

UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI MODENA E REGGIO EMILIA

**Dipartimento di Ingegneria “Enzo Ferrari”
Corso di laurea magistrale in Ingegneria Civile
ed Ambientale**

**VALUTAZIONE SPERIMENTALE DELLA RESISTENZA AL TAGLIO
DELLA LINEA DI INCOLLAGGIO E DELLA RESISTENZA ALLA
DELAMINAZIONE NEL LEGNO LAMELLARE DI CASTAGNO PER
LA PROMOZIONE DI LEGNI LOCALI SOTTOUTILIZZATI**

**EXPERIMENTAL EVALUATION OF GLUE LINE SHEAR STRENGTH
AND DELAMINATION RESISTANCE IN CHESTNUT LAMINATED
TIMBER FOR THE PROMOTION OF UNDERUTILIZED LOCAL
WOODS**

**Relatore
Prof. Bruno Briseghella**

**Correlatori
Prof. Angelo Aloisio
Prof. Roberto Tomasi**

**Laureando
Pianosi Leonardo
Matr. 196219**

**Anno Accademico
2025-2026**

INDICE

INDEX

RINGRAZIAMENTI	5	ACKNOWLEDGEMENTS
1. SOMMARIO	6	1. ABSTRACT
2. INTRODUZIONE	10	2. INTRODUCTION
2.1. Collaboratori	11	2.1. Collaborators
2.2. Cenni storici	13	2.2. Historical notes
2.3. Scelta del castagno	15	2.3. Choosing the sweet chestnut
2.4. La soluzione adesiva	17	2.4. The adhesive
2.5. Produzione del materiale	19	2.5. Material production
3. LE PROVE SPERIMENTALI	29	3. THE EXPERIMENTAL TESTS
4. PROVE DI RESISTENZA A TAGLIO LONGITUDINALE	33	4. LONGITUDINAL SHEAR RESISTANCE TESTS
4.1. Campioni	33	4.1. Samples
4.2. Strumentazione	35	4.2. Equipment
4.3. Risultati	37	4.3. Results
4.4. Analisi dei risultati	41	4.4. Analysis of the results
4.5. Considerazioni sui risultati	43	4.5. Comments on the results
4.5.1. Valori confrontati con legni soffici (ed esempio di progettazione)	43	4.5.1. Values compared with soft woods (and design example)
4.5.2. Valori alti anche nei casi delle rotture nella colla	51	4.5.2. High values also in cases of glue failures
4.5.3. Rotture nel legno	51	4.5.3. Wood Failures
4.5.4. Perpendicolarità degli anelli di accrescimento	53	4.5.4. Perpendicularity of the growth rings
4.5.5. Imperfezioni	53	4.5.5. Imperfections
4.5.6. Porzioni di legno dense e impermeabili	55	4.5.6. Dense and Impermeable Wood Portions
4.6. Conclusioni	55	4.6. Conclusions
5. PROVE DI RESISTENZA A DELAMINAZIONE	59	5. DELAMINATION RESISTANCE TESTS
5.1. Campioni	61	5.1. Samples

5.2. Strumentazione	63	5.2. Equipment
5.3. Esecuzione del test	63	5.3. Test execution
5.4. Analisi dei risultati	67	5.4. Analysis of the results
5.5. Considerazioni sui risultati	75	5.5. Comments on the results
5.5.1. <i>Confronto con altre specie</i>	75	5.5.1. <i>Comparison with other species</i>
5.5.2. <i>Effetti delle imperfezioni</i>	77	5.5.2. <i>Effects of imperfections</i>
5.5.3. <i>Delaminazioni alle estremità</i>	77	5.5.3. <i>Delaminations at the ends</i>
5.5.4. <i>Difetti del legno</i>	77	5.5.4. <i>Wood Defects</i>
5.5.5. <i>Perpendicolarità degli anelli di accrescimento</i>	79	5.5.5. <i>Perpendicularity of the growth rings</i>
5.5.6. <i>Cipollatura</i>	81	5.5.6. <i>Ring shake</i>
6. CONCLUSIONI FINALI E SPUNTI PER LA FUTURA RICERCA	85	6. FINAL CONCLUSIONS AND RESERACH SUGGESTIONS
6.1. Conclusioni	86	6.1. Conclusions
6.2. Spunti per la ricerca	88	6.2. Research suggestions
BIBLIOGRAFIA	92	REFERENCES

RINGRAZIAMENTI / ACKNOWLEDGEMENTS

Si ringraziano innanzi tutto il professor Briseghella Bruno, relatore di questa tesi, e i professori Tomasi Roberto e Aloisio Angelo, correlatori, per aver concepito, promosso e seguito questa attività di ricerca sia nelle fasi di laboratorio che nella stesura dell'elaborato scritto.

Special thanks also go to the collaborators from Dynea, NMBU and NIBIO for providing the material, their facilities and, most of all, for sharing their knowledge in the field, essential for the success of the research activity.

Si ringrazia anche l'azienda Campaldino Legnami per la fiducia riposta e per aver fornito il legname necessario durante le prove di laboratorio.

1. SOMMARIO

Questa tesi ha lo scopo di riportare i risultati del progetto di ricerca svolto, concentrato sull'analisi delle prestazioni di campioni GLULAM alternativi, cioè realizzati utilizzando legno di Castagno (*Castanea Sativa*) abbinato all'adesivo Prefere 4546 con aggiunta di indurente Prefere 5096, forniti da Dynea .

Nei capitoli seguenti vengono descritti i materiali utilizzati, la produzione degli elementi di legno lamellare e l'esecuzione dei test sperimentali su campioni ricavati da tali elementi.

La prima proprietà fondamentale indagata è la resistenza a taglio longitudinale della linea di incollaggio attraverso la modalità descritta nella normativa EN 14080: 2013 nell'allegato D, metodo anche denominato "shear block test".

In questo modo è stato possibile determinare la massima resistenza allo scorrimento di due lamelle incollate, proprietà fondamentale per garantire che le lamelle impiegate in una trave GLULAM abbiano un comportamento solidale e non indipendente tra loro.

La seconda proprietà studiata è la resistenza a delaminazione, ovvero alla separazione delle lamelle per via delle deformazioni igroscopiche differenziali del legno, e quindi delle conseguenti tensioni generate. Questa resistenza è fondamentale per l'applicabilità di questa tecnologia sul lungo periodo, in particolare se esposta ad agenti

1. ABSTRACT

This thesis aims to report the results of the research project conducted, which focused on analyzing the performance of alternative GLULAM samples, namely those made using chestnut wood (*Castanea sativa*) combined with the Prefere 4546 adhesive with the addition of Prefere 5096 hardener, supplied by Dynea.

The following chapters describe the materials used, the production of the glulam elements, and the experimental tests performed on samples obtained from these elements.

The first fundamental property investigated is the longitudinal shear strength of the glue line using the method described in the EN 14080:2013 standard, Annex D, a method also known as the "shear block test."

This allowed us to determine the maximum sliding resistance of two glued lamellae, a fundamental property for ensuring that the lamellae used in a GLULAM beam behave as one and not independently of each other.

The second property studied is resistance to delamination, or the separation of the bonded lamellae due to differential hygroscopic deformations of the wood and the resulting stresses. This resistance is essential for the long-term applicability of this technology, particularly when

atmosferici esterni o in ambienti con forti cicli di variazione di umidità.

La normativa utilizzata in questo caso è la UNI EN 302-2: 2023, che prevede la misurazione delle percentuali di lunghezze delaminate nelle linee di incollaggio generate da cicli di impregnamento in autoclave e asciugatura in cella climatica ventilata.

Gli esiti delle prove elencate hanno dimostrato che l'abbinamento tra il castagno e l'adesivo utilizzato ha forti potenzialità sia sotto aspetti meccanici sia per quanto riguarda la resistenza a delaminazione.

Emerge però l'essenzialità di controllare il processo di produzione del legno lamellare, in quanto i difetti nelle linee di incollaggio al termine della produzione hanno successivamente portato ai risultati più negativi, in particolare per quanto riguarda la delaminazione.

exposed to external atmospheric agents or in environments with severe humidity cycles.

The standard used in this case is UNI EN 302-2:2023, which requires measuring the percentage of delaminated lengths in the glue lines generated by autoclave impregnation and drying cycles in ventilated climatic cells.

The results of the tests listed demonstrated that the combination of chestnut and the adhesive used has strong potential, both in terms of mechanical properties and delamination resistance.

However, it results essential to monitor the laminated wood production process, as defects in the glue lines at the end of production have subsequently led to the most negative results, particularly with regard to delamination.

INTRODUZIONE

INTRODUCTION

2. INTRODUZIONE

L'argomento trattato all'interno di questa tesi si inserisce nel contesto della promozione di legni locali sottoutilizzati per la produzione di legno lamellare. Con legni sottoutilizzati si intende tutte quelle specie legnose dalle proprietà strutturali soddisfacenti, ma utilizzate unicamente per applicazioni semplici (come le travi in legno massello) e poco ingegnerizzate a causa di una scarsa ricerca o della non applicabilità con tecnologie obsolete.

La produzione del legno lamellare prevede tipicamente l'utilizzo di legno tenero derivante da conifere, il più diffuso è l'abete rosso. Questo perché in primis la pianta in sé per sé vede una crescita rapida e verticale, il che permette di ricavarne lunghe tavole rettilinee e poco contorte.

In secondo luogo, il materiale che se ne ricava è facilmente lavorabile, leggero, presenta pochi difetti e la combinazione di alta permeabilità e bassa presenza di tannini lo rendono ideale all'incollaggio.

Nonostante l'ingente ricerca che è stata e continua a essere condotta sul legno tenero, questo presenta un limite di resistenza naturale. Proprio per questa motivazione negli ultimi anni parte dell'attenzione si è spostata sul tentativo di inglobare anche legni duri prodotti da latifoglie (come quercia, faggio, frassino e altre specie) nella produzione del legno lamellare. Il vantaggio dei legni di latifolia è la maggiore resistenza meccanica del materiale, a

2. INTRODUCTION

The topic addressed in this thesis falls within the context of promoting underutilized local woods for the production of glulam. Underutilized woods refer to all those wood species with satisfactory structural properties, but used only for simple applications (such as solid wood beams) and poorly engineered due to lack of research or inapplicability with obsolete technologies.

Laminated wood production typically involves the use of softwood from conifers, the most common being Norway spruce. This is because, first, the tree itself grows rapidly and vertically, allowing for the production of long, straight, and only slightly twisted boards.

Second, the resulting material is easy to work with, lightweight, has few defects, and its combination of high permeability and low tannin content makes it ideal for gluing.

Despite the extensive research that has been and continues to be conducted on softwood, it has a natural resistance limit. For this very reason, in recent years, some attention has shifted to incorporating hardwoods from broadleaf trees (such as oak, beech, ash, and other species) in the production of laminated wood. The advantage of hardwoods is their greater mechanical strength, but this comes at the expense of other aspects such as

scapito però di altri aspetti come la difficile lavorabilità, l'alto peso specifico e un importante contenuto di tannini che ne riducono l'incollabilità, ma ne aumentano anche la resistenza all'attacco di funghi e insetti.

Nel corso di questa esperienza di ricerca si è voluto indagare l'idoneità del castagno (*Castanea Sativa*) alla produzione di legno lamellare.

2.1 COLLABORATORI

Questo progetto è il frutto di una collaborazione tra enti italiani e norvegesi tra cui università, aziende e istituti di ricerca.

Di seguito gli enti coinvolti:

- DYNEA: azienda norvegese specializzata nella produzione di adesivi per uso strutturale, tra cui la soluzione adesiva utilizzata nel progetto di ricerca.
- UNIVAQ: Università degli Studi dell'Aquila.
- NMBU: Università Norvegese di Scienze della Vita. Sono stati coinvolti i dipartimenti REALTEK e MINA.
- UNIMORE: Università degli studi di Modena e Reggio Emilia.
- CAMPALDINO LEGNAMI: azienda italiana specializzata nella produzione e lavorazione di legname tra cui il castagno utilizzato nell'esperienza di ricerca
- NIBIO: istituto di ricerca norvegese specializzato in materie di sostenibilità e innovazione.

their difficult workability, high specific weight, and high tannin content, which reduces their gluing properties but also increases their resistance to fungi and insects.

This research project aimed to investigate the suitability of chestnut (*Castanea Sativa*) for the production of laminated wood.

2.1 COLLABORATORS

This project is the result of a collaboration between Italian and Norwegian institutions, including universities, companies, and research institutes.

The following institutions are involved:

- DYNEA: Norwegian company specializing in the production of structural adhesives, including the adhesive solution used in the research project.
- UNIVAQ: University of L'Aquila.
- NMBU: Norwegian University of Life Sciences. The REALTEK and MINA departments were involved.
- UNIMORE: University of Modena and Reggio Emilia.
- CAMPALDINO LEGNAMI: Italian company specializing in the production and processing of wood, including the chestnut used in the research project.
- NIBIO: Norwegian research institute specializing in sustainability and innovation.



Fig.1

Fig.1: Fotografia storica ritraente le fasi di costruzione della Sala della Ferrovia Imperiale all'Esposizione Universale, Bruxelles, 1910.

Fig.1: Historical picture portraying the construction phase of the Imperial Railway Hall World's Fair, Brussels, 1910.

2.2 CENNI STORICI

Questa attività di ricerca si concentra sul legno lamellare, un'importante forma di ingegnerizzazione del legno che consente di ottenere elementi con grandi sezioni e lunghe luci, aggirando la necessità di ricercare e abbattere alberi di notevoli dimensioni e con poche imperfezioni.

Le prime tracce di un tentativo di perseguire questa tecnologia risale al XVI secolo (Philibert de l'Orme propose nel suo trattato *Nouvelles inventions pour bien bastir et à petits frais* (1561)) dove non si prevedeva l'uso di adesivi, ma l'utilizzo di perni lignei per una connessione puramente meccanica (tecnologia che per altro è stata ripresa in considerazione in tempi moderni visto l'impatto ambientale derivante dalla produzione delle colle).

Solo all'inizio del '900 si iniziano ad avere i primi esempi di incollaggio, come il padiglione per l'Esposizione Universale di Bruxelles del 1910 ad opera di Otto Hetzer, realizzato utilizzando la caseina (una proteina del latte) come collante (Fig.1).

Attorno agli anni '30 e '40 si iniziarono ad applicare invece resine sintetiche, come urea-formaldeide e resorcina, che consentivano di avere anche proprietà impermeabilizzanti, espandendo il campo di applicabilità di tale tecnologia.

In tempi moderni si ricorre invece a colle poliuretatiche (PUR) o melaminiche (MUF),

2.2 HISTORICAL NOTES

This activity is part of the research on laminated timber, an important form of wood engineering that allows for the creation of elements with large cross-sections and long spans, bypassing the need to search for and fell large trees with few imperfections.

The first traces of an attempt to pursue this technology date back to the 16th century (Philibert de l'Orme proposed it in his treatise "*Nouvelles inventions pour bien bastir et à petits frais*" (1561)), where the use of adhesives was not envisaged, but rather the use of wooden pins for a purely mechanical connection (a technology that has been revived in modern times given the environmental impact of glue production).

Only at the beginning of the 20th century did the first examples of gluing begin to appear, such as the pavilion for the 1910 Brussels World's Fair designed by Otto Hetzer, which used casein (a milk protein) as a glue (Fig.1).

Around the 1930s and 1940s, synthetic resins, such as urea-formaldehyde and resorcinol, began to be used, which also provided waterproofing properties, expanding the scope of this technology.

In modern times, polyurethane (PUR) or melamine (MUF) adhesives are used, which guarantee high

Species	Density (kg/m ³)	Durability Class	External Use	Cost range
Spruce	~460	4-5	Poor	Economic
Douglas fir	~530-590	3-4	Limited	Mid-Range
Scots Pine	~550	3-4	If Treated	Economic
Larch	~600	3	Excellent	Mid-Range
Ash	~680	5	Poor	High
European Oak	~680-720	2	Excellent	Premium
Sweet chestnut	~590	2	Excellent	High

Fig.2

Fig.2: Tabella contenente proprietà generali delle essenze più utilizzate o studiate.

Fig.2: Table illustrating general properties of the main used or studied species.

le quali garantiscono alte prestazioni di resistenza meccanica abbattendo le emissioni di formaldeide.

2.3 SCELTA DEL CASTAGNO

Tra le varie specie di latifoglie, si è scelto di indagare l'applicabilità del Castagno (*Castanea Sativa*) perché viene considerato un legno dalle proprietà "ibride" in quanto risulta avere l'alta resistenza meccanica tipica delle latifoglie, in combinazione con un basso peso specifico e una notevole durezza a causa dell'alto contenuto di tannini e della bassissima permeabilità.

Proprio queste ultime due caratteristiche rendono però l'incollaggio una sfida ardua.

Nella tabella accanto (Fig.2) viene svolto un rapido confronto tra alcune delle specie più utilizzate a scopi strutturali, valutando aspetti sia meccanici che economici.

Per la compilazione di tale tabella si è fatto riferimento a:

- Normative EN 338 e EN 1912 per la ricerca di valori medi di densità.
- Normative EN 335, EN 350 e EN 460 per la valutazione delle proprietà di durabilità e applicabilità in uso esterno.
- Per quanto riguarda l'aspetto economico sono stati consultati prezzari, che però non vengono citati per via della forte variabilità sia nel tempo sia in base alla posizione geografica.

mechanical resistance while reducing formaldehyde emissions.

2.3 CHOOSING THE SWEET CHESTNUT

Among all the hardwood species, it was chosen to investigate the applicability of sweet chestnut (*Castanea Sativa*) because this wood is considered to have "hybrid" properties, as it possesses the high mechanical strength typical of hardwoods, combined with a low specific weight and extreme durability due to its high tannin content and very low permeability.

These last two characteristics, however, make glueing extremely challenging.

