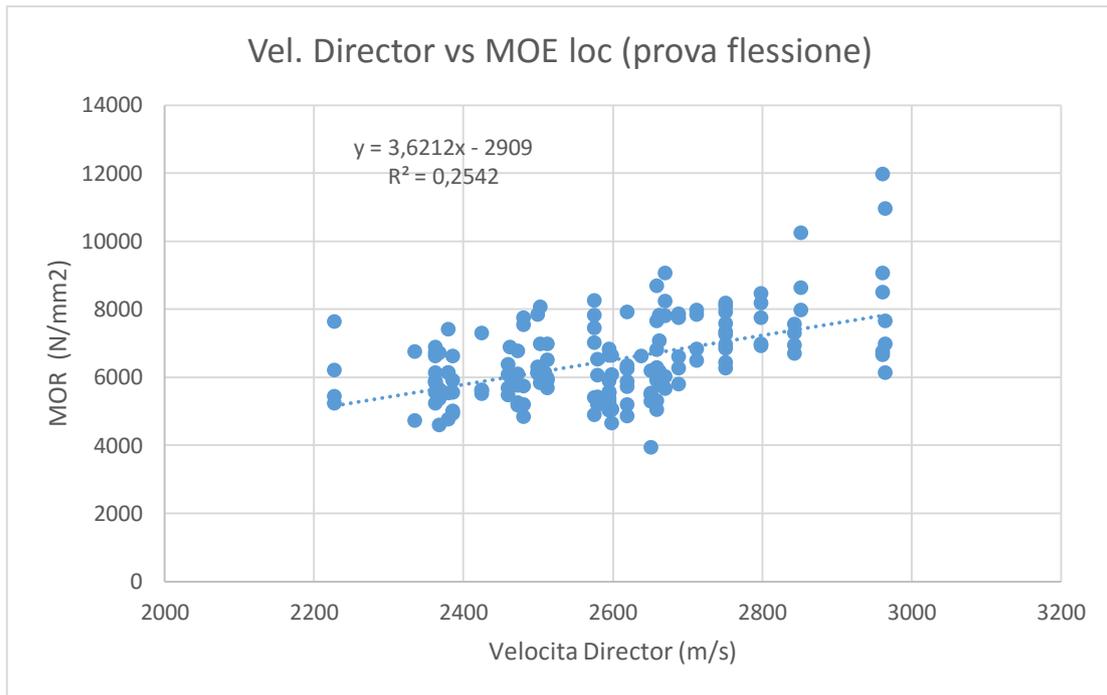


Figura 3.2.8 Velocita Director vs MOE loc –( prova flessione)

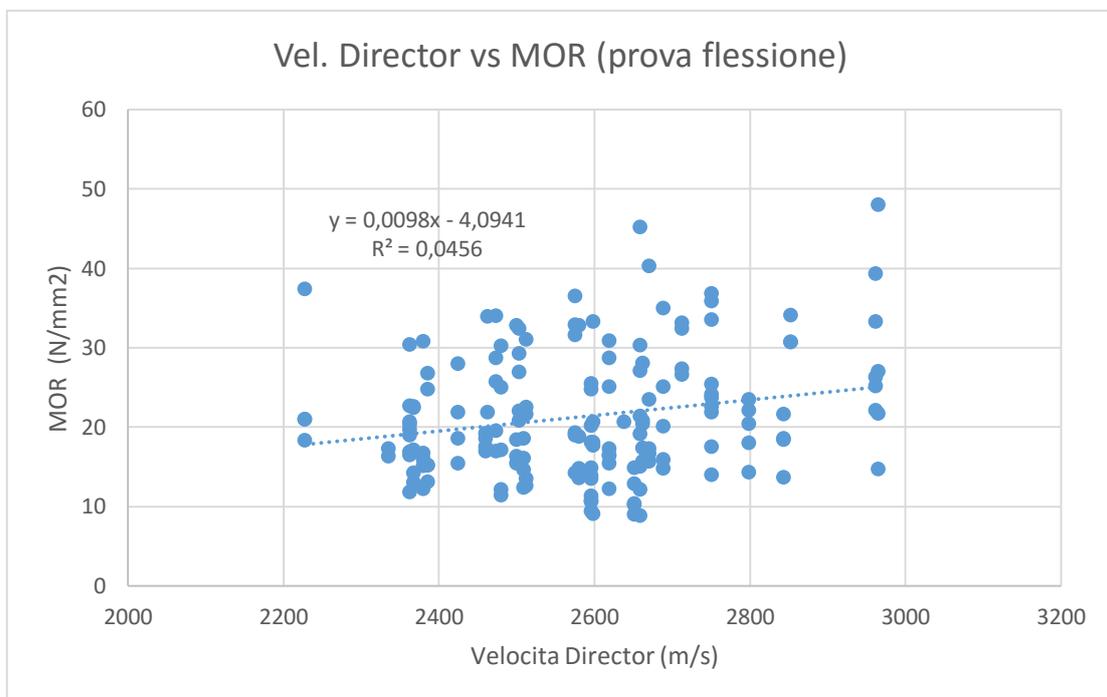


Figura 3.2.9 Velocità Director vs MOR –(prova flessione)

### 3.2.5 Bibliografia.

- Edlund J, Lindström H, Nilsson F, Reale M (2006) Modulus of elasticity of Norway spruce saw logs vs. structural lumber grade. *Holz Roh- Werkst* 64:273–279
- Jang SS (2000) Evaluation of lumber properties by applying stress waves to larch logs grown in Korea. *Forest Prod J* 50:44–48
- Unterwieser H, Schickhofer G (2007) Pre-grading of sawn timber in green condition. In: Proceedings of Conference of COST Action E53, 15–17 Oct, Warsaw, Poland, 2007, pp 161–166
- Ross RJ, McDonald KA, Green DW, Schad KC (1997) Relationship between log and lumber modulus of elasticity. *Forest Prod J* 47:89–92
- Yin Y, Jiang X, Wang L, Bian M (2011) Predicting wood quality of green logs by resonance vibration and stress wave in plantationgrown *Populus X euramericana*. *Forest Prod J* 61:136–142
- Tsehaye A, Buchanan AH, Walker JCF (2000) Sorting of logs using acoustics. *Wood Sci Technol* 34:337–344
- Carter P, Chauhan S, Walker J (2006) Sorting logs and lumber for stiffness using Director HM200. *Wood Fiber Sci* 38:49–54
- Andreas Rais • Hans Pretzsch • Jan-Willem G. van de Kuilen. Roundwood pre-grading with longitudinal acoustic waves for production of structural boards.

### 3.3 La classificazione a vista

#### 3.3.1 Introduzione

La classificazione a vista è il processo di individuazione di tutti quei difetti (dimensione dei nodi, presenza di lesioni e fessurazioni, inclinazione della fibratura e ampiezza degli anelli di accrescimento) che possono ridurre le prestazioni meccaniche dell'elemento ligneo che si vuole classificare. Questi difetti individuabili a occhio nudo vengono misurati dal classificatore con l'ausilio di semplici strumenti di misura.

Sulla base di specifiche prescrizioni normative viene individuata la Categoria che viene definita in relazione alla qualità dell'elemento con riferimento alla specie legnosa e alla provenienza geografica. Al legname appartenente a una determinata categoria, specie e provenienza, può essere assegnato uno specifico profilo resistente, utilizzando le regole di classificazione previste nelle relative normative. Il principio fondamentale della classificazione a vista è quello che esiste una correlazione più o meno stretta tra il difetto e le prestazioni meccaniche. Individuando il difetto peggiore presente nell'elemento da classificare si può, seguendo le regole indicate nella norma, assegnare a questo elemento una determinata categoria.

#### 3.3.2 La normativa

A causa della varietà delle specie legnose, della provenienza geografica, della qualità del materiale e delle tradizioni nella lavorazione e nell'utilizzo, in Europa esistono differenti normative nazionali sulla classificazione a vista. Per tale motivo è impossibile imporre un'unica norma adatta per tutti gli stati membri dell'Unione Europea, anche se i parametri rilevati devono essere comunque conformi alla norma UNI EN 14081-1, che fissa principalmente i requisiti di base da seguire dalle norme nazionali. La classificazione a vista, quindi deve essere applicata secondo la norma riferita ad una determinata area geografica. Questo comporta che le imprese di prima lavorazione italiane, che importano dall'estero, debbano conoscere le normative in vigore negli Stati da cui il materiale proviene (Brunetti *et al.*, 2011).

Il legname di origine italiana a sezione rettangolare destinato all'uso strutturale, è classificato a vista secondo la UNI EN 11035.

La UNI EN 11035-1, conformemente alla UNI EN 14081-1, specifica terminologia e metodi per la misurazione delle caratteristiche rilevanti ai fini della classificazione a vista secondo la resistenza meccanica di legname destinato all'uso in strutture portanti.

La UNI EN 11035-1 si applica al legno massiccio di qualsiasi dimensione e umidità, con la seguente esclusione: prodotti incollati o assemblati per i quali gli elementi devono necessariamente essere classificati prima dell'operazione di incollaggio o assemblaggio. Per quei segati di legno massiccio già classificati secondo una norma conforme alla UNI EN 14081-1, si rende necessaria una nuova

classificazione qualora si effettuino lavorazioni (ad esempio piallatura o levigatura) che eccedono i limiti indicati nella UNI EN 14081-1.

La UNI EN 11035-1 fa riferimento alle seguenti normative:

- UNI 11035-2 Legno strutturale - Classificazione a vista dei legnami secondo la resistenza meccanica - Parte 2: Regole per la classificazione a vista secondo la resistenza meccanica e valori caratteristici per tipi di legname strutturale
- UNI EN 338 Legno strutturale - Classi di resistenza
- UNI EN 1310 Legno tondo e segati - Metodo di misurazione delle caratteristiche
- UNI EN 13183-1 Umidità di un pezzo di legno segato - Determinazione tramite il metodo per pesata
- UNI EN 13183-2 Umidità di un pezzo di legno segato - Stima tramite il metodo elettrico
- UNI EN 13556 Legno tondo e segati - Nomenclatura dei legnami utilizzati in Europa
- UNI EN 14081-1 Strutture di legno - Legno strutturale con sezione rettangolare classificato secondo la resistenza - Parte 1: Requisiti generali

Si riportano di seguito alcuni termini e definizioni come indicati nella UNI EN 11035:

**assortimento:** Combinazione di forma e dimensioni con cui un tipo di legname viene commercializzato.

**categoria:** Insieme cui viene assegnato il legname classificato a vista secondo la resistenza meccanica in base ad una norma conforme alla UNI EN 14081-1

**classe di resistenza:** Profilo unificato a livello europeo di valori caratteristici di resistenza, rigidità e massa volumica, come riportato nella UNI EN 338, alla quale può fare riferimento una categoria.

**classificatore:** Operatore specificatamente qualificato per eseguire la classificazione a vista secondo la resistenza meccanica.

**cipollatura:** Fessurazione tangenziale che segue l'andamento di uno o più anelli di accrescimento e che può essere dovuta a cause traumatiche oppure a una naturale predisposizione di certe specie legnose, quali il Castagno, l'Abete bianco e il Larice.

**deformazioni:** Variazioni della forma geometrica di un segato rispetto a quella ideale di prisma retto.

**fessurazioni da ritiro:** Discontinuità longitudinali del tessuto legnoso dovute al naturale ritiro del legno in seguito alla perdita di umidità.

**fibratura:** Direzione o andamento generale prevalente delle fibre legnose nell'elemento ligneo. La fibratura è generalmente parallela all'asse longitudinale dell'elemento salvo deviazioni localizzate, intorno ai nodi, che non devono essere prese in considerazione.

**legno di reazione:** Legno che presenta caratteri anatomici distintivi, formato tipicamente nelle porzioni del fusto inclinate o curvate e nei rami quando l'albero tende a ripristinare la posizione originale, se esso è stato perturbato.

**legno massiccio strutturale:** Segato di legno massiccio classificato secondo la resistenza meccanica.

**legno massiccio strutturale essiccato/stagionato:** Legno stagionato o essiccato che è stato classificato ad un'umidità media del 20% o minore, senza alcuna misurazione maggiore del 24%.

**massa volumica:** Rapporto fra la massa del provino ed il suo volume riferiti a una data umidità del legno.

**nodi:** Qualsiasi porzione di ramo inclusa nell'elemento ligneo. Per gruppo di nodi si intende un insieme di due o più nodi approssimativamente allineati, che insistono su uno stesso tratto avente lunghezza pari a 150 mm dell'elemento strutturale, oppure – allineati o meno - aventi dimensioni e disposizione tale da impedire che fra un nodo e l'altro del gruppo la fibratura del legno (vedere i punti 3.8 e 4.3.2) non recuperi il suo normale andamento.

**provenienza:** Area geografica di crescita degli alberi dai quali vengono ottenuti i segati di legno massiccio

**segato di legno massiccio:** Singolo segato ottenuto da un tronco tramite lavorazione meccanica. Non sono compresi nella presente definizione i prodotti incollati o assemblati (per esempio legno giuntato a dita sull'intera sezione, legno lamellare, prodotti tipo bilama e trilama, pannelli di tavole incollate o assemblate con unioni meccaniche).

**smusso:** Superficie arrotondata originale del tronco, con o senza corteccia e comunque non toccata dalla lama della sega, che raccorda due facce del segato tra loro perpendicolari.

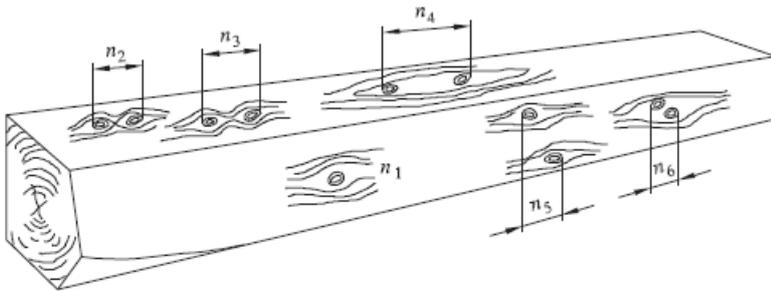
**specie legnosa:** Singola specie botanica oppure gruppo di specie (in tal caso, specificare le specie comprese nel gruppo in accordo alla UNI EN 13556).

**tipo di legname:** Materiale al quale si applicano i valori caratteristici. Il tipo di legname viene definito da parametri quali la specie, la provenienza e la categoria. Ogni tipo di legname comprende assortimenti di varia sezione e lunghezza, i quali devono contribuire tutti assieme alla determinazione dei valori caratteristici.

**valore caratteristico:** Valore che corrisponde a un determinato frattile della distribuzione statistica di una proprietà del legno strutturale. Per le proprietà di resistenza, il modulo di elasticità e la massa volumica il valore caratteristico è il 5-percentile. Per il modulo di elasticità anche il valor medio è un valore caratteristico. I valori di tutte le proprietà sono riferiti a provini aventi umidità tale da risultare in equilibrio con ambiente ad una temperatura di 20 °C e un'umidità relativa del 65%.

Di seguito vengono descritte le principali caratteristiche che riducono la resistenza meccanica e che il classificatore deve valutare secondo le modalità indicate nella UNI EN 11035-1 utilizzata per la classificazione oppure in altre da essa richiamate:

### 1. Esempi di nodi isolati e raggruppati



**$n_1$  Nodo isolato**

**$n_2$  Gruppo di nodi**, in quanto nodi allineati a meno di 150 mm di distanza

**$n_3$  Nodi isolati**, in quanto allineati a più di 150 mm di distanza

**$n_4$  Gruppo di nodi**, in quanto anche se a più di 150 mm di distanza la fibratura non recupera la direzione originale fra i nodi

**$n_5$  Nodi isolati**, in quanto anche se insistenti su un tratto minore di 150 mm di lunghezza non sono allineati e la fibratura fra di essi recupera la direzione originale

**$n_6$  Gruppo di nodi**, in quanto presentano la fibratura che non recupera la direzione originale

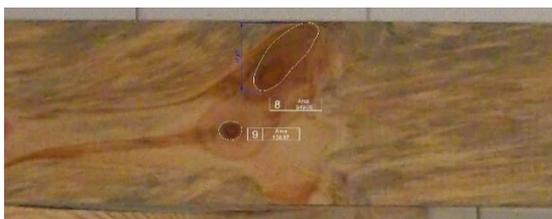
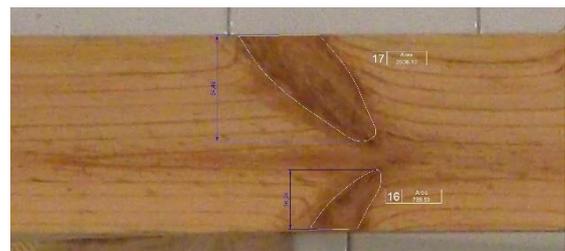
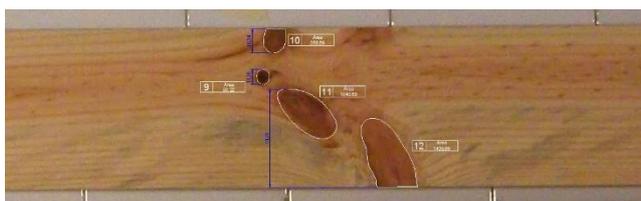


Figura 3.3.1 Esempi di nodi presenti nel Pino Marittimo sardo

## Inclinazione della fibratura

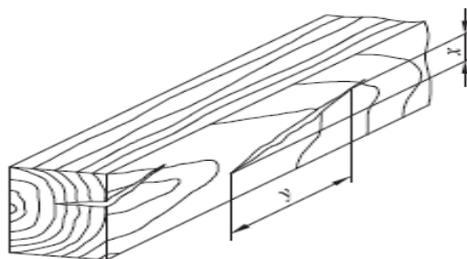


Figura 3.3.2 Fessure da ritiro

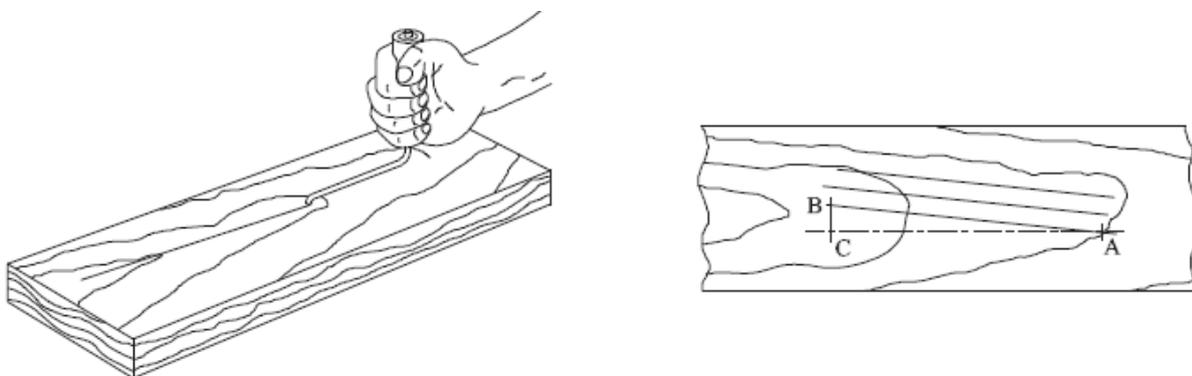


Figura 3.3.3 Utilizzo del graffietto

La direzione generale della fibratura viene determinata su una lunghezza minima pari a 1000 mm. L'inclinazione della fibratura si calcola come altezza  $x$  riferita alla lunghezza orizzontale  $y$  (vedere figura 2). Tale rapporto si esprime in percentuale secondo la seguente relazione:

$$F = (x/y) 100$$

Essa può essere determinata sulla base delle fessurazioni da ritiro (figura 3.3.2) eventualmente visibili, oppure mediante l'appropriato uso del graffietto (figura 3.3.3) conformemente alla UNI EN 1310.

### 2. Massa volumica

La massa volumica media, laddove richiesta, deve essere determinata su ciascun singolo elemento calcolando il rapporto fra la massa  $M$  (in kilogrammi, misurata con un'accuratezza dell'1%), e il volume  $V$  (in metri cubi, ottenuto moltiplicando l'area della sezione mediana per la lunghezza ed esprimendo il risultato con almeno 3 cifre significative), e riferita all'umidità del legno del 20%.

### 3. Ampiezza anelli

L'ampiezza degli anelli, laddove richiesto, dovrà essere misurata su una testata del segato; essa è uguale alla larghezza media, espressa in millimetri, degli anelli di accrescimento. La misurazione si effettua sulla linea più lunga e perpendicolare agli anelli di accrescimento e cominciando a  $y = 25$  mm dal midollo quando questo è presente (vedere figura 3.3.4). L'ampiezza media degli anelli è data da:

$$\omega = z/N \text{ mm}$$

dove:

$z$  è almeno 75 mm (quando possibile);

$N$  è il numero di anelli compreso in  $z$ ;

$\omega$  è l'ampiezza media degli anelli.

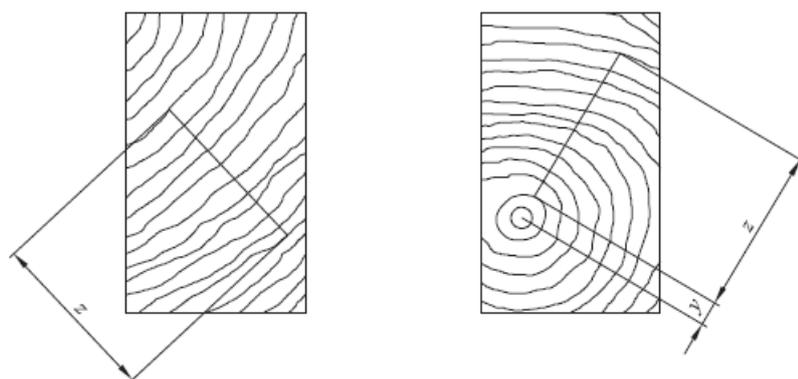


Figura 3.3.4 Misurazione degli anelli di accrescimento

$z$  Linea più lunga e perpendicolare agli anelli di accrescimento  
 $y$  Distanza minima dal midollo.

Si riportano di seguito alcune definizioni per la descrizione delle caratteristiche geometriche così come descritte nella UNI EN 11035-1

### 4. Smusso

L'entità dello smusso è espressa dal rapporto tra la proiezione dello stesso su un lato e la sua dimensione (vedere figura 3.3.5).

Essa è data da:

- su una faccia del segato:  $V1/d$  ovvero  $(V2+V3)/d$

dove:

$V1$ ,  $V2$  e  $V3$  sono le proiezioni ortogonali degli smussi sul lato maggiore della sezione,

$d$  è la larghezza del segato;

- su un bordo del segato:  $K1/b$  ovvero  $(K2+K3)/b$

dove:

$K1$ ,  $K2$  e  $K3$  sono le proiezioni ortogonali degli smussi sul lato minore della sezione,

$b$  è lo spessore del segato.

Si determina l'entità dello smusso ove tale rapporto sia massimo.

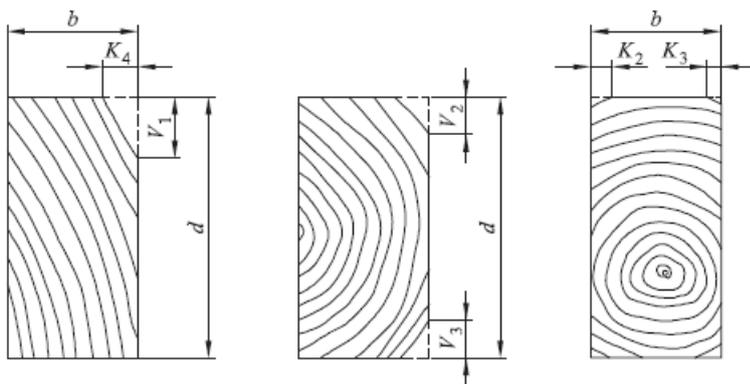


Figura 3.3.5 Misurazione degli smussi

$b$  Spessore del segato

$d$  Larghezza del segato

$V1$ ,  $V2$ ,  $V3$  Proiezioni ortogonali degli smussi sul lato maggiore della sezione (faccia del segato)

$K1$ ,  $K2$ ,  $K3$  Proiezioni ortogonali degli smussi sul lato minore della sezione (bordo del segato)

## 5. Deformazioni

Le deformazioni per le quali la Norma UNI 11035 - 1 prescrive un metodo di misurazione sono:

- **Arcuatura**: deformazione causata dalla presenza di legno di reazione su una delle due facce della tavola, con conseguente incurvamento del semilavorato che presenta la curvatura contenuta nel piano ortogonale alla faccia della tavola.
- **Falcatura**: deformazione che si manifesta a causa della presenza su un bordo della tavola di legno di reazione, che con il suo abnorme ritiro assiale tende ad incurvarla longitudinalmente. La curvatura è contenuta in un piano parallelo alle facce delle tavole.
- **Svergolamento**: torsione dell'intera tavola attorno all'asse longitudinale. Si manifesta in seguito al ritiro quando una striscia di legno di reazione occupa una zona centrale della tavola, oppure quando la tavola proviene da un tronco con fibratura elicoidale.
- **Imbarcamento**: tipo di deformazione da ritiro maggiormente presente nelle tavole che non contengono il midollo perché tagliate su piani tangenziali. L'imbarcamento tende ad

aumentare con la tangenzialità e con lo spessore della tavola ed è un difetto che riduce sensibilmente le rese di lavorazione (<http://www.ricercaforestale.it/index.php?module=CMpro&func=viewpage&pageid=133>).

Nell'immagine seguente sono rappresentate le differenti deformazioni nelle tavole.

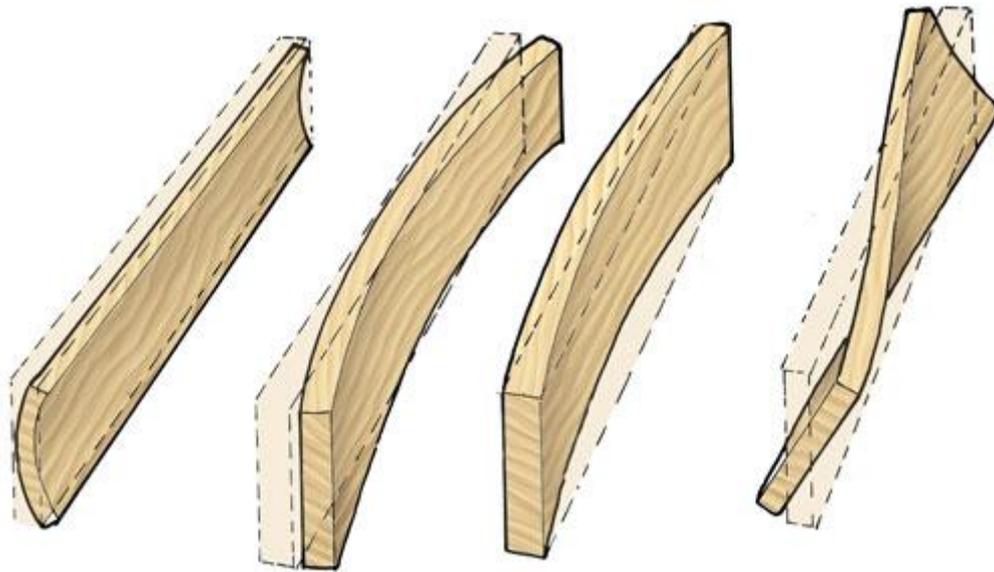
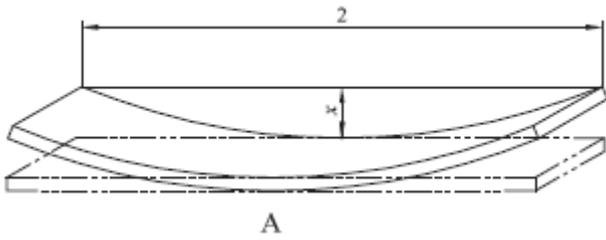


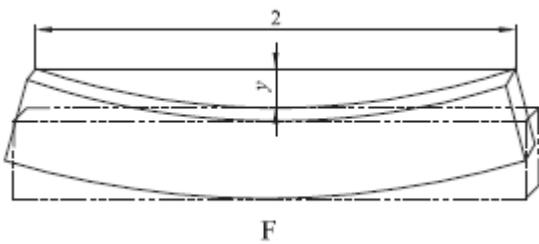
Figura 3.3.6 Tipi di deformazione delle tavole in sequenza: Imbarcamento, Falcatura, Arcuatura, Svergolamento

Le metodologie di misurazione delle deformazioni richiamate in tale normativa, sono descritte nella Norma UNI EN 1310 del 1999 che è stata sostituita dalla 14081 - 1 del 2006; la UNI EN 1310 prescrive che nel caso di *Arcuatura* e *Falcatura* siano rilevate le deformazioni massime riscontrabili su una lunghezza massima dell'elemento pari a 2 metri tramite l'utilizzo di un regolo di 2 metri, applicato contro la tavola in posizione simmetrica rispetto al punto stimato a vista di maggiore deformazione, misure espresse in mm. Nel caso di *Svergolamento* la deformazione massima della superficie longitudinale del segato deve essere valutata su una lunghezza rappresentativa di 2 metri, e infine, nel caso dell'*imbarcamento* si misura la deformazione massima nella larghezza dell'elemento. Queste misure possono essere espresse in mm o in percentuale della dimensione considerata.

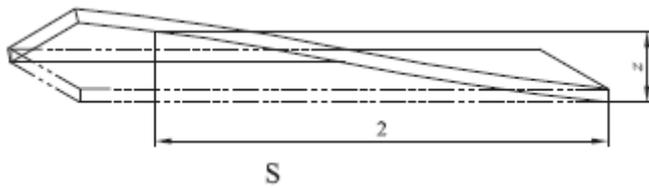
La Norma UNI 11035 - 1 riassume graficamente le grandezze che si devono valutare in funzione della lunghezza o della larghezza dell'elemento considerato.



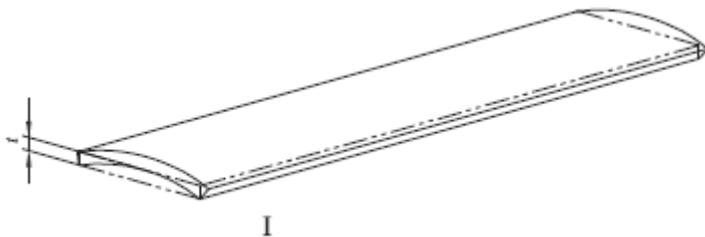
$x$  = arcuatura misurabile dal punto di massima curvatura dell'elemento al regolo



$y$  = falcatura misurabile dal punto di massima curvatura dell'elemento al regolo



$z$  = svergolamento misurabile dal piano d'appoggio considerando una lunghezza dell'elemento di 2 m a partire da un estremo, fino all'intradosso della superficie longitudinale



$t$  = imbarcamento misurabile tra il piano d'appoggio e la massima curvatura della sezione trasversale del segato

La UNI 11035-2 identifica i più comuni tipi di legname strutturale e per ciascuno di essi, indica le regole da adottare per effettuare la classificazione a vista secondo la resistenza meccanica facendo riferimento alle definizioni e prescrizioni generali riportate nella UNI 11035-1.

Le prescrizioni possono essere applicate esclusivamente a legno massiccio strutturale (come da definizione della UNI 11035-1).

Le prescrizioni si applicano ai tipi di legname ad uso strutturale (vedere il punto 3.18 della UNI 11035-1) elencati nel prospetto 1 (figura 3.3.7).

La presente norma può essere applicata a elementi lignei già in opera, purché siano soddisfatte tutte le seguenti condizioni:

- l'elemento in opera deve appartenere a uno dei tipi di legname previsti nella presente norma;
- la visibilità e l'accessibilità dell'elemento deve essere estesa ad almeno tre facce e a una delle due testate;
- non rientrano in ambito della UNI 11119.

La presente norma soddisfa tutti i requisiti previsti dalla UNI EN 14081-1 per le regole di classificazione a vista secondo la resistenza.

Specie/Provenienza	Sigla	Regola di classificazione da adottare	Classe/Categoria
<b>Conifere</b>			
Abete <sup>1)</sup> /Italia	A/I	"Conifere 1"	-/S1 <sup>11)</sup>
			C24/S2
			C18/S3
Larice <sup>2)</sup> /Nord Italia <sup>10)</sup>	L/N	"Conifere 1"	-/S1 <sup>11)</sup>
			C22/S2
			C18/S3
Douglasia <sup>3)</sup> /Italia	D/I	"Conifere 2"	C35/S1
			C22/(S2)
Pino laricio <sup>4)</sup> /Italia	PL/I	"Conifere 1"	C40/S1
			C22/S2
			C14/S3
Altre conifere <sup>5)</sup> /Italia	CON/I	"Conifere 1"	S1
			S2
			S3
<b>Latifoglie</b>			
Castagno <sup>6)</sup> /Italia	C/I	"Latifoglie"	D24/S
Querce caducifoglie <sup>7)</sup> /Italia	Q/I	"Latifoglie"	S
Pioppo e Ontano <sup>8)</sup> /Italia	P/I	"Latifoglie"	S
Altre latifoglie <sup>9)</sup> /Italia	LAT/I	"Latifoglie"	S

Figura 3.3.7 Prospetto 1 - UNI 11035-1

La classificazione di segati di una delle combinazioni specie/provenienza deve essere condotta adottando la regola di classificazione prevista nel prospetto 1 (Figura 3.3.7)

Tale prospetto indica:

- la combinazione specie/provenienza;
- la sigla di identificazione del materiale;
- la regola di classificazione appropriata (sono previste due distinte regole per le Conifere e una sola regola riservata alle Latifoglie, da individuare fra quelle riportate nei prospetti da 2 a 4);
- la categoria cui ciascun segato, una volta classificato, può essere assegnato; il numero delle categorie varia a seconda della maggiore o minore efficienza con cui le regole possono classificare le diverse combinazioni specie/provenienza;
- la classe di resistenza cui ciascun segato, una volta classificato, può essere assegnato;

- il relativo profilo resistente riportato nel prospetto 5, dal quale si possono desumere i valori caratteristici di resistenza, rigidezza e massa volumica per ciascun tipo di legname; questi valori sono ricavati conformemente alla UNI EN 384.

