



Consiglio Nazionale delle Ricerche

Istituto per la BioEconomia

PROT. 4570 DEL 05.08.2022

**DOMANDA DI SOSTEGNO N. 5111574, FOCUS AREA 5E,
GRUPPO OPERATIVO: ATS PAULOWNIA
ACRONIMO: PAULOWNIA**

**Titolo sostegno:
*Paulownia: sostenibilità ambientale ed economica
per un nuovo sistema forestale***

Relazione finale dell'attività svolta da CNR-IBE,
Istituto per la BioEconomia.

Giugno 2022

FIRENZE

BOLOGNA

CATANIA

ROMA

SASSARI

**S.MICHELE
ALL'ADIGE**

C.F. 80054330586 – P.IVA 02118311006

PEC: protocollo.ibe@pec.cnr.it



Obiettivi della ricerca

La finalità delle indagini condotte da CNR-IBE (che ha inglobato, a partire dal 1 giugno 2019, l'Istituto IVALSA) in stretta collaborazione con tutti gli altri partner dell'ATS Paulownia, è stata quella di caratterizzare, da un punto di vista tecnologico ed in vista delle possibili trasformazioni industriali, il legname prodotto da tre piantagioni di Paulownia CLONE BIO 125, dislocate in diverse località della Regione Emilia Romagna. In particolare due sono stati i filoni principali della ricerca:

1. analisi delle caratteristiche fisico-meccaniche
2. valutazione della durabilità naturale.

In dettaglio, le prove di caratterizzazione hanno previsto la determinazione delle seguenti proprietà:

- Massa volumica (fresca, equilibrata, anidra)
- Ritiri lineari, volumetrico e stabilità dimensionale
- Modulo elastico a flessione
- Resistenza a flessione
- Resistenza a taglio
- Resistenza a compressione
- Durezza superficiale
- Durabilità naturale nei confronti dei funghi basidiomiceti.

Le prove di caratterizzazione sono state effettuate sia su legname tal quale (non trattato), sia su materiale sottoposto a trattamento termico presso il DAGRI dell'Università di Firenze; l'attività svolta da CNR-IBE pertanto è risultata fortemente integrata e condivisa con quella condotta nei laboratori di UniFI sotto la guida del prof. Giacomo Goli.

Sempre nell'ambito di questa collaborazione, presso i laboratori CNR-IBE sono state eseguite le prove di caratterizzazione della qualità dell'incollaggio di pannelli compensati realizzati con legname di paulownia e pioppo, come riportato nei risultati ricerca condotta dal prof. Goli.

Infine, per quanto riguarda il calcolo della quantità di carbonio immagazzinata nel legno, l'attività è stata inclusa nella collaborazione con DAGRI che ha fornito i dati grezzi utilizzati per le successive elaborazioni svolte da parte di LCALAB.

Nel complesso, il gruppo di lavoro che ha partecipato allo studio è risultato composto da:

Michele Brunetti (CNR-IBE)
Giovanni Aminti (CNR-IBE)
Paolo Burato (CNR-IBE)
Michela Nocetti (CNR-IBE)
Sabrina Palanti (CNR-IBE)
Federico Stefani (CNR-IBE)

Giacomo Goli (DAGRI-UniFI)
Irene Criscuoli (DAGRI-UniFI)
Pasquale Murrone (DAGRI-UniFI)

Analisi delle caratteristiche fisico-meccaniche

Materiali e metodi

Come concordato nel corso della riunione di avvio del progetto, tenutasi il 24/01/2020, è stato previsto di caratterizzare il legname del clone BIO 125 (*Paulownia elongata x fortunei*) proveniente da tre diverse piantagioni, individuate all'interno della Rete dei partecipanti al progetto. I 3 siti da cui sono state prelevate le piante sono:

- Sito A: Azienda Camorani Alviero, Roncadello di Forlì (FC);
- Sito B: Azienda S.A.R.A. Società Agricola Romagnola Arborea S.S., Fratta Terme di Bertinoro (FC);
- Sito C: Azienda Argentesi Ercole, Libolla di Ostellato (FE).

