

Comparative Experimental Evaluation of the Mechanical Properties of Tornillo and Eucalyptus Wood in Dry, Wet, and Natural States.

Marian Victoria Alva Leyva, Est. ¹; Kevin Adrián Valiente Velarde, Est. ²

Jhenifer Thajana Carhuanambo Villanueva ³

¹Universidad Privada del Norte (UPN), Cajamarca - Perú, N00379883@upn.pe

²Universidad Privada del Norte (UPN), Cajamarca - Perú, N00406904@upn.pe

³Universidad Privada del Norte (UPN), Cajamarca - Perú, jhenifer.carhuanambo@upn.pe

Abstract– Wood is widely used in civil engineering due to its renewable nature, favorable strength-to-weight ratio, and structural versatility. This study experimentally evaluates the physical and mechanical behavior of *Cedrelina cateniformis* (Tornillo) and *Eucalyptus globulus* under dry, natural, and wet moisture conditions to determine their suitability for structural and formwork applications.

The experimental program included density, water absorption, dimensional variation, Poisson's ratio, compressive strength, and flexural behavior based on standardized tests. Results show that *Eucalyptus* presents higher density (737.47 kg/m³) than *Tornillo* (493.34 kg/m³), which is directly associated with its superior mechanical performance.

In flexural tests, dry *Eucalyptus* reached 134.98 MPa with a modulus of elasticity of 12,745.35 MPa, while *Tornillo* reached 62.66 MPa and 5,902.13 MPa, respectively. In axial compression, *Eucalyptus* achieved 948.12 kgf/cm² under dry conditions, exceeding *Tornillo* (476.26 kgf/cm²). Conversely, *Tornillo* exhibited higher water absorption capacity (16.33%) compared to *Eucalyptus* (8.75%). Both species showed significant reductions in mechanical performance under wet conditions, confirming the strong influence of moisture content.

Dimensional changes during drying were similar for both species, with contractions close to 2.8%. The results indicate that *Eucalyptus* is more suitable for structural applications requiring higher mechanical resistance, while *Tornillo* is appropriate for less demanding uses. Moisture content is identified as the dominant factor affecting the mechanical behavior of both species and must be considered in timber selection for construction engineering.

Keywords– Wood; Mechanical properties; Moisture content; *Eucalyptus globulus*; *Cedrelina cateniformis*.

I. INTRODUCCIÓN

La madera ha recuperado relevancia en la ingeniería y construcción contemporánea debido a su carácter renovable, baja huella de carbono y favorable relación resistencia–peso frente a materiales convencionales. En este contexto, su aplicación en elementos estructurales requiere una adecuada comprensión de sus propiedades físico-mecánicas y su comportamiento frente a condiciones ambientales variables, tal como lo señalan en [1], [2] y [7].

El desempeño estructural de la madera está condicionado por su densidad, contenido de humedad y anisotropía. En este sentido, [1] establece que la densidad influye en la capacidad resistente del material debido a su relación con la compactación

celular. Asimismo, según [13], el incremento del contenido de humedad genera una disminución significativa en la rigidez y resistencia de la madera; seguidamente, [19] indica que estas variaciones higroscópicas producen cambios en la estabilidad dimensional, manifestándose en procesos de hinchamiento y contracción.

En el contexto latinoamericano, especies como el Tornillo (*Cedrelina cateniformis*) y el Eucalipto (*Eucalyptus globulus*) presentan amplio potencial en la construcción civil, [17] nos comenta sobre su aplicación en encofrados. En relación con ello, [20] realizó una comparación de propiedades físico-mecánicas en distintas especies maderables, concluyendo que el Eucalipto presenta mayor resistencia y rigidez en comparación con el Tornillo. Por otro lado, [12] caracterizó el comportamiento del Tornillo, evidenciando una mayor capacidad de absorción de humedad; seguidamente, [18] confirmó esta tendencia al reportar una alta susceptibilidad de esta especie a la variación dimensional. Por lo tanto, se infiere que el Tornillo presenta un desempeño más sensible frente a condiciones ambientales adversas.

Adicionalmente, [14] analizó el comportamiento higroscópico del eucalipto durante el secado, determinando que las mayores deformaciones ocurren en direcciones transversales, lo que evidencia su naturaleza anisotrópica. Además, según [10], el coeficiente de Poisson en materiales ortotrópicos como la madera varía en función del contenido de humedad y la dirección de carga. Por lo tanto, resulta necesario evaluar conjuntamente las propiedades mecánicas y deformaciones para una adecuada caracterización estructural.

A pesar de los avances reportados, aún existe limitada información experimental comparativa que evalúe de manera integral el comportamiento del Tornillo y del Eucalipto bajo distintas condiciones de humedad, considerando simultáneamente propiedades físicas, mecánicas y deformaciones. Esta brecha limita la selección técnica adecuada de especies para aplicaciones estructurales.

En función de lo expuesto, se plantea la siguiente pregunta de investigación: ¿Cómo influye el contenido de humedad en las propiedades físico-mecánicas del Tornillo y del Eucalipto en condiciones seca, natural y húmeda?

Por lo tanto, el objetivo de la presente investigación es comparar experimentalmente las propiedades físico-mecánicas

de ambas especies mediante ensayos normalizados, evaluando estabilidad dimensional, absorción de humedad, densidad, resistencia a flexión, resistencia a compresión y coeficiente de Poisson.

En ese sentido, se plantea como hipótesis que el Eucalipto presenta un mejor desempeño físico-mecánico que el Tornillo en términos de resistencia y rigidez en las condiciones evaluadas. Asimismo, se establece que las propiedades mecánicas de ambas especies se incrementan en estado seco y disminuyen en estado húmedo respecto a la condición natural, evidenciando la influencia directa del contenido de humedad en su comportamiento estructural.

II. MATERIALES Y MÉTODOS

A. Especies seleccionadas

Para esta investigación se seleccionaron dos especies de madera utilizadas en el ámbito constructivo: Tornillo (*Cedrelinga catenaeformis*) y Eucalipto (*Eucalyptus globulus*). Se demostró que las propiedades físicas y mecánicas varían según el estado en el que se encuentra, siendo los tres estados estudiados húmedo, seco y natural.

