

EFFECTO DE LOS EXTRACTIVOS Y LA ESTRUCTURA ANATÓMICA EN LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DE LA MADERA DE CAOBA, *SWIETENIA MACROPHYLLA* KING

Palabras clave: sorción, contenido de humedad de equilibrio, propiedades mecánicas, estructura anatómica, extractivos, *Swietenia macrophylla*.

Key Words: sorption, equilibrium moisture content, mechanical properties, anatomic structure, extractives, *Swietenia macrophylla*.

Rosven Libardo Arévalo Fuentes¹
Roger Hernández²

RESUMEN

La compresión tangencial de probetas de madera de caoba peruana fue ensayada a diferentes niveles de humedad relativa a 25°C para determinar la influencia de los extractivos y la estructura anatómica. Muestras pareadas fueron utilizadas para establecer la proporción de extractivos mediante extracción con solventes de polaridad creciente: ciclohexano, diclorometano, acetona, metanol y agua caliente. Adicionalmente, catorce parámetros anatómicos fueron determinados por interpretación de imagen. Análisis estadísticos de regresión múltiple establecieron que, principalmente, parámetros anatómicos como radios y vasos, más que extractivos, afectan el comportamiento mecánico de la caoba. Estos resultados concuerdan con otros previamente establecidos que indican el efecto negativo de radios altos multiseriados en las propiedades mecánicas cuando son cargados perpendicularmente a su eje longitudinal. La influencia de extractivos solubles en diclorometano localizados en las cavidades celulares podría contrarrestar deformaciones. Finalmente, se lanza la hipótesis de que los extractivos solubles en agua caliente podrían jugar un papel plastificante.

ABSTRACT

The compression tangential to grain of samples of mahogany wood from Perú was examined at

different relative humidity levels at 25 °C to determine the influence of both extractives and anatomical structure. Matched samples were used to assess the percentage of extractive components by extraction with solvents of increasing polarity: cyclohexane, dichloromethane, acetone, methanol and hot water. Additionally, fourteen anatomical parameters were determined by image analysis. Stepwise regression analysis concluded that mainly anatomical features, such as rays and vessels, rather than extractives, affect the mechanical behaviour of mahogany. These findings are agree with earlier results showing a negative effect of large and multiseriate rays on the mechanical properties of wood when loaded perpendicularly to their long axis. The influence of lumen located extracts soluble in dichloromethane might disallow deformations. Finally, it is postulated that hot water extracts may play a plasticizing role in this species.

INTRODUCCIÓN

Las propiedades mecánicas de maderas conferidas por la presencia de extractivos han sido reconocidas desde tiempo atrás (Luxford 1931). Es sabido que los extractivos y la estructura anatómica pueden tener una considerable influencia sobre las propiedades mecánicas de maderas. Por ejemplo, se ha observado que la presencia de extractivos como taninos puede jugar el papel de resortes evitando el

1 Universidad del Tolima, Ibagué, Colombia, rlareval@ut.edu.co.

2 Universidad Laval. Quebec, Canadá, roger.hernandez@sbf.ulaval.ca.

rompimiento de la pared celular, actuando de manera similar a la celulosa (Pizzi & Cameron 1986). El efecto de los extractivos depende de su proporción y polaridad así como también del contenido de humedad de equilibrio (C_{HE}) y de la temperatura. Para un entendimiento de la influencia de los extractivos en las propiedades de la madera el conocimiento de su localización resulta de utilidad. Ello puede conocerse mediante una extracción sucesiva para remover los extractivos localizados en las cavidades celulares y posteriormente los localizados en las paredes celulares. Kellogg e Ifju (1962) sostienen que el efecto de la remoción de extractivos puede ser positivo o negativo dependiendo de la propiedad mecánica bajo consideración y de su localización en la estructura celular. La mayoría de los extractivos están localizados en las traqueidas radiales y los vasos compuestos fenólicos están localizados en el duramen (Maldas & Kamdem 1999).