Per ciascun sito il materiale è stato prelevato da 4 piante, evitando quelle di bordo.

Le caratteristiche fisico-meccaniche e di durabilità, secondo una metodologia standardizzata, devono essere determinate su provini prismatici di piccole dimensioni, ottenuti escludendo la presenza di difetti del legno. Per questo motivo, lo schema di campionamento ha previsto di ricavare la materia prima con le seguenti modalità:

- selezionare 4 piante per ciascuna delle tre stazioni individuate, caratterizzate da buona conformazione del fusto, elevata vigoria, assenza di danni meccanici alla base;
- da ciascuna pianta, prelevare 1 toppo di circa un metro di lunghezza, nella parte basale della pianta e a partire da una distanza di 30-40 cm dal colletto (per evitare le frequenti irregolarità di sezione tipiche della parte basale degli alberi);
- i topi così ricavati sono stati trasferiti presso la sede di Sesto Fiorentino di CNR-IBE, per essere sottoposti, alle lavorazioni schematizzate di seguito.

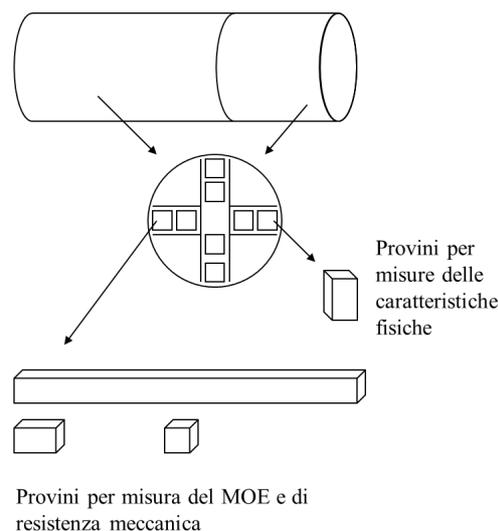


Figura 1: indicazione per la preparazione di campioni (prove fisico-meccaniche)



Il materiale è stato prelevato dalle piantagioni in data 2/10/2020.

L'elenco delle proprietà fisico-meccaniche analizzate è riportato nella seguente tabella, con il richiamo alle normative internazionali di riferimento per la metodologia di prova:

Tabella 1: proprietà fisico-meccaniche indagate e relative normative di riferimento

Proprietà	Simbolo	Dimensioni del provino (mm) (<i>b x h x l</i>)	Norma
Ritiro radiale e tangenziale	β_r / β_t	20 x 20 x 30	ISO 13061-13
Ritiro volumetrico	β_v	20 x 20 x 30	ISO 13061-14
Umidità	<i>W</i>	20 x 20 x 30	ISO 13061-1
Massa volumica	ρ	20 x 20 x 30	ISO 13061-2
Resistenza a compressione	σ_c	20 x 20 x 30	ISO 13061-17
Resistenza a taglio	τ	20 x 20 x 20	ISO 3347
Resistenza a flessione	σ_b	20 x 20 x 400	ISO 13061-3
Modulo di elasticità a flessione	<i>E</i>	20 x 20 x 400	ISO 13061-4
Durezza	<i>HB</i>	50 (longitudinale)	EN 1534

Per la metodologia ed i risultati delle prove di durabilità si veda la relazione specifica riportata in seguito.

Alcune prove di caratterizzazione sono state avviate a partire dal legno fresco (in particolare quelle della misurazione dei ritiri lineari e volumetrici), mentre per l'esecuzione delle prove meccaniche e di durabilità è stato necessario il condizionamento i campioni in una cella climatica ed il raggiungimento dell'equilibrio del legname all'umidità di riferimento, corrispondente a 20° C di temperatura e 65% di umidità relativa dell'aria. Le caratteristiche fisico-meccaniche (e di durabilità) sono state determinate sia su legno non trattato che su legno sottoposto a trattamento termico in vapore saturo (come previsto dalla sperimentazione, ovvero 3 ore e 9' a 160°C presso i laboratori del DAGRI di UniFI).