The table below (Fig. 2) provides a quick comparison of some of the most commonly used species for structural purposes, considering both mechanical and economic aspects.

In compiling this table, reference was made to:

- Standards EN 338 and EN 1912 for determining average density values.
- Standards EN 335, EN 350, and EN 460 for evaluating durability and suitability for outdoor use.
- Regarding economic aspects, price lists were consulted, but are not cited due to their significant variability both over time and based on geographic location.

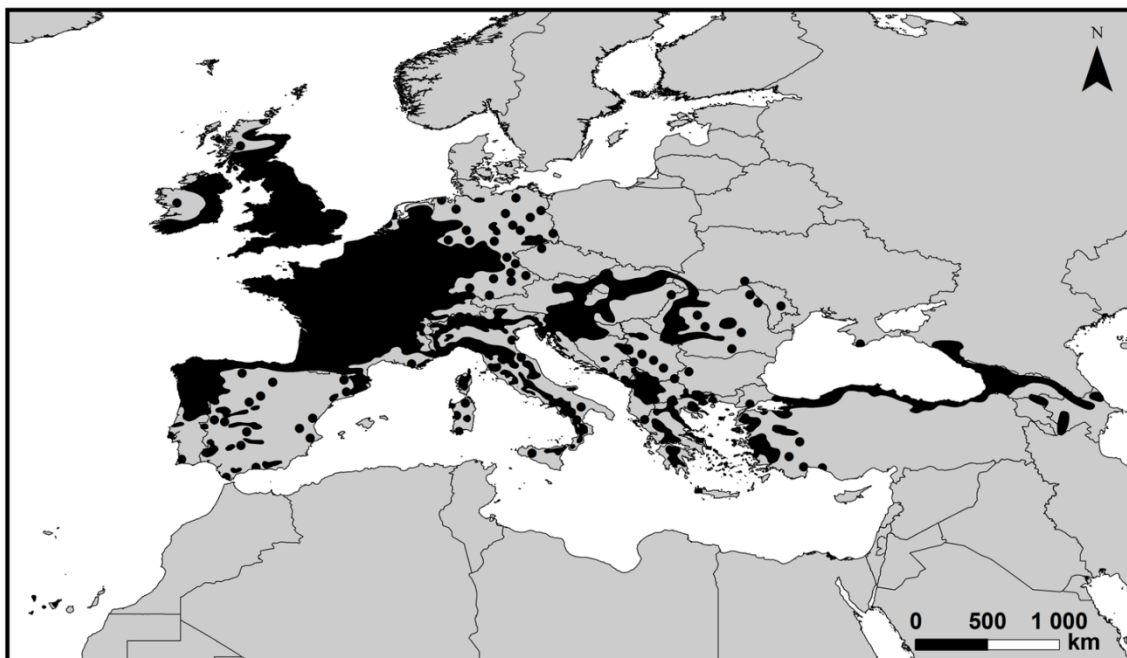


Fig.3

Fig.3: Distribuzione areale delle
freste di castagno (*Castanea*
sativa) in Europa (2020).
(Freitas et al., 2021)

Fig.3: The distribution area of
sweet chestnut (*Castanea sativa*)
forests throughout Europe (2020).
(Freitas et al., 2021)

La scelta di questa specie si allinea con l'intento da parte di molteplici stati di utilizzare essenze autoctone più facilmente reperibili e meglio inserite nell'ecosistema regionale. Dimostrano particolare interesse stati mediterranei come Spagna, Francia e Italia, dove la pianta è vastamente diffusa.

2.4 LA SOLUZIONE ADESIVA

Per la produzione di legno lamellare, le normative di riferimento per l'approvazione delle colle sono:

- EN 301 per adesivi fenolici e amminoplastici
- EN 15425 per adesivi poliuretanici monocomponente
- EN 16254 per adesivi polimerici ad isocianato in emulsione

Il collante utilizzato è l'adesivo Prefere 4546 combinato con l'indurente Prefere 5096. Questi sono prodotti dall'azienda Dynea. Tale soluzione, già pienamente testata e approvata secondo la norma EN 301 per strutture portanti in legno di castagno, risulta essere particolarmente flessibile e applicabile a varie condizioni di incollaggio come legno lamellare, travi a I e giunti a pettine.

Chimicamente, si tratta di un adesivo liquido MUF (Melamina-Urea-Formaldeide), un miglioramento delle precedenti colle Urea-Formaldeide. L'aggiunta della melamina consente di ottenere una resistenza alle intemperie e al fuoco notevolmente più elevata, rendendo l'adesivo ideale anche per applicazioni strutturali esterne (classi di servizio 1, 2 e 3 secondo la normativa EN 1995).

The choice of this species aligns with the desire of many countries to utilize native species that are more readily available and better integrated into the regional ecosystem. Mediterranean countries such as Spain, France, and Italy, where the plant is vastly spread, are showing particular interest.

2.4 THE ADHESIVE

For the production of laminated wood, the reference standards for the approval of glues are:

- EN 301 for phenolic and aminoplastic adhesives
- EN15425 for one-component polyurethane adhesives
- EN 16254 for emulsion polymer isocyanate adhesives

The adhesive used is Prefere 4546 adhesive combined with Prefere 5096 hardener. These are produced by Dynea. This solution, already fully tested and approved according to EN 301 standard for the use in load-bearing chestnut timber structures, is particularly flexible and applicable to various bonding conditions, such as glulam, I-beams, and finger joints.

Chemically, it is a liquid MUF (Melamine-Urea-Formaldehyde) adhesive, an improved solution compared to previous Urea-Formaldehyde glues. The addition of melamine allows for significantly higher weather and fire resistance, making the adhesive ideal for exterior structural applications (service classes 1, 2, and 3 according to the EN 1995 standard).



Fig.4

Fig.4: Lamelle di castagno conservato in condizioni standard. La disposizione è organizzata in modo da massimizzare le superfici a contatto con l'aria.

Fig.4: Chestnut lamellas stored in standard conditions. The disposition is organized in order to maximize the surface in contact with air.

2.5 PRODUZIONE DEL MATERIALE

Il legno fornito dall'azienda Campaldino Legnami consisteva in 50 lamelle di castagno (*Castanea Sativa*) di dimensioni 500x150x30 mm.

Per raggiungere le condizioni di incollaggio ideali si conservano le lamelle in una stanza climatizzata mantenuta in condizioni standard, ovvero con temperatura di $20\pm 2^{\circ}\text{C}$ e umidità relativa di $65\pm 5\%$.

In questo modo si è raggiunto un valore di contenuto d'acqua nel legno pari a $12\pm 1\%$. Per monitorare l'andamento di tale valore si è registrato il peso di alcune delle lamelle con cadenza costante, due volte al giorno e si è affiancata la misurazione tramite un igrometro a contatto per legno. Allo stabilizzarsi dei valori del peso si è deciso che i campioni erano pronti per passare alla fase di incollaggio.

Da notare che, vista la bassa permeabilità del legno di castagno, questo processo ha impiegato 2 settimane, cioè circa il doppio di quanto richiesto dai legni di aghifoglie.

Per la fase di incollaggio si è deciso di seguire le indicazioni fornite da Dynea, il produttore dell'adesivo. In particolare, si sono utilizzati due criteri principali:

- Incollaggio lento per evitare che la troppa celerità peggiorasse la qualità del prodotto finale
- Condizioni di incollaggio suggerite per il legno di quercia europea, ovvero il più simile al castagno tra quelli già testati dall'azienda produttrice.

2.5 MATERIAL PRODUCTION

The wood supplied by Campaldino Legnami consisted of 50 chestnut (*Castanea sativa*) lamellas measuring 500x150x30 mm.

To achieve ideal gluing conditions, the strips were stored in a climate-controlled room under standard conditions: a temperature of $20\pm 2^{\circ}\text{C}$ and a relative humidity of $65\pm 5\%$.

This resulted in a wood moisture content of $12\pm 1\%$. To monitor this value, the weight of some of the strips was recorded regularly, twice a day, and was also measured using a contact wood hygrometer. Once the weight values stabilized, the samples were deemed ready for gluing.

Note that, given the low permeability of chestnut wood, this process took two weeks, approximately twice as long as for softwood.

For the gluing phase, we decided to follow the instructions provided by Dynea, the adhesive manufacturer. Specifically, two main criteria were used:

- Slow gluing to prevent excessive speed from degrading the quality of the final product.
- Gluing conditions recommended for European oak, the wood mostly similar to chestnut among those already tested by the manufacturer.

Dosage (pwb)	Pot-Life at 20°C (minutes)
100:30	45
100:50	30
100:100	15
100:130	12

Fig.5



Fig.6

Fig.5: Tabella con indicazioni sulla pot-life fornita da Dynea.

Fig.6: Incollaggio delle lamelle con metodo mix-in.

Fig.5: Table with indications about pot-life provided by Dynea.

Fig.6: Glueing of the lamellas with mix-in method.

Ciascun elemento prodotto è stato ottenuto incollando assieme sei lamelle selezionate tra le 50 iniziali in modo da non presentare grandi imperfezioni e piallate entro 24 ore dall'incollaggio per rimuovere dalle superfici ogni traccia di ossidazione o contaminazione. Sono stati prodotti quattro elementi di legno laminato, quindi le lamelle impiegate sono 24 in totale.

Si può già notare che il castagno, come le latifoglie in generale, è un legno che presenta molte più imperfezioni rispetto alle aghifoglie, comportando quindi una selezione molto più importante del legno da utilizzare, producendo anche più scarto.

Nello specifico si è deciso di utilizzare un rapporto adesivo indurente pari a 100:30 pbw, in modo da avere una presa lenta e un tempo di pot-life il più lungo possibile a temperatura ambiente.

Si definisce pot-life il tempo che intercorre tra la miscelazione di adesivo e indurente e l'applicazione della miscela sulla superficie da incollare. Oltre questo intervallo di tempo la colla inizia a fare presa e perde le proprie capacità di spalmabilità.

Per l'applicazione sulla superficie si è scelto un metodo mix-in, ovvero andando a premiscelare adesivo e indurente in modo da ottenere più omogeneità rispetto alla tecnica con applicazioni separate. La soluzione è stata poi applicata tramite un rullo con una quantità di 200 g/m² per ogni faccia. Ogni linea di incollaggio prevedeva quindi 400 g/m².

Each piece was obtained by gluing together six lamellas selected from the initial 50 to avoid major imperfections. These were planed within 24 hours of gluing to remove any traces of oxidation or contamination from the surfaces. Four laminated wood pieces were produced, resulting in a total of 24 lamellas used.

It's already apparent that chestnut, like broadleaf trees in general, is a wood with many more imperfections than coniferous trees, requiring a much more careful selection of the wood to be used, thus also producing more waste.

Specifically, we decided to use an adhesive-hardener ratio of 100:30 pbw, to ensure a slow setting and the longest possible pot-life at room temperature.

The pot-life is defined as the time between mixing adhesive and hardener and applying the mixture to the surface to be bonded. Beyond this time, the glue begins to set and loses its spreadability.

For surface application, we chose a mix-in method, premixing the adhesive and hardener to achieve greater homogeneity than the separate application technique. The solution was then applied using a roller with a quantity of 200 g/m² per side. Each glue line therefore required 400 g/m².

Wood Species	\Hardener Ration (pbw)	Application amount (g/m ²)	Assembly Time in minutes with mix-in application at 20°C	
			Minimum assembly time	Maximum assembly time
Softwood	100:30	250	15	55
	100:30	400	15	65
	100:130	250	5	10
	100:130	400	5	15

Wood Species	Hardener Ration (pbw)	Application amount (g/m ²)	Assembly Time in minutes with separate application at 20°C	
			Minimum assembly time	Maximum assembly time
Softwood	100:30	250	15	55
	100:30	400	15	65
	100:130	250	5	10
	100:130	400	5	15
European Oak	100:30	400	30	60
	100:30	500	30	70
	100:130	400	15	20
	100:130	500	15	25
Birch, Beech	100:30	400	30	40
	100:30	500	30	55
	100:130	400	15	20
	100:130	500	15	25
Basralocus	100:30	400	45	55
	100:30	500	45	55
	100:130	400	15	18
	100:130	500	15	23

Fig.7

Fig.7: Tabella con indicazioni sul tempo di assemblaggio fornita da Dynea.

Fig.7: Table with indications about assembly time provided by Dynea.

Come da Figura 7, data una proporzione 100:30 pbw e una quantità di 400 g/m² il tempo di assemblaggio consigliato va da un minimo di 30 a un massimo di 60 minuti.

Con tempo di assemblaggio si intende un periodo di tempo suddiviso in aperto e chiuso.

Il tempo di assemblaggio aperto è il lasso di tempo che intercorre tra l'applicazione della colla e l'adesione dei componenti lignei. Questo non può in nessun caso superare i 5 minuti.

Con tempo di assemblaggio chiuso si intende invece il lasso di tempo che intercorre tra l'adesione dei componenti lignei e l'applicazione della pressione per la fase di polimerizzazione della colla.

Dei quattro elementi prodotti, i relativi tempi di assemblaggio sono:

- 30 minuti per un elemento
- 45 minuti per due elementi
- 60 minuti per un elemento

Si è deciso di utilizzare gli estremi, ovvero 30 e 60 minuti, per indagare quanto queste tempistiche influenzino sulla qualità finale dell'incollaggio.

Ci si aspetta infatti che per tempi troppo brevi la colla sia troppo fluido e fuoriesca eccessivamente sotto la pressatura. Per tempi troppo lunghi invece l'adesivo inizia a fare presa e perde la capacità di permeare nel legno adeguatamente.

Successivamente gli elementi vengono inseriti nella pressa per incollaggi. La pressione utilizzata è quella consigliata per la quercia europea, ovvero 1,3 N/mm², circa il doppio

As shown in Figure 7, given a ratio of 100:30 pbw and a quantity of 400 g/m², the recommended assembly time ranges from a minimum of 30 to a maximum of 60 minutes.

Assembly time refers to a period of time divided into open and closed phases.

The open assembly time is the time between the application of the glue and the adhesion of the wooden components. This cannot under any circumstances exceed 5 minutes.

The closed assembly time refers to the time between the adhesion of the wooden components and the application of pressure for the glue curing phase.

For the four elements produced, the corresponding assembly times are:

- 30 minutes for one element
- 45 minutes for two elements
- 60 minutes for one element

It was decided to use the extremes of 30 and 60 minutes to investigate how these times affect the final quality of the bond.

It's expected that if the bonding time is too short, the glue will be too fluid and will leak out excessively when pressed. If the bonding time is too long, however, the adhesive will begin to set and lose its ability to penetrate the wood adequately.

The elements are then placed in the gluing press. The pressure used is the one recommended for European oak, 1.3 N/mm², approximately double

Wood Species	Recommended Pressure (N/mm ²)
Softwood	0,6 – 0,8
European Oak	1,3
Beech, Basralocus	1,2
Birch	0,8

Dosage (pbw)	Pressing Time in minutes with 0,1 mm glue line thickness			
	15°C	20°C	25°C	30°C
100:130	225	135	90	45
100:100	260	150	105	45
100:50	310	170	125	45
100:30	330	180	135	45

Fig.8



Fig.9

Fig.8: Tabella con indicazioni su pressione e tempo di polimerizzazione fornita da Dynea.
Fig.9: Processo di polimerizzazione ultimato all'interno della pressa dedicata fornita da NIBIO.

Fig.8: Table with indications about pressure and curing time provided by Dynea.
Fig.9: Ultimated curing process inside the dedicated press provided by NIBIO.

di quanto richiesto per legni teneri di aghifoglia (vedi Figura 8).

Il tempo di applicazione della pressione per il processo di polimerizzazione dipende dalla temperatura a cui avviene il processo in quanto l'adesivo utilizzato è termoindurente.

Nella Figura 8 sono anche descritti tutti i tempi necessari a seconda di proporzione adesivo-indurente e temperatura di polimerizzazione.

Come già anticipato, si vuole evitare di accelerare eccessivamente il processo di polimerizzazione, pertanto questo avviene a temperatura ambiente, mantenuta attorno a 20°C.

Come da dati tabulati la polimerizzazione sotto pressione richiede 180 minuti.

Successivamente, prima di subire qualsiasi altra lavorazione, i campioni vengono conservati un'ulteriore settimana in condizioni standard in modo da accertarsi che la soluzione adesiva sia completamente polimerizzata.

Ricapitolando, le condizioni di incollaggio sono:

- Contenuto d'acqua del legno: 12 ± 1 %
- Lamelle piallate entro 24 h dall'incollaggio
- Proporzione adesivo-indurente: 100:30 pbw
- Quantità di collante: 400 g/m²
- Tempi di assemblaggio: 30 / 45 / 60 minuti
- Pressione: 1,3 N/mm²
- Tempo di pressatura: 180 minuti
- Temperatura di pressatura: 20°C

that required for coniferous softwoods (see Figure 8).

The time required for the curing process depends on the temperature at which the process takes place, as the adhesive used is thermosetting.

Figure 8 also describes all the times required depending on the adhesive-hardener ratio and curing temperature.

As mentioned, we want to avoid excessively accelerating the polymerization process, so this takes place at room temperature, maintained around 20°C.

According to the data shown in the table, curing under pressure requires 180 minutes.

Subsequently, before undergoing any further processing, the samples are stored for an additional week under standard conditions to ensure that the adhesive solution is fully polymerized.

To recap, the gluing conditions are:

- Wood water content: 12 ± 1 %
- Planed lamellas within 24 hours of gluing
- Adhesive-hardener ratio: 100:30 pbw
- Adhesive quantity: 400 g/m²
- Assembly time: 30 / 45 / 60 minutes
- Pressure: 1.3 N/mm²
- Pressing time: 180 minutes
- Pressing temperature: 20°C

LE PROVE SPERIMENTALI

THE EXPERIMENTAL TESTS

3. LE PROVE SPERIMENTALI

Le prove da eseguire per verificare la compatibilità tra il legno scelto e l'adesivo utilizzato coprono una moltitudine di argomenti.