Frecuentemente la influencia de los extractivos es explicada por las siguientes hipótesis:

- a) Un efecto de abultamiento. Se ha sugerido que, siendo los extractivos grandes moléculas (por ejemplo, dímeros de lignina y taninos polimerizados), mantienen la madera en un estado de “semihinchamiento” y esconden el número de sitios disponibles para la formación de enlaces intermoleculares entre celulosa y lignina y/o enlaces intramoleculares dentro de la lignina (Arganbright 1971). Este efecto podría ser similar al de la humedad penetrando la estructura polímera y disminuyendo los enlaces intermoleculares de hidrógeno, reduciendo así la resistencia. Además, estudios de secado desde el estado verde han evidenciado que la presencia de extractivos reduce significativamente la fatiga y la contracción a bajas temperaturas, mientras que ambos fenómenos se incrementan a altas temperaturas (Erickson *et al.* 1972, Demaree & Erickson 1976, Spalt 1979).
- b) Un efecto plastificante. La presencia de extractivos puede promover flujo plastificante (Pentoney y Davidson 1962, Tarkow & Seborg 1968, Spalt 1979).
- c) Un efecto de rigidez de las paredes celulares. Se afirma que los extractivos ejercen un pequeño pero significativo incremento en las propiedades mecánicas a corto término de la madera (Luxford 1931, de Zeeuw 1965, Panshin & de Zeeuw 1970, El-Osta *et al.* 1981.).

La influencia de la estructura anatómica en las propiedades mecánicas de la madera ha sido de interés para los investigadores. Por ejemplo, Berry *et al.* (1983) caracterizaron la estructura anatómica de algunas maderas tropicales utilizando el método estereológico propuesto por Ifju (1983) y relacionaron variables estructurales a la rigidez y resistencia tensil. Los resultados demostraron que la proporción de vasos de la zona de madera temprana influyen negativamente la deformación y el máximo esfuerzo radial, mientras que el área y ancho de radios afectó positivamente las propiedades en sentido radial. Keller & Thiercelin (1975), trabajando con madera de haya (*Fagus sylvatica*), demostraron que los radios son factores de alta resistencia mecánica y contracción tangencial. Bodig (1965) estudió las propiedades transversales de algunas especies coníferas y maderas duras, y encontró que el tamaño de los radios y el porcentaje de madera tardía son en su mayoría los factores que explican las diferencias de las propiedades entre especies.

Hernández (1989) estudió el efecto de los extractivos, a cinco niveles de humedad relativa, en la compresión tangencial de nueve maderas tropicales incluyendo la caoba. Esta investigación no incluyó la influencia de la estructura anatómica. El estudio de la influencia de los extractivos y la estructura anatómica en el comportamiento físico-mecánico de la madera de caoba contribuirá a un mejor conocimiento de esta especie y consecuentemente a su manejo racional y sustentable. Esta información será útil para explicar el desempeño de la madera y así ampliar el uso potencial de otras. La principal característica de este estudio es combinar ensayos físico-mecánicos con experimentos de sorción, junto con análisis químicos y anatómicos para establecer la influencia de estos últimos factores y estimar su importancia para la madera de caoba a lo largo de su rango higroscópico. El propósito de

esta investigación es suministrar dicha información para la madera de caoba cuando se ensaya en compresión tangencial perpendicular al grano.

MATERIALES Y MÉTODOS

Los experimentos fueron realizados con duramen de caoba *Swietenia macrophylla* King de una densidad anhidra promedio de 514 kg m^{-3} . 21 piezas de madera verde libre de defectos de 93 cm de longitud y de secciones transversales variables fueron escogidas al azar en un aserradero en Lima, Perú. El material enviado a la Universidad Laval fue almacenado en un cuarto climático a $20 \text{ }^\circ\text{C}$ y 65% de HR. Después de su acondicionamiento la madera fue aserrada en tablas de 20 mm (R) x 100 mm (T) x 450 mm (L). Posteriormente, las 30 mejores tablas fueron seleccionadas con base en la orientación y uniformidad de los anillos de crecimiento así como también en la reducida variación de densidad entre ellas. Un mínimo de 30 probetas fueron cortadas de la parte media de cada una de ellas con una sección transversal y una longitud como se describe en la Figura 1.