Risultati

Caratteristiche fisiche

I risultati riportati nelle tabelle seguenti (Tab 2-3-4-5-6) sono stati elaborati a partire da un campione di circa 200 provini, ricavati dalle 12 piante prelevate nelle 3 piantagioni.

Il valore medio di densità del legno all'umidità di riferimento del 12% è risultato pari a 226 kg/m³, un valore inferiore rispetto a quanto rilevato in indagini sperimentali condotte in Italia e in altri Paesi su varie specie di *Paulownia* (si veda Gridelli et al. 2002. *Paulownia tomentosa. Caratteristiche tecnologiche del legname proveniente da una piantagione dell'Italia settentrionale. Proprietà fisico-meccaniche*. Sherwood 74:37-40).

Il ritiro volumetrico totale ed il coefficiente di nervosità (calcolato come rapporto tra il ritiro in direzione tangenziale e ritiro in direzione radiale) sono risultati invece superiori rispetto a quanto riportato in bibliografia; complessivamente pertanto il legname analizzato sembrerebbe essere un po' meno stabile



rispetto a quanto osservato per altre piantagioni in Italia. Questo aspetto potrebbe anche essere dovuto alla giovane età delle piante che sono state analizzate, che comporta una elevata presenza di legno giovanile nei primi anni di crescita (il legno giovanile infatti presenta caratteristiche tecnologiche qualitativamente inferiori rispetto al legno maturo).

Dall'analisi dei dati non si osservano differenze sostanziali tra il legname proveniente dalle 3 piantagioni. Si notano due differenze: una riguarda il valore di umidità del legno allo stato fresco, più bassa per la piantagione C; l'altra riguarda il coefficiente di nervosità del legno (rapporto fra il coefficiente di ritiro tangenziale e quello radiale) che risulta essere più alto nel caso del legname ricavato dalla stazione A.

Tabella 2: Principali caratteristiche fisiche del legno di Paulownia CLONE BIO 125. Umidità allo stato fresco (U_f), umidità normale ottenuta in desorbimento ($U_{12\ des}$), umidità normale ottenuta in adsorbimento ($U_{12\ ads}$), massa volumica allo stato fresco (ρ_f), massa volumica allo stato anidro (ρ_0), densità basale (ρ_b) calcolata come rapporto tra la massa anidra e il volume fresco, densità alle condizioni normali in desorbimento ($\rho_{12\ des}$), densità alle condizioni normali in adsorbimento ($\rho_{12\ ads}$).

	U_f	$U_{12\ des}$	$U_{12\ ads}$	ρ_f	ρ_0	ρ_b	$\rho_{12\ des}$	$\rho_{12\ ads}$
	(%)	(%)	(%)	(kg/m^3)				
Media	190,1	10,3	8,6	549	212	192	226	220
SD	47,3	0,4	0,4	84	35	29	35	36

Tabella 3: Legno di Paulownia CLONE BIO 125, principali caratteristiche fisiche. Coefficiente di ritiro longitudinale (β_l), coefficiente di ritiro radiale (β_r), coefficiente di ritiro tangenziale (β_t), coefficiente di ritiro volumetrico (β_v) e nervosità.

	β_l	β_r	β_t	β_v	nervosità
	(%)	(%)	(%)	(%)	(-)
Media	0,4	2,0	7,0	9,3	4,2
SD	0,3	1,0	1,8	2,2	2,1

Tabella 4: Legno di Paulownia CLONE BIO 125, principali caratteristiche fisiche. Umidità allo stato fresco (U_f) e all'equilibrio in desorbimento ($U_{12\ des}$) ed assorbimento ($U_{12\ ads}$), suddivise per piantagione.

Sito	U_f (%)		$U_{12\ des}$ (%)		$U_{12\ ads}$ (%)	
	media	Dev.st	media	Dev.st	media	Dev.st
A	220,5	42,1	10,5	0,3	9,0	0,3
B	194,0	24,2	10,5	0,2	8,7	0,4
C	158,0	48,7	9,9	0,2	8,2	0,3
tutti	190,1	47,3	10,3	0,4	8,6	0,4

Tabella 5: Legno di Paulownia CLONE BIO 125, principali caratteristiche fisiche. massa volumica allo stato fresco (ρ_f), massa volumica allo stato anidro (ρ_0), densità basale (ρ_b), densità alle condizioni normali in desorbimento ($\rho_{12\ des}$) e in adsorbimento ($\rho_{12\ ads}$), suddivise per piantagione.