B. Variación dimensional

Es el cambio de sus dimensiones físicas debido a distintos factores. Estos cambios son más notorios en las direcciones tangencial y radial, lo que puede afectar su desempeño estructural según [7], [8].

Cálculo del porcentaje de cambio dimensional entre dos estados de humedad:

$$\Delta D\% = ((D_{\text{húmedo}} - D_{\text{seco}})/D_{\text{húmedo}}) \times 100 \quad (1)$$

Fuente: [5]

Donde:

- $D_{\text{húmedo}}$ = Dimensión de la muestra en estado húmedo (cm)
- D_{seco} = Dimensión en estado seco (cm)
- $\Delta D\%$ = Variación dimensional (%)

C. Contenido de humedad (CH)

El contenido de humedad (CH) es el porcentaje de agua contenido. Según la norma [4] podemos clasificar la madera según el porcentaje de humedad obtenido siendo:

- Estado húmedo: Contenido de humedad mayor al punto de saturación de fibras (> 30%).
- Estado natural: Contenido de humedad entre 12% y 20% (depende del clima del entorno).
- Estado seco: contenido de humedad menor al 12%.

Cálculo del contenido de humedad y grado de absorción:

$$CH = (P_{\text{húmedo}} - P_{\text{seco}})/P_{\text{seco}} \times 100\% \quad (2)$$

Fuente: [5]

Donde:

- $P_{\text{húmedo}}$ = Peso de la muestra en estado natural (g)
- P_{seco} = Peso de la muestra seca al horno (g)

TABLA I
VALORES PROMEDIO DE EQUILIBRIO HIGROSCÓPICO POR ESPECIE

Especie	Contenido de humedad de equilibrio (%)
Tornillo	10 – 12%
Eucalipto	9 – 11%

Fuente: [14]

D. Densidad básica (DB)

Es la relación entre la masa seca al horno y el volumen de la madera en estado verde. Las maderas con mayor densidad básica suelen presentar mejores propiedades mecánicas, mayor rigidez y, en muchos casos, mejor desempeño estructural y durabilidad [16].

Cálculo de densidad básica:

$$DB = P_{\text{seco}}/V_{\text{verde}} \quad (3)$$

Fuente: [5]

Donde:

- V_{verde} = Volumen de la muestra en estado verde (cm³)
- P_{seco} = Peso de la muestra seca al horno (g)

TABLA II
RANGOS DE DENSIDAD PARA MADERAS UTILIZADAS EN CONSTRUCCIÓN.

Especie	Densidad básica (kg/m ³)	Densidad al 12% de humedad (kg/m ³)
Tornillo	480 – 550	530 – 600
Eucalipto	550 – 700	600 – 750

Fuente: [12], [14]

E. Resistencia a la flexión

Con este ensayo se obtiene el módulo de elasticidad (E) y el módulo de rotura (σ). Según [6] este ensayo se realiza mediante flexión en tres puntos sobre una probeta estandarizada [3]. Se emplea para determinar el comportamiento mecánico de la madera estructural, reportando valores de MOR y MOE en especies como *Eucalyptus globulus* [15].

F. Módulo de rotura (σ)

Cálculo del módulo de rotura:

$$\sigma = 3PL/2bh^2 \quad (4)$$

Fuente: [6]

Donde:

- P = Carga máxima aplicada (kgf)
- L = Luz entre apoyos (cm)
- b = Ancho de la muestra (cm)
- h = Altura de la muestra (cm)

G. Módulo de elasticidad (E)

Se calcula a partir de la pendiente de la curva carga-deflexión en el tramo elástico:

$$E = L^3m/4bh^3 \quad (5)$$

$$E = L^3P/4bh^3\delta \quad (6)$$

$$m = P/\delta \quad (7)$$

Fuente: [6]

Donde:

- P = Carga aplicada dentro del rango elástico (kgf)
- m = Pendiente de la curva carga-deflexión dentro

del rango elástico ($\frac{kgf}{cm}$)

- L = Luz entre apoyos (cm)
- b = Ancho de la muestra (cm)
- h = Altura de la muestra (cm)
- δ = Deflexión correspondiente a la carga P (cm)

H. Resistencia a la compresión

La resistencia a la compresión mide la capacidad para soportar cargas aplicadas en dirección axial. Según la norma [6], la resistencia a la compresión paralela a las fibras se determina aplicando una carga axial hasta la falla, registrando la máxima carga resistida por la muestra y la deformación.

Cálculo de resistencia a la compresión:

$$\sigma_c = P_{M\acute{a}x}/A \quad (8)$$

Fuente: [6]

Donde:

- σ_c = Resistencia a la compresión ($\frac{kgf}{cm^2}$)
- $P_{M\acute{a}x}$ = Carga máxima aplicada antes de la falla (kgf)
- A = Área de la sección transversal de la muestra (cm²)

La resistencia a compresión de la madera depende de factores como la orientación de las fibras, la densidad, el contenido de humedad y el tipo de carga aplicada, debido a su comportamiento anisotrópico. Estas variables influyen directamente en la capacidad resistente y en la rigidez del material bajo esfuerzos mecánicos [13].

I. Coeficiente de Poisson

Describe la relación entre la deformación transversal y longitudinal producida por una carga axial dentro del rango elástico. En materiales ortotrópicos como la madera, este parámetro depende de la dirección de carga y resulta fundamental para el análisis estructural y la modelación mecánica [10].