La sola normativa UNI EN 302: 2023 è divisa in 8 capitoli, che riguardano rispettivamente:

1. Determinazione della resistenza al taglio longitudinale
2. Determinazione della resistenza alla delaminazione
3. Determinazione dell'effetto del danno da acido alle fibre di legno dovuto a cicli di temperatura e umidità sulla resistenza alla trazione trasversale
4. Determinazione dell'effetto del ritiro del legno sulla resistenza al taglio
5. Determinazione del tempo massimo di assemblaggio in condizioni di riferimento
6. Determinazione del tempo minimo di pressatura in condizioni di riferimento
7. Determinazione della durata utile in condizioni di riferimento
8. Prova di carico statico di provini con linee di incollaggio multiple in compressione e taglio

Trattandosi in questo caso dei primi tentativi attorno a questa tecnologia, ci si è limitati ai primi due capitoli in quanto riguardano caratteristiche fondamentali per la decisione di proseguire o meno la ricerca in questo campo.

Pertanto, i futuri capitoli tratteranno i test condotti per determinare la resistenza al taglio longitudinale e la resistenza alla delaminazione.

3. THE EXPERIMENTAL TESTS

The tests performed to verify the compatibility between the selected wood and the adhesive used cover a multitude of topics.

The UNI EN 302: 2023 standard alone is divided into 8 chapters, which cover:

1. Determination of longitudinal tensile shear strength
2. Determination of resistance to delamination
3. Determination of the effect of acid damage to wood fibres by temperature and humidity cycling on the transverse tensile strength
4. Determination of the effect of wood shrinkage on the shear strength
5. Determination of maximum assembly time under referenced conditions
6. Determination of the minimum pressing time under referenced conditions
7. Determination of the working life under referenced conditions
8. Static load test of multiple bond line specimens in compression shear

Since these are the first attempts at exploring this topic, we have limited ourselves to the first two chapters, as they address key characteristics that determine whether or not to continue research in this field.

Therefore, future chapters will discuss tests conducted to determine longitudinal shear strength and delamination resistance.

**PROVE DI RESISTENZA A TAGLIO
LONGITUDINALE**

LONGITUDINAL SHEAR RESISTANCE TESTS



Fig.10

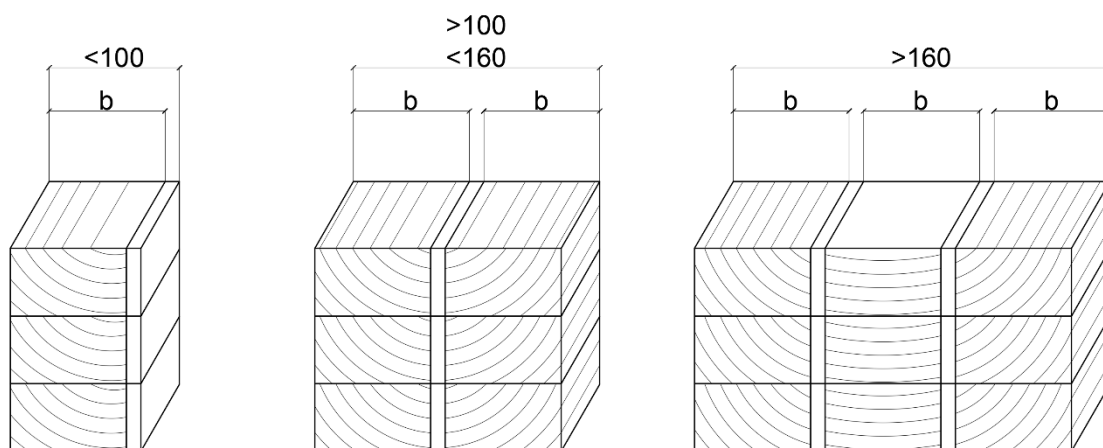


Fig.11

Fig.10: Campione utilizzato negli shear block tests.

Fig.11: Istruzioni per ricavare i campioni da utilizzare secondo normativa UNI EN 302: 2023.

Fig.10: Sample used in shear block tests.

Fig.11: Instructions for producing the samples according to the UNI EN 302: 2023 standard.

4. PROVE DI RESISTENZA A TAGLIO LONGITUDINALE

Per via dell'incompatibilità tra i materiali a disposizione e quelli richiesti dal primo capitolo della normativa UNI EN 302: 2023, si è deciso di seguire invece un'alternativa molto diffusa ovvero l'allegato D alla normativa EN 14080: 2013.

Questo metodo è anche spesso chiamato "shear block test".

4.1 CAMPIONI

I campioni su cui sono stati svolti i test sono ricavati da uno stesso elemento di legno laminato precedentemente prodotto. Nello specifico da uno dei due elementi con tempo di assemblaggio di 45 minuti.

I criteri per ricavare i campioni da un elemento sono forniti dalla normativa EN 14080: 2013, allegato D, in funzione del tipo di sezione che si vuole ricavare e dalle dimensioni dell'elemento di partenza.

A lato (Figura 11) si riportano le figure per ricavare campioni rettangolari seguendo le indicazioni fornite dalla normativa.

In particolare, i campioni ricavati hanno dimensioni 40 x 40 millimetri e un'altezza complessiva di 180 mm essendo 6 lamelle da 30 mm incollate.

I campioni ricavati sono 16, per un totale di 80 test eseguibili.

4. LONGITUDINAL SHEAR RESISTANCE TESTS

Due to the incompatibility between the available materials and those required by the first chapter of the UNI EN 302: 2023 standard, it was decided to instead follow a widely used alternative: Annex D of the EN 14080: 2013 standard.

This method is also often called the shear block test.

4.1 SAMPLES

The samples on which the tests were performed were obtained from the same previously produced laminated wood element. Specifically, from one of the two elements with an assembly time of 45 minutes.

The criteria for obtaining samples from an element are provided by the EN 14080: 2013 standard, Annex D, based on the type of cross-section desired and the dimensions of the starting element.

The Figure 11 illustrates the indications given by the normative to produce rectangular samples.

Specifically, the samples measured 40 x 40 mm and had a total height of 180 mm, consisting of six 30 mm lamellas glued together.

Sixteen samples were obtained, for a total of 80 tests.

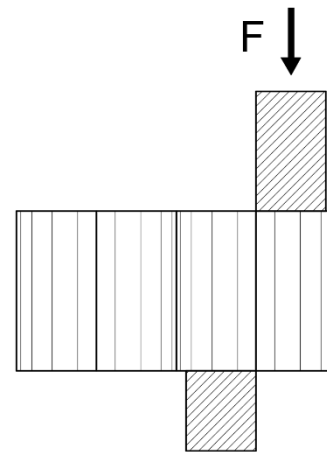
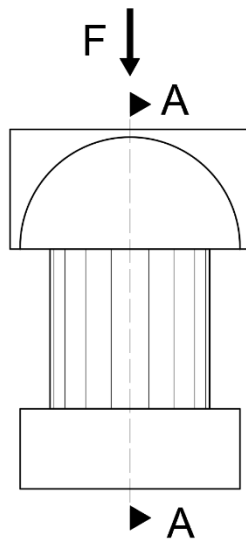


Fig.12

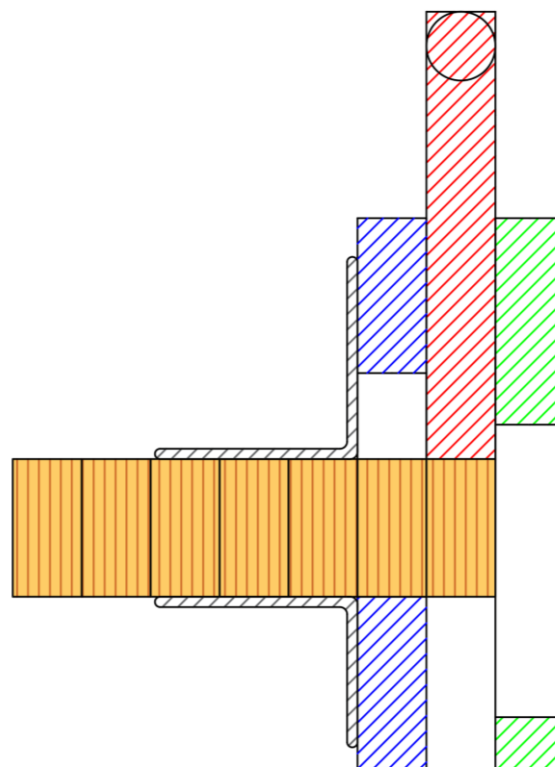


Fig.13

Fig.12: Istruzioni per produrre la strumentazione da utilizzare secondo normativa EN 14080: 2013.

Fig.13: Sezione verticale della strumentazione utilizzata.

Fig.12: Instructions for producing the equipment according to the EN 14080: 2013 standard.

Fig.13: Vertical section of the utilized equipment.

4.2 STRUMENTAZIONE

Il secondo passo consiste nel progettare uno strumento che permetta di esercitare uno sforzo tangenziale parallelo alle fibre del legno il più concentrato possibile in corrispondenza della linea di colla.

Nelle figure accanto vengono illustrati prima una possibile configurazione consigliata (Figura 12), poi la progettazione specifica utilizzata in questa attività di ricerca (Figure 13 e 14).

Lo strumento, a cui da qui in poi si farà riferimento come “ghigliottina”, consiste in tre componenti principali:

- Uno mobile (rosso) che esercita pressione sul lato destro della linea di colla
- Due fissi (verde e blu) che, imbullonati assieme forniscono sia una reazione opposta sul lato sinistro della linea di colla, sia una guida per il movimento della componente mobile.

Ai tre componenti principali si aggiungono due profili a L utilizzati per vincolare la rotazione del campione causata dalla lieve eccentricità tra azione e reazione.

Infine, per semplici motivi pratici si sono aggiunti due viti per limitare la corsa dell'elemento mobile e due piatti laterali per allargare la base d'appoggio e migliorare quindi la stabilità globale del sistema al ribaltamento.

4.2 EQUIPMENT

The second step involves designing a tool that exerts a tangential force parallel to the wood fibers, as concentrated as possible near the glue line.

The figures on the side first illustrate the possible recommended configuration (Figure 12), followed by the specific design used in this research (Figures 13 and 14).

The tool, which will be referred to as the "guillotine" from here on, consists of three main components:

- A movable component (in red) that exerts pressure on the right side of the glue line
- Two fixed components (in green and blue) that, when bolted together, provide both an opposing reaction on the left side of the glue line and a guide for the sliding of the movable component.

To these three main components are added two L-shaped profiles used to constrain the rotation of the specimen caused by the slight eccentricity between action and reaction.

Finally, for simple practical reasons, two screws were added to limit the travel of the movable element and two lateral plates to widen the support base and thus improve the overall stability of the system against overturning.

PLATE 1

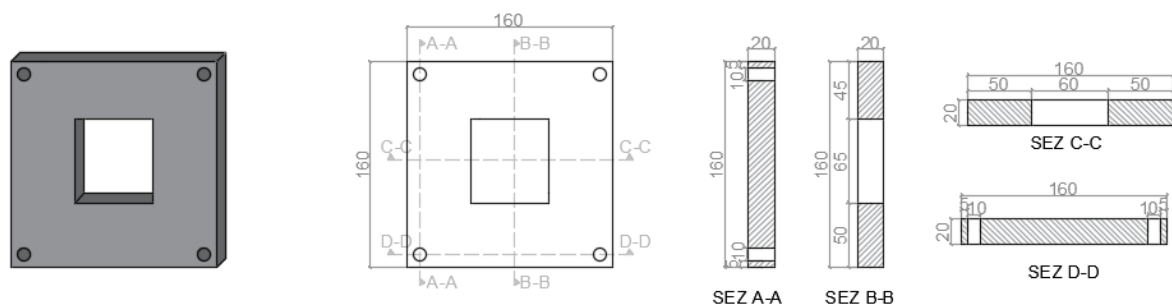
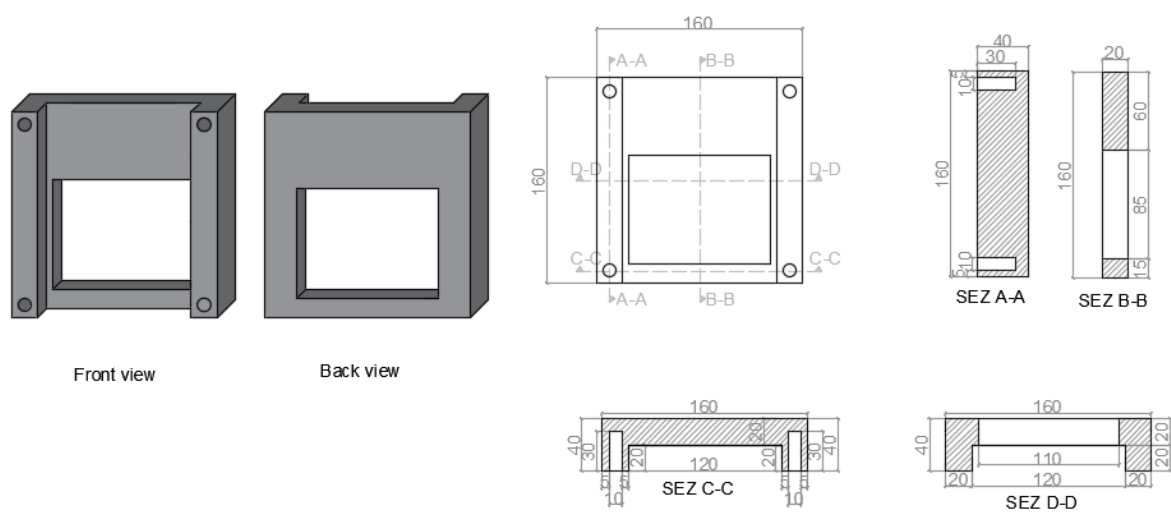


PLATE 2



GUILLOTINE

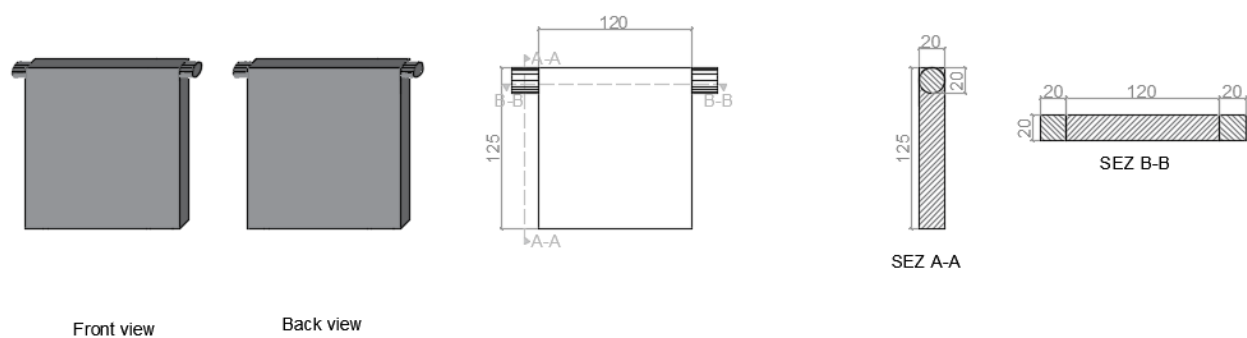


Fig.14

Fig.14: Dettagli di progettazione della strumentazione utilizzata.

Fig.14: Design details of the utilized equipment.

Lo sforzo viene applicato da una pressa idraulica a controllo d'avanzamento, che consente quindi di registrare lo sforzo nel tratto sia ascendente sia discendente del grafico forza-spostamento.

4.3 RISULTATI

Di seguito vengono riportati tutti i valori di spostamento massimo, forza massima e tensione massima corrispondente registrati durante le prove. La tensione massima è calcolata tramite la formula suggerita dalla normativa:

$$\tau = k * \frac{F_{max}}{t * b}$$

Dove:

- $k = 0,78 + 0,0044 * t$
- F_{max} è la massima forza registrata dal sistema
- t è la dimensione della superficie di incollaggio misurata parallelamente alle fibre
- b è la dimensione della superficie di incollaggio misurata perpendicolarmente alle fibre

Assieme ai dati numerici viene anche riportato un dato qualitativo, ovvero la collocazione della rottura nel campione.

Questa può essere infatti localizzata nel legno, nella colla o ripartita tra i due.

The force is applied by a feed-controlled hydraulic press, which allows the force to be recorded in both the ascending and descending portions of the force-displacement graph.

4.3 RESULTS

Below are all the maximum displacement, maximum force, and corresponding maximum stress values recorded during the tests.

The maximum stress is calculated using the formula suggested by the standard:

$$\tau = k * \frac{F_{max}}{t * b}$$

Where:

- $k = 0,78 + 0,0044 * t$
- F_{max} is the maximum force recorded by the system
- t is the dimension of the bonding surface measured parallel to the grain
- b is the dimension of the bonding surface measured perpendicular to the grain

Along with the numerical data, qualitative data is also reported, namely the location of the break in the sample.

This can be located in the wood, in the glue, or distributed between the two.