La UNI 11035-2 da inoltre alcune prescrizioni generali che si riportano di seguito:

- L'applicazione delle regole di cui alla presente norma deve avvenire tenendo conto anche di tutte le prescrizioni riportate nella UNI 11035-1.
- I segati classificati a vista sono assegnabili a una determinata categoria solo se soddisfano tutti i requisiti previsti per quella categoria. È pertanto il difetto peggiore, ovunque esso sia situato, a determinare la categoria di appartenenza.
- Se il segato non può essere assegnato ad alcuna delle categorie previste, deve essere scartato in quanto non classificabile per uso strutturale.

Al fine di rendere la classificazione a vista più efficiente, sarebbe adeguato classificare il legname con un'umidità inferiore al 20%: solo in questo caso tutti i difetti concorrenti a definire la qualità strutturale di un elemento sono effettivamente valutabili (Brunetti et al, 2011).

Per le Latifoglie è prevista una sola regola di classificazione, mentre per le Conifere queste sono due: “Conifere 1”: Abete rosso, Abete bianco, Larice e alcune altre specie di Conifere come Pini, Cipresso e Cedro; “Conifere 2”: Douglasia.

All'interno della UNI 11035-2, sono determinati i valori caratteristici per i diversi tipi di legname e le “categorie” strutturali ad essi corrispondenti. Le Conifere, secondo tale norma, vengono suddivise in tre categorie “S1”, “S2” ed “S3”, mentre le Latifoglie vengono attribuite ad unica categoria “S”.

Una volta assegnata la categoria, la norma UNI EN 1912, riporta la corrispondenza tra le sigle adottate nelle norme di classificazione nazionali e il sistema di classi di resistenza definite dalla norma UNI EN 338, in base alla specie e alla provenienza geografica del legno. Nel caso in cui le specie legnose siano già state assegnate alle classi di resistenza nella UNI EN 1912, le caratteristiche meccaniche vengono derivate dalla UNI EN 338, altrimenti queste vengono determinate in accordo con la UNI EN 384 che fornisce i requisiti per calcolare i valori caratteristici di una popolazione usando i risultati delle prove di laboratorio per la stima del MOR e del MOE, secondo i metodi di prova riportati nella UNI EN 408.

*Conifere 1*			
Criteri per la classificazione	Categorie		
	S1	S2	S3
Smussi <sup>1)</sup>	$s \leq 1/4$	$s \leq 1/3$	$s \leq 1/3$
Nodi singoli <sup>2)</sup>	$A \leq 1/5$ e comunque $d < 50$ mm	$A \leq 2/5$ e comunque $d < 70$ mm	$A \leq 3/5$
Nodi raggruppati <sup>3)</sup>	$A_g \leq 2/5$	$A_g \leq 2/3$	$A_g \leq 3/4$
Ampiezza anelli	$\leq 6$ mm	$\leq 15$ mm	
Inclinazione fibratura	$\leq 1:14$ (7,0%)	$\leq 1:8$ (12,5%)	$\leq 1:6$ (16,5%)
Fessurazioni: - da ritiro - cipollatura - da fulmine, gelo, lesioni	ammesse, se non passanti non ammessa non ammesse	ammesse. Se passanti con limitazioni <sup>6)</sup> ammessa con limitazioni <sup>4)</sup> non ammesse	
Degrado da funghi: - azzurramento - carie bruna e bianca	ammesso non ammesse		
Legno di compressione	fino a 1/5 del perimetro sulle facce o della sezione	fino a 2/5 del perimetro sulle facce o della sezione	fino a 3/5 del perimetro sulle facce o della sezione
Attacchi di insetti	non ammessi	ammessi con limitazioni <sup>5)</sup>	
Vischio	non ammesso		
Deformazioni: - arcuatura - falcatura - svergolamento - imbarcamento	10 mm ogni 2 m di lunghezza 8 mm ogni 2 m di lunghezza 1 mm ogni 25 mm di lunghezza nessuna restrizione	20 mm ogni 2 m di lunghezza 12 mm ogni 2 m di lunghezza 2 mm ogni 25 mm di larghezza nessuna restrizione	

Figura 3.3.8 Criteri per la classificazione per le "Conifere 1"

### 3.3.3 Materiale e metodo

#### 3.3.3.1 Misurazione dei difetti

Scopo di questa parte del lavoro è stato quello di individuare le possibili modalità di classificazione a vista secondo la resistenza del legname di pino marittimo di provenienza sarda, in vista di un suo possibile uso per realizzare pannelli di tavole incrociate ed altri prodotti incollati per impiego in edilizia.

Al fine di individuare le modalità di classificazione a vista è stato necessario raccogliere un campione di legname differenziato per sezioni, e per quanto possibile qualità, che fosse rappresentativo del materiale utilizzabile per i prodotti strutturali.

Per l'indagine sperimentale sono state testate 840 tavole di pino marittimo provenienti dalle località Sa Mela di Sutta (provenienza 1) e Sa Mela di Supra (provenienza 2), nei pressi di Pattada (provincia di Sassari). Le sezioni nominali delle tavole analizzate sono le seguenti: 34x85, 34x105, 48x155, 53x180 mm.

Dimensioni (mm)			Numero di tavole		Volume (m <sup>3</sup> )	
spessore	larghezza	lunghezza	Prov 1	Prov 2	Prov 1	Prov 2
34	105	3200	140	140	1.73	1.73
48	155	3700	140	140	4.14	4.14
34	85	3200	100	100	1.01	1.01
53	180	4100	40	40	1.71	1.71
TOT			420	420	8.59	8.59

Tabella 3.3.1 sezioni delle tavole

Ogni campione è stato sottoposto preliminarmente alla rilevazione delle caratteristiche qualitative a vista secondo quanto previsto dalla norma UNI EN 14081-1.

Nello specifico il lavoro ha previsto il rilievo e la mappatura di tutti i nodi presenti nel terzo medio, che successivamente sarà sottoposto alla sollecitazione massima di flessione durante la prova distruttiva. Le caratteristiche dimensionali e la posizione dei nodi sono state registrate tramite un software di utilizzo on-line ideato dalla ditta MiCROTEC (Web Knot Calculator, Figura 3.3.9).

Il software permette di calcolare i principali parametri di descrizione dei nodi, usati dalle diverse norme europee di classificazione a vista. Nella tabella 3.3.2 sono elencati tutti i parametri che il Webknot restituisce dopo l'input delle misure dei nodi e della loro posizione sulla tavola.

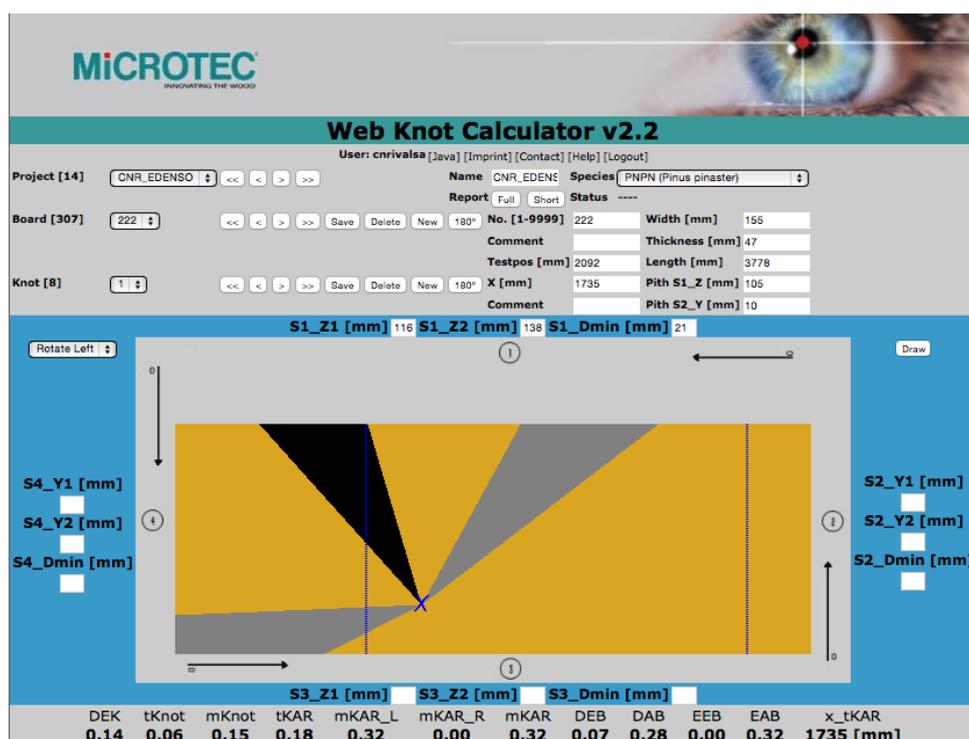


Figura 3.3.9 Schermata del Webknot Calculator

simbolo	nome	Descrizione
tKnot	total knot	Rapporto tra l'area della proiezione del nodo sulla sezione del segato e la sezione stessa.
mKnot	Marginal knot	Stesso di tKnot ma considera solo i quarti esterni della sezione del segato.
tKAR	Total Knot Area Ratio	La somma delle aree delle proiezioni sulla sezione del segato di tutti i nodi entro 150 mm di distanza e la sezione stessa.
mKAR	Marginal Knot Area Ratio	Stesso di tKAR ma considera solo i quarti esterni della sezione del segato.
mKAR_L	Marginal Knot Area Ratio Left	Stesso di mKAR ma considera solo il quarto a sinistra (per noi lato compresso).
mKAR_R	Marginal Knot Area Ratio Right	Stesso di mKAR ma considera solo il quarto a destra (per noi lato teso).
DEK	Diameter single knot joist	Rapporto tra il diametro minimo del nodo misurato su una faccia e la dimensione della faccia stessa.
DEB	Diameter single knot board	Rapporto tra la somma delle dimensioni del nodo sulle superfici del segato e il doppio della larghezza del segato stesso.
DAB	Diameter knot cluster board	Stesso di DEB ma considerando tutti i nodi che si trovano entro una distanza tra loro di 150 mm.
EEB	Lateral depth single knot board	Rapporto tra la dimensione del nodo misurata su una faccia e la larghezza della tavola. NB: contano solo i nodi che insistono nei quarti esterni (se toccano i quarti esterni sono comunque misurati per tutta la loro estensione)
EAB	Lateral depth knot cluster board	Stesso di EEB ma considerando i nodi nell'arco di 150 mm.

Tabella 3.3.2 Parametri di output del Webknot

Di ogni nodo (quelli considerati come difetto peggiore e posizionabili nella prova di flessione nel terzo medio) è stato misurato il diametro minimo e la sua posizione rispetto a due riferimenti: la



Figura 3.3.10 Misurazione dei nodi



Figura 3.3.11 Misurazione della sezione

posizione rispetto al bordo della faccia dove il nodo è presente e ad un estremo della tavola, come si può vedere in Figura 3.3.10.

Oltre ai nodi, il rilievo delle caratteristiche prevede la misurazione della deviazione della fibratura, delle principali deformazioni (arcuatura, falcatura e svergolamento), della presenza di smussi, lesioni, e di tutte le altre caratteristiche che possono avere un'influenza sulla classificazione del legname strutturale. Nella seguente figura si possono vedere alcune delle operazioni di misura.

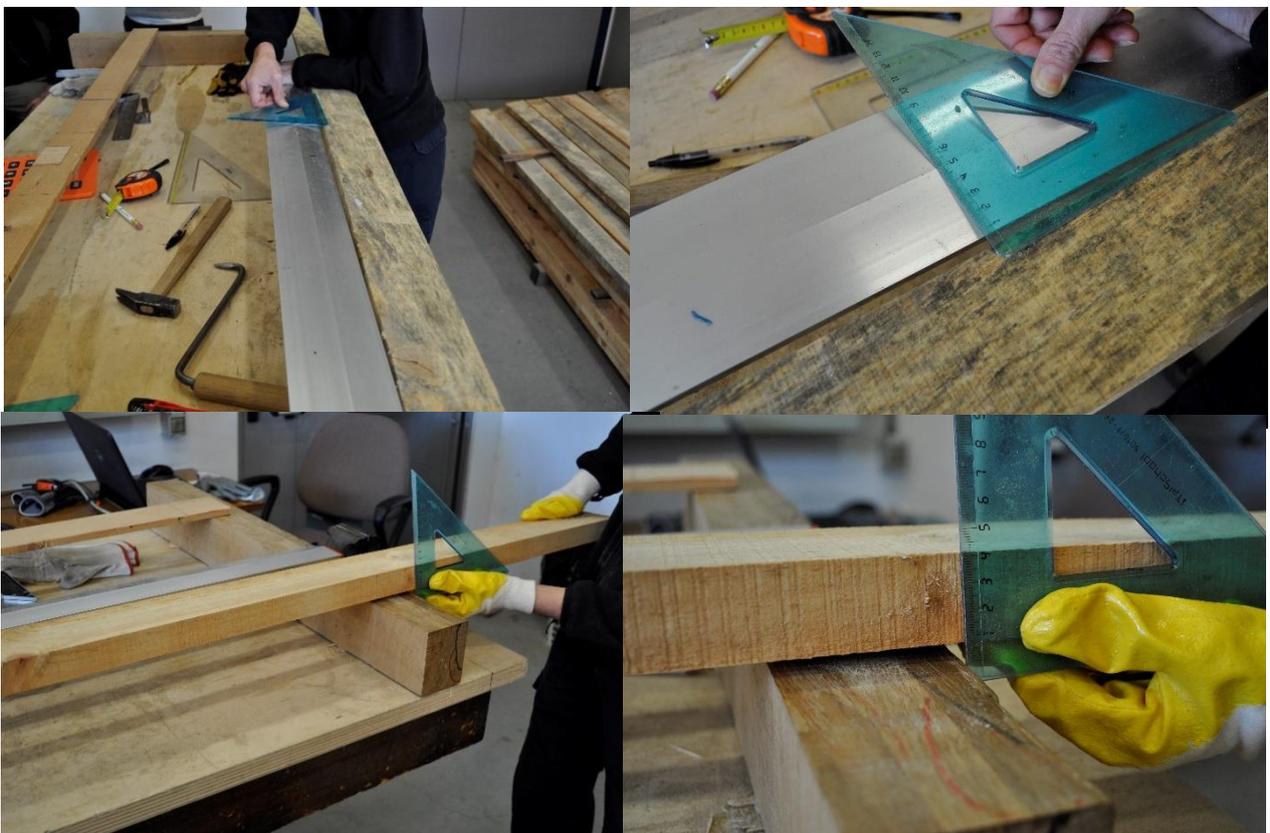


Figura 3.3.12 Misurazione di falcatura (in alto) e svergolamento (in basso)

In tutte le tavole è stata misurata la deviazione della fibratura. La fibratura per definizione è la direzione o l'andamento prevalente delle fibre legnose nell'elemento ligneo (UNI 11035-1).

La deviazione della fibratura invece si può definire come: lo scostamento della direzione delle fibre dall'asse longitudinale del pezzo (UNI EN 844-9).

La misurazione dell'inclinazione della fibratura è determinata sulla base delle fessurazioni da ritiro eventualmente visibili o mediante l'uso del graffietto.

La misura dell'inclinazione della fibratura:

- non deve essere effettuata intorno ai nodi, in cui può presentare solo deviazioni localizzate;
- viene determinata su una lunghezza minima di 1000 mm;
- si calcola come un rapporto percentuale tra la deviazione della fibratura in mm (x) e la lunghezza sulla quale è stata effettuata la misurazione in mm (y) (Figura 3.3.13), secondo l'equazione:

$$F (\%) = \left( \frac{X}{Y} \right) 100$$

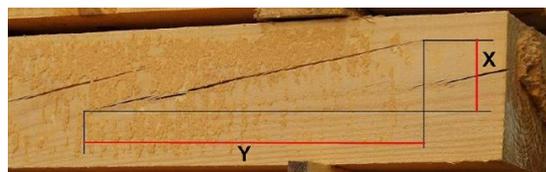


Figura 3.3.13

Solo in alcune delle 820 tavole testate in questo lavoro erano presenti delle fessure da ritiro. La deviazione della fibratura è stata quindi misurata tramite l'uso del graffietto. Le tavole sono state poi spaccate per mezzo di una accetta per verificare la reale inclinazione delle fibre. Come si può vedere dalla figura 3.3.14 la differenza tra la linea tracciata con il graffietto (linea rossa tratteggiata) e quella ottenuta con lo spacco (linea rossa continua), è notevole. **Questo è avvenuto nella maggior parte delle tavole è dovrebbe essere considerato come un basso indice di affidabilità nell'uso del graffietto nella classificazione a vista.**



Figura 3.3.14 Utilizzo del graffietto

La misura dell'ampiezza media degli anelli di accrescimento è stata fatta sulle 820 tavole. Per definizione l'ampiezza degli anelli ( $\omega$  in mm) è data dal rapporto tra la lunghezza in cui si è effettuato il conteggio ( $z$ ) e il numero degli anelli ( $N$ ):

$$\omega \text{ (mm)} = \frac{z}{N}$$



Figura 3.3.15 Misura degli anelli di accrescimento

### 3.3.3.2 Misura delle caratteristiche meccaniche

Ogni elemento, una volta classificato, è stato testato in laboratorio con prove distruttive a flessione 4 punti, ponendo il tratto stimato peggiore dal punto di vista della resistenza nella mezzeria

Mediante la prova a flessione sono stati determinati: il MOR (modulo di rottura o resistenza a flessione), il MOE (modulo elastico) e la MV (massa volumica). Queste tre proprietà sono definite “grade determining properties” (UNI EN 14081-1) e consentono di assegnare al materiale testato un profilo resistente. La determinazione delle classi di resistenza si basa su prove di rottura, effettuate secondo la UNI EN 408. Secondo la UNI EN 384, la sezione critica, scelta per ogni pezzo sulla base di un esame visivo, è identificata come il terzo medio, in cui le caratteristiche del segato sono stimate essere le peggiori e costituisce la posizione in cui si prevede avvenga la rottura. La determinazione delle caratteristiche meccaniche del legno avviene con prove a flessione, in cui il carico è applicato di coltello (on the edge) (UNI EN 14081-2).

Prima che il pezzo sia portato a rottura per la registrazione del carico massimo, sono misurate contemporaneamente la deformazione locale e globale. I particolari per la configurazione della prova e le equazioni usate per il calcolo delle proprietà meccaniche sono riportate nella UNI EN 408.

Inizialmente occorre determinare le dimensioni dei provini, secondo le disposizioni specificate nella UNI EN 408:

- qualora la larghezza o lo spessore variano all'interno di un provino, queste dimensioni dovrebbero essere registrate come la media di tre distinte misurazioni;
- le dimensioni del provino devono essere misurate con accuratezza pari all'1%;
- tutte le misurazioni devono essere eseguite su pezzi condizionati all'ambiente normale di  $20 \pm 2^\circ\text{C}$ ;
- le misurazioni non devono essere effettuate a meno di 150 mm dalle estremità dell'elemento.

Nel presente lavoro sono stati considerati i metodi riferiti al legno massiccio secondo sollecitazione a flessione a quattro punti per la determinazione del modulo elastico locale e globale e della resistenza a flessione.

Nelle prove per la determinazione del MOE locale e globale e per le prove a rottura per la determinazione del MOR, il provino e le distanze tra gli appoggi e le teste di carico devono avere la seguente geometria (Figura 3.3.16):

- il provino deve avere una lunghezza minima pari a 19 volte l'altezza della sezione;
- il provino deve essere caricato simmetricamente a flessione, appoggiando su due punti che coprono una luce pari a 18 volte l'altezza.

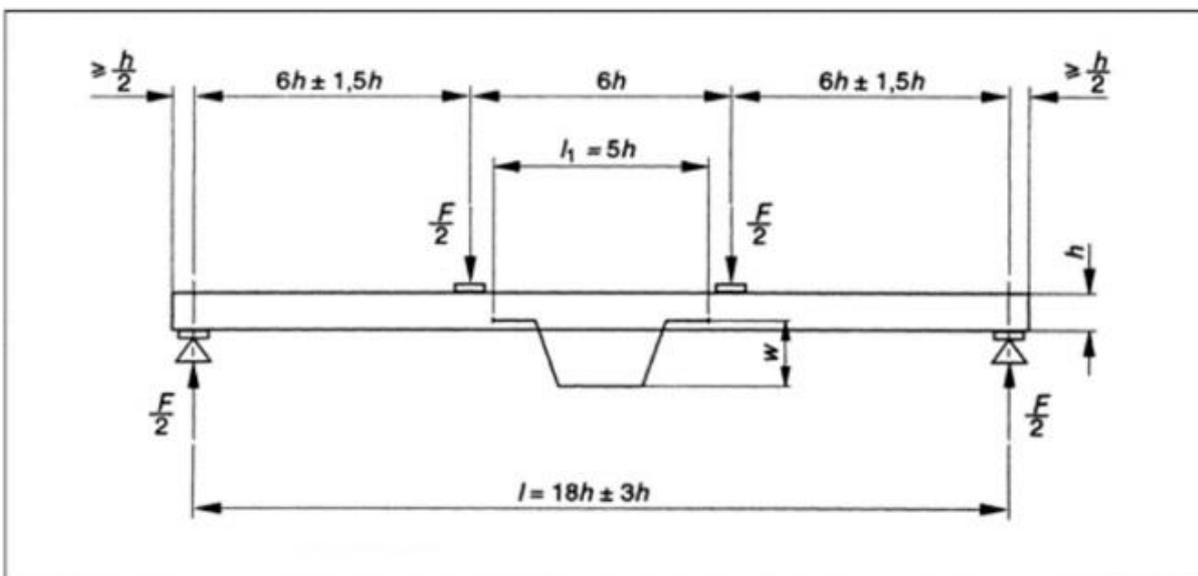


Figura 3.3.16 Prova di flessione secondo la EN 408

Nella prova a flessione sono necessari i seguenti accorgimenti (UNI EN 408):

- il provino deve essere semplicemente appoggiato;
- tra l'elemento e le teste di applicazione del carico possono essere inserite delle piastrine di acciaio non più larghe della metà dell'altezza del provino, in modo da minimizzare indentature localizzate;
- allo scopo di prevenire imbozzamenti, deve essere applicato un vincolo laterale, tale da consentire l'inflessione del pezzo senza attrito significativo.

I dati ottenuti da queste prove sono stati elaborati e calcolati secondo le equazioni fornite dalla UNI EN 408, per ogni tavola, al fine di determinare i valori di resistenza a flessione e MOE locale e globale, massa volumica. Inoltre è stata determinata l'umidità con metodo per pesata, dopo permanenza in stufa di un campione a 103° C fino a peso costante.

Le correzioni per l'umidità e per la sezione (kh) sono state applicate a ogni singolo elemento sottoposto a prova.

Il MOE locale e globale sono stati determinati contemporaneamente con l'utilizzo di tre trasduttori induttivi di spostamento con una corsa di 50 mm: due posti lateralmente sulle due facce opposte del provino (MOE locale) e uno posto nel lato teso del provino (MOE globale) (Figura 3.3.17).

I trasduttori misurano la corsa della deformazione in volt e con l'utilizzo di specifiche formule di calibrazione questa è trasformata in spostamento (in mm). L'apparecchiatura di misurazione utilizzata deve essere in grado di misurare la deformazione con accuratezza pari all'1%.

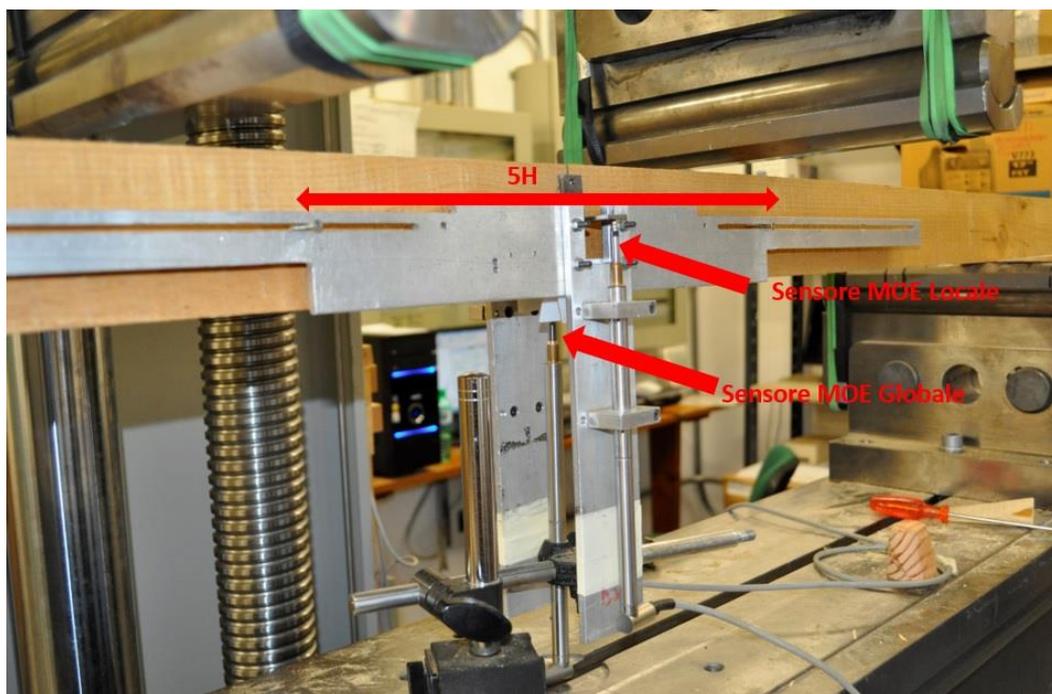


Figura 3.3.17 Posizionamento dei sensori

La velocità di spostamento della testa di applicazione del carico deve essere costante e non deve essere maggiore di 0,003 h mm/s. Il carico massimo applicato non deve essere superiore il 40% del carico massimo di rottura stimato.

### 3.3.3.3 Misurazione dei MOE

Nella misurazione del MOE locale la deformazione  $w$  deve essere considerata come la media delle misurazioni su entrambe le facce in corrispondenza dell'asse neutro e deve essere misurata al centro di una lunghezza di riferimento centrale pari a cinque volte l'altezza della sezione (Figura 3.3.18).

Il calcolo del MOE locale è stato fatto tramite la formula:

$$E_{m,l} \left( \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \right) = \frac{a l_1^2 (F_2 - F_1)}{16 I (w_2 - w_1)}$$

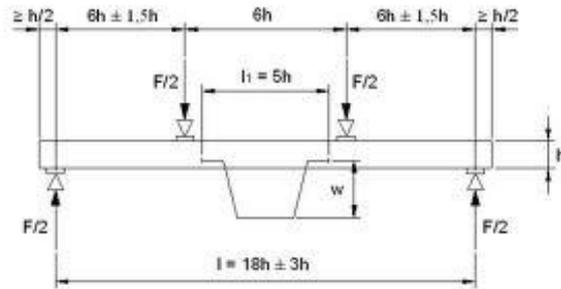


Figura 3.3.18 Riferimenti per la misura del MOE locale

Dove:

$l_1 = 5h$

$F_2 - F_1$ : incremento del carico sulla linea di regressione, in N

$w_2 - w_1$ : incremento di deformazione, in mm

$I$ : momento d'inerzia

La misurazione della deformazione del MOE globale  $w$  deve essere misurata al centro della luce (Figura 3.3.19) e al centro del bordo di trazione. Il calcolo del MOE è stato fatto tramite la seguente formula, come indicato dalla EN 408.

$$E_{m,g} = \frac{3al^2 - 4a^3}{2bh^3 \left( 2 \frac{w_2 - w_1}{F_2 - F_1} - \frac{6a}{5Gb} \right)}$$

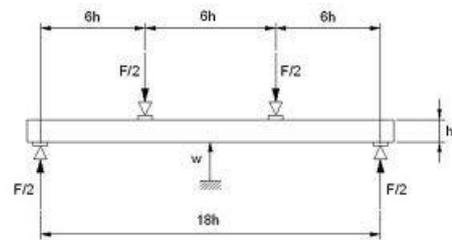
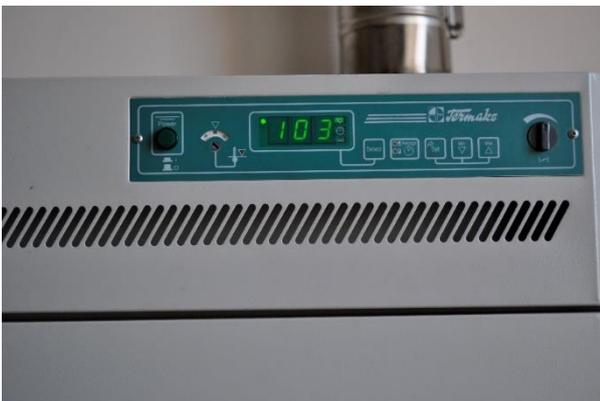


Figura 3.3.19 Riferimenti per la misura del MOE globale

$G$  = modulo di taglio; se non ci sono informazioni per la specie in oggetto si considera pari a infinito, oppure, per le conifere il valore del modulo medio al taglio può essere posto pari a  $G = 650 \text{ N/mm}^2$ .

Da ogni tavola è stato poi ricavato un provino per la misura della massa volumica (ISO 3131) e dell'umidità al momento della prova di rottura (metodo per pesata in accordo a UN EN 13183-1).



Nelle figure sono rappresentate le fasi del metodo della pesata. In alto a sinistra la pesatura del provino ricavato nella zona della rottura (rottura della tavola nella prova a flessione). In alto a destra i provini sistemati nel forno alla temperatura indicata nella foto in basso a sinistra. Nella figura in basso a destra si può vedere la pesatura dopo il trattamento in forno una volta raggiunto un peso costante. Il provino è tenuto sotto una campana di vetro per mantenere l'umidità costante.

### 3.3.4 Analisi dei dati sperimentali

Sono state misurate e sottoposte a rottura 821 tavole provenienti da due zone diverse.

Le tavole sono state suddivise in 4 Sub-Samples (considerando provenienza e sezione):

Nome SubSample	Provenienza	Sezioni (bxh)
A	R	R 34x105 / R 34x85
B	R	R 48x155 / R 53x180
C	B	B 34x105 / B 34x85
D	B	B 48x151 / B 53x180

Tabella 3.3.3 SubSamples

Nella tabella 3.3:4 sono riassunti I risultati ottenuti dalle prove sperimentali

SubSample	A		B		C		D		Tutti	
	media	cv	media	cv	media	cv	media	cv	mT	cv
<b>N (n°tavole)</b>	230	-	175	-	<b>234</b>	-	<b>182</b>	-	821	-
<b>Fm150</b>	29.8	41	29.6	35	<b>22.4</b>	<b>41</b>	<b>23.8</b>	<b>36</b>	26.3	41
<b>MOE_lo_12</b>	8702	27	8821	23	<b>6489</b>	<b>24</b>	<b>7090</b>	<b>20</b>	7739	28
<b>MOE_EN384_12</b>	8705	31	7961	29	<b>5912</b>	<b>29</b>	<b>6040</b>	<b>27</b>	7160	34
<b>MV_12</b>	479	8	480	10	<b>450</b>	<b>8</b>	<b>456</b>	<b>9</b>	466	9
<b>Grading_MC</b>	11.3	9	11.4	6	<b>11.5</b>	<b>11</b>	<b>11.2</b>	<b>6</b>	11.4	8
<b>U_lab</b>	10.2	4	10.6	5	<b>10.2</b>	<b>5</b>	<b>10.1</b>	<b>6</b>	10.2	5

Tabella 3.3.4 Sintesi risultati

Come si può facilmente leggere dalla tabella 3.3.4, la provenienza B (Sa mela de Supra) ha caratteristiche di resistenza, modulo elastico e MV inferiori rispetto alla provenienza R (Sa mela de Sutta).

Sono state analizzate le reciproche correlazioni tra le tre caratteristiche misurate con le prove sperimentali. Queste correlazioni possono essere osservate nei grafici delle figure 3.3.20 e 3.3.21

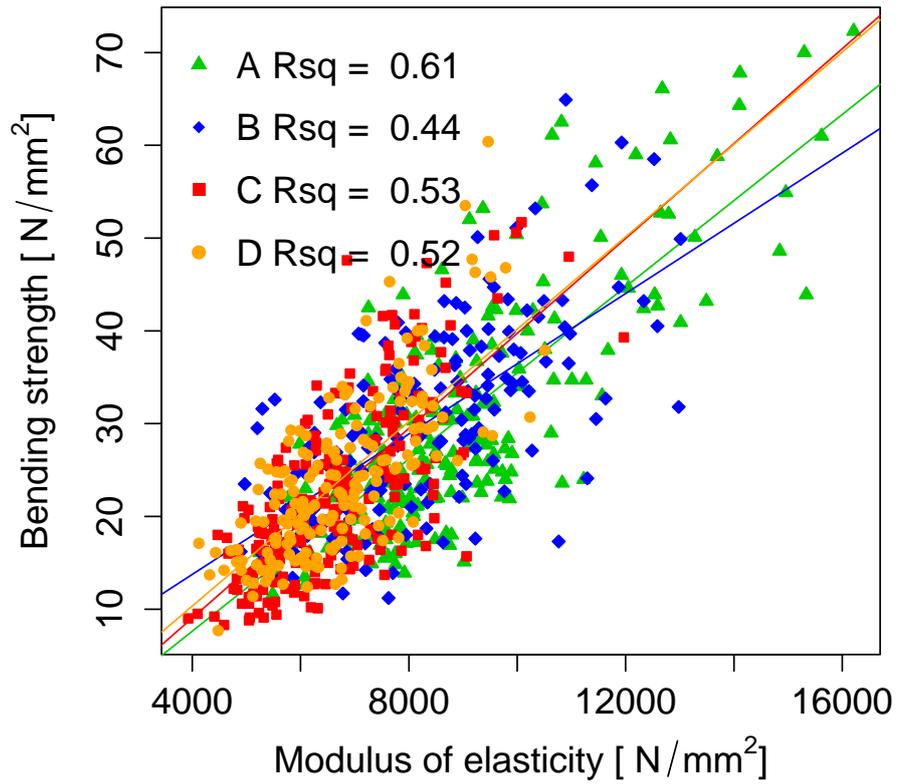


Figura 3.3.20 MOE globale vs MOR

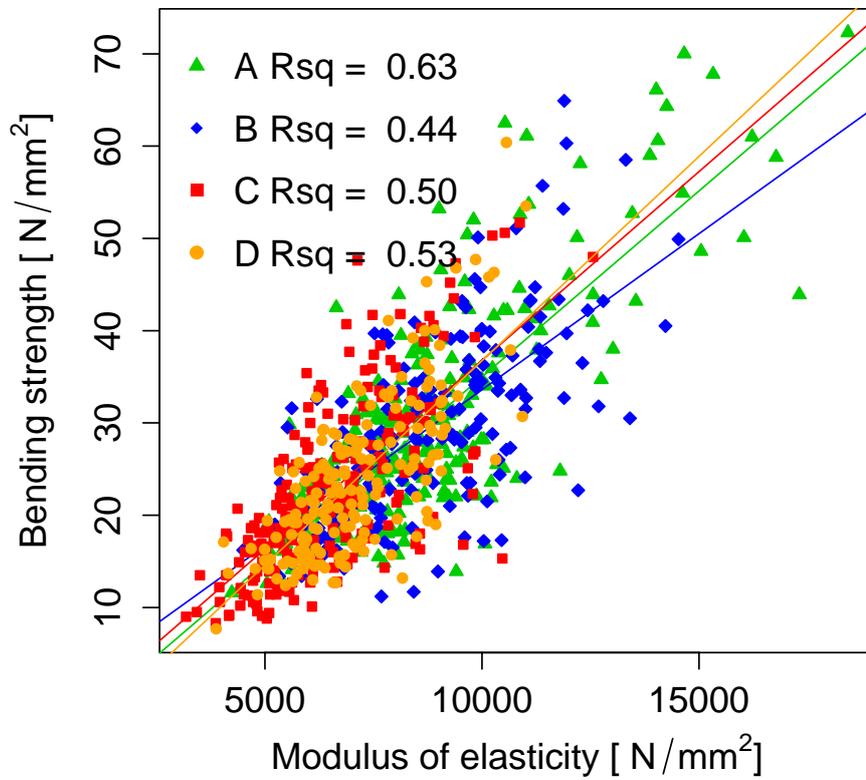


Figura 3.3.21 MOE locale vs MOR

Come si può vedere nei grafici illustrati nelle figure 3.3.22 e 3.3.23 le correlazioni tra la densità e il MOE ( $R^2 = 0.19$ ) e tra la densità ed il MOR sono basse ( $R^2 = 0.11$ ).