La deformación unitaria longitudinal (ϵL):

$$\epsilon L = (L' - L)/L. \quad (9)$$

Fuente: [5]

Donde:

- L = Longitud inicial (cm)
- L' = Longitud final tras aplicar la carga (cm)

La deformación unitaria transversal (ϵT):

$$\epsilon T = (D' - D)/D. \quad (10)$$

Fuente: [5]

Donde:

- D = Diámetro transversal inicial (cm)
- D' = Diámetro transversal después de la carga (cm)

Por lo tanto, el coeficiente de Poisson se calcula mediante la siguiente fórmula:

$$V = -\epsilon T / \epsilon L \quad (11)$$

Donde:

- ϵT = Deformación unitaria transversal
- ϵL = Deformación unitaria longitudinal

Fuente: [5]

Especie (Nombre científico)	Resistencia a la flexión (MPa)	Módulo de elasticidad en flexión (GPa)
Cedrelinga catenaeformis (Tornillo)	52.4	9.5
Eucalyptus globulus (Eucalipto)	85.6	22.0

Fuente: [9]

J. Población y muestra

La población del presente estudio son las especies Tornillo (Cedrelinga catenaeformis) y Eucalipto (Eucalyptus globulus), empleadas en la construcción peruana. Las muestras fueron obtenidas de proveedores locales y acondicionadas durante 30 días en un ambiente controlado (20 °C y 65 % de humedad relativa) según [5].

La muestra fue un total de 36 probetas de madera. Obteniendo 18 muestras de Tornillo (6 secas, 6 naturales y 6 húmedas) y 18 muestras de Eucalipto (6 secas, 6 naturales y 6 húmedas). De estas, 18 correspondieron a muestras de tamaño mayor y las otras 18 más pequeñas.

III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

1) Variación dimensional

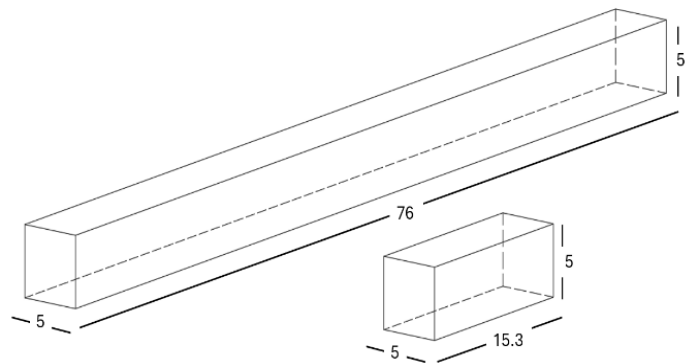


Fig. 1 Medidas de los ensayos, en centímetros.

TABLA IV
PRIMERAS MEDICIONES PROMEDIO DE MADERA DE EUCALIPTO

Muestra	Prom Alto	Prom Ancho	Prom Largo
TN 1	5.052	5.046	15.283
TN 2	5.054	5.044	15.353
TN 3	5.069	5.070	15.358
TH 1	5.069	5.079	15.343
TH 2	5.065	5.074	15.355
TH 3	5.069	5.065	15.387
TS1	5.066	5.078	15.368
TS2	5.281	5.071	15.350
TS3	5.073	5.064	15.370

TABLA V
PRIMERAS MEDICIONES PROMEDIO DE MADERA TORNILLO

Muestra	Prom Alto	Prom Ancho	Prom Largo
EN1	4.942	5.007	15.238
EN2	5.048	5.033	15.357
EN3	5.041	5.050	15.373
EH1	5.040	4.997	15.378
EH2	5.050	5.045	15.397
EH3	5.049	5.036	15.380
ES1	5.048	5.041	15.523
ES2	5.046	5.039	15.453
ES3	5.039	5.038	15.363

En las tablas IV y V se presentan las primeras mediciones promedio de las dimensiones de la madera de Eucalipto y Tornillo, tomadas antes de ser sometidas a los ensayos. Estos datos permiten establecer una base comparativa para evaluar la variación dimensional que experimenta la madera durante y después de los ensayos.

TABLA VI
MEDIDAS FINALES DE MUESTRAS SATURADAS

Muestra	Prom Alto (cm)	Prom Ancho (cm)	Prom Largo (cm)
TH1	5.183	5.192	15.329
TH2	5.218	5.224	15.331
TH3	5.196	5.232	15.331
EH1	5.128	5.14	15.333
EH2	5.148	5.199	15.356
EH3	5.144	5.203	15.278

TABLA VII
MEDIDAS FINALES DE MUESTRAS SECAS

Muestra	Prom Alto (cm)	Prom Ancho (cm)	Prom Largo (cm)
TS1	4.957	4.92	15.33
TS2	4.964	4.961	15.323
TS3	4.981	4.975	15.335
ES1	4.916	4.864	15.335
ES2	4.917	4.888	15.336
ES3	4.908	4.896	15.329

En las tablas VI y VII se presentan las medidas finales de las muestras de madera en condiciones de saturación y secado completo, considerando sus dimensiones en altura, ancho y longitud. Estos datos permiten analizar las variaciones dimensionales ocurridas tras los procesos de saturación y secado, en comparación con las dimensiones iniciales registradas.

TABLA VIII
DIFERENCIA PORCENTUAL ENTRE DIMENSIÓN INICIAL Y HÚMEDA

Muestra	Prom Alto	Prom Ancho	Δ% Alto	Δ% ancho
TH1	5.183	5.192	2.24%	2.23%
TH2	5.218	5.224	3.02%	2.96%
TH3	5.196	5.232	2.50%	3.30%
EH1	5.128	5.14	1.75%	2.86%
EH2	5.148	5.199	1.93%	3.07%
EH3	5.144	5.203	1.88%	3.32%

La tabla VII presenta la variación porcentual entre las dimensiones iniciales y las medidas en estado húmedo, permitiendo cuantificar los cambios dimensionales generados por la absorción de humedad.

TABLA IX
DIFERENCIA PORCENTUAL ENTRE DIMENSIÓN INICIAL Y SECA

Muestra	Prom Alto	Prom Ancho	Δ% Alto	Δ% ancho
TS1	4.957	4.92	-2.16%	-3.10%
TS2	4.964	4.961	-6.01%	-2.17%
TS3	4.981	4.975	-1.81%	-1.75%
ES1	4.916	4.864	-2.62%	-3.50%
ES2	4.917	4.888	-2.56%	-3.00%
ES3	4.908	4.896	-2.60%	-2.82%

La tabla IX presenta la variación porcentual entre las dimensiones iniciales y las dimensiones en estado seco evidenciando la contracción de la madera como resultado del proceso de secado.