TEST	D _{max}	F _{max}	τ _{max}	Glue breaks
	mm	kN	N/mm ²	
2.1	1,00	14,70	8,79	
2.2	0,86	14,16	8,46	
2.3	1,13	19,54	11,67	
2.4	0,78	16,29	9,73	
2.5	1,50	20,48	12,24	
3.1	0,88	15,85	9,47	
3.2	1,02	18,92	11,31	
3.3	1,08	20,45	12,22	
3.4	1,23	21,51	12,85	
3.5	1,64	21,61	12,91	
4.1	0,92	16,77	10,02	
4.2	0,79	16,19	9,68	
4.3	1,01	18,88	11,28	
4.4	1,20	19,86	11,87	
4.5	1,34	19,42	11,60	
5.1	0,91	16,50	9,86	Small traces
5.2	0,83	16,17	9,66	
5.3	0,95	19,56	11,69	
5.4	1,16	21,79	13,02	
5.5	1,87	22,08	13,19	
6.1	0,93	17,61	10,52	
6.2	0,87	15,70	9,38	
6.3	0,90	17,52	10,47	
6.4	1,11	20,13	12,03	
6.5	1,49	21,89	13,08	
7.1	1,05	16,09	9,61	
7.2	1,28	18,21	10,88	Small traces
7.3	1,19	20,61	12,31	
7.4	1,41	24,05	14,37	
7.5	0,79	16,09	9,62	
8.1	1,26	19,14	11,44	
8.2	0,71	14,32	8,56	Partial
8.3	1,01	20,52	12,26	
8.4	0,94	17,91	10,70	
8.5	1,11	19,34	11,56	
9.1	1,14	19,29	11,53	Small traces
9.2	0,97	19,38	11,58	Small traces
9.3	1,20	21,48	12,83	
9.4	1,34	20,11	12,02	
9.5	1,32	18,11	10,82	
10.1	0,82	15,54	9,29	Small traces
10.2	1,11	20,55	12,28	
10.3	1,13	21,98	13,13	
10.4	1,20	21,64	12,93	
10.5	1,25	21,70	12,97	

11.1	0,90	17,49	10,45	
11.2	0,93	18,20	10,87	
11.3	1,57	23,41	13,99	
11.4	1,20	20,93	12,51	
11.5	1,51	21,03	12,56	
12.1	1,02	15,56	9,30	
12.2	1,15	16,56	9,89	
12.3	1,50	21,70	12,96	
12.4	1,06	18,80	11,24	Small traces
12.5	1,00	16,10	9,62	Partial
13.1	0,90	13,58	8,12	
13.2	1,12	17,23	10,29	
13.3	1,29	20,99	12,54	
13.4	0,93	15,11	9,03	Total
13.5	0,76	16,41	9,80	
14.1	0,90	18,06	10,79	
14.2	0,91	19,36	11,57	
14.3	1,46	24,60	14,70	
14.4	0,82	17,73	10,59	
14.5	1,03	19,29	11,53	
15.1	0,89	16,99	10,15	
15.2	1,03	17,49	10,45	
15.3	1,04	20,75	12,40	
15.4	1,29	24,99	14,93	
15.5	1,30	21,06	12,59	
16.1	0,94	16,45	9,83	
16.2	0,90	16,93	10,12	
16.3	1,13	21,22	12,68	
16.4	1,17	20,42	12,20	
16.5	1,54	23,01	13,75	
17.1	0,80	15,98	9,55	
17.2	0,90	17,51	10,46	
17.3	1,27	22,35	13,35	
17.4	1,39	19,16	11,45	
17.5	0,99	18,76	11,21	

Fig.15

Fig.15: Risultati registrati. In verde i valori più alti di resistenza, in rosso quelli più bassi.

Fig.15: Recorded results. In green the highest values, in red the lowest ones.

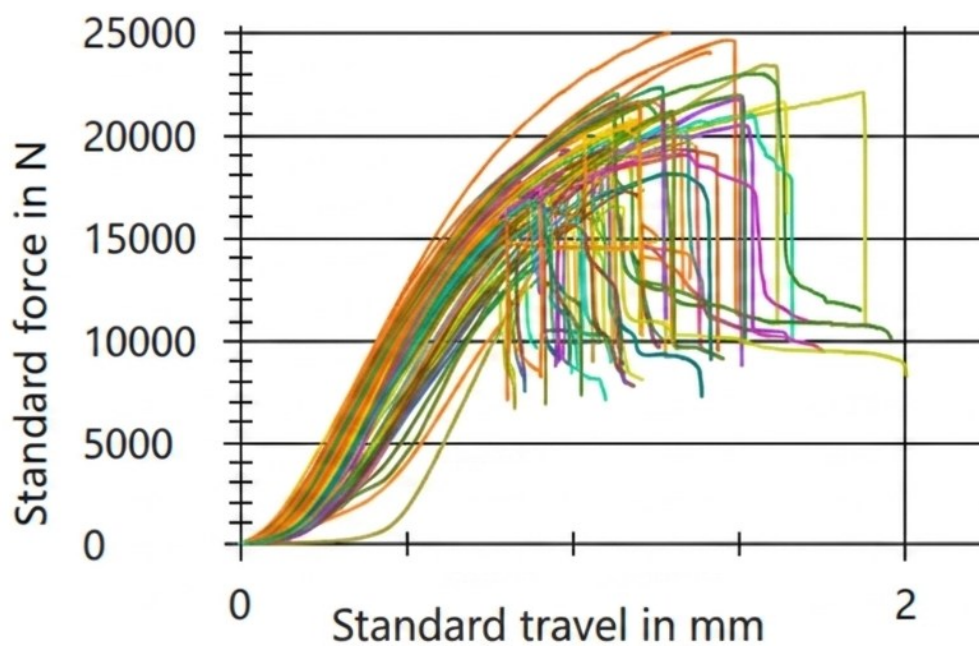


Fig.16

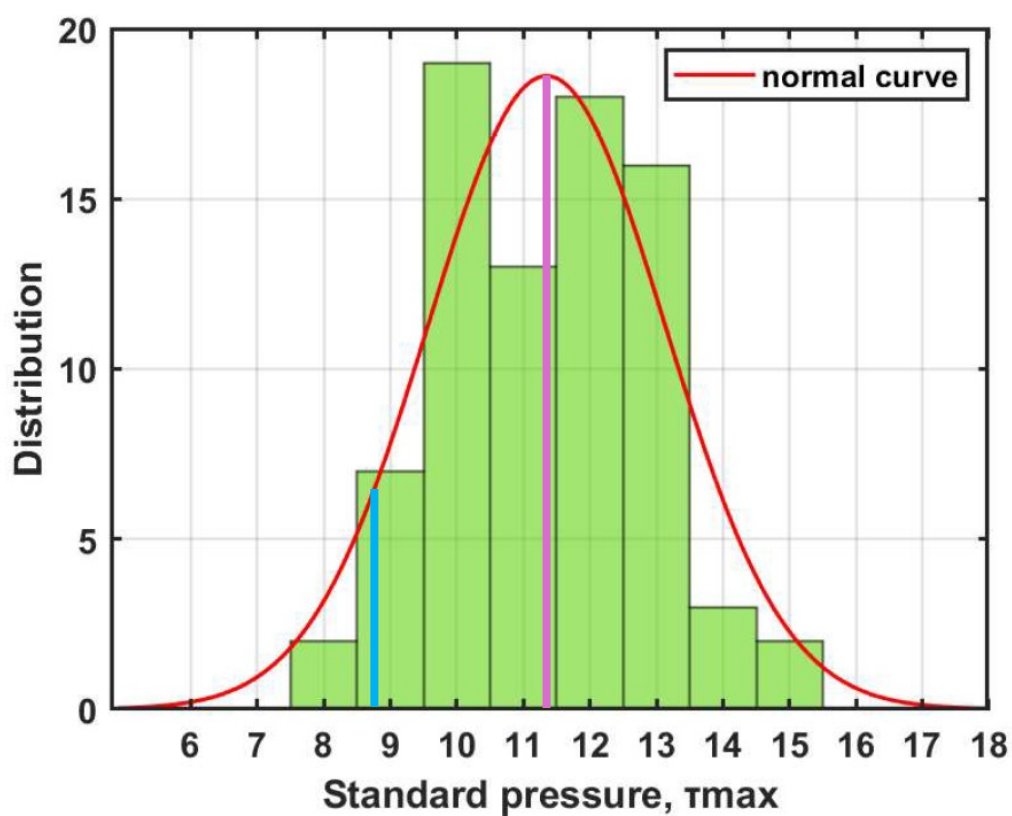


Fig.17

Fig.16: Diagrammi forza-spostamento registrati durante i test.

Fig.17: Distribuzione probabilistica dei risultati registrati.

Fig.16: Force-displacement diagrams recorded during the tests.

Fig.17: Probabilistic distribution of the recorded results.

4.4 ANALISI DEI RISULTATI

La prima osservazione che si può avanzare è che, analizzando visivamente gli andamenti dei grafici forza-spostamento (Figura 16), si riconosce per tutti i casi una forma ad S con una importante caduta di resistenza dopo il raggiungimento del valore massimo.

Si noti poi che i valori misurati variano da un massimo di $14,93 \text{ N/mm}^2$ ($24,99 \text{ kN}$) a un minimo di $8,12 \text{ N/mm}^2$ ($13,58 \text{ kN}$).

Per un'analisi probabilistica dei valori rilevati, essi vengono suddivisi in intervalli di 1 N/mm^2 , da un minimo di $7,5 \text{ N/mm}^2$ a un massimo di $15,5 \text{ N/mm}^2$ come riportato nel grafico di distribuzione probabilistica (Figura 17).

Dalla curva di distribuzione normale si ottiene che:

- Il valore medio (segnato in magenta) corrisponde a $11,31 \text{ N/mm}^2$ ($18,93 \text{ kN}$).
- La deviazione standard vale $1,54 \text{ N/mm}^2$ ($2,57 \text{ kN}$).

Se si volesse calcolare un valore utile per la progettazione futura, si dovrebbe ricorrere al valore del 5-percentile, ovvero quel valore di pressione per cui il 95% delle misurazioni hanno un valore maggiore di esso.

Il valore del 5-percentile in questo caso risulta essere $8,80 \text{ N/mm}^2$ ($14,72 \text{ kN}$), segnato in blu sul grafico.

4.4 ANALYSIS OF THE RESULTS

The first observation that can be made is that, visually analyzing the trends in the force-displacement graphs (Figure 16), an S-shape is recognized for all cases, with a significant drop in resistance after reaching the maximum value.

It is then observed that the measured values vary from a maximum of 14.93 N/mm^2 (24.99 kN) to a minimum of 8.12 N/mm^2 (13.58 kN).

For a probabilistic analysis of the measured values, they are divided into intervals of 1 N/mm^2 , from a minimum of 7.5 N/mm^2 to a maximum of 15.5 N/mm^2 , as shown in the probabilistic distribution graph (Figure 17).

From the normal distribution curve, we obtain:

- The mean value (marked in magenta) corresponds to 11.31 N/mm^2 (18.93 kN).
- The standard deviation is 1.54 N/mm^2 (2.57 kN).

If you wanted to calculate a useful value for future design, you would use the 5th percentile value, which is the pressure value for which 95% of measurements are greater than it.

The 5th percentile value in this case is 8.80 N/mm^2 (14.72 kN), marked in blue on the graph.



Fig.18

Fig.18: Strumentazione in posizione sotto la pressa idraulica durante l'esecuzione delle prove.

Fig.18: Equipment placed under the hydraulic press during the tests.

Analizzando invece l'aspetto qualitativo delle rotture si nota che:

- Solo 1,25% delle rotture è totalmente avvenuta nella colla (test n° 13.4).
- L' 88,75% delle rotture è avvenuta nel legno
- Il 10% delle misurazioni presentava piccole tracce di rottura nella colla

4.5 CONSIDERAZIONI SUI RISULTATI

Le considerazioni che si possono avanzare sull'argomento sono molteplici sia dal punto di vista dei valori ottenuti sia dal punto di vista della qualità delle rotture

4.5.1 Valori confrontati con legni soffici (ed esempio di progettazione)

Già semplicemente osservando i valori statistici ottenuti notiamo che la media è superiore a quella derivante da altre esperienze di laboratorio con essenze lignee diverse.

Analizzando per esempio il documento "*Evaluation of glue line shear strength of laminated timber structures using block and core type specimens*" (redatto da Florindo Gaspar, Helena Cruz e Augusto Gomes, pubblicato il 7 Luglio 2017) risulta che un valore medio per la resistenza a sforzo di taglio tangenziale per legni come quello di abete rosso si aggiri attorno a 9,5 – 9,7 N/mm², mentre quella rilevata sul castagno sarebbe 11,3 N/mm². Parlando

Analyzing the qualitative aspect of the breaks, we note that:

- Only 1.25% of the breaks occurred entirely in the glue (test n°13.4)
- 88.75% of the breaks occurred in the wood
- 10% of the measurements showed small traces of breakage in the glue

4.5 COMMENTS ON THE RESULTS

There are many considerations that can be made on this topic, both in terms of the values obtained and in terms of the quality of the breaks.

4.5.1 Values compared with soft woods (and design example)

Just by simply observing the statistical values obtained, we note that the average is higher than those resulting from other laboratory experiments with different wood species.

For example, analyzing the document "*Evaluation of glue line shear strength of laminated timber structures using block and core type specimens*" (written by Florindo Gaspar, Helena Cruz e Augusto Gomes, published on the 7th July 2017) it appears that an average value for the resistance to tangential shear stress for woods such as that of spruce is around 9.5 – 9.7 N/mm², while that found on chestnut would be 11.3 N/mm². Speaking instead of

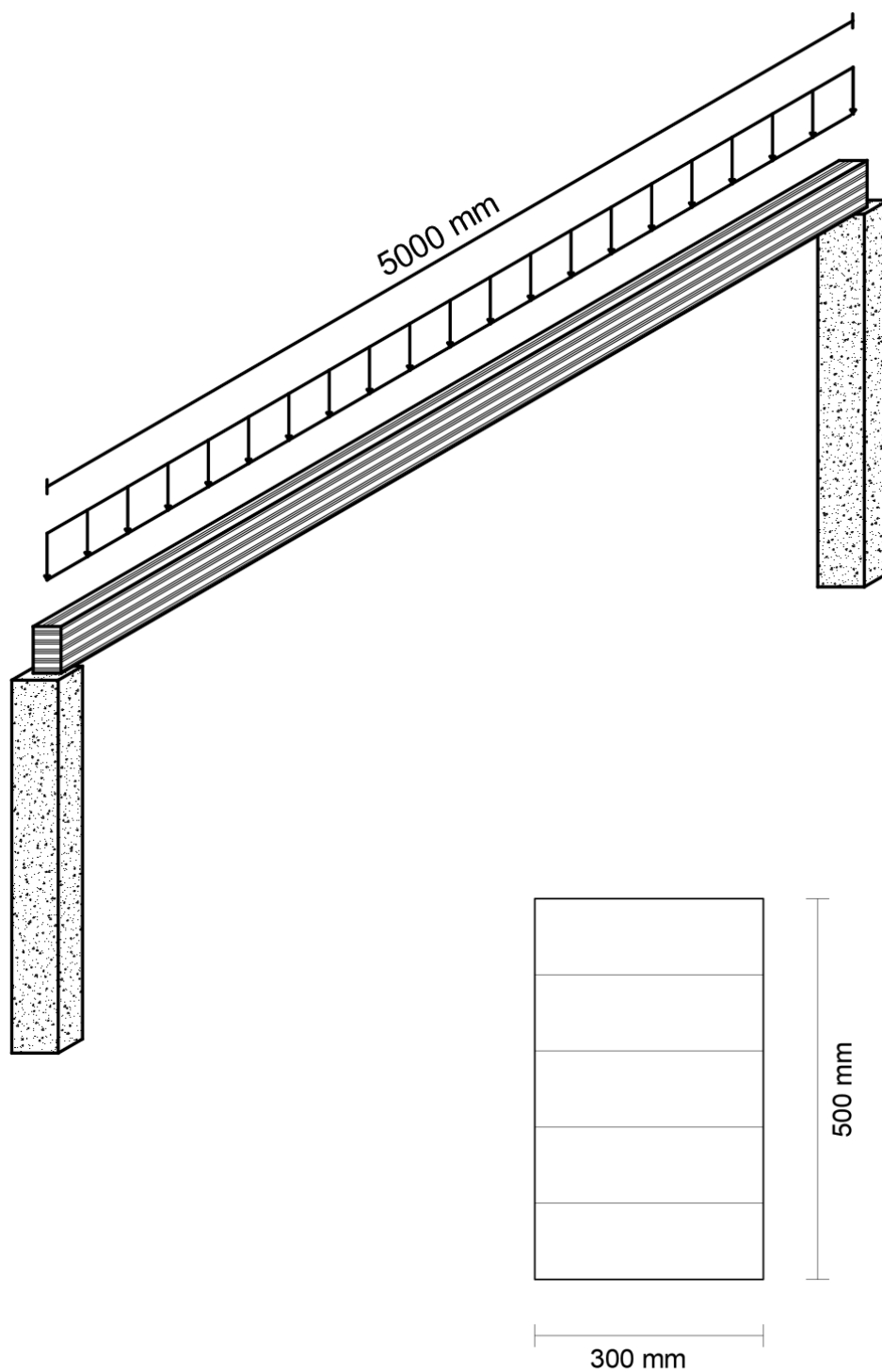


Fig.19

Fig.19: Trave appoggiata caricata uniformemente e sezione verticale.

Fig.19: Supported beam under uniform load with vertical section.

invece di 5-percentili la normativa NTC 2018 / Eurocodice 5 propone un valore di $2,5 \text{ N/mm}^2$, mentre quella calcolata precedentemente si aggira attorno a $8,8 \text{ N/mm}^2$.

Questo grosso divario tra i valori percentili potrebbe essere dovuto a un campione statistico molto più ampio utilizzato per la validazione della normativa.

Se si combina questo dato con la maggior resistenza a sforzo flessionale del legno di castagno (come molte latifoglie in generale), è facile intuire che questo materiale, a parità di caratteristiche geometriche permette di ottenere elementi strutturali con caratteristiche di resistenza flessionale migliori rispetto al semplice abete rosso.

Per rendere tutto più chiaro si propone di seguito un breve dimensionamento, senza tenere conto dei fattori correttivi, per una semplice trave appoggiata caricata uniformemente.