Las dimensiones fueron seleccionadas teniendo en cuenta el tipo de muestreo empleado y el tiempo requerido para la sorción. El pareado longitudinal permitió la obtención de 12 grupos de 30 probetas

cada uno. La forma y dimensión de las muestras difiere de las recomendadas por la norma ASTM D143, no obstante, una relación largo-ancho de 3 fue utilizada para evitar el pandeo durante el ensayo de compresión tangencial (Bodig & Jayne 1982) y limitar el efecto debido a la curvatura de los anillos de crecimiento.

ENSAYOS DE SORCIÓN Y MECÁNICOS

El material en su totalidad fue inicialmente secado al horno con el fin de asegurar uniformidad entre los grupos. Durante 30 días se fue incrementando la temperatura hasta alcanzar los $100 \text{ }^\circ\text{C}$, siendo el CH final de la madera de aproximadamente 0%. Posteriormente el material fue almacenado durante 45 días en desecadores con P_2O_5 a fin de reducir tensiones y eliminar la humedad residual. Al final de este periodo de acondicionamiento las probetas fueron pesadas y medidas en la condición anhidra. A continuación el material fue sometido a ensayos de sorción utilizando los estanques descritos por Goulet (1968). Por cada punto de sorción se emplearon 12 desecadores conteniendo 30 probetas cada uno. Las condiciones finales de sorción fueron realizadas con soluciones salinas saturadas o con agua destilada. En la Tabla 1 se puede observar el procedimiento por etapas empleado para tal fin, el cual duró de 140 (adsorción, 33% HR) a 315 días

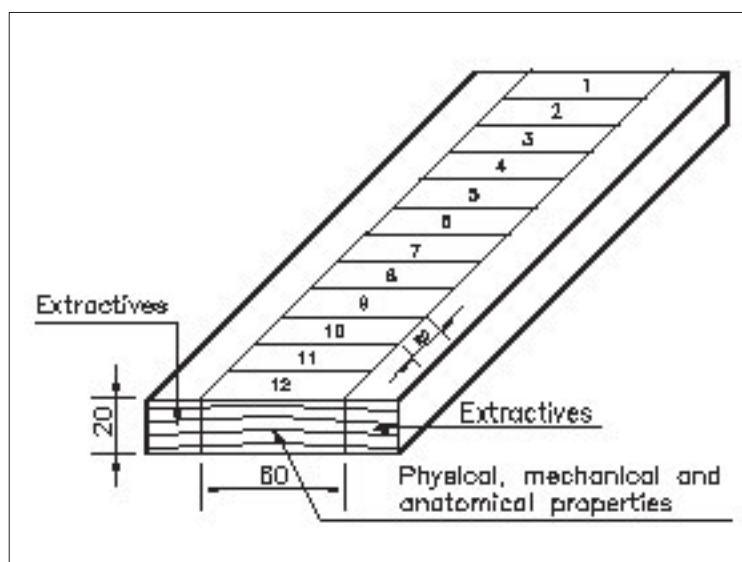


Figura 1. Esquema de la selección de probetas por grupos.

Tabla 1. Secuencia de las condiciones de sorción de humedad.