Sito	ρ_f (kg/m^3)		ρ_0 (kg/m^3)		ρ_b (kg/m^3)		$\rho_{12\ des}$ (kg/m^3)		$\rho_{12\ ads}$ (kg/m^3)	
	media	Dev.st	media	Dev.st	media	Dev.st	media	Dev.st	media	Dev.st
A	587	63	206	36	186	30	217	29	215	38



B	558	50	211	23	190	17	226	20	220	24
C	506	105	218	41	198	36	234	45	225	43
tutti	549	84	212	35	192	29	226	35	220	36

Tabella 6: Legno di Paulownia CLONE BIO 125, principali caratteristiche fisiche. Coefficiente di ritiro longitudinale (β_l), coefficiente di ritiro radiale (β_r), coefficiente di ritiro tangenziale (β_t), coefficiente di ritiro volumetrico (β_v) e nervosità, suddivisi per piantagione.

Sito	β_l (%)		β_r (%)		β_t (%)		β_v (%)		Nervosità (-)	
	media	Dev.st								
A	0,2	0,3	1,6	0,8	7,8	2,5	9,4	2,9	5,9	2,7
B	0,5	0,2	2,3	1,0	7,1	1,6	9,6	2,2	3,5	1,1
C	0,5	0,3	2,1	0,9	6,4	0,9	8,8	1,4	3,5	1,2
tutti	0,4	0,3	2,0	1,0	7,0	1,8	9,3	2,2	4,2	2,1

Caratteristiche meccaniche

Le proprietà meccaniche sono state rilevate su campioni di legname di piccole dimensioni e netti da difetti, come previsto dalle normative internazionali di riferimento (vedi tabella 1); i provini, a sezione quadrata e di lunghezza variabile in relazione alla tipologia di prova, sono stati ricavati previa condizionamento a 20° C di temperatura e 65% di umidità relativa. Per ciascuna caratteristica meccanica sono stati valutati 113 campioni di legno non trattato e 96 campioni di legno trattato termicamente.

Nelle tabelle che seguono (Tab. 7–8) sono riportati i valori medi e la deviazione standard delle caratteristiche ottenuti sperimentalmente.

Tabelle 7 e 8: Legno di Paulownia CLONE BIO 125, principali caratteristiche fisiche e meccaniche calcolate su provini netti da difetti, non trattati e trattati termicamente. Le differenze tra legno trattato e non trattato sono sempre statisticamente significative tranne che per resistenza a compressione e modulo elastico.

Legno non trattato

Sito	Compressione (MPa)		Taglio (MPa)		Res flessione (MPa)		Modulo elastico flessione (MPa)		Durezza (kg/mm ²)	
	media	Dev.st	media	Dev.st	media	Dev.st	media	Dev.st	media	Dev.st
A	19,1	3,3	5,7	3,0	31,1	6,8	3166	680	0,6	0,3
B	20,7	3,2	5,4	3,3	33,1	5,5	3443	538	0,6	0,3
C	19,8	3,5	4,7	1,6	30,6	7,7	3253	790	0,7	0,5
tutti	19,8	3,4	5,3	2,7	31,5	6,8	3287	684	0,7	0,3

Legno termotrattato

Sito	Compressione (MPa)		Taglio (MPa)		Res flessione (MPa)		Modulo elastico flessione (MPa)		Durezza (kg/mm ²)	
	media	Dev.st	media	Dev.st	media	Dev.st	media	Dev.st	media	Dev.st
A	18,0	3,8	3,1	0,9	22,6	6,9	2955	558	0,5	0,2
B	20,4	3,5	3,7	1,2	23,6	9,9	3390	816	0,4	0,1
C	19,9	4,8	3,2	1,1	19,6	10,6	3330	871	0,5	0,3
tutti	19,4	4,2	3,3	1,1	21,8	9,3	3219	776	0,5	0,2