Si assumono caratteristiche geometriche pari a:

- Area di sezione $A=300*500=150.000 \text{ mm}^2$
- Luce $L=5.000 \text{ mm}$
- Modulo di resistenza elastico $W=12.500.000 \text{ mm}^3$

Inoltre, si assume un valore di tensione flessionale ultima (ricavato dalla normativa UNI EN 14080) pari a:

- 24 N/mm^2 per l'abete rosso
- 28 e 32 N/mm^2 per il castagno

Utilizzando le seguenti formule si vuole verificare il massimo momento applicabile a una trave al variare del valore di resistenza a taglio longitudinale.

5th percentiles, the Eurocode 5 proposes a value of 2.5 N/mm^2 , while the one previously calculated is around 8.8 N/mm^2 .

This large gap between percentile values may be due to a much larger statistical sample used to validate the standard.

Combining this data with the greater flexural strength of chestnut wood (like many hardwoods in general), it's easy to see that this material, given the same geometric characteristics, allows for structural elements with better flexural strength characteristics than simple spruce.

To clarify, below is a brief sizing calculation, without considering correction factors, for a simple supported beam under uniform loading.

The geometric characteristics are assumed to be:

- Cross-section $A = 300 * 500 = 150,000 \text{ mm}^2$
- Span $L = 5,000 \text{ mm}$
- Elastic section modulus $W = 12,500,000 \text{ mm}^3$

Furthermore, the ultimate bending stress (derived from UNI EN 14080 standard) is assumed to be:

- 24 N/mm^2 for spruce
- 28 and 32 N/mm^2 for chestnut

Using the following formulas, we want to verify the maximum moment applicable to a beam as the longitudinal shear strength varies.

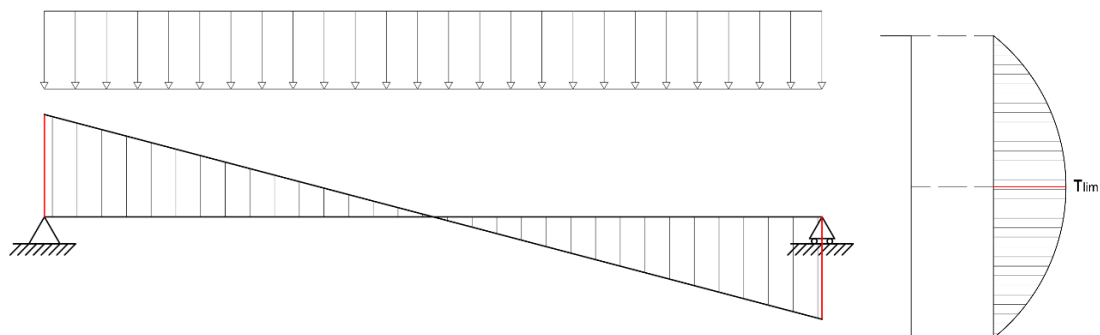


Fig.20

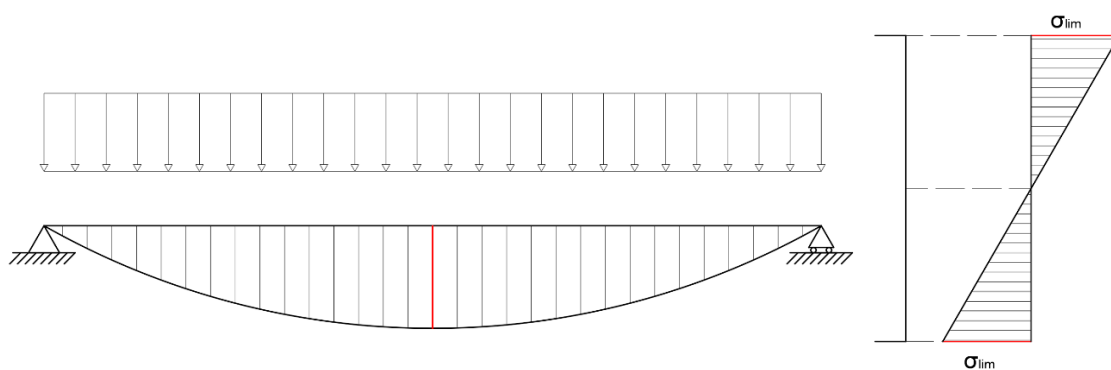


Fig.21

Fig.20: Diagramma delle sollecitazioni a taglio con dettaglio delle tensioni all'interno della sezione maggiormente sollecitata.

Fig.21: Diagramma delle sollecitazioni a momento flessionale con dettaglio delle tensioni all'interno della sezione maggiormente sollecitata.

Fig.20: Shear stress diagram with details of the stresses within the most stressed section.

Fig.21: Bending moment stress diagram with details of the stresses within the most stressed section.

Il taglio corrispondente al valore di resistenza misurato si calcola come:

$$V_{corr} = \frac{\tau_u * A}{1,5}$$

Nel caso studiato il valore massimo di taglio è localizzato alle estremità della trave e si calcola come:

$$V = \frac{q * L}{2}$$

Mentre il momento assume valore massimo in mezzera e si calcola come:

$$M = \frac{q * L^2}{8}$$

Pertanto, taglio e momento sono legati dalla relazione:

$$M_{corr} = \frac{V_{corr} * L}{4}$$

(nel caso della trave appoggiata caricata uniformemente)

La tensione flessionale generata da tale momento corrispondente sarebbe:

$$\sigma_{corr} = \frac{M_{corr}}{W}$$

Nel caso in cui la tensione flessionale corrispondente abbia valore maggiore rispetto alla tensione flessionale ultima si avrebbe una rottura per flessione prima del raggiungimento di quella a scorrimento delle lamelle. Pertanto, il valore massimo di momento flessionale resistente si calcola come:

$$M_{max} = \min(\sigma_{corr}, \sigma_u) * W$$

The shear corresponding to the measured resistance value is calculated as:

$$V_{corr} = \frac{\tau_u * A}{1,5}$$

In the case studied, the maximum shear value is located at the ends of the beam and is calculated as:

$$V = \frac{q * L}{2}$$

While the bending moment reaches its maximum value at midspan and is calculated as:

$$M = \frac{q * L^2}{8}$$

Therefore, shear and moment are related by the relationship:

$$M_{corr} = \frac{V_{corr} * L}{4}$$

(in the case of a uniformly loaded supported beam)

The bending stress generated by this corresponding moment would be:

$$\sigma_{corr} = \frac{M_{corr}}{W}$$

If the corresponding bending stress is greater than the ultimate bending stress, flexural failure would occur before the lamellas reach the sliding stress. Therefore, the maximum value of the bending moment is calculated as:

$$M_{max} = \min(\sigma_{corr}, \sigma_u) * W$$



Fig.22

Fig.22: Rottura a flessione tipica di una trave in legno lamellare.
(Martins et al., 2025)

Fig.22: Typical Bending failure of a glulam beam.
(Martins et al., 2025)

Svolgendo i calcoli si ottiene che:

	τ_u			
	2,5	8,8	9,5	11,3
V_{corr}	250	880	950	1131
M_{corr}	312,5	1100	1187,5	1413,75
σ_{corr}	25	88	95	113,1
σ_u	24	28/32	24	28/32
M_{max}	300	350/400	300	350/400

Si riscontra, quindi, un miglioramento tra il 16,7% e il 33,3% in base alla resistenza flessionale del castagno utilizzato.

Da notare che nella totalità dei casi non è tanto la resistenza a taglio longitudinale a essere dimensionante, quanto la tensione flessionale ultima.

È però fondamentale che la resistenza a taglio longitudinale rispetti un valore minimo in modo da sfruttare a pieno le proprietà flessionali del castagno. Se si volesse quantificare questo valore minimo sarebbe (sempre nel caso di trave appoggiata con carico distribuito):

$$\tau_{min} = \sigma_u * \frac{1.5 * 4 * W}{A * L} = 2,8 \div 3,2 \text{ N/mm}^2$$

A seconda della classe di resistenza del castagno utilizzato.

By doing the calculations we get that:

	τ_u			
	2,5	8,8	9,5	11,3
V_{corr}	250	880	950	1131
M_{corr}	312,5	1100	1187,5	1413,75
σ_{corr}	25	88	95	113,1
σ_u	24	28/32	24	28/32
M_{max}	300	350/400	300	350/400

Therefore, an improvement of between 16.7% and 33.3% is observed depending on the flexural strength of the chestnut used.

It should be noted that in all cases, it is not the longitudinal shear strength that determines the dimensioning, but rather the ultimate flexural stress.

However, it is essential that the longitudinal shear strength respects a minimum value in order to fully exploit the flexural properties of the chestnut. If one were to quantify this minimum value (again in the case of a beam supported with a distributed load):

$$\tau_{min} = \sigma_u * \frac{1.5 * 4 * W}{A * L} = 2,8 \div 3,2 \text{ N/mm}^2$$

Depending on the strength class of the chestnut used.



Fig.23

Fig.23: Campione riassembleto dopo la rottura di ciascuna linea di colla.

Fig.23: Reassembled sample after the break of each glue line.

4.5.2 Valori alti anche nei casi delle rotture nella colla

Andando invece ad analizzare solo casi in cui la rottura è avvenuta per delaminazione della colla (totale o parziale), si nota che i valori di resistenza rilevati sono, in ordine crescente: 8,56 , 9,03 , 9,29 , 9,62 , 9,86 , 10,88 , 11,24 , 11,53 e 11,58.

Solo due di questi risultati sono minori alla resistenza media ($9,5 \text{ N/mm}^2$) di un campione in abete rosso, ma comunque tutti superiori al valore minimo richiesto precedentemente calcolato ($2,8 \div 3,2 \text{ N/mm}^2$).

4.5.3 Rotture nel legno

Concentrandosi invece sulle rotture avvenute nel legno, ovvero la maggior parte delle misurazioni, notiamo che generalmente le rotture seguono la curva data dagli anelli di accrescimento naturalmente presenti nel legno. Essi, infatti, rappresentano un piano preferenziale per lo scorrimento tra due fibre a diversa densità.

Nei casi in cui invece la rottura non sembra seguire gli anelli si registra una resistenza maggiore del campione, come nei test 5.5 ($13,19 \text{ N/mm}^2$), 7.4 ($14,37 \text{ N/mm}^2$) e 15.4 ($14,93 \text{ N/mm}^2$).

4.5.2 High values also in cases of glue failures

If we analyze only cases where the failure occurred due to delamination of the glue (total or partial), we note that the strength values recorded are, in ascending order: 8.56, 9.03, 9.29, 9.62, 9.86, 10.88, 11.24, 11.53, and 11.58.

Only two of these results are lower than the average strength (9.5 N/mm^2) of a spruce sample, but all are above the minimum required value previously calculated ($2.8 \div 3.2 \text{ N/mm}^2$).

4.5.3 Wood Failures

Focusing instead on failures that occurred in the wood, which constituted the majority of measurements, we note that the failures generally follow the curve given by the growth rings naturally present in the wood. In fact, they represent a preferential plane for sliding between two fibers of different densities.

In cases where the break does not appear to follow the rings, the sample shows a higher resistance, as in tests 5.5 (13.19 N/mm^2), 7.4 (14.37 N/mm^2), and 15.4 (14.93 N/mm^2).



Fig.24



Fig.25

Fig.24: Dettaglio con visibile perpendicolarità tra gli anelli di accrescimento.

Fig.25: Dettaglio con visibile imperfezione preesistente del legno.

Fig.24: Detail with visible perpendicularity of the growth rings.

Fig.25: Detail with visible preexisting imperfection in the wood.

4.5.4 Perpendicolarità degli anelli di accrescimento

Nei pochi test in cui si notava una perpendicolarità tra le direzioni degli anelli di accrescimento (vedi Figura 24) si prevedeva una minore resistenza del campione. Questo sarebbe dovuto a una diversa permeabilità dei due elementi lignei, che avrebbe causato una infiltrazione non simmetrica della soluzione adesiva.

Analizzando però questi campioni non risulta significativa la differenza di resistenza tra un campione che presenta questa perpendicolarità e uno che ne è privo.

Questo potrebbe essere dovuto alla bassa permeabilità in genere del legno utilizzato.

4.5.5 Imperfezioni

Prima della fase di incollaggio il legno disponibile è stato selezionato in modo da non presentare grandi imperfezioni come cipollature, crepe, grossi nodi, decolorazioni o attacco biologico.

Rimane la presenza di alcune imperfezioni minori come nodi o crepe di piccole dimensioni. Non si può però affermare che essi comportino una perdita di resistenza rilevante visti i risultati registrati. L'unica possibile influenza rilevata è affrontata nel punto successivo.

4.5.4 Perpendicularity of the growth rings

In the few tests where perpendicularity between the growth rings was observed (see Figure 24), the sample was expected to have lower strength. This would be due to different permeability of the two wood elements, which would have caused asymmetrical infiltration of the adhesive solution.

However, analyzing these samples, the difference in strength between a sample with this perpendicularity and one without it was not significant.

This could be due to the generally low permeability of the wood used.

4.5.5 Imperfections

Before the gluing phase, the available wood was selected to be free of major imperfections such as ringing, cracks, large knots, discoloration, or biological attack.

Some minor imperfections, such as small knots or cracks, remain. However, given the results recorded, it cannot be said that these lead to a significant loss of strength. The only possible influence detected is addressed in the next section.



Fig.26

Fig.26: Dettaglio su porzione di legno addensata. È ben visibile la differenza di porosità rispetto alla lamella sottostante.

Fig.26: Detail of denser portion of wood. Well visible is the difference in porosity if compared to the lower lamella.

4.5.6 Porzioni di legno dense e impermeabili

Sono stati registrati dei campioni con resistenza più bassa della media accomunati da una stessa caratteristica: uno dei due elementi lignei incollati presentava una irregolarità nella curvatura degli anelli di accrescimento. Questo è molto probabilmente associabile alla prossimità a un nodo di dimensioni importanti, che però non è presente all'interno del campione. La conseguenza è che il legno risulta essere particolarmente denso, il che comporta da un lato un'elevata resistenza del legno (infatti non si registrano rotture in elementi di legno con queste caratteristiche), dall'altro lato però la densità aumenta ulteriormente l'impermeabilità del materiale e durante la fase di polimerizzazione la colla permea in maniera asimmetrica, diminuendo la resistenza dell'adesione. Molti dei campioni più deboli infatti presentano questa caratteristica.

4.6 CONCLUSIONI

La prova di resistenza a taglio longitudinale ha restituito valori positivi, sia dal punto di vista quantitativo che qualitativo: il valore di resistenza ottenuto è superiore a quello di prodotti più tipici come (l'abete rosso o altre aghifoglie) e la percentuale di superfici di incollaggio delaminate è contenuta.

Rimane pertanto da indagare la resistenza di questa tecnologia all'esposizione agli agenti atmosferici, studiata nel test successivo.

4.5.6 Dense and Impermeable Wood Portions

Samples with lower-than-average strength were recorded, but they all shared a common characteristic: one of the two glued wooden elements had an irregularity in the curvature of the growth rings. This is most likely related to proximity to a large knot, which, however, was not present within the sample. The result is that the wood is particularly dense, which on the one hand leads to high wood strength (in fact, no breakages were recorded in wooden elements with these characteristics). On the other hand, however, the density further increases the material's impermeability, and during the curing phase, the glue permeates asymmetrically, decreasing the bond strength. Many of the weakest samples, in fact, exhibit this characteristic.

4.6 CONCLUSIONS

The longitudinal shear strength test yielded positive results, both quantitatively and qualitatively: the strength obtained was higher than that of more typical products (such as spruce or other coniferous trees), and the percentage of delaminated bonded surfaces was low.

Therefore, the resistance of this technology to exposure to atmospheric agents remains to be investigated, which is studied in the subsequent test.

PROVE DI RESISTENZA A DELAMINAZIONE

DELAMINATION RESISTANCE TESTS



Fig.27

Fig.27: Campione al termine della prova. Sono ben visibili le rotture radiali, tangenziali e lungo la linea di colla.

Fig.27: Sample at the end of the test. Well visible are the breaks along the radius, tangential and in the gluelines.

5. PROVE DI RESISTENZA A

DELAMINAZIONE

Questo tipo di prova vuole analizzare la resistenza a delaminazione di una linea di colla. Con delaminazione si intende una rottura localizzata all'interno della linea di colla (che non coinvolge quindi il legno) causata principalmente dall'isteresi igroscopica, ovvero cicli di bagnatura e asciugatura dell'elemento a causa dell'esposizione alle intemperie. Queste rotture sono causate da tensioni tangenziali originate da un ritiro/espansione del legno al variare del contenuto d'acqua.

Il legno infatti è un materiale igroscopico che aumenta il proprio volume quando assorbe umidità dall'ambiente circostante. Questa variazione di volume non è però omogenea per due motivi principali:

- Il legno è un materiale eterogeneo e alcune porzioni di materiale espandono maggiormente rispetto ad altre
- Le fibre più esterne iniziano a inumidirsi ed espandersi prima di quelle vicino al nucleo centrale dell'elemento, ed essendo l'adesivo una connessione tra fibre più e meno espanse diventa una superficie sensibile alle tensioni che si generano tra fibre espanse (comprese per reazione) e non ancora espanse (tese). Ovviamente si hanno reazioni opposte nel caso dell'asciugatura.

Il test fornito dalla normativa UNI EN 302-2: 2023 descritto di seguito rappresenta un caso estremo rispetto alle condizioni naturali, dove la quantità di umidità assorbita sarebbe minore e le tempistiche molto più dilatate.

5. DELAMINATION RESISTANCE TESTS

This type of test analyzes the delamination resistance of a glue line. Delamination refers to a localized break within the glue line (which therefore does not involve the wood) caused primarily by hygroscopic hysteresis, which are cycles of wetting and drying of the laminated wood due to exposure to the elements. These breaks are caused by shear stresses arising from the wood's shrinkage/expansion as its water content varies.