Experiencia	Número de Grupo	Producto Químico	Humedad Relativa	Estado de Sorción (%)	Duración días	Etapas
Adsorción 1	P ₂ O ₅	0	Adsorción	238	1*	
	3	MgCl ₂	33	Adsorción	140	1*
	5	NaBr	58	Adsorción	183	1*
	7	NaCl	76	Adsorción	194	1*
	9	KCl	86	Adsorción	185	1*
	11	ZnSO ₄	90	Adsorción	313	1*
	12	H ₂ O	100	Adsorción	315	1*
Desorción	2,4,6,8,10	NaBr	58	Adsorción	19	1
	2,4,6,8,10	KCl	86	Adsorción	20	2
	2,4,6,8,10	H ₂ O	100	Adsorción	80	3
	2	P ₂ O ₅	0	Desorción	244	4*
	4	MgCl ₂	33	Desorción	147	4*
	6	NaBr	58	Desorción	148	4*
	8	NaCl	76	Desorción	151	4*
	10	KCl	86	Desorción	244	4*

*Etapa final.

(adsorción, 100% HR). Para evitar el efecto de la histéresis de saturación, los ensayos de desorción fueron realizados en presencia de agua higroscópica exclusivamente. Por lo tanto las desorciones finales fueron precedidas por una adsorción sobre agua destilada. Una vez alcanzado el equilibrio, el peso de las probetas fue determinado con una precisión de 0.001 g. Dichos valores fueron obtenidos para 12 condiciones de sorción. El contenido de humedad de equilibrio fue expresado con base en la masa anhidra.

Los ensayos de compresión tangencial fueron realizados en una máquina Riehle equipada con una célula de carga de 340 kg de capacidad. La deformación fue medida, en una distancia de 40 mm localizada en la parte central de la probeta, utilizando un captor de deformación Sangamo DG 1.0. Adicionalmente, la deformación total de las muestras (60 mm) fue medida con otro captor Sangamo DG 1.0 instalado en el cabezal de la máquina de ensayos. Durante el ensayo se controlaron los cambios higrotérmicos envolviendo la probeta con una banda de algodón previamente acondicionado

a las mismas condiciones de humedad del espécimen. La velocidad de la máquina de ensayos fue regulada para asegurar una misma tasa de deformación para todas las condiciones de humedad (Sliker 1978). En el rango elástico esta tasa fue de 0.40 mm/mm/min. Dichos ensayos permiten el cálculo del coeficiente de deformación tangencial s_{11} cuyo valor recíproco corresponde al módulo de Young en la dirección tangencial. La carga al límite proporcional fue calculada siguiendo la metodología descrita por Goulet & Veer (1975). En todos los casos el área de la probeta utilizada para los cálculos fue la determinada momentos antes del ensayo.

ANÁLISIS QUÍMICOS Y ANATÓMICOS

Para establecer la proporción de extractivos se utilizó una secuencia de solventes de polaridad creciente para remover los compuestos secundarios siguiendo una metodología similar a la empleada por Morgan & Orsler (1969) y Hernández (1989). Una descripción detallada de la extracción secuencial con ciclohexano, diclorometano, acetona metanol y agua caliente junto con el procedimiento

para el estudio anatómico está dada en Arévalo & Hernández (2001).

Junto con los ensayos de sorción se utilizaron muestras pareadas para el análisis de anatomía cuantitativa. Catorce parámetros anatómicos se utilizaron para evaluar su relación con las propiedades mecánicas de la madera de caoba. Siete caracterizan a los vasos, seis se refieren a los radios y la última define la proporción de fibra y de parénquima.

Cortes transversales fueron utilizados para medir el área de vasos (AV), diámetro tangencial de vasos (DTV), diámetro menor (DMEV), diámetro mayor (DMV) y vasos por milímetro cuadrado (VPM²). Las dimensiones de los radios como altura (AR), ancho (ANR), radios por milímetro (RPM) y área de radios (SR) fueron hechas en cortes tangenciales. La proporción de tejidos de los diferentes tipos de células fue estimada a partir de dos imágenes por cada muestra. Para determinar la proporción de vasos (PV), éstos fueron “pintados” en la pantalla del computador para distinguirlos de las fibras y el

parénquima y su área relativa fue calculada por el programa. La proporción de radios (PR) fue medida de la misma manera. Siguiendo la recomendación de Keller y Thiercelin (1975) se determinó la forma de vasos (FFV) y radios (FFR) dividiendo el diámetro mayor por el diámetro menor de los vasos y la altura por el ancho de los radios.