Sempre facendo riferimento a precedenti studi condotti sul legname di Paulownia in Italia (Gridelli et al. – 2002), anche per le proprietà meccaniche indagate si può rilevare che i valori riscontrati nel corso di questa indagine sono sensibilmente inferiori rispetto a quanto riportato in bibliografia; il risultato non deve sorprendere in quanto tutte le proprietà di rigidità e resistenza sono generalmente direttamente correlate al valore di densità del legname (che abbiamo visto essere più basso, nel caso studiato), almeno nel caso dei campioni di legno netto (privo di difetti).

Con l'applicazione del trattamento termico, per la maggior parte delle proprietà analizzate si verifica una riduzione compresa tra il 28 % ed il 40 % rispetto al legno non trattato; fanno eccezione la resistenza a compressione e il valore del modulo di elasticità (indice della rigidità del materiale), che rimangono praticamente inalterati.

In sintesi si può affermare che le proprietà fisico-meccaniche del legname di Paulownia CLONE BIO 125 analizzato presentano, in generale, dei valori sensibilmente più bassi rispetto a quelli di materiale ricavato da altre piantagioni italiane o di altri Paesi, come riportato nella bibliografia scientifica.

L'applicazione del trattamento termico non comporta un miglioramento delle proprietà fisico-meccaniche del legname, che eventualmente può quindi essere preso in considerazione solo a fini estetici o di riduzione dell'igroscopicità del materiale.

Dall'analisi dei dati non si osservano differenze sostanziali tra il legname proveniente dalle 3 piantagioni.



Prove di resistenza biologica (Dr.ssa Sabrina Palanti)

I campioni di Paulownia CLONE BIO 125 utilizzati per la determinazione della durabilità naturale (con o senza trattamento termico) sono stati ricavati con la stessa modalità dei precedenti, scartando però la parte esterna, supponendo che, sulla base della colorazione più chiara, si trattasse di alburno.

I provini per la durabilità naturale e la valutazione del trattamento termico sono di dimensioni 50 mm x 25 mm x 15 mm.

I provini per il controllo dell'attività dei funghi (virulenza), delle stesse dimensioni di quelli usati per il test, sono di faggio (*Fagus sylvatica*); nel test della valutazione del trattamento termico, sono stati utilizzati provini di *Pinus sylvestris*, in numero di 10 per specie di fungo.

Per la determinazione della durabilità naturale sono stati utilizzati 30 provini, per la determinazione della massa anidra teorica iniziale sono stati utilizzati 10 provini per sito. Nel test della durabilità naturale, per la determinazione della virulenza, sono stati utilizzati 10 provini di faggio per specie di fungo.

Per la determinazione della durabilità acquisita dal trattamento termico sono stati utilizzati 30 provini per fungo.

Test biologico per la valutazione della durabilità naturale della resistenza biologica del legno sottoposto a trattamento termico.

CEN EN 113-2: 2020 Durabilità del legno e dei prodotti a base legno- Metodo di test contro i funghi basidiomiceti del legno - Parte 2 Valutazione della durabilità intrinseca o indotta.

Funghi utilizzati

I funghi utilizzati e le minime perdite di massa per la validità del test sono stati:

1. *Coniophora puteana* (Schumacher ex Fries) Karsten (BAM Ebw. 15). Minima perdita di massa dopo 16 settimane: 20%
2. *Trametes versicolor* (L.) Lloyd (CTB 863A). minima perdita di massa dopo 16 settimane : 20%
3. *Rhodonia placenta*(Fr.) Niemela , K.H. Larss, and Schigel (FPRL 280). Minima perdita di massa: 20%.

Trattamento Termico (effettuato presso DAGRI)

Il materiale trattato termicamente, equilibrato a umidità ambiente, è stato trattato in autoclave, in ambiente di vapore saturo a 160°C e una pressione di 6,18 bar assoluti (corrispondenti alla pressione di vapore saturo dell'H₂O a 160°C). Il ciclo prevedeva un preriscaldamento dell'autoclave a 100°C.