Wood is a hygroscopic material that expands when it absorbs moisture from the surrounding environment. This change in volume, however, is not homogeneous for two main reasons:

- Wood is a heterogeneous material, and some portions of the material expand more than others.
- The outermost fibers begin to moisten and expand before those near the core of the element. Since the adhesive acts as a connection between more and less expanded fibers, it becomes a surface sensitive to the stresses generated between expanded fibers (compressed by reaction) and non-expanded fibers (stretched).

Obviously, opposite reactions occur during drying.

The test provided by the UNI EN 302-2:2023 standard described below represents an extreme case compared to natural conditions, where the amount of moisture absorbed would be less and the timeframes would be much longer.



Fig.28

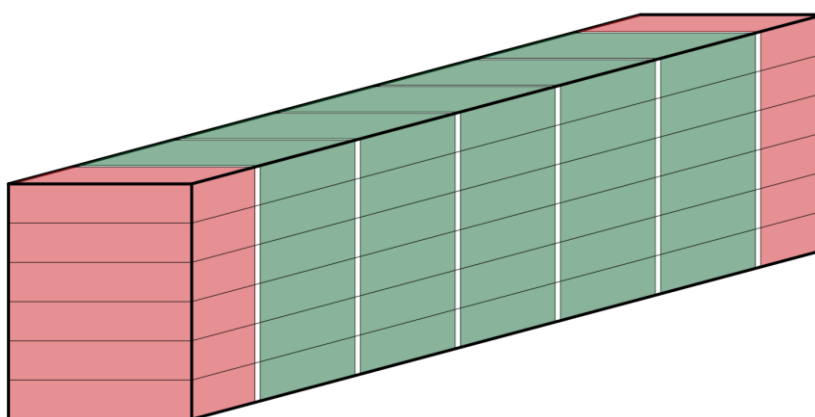


Fig.29

Fig.28: Campione utilizzato nei test di delaminazione.

Fig.29: Schema per il taglio degli elementi di legno lamellare. In rosso le porzioni da scartare, in verde i campioni utilizzabili.

Fig.28: Sample used in the delamination tests.

Fig.29: Cutting scheme of the glulam elements. In red the portions to discard, in green the usable samples.

5.1 CAMPIONI

I campioni utilizzati nel test sono stati ricavati da tre elementi di legno lamellare realizzati con tempi di assemblaggio diversi: 30, 45 e 60 minuti.

Da notare che gli elementi con tempi di assemblaggio 30 e 60 minuti presentano delle imperfezioni negli incollaggi, il che condiziona l'interpretazione dei risultati più avanti.

I campioni sono ricavati secondo le indicazioni date da normativa UNI EN 302-2: 2023. Questa prescrive che da ciascun elemento di legno lamellare si ricavino 5 campioni di dimensioni 140x180 mm sulla faccia di testa e 75 mm di spessore come quello riportato a lato.

Viene inoltre specificato che dall'elemento iniziale (con dimensioni 140x180x500 mm) vengano scartate porzioni di 50 mm dalle facce di testa.

Non fornendo la normativa figure inerenti alla produzione dei campioni viene riportato accanto uno schema a titolo esemplificativo (Figura 29).

5.1 SAMPLES

The samples used in the test were obtained from three glulam elements made with different assembly times: 30, 45, and 60 minutes.

Note that the elements with assembly times of 30 and 60 minutes show imperfections in the gluing, which will affect the interpretation of the results later.

The samples were obtained according to the instructions provided by the UNI EN 302-2:2023 standard. This standard requires that from each glulam element, five samples be obtained, each measuring 140x180 mm on the end face and 75 mm thick, as shown on the side.

It is also specified that 50 mm portions of the end faces of the initial element (which has dimensions of 140x180x500 mm) be discarded.

Since the standard does not provide figures relating to the production of the samples, an example illustration is shown alongside (Figure 29).



Fig.30



Fig.31

Fig.30: Autoclave e cella climatica utilizzate per i cicli di impregnamento-asciugatura.

Fig.31: Campioni caricati all'interno dell'autoclave.

Fig.30: Autoclave and climate chamber used in the impregnation-drying cycles.

Fig.31: Samples loaded inside the autoclave.

5.2 STRUMENTAZIONE

La strumentazione necessaria per la prova descritta consiste principalmente in quella richiesta per i cicli di impregnamento-asciugatura.

È infatti necessario disporre di:

- Un'autoclave dove inserire i campioni in immersione
- Una pompa a vuoto che permetta di esercitare una pressione assoluta di 25 kPa (75 kPa al di sotto della pressione atmosferica)
- Una pompa che permetta di esercitare una pressione assoluta di 600 kPa (500 kPa al di sopra della pressione atmosferica)
- Una cella climatica ventilata che permetta di controllare temperatura, umidità e velocità dell'aria.
- Una bilancia
- Una lente di ingrandimento per l'analisi dei campioni a fine ciclo

5.3 ESECUZIONE DEL TEST

Il primo passo per l'esecuzione del test consiste nel misurare e registrare il peso di ciascun campione.

Successivamente vengono collocati i campioni all'interno dell'autoclave tra due griglie, una superiore e una inferiore, con una disposizione tale da lasciare tutte le facce di testa completamente esposte (come in Figura 31).

5.2 EQUIPMENT

The equipment required for the test described consists primarily of that needed for the impregnation-drying cycles.

The following are required:

- An autoclave to immerse the samples
- A vacuum pump capable of applying an absolute pressure of 25 kPa (75 kPa below atmospheric pressure)
- A pump capable of applying an absolute pressure of 600 kPa (500 kPa above atmospheric pressure)
- A ventilated climate chamber capable of controlling temperature, humidity, and air velocity.
- A scale
- A magnifying glass for analyzing the samples at the end of the cycle

5.3 TEST EXECUTION

The first step in performing the test is to measure and record the weight of each sample.

The samples are then placed inside the autoclave between two grids, one upper and one lower, with an arrangement such as to leave all the end faces completely exposed (as in Figure 31).

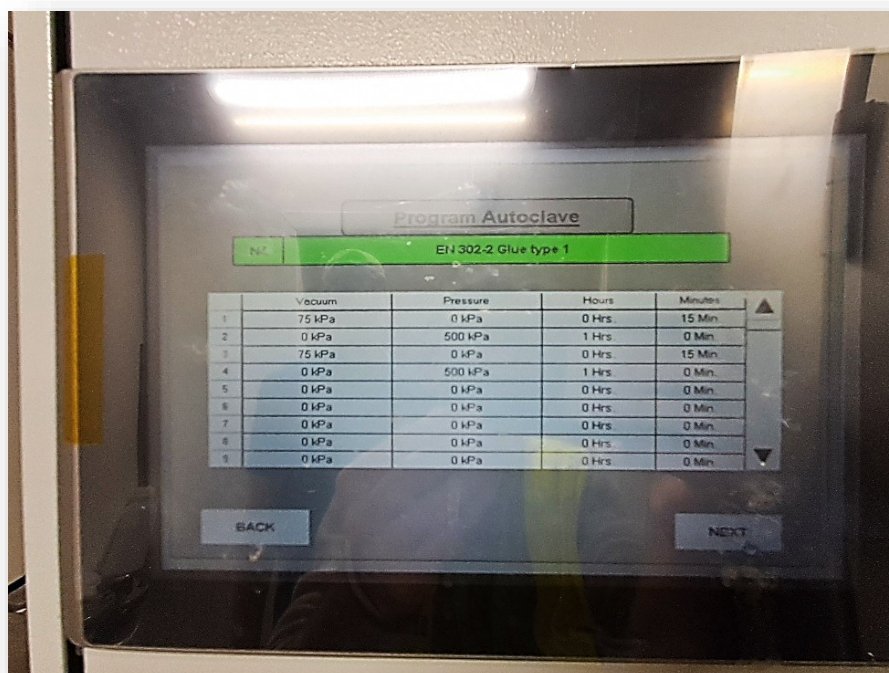


Fig.32



Fig.33

Fig.32: Display con impostazioni relative al ciclo di impregnamento.

Fig.33: Interno della cella climatica.

Fig.32: Display with settings relative to the impregnation cycle.

Fig.33: Inside of the climatic chamber.

Una volta sigillata l'autoclave si introduce acqua all'interno in modo da sommergere totalmente i campioni.

Si inizia quindi il ciclo di impregnamento con le seguenti specifiche:

- 15 minuti a pressione assoluta 25 kPa (-75 kPa rispetto alla pressione atmosferica)
- 1 ora a pressione assoluta 600 kPa (500 kPa rispetto alla pressione atmosferica)
- 15 minuti a pressione assoluta 25 kPa
- 1 ora a pressione assoluta 600 kPa

Successivamente si spostano i campioni nella cella climatica ventilata. Le impostazioni per l'asciugatura sono:

- Temperatura: 65°C
- Umidità: 12,5%
- Velocità aria: 2-3 m/s a cella vuota

Il processo di asciugatura termina quando il peso di ciascun campione (che durante l'impregnamento sarà sicuramente aumentato) torna al di sotto del 108% rispetto al peso originario. Ad ogni modo si sconsiglia di far scendere il peso al di sotto di quello originario del campione. L'asciugatura ha impiegato in media 19 ore.

Terminato questo ciclo impregnamento-asciugatura la norma prevede di ripeterlo due ulteriori volte.

Per motivi di tempistiche è stato eseguito un solo ciclo, che spesso risulta essere già pienamente esplicativo degli effetti della delaminazione sul campione.

Once the autoclave is sealed, water is poured inside to completely submerge the samples.

The impregnation cycle then begins with the following specifications:

- 15 minutes at 25 kPa absolute pressure (-75 kPa compared to atmospheric pressure)
- 1 hour at 600 kPa absolute pressure (500 kPa compared to atmospheric pressure)
- 15 minutes at 25 kPa absolute pressure
- 1 hour at 600 kPa absolute pressure

The samples are then moved to the ventilated climate chamber. The drying settings are:

- Temperature: 65°C
- Humidity: 12.5%
- Air velocity: 2-3 m/s with the chamber empty

The drying process ends when the weight of each sample (which will undoubtedly have increased during the impregnation) returns to less than 108% of its original weight. In any case, it is not recommended to lower the sample's weight below its original weight. Drying took an average of 19 hours.

After completing this impregnation-drying cycle, the standard requires two additional cycles.

Due to time constraints, only one cycle was performed, which often provides a full picture of the effects of delamination on the sample.



Fig.34



Fig.35

Fig.34: Linea di colla delaminata vista sotto una lente di ingrandimento.

Fig.35: Rottura del legno, non valida come delaminazione, vista sotto una lente di ingrandimento.

Fig.34: Delaminated glueline under the magnifying glass

Fig.35: Wood break, not valid as delamination, under the magnifying glass.

5.4 ANALISI DEI RISULTATI

Prima di addentrarsi nell'analisi dei risultati, bisogna fare un chiarimento su ciò che sarà di interesse per la resistenza a delaminazione.

Ogni campione esce dai cicli di impregnamento-asciugatura presentando numerose crepe e aperture sulle facce di testa. Con l'aiuto delle immagini a lato, si determina che le rotture importanti al fine della determinazione della resistenza del campione sono quelle totalmente localizzate all'interno della linea di colla o che al massimo coinvolge uno strato di legno di spessore nella scala microscopica.

Sono per tanto da escludere:

- Rotture localizzate totalmente all'interno della parte legnosa del campione
- Rotture che attraversano la linea di colla
- Rotture nella colla localizzate in prossimità di nodi o fratture preesistenti
- Rotture lunghe meno di 2,5 mm e localizzate a più di 5 mm da altre delaminazioni

Per la quantificazione numerica della resistenza a delaminazione la normativa richiede di misurare la lunghezza delle delaminazioni per ciascuna linea di colla su entrambe le facce di testa.

Successivamente si utilizza per ciascuna linea di colla una semplice formula fornita da normativa:

$$D = \frac{l}{l_{tot}} * 100$$

Dove:

- D è la percentuale di lunghezza delaminata
- l è la somma delle lunghezze dei tratti delaminati

5.4 ANALYSIS OF RESULTS

Before focusing on the analysis of the results, it is important to clarify what will be of interest for delamination resistance.

Each sample emerges from the impregnation-drying cycles with numerous cracks and openings on the end faces. With the help of the accompanying images, it can be specified that the breaks that are important for determining the sample's resistance are those located entirely within the glue line or, at most, involving one layer of wood with a thickness at the microscopic scale.

Therefore, the following must be excluded:

- Breaks located entirely within the woody part of the sample
- Breaks crossing the glue line
- Breaks in the glue located near pre-existing knots or fractures
- Breaks less than 2.5 mm long and located more than 5 mm from other delaminations

To numerically quantify delamination resistance, the standard requires measuring the length of delaminations for each glue line on both end faces. Subsequently, a simple formula provided by the regulations is used for each glue line:

$$D = \frac{l}{l_{tot}} * 100$$

Where:

- D is the percentage of delaminated length
- l is the sum of the lengths of the delaminated sections



Fig.36

Fig.36: Campione al termine dei cicli di impregnamento-asciugatura con delaminazioni segnate.

Fig.36: Sample at the end of the impregnation-drying cycles with marked delaminations.

- l_{tot} è la somma delle lunghezze delle linee di colla sulle due facce ($140+140 = 280$ mm)

Viene richiesto che:

- la delaminazione percentuale di ciascuna linea di colla non superi il 5%
- la delaminazione percentuale media sulla totalità di ciascun campione non superi anch'esso il 5%

Prima di fornire i risultati, però, è opportuno fare una specificazione. Come annunciato precedentemente, alcuni campioni presentavano delle imperfezioni nell'incollatura, ovvero alcune lamelle non aderivano particolarmente bene lasciando una visibile apertura al posto di parte della linea di colla. In particolare:

- l'elemento con tempo di assemblaggio di 30 minuti presenta una porzione non adesa tra la prima e la seconda lamella
- l'elemento con tempo di assemblaggio di 60 minuti presenta due porzioni non adese: una tra la quarta e la quinta lamella e una tra la quinta e la sesta.

Questa accidentale imperfezione indebolisce sicuramente la resistenza a delaminazione dei campioni coinvolti, ma fornisce un interessante spunto per la valutazione degli effetti di una incorretta incollatura sulla qualità del prodotto finale.

- l_{tot} is the sum of the lengths of the glue lines on the two faces ($140 + 140 = 280$ mm)

It is required that:

- the percentage delamination of each glue line does not exceed 5%
- the average percentage delamination across the entire sample does not exceed 5%

Before providing the results, however, it is appropriate to make a specification. As previously announced, some samples showed imperfections in the gluing, that is, some lamellae did not adhere particularly well, leaving a visible gap where part of the glue line should have been. In particular:

- the element with an assembly time of 30 minutes has a non-adherent portion between the first and second lamellae
- the element with an assembly time of 60 minutes has two non-adherent portions: one between the fourth and fifth lamellae and one between the fifth and sixth.

This accidental imperfection certainly weakens the delamination resistance of the samples involved but provides an interesting starting point for evaluating the effects of incorrect gluing on the quality of the final product.

ASSEMBLY TIME: 30 minutes						
	Glueline n°	Del on side A [mm]	Del on side B [mm]	DEL% over single glueline	DEL% over whole sample	DEL% over acceptable gluelines
Sample 1	1	88	66	55,0	13,6	3,2
	2	17	0	6,1		
	3	0	0	0,0		
	4	0	0	0,0		
	5	19	0	6,8		
Sample 2	1	140	63	72,5	14,8	0,4
	2	0	0	0,0		
	3	0	0	0,0		
	4	0	0	0,0		
	5	4	0	1,4		
Sample 3	1	140	140	100,0	22,9	3,6
	2	6	7	4,6		
	3	0	0	0,0		
	4	0	0	0,0		
	5	11	16	9,6		
Sample 4	1	140	92	82,9	19,1	3,2
	2	0	9	3,2		
	3	0	0	0,0		
	4	0	8	2,9		
	5	14	5	6,8		
Sample 5	1	71	75	52,1	12,4	2,4
	2	6	2	2,9		
	3	4	0	1,4		
	4	0	0	0,0		
	5	15	0	5,4		

Fig.37.a

ASSEMBLY TIME: 45 minutes						
	Glueline n°	Del on side A [mm]	Del on side B [mm]	DEL% over single glueline	DEL% over whole sample	DEL% over acceptable gluelines
Sample 6	1	6	0	2,1	2,4	2,4
	2	2	0	0,7		
	3	10	0	3,6		
	4	0	5	1,8		
	5	11	0	3,9		
Sample 7	1	4	3	2,5	2,1	2,1
	2	0	3	1,1		
	3	9	3	4,3		
	4	0	0	0,0		
	5	3	4	2,5		
Sample 8	1	9	7	5,7	2,5	2,5
	2	7	0	2,5		
	3	10	1	3,9		
	4	0	0	0,0		
	5	1	0	0,4		
Sample 9	1	10	9	6,8	3,2	3,2
	2	4	0	1,4		
	3	1	0	0,4		
	4	6	13	6,8		
	5	2	0	0,7		
Sample 10	1	0	0	0,0	2,1	2,1
	2	0	7	2,5		
	3	0	2	0,7		
	4	5	6	3,9		
	5	0	10	3,6		

Fig.37.b

Fig.37.a/b/c: Tabella contenente i risultati delle prove di delaminazione.

Fig.37.a/b/c: Table containing the results of the delamination tests.