TABLA X
PORCENTAJE DE VARIACIÓN DIMENSIONAL

Muestra	Prom variación alto	Prom variación ancho
TS	-3.33%	-2.34%
ES	-2.59%	-3.11%
TH	2.59%	2.83%
EH	1.85%	3.08%

La tabla X presenta la variación porcentual dimensional de las maderas Tornillo y Eucalipto en estado seco y húmedo, permitiendo comparar el comportamiento de ambas especies frente a los procesos de pérdida y absorción de humedad.

2) Contenido de humedad

TABLA XI
PESOS DE MUESTRAS 5X5X5X13.5CM, TORNILLO Y EUCALIPTO

Muestra	Peso inicial(g)	Peso final(g)	ΔPeso (g)
T.H.1	203.11	235.900	32.790
T.H.2	203.65	236.200	32.550
T.H.3	190.67	222.800	32.130
T.N.1	183.18	183.700	0.520
T.N.2	186.93	187.300	0.370
T.N.3	191.09	191.500	0.410
T.S.1	186.96	166.500	-20.460
T.S.2	202.93	180.500	-22.430
T.S.3	202.67	180.300	-22.370
E.N.1	270.24	270.200	-0.040
E.N.2	270.52	270.500	-0.020
E.N.3	266.55	266.500	-0.050
E.S.1	309.94	274.500	-35.440
E.S.2	308.32	272.600	-35.720
E.S.3	274.06	242.700	-31.360
E.H.1	264.14	287.800	23.660
E.H.2	299.55	326.300	26.750
E.H.3	313.58	339.800	26.220

La tabla XI presenta los pesos iniciales y finales de las muestras pequeñas de Tornillo y Eucalipto, así como su coeficiente de variación. Esta información permite analizar la estabilidad del peso en función del contenido de humedad y evaluar la uniformidad del comportamiento de las muestras ensayadas.

TABLA XII
CONTENIDO DE HUMEDAD DE LAS MUESTRAS

Muestra	Contenido de humedad
T.H.1	16.14%
T.H.2	15.98%
T.H.3	16.85%
T.N.1	0.28%
T.N.2	0.20%
T.N.3	0.21%
T.S.1	-10.94%
T.S.2	-11.05%
T.S.3	-11.04%
E.N.1	-0.01%
E.N.2	-0.01%
E.N.3	-0.02%
E.S.1	-11.43%
E.S.2	-11.59%
E.S.3	-11.44%
E.H.1	8.96%
E.H.2	8.93%
E.H.3	8.36%

La tabla XII presenta el contenido de humedad de todas las muestras analizadas de Tornillo y Eucalipto, permitiendo evaluar el estado higroscópico de la madera y su influencia en su comportamiento físico-mecánico.

3) Densidad básica

TABLA XIII
DENSIDADES BÁSICAS DE LAS MUESTRAS

Muestra	Volumen verde (cm ³)	Peso inicial (g)	Densidad (kg/m ³)
TN 1	388.283	203.11	523.098
TN 2	390.144	203.65	521.987
TN 3	393.447	190.67	484.614
TH 1	393.734	183.18	465.238
TH 2	393.310	186.93	475.274
TH 3	393.761	191.09	485.294
TS1	394.092	186.96	474.407
TS2	409.786	202.93	495.210
TS3	393.540	202.67	514.992
EN1	375.846	270.24	719.018
EN2	388.890	270.52	695.621
EN3	390.113	267.33	685.264
EH1	386.094	309.94	802.759
EH2	390.991	308.32	788.561
EH3	389.792	274.06	703.092
ES1	393.749	264.14	670.833
ES2	390.259	298.75	765.517
ES3	388.777	313.58	806.580

La tabla XII presenta los valores del volumen verde y el peso inicial de cada muestra, necesarios para el cálculo de la densidad básica de la madera.

TABLA XIV
DENSIDAD PROMEDIO DE LAS MUESTRAS

Muestra	Densidad (kg/m ³)		
	Mínima	Máxima	Promedio
Tornillo	465.238	523.098	493.346
Eucalipto	670.833	806.580	737.471

La tabla XIV presenta la densidad básica promedio de las muestras, incluyendo los valores máximos y mínimos.

4) Resistencia a la flexión

TABLA XV
DATOS ENSAYO A FLEXIÓN DE LAS MUESTRAS

Muestra	Base (mm)	Alto (mm)	Carga final (N)
EN1F	50.34	50.53	21660.48
EN2F	50.86	51.02	23563.62
EN3F	51.42	50.66	16706.43
EH1F	51.14	51.07	19992.78
EH2F	50.84	50.85	22239.27
EH3F	51.43	50.98	22219.65
ES1F	49.23	50.12	24887.97
ES2F	49.03	49.67	15558.66
ES3F	49.5	49.75	23279.13
TN1F	50.77	50.68	14665.95
TN2F	50.71	50.57	14391.27
TN3F	50.64	50.82	14793.48
TH1F	53.24	53.18	12007.44
TH2F	51.75	52.22	7779.33
TH3F	51.5	51.27	8152.11
TS1F	49.16	49.07	10938.15
TS2F	49.08	49.18	9643.23
TS3F	48.86	49.34	11458.08

La tabla XV presenta los datos obtenidos del ensayo de flexión, incluyendo las dimensiones de la base y la altura, así como la carga final aplicada.

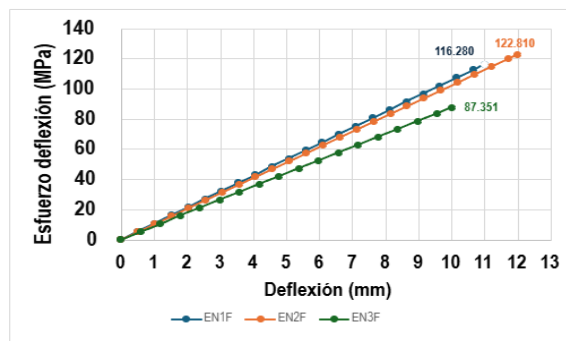


Fig. 2 Curva esfuerzo deflexión vs deflexión de muestras en estado natural del Eucalipto

La figura 2 presenta la relación entre el esfuerzo de flexión y la deflexión hasta la falla de las muestras de eucalipto en estado natural.