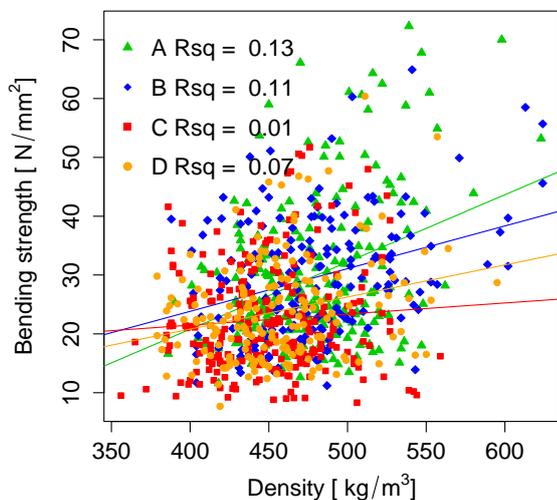


Figura 3.3.22 Correlazione tra la MV ed il MOR

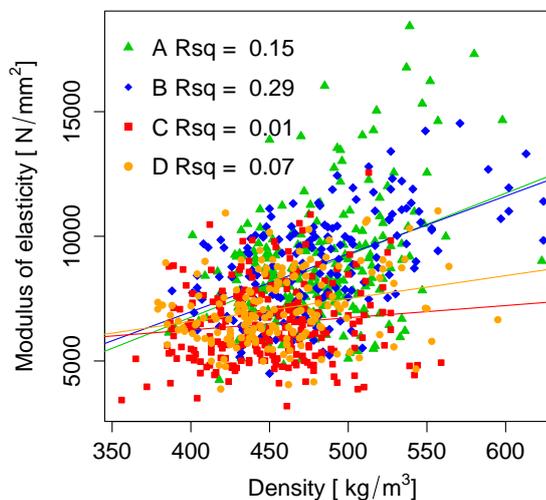


Figura 3.3.23 Correlazione tra la MV ed il MOE loc

Si riportano per comodità le definizioni dei parametri ricavati con il software WebKnot

simbolo	nome	Descrizione
tKnot	total knot	Rapporto tra l'area della proiezione del nodo sulla sezione del segato e la sezione stessa.
mKnot	Marginal knot	Stesso di tKnot ma considera solo i quarti esterni della sezione del segato.
tKAR	Total Knot Area Ratio	La somma delle aree delle proiezioni sulla sezione del segato di tutti i nodi entro 150 mm di distanza e la sezione stessa.
mKAR	Marginal Knot Area Ratio	Stesso di tKAR ma considera solo i quarti esterni della sezione del segato.
mKAR_L	Marginal Knot Area Ratio Left	Stesso di mKAR ma considera solo il quarto a sinistra (per noi lato compresso).
mKAR_R	Marginal Knot Area Ratio Right	Stesso di mKAR ma considera solo il quarto a destra (per noi lato teso).
DEK	Diameter single knot joist	Rapporto tra il diametro minimo del nodo misurato su una faccia e la dimensione della faccia stessa.
DEB	Diameter single knot board	Rapporto tra la somma delle dimensioni del nodo sulle superfici del segato e il doppio della larghezza del segato stesso.
DAB	Diameter knot cluster board	Stesso di DEB ma considerando tutti i nodi che si trovano entro una distanza tra loro di 150 mm.
EEB	Lateral depth single knot board	Rapporto tra la dimensione del nodo misurata su una faccia e la larghezza della tavola. NB: contano solo i nodi che insistono nei quarti esterni (se toccano i quarti esterni sono comunque misurati per tutta la loro estensione)
EAB	Lateral depth knot cluster board	Stesso di EEB ma considerando i nodi nell'arco di 150 mm.

Tutti questi parametri sono stati confrontati con la resistenza ed il modulo elastico ricavato dalle prove distruttive. Si riassumono le correlazioni trovate nelle tabelle 3.3:7 e 3.3.8.

parametro	tutti		solo nodi nel tratto teso (T)		esclusi i nodi nel tratto comp (T + T/C)		nodo su cui è avvenuta la rottura	
	n	r	n	r	N	r	n	r
tKnot	821	-0.327	375	-0.396	493	-0.319	821	-0.221
mKnot	821	-0.436	429	-0.558	470	-0.558	821	-0.444
tKAR	821	<b>-0.529</b>	691	-0.535	756	-0.525	821	-0.498
mKAR	821	-0.481	697	-0.520	749	-0.516	821	-0.499
mKAR_L	821	-0.194					821	-0.193
mKAR_R	821	-0.584					821	-0.577
DEK	821	<b>-0.470</b>	412	-0.530	464	-0.554	821	-0.442
DEB	821	-0.350	408	-0.418	490	-0.379	821	-0.245
DAB	821	<b>-0.515</b>	698	-0.484	757	-0.500	821	-0.489
EEB	821	-0.381	445	-0.343	497	-0.335	821	-0.312
EAB	821	-0.411	703	-0.370	757	-0.389	821	-0.396

Tabella 3.3.5 correlazioni tra i parametri e la resistenza (MOR)

parametro	tutti		solo nodi nel tratto teso (T)		esclusi i nodi nel tratto comp (T + T/C)		nodo su cui è avvenuta la rottura	
	n	r	n	r	N	r	n	r
tKnot	821	-0.277	375	-0.254	493	-0.235	821	-0.175
mKnot	821	-0.286	429	-0.287	470	-0.266	821	-0.235
tKAR	821	<b>-0.438</b>	691	-0.461	756	-0.448	821	-0.418
mKAR	821	-0.334	697	-0.359	749	-0.346	821	-0.335
mKAR_L	821	-0.279					821	-0.276
mKAR_R	821	-0.279					821	-0.271
DEK	821	<b>-0.392</b>	412	-0.403	464	-0.398	821	-0.328
DEB	821	-0.312	408	-0.266	490	-0.257	821	-0.200
DAB	821	<b>-0.450</b>	698	-0.462	757	-0.455	821	-0.431
EEB	821	-0.333	445	-0.341	497	-0.305	821	-0.268
EAB	821	-0.352	703	-0.361	757	-0.353	821	-0.350

Tabella 3.3.6 correlazioni tra i parametri e il modulo elastico MOE

Considerazioni:

**I parametri che hanno correlazioni maggiori con la resistenza e il modulo elastico sono il tKAR e il DAB. Il DEK viene subito dopo.**

#### 3.3.4.1 Definizione di nuovi parametri

A partire dai parametri creati dal webknot si è pensato di crearne degli altri allo scopo di ottenere delle migliori correlazioni con le caratteristiche meccaniche delle tavole. I nuovi parametri possono essere così descritti:

DEB<sub>n</sub> → stesso del DEB ma la misura del nodo è rapportata al semi-perimetro invece che a 2 volte la larghezza.

DAB<sub>n</sub> → stesso del DAB ma rapportato al perimetro invece che a 2 volte la larghezza

DEK<sub>n</sub> → diametro minimo rapportato al semi-perimetro invece che alla dimensione della faccia su cui insiste il nodo

DEK<sub>w</sub> → diametro minimo rapportato alla dimensione della faccia su cui insiste il nodo, ma sono considerate solo le facce (larghezza)

DEK<sub>t</sub> → diametro minimo rapportato alla dimensione della faccia su cui insiste il nodo, ma sono considerati solo i bordi

DAK → somma dei diametri minimi dei nodi in un tratto di 150mm misurati su tutte le 4 facce e rapportati al perimetro. NB: diversamente dai vari DAB del webknot viene calcolato solo se c'è più di un nodo

DAK<sub>w</sub> → somma dei diametri minimi in un tratto di 150mm misurati sulle due larghezze e rapportati al doppio della larghezza. NB: diversamente dai vari DAB del webknot viene calcolato solo se c'è più di un nodo

DAK<sub>f</sub> → somma dei diametri minimi dei nodi in un tratto di 150mm misurati su una faccia e rapportati alla dimensione della faccia stessa. [problema: può essere maggiore di 1]. NB: diversamente dai vari DAB del webknot viene calcolato solo se c'è più di un nodo

DAB<sub>f</sub> → somma delle proiezioni dei nodi entro i 150 mm (escludendo le sovrapposizioni) sulle singole facce rapportati alla dimensione della faccia. NB: viene calcolato solo se c'è più di un nodo nel tratto dei 150 mm

DAB<sub>w</sub> → somma delle proiezioni dei nodi entro i 150 mm (escludendo le sovrapposizioni) sulle singole facce rapportati alla dimensione della faccia, considera solo le facce più larghe. NB: viene calcolato solo se c'è più di un nodo nel tratto dei 150 mm

DAB<sub>t</sub> → somma delle proiezioni dei nodi entro i 150 mm (escludendo le sovrapposizioni) sulle singole facce rapportati alla dimensione della faccia, considera solo i bordi. NB: viene calcolato solo se c'è più di un nodo nel tratto dei 150 mm

DABu → somma delle proiezioni dei nodi entro i 150 mm (escludendo le sovrapposizioni) sulle singole facce rapportati alla dimensione della faccia. NB: viene calcolato anche nel caso di nodo singolo

DABuw → somma delle proiezioni dei nodi entro i 150 mm (escludendo le sovrapposizioni) sulle singole facce rapportati alla dimensione della faccia, considera solo le facce più larghe. NB: NB: viene calcolato anche nel caso di nodo singolo

DABut → somma delle proiezioni dei nodi entro i 150 mm (escludendo le sovrapposizioni) sulle singole facce rapportati alla dimensione della faccia, considera solo i bordi. NB: NB: viene calcolato anche nel caso di nodo singolo.

Le correlazioni dei nuovi parametri con il MOE ed il MOR sono riassunte nelle seguenti tabelle

parametro	tutti		solo nodi nel tratto teso (T)		esclusi i nodi nel tratto compresso (T + T/C)	
	n	r	n	r	n	r
DEBn	819	-0.360	408	-0.429	488	-0.391
DABn	819	<b>-0.518</b>	698	-0.485	745	-0.506
DEKn	819	-0.404	409	-0.486	501	-0.460
DEKw	819	-0.358	406	-0.418	506	-0.405
DEKt*	704	-0.379	373	-0.475	391	-0.463
DAK*	683	<b>-0.485</b>				
DAKw*	683	-0.350				
DAKf*	665	-0.355				
DABf*	700	<b>-0.418</b>				
DABw*	663	-0.386				
DABt*	136	-0.384				
DABu	821	<b>-0.447</b>				
DABuw	821	-0.434				
DAut*	705	-0.300				

Tabella 3.3.7 correlazioni tra i nuovi parametri e la resistenza (MOR)

parametro	tutti		solo nodi nel tratto teso (T)		esclusi i nodi nel tratto compresso (T + T/C)	
	n	r	n	r	n	r
DEBn	819	-0.316	409	-0.268	489	-0.260
DABn	819	<b>-0.449</b>	698	-0.461	745	-0.461
DEKn	819	-0.375	410	-0.375	502	-0.375
DEKw	819	-0.342	406	-0.328	506	-0.328
DEKt*	704	-0.332	373	-0.336	391	-0.321
DAK*	683	<b>-0.430</b>				
DAKw*	683	-0.314				
DAKf*	665	-0.329				
DABf*	700	<b>-0.365</b>				
DABw*	663	-0.329				
DABt*	136	-0.320				
DABu	821	<b>-0.379</b>				
DABuw	821	-0.375				
DABut	705	-0.259				

Tabella 3.3.8 correlazioni tra i nuovi parametri e il modulo elastico (MOE)

*Considerazioni:*

*Dei parametri nuovi i migliori sono DABn, DAK, DABf, DABu. Il DABn, però, come il DAB classico della DIN non è un parametro che distingue il nodo singolo dal gruppo di nodi, viene calcolato anche se c'è un nodo solo, per questo la correlazione è più alta.*

*SUGGERIMENTO: si potrebbe usare il parametro DEK per nodo singolo e DAK, DAKf o DABf per gruppo di nodi. Oppure, per rendere più semplice la regola si può usare un solo parametro per nodo singolo e gruppo: DABu.*

Nella tabella 3.3.10 si possono osservare le correlazioni degli altri difetti con correlazioni la resistenza:

Difetto	N° tavole	r
Gruppo di nodi	n = 426	-0.353
Fibratura (spacco)	n = 821	-0.183
Arcuatura	n = 821	-0.261
Falcatura	n = 821	-0.186
Svergolamento	n = 821	-0.323
Ampiezza anelli	n = 821	-0.325
Smusso	n = 77	-0.069 ns

Tabella 3.3.9 Correlazioni tra i difetti rilevati ed il MOR

È stato effettuato il t-test della resistenza in presenza o meno di midollo nella sezione testata e si è ottenuto un  $t = 6.2901$  La media dei gruppi:

con midollo assente MOR = 27.4 N/mm<sup>2</sup>; con midollo presente MOR = 23.0 N/mm<sup>2</sup>

Nella tabella 3.3.11 si possono osservare le correlazioni degli altri difetti con il modulo elastico.

Difetto	N° tavole	r
Gruppo di nodi	n = 426	-0.348
Fibratura (spacco)	n = 821	-0.180
Arcuatura	n = 821	-0.256
Falcatura	n = 821	-0.234
Svergolamento	n = 821	-0.361
Ampiezza anelli	n = 821	-0.371
Smusso	n = 77	-0.088 ns

Tabella 3.3.10 Correlazioni tra i difetti rilevati ed il MOE

È stato effettuato il t-test della resistenza in presenza o meno di midollo nella sezione testata e si è ottenuto un  $t = 6.2901$ . La media dei gruppi:

con midollo assente MOE = 7958 N/mm<sup>2</sup>; con midollo presente MOE = 7075 N/mm<sup>2</sup>

### 3.3.5 Sviluppo di una regola di classificazione a vista per il pino marittimo sardo.

Allo scopo di sviluppare una regola specifica per la classificazione a vista del pino marittimo con una resa non troppo bassa (cosa che accadrebbe seguendo le indicazioni della 11035-2) si sono provate varie combinazioni di parametri classici e nuovi. Nella tabella 3.3.11a sono riassunte due delle soluzioni provate. Imponendo i valori caratteristici di resistenza e facendo variare i limiti per i parametri scelti si sono ricavate le rese.

Parametri utilizzato	Valore Limite		Rese			F <sub>m0,5</sub> (N/mm <sup>2</sup> )	
	S1	S2	Rejected(%)	S1 (%)	S2(%)	S1	S2
DABu	0,5	0,66	356 (43,4)	244(29,7)	221(26,9)	16.4 C16	14.9 C14
DEK	0,4	0,66	219(26,7)	288(35,1)	314(38,2)	17.5 C16	14.8 C14
DABf	0,66	0,75					

Tabella 3.3.11a Rese per due combinazioni di parametri

I limiti della deviazione della fibratura e la dimensione degli anelli (tabella 3.3.11.b) sono stati mantenuti costanti nelle diverse combinazioni provate con i vecchi e i nuovi parametri.

Parametri utilizzato	Fibratura %		Dim. Anelli (mm)	
	S1	S2	S1	S2
DABu	14	20	10	nessuna
DEK + DABf	14	20	10	nessuna

Tabella 3.3.11.b Limiti per dev. della fibratura e dimensione anelli

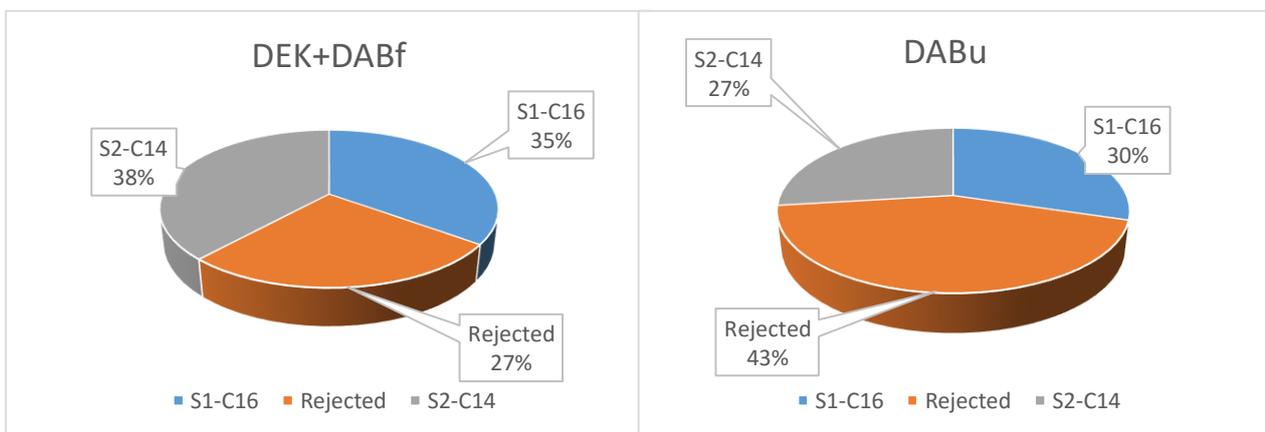


Figura 3.3.24 Rese per i parametri DABu e DEK+DABf

Riportiamo nella tabella 3.3.12 per il caso dei parametri DEK (0.4/0.66) + DABf (0.66/0.75)

valori di resistenza, modulo elastico e massa volumica per le due categorie S1 e S2 separando i SubSamples A B C D.

	grade	SubS	n	fm_mean N/mm <sup>2</sup>	fm_sd N/mm <sup>2</sup>	Fm05 N/mm <sup>2</sup>	EI N/mm <sup>2</sup>	Een N/mm <sup>2</sup>	Dens Kg/m <sup>3</sup>
1	S1	A	103	35.0	13.3	17.2	9798	9709	420
2	S1	B	65	36.6	9.4	22.9	9726	9059	409
3	S1	C	65	29.1	8.9	16.6	7353	6868	388
4	S1	D	55	28.5	9.4	16.5	7780	6776	381
5	S2	A	67	26.9	8.5	16.8	7986	7917	418
6	S2	B	80	27.4	8.0	15.9	8523	7569	405
7	S2	C	75	22.8	8.2	13.9	6557	5976	388
8	S2	D	92	22.8	7.7	14.2	6953	5885	404

Tabella 3.3.12 Valori medi e caratteristici ottenuti con DEK+DABf

I valori della tabella 3.3.12 sono stati calcolati per tutte le combinazioni di parametri (quelli descritti nelle norme e quelli nuovi creati in questo lavoro) ma per semplicità si è riportato solo l'esempio del DEK+DABf che è risultato essere quello più conveniente sia dal punto di vista della resa che per facilità di utilizzo per il classificatore.

Possiamo riassumere nei seguenti punti le considerazioni più significative:

- Il parametro unico DABu funziona ma restituisce troppi scarti (rese basse)
- Usare il parametro DEK per il nodo singolo e DABf per il gruppo di nodi sembra la soluzione migliore, sia per rese come anche per valori caratteristici e soprattutto per semplicità di misura. Usare DAKf, DAK o DAB per gruppo di nodi restituisce gli stessi valori caratteristici con rese solo leggermente superiori ma sono più dispendiosi in termini di tempo per la loro misura
- Fissare limiti diversi per parametri rilevati sulla faccia e sul bordo non consente di ottenere valori caratteristici migliori, ma permette di avere gli stessi risultati tra la EN 384 attuale e la nuova versione
- La soluzione consigliata è quindi la DEK +DABf con classi pari a C16 / C14 (per la nuova versione sarebbe C16 / C12).

La regola di classificazione e riassunta nella tabella 3.3.15

Pino marittimo		
Criteri per la classificazione	Categorie	
	S1	S2
Nodi singoli <sup>1)</sup>	$A \leq 2/5$ (0.4)	$A \leq 2/3$ (0.66)
Gruppi di nodi <sup>2)</sup>	$A_g \leq 2/3$ (0.66)	$A_g \leq 3/4$ (0.75)
Ampiezza degli anelli	$\leq 10$ mm	Nessuna limitazione
Inclinazione della fibratura	$\leq 1/7$ (14,3%)	$\leq 1/5$ (20%)
Fessurazioni: - cipollatura - da fulmine, gelo, lesioni - da ritiro	non ammessa non ammesse ammesse con limitazioni <sup>3)</sup>	
Degrado da funghi: - azzurramento - carie bruna e bianca	ammesso non ammesse	
Legno di compressione	fino a 2/5 del perimetro sulle facce o della sezione	fino a 3/5 del perimetro sulle facce o della sezione
Attacchi di insetti	ammessi con limitazioni <sup>4)</sup>	
Smusso <sup>5)</sup>	$s \leq 1/3$	
Deformazioni: - arcuatura - falcatura - svergolamento - imbarcamento	20 mm ogni 2 m di lunghezza 12 mm ogni 2 m di lunghezza 2 mm ogni 25 mm di larghezza nessuna limitazione	

1) A è il rapporto tra il diametro minimo del nodo e la dimensione della faccia su cui tale nodo è misurato. Questo rapporto deve essere il peggiore sull'intero segato.

2)  $A_g$  è il rapporto tra la somma delle proiezioni (si escludono eventuali sovrapposizioni) di tutti i nodi presenti su una faccia entro una lunghezza di 150 mm e la dimensione della faccia su cui sono situati. Questo rapporto deve essere il peggiore sull'intero segato.

---

3) Non passanti: lunghezza massima 1,5 m o  $\frac{1}{2}$  della lunghezza del pezzo, quale dei due limiti sia il minore. Passanti: lunghezza massima 1 m o  $\frac{1}{4}$  della lunghezza del pezzo, quale dei due limiti il minore; se alle estremità, lunghezza massima due volte la larghezza del segato.

4) Ammessi solo fori con alone nerastro, oppure fori rotondi, senza alone nerastro, di diametro compreso tra 1,5 e 2,5 mm (di Anobidi), purché l'attacco sia sicuramente esaurito, per un massimo di 10 fori per m di lunghezza (somma di tutte le facce), distribuiti uniformemente.

5)  $s$  è espresso come rapporto tra la proiezione dello smusso su un lato del segato e la dimensione totale del lato stesso.

---

*Tabella 3.3.13 Regola di classificazione per il Pino Marittimo Sardo*

## 3.4 La classificazione a Macchina

### 3.4.1 Introduzione

La classificazione a macchina consiste nella misurazione strumentale di una o più proprietà di un elemento di legno strutturale, per assegnare ad esso una classe strutturale. Perché la classificazione sia efficiente, tali proprietà devono risultare ben correlate con le caratteristiche fisico-meccaniche degli elementi classificati.

Le tecnologie utilizzate per rilevare le proprietà dell'elemento ligneo sono diverse. Nelle macchine più diffuse vengono i metodi utilizzati sono l'applicazione di carico con misura della deformazione, l'induzione di vibrazioni in flessione o in compressione, la misurazione della velocità di ultrasuoni, la scansione con raggi X, la scansione laser, l'analisi d'immagine. I diversi metodi possono essere utilizzati singolarmente o in combinazione tra loro

Le proprietà rilevate sono generalmente il modulo di elasticità statico a flessione o a trazione, il modulo di elasticità dinamico a flessione, la massa volumica ed il fattore di nodosità.

Tutti i metodi utilizzati per rilevare le proprietà dell'elemento da classificare non devono compromettere le le caratteristiche meccaniche dello stesso, tranne nel caso di elementi sottoposti a cariche questo rischio non esiste.

A completamento della classificazione, è sempre necessario un controllo visuale delle caratteristiche che possono sfuggire alle macchine classificatrici (Brunetti et al. 2014).

Ogni macchina utilizzata per la classificazione ha bisogno di una certificazione e continui test di controllo. Sono due le metodologie di controllo previste dalla EN 14081 per la classificazione a macchina: machine control e output control.

La machine control prevede che la macchina sia "settata" e certificata attraverso prove preliminari (prove iniziali di tipo - Initial Type Testing – ITT), nel corso delle quali si effettuano test distruttivi per verificare la bontà delle correlazioni tra le proprietà rilevate dalle macchine e le reali proprietà del legname. Tali prove devono essere effettuate per ogni specie e provenienza geografica del legname, nonché devono essere svolte su un intervallo di sezioni rappresentativo degli assortimenti che dovranno essere classificati.

L'output control invece prevede che il materiale classificato in produzione sia testato a campione, con regole ben precise, in modo da garantire la sicurezza della classificazione stessa. Proprio per la sua natura l'output control è più adatto ad aziende con produzioni molto omogenee, sia in termini di specie che di dimensioni e non è molto diffuso in Europa (Brunetti et al. 2014).

La EN 14081 descrive le modalità di validazione delle macchine classificatrici. Un importante numero di prove distruttive e di analisi statistiche sono necessari per definire i settaggi che le varie

macchine dovranno utilizzare. Una volta definito il settaggio, che sarà specifico per ogni specie e provenienza, la macchina potrà assegnare una classe (tra quelle indicate dalla EN 338) all'elemento ligneo analizzato.

La classificazione a macchina rappresenta un argomento relativamente nuovo per il panorama Italiano. Per le imprese di dimensioni medie o piccole il problema di dotarsi di una macchina classificatrice è principalmente di tipo economico. Il secondo problema (se parliamo della realtà italiana) è che non sempre le macchine classificatrici in commercio hanno i settaggi certificati per il tipo di legname che si vuole produrre e certificare.

I vantaggi dell'utilizzo di una macchina classificatrice sono comunque indiscutibili, l'elevata ripetibilità dei risultati e l'elevato numero di elementi che possono essere classificati nell'unità di tempo sono solo alcuni di essi.

Altri importanti vantaggi sono le rese più alte dei segati e la possibilità di attribuire ai segati classi di resistenza più elevate rispetto a quelle attribuibili con la classificazione a vista. Questo è dovuto principalmente al fatto che nella classificazione a macchina si misurano proprietà del legname meglio correlate alla resistenza rispetto alla classificazione a vista.

Nella Tabella 3.1.2 è riportato un esempio di settings definiti per una macchina classificatrice che misura il modulo di elasticità dinamico: per una data specie legnosa (larice europeo) di una certa provenienza geografica (Francia ed Italia), sono definite 7 possibili combinazioni di classi di resistenza, alternative tra loro. Sulla base delle caratteristiche della materia prima, ed in funzione delle richieste dei clienti, il produttore può preventivamente selezionare la combinazione che ritiene più opportuna. Come si può notare, con la classificazione a macchina sono previste anche classi di resistenza non ottenibili attraverso la classificazione a vista. (Brunetti et al. 2014).

L'introduzione del marchio CE ha accelerato l'introduzione del controllo di qualità nei centri di produzione di legname da costruzione. La qualità finale del prodotto legno è rappresentato oggi da un mix di caratteristiche strutturali ed estetiche, che può essere garantito solo da un efficace impianto di produzione.

Source country or countries	Source mark <sup>a</sup>	Species	Permitted timber size <sup>b</sup> (mm)	Grade <sup>c</sup> or grade combination	Model value	
						E <sub>mod</sub>
France Italy	FR IT	European larch <i>Larix decidua</i>	29 ≤ t <sub>n</sub> ≤ 198 90 ≤ b <sub>n</sub> ≤ 242	C40		16 200
				C30		11 900
				C18		7 200
				C40		16 200
				C24		9 800
				C16		6 700
				C35		15 200
				C27		10 800
				C18		8 100
				C35		15 200
				C24		10 100
				C16		7 400
				C35		15 200
				C18		6 700
				C30		14 000
				C24		10 500
				C18		8 200
				C30		14 000
C24		10 500				
C16		6 700				

Tabella 3.4.1 Esempio di setting per una macchia classificatrice.

### 3.4.2 Materiale e metodo

In questa fase della sono state utilizzate due macchine classificatrici il VISCAN Compact (già descritto nel paragrafo 3.2.2) ed il GoldenEye702 entrambe realizzate alla Microtec (che ha collaborato alla ricerca e messo a disposizione i suoi locali e le sue macchine).

Le tavole hanno subito il processo di essiccazione prima di arrivare a Bressanone dove, nei locali della Microtec si sono svolte tutte le operazioni di misura.

Sono state scansionate con il GoldenEye702 tutte le 840 tavole di pino marittimo e su queste si sono anche ripetute le misure descritte nel capitolo della pre-classificazione con il VISCAN Portable.

Questa volta le tavole erano già essiccate (con misure di umidità tra il 10 ed il 12%) e si è quindi provveduto alla misura dell'umidità.

Le sezioni nominali delle tavole analizzate sono le seguenti: 34x85, 34x105, 48x155, 53x180 mm

Dimensioni (mm)			Numero di tavole		Volume (m <sup>3</sup> )	
spessore	larghezza	lunghezza	Prov 1	Prov 2	Prov 1	Prov 2
34	105	3200	140	140	1.73	1.73
48	155	3700	140	140	4.14	4.14
34	85	3200	100	100	1.01	1.01
53	180	4100	40	40	1.71	1.71
TOT			420	420	8.59	8.59

Tabella 3.4.2 Riepilogo delle tavole scansionate con il GoldenEye

Per mezzo del GoldenEye si può ottenere la misura della densità in molte posizioni nella lunghezza delle tavole tramite un sistema di raggi x a bassa potenza e di sensori ultra sensibili. La sorgente dei raggi x a bassa potenza non necessita di raffreddamento e schermatura. In figura 3.4.1 si può vedere la macchina classificatrice GoldenEye702 utilizzata nello stabilimento della Microtec.

Nella pratica queste le due macchine classificatrici (GoldenEye702 ed il Viscan) possono essere usate in combinazione tra loro (allora il sistema viene chiamato GoldenEye706, Figura 3.4.3) o da sole. I sistemi realizzati alla Microtec sono pensati per lavorare “senza contatto” con l’elemento ligneo da analizzare.