Una volta inserito al suo interno il materiale è stata fatta una rampa lineare di riscaldamento da 100°C fino a 160°C in 64 minuti. Una volta raggiunta la temperatura (160°C) il materiale è stato trattato per 3 ore e 9 minuti primi a 160°C. E' stato osservato, mediante prove preliminari che tale trattamento termico determina una perdita di massa anidra del 10%. Dopo le tre ore di trattamento



Una volta trascorso il tempo di trattamento l'autoclave è stata aperta, il vapore scaricato in pochi minuti. I provini sono stati equilibrati nuovamente in condizioni normali.

Risultati del test per la valutazione della durabilità naturale

La valutazione della durabilità naturale si basa sulla determinazione della mediana della massa persa dei provini esposti ad ogni fungo utilizzato.

La durata del test è di 16 settimane di incubazione dei provini di Paulownia CLONE BIO 125 con i funghi del test in ambiente condizionato T 20 ± 2 R.H. (Relative Humidity o umidità ambientale) 70 ± 5 %.

Dopo le 16 settimane si effettua la rimozione dei provini, la pulitura dal micelio che è eventualmente cresciuto sopra, si pesano e poi si essicano a 103° C per 24 ore, determinando alla fine il peso anidro.

Devono essere esclusi i provini completamente imbibiti di acqua e quelli che presentano contaminazioni.

Escludendo tali provini la mediana dovrebbe essere ottenuta su almeno 20 provini.

Almeno una combinazione di fungo e specie legnosa di riferimento (faggio per le latifoglie, pino per le conifere e le modificazioni chimiche) dovrebbe avere una mediana della massa persa del 30%.

La classe di durabilità è assegnata in base a questa tabella, esposta di quesito e ricavata dalla norma CEN EN 350:2016 Durabilità del legno dei prodotti a base di legno. Determinazione e classificazione della durabilità agli agenti biologici del legno e dei prodotti a base legno.

Tabella 1: tabella tratta dalla norma EN 350:2016.

Table 5 — Durability classes (DC) of wood to fungal attack (basidiomycete fungi)

Durability class	Description	Percentage mass loss (ML)
DC 1	Very durable	ML ≤ 5
DC 2	Durable	5 < ML ≤ 10
DC 3	Moderately durable	10 < ML ≤ 15
DC 4	Slightly durable	15 < ML ≤ 30
DC 5	Not durable	30 < ML

ML = highest of the median mass losses (in %) determined for test specimens exposed to each of the used test fungi

I risultati della durabilità naturale e del trattamento termico sono riportati in tabella 2.



Tabella 2: Risultati finali

Durabilità naturale	Mediana	N	DC
<i>C. puteana</i>	52,4	16	5
<i>R. placenta</i>	27,9	17	4
<i>T. versicolor</i>	32,1	30	5
Resistenza trattamento termico	Mediana	N	DC
<i>C. puteana</i>	46,8	30	5
<i>R. placenta</i>	46,02	14	5
<i>T. versicolor</i>	26,27	30	4
Controlli su faggio	Mediana	N	DC
<i>C. puteana</i>	40,14	10	5
<i>R. placenta</i>	19,23	10	4
<i>T. versicolor</i>	26,15	10	4
Virulenza su pino			
<i>C. puteana</i>	42,35	4	5
<i>R. placenta</i>	42,58	4	5
<i>T. versicolor</i>	24,40	10	4

Conclusioni

Il legno di Paulownia CLONE BIO 125 analizzato in questo progetto non è durabile e il trattamento termico, effettuato come descritto sopra, non porta nessun incremento di durabilità.

Tale Paulownia CLONE BIO 125 risulta avere una durabilità naturale di classe 4-5 poco durabile, non durabile in accordo alla CEN EN 350:2016.

Quando tale legno è sottoposto al trattamento termico descritto sopra non si è osservato nessun incremento della sua durabilità, si ha infatti di nuovo durabilità naturale di classe 4-5 poco durabile, non durabile in accordo alla CEN EN 350:2016.