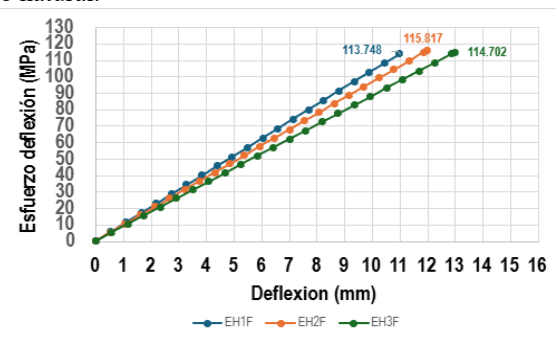


Fig. 3 Curva esfuerzo deflexión vs deflexión de muestras en estado húmedo del Eucalipto

La figura 3 presenta la relación entre el esfuerzo de flexión y la deflexión hasta la falla de las muestras de eucalipto en estado húmedo.

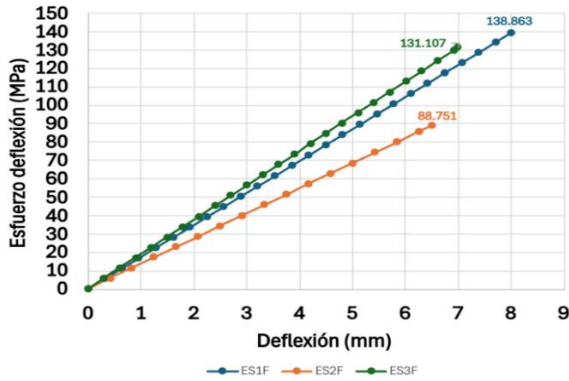


Fig. 4 Curva esfuerzo deflexión vs deflexión de muestras en estado seco del Eucalipto

La figura 4 presenta la relación entre el esfuerzo de flexión y la deflexión hasta la falla de las muestras de eucalipto en estado seco.

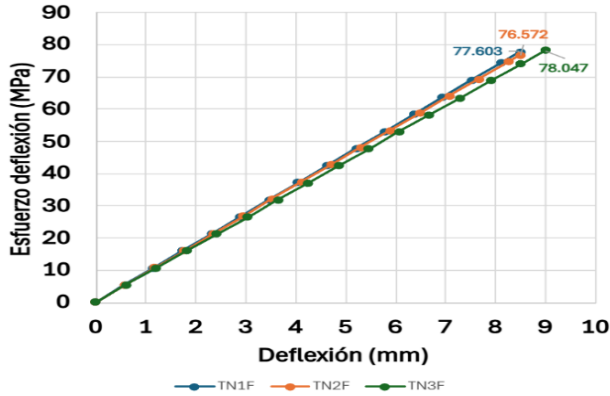
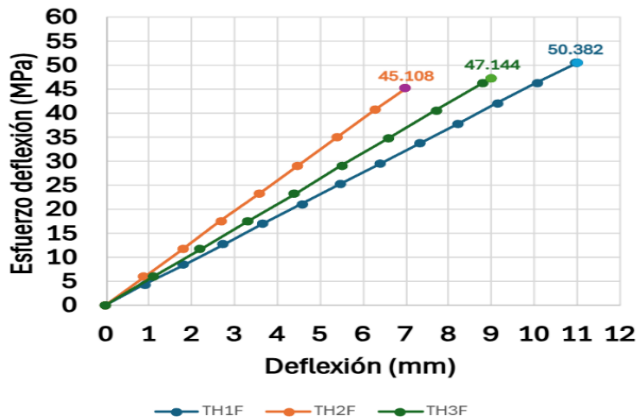


Fig. 5 Curva esfuerzo deflexión vs deflexión de muestras en estado natural del Tornillo

La figura 5 muestra los valores del esfuerzo de deflexión vs deflexión hasta que las muestras naturales del Tornillo fallen.



La figura 9 muestra los valores promedio del esfuerzo de deflexión vs deflexión de las muestras naturales, húmedas y secas del Tornillo hasta que falle.

TABLA XVI

MODULO DE ROTURA Y ELASTICIDAD PROMEDIO

Estado promedio	Módulo de rotura (MPa)	Módulo de elasticidad (MPa)
EN	119.545	7226.001
EH	114.756	6726.298
ES	134.985	12745.355
TN	77.407	6217.783
TH	44.871	3387.603
TS	62.659	5902.125

En la tabla XVI se muestran los resultados promedio de modulo de rotura y elasticidad en cada uno de lo estados de las dos especies de madera estudiadas.

5) Resistencia a la compresión

TABLA XVII

PORCENTAJE DE REDUCCIÓN DE RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN.

Muestra	Estado		% de reducción
	Natural	Húmedo	
Eucalipto	550.047	363.124	-33.98%
Tornillo	386.949	228.920	-40.84%

TABLA XVIII

PORCENTAJE DE AUMENTO DE RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN.

Muestra	Estado		% de aumento
	Natural	Seca	
Eucalipto	550.0470	948.120	72.37%
Tornillo	386.9494	476.258	23.08%

En las tablas XVII y XVIII se muestra el porcentaje de reducción de la resistencia a la compresión de las muestras en cada estado.