*“GoldenEye uses X-ray to determine knots and density of a board. The radiation is partially absorbed, depending on the thickness, moisture content and density of the board. This results in a grey scale image which can be processed by means of image processing. Since the density of knots is approximately twice as high as the density of the surrounding clear wood, knots can be detected accurately regarding size and position”.* (Giudiceandrea 2005)



Figura 3.4.1 GoldenEye nei locali della Microtec

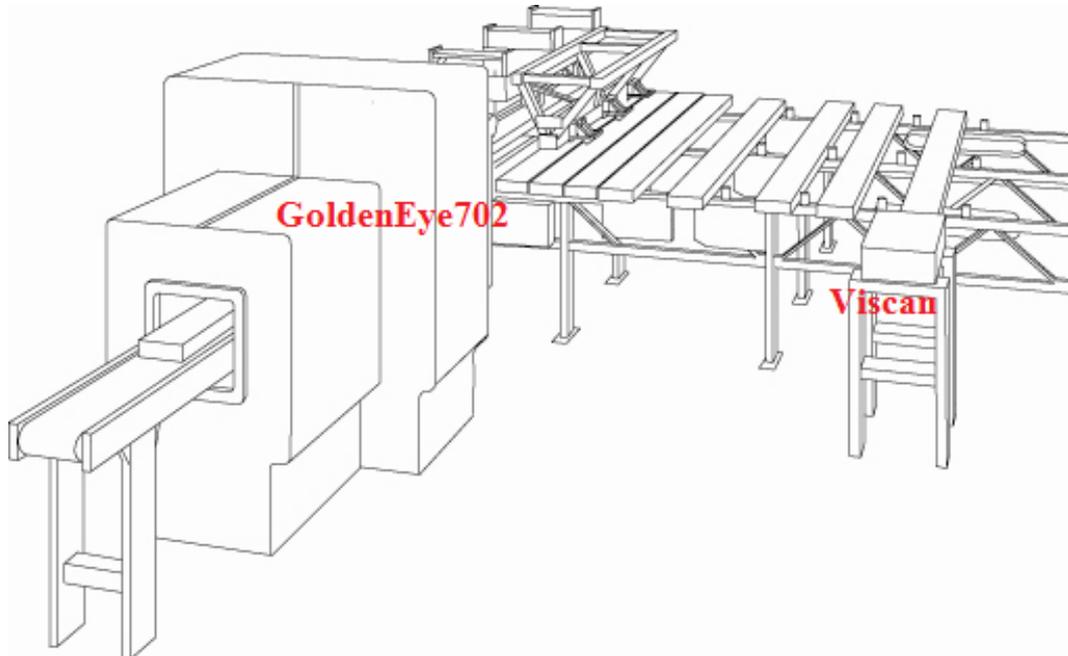


Figura 3.4.2 Combinazione GoldenEye702 e Viscan

### 3.4.3 Analisi di correlazione

Come anticipato all'inizio del paragrafo in tutte le tavole dopo il processo dell'essiccazione è stato rimisurato il MOEdyn tramite il VISCAN Portable. Nella figura 3.4.3 si può osservare che tra il

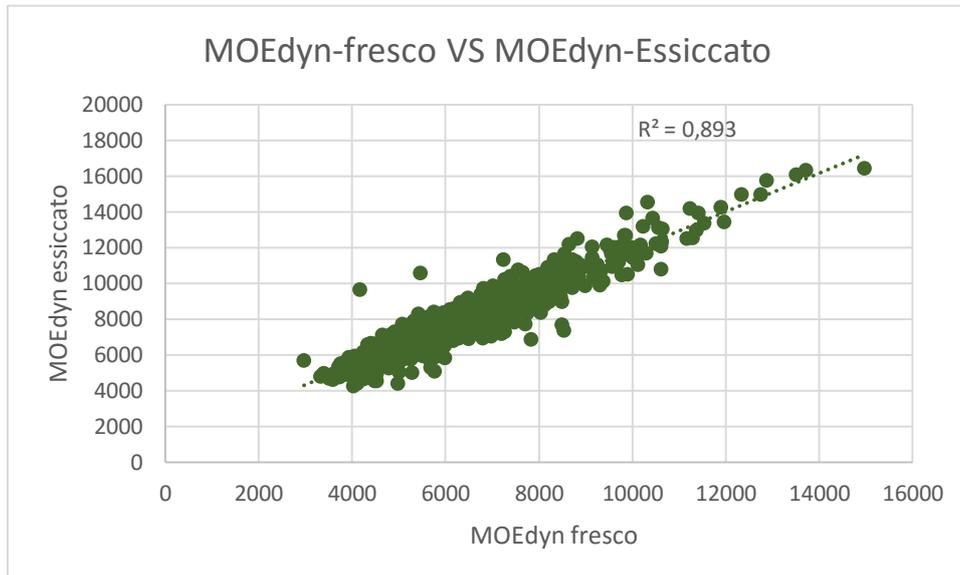


Figura 3.4.3 Correlazione tra MOEdyn fresco ed essiccato

MOEdyn misurato prima e dopo il processo di essiccazione c'è una correlazione molto forte e questo è un dato sicuramente importante perché permette di selezionare le tavole già prima dell'essiccazione comportando un importante risparmio energetico nella filiera.

#### 3.4.3.1 Correlazione tra MOE dinamico e caratteristiche fisico-meccaniche

Nella Tabella 3.4.3 sono riportati i coefficienti di correlazione ( $R^2$ ) tra l'IP della macchina (MOE dinamico corretto per l'umidità) per i 4 subsamples e le 3 caratteristiche meccaniche del legno (determining properties). Le stesse correlazioni si possono osservare nei grafici delle figure 3.4.4/5/6.

SubSmples	MOR (N/mm <sup>2</sup> )	MOE (N/mm <sup>2</sup> )	MV (kg/m <sup>3</sup> )
A	0,49	0,84	0,28
B	0,33	0,88	0,31
C	0,42	0,80	0,08
D	0,43	0,85	0,09
Tutte	0,45	0,84	0,16

Tabella 3.4.3 correlazioni ( $R^2$ ) tra MOEdyn e MOE, MOR e MV

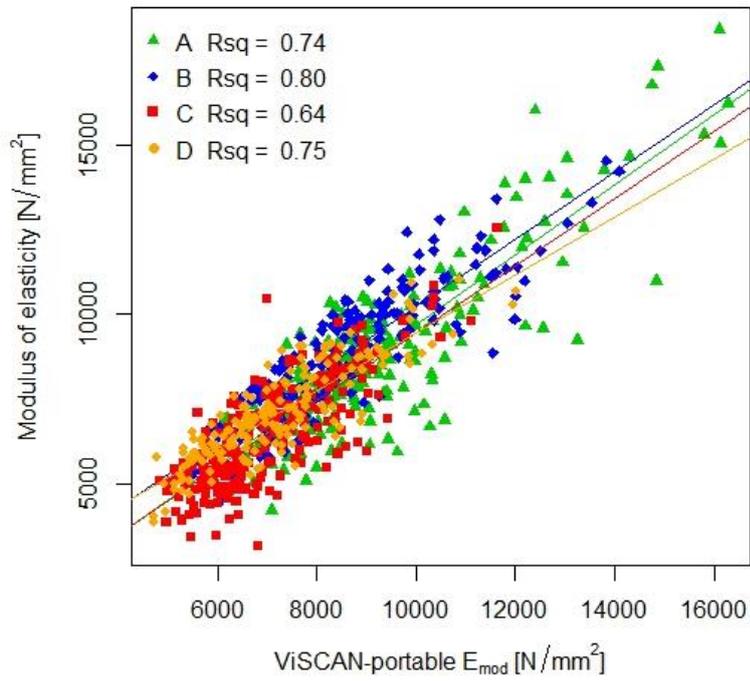


Figura 3.4.4 Correlazione tra MOEdyn e MOE statico locale

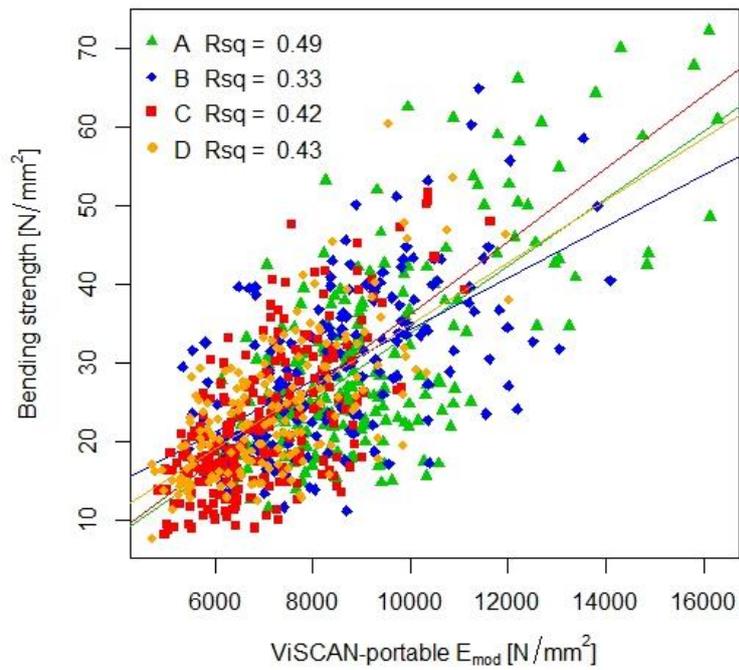


Figura 3.4.5 Correlazione tra MOEdyn e MOR

Dall'osservazione delle Tabella 3.4.3 l'IP della macchina per l'intero campione **è fortemente correlato con il MOE statico (0.84)**, in misura minore col MOR (0.45) e **non è correlato con la massa volumica (0.16)** soprattutto per i sub-samples C e D.

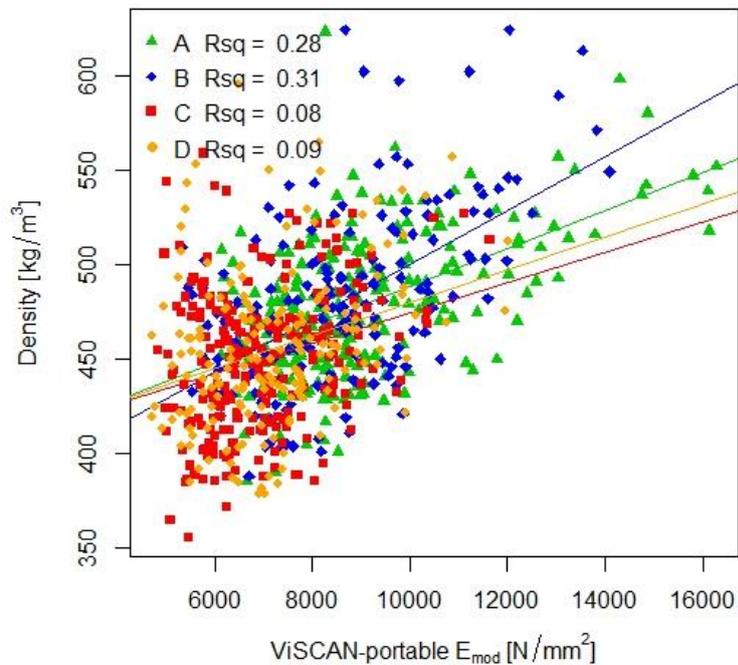
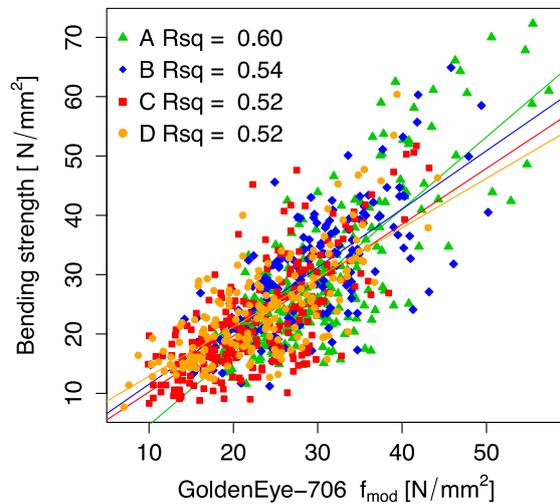
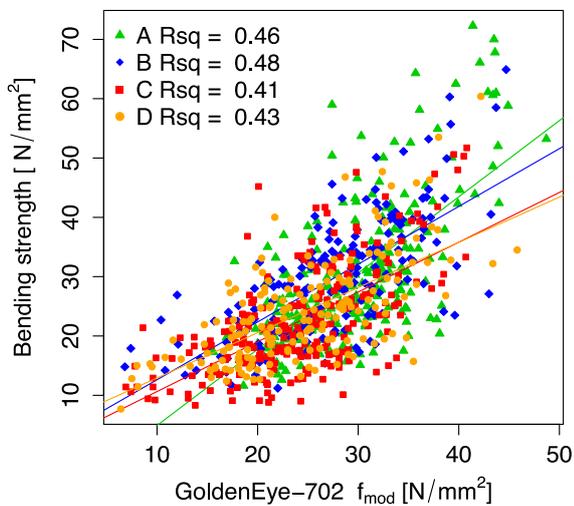
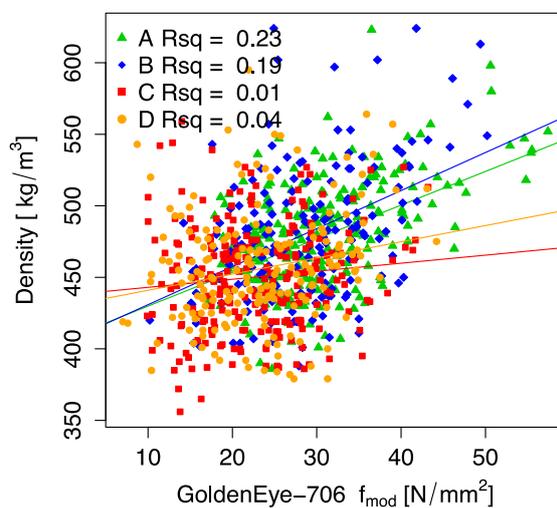
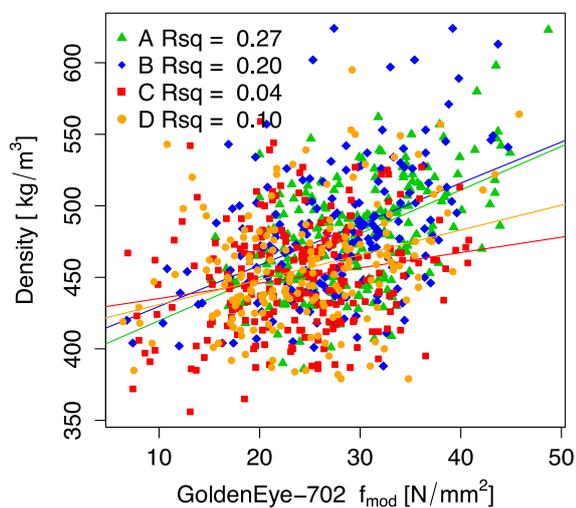
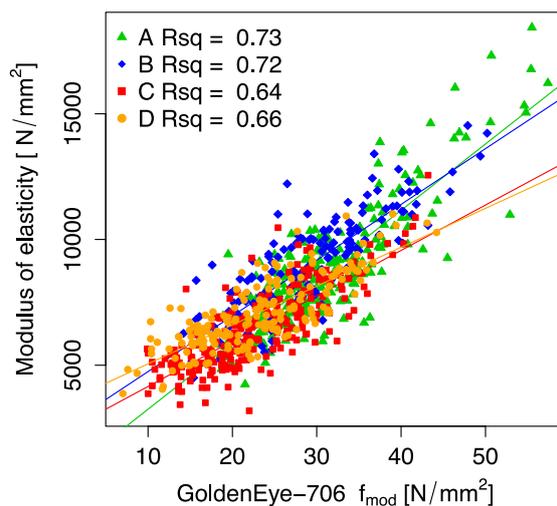
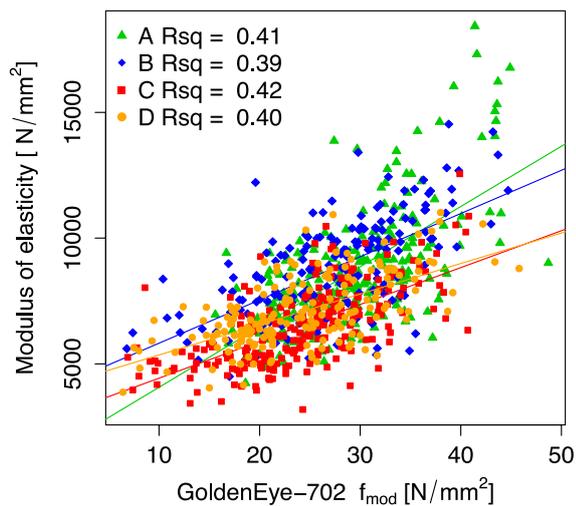


Figura 3.4.6 Correlazione tra MOEdyn e MV

I grafici delle figure che seguono mostrano le correlazioni tra i parametri rilevati dal GoldenEye702 ed il GoldenEye706 con le prove sperimentali





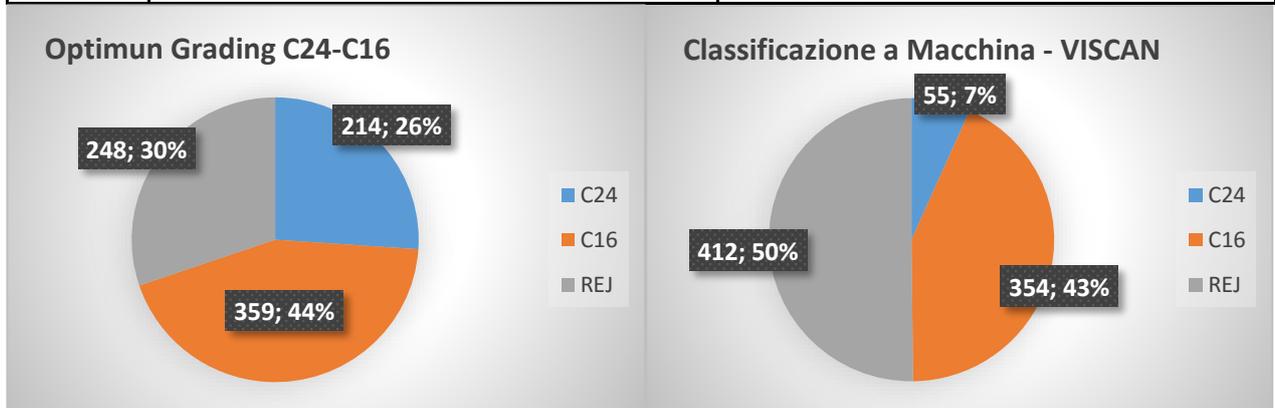
Si può osservare come le correlazioni delle proprietà meccaniche con i parametri rilevati dal GoldenEye706 siano più alte di quelle del GoldenEye702. La differenza sta nel fatto che il GoldenEye706 può predire tutte tre le “determining properties” indipendentemente una dall’altra raggiungendo oggi le più alte prestazioni nella classificazione industriale del legno strutturale. **Nel caso di una produzione locale di tavole di pino marittimo sardo con volumi ridotti i costi di acquisto e gestione di una macchina classificatrice come il GoldenEye706 sarebbero comunque non sostenibili.**

### 3.4.3.2 Analisi delle rese

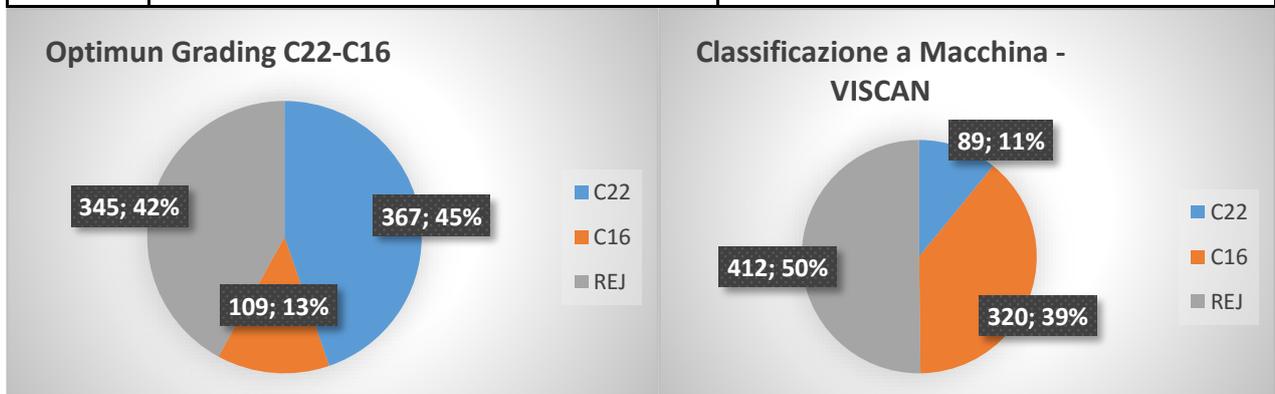
Si sono confrontate le rese della classificazione ottimale, di quella a macchina e di quella a vista. Nel fare questo sono state scelte diverse combinazioni di classi C24-C16-R, C22-C16-R, C18-C14-R, C16-C14-R e C16-C12-R. L'ultima combinazione è stata pensata nell'ipotesi di definire una classe, inferiore alla C14 quindi non compresa nella EN338. Per nuova classe C12 si sono definiti il MOE=6000 MPa, il MOR=12 MPA e la MV=280 Kg/m<sup>3</sup>.

Si riportano di seguito le tabelle ed i grafici con le rese per le varie combinazioni

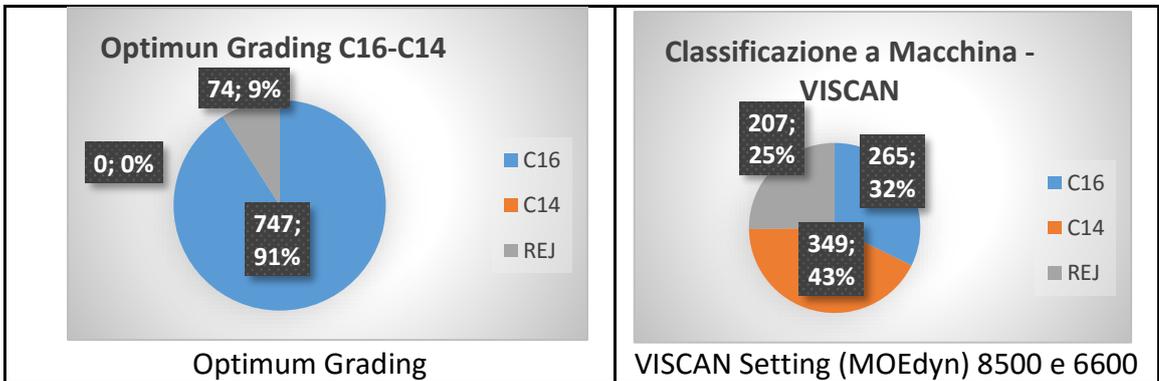
Grade	Optimum Grading				VISCAN Setting (MOEdyn) 10900 e 7700			
	Num	MOR	MOE	DEN	Num	MOR	MOE	DEN
C24	214	24.4	10500	427	55	24.9	10500	427
C16	359	16.5	7600	401	354	16.5	7600	401
REJ	248	10.3	5600	390	412	10.3	5600	390



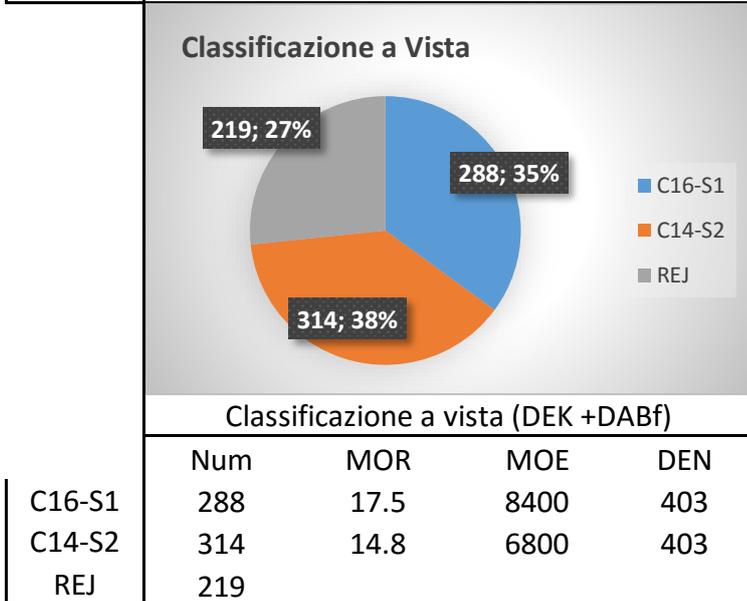
Grade	Optimum Grading				VISCAN Setting (MOEdyn) 10300 e 7700			
	Num	MOR	MOE	DEN	Num	MOR	MOE	DEN
C22	367	22.5	9500	414	89	22.3	11600	456
C16	109	16.7	7600	388	320	16	8500	421
REJ	345	10.9	5900	392	412	11.4	6300	389



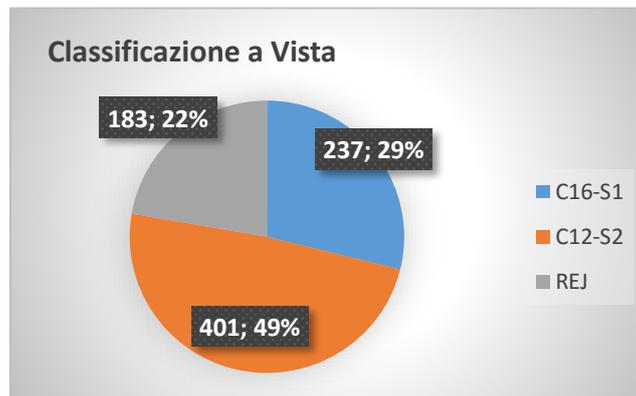
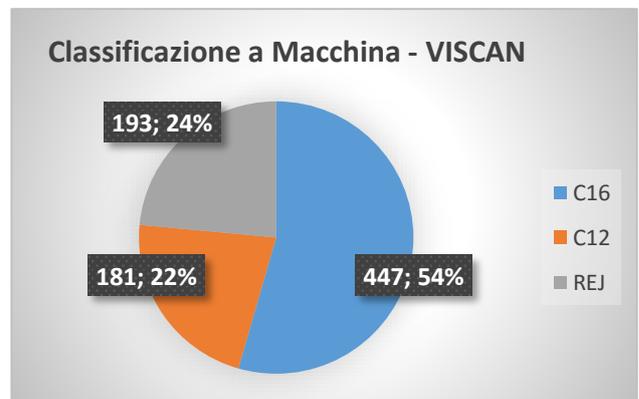
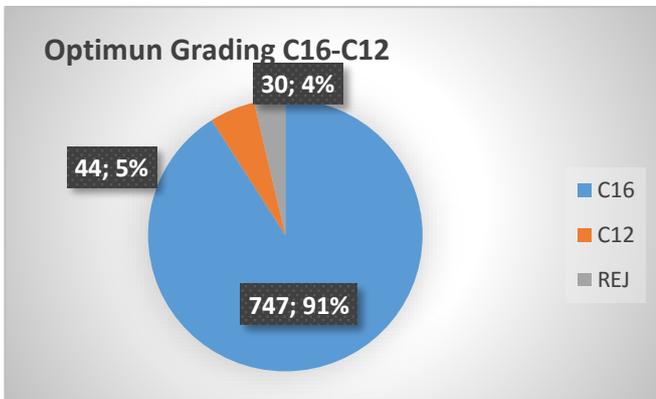
Grade	Optimum Grading				VISCAN Setting (MOEdyn) 9500 e 6300			
	Num	MOR	MOE	DEN	Num	MOR	MOE	DEN
C18	587	18.1	8600	401	135	18.9	11000	441
C14	79	14.2	6700	406	528	14	7600	402
REJ	155	9.4	5200	388	158	10.1	5500	387

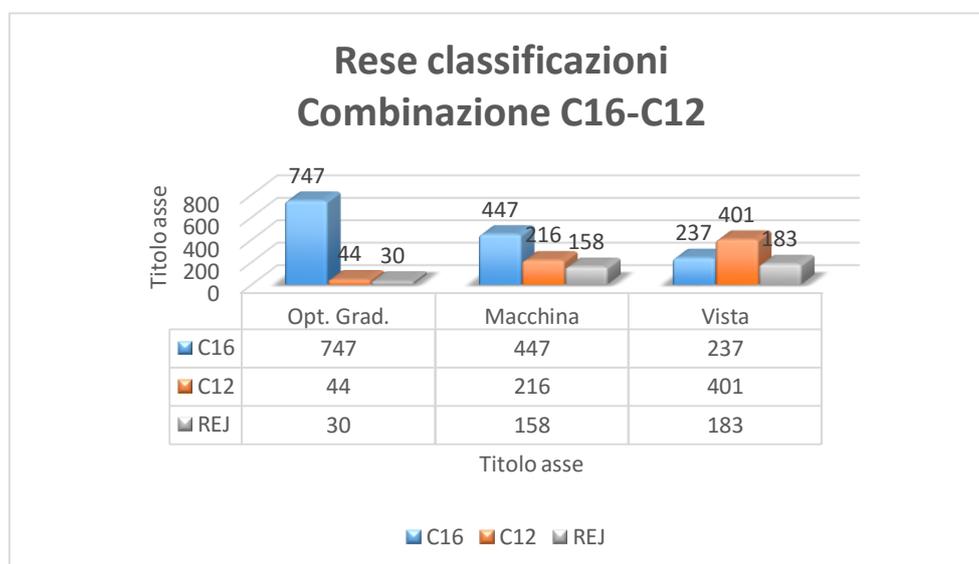
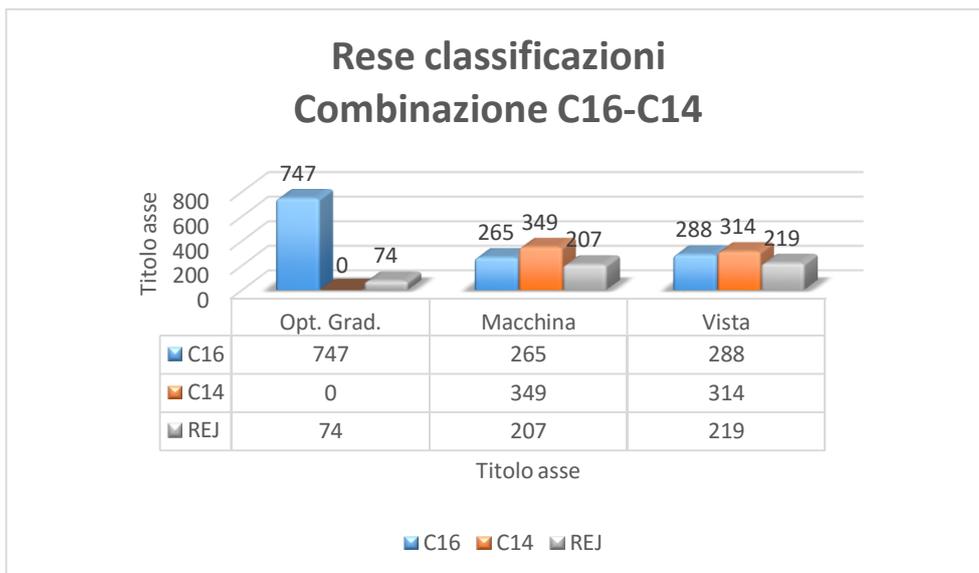


Grade	Optimum Grading				VISCAN Setting (MOEdyn) 8500 e 6600			
	Num	MOR	MOE	DEN	Num	MOR	MOE	DEN
C16	747	16	8000	402	265	17.5	9900	432
C14	0	0	0	0	349	14.2	7300	400
REJ	74	8	5500	389	207	10.5	5600	387



Grade	Optimum Grading				VISCAN Setting (MOEdyn) 7500 e 6300			
	Num	MOR	MOE	DEN	Num	MOR	MOE	DEN
C16	747	16	8000	402	447	16.1	9000	425
C12	44	12.1	5900	400	181	12.6	6700	390
REJ	30	8	4800	364	193	10.3	5500	387
Class. a vista (DEKw DEKt + DABw DABt)								
	Num	MOR	MOE	DEN				
C16-S1	237	16.5	8500	401				
C12-S2	401	13.3	6900	406				
REJ	183							





Inoltre, a seguito delle misurazioni effettuate con le macchine della ditta Microtec (GoldenEye e Viscan Portable) sono state valutate le correlazioni tra i parametri ottenuti e le proprietà meccaniche delle tavole di pino marittimo testate, ottenendo ottimi risultati (tabella 3.4.4). Dopo la scansione ai raggi x la macchina ha restituito una serie di parametri numerici (chiamati Kn01-Kn018-Kn033) che sono stati messi in correlazione con il MOR ed il MOE. Questi parametri sono stati ricalibrati in funzione dei dati ottenuti dalle prove distruttive. La ricerca del setting ottimale del GoldenEye è un lavoro complesso, è coperto da copyright e non può essere descritto in questa tesi. Come in altri casi di studio analizzati (Brunetti et al., 2012) le proprietà non distruttive misurate a macchina sono risultate più efficienti nel predire le caratteristiche del materiale.

### 3.5 Commenti e conclusioni

Dall'analisi descrittiva delle caratteristiche fisico-meccaniche, si può affermare che il legno di pino marittimo sardo analizzato in questo lavoro non possiede qualità strutturali elevate: MOR di 26,3 N/mm<sup>2</sup>, MOE di 7160 N/mm<sup>2</sup> e massa volumica di 466 kg/m<sup>3</sup>.

Distinguendo tra le due provenienze, la A, risulta essere di qualità inferiore, questo è da attribuirsi alle caratteristiche strutturali del popolamento da cui il materiale è stato ottenuto.

**Quindi è possibile affermare che il legno di pino marittimo sardo è comunque di qualità tale da permetterne l'uso anche nell'ambito del legno strutturale, come ad esempio la produzione di pannelli x-lam, nella quale è possibile l'utilizzo di legno anche di bassa qualità.**

Nel confronto tra le rese della classificazione a macchina e della classificazione a vista, sulle tavole di pino marittimo sardo, si sono riscontrate differenze. Questo è dovuto al fatto che la classificazione a macchina si basa sull'analisi strumentale di una proprietà meccanica del legno (Brunetti *et al.*, 2012), che nel caso di ViSCAN è il modulo elastico dinamico, il quale è ben correlato con la resistenza. La classificazione a vista è impostata sulla valutazione delle caratteristiche osservabili ad occhio nudo, le quali sono correlate in misura minore con la resistenza. Dal confronto tra i due metodi di classificazione, tra le variabili considerate nella classificazione a vista e l'IP della macchina classificatrice, quest'ultima è quella maggiormente correlata con le *determinig properties*.

Entrambi i metodi, comunque, risultano essere cautelativi soprattutto per le classi di resistenza più elevate, poiché si basano sullo stesso parametro di sicurezza: il 5°percentile, il quale garantisce che il 95% del materiale assegnato alla classe o categoria, abbia le caratteristiche pari o superiori a quelle indicate nella norma UNI EN 338.

La classificazione a macchina risulta essere più efficiente, rispetto a quella a vista, in quanto porta ad una selezione del materiale più vicina alla realtà (dal confronto con la classificazione ottimale) e in quanto mostra rese più elevate e meno scarti. **La classificazione a vista, oltre a discostarsi maggiormente dalla condizione reale del materiale, considera un numero maggiore di tavole non idonee all'impiego strutturale.**

In ultima analisi, dal confronto tra le misure ottenute sul materiale fresco e su quello essiccato, si può affermare che l'efficienza di ViSCAN è alta anche nella misura del legno fresco (forte correlazione ( $r=0.89$ ) tra il MOE dinamico sul fresco e quello sull'essiccato). **Si dimostra così la possibilità di classificare anche il legno allo stato fresco.**

**La classificazione a macchina** risulta essere più efficiente rispetto a quella a vista, sia per la qualità sia per la resa (quantità) del materiale (minore scarto).