ASSEMBLY TIME: 60 minutes						
	Glueline n°	Del on side A [mm]	Del on side B [mm]	DEL% over single glueline	DEL% over whole sample	DEL% over acceptable gluelines
Sample 11	1	9	0	3,2	6,0	4,0
	2	7	0	2,5		
	3	18	0	6,4		
	4	14	6	7,1		
	5	25	5	10,7		
Sample 12	1	2	14	5,7	8,4	6,7
	2	5	0	1,8		
	3	0	35	12,5		
	4	24	7	11,1		
	5	6	24	10,7		
Sample 13	1	0	0	0,0	7,8	1,0
	2	0	5	1,8		
	3	0	3	1,1		
	4	41	36	27,5		
	5	11	13	8,6		
Sample 14	1	0	0	0,0	5,4	0,6
	2	0	0	0,0		
	3	5	0	1,8		
	4	21	34	19,6		
	5	7	9	5,7		
Sample 15	1	0	0	0,0	6,9	3,5
	2	3	17	7,1		
	3	3	6	3,2		
	4	6	22	10,0		
	5	29	10	13,9		

Fig.37.c

Nelle tabelle precedenti sono state segnate in rosso tutte le linee di colla che, come descritto precedentemente, presentavano imperfezioni alla fine del processo di incollaggio.

Come si può notare dalle due ultime colonne è stata calcolata una delaminazione percentuale media su tutto il campione applicando due diverse discriminanti:

- nella prima vengono considerate tutte le linee di colla, sia che presentino imperfezioni che non.
- nella seconda invece viene calcolata la media solamente sulle linee di colla accettabili, ovvero prive dei difetti prima esplicitati.

Andando a contare per la prima casistica, superano il test:

- 48 linee di colla su 75
- 5 campioni su 15

Se invece selezioniamo solo quelle prive di difetti, a superare il test sono:

- 48 linee di colla su 60
- 14 campioni su 15

Già si nota quindi che la totalità delle linee di colla difettose non ha superato il test.

In the previous tables, all glue lines that, as described above, showed imperfections at the end of the gluing process, have been marked in red.

As can be seen from the last two columns, an average percentage delamination was calculated for the entire sample by applying two different discriminators:

- First, all glue lines are considered, whether or not they have imperfections.
- Secondly, the average is calculated only for acceptable glue lines, which are those free of the defects described above.

Considering the first case, the following passed the test:

- 48 glue lines out of 75
- 5 samples out of 15

If, however, we select only those without defects, the following passed the test:

- 48 glue lines out of 60
- 14 samples out of 15

It is therefore already clear that all defective glue lines failed the test.

Species	Ratio	Spread [g/m ²]	AT [min]	$\bar{D}$ [%]	CoV [%]
Castanea Sativa	100:30	400	30	16,5	1,8
	100:30	400	45	2,5	0,81
	100:30	400	60	6,9	0,97

Fig.38

Species	Ratio	Spread [g/m ²]	AT [min]	$\bar{D}$ [%]	CoV [%]
Picea Abies	100:30	250	15	1,08	8,9
Picea Abies	100:30	400	65	3,60	35,9
Picea Abies	100:130	250	5	2,30	95,5
Picea Abies	100:130	400	15	1,10	29,7
Quercus Petraea /Q. Robur	100:30	400	30	2,68	40,1
Quercus Petraea /Q. Robur	100:30	500	70	2,73	35,1
Quercus Petraea /Q. Robur	100:130	400	15	2,88	27,6
Quercus Petraea /Q. Robur	100:130	500	25	6,83	14,7

Fig.39

Fig.38: Tabella riassuntiva per il test di delaminazione sul legno di castagno.

Fig.39: Tabella riassuntiva per il test di delaminazione su legno di abete rosso e quercia/rovere.

Fig.38: Summary table for the delamination test on chestnut wood.

Fig.39: Summary table for the delamination test on spruce and oak/durmast wood.

5.5 CONSIDERAZIONI SUI RISULTATI

Come per il test precedente, si possono avanzare considerazioni su molteplici aspetti. Di seguito le principali osservazioni.

5.5.1 Confronto con altre specie

Per permettere il confronto con altre specie legnose si fa riferimento a valori di delaminazione medi per ogni tempo di assemblaggio e al relativo coefficiente di variazione. Si decide di considerare nel calcolo tutte le linee di colla, difettose comprese.

Le formule utilizzate sono:

$$\bar{D} = \frac{\sum_{i=1}^{25} DEL_{\%}^i}{25}$$
$$CoV = \frac{\sigma}{\bar{D}}$$

Dove σ corrisponde alla deviazione standard, calcolata come:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{25} (DEL_{\%}^i - \bar{D})^2}{25 - 1}}$$

I risultati ottenuti sono riportati nella tabella accanto (Fig.38). Rapportandoli ai risultati ottenuti da Dynea su altre specie legnose (abete rosso e quercia/rovere) in condizioni di incollaggio sfavorevoli (in Fig.39), possiamo notare che i risultati ottenuti si dimostrano soddisfacenti, specialmente per i campioni con tempo di assemblaggio di 45 minuti, perfettamente in linea con quelli ottenuti per il legno di quercia.

5.5 CONSIDERATIONS ON THE RESULTS

As with the previous test, several considerations can be made. The main observations are as follows.

5.5.1 Comparison with other species

To allow comparison with other wood species, we refer to average delamination values for each assembly time and the corresponding coefficient of variation. We decided to consider all glue lines, including defective ones, in the calculation.

The utilized formulas are:

$$\bar{D} = \frac{\sum_{i=1}^{25} DEL_{\%}^i}{25}$$
$$CoV = \frac{\sigma}{\bar{D}}$$

Where σ corresponds to the standard deviation, calculated as:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{25} (DEL_{\%}^i - \bar{D})^2}{25 - 1}}$$

The results obtained are shown in the table alongside (Fig.38). Comparing them to the results obtained by Dynea on other wood species (spruce and oak/durmast) in unfavourable glueing conditions (in Fig.39), we can see that the results obtained are satisfactory, especially for the samples with an assembly time of 45 minutes, perfectly fitting in the result measured on oak wood.



Fig.40



Fig.41

Fig.40: Dettaglio con visibili imperfezioni preesistenti nel legno.

Fig.41: Dettaglio con visibile nodo in prossimità della linea di colla.

Fig.40: Detail with visible preexisting imperfections in the wood.

Fig.41: Detail with visible knot near the glue line.

5.5.2 Effetti delle imperfezioni

Come già evidenziato precedentemente, la qualità dell'incollaggio è fondamentale per la tenuta alla delaminazione di un elemento. La presenza, infatti, di una porzione non correttamente adesiva aumenta esponenzialmente gli effetti della delaminazione, come nel caso della prima linea di colla del campione 3 che si è totalmente separata.

Questo è imputabile molto probabilmente a un cambiamento di quelle che potrebbero essere considerate come "condizioni al contorno" delle superfici di incollaggio

5.5.3 Delaminazioni alle estremità

Ricollegandosi alle condizioni al contorno, spesso si è registrata la formazione delle delaminazioni a partire dagli spigoli del campione, dove è facile intuire che l'adesivo sia maggiormente esposto.

5.5.4 Difetti del legno

Si può poi procedere prendendo invece in considerazione l'effetto delle imperfezioni presenti nel legno, come fratture o nodi. Come è ben evidente nelle figure accanto, la presenza di imperfezioni non sembra generare particolari concentrazioni di delaminazioni nelle zone limitrofe. Ci si aspetterebbe invece il contrario. La normativa, infatti, prescrive di non conteggiare eventuali delaminazioni nei pressi di nodi e crepe;

5.5.2 Effects of imperfections

As previously highlighted, the quality of the bond is crucial for a component's resistance to delamination. Indeed, the presence of a poorly bonded portion exponentially increases the effects of delamination, as in the case of the first glue line on sample 3, which completely separated.

This is most likely due to a change in what could be considered "boundary conditions" of the bonding surfaces.

5.5.3 Delaminations at the ends

Referring to the boundary conditions, delaminations often occurred starting from the edges of the sample, where it is easy to imagine the adhesive is most exposed.

5.5.4 Wood Defects

We can then proceed by considering the effect of imperfections in the wood, such as fractures or knots. As is clearly evident in the figures alongside, the presence of imperfections does not seem to generate particular concentrations of delaminations in the surrounding areas. One would expect the opposite. The standard, in fact, prescribes not counting any delamination near knots and cracks,



Fig.42

Fig.42: Dettaglio con visibile
perpendicolarità tra gli anelli di
accrescimento.

Fig.42: Detail with visible
perpendicularity between the growth
rings.

quindi, è facile intuire che queste abbiano genericamente un effetto negativo sulla resistenza a delaminazione. In questo caso, invece, l'accoppiata tra il castagno e l'adesivo utilizzato sembra ben sopperire a questa generale debolezza.

5.5.5 Perpendicolarità degli anelli di accrescimento

Come quanto detto per lo shear block test, ci si aspetta una prestazione inferiore da parte dell'adesivo quando le direzioni degli anelli di accrescimento tra due lamelle adese risultano perpendicolari. Oltre alla diversa permeabilità delle porzioni di legno (fenomeno già descritto nel test precedente), in questo caso studio si aggiunge anche un secondo fenomeno.

Il legno infatti tende a espandersi in maniera differente lungo tre distinte direzioni:

- Parallelo alle fibre: allungando ciascuna fibra
- Radialmente: espandendo allontanando le fibre dal centro
- Tangenzialmente: seguendo la curva data dagli anelli di accrescimento

La prima è quella di modulo minore e comunque, avendo tutte le fibre lo stesso orientamento, non genera tensioni ulteriori.

La seconda invece ha modulo pari alla metà della terza (in genere), pertanto dove due legni tendono a espandere principalmente lungo direzioni perpendicolari, si può aspettare la generazione di

so it's easy to imagine that these generally have a negative effect on delamination resistance. In this case, however, the combination of chestnut and the adhesive used seems to compensate for this general weakness.

5.5.5 Perpendicularity of the growth rings

As mentioned for the shear block test, the adhesive is expected to perform poorly when the directions of the growth rings between two bonded lamellae are perpendicular. In addition to the different permeability of the wood sections (a phenomenon already described in the previous test), this case study also includes a second phenomenon.

Wood, in fact, tends to expand differently along three distinct directions:

- Parallel to the grain: stretching each grain
- Radially: expanding by moving the grain away from the center
- Tangentially: following the curve of the growth rings

The first has the lowest modulus and, since all the grains have the same orientation, does not generate additional stress.

The second, however, has a modulus equal to half that of the third (generally), so where two pieces of wood tend to expand primarily along perpendicular directions, one can expect the generation of



Fig.43

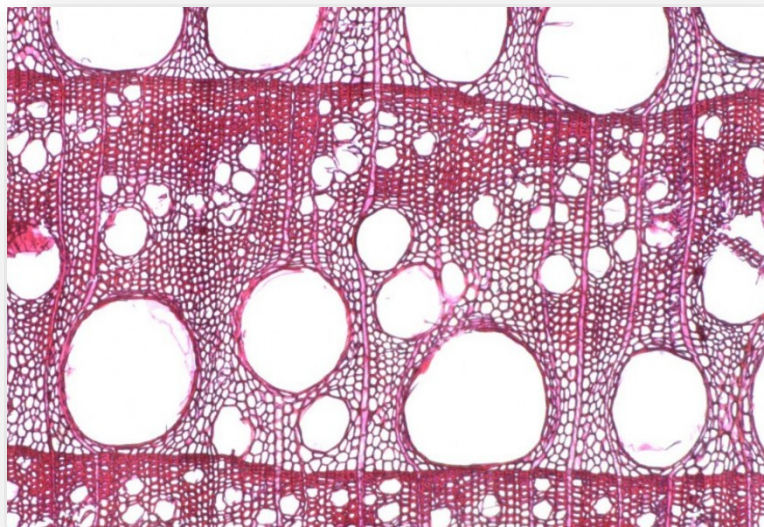


Fig.44

Fig.43: Esempi di cipollatura nel castagno. (Fonti et al., 2002)

Fig.44: Dettaglio dei pori negli anelli di accrescimento del castagno. (Poli, 2016)

Fig.43: Examples of ringshake in chestnut wood. (Fonti et al., 2002)

Fig.44: Detail of pores in the growth rings of chestnut wood. (Poli, 2016)

ulteriori tensioni che mettano in difficoltà la resistenza a delaminazione. Nonostante questo, non sono state rinvenute nei campioni delaminazioni dovute a questa causa.

5.5.6 Cipollatura

Il seguente effetto non è strettamente correlato al binomio castagno-adesivo su cui si concentra all'interna di questa relazione, ma piuttosto alle caratteristiche del solo legno. Può comunque essere interessante prenderne nota in quanto potrebbe influenzare la resistenza strutturale di una eventuale applicazione di questa tecnologia.

Al termine del ciclo di impregnamento-asciugatura, un discreto numero di campioni riportava tracce di cipollatura. Questa consiste in un distaccamento interno al legno in corrispondenza di due anelli di accrescimento consecutivi.

Questa caratteristica sembra essere tipica del legno di castagno e altri studi come *“La cipollatura nel legno di castagno: un problema centrale per il rilancio della castanicoltura da legno di qualità”* (redatto da Patrick Fonti, Fulvio Giudici e Marco Conedera) sembrano trovarne le cause in due principali fattori.

Il primo è congenito al legno di castagno, che presenta un legno primaticcio notevolmente più poroso rispetto a quello tardivo (vedi immagine), riducendo di molto la resistenza degli strati primaverili rispetto a quelli estivi, ma sono anche stati notati alcuni ceppi familiari meno inclini a questo divario.

additional stresses that would compromise the delamination resistance. Despite this, no delaminations due to this cause were found in the samples.

5.5.6 Ring shake

The following effect is not strictly related to the chestnut-adhesive combination, which is the focus of this paper, but rather to the characteristics of the wood alone. However, it may be interesting to note, as it could influence the structural strength of a potential application of this technology.

At the end of the impregnation-drying cycle, a significant number of samples showed traces of ring shake. This consists of internal detachment of the wood at two consecutive growth rings.

This characteristic appears to be typical of chestnut wood, and other studies, such as *“Ring shake in Chestnut Wood: A Central Problem for the Revitalization of Quality Chestnut Cultivation”* (written by Patrick Fonti, Fulvio Giudici, and Marco Conedera), seem to identify two main factors as the causes.

The first is congenital to chestnut wood, which has an early wood that is considerably more porous than the late wood (see image), greatly reducing the resistance of the spring layers compared to the summer ones, but have also been noted some familiar strains less prone to this gap.

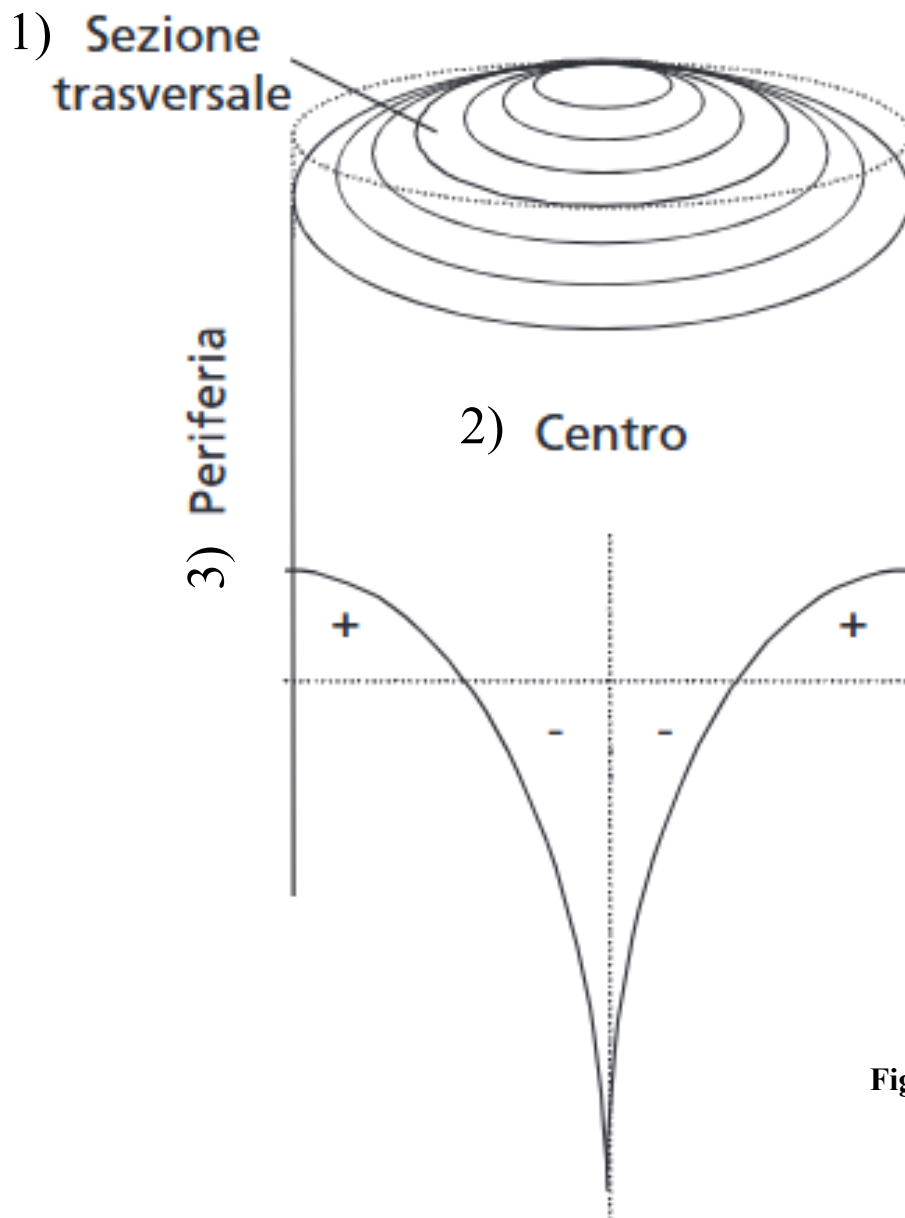


Fig.45

Fig.45: Tensioni indotte dal taglio in una sezione di legno.
(Fonti et al., 2002)

Fig.45: Stress induced by the cutting action in a wood section.
In order: 1) Cross section; 2) Core
3) Outer layer
(Fonti et al., 2002)

Una seconda causa sarebbe una crescita irregolare nella fase giovanile della pianta. Questo sembrerebbe spiegare come mai il castagno italiano risulti essere più propenso alla cipollatura rispetto a piante della stessa specie ma derivanti da Francia o Spagna. Una maggiore variabilità delle condizioni meteorologiche esercita infatti un importante stress sulla pianta.