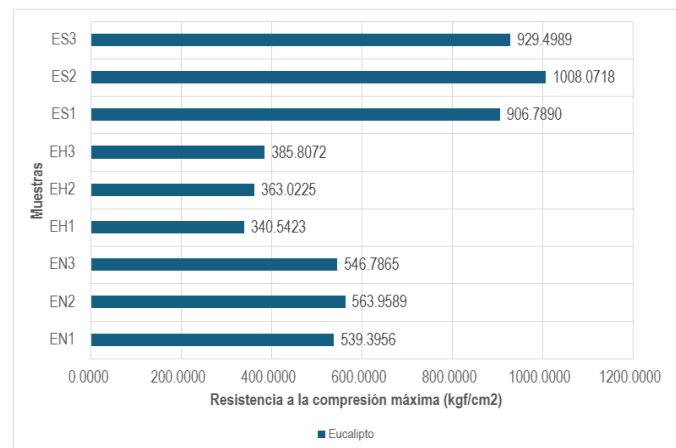


Fig. 10 Resistencia a la compresión del Tornillo según el estado

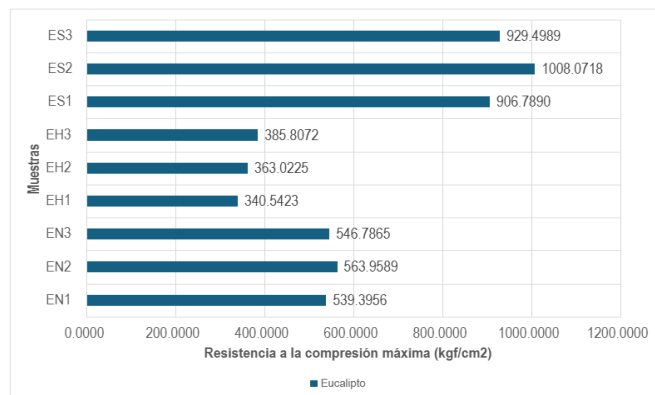


Fig. 11 Resistencia a la compresión del Eucalipto según el estado

Las figuras 10 y 11 muestran la resistencia a la compresión de la madera Tornillo y Eucalipto según su estado: natural (N), húmedo (H) y seco (S).

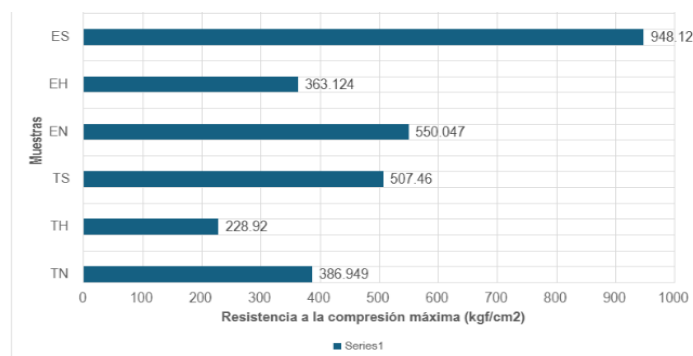


Fig. 12 Resistencia a la compresión promedio de las maderas Tornillo y Eucalipto según su estado

La figura 12 muestra la resistencia a la compresión promedio de las maderas Tornillo y Eucalipto en sus estados natural (N), húmedo (H) y seco (S).

6) Coeficiente de Poisson

TABLA XIX

DISTANCIAS INICIALES Y FINALES DEL COEFICIENTE DE POISSON

Muestra	INICIAL		FINAL	
	Distancia vertical	Distancia transversal	Distancia vertical	Distancia transversal
TN 1	11.018	2.200	10.964	2.209
TN 2	11.018	2.200	10.965	2.203
TN 3	6.316	2.200	6.287	2.207
TH 1	5.453	2.216	5.432	2.223
TH 2	5.469	2.210	5.447	2.214
TH 3	5.452	2.215	5.428	2.223
TS1	5.236	2.490	5.213	2.495
TS2	4.861	2.500	4.820	2.502
TS3	5.219	2.489	5.215	2.491
EN1	5.662	2.189	5.650	2.191
EN2	5.662	2.193	5.651	2.195
EN3	5.660	2.187	5.649	2.190
EH1	5.187	2.203	5.180	2.205
EH2	5.693	2.176	5.685	2.178
EH3	4.830	2.214	4.823	2.216
ES1	4.573	2.500	4.522	2.511
ES2	5.036	2.490	4.987	2.498
ES3	5.222	2.500	5.180	2.510

La tabla XIX presenta las distancias iniciales y finales tanto en dirección vertical como transversal.

TABLA XX
DEFORMACIÓN LONGITUDINAL, TRANSVERSAL Y PROMEDIO DEL COEFICIENTE DE POISSON.

Muestra	Deformación unitaria longitudinal	Deformación unitaria transversal	Coefficient e de Poisson	Coefficient e de Poisson promedio
TN 1	-0.00490	0.00409	0.835	0.604
TN 2	-0.00481	0.00136	0.283	
TN 3	-0.00459	0.00318	0.693	
TH 1	-0.00385	0.00316	0.820	0.697
TH 2	-0.00402	0.00181	0.450	
TH 3	-0.00440	0.00361	0.820	
TS1	-0.00439	0.00201	0.457	0.533
TS2	-0.00843	0.00080	0.095	
TS3	-0.00077	0.00080	1.048	
EN1	-0.00212	0.00091	0.431	0.535
EN2	-0.00194	0.00091	0.469	
EN3	-0.00194	0.00137	0.706	
EH1	-0.00135	0.00091	0.673	0.650
EH2	-0.00141	0.00092	0.654	
EH3	-0.00145	0.00090	0.623	
ES1	-0.01115	0.00440	0.395	0.407
ES2	-0.00973	0.00321	0.330	
ES3	-0.00804	0.00400	0.497	

La tabla XX presenta los coeficientes de Poisson promedio de las muestras en cada estado estudiado.

En esta sección se presentan los valores de deformación longitudinal y transversal de las muestras, así como el coeficiente de Poisson promedio obtenido para cada una.

En la investigación reportada en [14], se analizó el comportamiento higroscópico del eucalipto durante procesos de secado, evidenciándose que las mayores deformaciones se presentan en direcciones transversales, especialmente en la tangencial. Estos resultados son consistentes con los obtenidos en el presente estudio, donde el Eucalipto alcanzó valores de hinchamiento de 3.08% en ancho y contracciones de -3.11%, superiores a las variaciones longitudinales. En comparación, el Tornillo presentó valores de 2.83% de hinchamiento y -2.34% de contracción en ancho, mostrando una respuesta más equilibrada, aunque con menor estabilidad global frente a la humedad.