Un altro vantaggio di questo metodo risiede nella sua versatilità ed adattabilità alle esigenze del produttore e alla qualità del materiale (Brunetti *et al.*, 2012). La classificazione, infatti, avviene

secondo diverse combinazioni di classi, che implicano che il produttore possa decidere, in base alle esigenze commerciali, di privilegiare la qualità del materiale impostando classi più alte o di aumentare la quantità (rese) impostandole più basse. Per effettuare questo però è necessario variare i settaggi della macchina classificatrice, per i quali sono necessarie un numero elevato di prove distruttive. Questo può rappresentare un limite in quanto l'utilizzo delle macchine classificatrici, è possibile solo per quelle specie e provenienze per cui sono stati calcolati i settaggi. Uno degli obiettivi del progetto ED.EN.SO. è appunto quello di definire i settaggi per la classificazione a macchina per le specie legnose locali della Sardegna (iniziando appunto dal pino marittimo). L'efficienza della classificazione a macchina è rappresentato sia dall'alta ripetibilità delle misure (99% per il sistema ViSCAN ([www.microtec.eu](http://www.microtec.eu))) sia dalla velocità di classificazione, ricordando che comunque nella classificazione a macchina è richiesto la presenza di personale esperto e qualificato, per un controllo preliminare del pezzo. Inoltre, ViSCAN-Portable avrebbe il vantaggio, una volta ottenuta la certificazione, di poter essere usato anche su legno fresco. L'ostacolo principale del sistema ViSCAN è rappresentato, soprattutto per le aziende di medio - piccole dimensioni, dall'elevato costo iniziale dello strumento classificatore e dalla necessità di inserirlo all'interno di un ciclo di produzione. L'innovazione di questo strumento portatile consiste nell'aver trasferito un sistema di classificazione utilizzato nelle linee produttive solo dalle grandi aziende, in uno strumento portatile, svincolato quindi dai cicli produttivi e nella possibilità di poterlo utilizzare in modo consorziato dalle imprese locali di medio - piccole dimensioni, al fine di ammortizzare i costi.

**La classificazione a vista**, invece, risulta meno efficiente della macchina classificatrice in quanto porta a rese inferiori. Questo, è dovuto alla difficoltà di stimare la resistenza meccanica del materiale e di trovare il parametro con cui è meglio correlata. Uno dei suoi limiti è rappresentato dalla possibilità di classificare secondo una combinazione di classi fissa e a volte incompleta (Brunetti *et al.*, 2012). Tuttavia la classificazione a vista è un procedimento affidabile, se eseguito da personale esperto e qualificato (Brunetti *et al.*, 2012), il quale rappresenta l'unico investimento economico da parte dell'azienda, a differenza della spesa iniziale per la macchina classificatrice.

### 3.5.1 Bibliografia

- EN 384, Structural timber – Determination of characteristic values of mechanical properties and density.
- EN 14081-1, Timber structures – Strength graded structural timber with rectangular cross-section – Part 1: General requirements.
- EN 14081-2, Timber structures – Strength graded structural timber with rectangular cross-section – Part 2: Machine Grading - Additional requirements for initial type testing.
- EN 14081-3, Timber structures – Strength graded structural timber with rectangular cross-section – Part 3: Machine Grading - Additional requirements for factory production control.
- Brunetti M., Burato P., Cremonini C., Negro F., Nocetti M. e Zanuttini R. 2012. Legname di larice per impieghi strutturali. Classificazione a vista e a macchina. Sherwood 188: 5-10
- Brunetti M., Luchetti M., Nocetti M., Togni M. 2011. Impiego del legno in edilizia. Nuove regole e nuove opportunità. Sherwood 75: 42-45
- UNI 11035-2 Legno strutturale - Classificazione a vista dei legnami secondo la resistenza meccanica - Parte 2: Regole per la classificazione a vista secondo la resistenza meccanica e valori caratteristici per tipi di legname strutturale
- UNI EN 338 Legno strutturale - Classi di resistenza
- UNI EN 1310 Legno tondo e segati - Metodo di misurazione delle caratteristiche
- UNI EN 13183-1 Umidità di un pezzo di legno segato - Determinazione tramite il metodo per pesata
- UNI EN 13183-2 Umidità di un pezzo di legno segato - Stima tramite il metodo elettrico
- UNI EN 13556 Legno tondo e segati - Nomenclatura dei legnami utilizzati in Euro

## 4 Capitolo 4: Il xlam

### 4.1 Introduzione alla tecnologia del x-lam

Il settore delle costruzioni in legno in Italia è in forte sviluppo grazie all'introduzione di nuovi sistemi costruttivi, spesso prodotti in ambito industriale, che permettono di velocizzare i tempi di costruzione dell'opera rispetto ai sistemi più tradizionali. Appartengono a questa categoria gli edifici con struttura a pannelli lignei portanti del tipo X-lam, ottenuti dalla sovrapposizione di strati di tavole di legno incrociate, connessi tramite incollaggio o chiodatura, in modo da formare un elemento bidimensionale. I pannelli X-lam vengono utilizzati sia nelle pareti (figura 4.1.2 sinistra), nelle quali agiscono principalmente carichi nel piano (comportamento a lastra), che nei solai (figura 4.1.2 destra), nei quali agiscono carichi fuori dal piano (comportamento a piastra).

I pannelli x-lam (chiamati anche CLT – Cross Laminated Timber) sono realizzati tramite la sovrapposizione di vari strati di tavole, almeno tre e fino a undici o più, alternando la direzione delle tavole con angoli generalmente di 90 gradi (Figura 4.1.1)

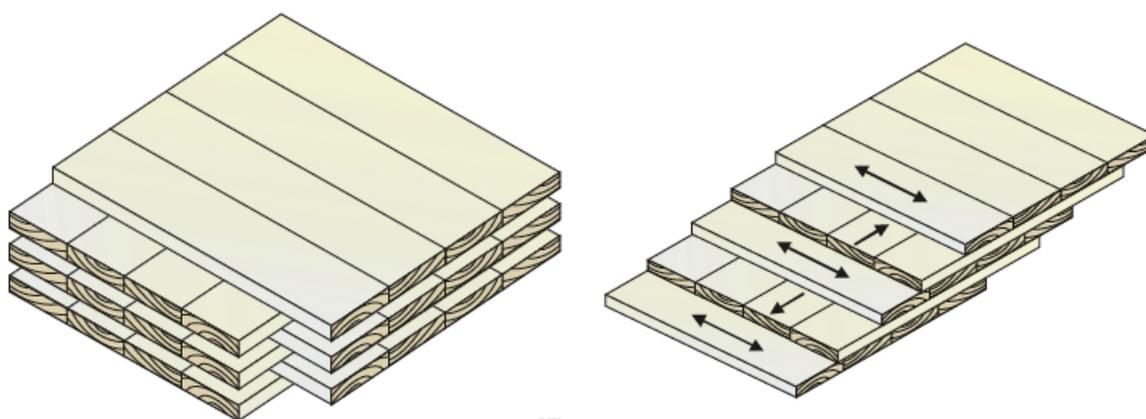


Figura 4.1.1 Il pannello x-lam



Figura 4.1.2 Utilizzo del xlam come elemento parete (sinistra) e solaio (destra)

Alcune produzioni prevedono anche due strati di tavole consecutivi nella stessa direzione, generalmente si tratta degli strati longitudinali esterni. In figura 4.1.3 si possono osservare alcune tra le stratigrafie più comuni ed attualmente in produzione.

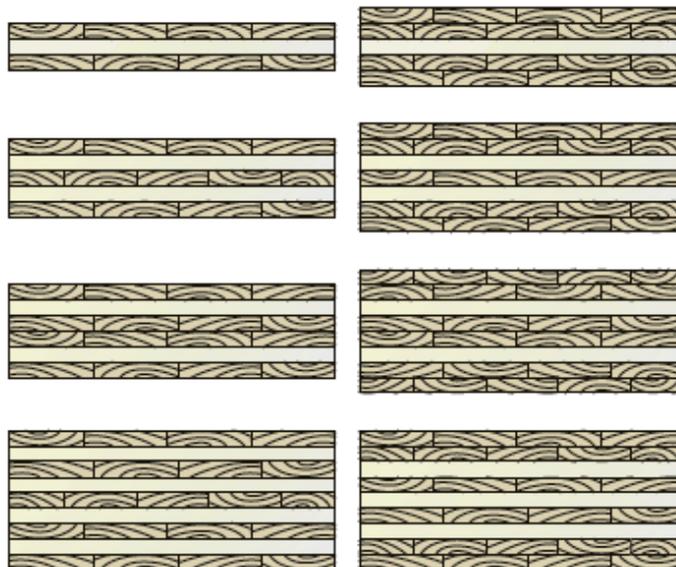


Figura 4.1.3 Alcune possibili stratigrafie

Gli spessori delle tavole variano da 10 a 50 mm con larghezze tra gli 80 e 240 mm. Le tavole dopo la classificazione a vista o a macchina sono giuntate per ottenere lunghezze dei pannelli fino a 14 m.

Generalmente le tavole sono state precedentemente essiccate in forno (anche con sistemi che funzionano con il sottovuoto). Le prestazioni dei pannelli dipendono da diversi fattori e variano da un produttore all'altro. Si è lavorato molto ultimamente per coordinare i produttori con lo scopo di uniformare le produzioni ma questo processo sembra essere di non facile soluzione.

La classe di resistenza più comunemente usata in Europa è il C24 (EN338). I pannelli che vengono utilizzati per le pareti sono a volte realizzati con tavole di classe inferiore.

La produzione del xlam può essere schematizzata (Figura 4.1.6) nelle seguenti fasi:

- la classificazione delle tavole, (dopo il processo di essiccazione che generalmente avviene in forno e solo in rari casi avviene tramite essiccazione naturale) che consiste nel taglio di quelle parti delle tavole che presentano difetti (nodi, deviazione della fibratura, etc..) non ammessi nella classe resistente richiesta e nell'unione delle stesse tramite giunti a dita (figura 4.1.5)
- selezione delle tavole e divisione delle stesse in base al posizionamento delle stesse nel pannello: tavole per gli strati longitudinali e per quelli trasversali.
- piallatura delle tavole
- incollaggio delle tavole

- pressatura dei pannelli e maturazione
- taglio dei pannelli con pantografo cnc a 5 assi in base al disegno del progettista



Figura 4.1.5 Individuazione del difetto (sinistra) giunto a dita (destra)

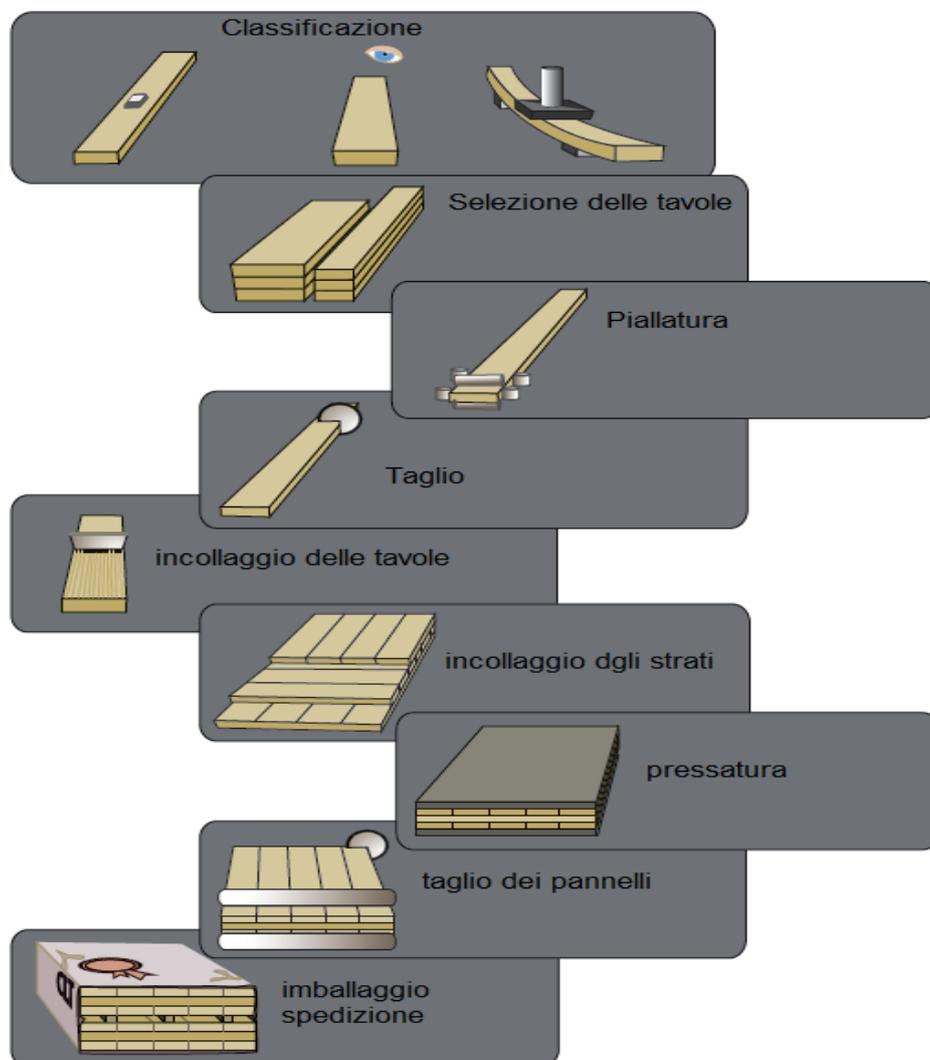


Figura 4.1.6 Produzione dei pannelli x-lam

Il materiale base dei pannelli è costituito in genere da tavole essiccate in forno con un contenuto di umidità  $U = 12 \pm 2 \%$  che vengono classificate prima del loro utilizzo in accordo per esempio alla EN 14081 o alla DIN 4074-1. Ogni strato deve essere composto da tavole della stessa classe o la classe dichiarata per quello strato deve essere quella più bassa utilizzata.

Le presse utilizzate nella fase dell'incollaggio sono principalmente di due tipi (figura 4.1.7): le presse idrauliche e le presse sottovuoto (come quella utilizzata nella produzione dei provini testati in questa ricerca) Nel caso delle presse idrauliche le pressioni di incollaggio variano da 0,1 a 1,00 MPa mentre nel caso di presse sottovuoto si hanno pressioni da 0,05 a 0,10 MPa. Al momento non esiste una normativa che regola l'incollaggio in tutti i suoi aspetti. La EN 16351 dà alcune indicazioni sull'incollaggio ma non in maniera completa e per quanto riguarda le pressioni da applicare rimanda



Figura 4.1.7 Pressa idraulica (sinistra) e pressa sottovuoto (destra)

alle indicazioni del produttore. In teoria, se le tavole che compongono i pannelli hanno le facce perfettamente piane e non hanno subito deformazioni importanti dopo il processo di essiccazione, allora pressioni molto basse o nulle sarebbero sufficienti. In realtà le tavole spesso presentano superfici irregolari e si deformano dopo l'essiccazione e una pressione adatta e necessaria per ottenere un incollaggio efficiente.

La pressione minima necessaria dovrebbe soddisfare diversi requisiti come ad esempio garantire che la colla venga distribuita uniformemente su tutta la superficie o che lo spessore della colla sia quello indicato dal produttore. Riguardo questo aspetto bisogna differenziare le colle in due grandi gruppi: quelle espansive (resine poliuretaniche, mono e bi-componenti) e quelle a ritiro (resine aminoplastiche e fenoplastiche). Per le prime è richiesta una pressione di incollaggio di 0,01-0,10 MPa mentre per le seconde è necessaria una pressione più elevata tra 1,0 e 2,0 MPa. Indipendentemente dalle colle utilizzate le pressioni applicate devono essere tali da superare la resistenza alla deformazione delle tavole svergolate. L'entità della pressione esercitata deve essere regolata anche nel suo valore massimo. Una pressione eccessiva potrebbe danneggiare le tavole

superando la resistenza alla compressione ortogonale alle fibre o causando la completa fuoriuscita della resina dalla linea di colla. La pressione di incollaggio dovrebbe essere regolata quindi anche in base alla specie legnosa che compone il pannello. Se si ipotizza ad esempio una resistenza caratteristica  $f_{c,90,05} = 2,2$  MPa allora la pressione esercitata dalla pressa non dovrebbe superare 1,1 MPa (50% del valore caratteristico).

## 4.2 Le prove sperimentali sui pannelli

Le prove sperimentali effettuate avevano lo scopo di caratterizzare i pannelli realizzati con il pino marittimo con diverse stratigrafie (combinazioni di specie e classi) e spessori delle tavole. Le prove sono state effettuate unicamente per carichi ortogonali al piano del pannello. Nella tabella 4.2.1 sono riassunte le caratteristiche dei provini testati.

Configurazione	Tipo prova	Sigla	N° Provini	L (mm)	N° strati	Stratigrafia Specie (mm)	Class e strato	h tot pannello (mm)
	Flessione	60-PF-01M	10	1200	3	20-Abete	C24	60
	Taglio	60-PT-01M	7	600		20- Pino 20-Abete	C14 C24	
	Flessione	60-PF-01	10	1200	3	20 - Pino	C16	60
	Taglio	60-PT-01	7	600		20 - Pino 20 - Pino	C14 C16	
	Flessione	120-PF-01	10	240	3	40 - Pino	C16	120
	Taglio	120-PT-01	7	120		40 - Pino 40 - Pino	C14 C16	
	Flessione	100-PF-01	10	2000	5	20 - Pino	C16	100
	Taglio	100-PT-01	7	1000		20 - Pino 20 - Pino 20 - Pino 20 - Pino	C14 C16 C14 C16	

Tabella 4.2..1 Tabella riassuntiva dei provini

I profili prestazionali delle classi utilizzate nella realizzazione dei pannelli sono quelli dei C14, C16 e C24 della EN338 (tabella 4.2.2).

		Softwood species													Hardwood species						
		C14	C16	C18	C20	C22	C24	C27	C30	C35	C40	C45	C50	D18	D24	D30	D35	D40	D50	D60	D70
Strength properties (in N/mm <sup>2</sup> )																					
Bending	$f_{b,k}$	14	16	18	20	22	24	27	30	35	40	45	50	18	24	30	35	40	50	60	70
Tension parallel	$f_{t,k}$	8	10	11	12	13	14	16	18	21	24	27	30	11	14	18	21	24	30	36	42
Tension perpendicular	$f_{t90,k}$	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6
Compression parallel	$f_{c,k}$	16	17	18	19	20	21	22	23	25	26	27	29	18	21	23	25	26	29	32	34
Compression perpendicular	$f_{c90,k}$	2,0	2,2	2,2	2,3	2,4	2,5	2,6	2,7	2,8	2,9	3,1	3,2	7,5	7,8	8,0	8,1	8,3	9,3	10,5	13,5
Shear	$f_{v,k}$	3,0	3,2	3,4	3,6	3,8	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0	3,4	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0	4,5	5,0
Stiffness properties (in kN/mm <sup>2</sup> )																					
Mean modulus of elasticity parallel	$E_{0,05,k}$	7	8	9	9,5	10	11	11,5	12	13	14	15	16	9,5	10	11	12	13	14	17	20
5 % modulus of elasticity parallel	$E_{0,05,k}$	4,7	5,4	6,0	6,4	6,7	7,4	7,7	8,0	8,7	9,4	10,0	10,7	8	8,5	9,2	10,1	10,9	11,8	14,3	16,8
Mean modulus of elasticity perpendicular	$E_{0,05,k}$	0,23	0,27	0,30	0,32	0,33	0,37	0,38	0,40	0,43	0,47	0,50	0,53	0,63	0,67	0,73	0,80	0,86	0,93	1,13	1,33
Mean shear modulus	$G_{0,05,k}$	0,44	0,5	0,56	0,59	0,63	0,69	0,72	0,75	0,81	0,88	0,94	1,00	0,59	0,62	0,69	0,75	0,81	0,88	1,06	1,25
Density (in kg/m <sup>3</sup> )																					
Density	$\rho_k$	290	310	320	330	340	350	370	380	400	420	440	460	475	485	530	540	550	620	700	900
Mean density	$\rho_{mean}$	350	370	380	390	410	420	450	460	480	500	520	550	570	580	640	650	660	750	840	1080

Tabella 4.2:2 Profili prestazionali delle classi utilizzate secondo la EN 338: (2004)

#### 4.2.1 Prova di flessione per il calcolo del MOE e del MOR

La prima prova, effettuata su un totale di 40 pannelli (figura 4.2.1), è la classica prova di flessione a 4 punti indicata dalla EN 408. Con questa prova sono stati misurati il modulo elastico locale, il modulo elastico globale e la resistenza a flessione dei pannelli.

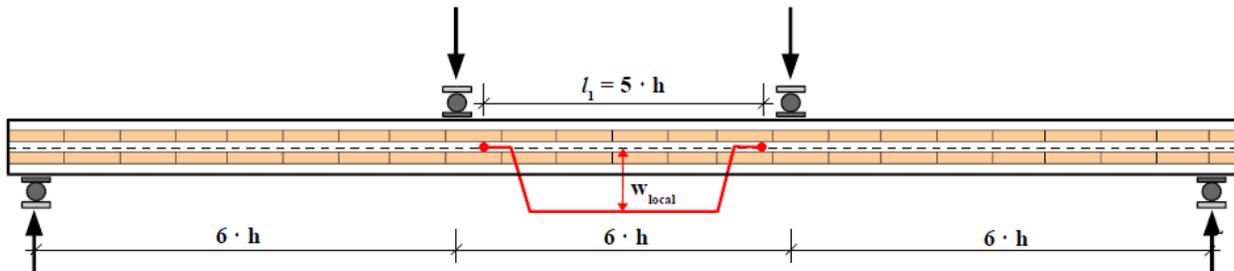


Figura 4.2.1 Schema della prova di flessione a quattro punti per la misura dei MOE e del MOR

La nuova norma europea di prodotto sui pannelli x-lam UNI EN 16351:2015 (non ancora approvata durante la campagna sperimentale qui presentata) propone per questa prova un rapporto  $l/h=24-30$ . La ragione è quella di evitare rotture del provino dovute a sollecitazioni di taglio negli strati ortogonali (in realtà questo accade molto di rado in questo tipo di prova), che diminuiscono all'aumentare del rapporto  $l/h$ . La EN 408 indica due strade per il calcolo del modulo elastico: la misura del MOE (modulo elastico) locale e quello globale. È consigliabile assumere come modulo di elasticità quello locale che viene misurato nella zona centrale del pannello sottoposto a flessione dove, per combinazioni di carico simmetriche come quella della prova, il taglio è nullo e non influisce sulla deformazione. La deformazione dovuta a taglio nel x-lam è influenzata da molti parametri e rende la misura del modulo elastico globale meno stabile di quella locale. La misura del MOE nel x-lam è basata sulle seguenti ipotesi: teoria della trave, connessioni (incollaggio) perfettamente rigide, calcolo della sezione effettiva,  $E_{90,CLT,mean}=0$ ,  $G_{CLT,mean}=650$  MPa e  $Gr=50$  MPa.

L'apparecchiatura di carico utilizzata è in grado di misurare il carico con accuratezza pari all'1% del carico applicato al provino o, per carichi minori del 10% del carico massimo applicato, con accuratezza pari allo 0,1% del carico massimo applicato. La deformazione  $w$  è stata considerata come la media delle misurazioni su entrambe le facce in corrispondenza dell'asse neutro.

Utilizzando i dati ottenuti dalla prova si è tracciato il grafico carico/deformazione.

È stato quindi utilizzato il segmento del grafico tra  $0,1 F_{max,est}$  e  $0,4 F_{max,est}$  per un'analisi di regressione. Si è trovato il tratto più lungo di questo segmento che fornisce un coefficiente di correlazione di 0,99 o maggiore. Il modulo di elasticità locale si ricava dall'espressione seguente:

$$E_{m,l} = \frac{al_1^2(F_2 - F_1)}{16l(w_2 - w_1)}$$

dove:

- $F_2 - F_1$  è un incremento del carico in newton sulla linea di regressione con un coefficiente di correlazione di 0,99 o migliore;
- $w_2 - w_1$  è l'incremento di deformazione in millimetri corrispondente a  $F_2 - F_1$ ;
- $a$  è la distanza tra i coltelli e gli appoggi ( $6xh$ )
- $I$  è il momento d'inerzia della sezione del pannello

Il momento di inerzia della sezione è in realtà quello efficace (Jeff) che tiene conto solo del contributo degli strati longitudinali. La rigidezza della sezione di un pannello x-lam è calcolata con la:

$$K_{cht} = \sum (J_i \cdot E_i) + \sum (A_i \cdot e_i^2 \cdot E_i)$$

Cioè si tiene conto dell'orientamento degli strati e quindi  $E_0$  (modulo di elasticità in direzione parallela

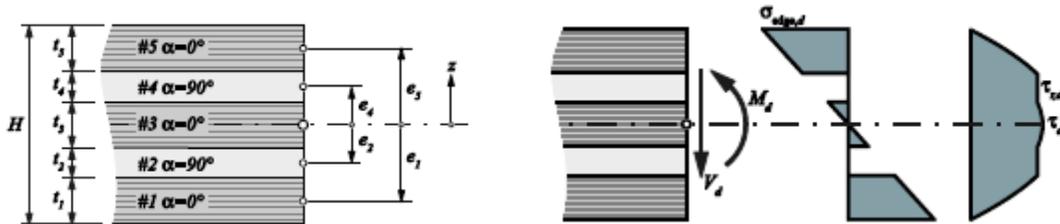


Figura 4.2.2 Distribuzione degli sforzi in una sezione di x-lam a 5 strati sottoposto a flessione

alle fibre della tavola) sarà utilizzato solo per gli strati longitudinali. Per strati ortogonali si utilizzerà  $E_{90}$ . Considerando che  $E_0/E_{90} = 30$  (vedi EN338) possiamo allora, con una approssimazione accettabile, trascurare il contributo degli strati ortogonali al momento di inerzia della sezione. La distribuzione degli sforzi in una sezione di un pannello x-lam sottoposto a flessione, è rappresentato dalla figura 4.2.2

Il MOE locale viene misurato all'interno della zona centrale del pannello tra i due coltelli che impongono il carico con una lunghezza di riferimento di  $5h$  (figura 4.2.4). Si può assumere che l'influenza nella zona di applicazione del carico (picco di stress) sia già declinata ad una distanza di  $0,5h$ . Un momento uniforme può essere assunto all'interno della misura di riferimento. In realtà

la zona priva di taglio e di effetti dovuti alla piastra di carico è inferiore ai 5h come si può osservare in figura 4.2.3 ma l'errore che si commette è comunque accettabile.

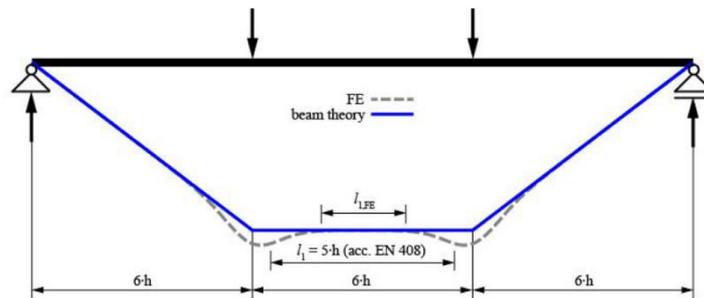


Figura 4.2.3 Confronto FE e beam theory (Gerhard Schickhofer et al. 2011)

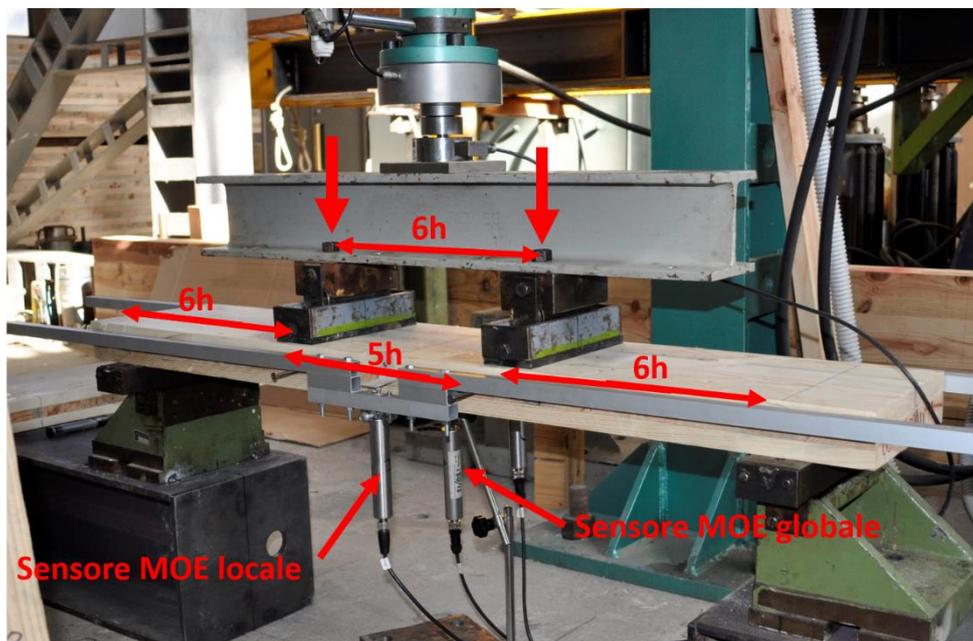


Figura 4.2.4 Posizionamento dei sensori per la misura dei MOE

La determinazione del MOE globale si basa sulla misura della deformata del provino nella mezzeria.

Utilizzando i dati ottenuti dalla prova si traccia il grafico carico/deformazione.

Come per il calcolo del MOE locale si è utilizzata la sezione del grafico tra 0,1  $F_{max,est}$  e 0,4  $F_{max,est}$  per un'analisi di regressione. Si è trovato il tratto più lungo di questa sezione che fornisce un coefficiente di correlazione di 0,99 o maggiore. Il modulo di elasticità globale si ricava dall'espressione seguente:

$$E_{m,g} = \frac{3al^2 - 4a^3}{2bh^3 \left( 2 \frac{W_2 - W_1}{F_2 - F_1} - \frac{6a}{5Gbh} \right)}$$

Dove:

- $F2 - F1$  è un incremento del carico in newton sulla linea di regressione con un coefficiente di correlazione di 0,99 o migliore;
- $w2 - w1$  è l'incremento di deformazione in millimetri corrispondente a  $F2 - F1$ ;
- $l$  è la lunghezza del pannello
- $a$  è la distanza tra i coltelli e gli appoggi ( $6xh$ )
- $b$  e  $h$  sono le dimensioni della sezione del pannello
- il rapporto  $6/5$  che compare nella formula è il coefficiente di correzione  $k$  (che è stato corretto per il caso del x-lam)

Questa misura sarà sicuramente influenzata dalla deformazione dovuta al taglio (taglio che è presente nella zona tra i coltelli di carico e gli appoggi inferiori) e bisogna quindi prenderla in considerazione.

Il coefficiente di correzione del taglio  $k$  che deve essere utilizzato in questo caso, dipende fortemente dalla configurazione del pannello e dalla rigidità del singolo strato. Nel caso di sezioni omogenee come quelle ad esempio di una trave lamellare il coefficiente di correzione viene assunto come 0,83 (l'inverso 1,2 o  $6/5$ ). Nel x-lam sono presenti zone (strati longitudinali e strati ortogonali) con rigidità variabile con  $G_r \ll G_0$  (figura 4.2.5) e questo deve essere considerato nel calcolo del coefficiente di correzione.

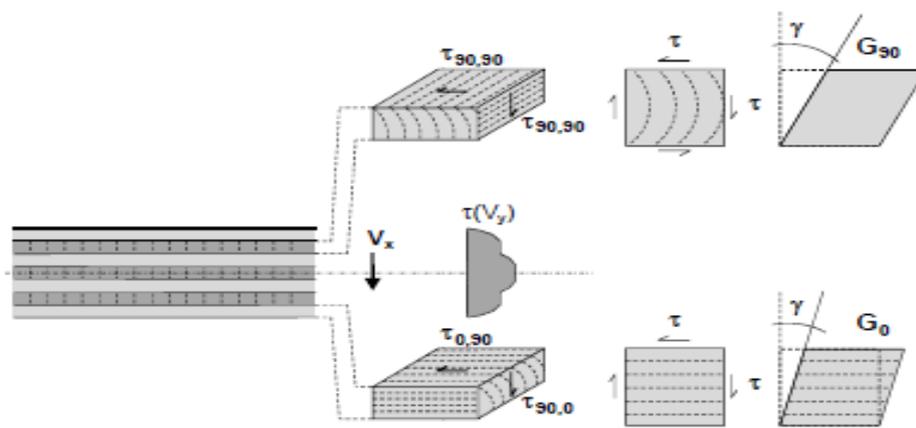


Figura 4.2.5 Deformazioni dovute al taglio

Nella figura 4.2.6 è rappresentata la variazione del coefficiente  $k$  al variare del rapporto tra la somma degli spessori degli strati longitudinali e l'altezza totale della sezione proposta dalla TU di Graz.

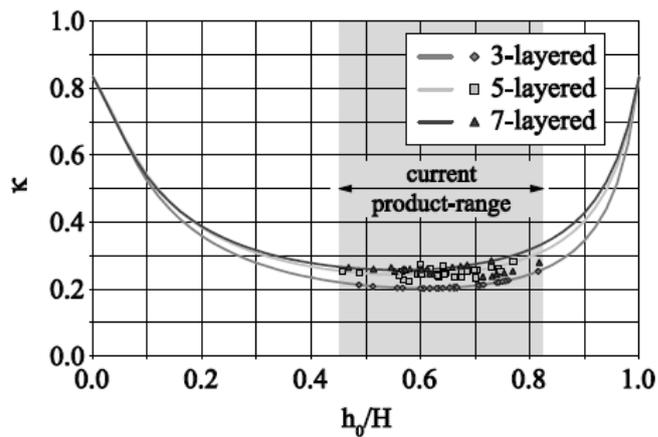


Figura 4.2.6 Coefficiente  $k$  in funzione del rapporto  $h_0/H$  per differenti configurazioni. Dove  $h_0$  è la somma degli spessori degli strati longitudinali ed  $H$  è l'altezza totale della sezione (Schickhofer et al. 2011)

Il coefficiente  $k$  varia quindi al variare del rapporto tra  $G_0$  e  $G_r$  e dello spessore degli strati.