All'interno del trattato sopra citato si ipotizza quindi che una maggiore tutela del pollone durante la crescita, una selezione più stringente delle caratteristiche del legno da coltivare e ovviamente una maggior cura durante la fase di taglio e trasporto possano incrementare la qualità del prodotto finale.

A second cause could be irregular growth during the tree's youthful phase. This would seem to explain why Italian chestnut trees are more susceptible to ring shakes than similar trees from France or Spain. Greater variability in weather conditions places significant stress on the tree.

The previously mentioned treatise therefore hypothesizes that greater protection of the shoot during growth, more stringent selection of the characteristics of the wood to be cultivated, and obviously greater care during the cutting and transportation phases can increase the quality of the final product.

CONCLUSIONI FINALI E SPUNTI PER LA FUTURA RICERCA

FINAL CONCLUSIONS AND RESERACH SUGGESTIONS

6.1 CONCLUSIONI

Questa tesi descrive il processo di produzione in laboratorio di elementi di legno lamellare in castagno (assemblati utilizzando l'adesivo MUF Prefere 4546 combinato all'indurente Prefere 5096) e i successivi test eseguiti per indagare le proprietà di resistenza a taglio longitudinale e resistenza a delaminazione.

I dati registrati per il taglio longitudinale restituiscono una resistenza che spazia da 8,12 a 14,93 N/mm², con un valore medio di 11,31 N/mm² e un 5-percentile pari a 8,80 N/mm². Inoltre, le rotture, prevalentemente localizzate nel legno, dimostrano che l'adesivo è maggiormente resistente del legno adiacente.

Nei test di resistenza a delaminazione si è ispezionato il comportamento del sistema colla-legno sottoposto a cicli di impregnamento-asciugatura. Inoltre, si è studiata l'influenza del tempo di assemblaggio sulla resistenza a tale sollecitazione. La maggior conseguenza derivante dai diversi tempi di assemblaggio è stata una qualità dell'incollaggio decisamente peggiore per alcuni dei campioni assemblati in 30 e 60 minuti, che si è poi tradotta in una resistenza non accettabile alla delaminazione. Le percentuali medie di delaminazione sono, relativamente ai tempi di assemblaggio:

- 30 minuti: 16,5 %
- 45 minuti: 2,5 %
- 60 minuti: 6,9 %

6.1 CONCLUSIONS

This thesis describes the laboratory production process of chestnut glulam elements (assembled using Prefere 4546 adhesive combined with Prefere 5096 hardener) and the subsequent tests performed to investigate the longitudinal shear strength and delamination resistance properties.

The longitudinal shear data recorded showed a strength ranging from 8.12 to 14.93 N/mm², with a mean value of 11.31 N/mm² and a 5th percentile of 8.80 N/mm². Furthermore, the cracks, predominantly localized in the wood, demonstrate that the adhesive is more resistant than the adjacent wood.

In the delamination resistance tests, the behavior of the glue-wood system was examined when subjected to impregnation-drying cycles. Furthermore, the influence of assembly time on resistance to this stress was studied. The main consequence of the different assembly times was a significantly worse bond quality for some of the samples assembled in 30 and 60 minutes, which then resulted in unacceptable resistance to delamination. The average delamination rates, relative to assembly times, are:

- 30 minutes: 16.5%
- 45 minutes: 2.5%
- 60 minutes: 6.9%

Se però si vanno a prendere in considerazione solo le linee di colla che non presentavano difetti evidenti prima del ciclo di impregnamento-asciugatura si può notare un notevole cambiamento dei risultati.

Considerando tutte le linee di colla solo 48 su 75 (ovvero il 64%) presentano meno del 5% di lunghezza delaminata. Se invece si selezionano le linee di colla prive di difetti, a passare il test sono 48 su 60 (l'80%). Da notare che quindi tutte le linee di colla difettose non hanno poi superato il test a delaminazione.

I dati raccolti per entrambi i test svolti sembrano quindi restituire un esito positivo o quanto meno incoraggiante per proseguire la ricerca in questo campo.

L'adesivo Prefere 4546 combinato con l'indurente Prefere 5096 ha dimostrato di essere una soluzione non solamente forte, ma anche ben adattabile alle difficili condizioni di incollaggio date dalla bassa permeabilità del castagno e l'alto contenuto di tannini.

Di fondamentale importanza risulta però essere il controllo del processo di produzione, che risulta essere sicuramente il fattore più influente sulle prestazioni finali dei campioni studiati.

Pertanto, potrebbe valer la pena investire altre energie per approfondire questa tecnologia. Esistono infatti molti progetti e finanziamenti a livello europeo attorno al mondo delle specie legnose sottoutilizzate, ovvero tutte quelle essenze

However, if we consider only the glue lines that did not show obvious defects before the impregnation-drying cycle, a significant change in the results can be observed.

Considering all the glue lines, only 48 out of 75 (or 64%) have less than 5% delamination in length. If, however, the defect-free glue lines are selected, 48 out of 60 (80%) pass the test. It should be noted that all the defective glue lines therefore failed the delamination test.

The data collected from both tests appear to be positive, or at least encouraging, for further research in this field.

The Prefere 4546 adhesive combined with the Prefere 5096 hardener has proven to be not only a strong solution, but also well-adapted to the challenging bonding conditions created by chestnut's low permeability and high tannin content.

Of fundamental importance, however, is the control of the production process, which is certainly the most influential factor on the final performance of the samples studied.

Therefore, it may be worth investing further effort in exploring this technology. Indeed, there are many European-level projects and funding programs focused on underutilized wood species, which are

sfruttate in maniera scarsamente ingegnerizzata (per travi in legno massello per esempio).

Più conservatore appare invece il gusto del mercato italiano, che sembrerebbe ancora prediligere travi a uso fiume dall'aspetto più rustico e meno moderno rispetto al legno lamellare. Quindi, è più facile immaginare un'applicazione in strutture industriali o di grandi dimensioni rispetto a un utilizzo domestico.

6.2 SPUNTI PER LA RICERCA

Vista la quantità del materiale disponibile, la variabilità all'interno dei campioni testati si limita al tempo di assemblamento e alla accidentale presenza di difetti nei campioni. Può essere interessante introdurre maggiore variabilità su aspetti come:

- Proporzione adesivo-indurente
- Quantità di adesivo applicato al m²
- Temperatura e tempo di polimerizzazione
- Pressione durante la polimerizzazione

e indagare i loro effetti sulla qualità finale del prodotto.

Inoltre, sarebbe opportuno per ottenere nuovi dati eseguire diversi tipi di test, come per esempio quelli suggeriti dalla normativa UNI EN 302-2:2023 (vedi capitolo LE PROVE SPERIMENTALI) o iniziare a produrre vere e proprie travi di legno lamellare di castagno per testarne direttamente le proprietà a flessione tramite prove apposite.

those wood species exploited in a poorly engineered manner (for solid wood beams, for example).

The Italian market, in contrast, appears more conservative, still apparently favoring solid wood beams with a more rustic and less modern appearance than laminated wood. Therefore, it's easier to imagine an application in big or industrial structures rather than a domestic use.

6.2 RESEARCH SUGGESTIONS

Given the quantity of material available, variability within the tested samples was limited to assembly time and the accidental presence of defects in the samples. It may be interesting to introduce greater variability in aspects such as:

- Adhesive-to-hardener ratio
- Amount of adhesive applied per m²
- Curing temperature and time
- Curing pressure

and investigate their effects on the final product quality.

Furthermore, to obtain new data, it would be appropriate to perform various types of tests, such as those suggested by the UNI EN 302-2:2023 standard (see THE EXPERIMENTAL TESTS chapter), or to begin producing actual chestnut glulam beams to directly test their flexural properties using specific tests.

Una ricerca più approfondita sul comportamento in opera di un elemento completo (e non campioni ridotti come quelli utilizzati) potrebbe fornire anche diversi valori di soglia per i test condotti.

Si porta ad esempio il caso del test di resistenza a delaminazione sul legno di quercia: mentre per tutti i tipi di legno viene assunto in generale un valore soglia di delaminazione pari al 5% (come quello assunto durante l'esecuzione della prova sul castagno), si è studiato che per il legno di quercia è possibile raggiungere un valore pari all' 8% senza inficiare considerevolmente le proprietà strutturali dell'elemento. Una ricerca più approfondita potrebbe quindi rendere alcuni dei test condotti positivi spostando il valore di soglia verso un valore maggiore.

Un'altra tecnologia indispensabile per la realizzabilità di travi con grandi luci è la possibilità di realizzare finger joints (o giunti a pettine in italiano). Andrebbero studiate le performance di questa soluzione adesiva anche in questo contesto, ben diverso da quello descritto in questa relazione.

Infine, sarebbe interessante approfondire quali effetti abbia la cipollatura su elementi strutturali in glulam di castagno e se si possa prevenire o compensare l'insorgenza di questi difetti.

Further research into the behavior in operational phase of a complete element (rather than small samples like the ones used) could also provide different threshold values for the tests conducted.

For example, the case of the delamination resistance test on oak wood is put forward: while a delamination threshold of 5% is generally assumed for all types of wood (like that used in the chestnut test), it has been studied that for oak wood, a value of 8% can be reached without significantly affecting the structural properties of the element. Further research could therefore make some of the tests conducted positive by shifting the threshold value to a higher value.

Another essential technology for the production of beams with large spans is the ability to create finger joints. The performance of this adhesive solution should also be studied in this context, which is very different from the one described in this report.

Finally, it would be interesting to explore the effects of ring shakes on chestnut glulam structural elements and whether the onset of these defects can be prevented or compensated.

BIBLIOGRAFIA / REFERENCES

Fig. n°	Page	Specifiche sul documento	Specifications on the document
1	12	Immagine scaricata dal sito internet www.Otto-Hetzer.de	Picture downloaded from the www.Otto-Hetzer.de website
	13	“ <i>Nouvelles inventions pour bien bastir et à petits frais</i> ”, Philibert de l'Orme (1561)	“ <i>Nouvelles inventions pour bien bastir et à petits frais</i> ”, Philibert de l'Orme (1561)
2	14	Tabella autoprodotta con dati derivanti dalle seguenti normative	Self-produced table with data from the following standards
	15	Normativa EN 338	EN 338 standard
	15	Normativa EN 1912	EN 1912 standard
	15	Normativa EN 335	EN 335 standard
	15	Normativa EN 350	EN 350 standard
	15	Normativa EN 460	EN 460 standard
3	16	Immagine tratta da “ <i>Influence of Climate Change on Chestnut Trees: A Review</i> ” redatto da Teresa R. Freitas, João A. Santos, Ana P. Silva and Hélder Fraga, 2021	Picture derived from “ <i>Influence of Climate Change on Chestnut Trees: A Review</i> ” by Teresa R. Freitas, João A. Santos, Ana P. Silva and Hélder Fraga, 2021
	17	Normativa EN 301	EN 301 standard
	17	Normativa EN 15425	EN 15425 standard
	17	Normativa EN 16254	EN 16254 standard
	17	Normativa EN 1995	EN 1995 standard
4	18	Fotografia autoprodotta durante il progetto di ricerca	Self-produced picture during the research project
5	20	Tabella fornita da Dynea	Table provided by Dynea
6	20	Fotografia autoprodotta durante il progetto di ricerca	Self-produced picture during the research project
7	22	Tabella fornita da Dynea	Table provided by Dynea
8	24	Tabella fornita da Dynea	Table provided by Dynea
9	24	Fotografia autoprodotta durante il progetto di ricerca	Self-produced picture during the research project

	29	Normativa UNI EN 302: 2023	UNI EN 302: 2023 standard
10	32	Fotografia autoprodotta durante il progetto di ricerca	Self-produced picture during the research project
11	32	Disegno tecnico autoprodotta secondo indicazioni fornite dalla normativa EN 14080: 2013	Self-produced technical drawing according to indications provided by EN 14080: 2013 standard
	33	Normativa EN 14080: 2013	EN 14080: 2013 standard
12	34	Disegno tecnico autoprodotta secondo indicazioni fornite dalla normativa EN 14080: 2013	Self-produced technical drawing according to indications provided by EN 14080: 2013 standard
13	34	Disegno tecnico autoprodotta	Self-produced technical drawing
14	36	Disegno tecnico autoprodotta	Self-produced technical drawing
15	38-39	Tabella autoprodotta	Self-produced table
16	16	Grafico prodotto dal software nativo della pressa idraulica utilizzata per i test. Il grafico è stato modificato con software Google Gemini per una maggiore chiarezza senza modificare il dato fornito	Graphic produced by the software native to the hydraulic press used in the test. The graphic has been modified with the software Google Gemini for a better readability without modifying the provided data
17	17	Grafico autoprodotta con software MATLAB	Self-produced graphic through MATLAB software
18	18	Fotografia autoprodotta durante il progetto di ricerca	Self-produced picture during the research project
	43	<i>“Evaluation of glue line shear strength of laminated timber structures using block and core type specimens”</i> redatto da Florindo Gaspar, Helena Cruz e Augusto Gomes, pubblicato il 7 Luglio 2017	<i>“Evaluation of glue line shear strength of laminated timber structures using block and core type specimens”</i> written by Florindo Gaspar, Helena Cruz e Augusto Gomes, published on the 7 th July 2017
19	44	Disegno tecnico autoprodotta	Self-produced technical drawing
	45	NTC 2018 / Eurocodice 5	Eurocode 5
20	46	Disegno tecnico autoprodotta	Self-produced technical drawing
21	46	Disegno tecnico autoprodotta	Self-produced technical drawing

22	48	Immagine tratta da “ <i>Mechanical properties of sweet chestnut sawn wood and glulam performance</i> ” redatto da Carlos Martins, Cláudio Ferreira, Sandra R. S. Monteiro, Alfredo M. P. G. Dias, 2025	Picture derived from “ <i>Mechanical properties of sweet chestnut sawn wood and glulam performance</i> ” by Carlos Martins, Cláudio Ferreira, Sandra R. S. Monteiro, Alfredo M. P. G. Dias, 2025
23	50	Fotografia autoprodotta durante il progetto di ricerca	Self-produced picture during the research project
24	52	Fotografia autoprodotta durante il progetto di ricerca	Self-produced picture during the research project
25	52	Fotografia autoprodotta durante il progetto di ricerca	Self-produced picture during the research project
26	54	Fotografia autoprodotta durante il progetto di ricerca	Self-produced picture during the research project
27	58	Fotografia autoprodotta durante il progetto di ricerca	Self-produced picture during the research project
	59	Normativa UNI EN 302-2: 2023	UNI EN 302-2: 2023 standard
28	60	Fotografia autoprodotta durante il progetto di ricerca	Self-produced picture during the research project
29	60	Disegno tecnico autoprodotta secondo indicazioni fornite dalla normativa UNI EN 302: 2023	Self-produced technical drawing according to indications provided by UNI EN 302: 2023 standard
	61	Normativa UNI EN 302-2: 2023	UNI EN 302-2: 2023 standard
30	62	Fotografia autoprodotta durante il progetto di ricerca	Self-produced picture during the research project
31	62	Fotografia autoprodotta durante il progetto di ricerca	Self-produced picture during the research project
32	64	Fotografia autoprodotta durante il progetto di ricerca	Self-produced picture during the research project
33	64	Fotografia autoprodotta durante il progetto di ricerca	Self-produced picture during the research project
34	66	Fotografia autoprodotta durante il progetto di ricerca	Self-produced picture during the research project
35	66	Fotografia autoprodotta durante il progetto di ricerca	Self-produced picture during the research project

36	68	Fotografia autoprodotta durante il progetto di ricerca	Self-produced picture during the research project
37 a / b / c	70-71- 72	Tabella autoprodotta	Self-produced table
38	74	Tabella autoprodotta	Self-produced table
39	74	Tabella autoprodotta con valori forniti da Dynea	Self-produced table with values provided by Dynea
40	76	Fotografia autoprodotta durante il progetto di ricerca	Self-produced picture during the research project
41	76	Fotografia autoprodotta durante il progetto di ricerca	Self-produced picture during the research project
42	78	Fotografia autoprodotta durante il progetto di ricerca	Self-produced picture during the research project
43	80	Immagine tratta da “ <i>La cipollatura nel legno di castagno: un problema centrale per il rilancio della castanicoltura da legno di qualità</i> ” redatto da Patrick Fonti, Fulvio Giudici e Marco Conedera, 2002	Picture derived from “ <i>Ring shake in chestnut: a main problem for the resumption of quality chestnut wood cultivation</i> ” by Patrick Fonti, Fulvio Giudici e Marco Conedera, 2002
44	80	Immagine tratta da “ <i>La struttura del legno</i> ” redatto da Luca Poli, 2016	Picture derived from “ <i>La struttura del legno</i> ” by Luca Poli, 2016
	81	“ <i>La cipollatura nel legno di castagno: un problema centrale per il rilancio della castanicoltura da legno di qualità</i> ” redatto da Patrick Fonti, Fulvio Giudici e Marco Conedera, 2002	“ <i>Ring shake in chestnut: a main problem for the resumption of quality chestnut wood cultivation</i> ” by Patrick Fonti, Fulvio Giudici e Marco Conedera, 2002
45	82	Immagine tratta da “ <i>La cipollatura nel legno di castagno: un problema centrale per il rilancio della castanicoltura da legno di qualità</i> ” redatto da Patrick Fonti, Fulvio Giudici e Marco Conedera, 2002	Picture derived from “ <i>Ring shake in chestnut: a main problem for the resumption of quality chestnut wood cultivation</i> ” by Patrick Fonti, Fulvio Giudici e Marco Conedera, 2002