Asimismo, en [12] y [18] se evaluaron propiedades físicas de la madera *Cedrelinga cateniformis*, reportando una alta capacidad de absorción de humedad y mayor variabilidad dimensional. Estos resultados coinciden con los obtenidos en esta investigación, donde el Tornillo presentó una absorción de 16.33%, significativamente mayor que el Eucalipto (8.75%). Esta diferencia confirma una mayor permeabilidad del Tornillo, lo cual explica su mayor susceptibilidad a la degradación de propiedades mecánicas en ambientes húmedos.

En relación con la densidad, estudios como [1] y [19] establecen que existe una relación directa entre densidad y resistencia mecánica. En el presente estudio, el Eucalipto presentó una densidad promedio de 737.47 kg/m³, superando al

Tornillo (493.34 kg/m³), lo cual se reflejó en un mejor desempeño estructural. Estos resultados son coherentes con lo reportado en [16], donde se indica que el eucalipto presenta mayor compactación estructural y mejores propiedades mecánicas en comparación con especies de menor densidad.

En los ensayos de flexión, investigaciones como [11] y [15] destacan que el eucalipto presenta altos valores de resistencia y módulo de elasticidad en aplicaciones estructurales. En el presente estudio, se observa que para el eucalipto el estado seco alcanza los mayores valores, con un módulo de rotura de 134.98 MPa y un módulo de elasticidad de 12,745.35 MPa. Al pasar al estado natural, la resistencia disminuye en 11.4% y el módulo de elasticidad en 43.3%. En condición húmeda, la reducción respecto al estado seco es de 15.0% en resistencia y 47.2% en rigidez. En el caso del tornillo, se observa una tendencia similar pero más pronunciada. En estado seco, presenta un módulo de rotura de 62.66 MPa y un módulo de elasticidad de 5,902.12 MPa. En estado natural, la resistencia aumenta en 23.5% y la rigidez en 5.3%, respectivamente. Sin embargo, en estado húmedo, se registra una disminución respecto al estado seco de 28.4% en resistencia y 42.6% en módulo de elasticidad.

En cuanto a la resistencia a la compresión, estudios como [20] comparan el comportamiento mecánico de especies como eucalipto y tornillo, evidenciando la superioridad del primero en aplicaciones estructurales. En la presente investigación, el Eucalipto alcanzó 948.12 kgf/cm² en estado seco, mientras que el Tornillo registró 476.26 kgf/cm², es decir, aproximadamente un 99% menor. En estado húmedo, ambos materiales redujeron su resistencia a 363.12 kgf/cm² y 228.92 kgf/cm², respectivamente, lo que representa disminuciones de -33.98% y -40.84%. Estos resultados son consistentes con lo reportado en [13] y [19], donde se señala que la humedad afecta directamente la capacidad portante de la madera.

Por otro lado, en [10] se analizan los límites del coeficiente de Poisson en materiales ortotrópicos como la madera, indicando que este parámetro varía según la dirección y el contenido de humedad. En el presente estudio, el Tornillo presentó valores de 0.533 (seco), 0.604 (natural) y 0.697 (húmedo), superiores a los del Eucalipto (0.407, 0.535 y 0.650), lo que indica una mayor deformabilidad lateral. Esta diferencia sugiere una menor rigidez transversal del Tornillo, lo cual puede afectar su comportamiento estructural bajo cargas combinadas.

En función de los resultados obtenidos y su comparación con la literatura, se establece que el Eucalipto presenta un mejor desempeño mecánico global, asociado a su mayor densidad y menor capacidad de absorción de agua. Por el contrario, el Tornillo muestra una mayor susceptibilidad a la humedad, lo que limita su aplicación en condiciones estructurales exigentes, siendo estos resultados coherentes con lo reportado en estudios previos [12], [20] y [21].

IV. CONCLUSIONES

Se concluye que la hipótesis se cumple, debido a que se comprobó que el contenido de humedad influye directamente

en las propiedades mecánicas de ambas especies, observándose un incremento en estado seco y una disminución en estado húmedo respecto a la condición natural lo que confirma la relación inversa entre humedad y resistencia mecánica.

Se evidenció que el Tornillo presenta una mayor capacidad de absorción de agua (16.33%) en comparación con el Eucalipto (8.75%), lo que indica una mayor susceptibilidad a ambientes húmedos, pese a que ambas especies presentan contenidos de humedad inicial similares (~11%).

Se comprobó que el Eucalipto posee una mayor densidad básica (737.47 kg/m³) respecto al Tornillo (493.34 kg/m³), lo que se traduce en una estructura más compacta y en una mayor eficiencia en la transmisión de esfuerzos.

En los ensayos de flexión, el eucalipto presenta mayor módulo de rotura y elasticidad que el tornillo en todos los estados; en seco alcanza 134.98 MPa y 12,745.35 MPa, frente a 62.66 MPa y 5,902.12 MPa del tornillo. Al incrementarse la humedad el eucalipto disminuye su resistencia en aproximadamente 15% y su rigidez en 47%, mientras que el tornillo presenta una caída más severa de 28% y 43%, respectivamente.

En resistencia a la compresión, el Eucalipto alcanzó 948.12 kgf/cm² en estado seco, superando al Tornillo (476.26 kgf/cm²). En condición húmeda, ambas especies experimentaron reducciones en su capacidad resistente, siendo esta disminución más pronunciada en el Tornillo.

El análisis del coeficiente de Poisson evidenció que el Tornillo presenta mayor deformabilidad lateral que el Eucalipto, especialmente en estado húmedo, lo que indica un comportamiento más flexible y menor rigidez transversal bajo cargas axiales.