Per uno spessore costante degli strati e per un rapporto tra  $G_0$  e  $G_r$  uguale a dieci si possono adottare i seguenti valori:

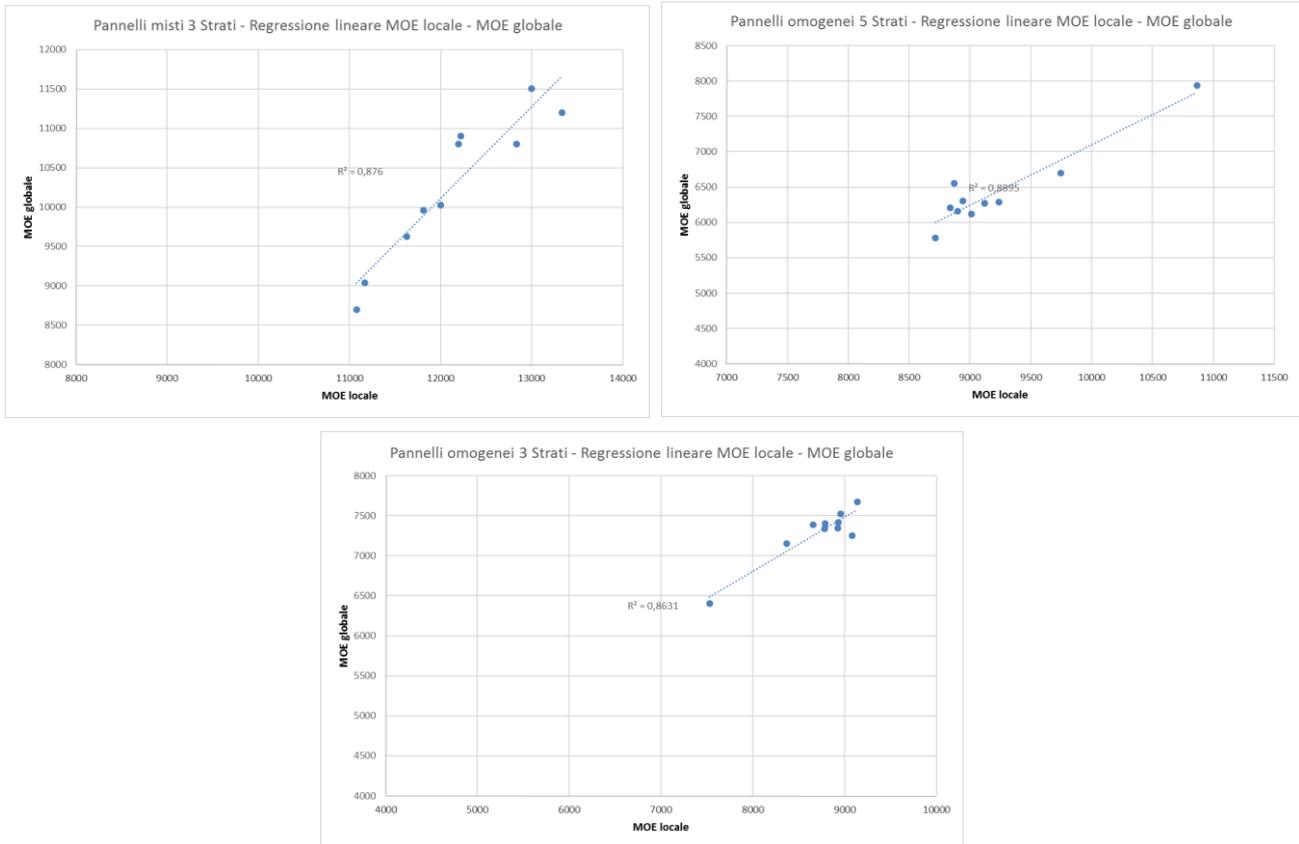
	Numero strati					
	3	5	7	9	11	13
$\kappa$	0,21	0,24	0,26	0,27	0,27	0,27

Uno dei parametri più influenti nella determinazione del coefficiente  $k$  è il  $G_r$ . La letteratura indica il valore  $G_r = 50$  MPa. Nelle DIN1052:2008 questo valore è dato come  $G_0/10$ . Feichter, 2013 ha analizzato l'influenza di alcuni parametri sulla rigidezza a taglio delle sezioni di x-lam (dimensione delle tavole, posizione delle tavole nel tronco, andamento degli anelli di accrescimento etc..) misurando valori di  $G_r$  che vanno da 40 a 150 MPa.

Görlacher, 2002 conferma i valori misurati da Feichter. Va comunque detto che valori tra 40 e 80 MPa coprono realisticamente il campo di variazione del  $G_r$  nei pannelli commercializzati (Schickhofer et al. 2011). Il valore del rapporto  $G_0/G_r$  che probabilmente meglio descrive la relazione tra i due moduli varia tra 7 e 8 (Schickhofer et al. 2011) Nel paragrafo 4.5 di questa tesi verrà descritta l'influenza del  $G_r$  sulla deformata globale di un pannello sottoposto a flessione con il confronto tra i più comuni metodi analitici ed un modello solido agli elementi finiti.

Durante la prova sono stati misurati entrambi i MOE per mezzo di tre sensori (figura 4.3.3), due per la misura del MOE locale posizionati lateralmente al pannello ed uno posizionato nella faccia inferiore del pannello nella mezzeria per la misura del MOE globale.

Le correlazioni tra il MOEloc ed il MOEglob. si possono osservare nei grafici seguenti. Gli  $R^2$  elevati (0,87, 0,86, 0,88) mostrano la bontà delle misure effettuate.



La prima configurazione testata è stata quella a tre strati da 20 mm ( $h_{tot} = 60$  mm) con l'Abete negli strati longitudinali esterni ed il Pino Marittimo nello strato centrale (figura 4.2.7).

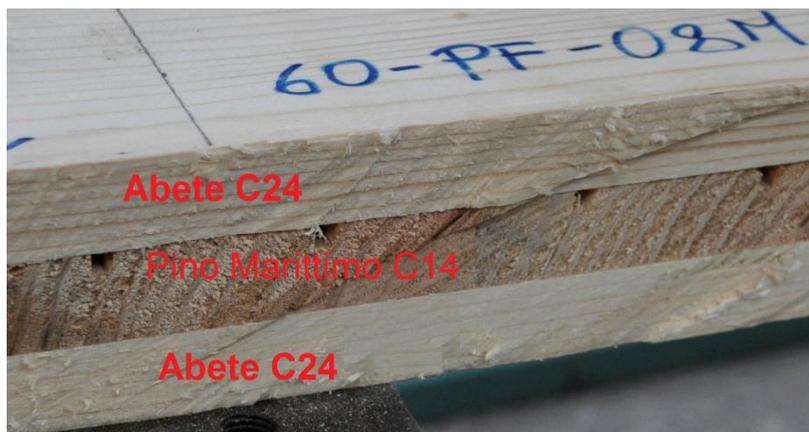


Figura 4.2.7 Sezione del pannello misto a 3 strati

Lo scopo di questa configurazione era quello di verificare le prestazioni dei pannelli a tre strati, quando nello strato centrale (ortogonale) si utilizza una classe molto inferiore (C14) a quella degli strati esterni (C24). Questa soluzione è stata pensata a seguito dei dati ottenuti dalla classificazione del Pino Marittimo. Le prestazioni meccaniche della specie in esame sono basse rispetto ai materiali

usati comunemente nella produzione del x-lam (C24 – C30) ed allora si è voluto indagare un suo possibile utilizzo nei pannelli misti. I dati relativi alle prove con la configurazione mista Abete-Pino Marittimo sono riassunti nella tabella 4.2.3.

Il primo commento che si può fare analizzando i dati della prova di flessione su questo pannello è che il MOE locale ed il MOR sono quelli che ci si aspetta da un pannello omogeneo composto da tavole con prestazioni corrispondenti ad un C24-C30. I CV sono molto bassi, e questo ci conferma che la dispersione dei valori prestazionali diminuisce rispetto a quella delle tavole che compongono il pannello x-lam. Questo fenomeno viene chiamato “effetto sistema” ed è stato confermato in questa indagine sperimentale. In pratica il MOE ed il MOR dei pannelli risulta più alto e la dispersione dei dati è inferiore a quello del materiale che lo compone.

Pannelli 3 strati H=60 mm. Misti: Strati esterni di Abete C24 - strato ortogonale Pino Marittimo (C14)									
Pannello	h	b	Jeff	MOE <sub>loc</sub>	MOE <sub>glob</sub>	F <sub>max</sub>	M	MOR	t <sub>max</sub>
60-PF-01M	61,3	241	4.454.786	11630	9630	36696	6605280	45,45	1,9
60-PF-02M	62,0	241	4.609.146	12197	10800	34199	6155820	41,40	1,7
60-PF-03M	61,8	241	4.564.685	11167	9036	34447	6200460	41,97	1,7
60-PF-04M	61,7	242	4.559.193	12834	10800	32500	5850000	39,58	1,6
60-PF-05M	61,0	240	4.371.486	11080	8700	33544	6037920	42,13	1,7
60-PF-06M	60,2	241	4.219.246	12226	10906	41199	7415820	52,90	2,1
60-PF-07M	60,5	240	4.264.869	12000	10023	37692	6784560	48,12	1,9
60-PF-08M	61,1	240	4.393.020	13332	11200	31800	5724000	39,81	1,6
60-PF-09M	60,2	241	4.219.246	13000	11504	33452	6021360	42,96	1,7
60-PF-010M	61,2	241	4.433.020	11812	9960	36540	6577200	45,40	1,9
			<b>Media</b>	<b>12128</b>	<b>9985</b>	<b>35207</b>	<b>6337242</b>	<b>44,5</b>	<b>1,8</b>
			<b>ds</b>	754	937	2837	<b>ds</b>	<b>0,091</b>	
			<b>CV %</b>	6,2	9,4	8,1	<b>fm,k</b>	<b>36,6</b>	

Tabella 4.2.3 Dati sperimentali dei pannelli misti a 3strati

In questa prova tutti i provini si sono rotti per flessione (rottura per trazione delle tavole dello strato inferiore) con rotture comprese nella zona centrale (tra i due coltelli superiori). Un esempio si può osservare in figura 4.2.8.



Figura 4.2.8 rottura per trazione delle tavole - Pannello Mistto Abete Pino

Gli sforzi di taglio (il taglio massimo si raggiunge nella zona centrale della sezione che nei pannelli a tre strati corrisponde allo strato ortogonale) raggiunti sono compresi tra 1,6 e 2,1 MPa senza aver peraltro raggiunto la rottura per taglio degli strati ortogonali. **Si può quindi affermare che la resistenza a taglio  $f_{v,90,90}$  è sicuramente maggiore di questi valori, come confermato nelle prove di taglio.**

La seconda configurazione testata è stata quella a tre strati da 20 mm ( $h_{tot}=60\text{mm}$ ) omogenea di Pino Marittimo, dove si sono utilizzate le tavole classificate C16 negli strati longitudinali e quelle classificate C14 in quelle ortogonali. I dati delle prove sono riassunti nella tabella 4.2.4.

Pannelli 3 strati H=60 mm. Omogenei Pino Marittimo. (strati long. esterni C16, centrale ortogonale C14)									
Pannello	h	b	Jeff	MOE <sub>loc</sub>	MOE <sub>glob</sub>	F <sub>max</sub>	M	MOR	$\tau_{max}$
60-PF-01	61,7	242	3.971.936	8368	7154	23357	4204260	32,65	1,2
60-PF-02	62,0	242	4.030.156	8924	7347	19424	3496320	26,89	1,0
60-PF-03	61,0	242	3.838.277	8786	7405	23869	4296420	34,14	1,2
60-PF-04	61,4	241	3.898.105	7531	6400	21460	3862800	30,42	1,1
60-PF-05	61,0	240	3.806.555	8934	7418	24870	4476600	35,87	1,3
60-PF-06	61,5	241	3.917.182	8660	7390	22815	4106700	32,24	1,2
60-PF-07	60,0	241	3.637.493	9137	7675	30442	5479560	45,19	1,6
60-PF-08	60,0	242	3.652.587	8960	7520	26007	4681260	38,4	1,3
60-PF-09	61,4	241	3.898.105	9080	7250	25460	4582800	36,1	1,3
60-PF-10	61,2	241	3.860.137	8780	7340	24630	4433400	35,1	1,3
			<b>Media</b>	<b>8716</b>	<b>7290</b>	<b>24233</b>	<b>4362012</b>	<b>34,7</b>	<b>1,2</b>
			<b>ds</b>	471	343	2934	<b>ds</b>	<b>0,142</b>	
			<b>CV %</b>	5,4	4,7	12,1	<b>fm,k</b>	<b>24,9</b>	

Tabella 4.2.4 Caratteristiche pannelli omogenei Pino marittimo a tre strati.

Anche in questo caso le caratteristiche meccaniche del pannello sono risultate essere maggiori di quelle delle tavole utilizzate (classificate come C16). La dispersione dei dati risulta essere anch'essa inferiore a quella del materiale di base. Tutti e dieci i pannelli testati si sono rotti per flessione nella zona centrale (figure 4.2.9/10)



Figura 4.2.9 Rotture di pannelli omogenei di Pino Marittimo a 3 strati



Figura 4.2.10 Rotture di pannelli omogenei di Pino Marittimo a 3 strati

Questi pannelli rispetto a quelli misti hanno raggiunto la rottura con dei carichi inferiori e quindi anche le sollecitazioni a taglio che sono state raggiunte durante la prova sono anch'esse ovviamente inferiori. La terza configurazione che è stata testata è quella a quelli a cinque strati da 20mm

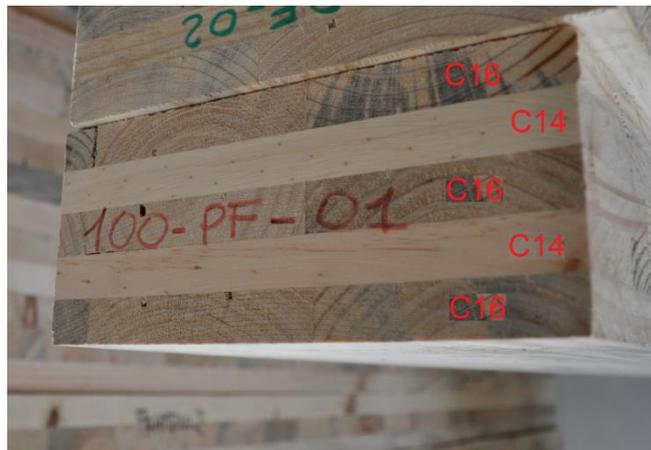


Figura 4.2.11 Stratigrafia pannello omogeneo Pino M.

Pannelli 5 strati H=100 mm. Omogenei Pino Marittimo. (strati long.C16, ortogonali C14)									
Pannello	h	b	Jeff	MOE <sub>loc</sub>	MOE <sub>glob</sub>	F <sub>max</sub>	M	MOR	t <sub>max</sub>
100-PF-01M	102	241	20523239	9119	6270	37728	11318400	28,1	1,15
100-PF-02M	101	240	19842834	8897	6161	36816	11044800	28,1	1,14
100-PF-03M	103	246	21571240	8873	6551	43772	13131600	31,4	1,30
100-PF-04M	103	243	21308177	10864	7940	49487	14846100	35,9	1,48
100-PF-05M	103	243	21308177	9744	6696	45443	13632900	32,9	1,36
100-PF-06M	104	243	21934848	8717	5781	44123	13236900	31,4	1,31
100-PF-07M	103	240	21045113	9240	6286	40537	12161100	29,8	1,23
100-PF-08M	102	241	20523239	8840	6210	40530	12159000	30,2	1,24
100-PF-09M	101	242	20008191	8940	6306	41523	12456900	31,4	1,27
100-PF-010M	102	242	20608397	9010	6122	45642	13692600	33,9	1,39
			<b>Media</b>	<b>9224</b>	<b>6432</b>	<b>42560</b>	<b>12768030</b>	<b>31,3</b>	<b>1,3</b>
			<b>ds</b>	644	583	3878	<b>ds</b>	<b>0,078</b>	
			<b>CV %</b>	7,0	9,1	9,1	<b>f<sub>m,k</sub></b>	<b>26,5</b>	

Tabella 4.2.5 Caratteristiche pannelli omogenei Pino marittimo a cinque strati

(htot=100 mm). La stratigrafia e le classi dei vari strati si possono osservare in figura 4.2.11. I dati delle prove sono riassunti nella tabella 4.2.5.

I pannelli a cinque strati omogenei di pino marittimo hanno mostrato un MOE locale medio ed un MOR più alto rispetto ai tre strati ed un MOE globale più basso. Come già detto in precedenza la misura del MOE glob. è sempre meno stabile di quello locale. Nei pannelli a cinque strati il rapporto tra gli strati ortogonali e quelli longitudinali è di 0,66 contro 0,5 in quello a tre strati e questo incide sul coefficiente di correzione  $k$  e conseguentemente sulla deformata e sul calcolo del MOE globale. Anche in questo caso su tutti i provini si sono ottenute rotture per flessione nella zona centrale del pannello (figura 4.2.12).

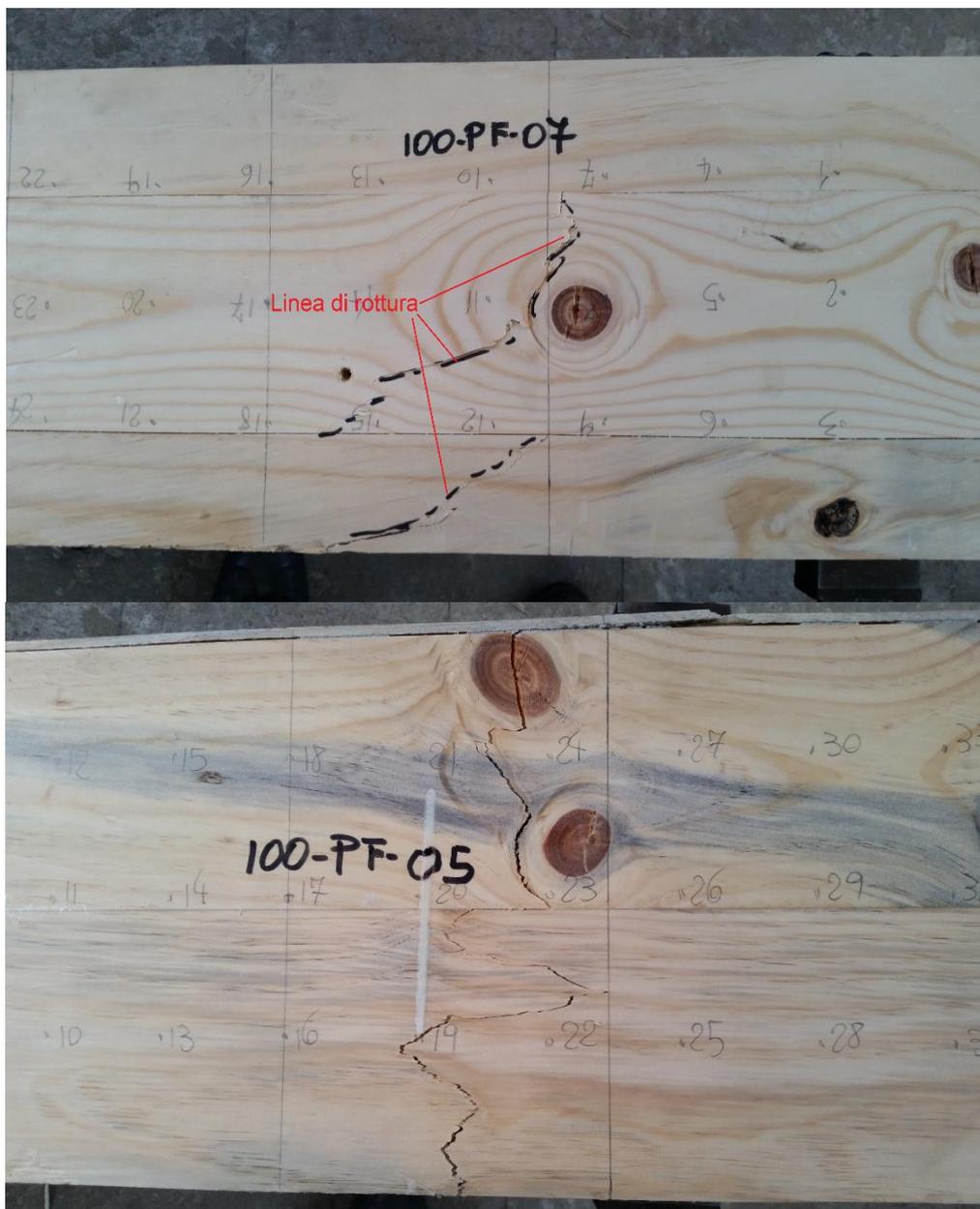


Figura 4.2.12 Esempi di rotture per flessione nei pannelli a 5 strati

Le prove riguardanti i pannelli a tre strati da 40 mm ( $H_{tot} = 120$ ) non hanno dato risultati attendibili e non verranno riportate in questa tesi. Come si può osservare nelle seguenti figure seguenti i pannelli hanno presentato lo scollamento degli strati durante la prova di flessione.



Figura 4.2.13 Difetti di incollaggio nei pannelli a tre strati da 40 mm

Questo è dovuto ad un problema di fabbricazione. Il difetto di incollaggio è da attribuire alla pressa utilizzata. La pressa è di tipo sottovuoto e non è in grado di esercitare la pressione necessaria (0,1-1,0 MPa) per incollare tavole con 40 mm di spessore, soprattutto con una specie come il Pino Marittimo, che presenta importanti deformazioni dopo il processo di essiccazione.

#### 4.2.2 Prove di taglio – Misura della resistenza $f_{v,90,90}$ - rolling shear

La seconda tipologia di prova è sempre una prova di flessione su 4 punti ma cambia il rapporto  $l/h$  che è uguale a 9 (figura 4.2.14/15)

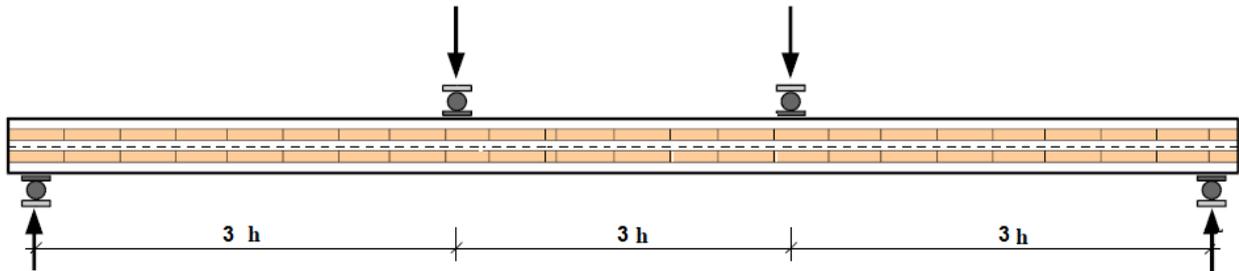


Figura 4.2.14 Schema della prova di flessione a quattro punti per la misura della resistenza a taglio per rolling shear.

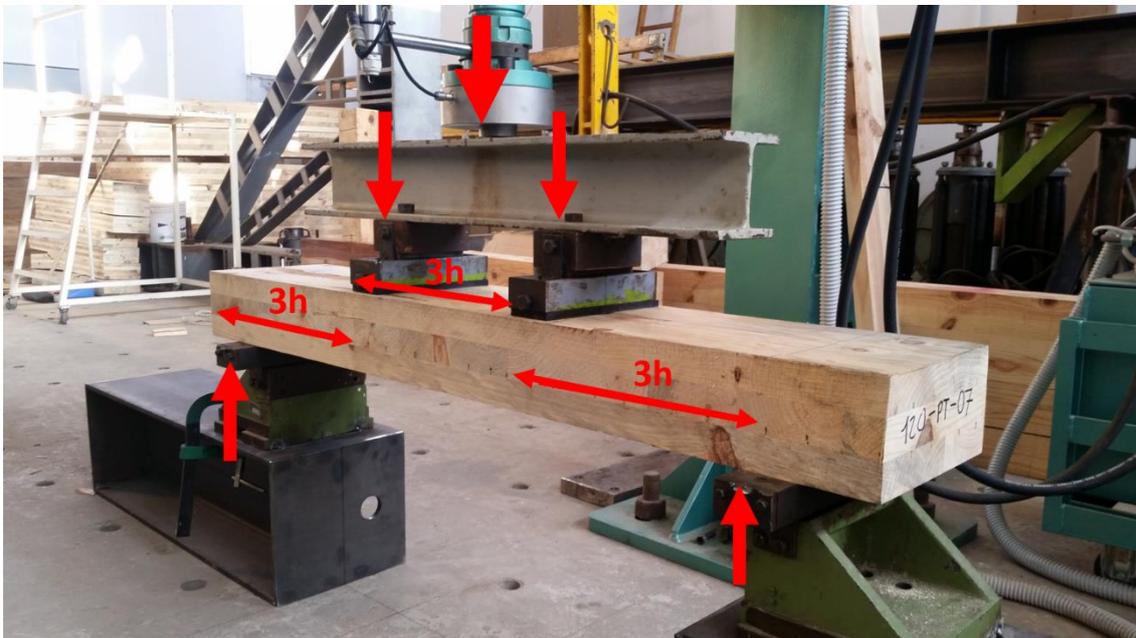


Figura 4.2.2 Prova di flessione a quattro punti per la misura della resistenza a taglio per rolling shear

In questa prova i rapporti tra la distanza dei carichi e gli appoggi sono ridotte ( $3h$ ) per forzare la rottura a taglio per rolling shear ( la rottura per taglio negli strati ortogonali avviene sempre prima di quelli longitudinali dato che  $f_{v,90,90,k} = 1,1\text{MPa}$  (EN16351, 2015) è minore del  $f_{v,k}$  da 3 a 4 MPa).

La EN16351, 2015 indica il valore di  $f_{v,90,90,k} = 1,1$  MPa nel caso in cui non siano disponibili dati sperimentali. Questo valore può essere adottato quando gli strati ortogonali non hanno spessore maggiore di 45 mm ed il rapporto delle dimensioni delle tavole (larghezza/altezza) non sia inferiore a 4.



Figura 4.2.16 Esempi di rottura per rolling shear (pannello misto Abete-Pino Marittimo)

Con la configurazione dei pannelli misti Abete-Pino, si aveva un materiale con resistenze a trazione molto più alte del pino marittimo. Questo ha consentito, raggiungendo carichi più elevati rispetto ai pannelli di pino, di ottenere delle rotture per rolling shear (figura 4.2.16) che hanno permesso di misurarne la resistenza. Nella prova a flessione (con  $l/h = 9$ ) è possibile ma comunque difficile

ottenere rotture di questo tipo, anche per questo motivo la EN16351, 2015 indica il metodo alternativo di Figura 4.2.17.

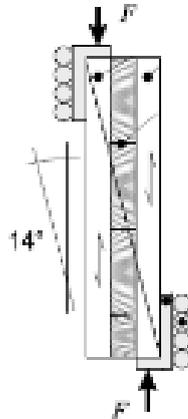


Figura 4.2.17 Test alternativo per la determinazione del  $G_r$  e del  $f_{v,9090}$  secondo la EN16351

La prova con lo schema della figura 4.2.14 come già detto non porta di solito a risultati soddisfacenti, come è stato dimostrato anche in questa ricerca, tranne nel caso dei pannelli misti. Nelle tabelle 4.2.6/7/8 sono riassunti i dati delle prove nelle tre configurazioni testate.

Pannello	h	b	Fmax (N)	$\tau_{max}$	Tipo Rottura
60-PT-01M	61	241	69241	<b>3,5</b>	<b>rolling shear</b>
60-PT-02M	61	242	71562	<b>3,6</b>	<b>rolling shear</b>
60-PT-03M	62	240	64251	3,2	Flessione
60-PT-04M	62	243	64256	3,2	Flessione
60-PT-05M	61	241	55264	2,8	Flessione
60-PT-06M	62	242	68457	<b>3,4</b>	<b>rolling shear</b>
60-PT-07M	61	243	71254	<b>3,6</b>	<b>rolling shear</b>
60-PT-08M	61	242	59431	3,0	Flessione
		<b>Media</b>	<b>65465</b>	<b>3,3</b>	

Tabella 4.2.6 Dati sperimentali della prova a taglio -3 strati misti

Pannello	h	b	Fmax (N)	$\tau_{max}$	Tipo Rottura
60-PT-01	61,9	242	48147	<b>2,4</b>	Flessione
60-PT-02	61,6	241	53962	<b>2,7</b>	Flessione
60-PT-03	61,7	242	41370	<b>2,1</b>	Flessione
60-PT-04	61,5	243	46327	<b>2,3</b>	Flessione
60-PT-05	61,5	241	51251	<b>2,6</b>	Flessione
60-PT-06	61,5	243	58034	<b>2,9</b>	Flessione
60-PT-07	61,5	241	52040	<b>2,6</b>	Flessione
		<b>Media</b>	<b>50162</b>	<b>2,5</b>	

Tabella 4.2.7 Dati sperimentali della prova a taglio -3 strati omogenei

Pannello	h	b	Fmax (N)	$\tau_{max}$	Tipo Rottura
100-PT-01	103	243	89294	<b>2,7</b>	Flessione
100-PT-02	103	242	83907	<b>2,5</b>	Flessione
100-PT-03	103	240	100047	<b>3,0</b>	<b>rolling shear</b>
100-PT-04	103	242	91034	<b>2,7</b>	<b>rolling shear</b>
100-PT-05	103	242	90131	<b>2,7</b>	Flessione
100-PT-06	103	242	86094	<b>2,6</b>	Flessione
100-PT-07	103	243	94100	<b>2,8</b>	Flessione
		<b>Media</b>	<b>90658</b>	<b>2,7</b>	

Tabella 4.2.8 Dati sperimentali della prova a taglio -5 strati omogenei pino marittimo

Come si può osservare dai dati delle prove sperimentali solo alcune delle prove hanno portato alla rottura per rolling shear negli strati trasversali. Nel caso dei pannelli misti grazie ai carichi più elevati che si sono raggiunti nella prova per la presenza dell'abete (C24), si sono ottenute 4 rotture per taglio (esempio in figura 4.2.16). Nel caso dei 3 strati omogenei di pino tutti i pannelli si sono rotti per flessione sviluppando comunque un valore medio di taglio di 2,5 MPa senza peraltro raggiungere la rottura. Nel caso dei pannelli a cinque strati si ottenute due rotture a taglio negli strati ortogonali (figura 4.2.18)



Figura 4.2.18 Esempio di rottura per rolling shear nei pannelli a 5 strati

La terza prova riguarda il metodo alternativo proposto dalla stessa norma (figura 4.2.17) che è stato utilizzato in questo lavoro per ricavare la resistenza a rolling shear con risultati soddisfacenti.

Il valore della resistenza a rolling shear si ottiene con la formula:

$$f_R = \frac{F_{max} \cdot \cos \alpha}{l \cdot w_1}$$

dove:

$f_R$  è la resistenza a rolling shear

$F_{max}$  è la forza massima raggiunta durante la prova (inclinata di un angolo  $\alpha$  rispetto alla faccia del provino)

$l$  e  $w$  sono rispettivamente la lunghezza e la larghezza dello strato centrale (ortogonale) del provino



Figura 4.2.19 Setup della prova di taglio

In questa prova è fondamentale la precisione del taglio del provino. La direzione della forza deve passare per il centro dello strato centrale del provino. Questo si ottiene con un angolo di inclinazione del provino di 14 gradi. Se la geometria del provino è corretta si ha una sforzo di taglio costante nella zona centrale del provino (figura 4.2.20 sinistra) e gli sforzi di trazione e compressione perpendicolari alle fibre sono elevati nei punti di discontinuità del provino (figura 4.2.20 destra).

Con questa prova è possibile misurare anche il modulo di taglio  $G_r$  ma la strumentazione disponibile non ne permetteva la misura corretta. Gli spostamenti sono troppo piccoli per la precisione degli strumenti a disposizione.

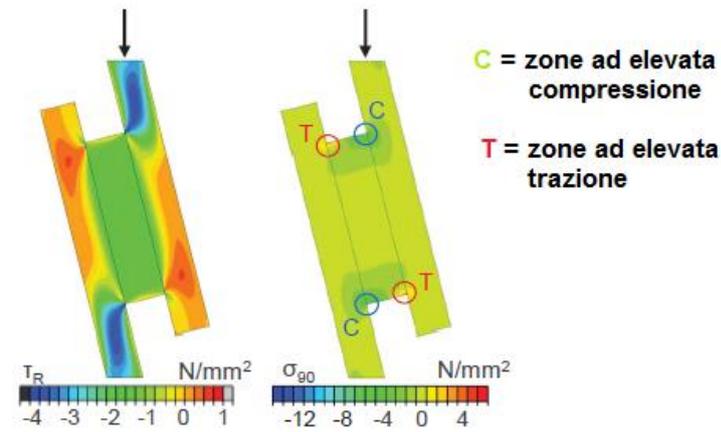


Figura 4.2.20 Stato tensionale del provino secondo il modello FEM (Ehrhart et al 2011)

I 7 provini testati sono stati ricavati da pannelli a tre strati ed avevano le misure della figura 4.2.21



Figura 4.2.21 Dimensioni dei provini per la prova di taglio alternativa a rolling shear

I dati ottenuti dalle prove di taglio sono riassunti nella tabella 4.2.9. Un esempio di rottura si può osservare nella figura 4.2.23

Nome Provino	l (mm)	w(mm)	Fmax (N)	$\tau_{max}$ (MPa)
RS-01	100	100	28342	2,7
RS-02	100	100	27459	2,7
RS-03	100	100	24857	2,4
RS-04	100	100	28340	2,7
RS-05	100	100	31500	3,1
RS-06	100	100	27654	2,7
RS-07	100	100	24560	2,4
			Media	2,7
			CV %	8,5

Tabella 4.2.9 Dati relativi alle prove di taglio



Figura 4.2.23 rottura per rolling shear

#### 4.2.3 Commenti sui dati sperimentali

- I pannelli misti Abete-Pino Marittimo hanno dato risultati soddisfacenti. Lo strato intermedio di pino marittimo non riduce la rigidità flessionale della sezione del pannello. In questa campagna sperimentale non è stato misurato il  $G_r$  (e quindi la rigidità a taglio della sezione) ma sembra che nonostante il fatto che il pino marittimo abbia caratteristiche meccaniche (MOE e MOR) inferiori all'Abete, la sua rigidità a taglio trasversale sia paragonabile a quella delle classi di resistenza superiori. Come si può vedere dal confronto del modello numerico con le prove sperimentali riportato più avanti il valore del  $G_r$  che porta alle deformate ottenute nelle prove sperimentali è tra 70 e 100 MPa.
- I valori caratteristici del MOR ottenuti nei pannelli omogenei con tre e cinque strati sono più alti del 50 % rispetto a quello dei profili resistenti delle tavole che li compongono. Questo è dovuto in parte a quello che viene definito effetto sistema (dal 2 al 10% Schickhofer 2011) ed il resto al “difetto” della classificazione a vista. Il classificatore, quando analizza il difetto (nodo, deviazione della fibratura etc..) nell'incertezza, tende a scartare anche materiale idoneo, incrementando i valori medi e caratteristici del materiale classificato. Le rese teoriche calcolate nel capitolo 3 vanno riviste tenendo conto delle difficoltà che il classificatore incontra in pratica nell'applicazione della regola di classificazione a vista.
- I dati ottenuti dalle prove sui pannelli omogenei a tre strati da 40 mm dimostrano che, per spessori oltre i 30 mm l'utilizzo della pressa sottovuoto è da evitare, soprattutto con specie che presentano grandi deformazioni dopo il processo di essiccazione.
- Il valore medio della resistenza a rolling shear ottenuto nelle prove di taglio (flessione su 4 punti) è di 3,2 MPa mentre quello ottenuto con la prova alternativa è di 2,7 MPa. Questa differenza può essere attribuita al fatto che nella prova di flessione si ha, nelle zone dell'appoggio e dell'applicazione del carico, una compressione ortogonale alle fibre che migliora la resistenza a rolling shear (Augustin 2008). I dati non sono sufficienti per valutare un valore caratteristico ma si può certamente affermare che il valore della resistenza a taglio ortogonale  $f_{v,90}$  del pino marittimo è ben superiore al valore minimo di 1 Mpa indicato dalla EN16351, 2015.

## 4.3 Confronto tra FEM, metodi analitici e dati sperimentali

### 4.3.1 I metodi analitici

Diversi metodi sono stati adottati per la determinazione delle principali caratteristiche meccaniche dei pannelli x-lam. Qualcuno di essi deriva da prove sperimentali ed altri sono puramente analitici.

Testare sperimentalmente i pannelli che per esempio saranno usati come solai (tramite una prova di flessione con schemi indicati dalla norma) ha il problema che i risultati potranno essere usati solo per quel tipo di configurazione, materiale e produzione.

L'approccio analitico invece, una volta verificato con le prove sperimentali, offre sicuramente una soluzione più economica e universale e quindi può essere utilizzato nella progettazione. In generale un metodo analitico calcola le proprietà del pannello a partire dalla proprietà delle tavole da cui è composto.

Il metodo analitico più comune e più usato nella pratica progettuale è quello che si basa sulla teoria delle sezioni composte unite meccanicamente anche conosciuta come teoria di Mohler o "Il metodo Gamma" che è riportato nell'Allegato B dell'Eurocodice 5 (EN 1995-1, 2009). In questa teoria viene introdotto il concetto della Rigidezza Effettiva ( $E_{\text{Ieff}}$ ) che dipende dall'efficienza della connessione tramite il coefficiente  $\gamma_i$  che può essere considerato uguale a zero nel caso di assenza della connessione o uguale ad uno nel caso di connessione infinitamente rigida. Questo principio può essere applicato al caso del x-lam se si considerano gli strati ortogonali come i "connettori" tra gli strati longitudinali. Questo metodo viene chiamato Modified gamma method (Blass e Goerlacher 2003)

Blass and Fellmoser (2004) hanno elaborato la teoria chiamata K-method per calcolare le proprietà meccaniche del x-lam. Questo metodo non tiene conto della deformazione dovuta al taglio e nel caso di rapporti luce-spessore molto bassi ( $< 15$ ) potrebbe non essere sufficientemente attendibile.

Uno dei metodi più utilizzati è quello che viene chiamato "Shear Analogy Method" (Kreuzinger, 1999). Questo metodo diversamente dal k-method tiene conto della deformazione dovuta al taglio. Sembra essere al momento quello che può dare indicazioni più attendibili sulla valutazione delle prestazioni meccaniche ed elastiche dei pannelli x-lam soprattutto nel calcolo agli stati limite di esercizio.

Sono stati proposti altri metodi, alcuni di essi sono una combinazione di approcci empirici ed analitici, ma al momento non hanno riscontrato interesse. Solo i tre metodi citati sopra verranno descritti e analizzati in questa tesi. Non esiste un metodo universalmente accettato dai produttori e dai progettisti. Quasi tutte le ricerche si sono comunque concentrate sul calcolo della rigidezza effettiva,

anche perché è proprio questa caratteristica meccanica che generalmente guida il dimensionamento dei pannelli x-lam.

C'è sicuramente bisogno di affinare ulteriormente un metodo per il calcolo della rigidezza e la resistenza dei pannelli x-lam che dia affidabilità nelle diverse condizioni di carico e vincolo. Probabilmente la strada è quella di studiare e perfezionare il Shear Analogy Method. Quello che si propone questa tesi è quello di comparare i tre metodi sopra menzionati che verranno descritti in questo paragrafo con i risultati ottenuti nelle prove sperimentali.

Verranno descritti i tre metodi solo per il caso di carichi perpendicolari al piano del pannello (out of plane) che riguarda cioè il caso delle prove a flessione che sono state effettuate sui pannelli di pino marittimo.

- Il  $G_r$  – modulo di taglio per gli strati ortogonali.

Il modulo ( $G_r$ ) e la resistenza ( $f_{vr}$  a taglio ortogonale) sono le caratteristiche meccaniche del x-lam che hanno un peso importante sul dimensionamento nel caso di solai o coperture. Il rolling shear è un aspetto nuovo del dimensionamento degli elementi in legno ed è dovuto alla presenza degli strati ortogonali tipici dei pannelli di x-lam. Il comportamento degli strati ortogonali quando il pannello è sottoposto ad un carico ortogonale al suo piano è descritto dalle due caratteristiche meccaniche sopra citate. L'effettiva rigidezza flessionale del pannello è fortemente influenzata dal  $G_r$  (Fellmoser and Blass, 2004). Nonostante la sua importanza ancora molto deve fare la ricerca per definire questo aspetto e per dare indicazioni chiare ed universalmente accettate ai produttori e progettisti.

Il modulo di taglio ortogonale dipende da tanti fattori come: lo spessore delle tavole, la densità e la direzione degli anelli di accrescimento. Diversi metodi sono stati sviluppati per la misura del  $G_r$ , alcuni numerici ed altri dinamici (Steiger et al, 2008) ma non si è arrivati ad un accordo generale tra i ricercatori e operatori su quale sia il metodo da adottare.

In letteratura (Mestek et al., 2008) il  $G_r$  viene spesso assunto come un 1/10 del  $G_0$ , che a sua volta può essere ricavato dal modulo elastico longitudinale. In alcune normative ed ETA viene indicato il valore di 50 MPa. Lo stesso valore è indicato da molti autori compresi Blass and Gorlacher (2000). Questo valore porta ad assumere un modulo di taglio parallelo alle fibre  $G_0$  pari a 500 MPa.

La letteratura ci dice che in generale il  $G_0$  può essere ricavato dal MOE dividendolo per un valore compreso tra 12 e 20. Se quindi assumiamo di utilizzare delle tavole che hanno un MOE di 9000 MPa allora possiamo assumere un  $G_0 = 9000/16 = 562$  MPa ed un  $G_r = 56,2$  MPa.

Essendo il  $G_r$  10 volte inferiore al  $G_0$  il suo contributo alla deformata dovuta al taglio sarà 10 volte superiore come in figura 4.3.1

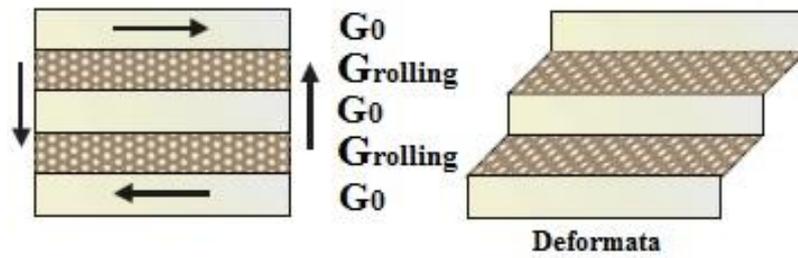


Figura 4.3.1 Deformata dovuta al taglio di un elemento di pannello sottoposto a flessione

Alcuni autori (Mestek et al., 2008) suggeriscono che per rapporti luce-spessore superiori a 20 il contributo del taglio nella deformata totale di un pannello sottoposto a flessione può essere trascurata. Altri autori e molti produttori indicano il rapporto  $l/h$  superiore a 30 prima che il taglio possa essere completamente trascurato

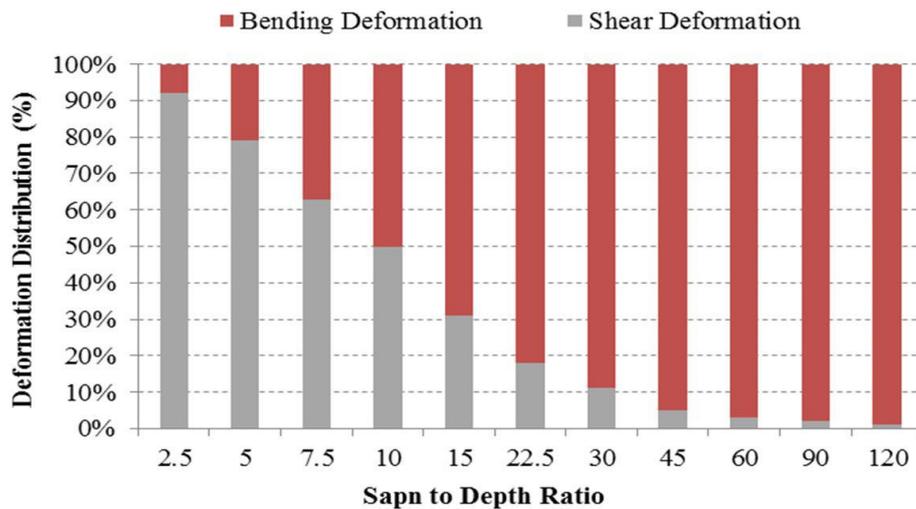


Figura 4.3.2 Influenza del taglio sulla deformazione al variare del rapporto  $l/h$  (Blass 2000)

- Il Metodo Gamma

La maggior parte dei produttori e dei progettisti adottano il Metodo Gamma modificato nei loro calcoli, il quale è indicato nell'Eurocodice 5. Questo metodo è stato sviluppato nel 1955 ed inizialmente fu pensato per travi con profili a T o H con connettori metallici. Si definisce la rigidezza effettiva ( $EI_{eff}$ ) che dipende dalla geometria della sezione e dall'efficienza delle connessioni. Nel Metodo Gamma Modificato, se consideriamo il pannello x-lam come una trave composta dagli strati longitudinali connessi tra loro dagli strati ortogonali possiamo adottare il metodo gamma per definire rigidezza e resistenza della sezione. Per adattare questo metodo al x-lam è necessario però apportare delle modifiche. Il comportamento dello strato ortogonale è descritto dal  $G_R$  ed è quindi necessario che questa caratteristica entri in gioco nella definizione della rigidezza come nella:

$$\frac{s}{K_i} = \frac{\bar{h}_i}{G_R \cdot b}$$

La rigidezza del connettore viene così sostituita dalla rigidezza dello strato trasversale dove:

$s$  è lo spazio tra connettori

$h_i$  è lo spessore dello strato trasversale considerato

$b$  è la larghezza del pannello

$K_i$  è la rigidezza del connettore

Le ipotesi di base della teoria sono mantenute. La deformazione dovuta al taglio è trascurata negli strati longitudinali ed è considerata invece negli strati trasversali tramite il  $G_R$ .

Questo approccio restituisce una soluzione molto vicina a quella esatta solo in caso di travi semplicemente appoggiate con carichi ad andamento sinusoidale (o distribuiti). In altre condizioni di vincolo o di carico la soluzione si allontana da quella esatta ma continua ad essere accettabile nella progettazione comune (Ceccotti, 2003).

Va detto comunque che questo metodo se utilizzato per il calcolo delle deformazioni restituisce valori attendibili solo per rapporti  $l/h$  superiori a 25.

Il momento statico e la rigidezza vengono così definite:

$$S_{eff} = \frac{2 \times I_{eff}}{h_{tot}} = \frac{I_{eff}}{0.5 \times h_{tot}}$$

$$EI_{eff} = \sum_{i=1}^n (E_i I_i + \gamma_i E_i A_i a_i^2)$$

Il valore di  $\gamma_i$  varia nella pratica da 0,80 a 0,99.

Se per esempio si considera un pannello a 5 strati come in figura 4.3.3, allora i  $\gamma_i$  possono essere così calcolate:

$$\gamma_2 = 1$$

$$\gamma_1 = \frac{1}{1 + \left( \pi^2 \cdot \frac{E_1 \cdot A_1}{l^2} \cdot \frac{\bar{h}_1}{G_R \cdot b} \right)} \quad \text{and} \quad \gamma_3 = \frac{1}{1 + \left( \pi^2 \cdot \frac{E_3 \cdot A_3}{l^2} \cdot \frac{\bar{h}_2}{G_R \cdot b} \right)}$$

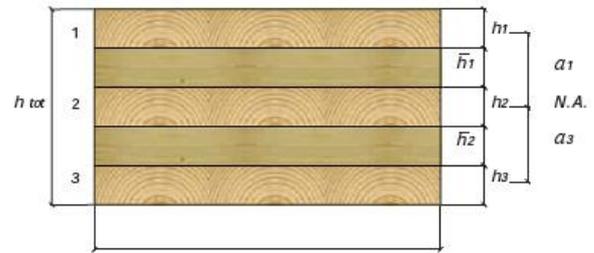


Figura 4.3.3 Sezione di un pannello a 5 strati

I valori degli  $a_i$  sono dati dalle:

$$a_1 = \frac{h_1}{2} + \bar{h}_1 + \frac{h_2}{2} - a_2 \quad \text{and} \quad a_3 = \frac{h_2}{2} + \bar{h}_2 + \frac{h_3}{2} + a_2$$

$$a_2 = \frac{\gamma_1 \cdot E_1 \cdot A_1 \cdot \left( \frac{h_1}{2} + \bar{h}_1 + \frac{h_2}{2} \right) - \gamma_3 \cdot E_3 \cdot A_3 \cdot \left( \frac{h_2}{2} + \bar{h}_2 + \frac{h_3}{2} \right)}{\sum_{i=1}^3 (\gamma_i \cdot E_i \cdot A_i)}$$

Nel caso in cui  $E_1 = E_2$  e  $A_1 = A_2$  allora  $a_2 = 0$

In accordo con l'Eurocodice5 le tensioni massime possono essere così calcolate:

$$\sigma_{\max} = \sigma_{\text{global}} + \sigma_{\text{local}}$$

dove

$$\sigma_{\text{global}} = \frac{\gamma_1 E_1 a_1 M}{(EI)_{\text{eff}}} \quad \sigma_{\text{local}} = \frac{0.5 E_1 h_1 M}{(EI)_{\text{eff}}}$$

La resistenza a taglio dei pannelli può essere determinata con la:

$$\tau = \frac{V \cdot (EQ)}{(EI)_{\text{eff}} \cdot b}$$

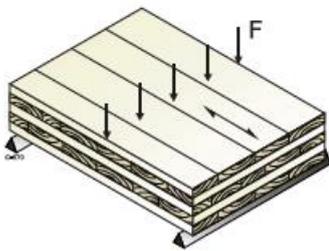
Dove V è la forza di taglio, b è la larghezza della sezione e Q è il momento statico della sezione.

- Il K-method

Questo metodo, già conosciuto nell'industria dei laminati, è stato adattato alla tecnologia del x-lam ed è basato sulle seguenti ipotesi:

- Conservazione delle sezioni piane
- Vengono considerate le rigidità di tutti gli strati e  $E_{90} = E_0/30$
- le deformazioni dovute al taglio non sono prese in considerazione
- i "composition factor" K sono ricavati dalle tabelle (Blass 2004) in base allo schema di carico.

Nel caso di pannelli caricati perpendicolarmente al piano (come nel caso dei test effettuati in questo lavoro) il  $K_1$  è ricavato nel seguente modo:



$$k_1 = 1 - \left( 1 - \frac{E_{90}}{E_0} \right) \cdot \frac{a_{m-2}^3 - a_{m-4}^3 + \dots \pm a_1^3}{a_m^3}$$

È quindi possibile ricavare i valori effettivi di resistenza e del modulo elastico nel seguente modo

$$f_{b,0,eff} = f_{b,0} \times K_1 \quad e \quad E_{b,0,eff} = E_0 \times K_1$$

Il coefficiente  $K_1$  agisce riducendo la resistenza ed il modulo elastico. La rigidità effettiva ed il momento resistente possono quindi essere calcolati nel modo classico considerando la sezione omogenea.

- Shear Analogy Method

Questo metodo è considerato il più preciso tra quelli in uso (Blass and Fellmoser, 2004).

In questo metodo il contributo della deformazione dovuta al taglio non è trascurato e fa sì che possa essere usato anche nel caso di rapporti  $l/h < 20$ .

Essenzialmente il metodo divide il pannello in due travi virtuali BA e BB collegate da elementi con rigidezza assiale infinita (Figura 4.3.4).



Figura 4.3.4 Schematizzazione del principio del Shear Analogy

La trave BA rappresenta la somma dei momenti d'inerzia dei singoli strati rispetto al loro asse neutro:

$$B_A = \sum_{i=1}^n E_i \cdot I_i = \sum_{i=1}^n E_i \cdot b_i \cdot \frac{h_i^3}{12}$$

La trave BB rappresenta la somma dei momenti d'inerzia calcolati con il teorema di Steiner:

$$B_B = \sum_{i=1}^n E_i \cdot A_i \cdot z_i^2$$

$z$  è la distanza del centro di ogni strato dal baricentro della sezione.

La rigidezza effettiva del pannello è la somma delle rigidezze delle due travi virtuali:

$$(EI)_{eff} = B_A + B_B = \sum_{i=1}^n E_i \cdot b_i \cdot \frac{h_i^3}{12} + \sum_{i=1}^n E_i \cdot A_i \cdot z_i^2$$

Gli elementi ausiliari che collegano le due travi hanno resistenza e rigidezza assiale infinita.

La deformata delle due travi coincide quindi in tutti i punti.

La trave BB contiene anche la rigidezza a taglio  $S_B$  che può essere calcolata come:

$$\frac{1}{S_B} = \frac{1}{a^2} \cdot \left[ \frac{h_1}{2 \cdot G_1 \cdot b_1} + \sum_{i=2}^{n-1} \frac{h_i}{G_i \cdot b_i} + \frac{h_n}{2 \cdot G_n \cdot b_n} \right]$$

La quale porta a definire la rigidezza a taglio effettiva come

$$(GA)_{eff} = \frac{a^2}{\left[ \left( \frac{h_1}{2 \cdot G_1 \cdot b} \right) + \left( \sum_{i=2}^{n-1} \frac{h_i}{G_i \cdot b_i} \right) + \left( \frac{h_n}{2 \cdot G_n \cdot b} \right) \right]}$$

Nelle formule indicate il modulo elastico per gli strati longitudinali sarà E0 dal quale si può ricavare E90 (E90 = E0/30) per gli strati ortogonali. Per il calcolo della rigidezza a taglio verrà utilizzato il G0 per gli strati longitudinali ed il Gr (anche in questo caso Gr può essere ricavato dalla Gr = G0/10) per quelli ortogonali.

È quindi possibile definire la freccia massima di un pannello semplicemente appoggiato e sottoposto a ad un carico uniforme con la formula:

$$u_{max} = \frac{5}{384} \cdot \frac{qL^4}{(EI)_{eff}} + \frac{1}{8} \cdot \frac{qL^2 k}{(GA)_{eff}}$$

dove:

q = carico uniformemente distribuito

L = lunghezza del pannello

k = coefficiente di taglio (vedi Timoshenko)

#### 4.3.2 Modellazione meccanica del materiale

- Ipotesi

Nel materiale legno le proprietà meccaniche (modulo elastico, modulo di taglio etc...), sono dipendenti dalla direzione considerata, deve quindi essere guardato come un materiale non isotropo.

Questa affermazione vale sia per il legno massiccio, sia per il xlam, che è composto appunto da elementi in legno massiccio incollati tra loro. Per questa ragione ad esempio non è possibile individuare un unico coefficiente di Poisson, come avviene con i materiali isotropi.

Tuttavia le proprietà meccaniche, nel caso del legno, possono essere messe in stretta relazione con le direzioni anatomiche del materiale.

Partendo dal tronco, si può ragionevolmente pensare che sia composto da un certo numero di pareti cilindriche concentriche (gli anelli di accrescimento): con questo modello si può individuare una, pur approssimata, simmetria cilindrica, con asse coincidente con l'asse midollare. In questo modo si individuano tre direzioni anatomiche principali: quella longitudinale, parallela alla direzione del tronco; quella radiale, parallela alla direzione dei raggi dei "cerchi concentrici" rappresentati dagli anelli di accrescimento; quella tangenziale, parallela alla tangente dei "cerchi concentrici" rappresentati dagli anelli di accrescimento.

Tale considerazione implica, comunque, una prima semplificazione, cioè il riferimento ad un tronco cilindrico in luogo di un (pur sempre approssimato) tronco di cono.

Considerando invece un cubo di materiale sufficientemente piccolo ad una certa distanza dall'asse, e chiamate L, R, T le direzioni anatomiche rispettivamente longitudinale, radiale e trasversale, una ulteriore semplificazione può essere quella illustrata nella figura a lato, dove gli anelli di accrescimento (circonferenze) sono sostituiti da "strati" piani.

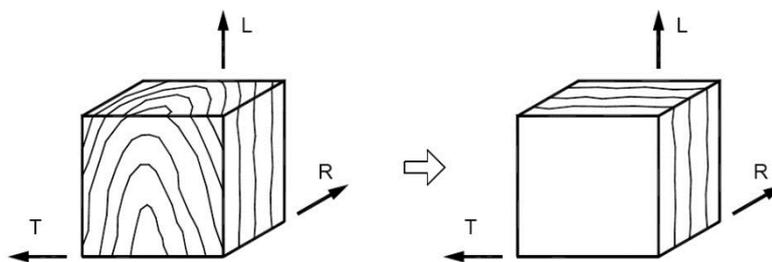


Figura 4.3.5 Semplificazione della struttura anatomica del legno

Evidentemente le semplificazioni così introdotte risultano tanto meno influenti quanto più l'elemento di legno è ricavato lontano (in rapporto alla sua dimensione trasversale) dall'asse midollare: gli errori introdotti nella modellazione saranno quindi massimi per tavole (o elementi) con la presenza del midollo, minimi per le cosiddette tavole "tangenziali" ricavate ad una certa distanza dal medesimo asse midollare (solitamente un pannello di xlam è per lo più composto da tavole tangenziali).

In questa ultima ipotesi il materiale legno, o meglio un elemento di legno privo di difetti, è localmente schematizzabile come materiale ortotropo rispetto ai tre piani sopra indicati, introducendo una semplificazione nella matrice di rigidezza che descrive il legame costitutivo del materiale. Infatti un materiale ortotropo può essere descritto da una matrice in cui figurano 9 costanti indipendenti, in luogo dei 21 parametri indipendenti del materiale anisotropo. La matrice di sotto si riporta la legge di Hooke generalizzata nel caso di materiale ortotropo con matrice di cedevolezza (inversa di quella di rigidezza), scritta utilizzando i cosiddetti "parametri ingegneristici" (moduli elastici e coefficienti di Poisson), in cui figurano 9 costanti indipendenti (si noti che non c'è uguaglianza tra i coefficienti di Poisson ottenuti per inversione dell'ordine dei pedici).

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_L \\ \varepsilon_R \\ \varepsilon_T \\ \gamma_{RT} \\ \gamma_{LT} \\ \gamma_{LR} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{E_L} & -\frac{\nu_{RL}}{E_R} & -\frac{\nu_{TL}}{E_T} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu_{LR}}{E_L} & \frac{1}{E_R} & -\frac{\nu_{TR}}{E_T} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu_{LT}}{E_L} & -\frac{\nu_{RT}}{E_R} & \frac{1}{E_T} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{RT}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{LT}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{LR}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_L \\ \sigma_R \\ \sigma_T \\ \tau_{RT} \\ \tau_{LT} \\ \tau_{LR} \end{bmatrix}$$

È evidente che la simmetria della matrice comporta le seguenti uguaglianze:

- $\frac{\nu_{LR}}{E_L} = \frac{\nu_{RL}}{E_R}$ ,  $\frac{\nu_{LT}}{E_L} = \frac{\nu_{TL}}{E_T}$ ,  $\frac{\nu_{RT}}{E_R} = \frac{\nu_{TR}}{E_T}$

Dai valori riportati dalla letteratura la simmetria matriciale, controllata tramite valori ricavati da sperimentazione fisica, risulta abbastanza bene rispettata, sebbene i valori dei coefficienti di Poisson  $\nu_{RL}$  e  $\nu_{TL}$ , essendo molto piccoli e paragonabili all'errore di misura, siano anche di difficile riscontro sperimentale.

I valori riportati per le caratteristiche meccaniche del legno possono consentire una ulteriore interessante ipotesi semplificativa, quella che permette il riferimento ad un'unica direzione

“trasversale”, confondendo le direzioni anatomiche trasversali R e T. Il riferimento ad un'unica direzione ortogonale all'asse L può essere tollerabile a livello di applicazioni ingegneristiche. Con tale ulteriore semplificazione il materiale diviene quindi caratterizzato da due orientazioni, quella longitudinale (parallela alla fibratura), nel seguito identificata con il pedice 0, e quella ad essa ortogonale, con il pedice 90. Si perviene quindi ad un materiale caratterizzato, elasticamente, dai moduli di elasticità normali  $E_0$  e  $E_{90}$  e da quelli tangenziali  $G_0$  e  $G_{90}$ . In mancanza di determinazioni specifiche, possono essere accettabili, sempre nel caso di legno di conifera, le assunzioni:  $G_0 = E_0 / 16$ ,  $E_{90} = E_0 / 30$ ,  $G_{90} = G_0 / 10$ . Sempre con l'ipotesi di un'unica direzione trasversale il coefficiente di Poisson, inteso come rapporto tra la deformazione trasversale e la deformazione longitudinale in un elemento sollecitato lungo la direzione longitudinale, nel caso delle conifere, può assumere valori compresi tra 0,37 e 0,42. In questo lavoro il valore assunto costante nelle tre direzioni è di 0,40.

- Descrizione del modello numerico

Sono stati analizzati due modelli FEM (tramite il codice di calcolo agli elementi finiti Abaqus) che rappresentavano i pannelli di xlam a 3 strati da 20 mm ( $htot=60$ ) e a 5 strati da 20 mm ( $htot=100$ ). Le condizioni di carico e di vincolo sono quelle delle prove di flessione a quattro punti che sono state effettuate sui pannelli.

Si è scelto di utilizzare degli elementi solidi, esaedri a 8 nodi. Si sono fatte diverse analisi di sensibilità variando sia il numero dei elementi per strato che tutti i valori dei moduli. Si è deciso di adottare quattro elementi nello spessore degli strati (altezza e larghezza dell'elemento uguale a 5 mm e lunghezza uguale a 10 mm). Nella figura 4.3.6 a sinistra la schermata del software Abaqus con il modello FEM del pannello a 5 strati nella configurazione di prova (flessione su 4 punti), a destra il particolare degli assi di riferimento ruotati di  $90^\circ$  negli strati ortogonali.

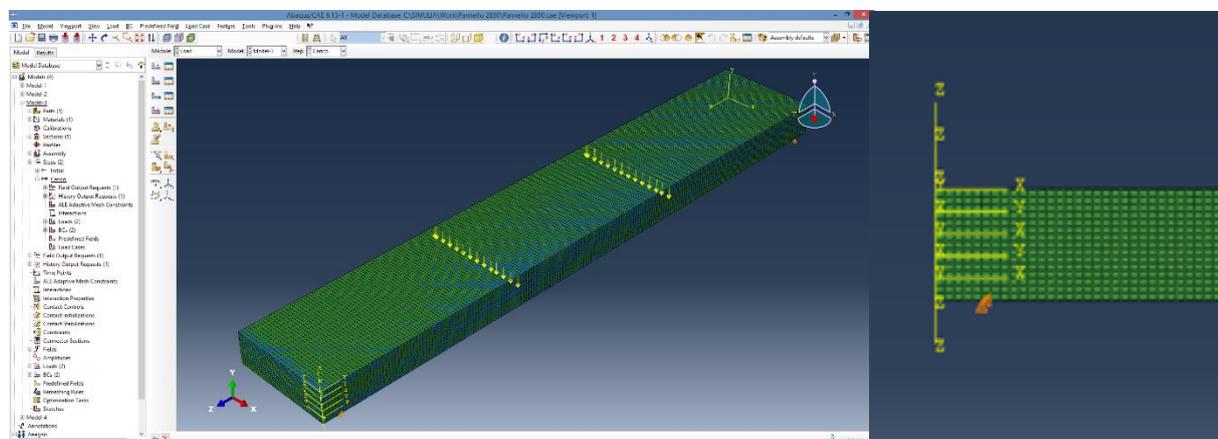


Figura 4.3.6 A sinistra la schermata del modello FEM. A destra un particolare degli assi di riferimento ruotati di  $90^\circ$  negli strati ortogonali.

Nelle figure 4.3.7 e 4.3.8 si possono osservare gli andamenti degli sforzi in una sezione trasversale dei pannelli nel caso dei 3 e 5 strati. Si può osservare il tipico andamento degli sforzi nella sezione di un pannello xlam dove negli strati ortogonali (figura 4.3.7/8 destra) le tensioni sono vicino allo zero, quindi il loro contributo alla rigidezza flessionale della sezione è praticamente trascurabile.

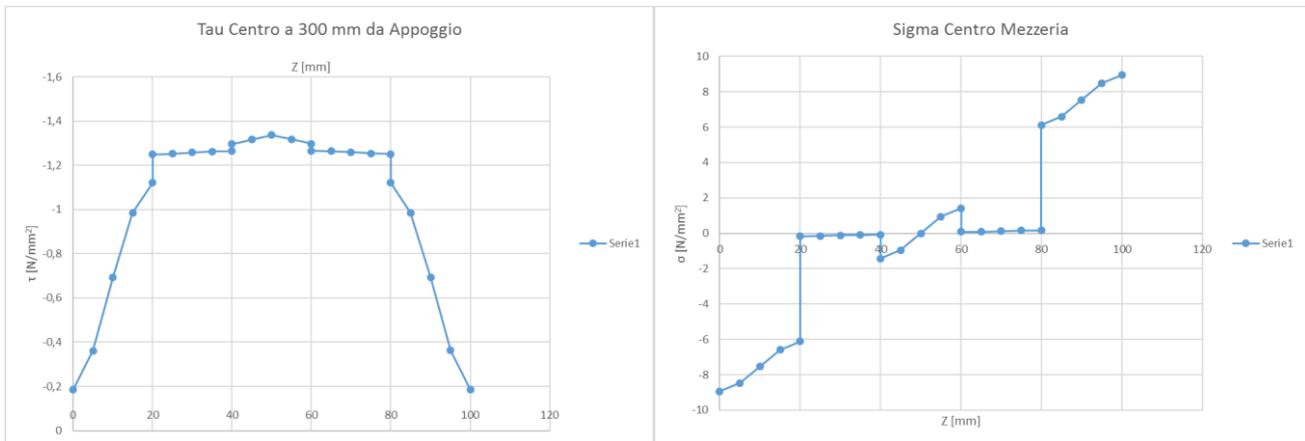


Figura 4.3.7 Andamento degli sforzi nel modello FEM - pannello a 5 strati  $h=100$  mm

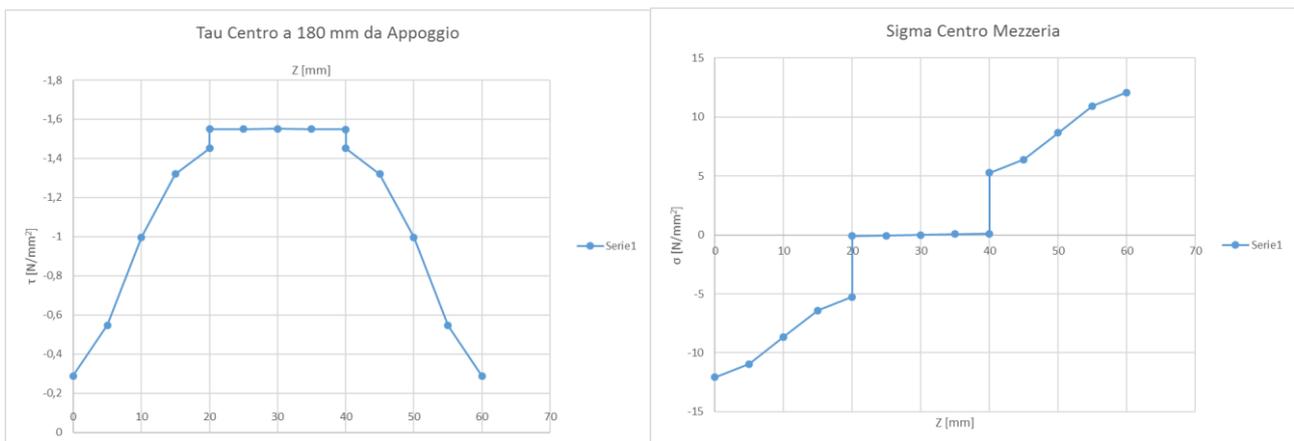


Figura 4.3.8 Andamento degli sforzi nel modello FEM- pannello a 3 strati  $h=60$  mm

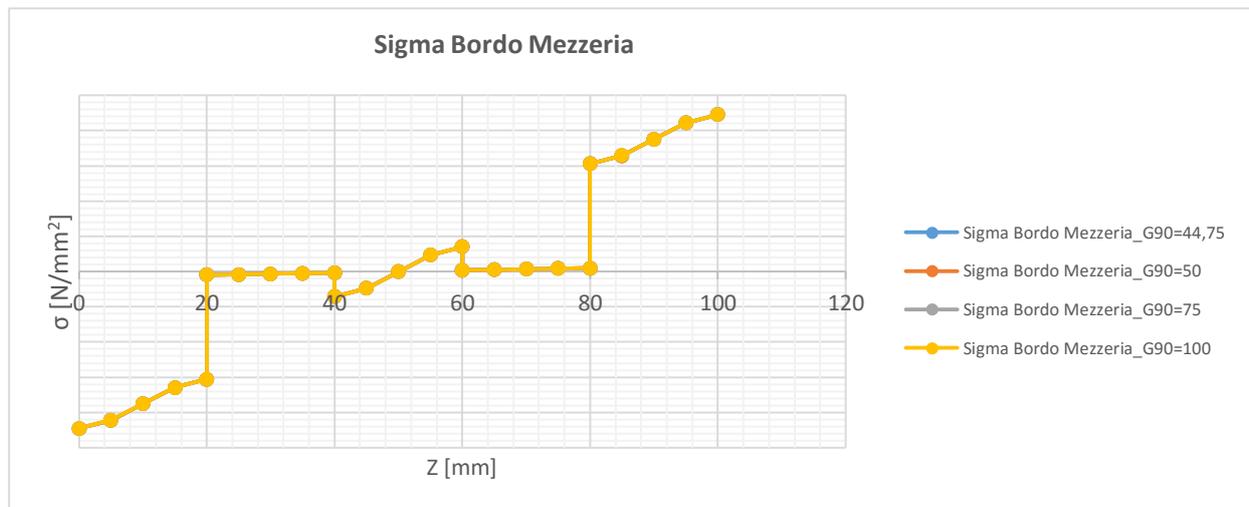


Figura 4.3.9 Andamento degli sforzi di trazione nella sezione di mezzeria al variare di Gr. I diagrammi sono praticamente coincidenti.