En conjunto, el Eucalipto presenta un mejor desempeño mecánico global, siendo más adecuado para aplicaciones estructurales de alta exigencia, mientras que el Tornillo resulta más apropiado para usos de menor demanda. El contenido de humedad se confirma como el factor predominante en la variación de las propiedades físico-mecánicas de ambas especies.

REFERENCES

- [1] Arriaga, F., Esteban, M., & Íñiguez-González, G. (2023). Mechanical properties of wood: A review. *Forests*, 14(6), 1202. <https://doi.org/10.3390/f14061202>
- [2] Arriaga, F., Wang, X., Íñiguez-González, G., Llana, D. F., Esteban, M., & Niemz, P. (2023). Mechanical properties of wood: A review. *Forests*, 14(6), 1202. <https://doi.org/10.3390/f14061202>
- [3] ASTM International. (2014). ASTM D143-14: Standard test methods for small clear specimens of timber. <https://doi.org/10.1520/D0143-14>
- [4] ASTM International. (2016). ASTM D4442-16: Standard test methods for direct moisture content measurement of wood and wood-base materials. <https://doi.org/10.1520/D4442-16>
- [5] ASTM International. (2017). ASTM E132-17: Standard test method for Poisson's ratio at room temperature. <https://doi.org/10.1520/E0132-17>
- [6] ASTM International. (2022). ASTM D198-22a: Standard test methods of static tests of lumber in structural sizes. <https://doi.org/10.1520/D0198-22A>
- [7] Farid, M. M., Nashed, M. N., & Lu, J. (2022). Transforming wood as next-generation structural and functional materials for a sustainable future.

- Advanced Sustainable Systems, 6(5), 2100410. <https://doi.org/10.1002/adsu.202100410>
- [8] Farid, T., Rafiq, M. I., Ali, A., & Tang, W. (2022). Transforming wood as next-generation structural and functional materials for a sustainable future. *EcoMat*, 4(1), e12154. <https://doi.org/10.1002/eom2.12154>
- [9] García Rivera, F. E., & Lliuyacc Huamán, J. R. (2021). Influencia de la humedad en la resistencia a flexo compresión en rollizos de eucalipto (*Eucalyptus globulus*) [Tesis de pregrado, Universidad Nacional de Huancavelica]. Repositorio Institucional UNH. <https://repositorio.unh.edu.pe/items/0a447505-6f48-421f-ac37-4636870d99e6>
- [10] Greco, F., Lonetti, P., Luciano, R., & Nevone Blasi, P. (2021). Poisson's ratio bounds in orthotropic materials: Application to natural composites: wood, bamboo and Arundo donax. *Composites Part B: Engineering*, 209, 108612. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2021.108612>
- [11] Guarniz Linares, C. J., & Aguilar Aliaga, O. S. (2020). Resistencia a la flexión de la madera tornillo (*Cedrelinga cateniformis*) en estado macizo y laminado, para uso estructural en la ciudad de Cajamarca [Tesis de pregrado, Universidad Privada del Norte]. Repositorio UPN. <https://repositorio.upn.edu.pe/handle/11537/33924>
- [12] Haag, V., Koch, G., Melcher, E., & Welling, J. (2020). Characterization of the wood properties of *Cedrelinga cateniformis* as substitute for timbers used for window manufacturing and outdoor applications. *Maderas. Ciencia y Tecnología*, 22(1), 23–36. <https://doi.org/10.4067/S0718-221X2020005000103>
- [13] Kherais, M., Csébfalvi, A., Len, A., Fülöp, A., & Pál-Schreiner, J. (2024). The effect of moisture content on the mechanical properties of wood structure. *Pollack Periodica*, 19(1), 41–46. <https://doi.org/10.1556/606.2023.00917>
- [14] Li, Z., Zhang, S., Liu, W., & Chen, Y. (2022). The characteristics of moisture and shrinkage of *Eucalyptus urophylla* × *Eucalyptus grandis* wood during conventional drying. *Materials*, 15(9), 3386. <https://doi.org/10.3390/ma15093386>
- [15] Mendes, N., Branco, J. M., Machado, J. S., & Sena-Cruz, J. (2025). Bending properties of LVL made by *Eucalyptus globulus* Labill. and its potential for hybrid glulam beams. *European Journal of Wood and Wood Products*, 83, 97. <https://doi.org/10.1007/s00107-025-02244-w>
- [16] Moreno, K., Achinelli, F., Stefani, P. M., Monteoliva, S., & Spavento, E. (2024). Physical and mechanical wood properties of *Eucalyptus globulus* (Argentina), and its association with site quality and plantation age. *Bosque*, 45(3), 427–436. <https://doi.org/10.4067/S0717-92002024000300427>
- [17] Noor Asnan, M., Zulkifli, A., & Baharuddin, H. (2023). The analysis study of strength on concrete formwork wood construction. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1260(1), 012024. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1260/1/012024>
- [18] Soriani, L., Arroyo, F. N., et al. (2021). Influence of moisture content on physical and mechanical properties of *Cedrelinga cateniformis* wood. *BioResources*, 16(4), 6758–6765. <https://doi.org/10.15376/biores.16.4.6758-6765>
- [19] USDA Forest Products Laboratory. (2021). Wood handbook: Wood as an engineering material (General Technical Report FPL-GTR-282). U.S. Department of Agriculture. https://www.fpl.fs.usda.gov/documnts/fplgtr/fpl_gtr282.pdf
- [20] Valdera Salazar, J. J., Cueva Aguilar, J. L., & Chávez Tuesta, R. A. (2020). Comparación de las propiedades físico mecánicas de las maderas eucalipto, tornillo y copaiba para encofrados en obra [Trabajo de suficiencia profesional, Universidad Privada del Norte]. Repositorio UPN. <https://repositorio.upn.edu.pe/handle/11537/26227>
- [21] Zhao, X., Wang, Y., Liu, H., Chen, J., & Zhang, L. (2025). Microwave-treated *Eucalyptus globulus* wood for construction applications: Enhanced impregnability, biological resistance, and preserved mechanical performance. *Construction and Building Materials*, 458, 144049. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2025.144049>