#### 4.3.3 Confronto tra FEM, metodi analitici e risultati sperimentali.

È apparso interessante un confronto tra il modello FEM e i due metodi analitici più utilizzati nella progettazione degli elementi di xlam: il Metodo Gamma Modificato (GM) ed il Shear Analogy (SAM). Si sono confrontate le deformazioni del modello FEM con quelle calcolate con i due metodi analitici variando il rapporto  $l/h$  (da 5 a 40) e il  $Gr$  (da 40 a 100 MPa) mentre tutti gli altri parametri elastici sono stati mantenuti invariati. La figura 4.3.10 mostra il confronto delle deformate (errori percentuali) nel caso del rapporto  $l/h = 5$ . Si può notare la dipendenza dal  $Gr$  della deformazione del pannello ed il fatto che il SAM sia più vicino al modello FEM rispetto al GM. **Questo conferma che per  $l/h < 15$  nel calcolo della deformata totale di un pannello xlam non si può trascurare il contributo del taglio e che l'utilizzo del SAM (che tiene conto di questo contributo) è sicuramente più appropriato.** Come si può osservare dai grafici (figura 4.3.12/13/14/16 per  $l/h > 18$  i due metodi analitici si equivalgono e riescono a predire la deformazione (e quindi la rigidezza flessionale) in modo accurato con errori vicino all'unità percentuale. **Per  $l/h > 15$  l'errore che si commette non cambia in maniera significativa al variare del  $Gr$ .**

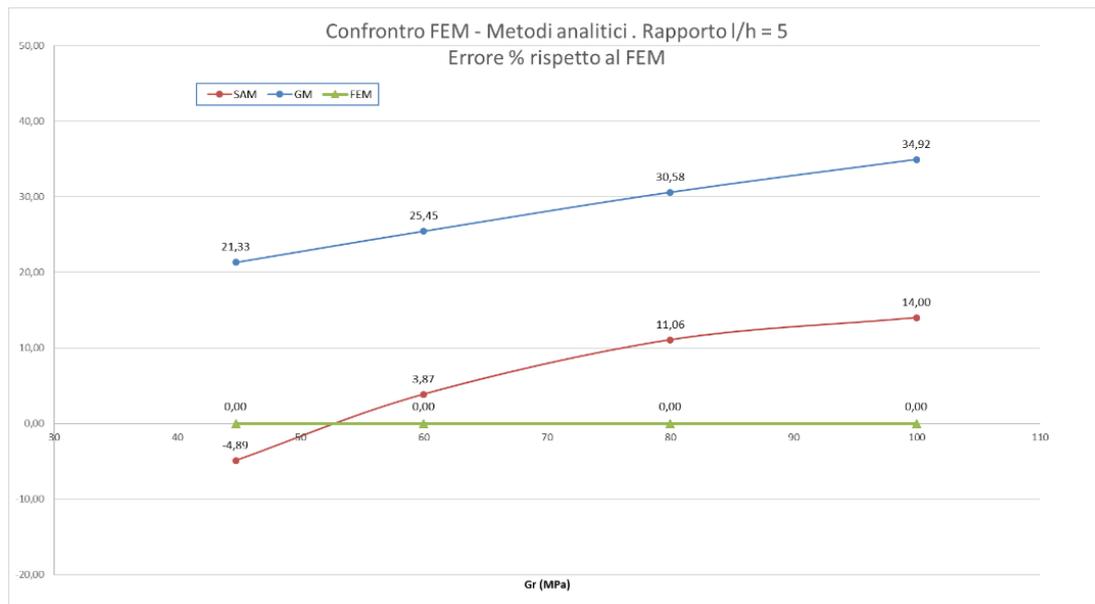


Figura 4.3.10 Confronto delle deformate (errore %) FEM-GM-SAM con  $l/h = 5$

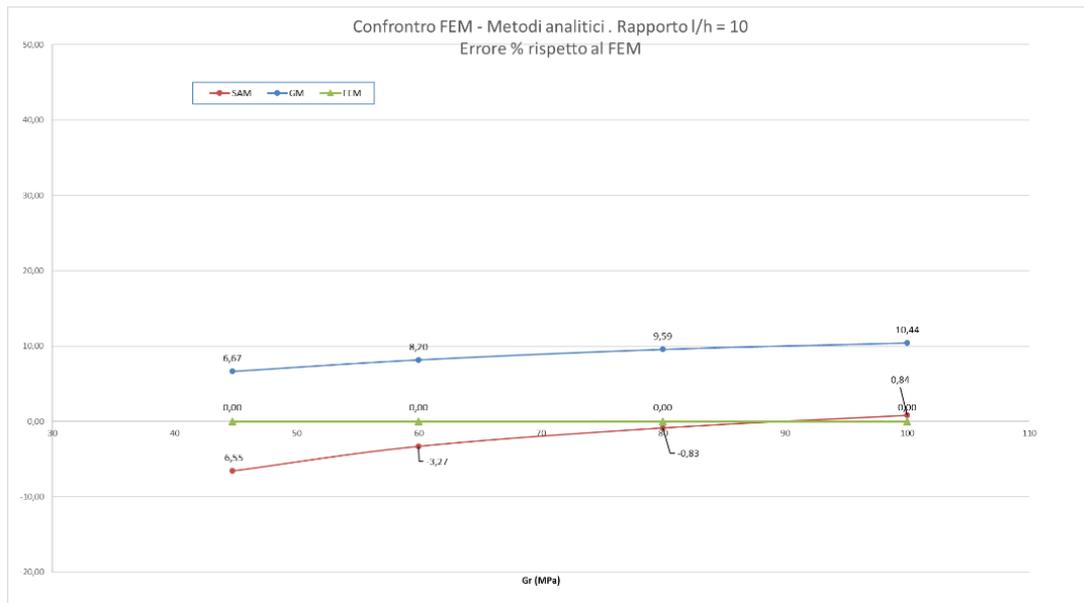


Figura 4.3.11 Confronto delle deformate (errore %) FEM-GM-SAM, l/h = 10

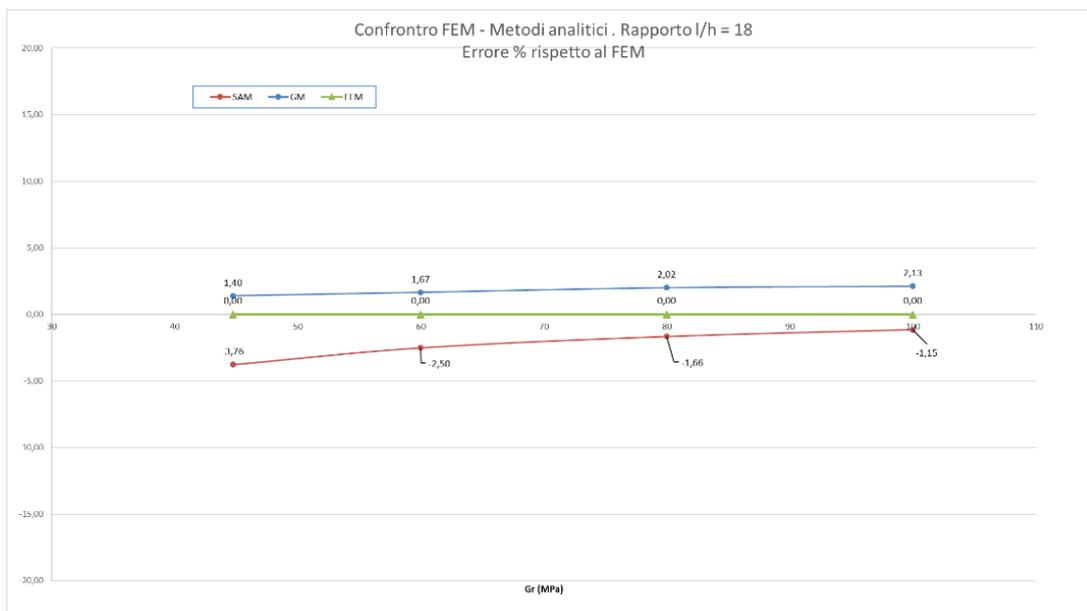


Figura 4.3.12 Confronto delle deformate (errore %) FEM-GM-SAM l/h = 18

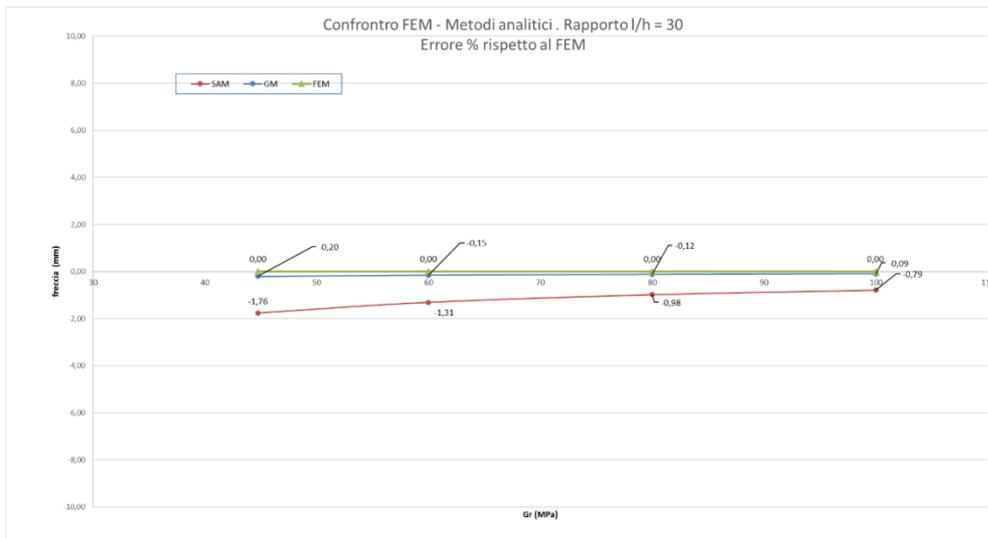


Figura 4.3.13 Confronto delle deformate (errore %) FEM-GM-SAM con  $l/h = 30$

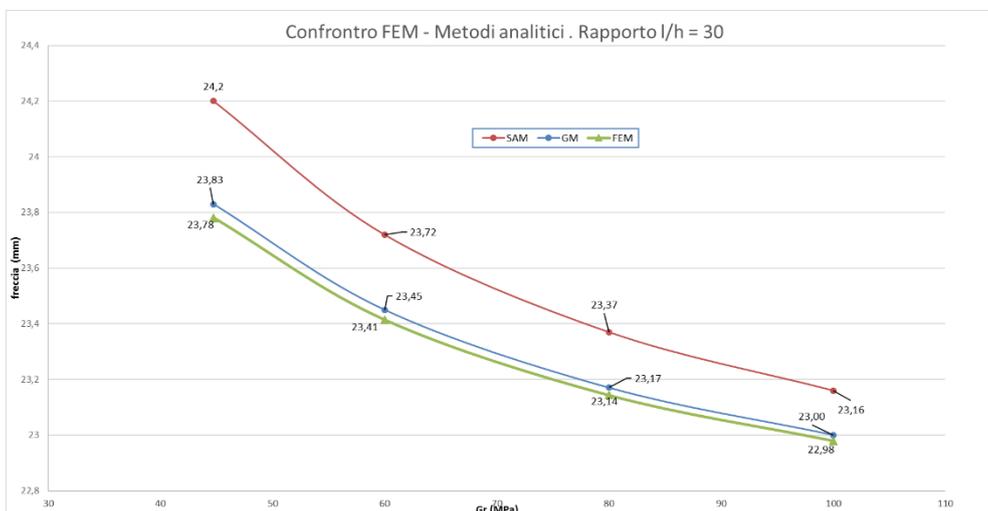


Figura 4.3.14 Confronto delle deformate FEM-GM-SAM con  $l/h = 30$

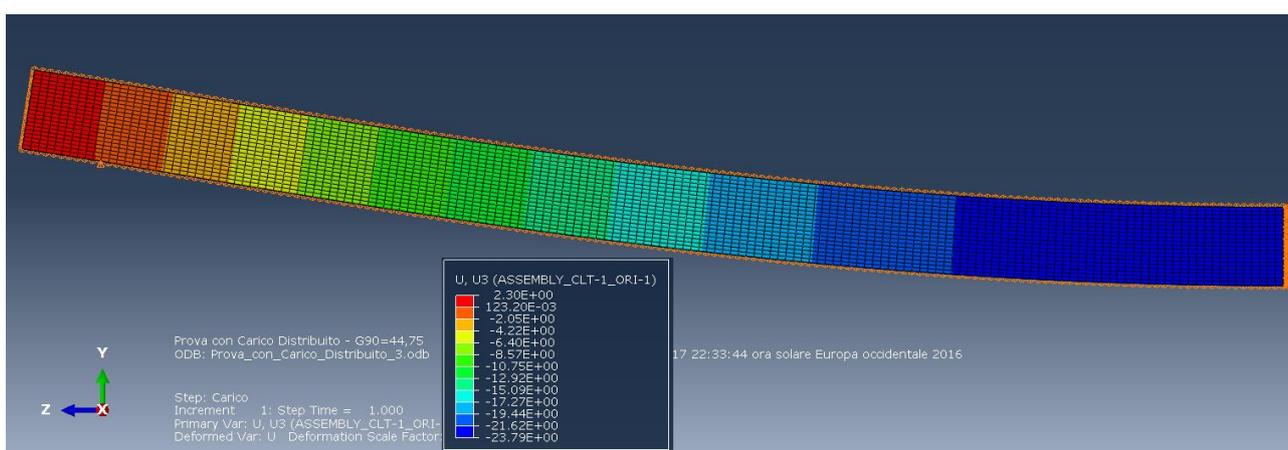


Figura 4.3.15 Deformata del modello FEM a 5 strati da 20 mm,  $H_{tot} = 100$  mm,  $l/h = 30$ ,  $Gr = 44,75$

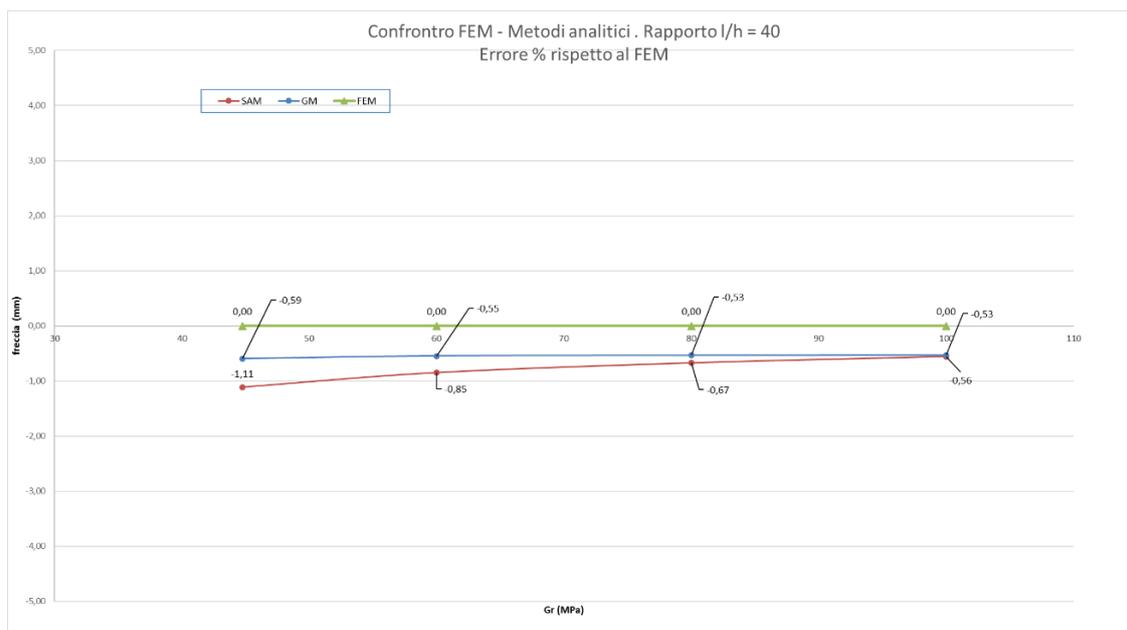


Figura 4.3.16 Confronto delle deformate (errore %) FEM-GM-SAM  $l/h = 40$

Il grafico di figura 4.3.17 rappresenta il confronto delle frecce registrate durante le prove a flessione su quattro punti con  $l/h = 18$  con quelle ottenute tramite il modello FEM ed i metodi analitici.

Con il GM si sono ottenute due curve, una con  $E_0 = 8000$  MPa (che corrisponde al C16 dichiarato dal classificatore per le tavole utilizzate) e l'altra con  $E_0$  ottenuto con le prove sperimentali

In tutti i casi si sono tenuti costanti tutti i moduli tranne il  $G_r$  che è stato fatto variare da 40 a 100 MPa. Si può osservare che i valori del FEM, GM e SAM corrispondono ai valori ottenuti sperimentalmente per i valori di  $G_r$  che sono compresi tra 60 e 80 MPa. In particolare, se si osserva la curva del FEM, si vede che il valore che corrisponde a quello sperimentale si ha per un  $G_r = 72$  MPa che confermerebbe che i rapporti tra i moduli ipotizzati  $E_0/G_0 = 16$  e  $G_0/G_r = 10$ , sono validi nel caso del pino marittimo sardo. Per un  $E_0 = 10800$  MPa misurato nella prova sperimentale si avrebbe  $G_0 = 675$  MPa  $\Rightarrow G_r = 67,5$  MPa vicino al valore di 72 MPa ottenuto tramite il modello FEM.

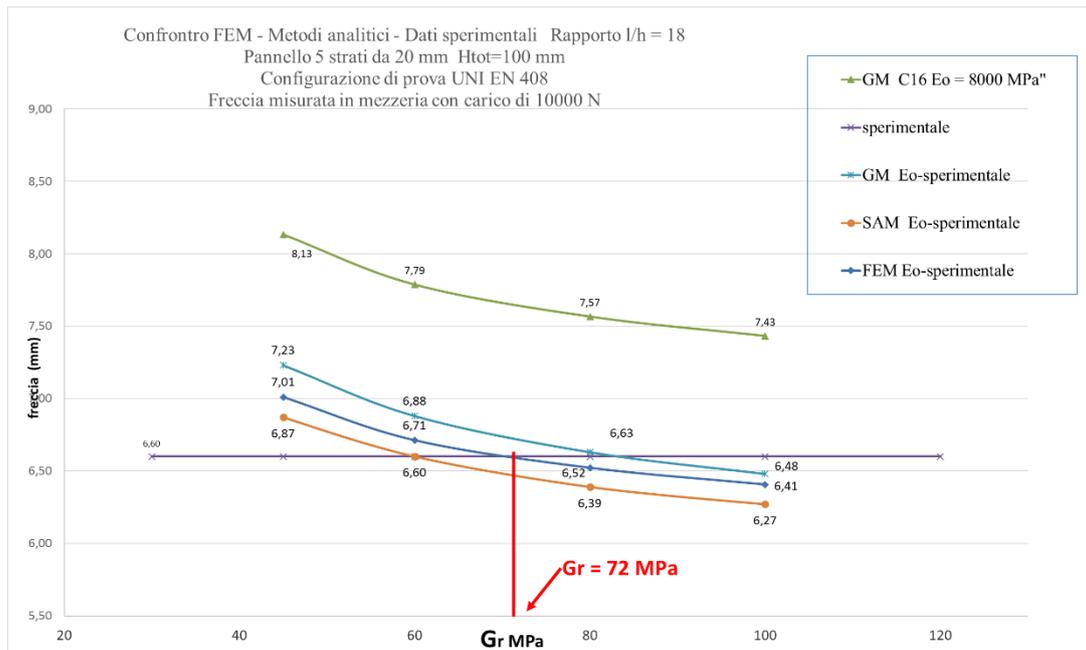


Figura 4.3.17 Confronto FEM, GM, SAM e dati sperimentali

Questa ricerca aveva lo scopo di indagare la possibilità di avviare una filiera corta del legno strutturale disponibile nel patrimonio boschivo della Sardegna. Si è deciso di iniziare classificando il Pino Marittimo, specie legnosa diffusa sul territorio regionale. L'indagine sperimentale ha evidenziato che il Pino Marittimo per uso strutturale è limitato dal suo basso modulo elastico. Questo ha portato a definire due classi di resistenza piuttosto basse (C14 e C16 secondo la UNI EN 338 2010). Un prodotto strutturale come il xlam si adatta bene all'esigenza di utilizzare un materiale con prestazioni meccaniche basse. Tuttavia, i pannelli in commercio sono realizzati con tavole con profili prestazionali superiori a quelle del Pino Marittimo, ed è con quelli che il prodotto che si è testato deve essere confrontato. Il confronto è utile per capire se il prodotto realizzato può (ed in che modo) essere competitivo. Nella tabella 4.3.1 sono stati riportati il valore del  $E_{\text{eff}}$  per tre pannelli in commercio (con lo stesso spessore del prototipo testato) confrontati con la rigidezza flessionale (è il parametro che generalmente governa il dimensionamento del pannello x-lam agli stati limite di esercizio) del prototipo testato in questa campagna sperimentale.

Produttore	Prodotto	N° strati	h strato (mm)	htot	Classe	E <sub>ieff</sub> (N*mm <sup>2</sup> )
KLH	5s 100mm DL	5	20	100	C24	7,6853E+11
Binderholz	100-5s	5	20	100	C24	7,3241E+11
Stora Enso	100L5s	5	20	100	C24	8,3141E+11
Sardegna	100-5s PM	5	20	100	C16-C14	5,3268E+11
Sardegna mod	100-5s PM mod	5	23	115	C16-C14	8,1014E+11

Tabella 4.3.1 Confronto tra prodotti commercializzati ed il pannello in Pino Marittimo in termini di E<sub>ieff</sub> e spessore.

Si può osservare che il pannello realizzato con il pino marittimo, essendo composto da tavole appartenenti ad una classe inferiore (C16 negli strati longitudinali) avrà a parità di spessore una rigidezza inferiore rispetto ai pannelli in commercio (generalmente realizzati con C24). Con un aumento dello spessore di 15 mm (15%) il pannello in Pino Marittimo (100-5s PM mod) ha il valore di rigidezza flessionale simile (o superiore) agli altri pannelli. Gli stessi risultati sono raffigurati nel grafico di figura 4.3.18. Lo stesso confronto potrebbe essere fatto nel caso delle pareti dove il dimensionamento è governato dall'instabilità per carico di punta e quindi dalla rigidezza della sezione.

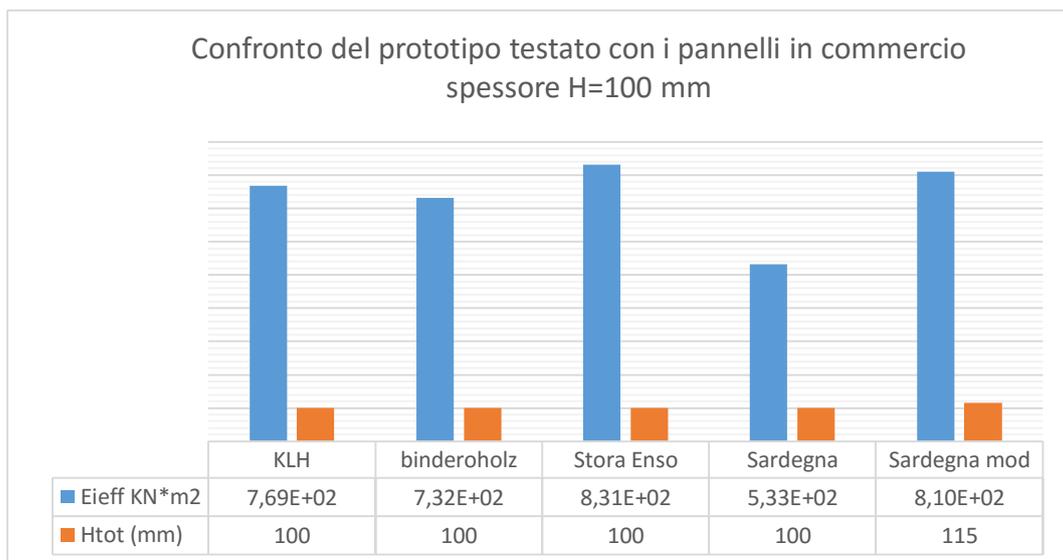


Figura 4.3.18 Confronto del prototipo con i pannelli in commercio

#### 4.3.4 Bibliografia

- Blass H. J., and P. Fellmoser. 2004. Design of solid wood panels with cross layers. In Proceedings of the 8th World Conference on Timber Engineering, June 14-17, 2004, Lahti, Finland, 2:543-548.
- Gerhard Schickhofer, Helene Unterwieser 2011, Characteristic Values and test configuration of CLT.
- Feichter, I., “*Spannungs- und Traglastberechnungen an ausgewählten Problemen der Holz73 Massivbauweise in Brettsperrholz*“, Institute for Timber Engineering and Wood Technology, TU Graz, Masterarbeit, 2013
- Görlacher, R., “Ein Verfahren zur Ermittlung des Rollschubmoduls von Holz”, Universität Karlsruhe, Lehrstuhl für Ingenieurholzbau und Baukonstruktionen, 2002
- Fellmoser P, Blass H. Influence of rolling shear modulus on strength and stiffness of structural bonded timber elements. Germany; 2004.
- Kreuzinger H. 1995. Mechanically jointed beams and columns. In Timber Engineering – STEP 1, ed. H. J. Blass et al., B11/1-8. Almere, The Netherlands: Centrum Hout.1999..
- Mestek, P., H. Kreuzinger, and S. Winter. 2008. Design of cross laminated timber (CLT). Paper presented at the 10th World Conference on Timber Engineering, June 2-5, 2008, Miyazaki, Japan.
- Steiger, R., and A. Gulzow. 2009. Validity of bending tests on strip-shaped specimens to derive bending strength and stiffness properties of cross laminated solid timber (CLT). In Proceedings of CIB-W18 Timber Engineering, University of Karlsruhe, Karlsruhe, Germany, paper 42-12-4.
- Steiger, R., A. Gulzow, and D. Gsell. 2008. Non-destructive evaluation of elastic material properties of cross laminated timber (CLT). In Proceedings of the COST E53 Conference, October 29-30, 2008, Delft, The Netherlands, p. 171-182.
- Timoshenko, S., and S. Woinowsky-Krieger. 1959. Theory of plates and shells.
- Jobstl, R. A., and G. Schickhofer. 2007. Comparative examination of creep of GTL and CLT-slabs in bending. In Proceedings of CIB-W18 Timber Engineering, University of Karlsruhe, Karlsruhe, Germany, paper 40-12-3.
- Jobstl, R. A., T. Bogensperger, and G. Schickhofer. 2008. In-plane shear strength of cross laminated timber. In Proceedings of CIB-W18 Timber Engineering, University of Karlsruhe, Karlsruhe, Germany, paper 41-12-3.
- Jobstl, R.A., T. Moosbrugger, T. Bogensperger and G. Schickhofer. 2006. A contribution to the design and system effect of cross laminated timber (CLT). In Proceedings of CIB-W18 Timber Engineering, University of Karlsruhe, Karlsruhe, Germany, paper 39-12-5.
- Ceccotti A. 2003. Composite structures. In Timber Engineering, ed. S. Thelandersson and H. J. Larsen, chapter 21. West Sussex, England: John Wiley and Sons.

## 5 Conclusioni

- L'analisi delle potenzialità dei boschi di pino marittimo, dai quali è stato prelevato il materiale, servirà per stimare il potenziale del territorio regionale e capire se il patrimonio boschivo esistente sia in grado di soddisfare la richiesta di una filiera corta del legno per la produzione di pannelli x-lam.
- La regola di classificazione creata in questo lavoro, indispensabile per l'uso strutturale di questa specie, permetterà l'utilizzo della specie studiata nella realizzazione di prodotti strutturali come i pannelli x-lam e potrà essere utilizzata come base per la creazione di nuove regole di classificazione per altre conifere presenti nel patrimonio boschivo regionale.
- I risultati ottenuti sui pannelli con strati da 40 mm hanno presentato importanti difetti di incollaggio. La pressa utilizzata è di tipo sottovuoto ed è risultata essere inadatta per l'incollaggio di tavole di spessori elevati. La produzione di pannelli in pino marittimo dovrebbe prevedere l'utilizzo di presse idrauliche.
- I prototipi di x-lam in pino marittimo sardo realizzati e testati hanno dimostrato di poter essere utilizzati nelle costruzioni. Certamente molti altri test devono essere effettuati per definire completamente le prestazioni di questi pannelli. A prima vista, se confrontati con i pannelli in commercio delle stesse dimensioni, risulterebbero essere non competitivi perché richiederebbero spessori maggiori per uguagliarne le prestazioni. In realtà con piccoli incrementi dello spessore (15%) il pannello in pino marittimo sardo uguaglia o supera le prestazioni, in termini di rigidità flessionale, dei prodotti concorrenti.

*“ L’immensa mole dei lavori che ci attende ... impone che di ogni materiale costruttivo si faccia l’uso più razionale e economico sfruttando in modo opportuno le sue caratteristiche peculiari ...”*

**Prof. Guglielmo Giordano (Torino – 1946 )**

## 6 Sommario

Capitolo 1: Introduzione .....	6
1.1    Idea alla base del progetto .....	6
1.2    Obiettivi generali della ricerca .....	7
1.3    Struttura e scopo della tesi .....	9
2    Approvvigionamento del materiale .....	10
2.1    Premessa.....	10
2.2    Inquadramento territoriale e prima caratterizzazione dei popolamenti .....	10
2.3    Attività svolte .....	12
2.3.1    Cavallettamento totale e mappatura dei popolamenti (sito A) .....	12
2.3.2    Primi test e affinamento della procedura .....	13
2.3.3    Funzione di profilo individuale .....	13
2.3.4    Algoritmo di caratterizzazione dello schema di taglio ottimale .....	14
2.3.5    Selezione delle piante e assortimentazione in piedi .....	15
2.3.6    Abbattimento e assortimentazione finale (a terra).....	16
2.3.7    Funzione di profilo per il pino marittimo di 40 anni di Pattada .....	17
2.3.8    Attività in segheria.....	18
2.3.9    L'essicazione.....	19
2.4    Potenziale disponibile per uso strutturale (ed energetico) .....	20
2.4.1    Bibliografia .....	23
3    La classificazione.....	24
3.1    Introduzione.....	24
3.2    La pre-classificazione .....	29
3.2.1    L'importanza della pre-classificazione .....	29
3.2.2    Materiale e metodo .....	31
3.2.3    Le misure sui topi e sulle tavole. ....	34
3.2.3    Analisi dei dati e conclusioni. ....	35

3.2.5	Bibliografia.....	38
3.3	La classificazione a vista.....	39
3.3.1	Introduzione.....	39
3.3.2	La normativa.....	39
3.3.3	Materiale e metodo.....	52
3.3.4	Analisi dei dati sperimentali.....	61
3.3.5	Sviluppo di una regola di classificazione a vista per il pino marittimo sardo.....	69
3.4	La classificazione a Macchina.....	73
3.4.1	Introduzione.....	73
3.4.2	Materiale e metodo.....	76
3.4.3	Analisi di correlazione.....	78
3.5	Commenti e conclusioni.....	86
3.5.1	Bibliografia.....	88
4	Capitolo 4: Il xlam.....	89
4.1	Introduzione alla tecnologia del x-lam.....	89
4.2	Le prove sperimentali sui pannelli.....	94
4.2.1	Prova di flessione per il calcolo del MOE e del MOR.....	95
4.2.2	Prove di taglio – Misura della resistenza $f_{v,90,90}$ - rolling shear.....	106
4.2.3	Commenti sui dati sperimentali.....	112
4.3	Confronto tra FEM, metodi analitici e dati sperimentali.....	113
4.3.1	I metodi analitici.....	113
4.3.2	Modellazione meccanica del materiale.....	121
4.3.3	Confronto tra FEM, metodi analitici e risultati sperimentali.....	125
4.3.4	Bibliografia.....	131
5	Conclusioni.....	132