La proporción de fibra y de parénquima (PFP) como un todo fue obtenida restando la proporción de vasos y radios de la unidad (100%). Los mencionados parámetros anatómicos fueron utilizados para evaluar su relación con las propiedades mecánicas de la madera de caoba utilizando técnicas de regresión múltiple como fue publicado por Arévalo & Hernández (2001).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Las principales propiedades mecánicas de la madera de caoba pueden observarse en la Tabla 2. Se presentan el coeficiente de deformación tangencial (s_{11}) y el esfuerzo de la carga al límite proporcional

Tabla 2. Principales propiedades mecánicas de la madera de caoba.

CHE (%)	Parte central de la muestra						Largo total de la muestra			
			s_{11} GPa ⁻¹		σ_{LP} MPa		s_{11} GPa ⁻¹		σ_{LP} MPa	
	A ¹	D ¹	A	D	A	D	A	D	A	D
0			1.25	1.28	3.89	3.52	1.66	1.63	4.74	4.24
			18.4	18.2	19.9	24.6	16.4	16.9	16.3	21.2
33	5.67	7.83	1.28	1.34	3.02	2.88	1.7	1.76	4.0	3.45
	3.9	3.0	18.8	18.8	26.4	18.9	17.5	17.3	21.4	21.7
58	9.29	12.07	1.36	1.47	2.85	2.57	1.75	1.95	3.4	3.13
	3.2	3.2	19.4	17.5	27.1	21.1	18.6	17.0	20.1	22.2
76	12.66	15.79	1.44	1.61	2.53	2.18	1.84	2.13	3.03	2.43
	2.7	3.4	19.4	18.8	21.8	21.5	18.0	16.9	20.2	23.3
86	14.91	17.98	1.57	1.68	2.05	1.67	2.04	2.13	2.57	2.06
	2.8	4.0	18.7	19.1	20.4	27.5	17.5	18.1	20.8	23.7
90	16.21		1.63		2.12		2.01		2.48	
	3.1		19.2		19.6		17.5		21.8	
100	25.34		2.12		1.13		2.69		1.35	
	5.5		21.5		15.8		18.3		22.6	

1) A: adsorción; D: desorción.

(σ_{LP}), medidos en la parte central y total de la probeta para ambos estados de sorción. En absorción, a 76% y 100% de humedad relativa (HR), los valores de s_{11} fueron 1.44 y 2.12 respectivamente, mientras que en desorción este valor fue de 1.47 para 58% de HR. Hernández (1989) reportó valores de 2.16, 3.14 y 2.10 para la misma especie, estado de sorción y niveles de HR. Las diferencias pueden deberse a la disparidad de densidades entre las probetas utilizadas en los dos experimentos (Arévalo & Hernández 2000).

El s_{11} total fue 22% mayor que el central. Un valor de 32% para arce fue reportado por Hernández & Bizoñ (1994). El σ_{LP} total fue 17% mayor que el σ_{LP} central. Como fue reportado previamente por Hernández (1993) y por Hernández & Bizoñ (1994) los resultados confirman la existencia de una distribución heterogénea de esfuerzos dentro de los especímenes. Las diferencias obtenidas entre s_{11} y σ_{LP} medidos en la parte central y total de las probetas podrían deberse al hecho de que esas propiedades cuando se miden en la longitud total de la probeta involucran un sinnúmero de factores durante el ensayo e introducen concentración de esfuerzos en el área de la probeta en contacto con la máquina de ensayos (Bodig y Jayne 1982). Los resultados sugieren que la caoba tiene un comportamiento mecánico similar en adsorción que en desorción a un CHE equivalente. Consecuentemente, adsorción conduce al mismo s_{11} y σ_{LP} que desorción, especialmente cuando la madera de caoba trabaja al aire libre.

Debido a que análisis preliminares de regresión mostraron relación entre parámetros anatómicos fue necesario realizar varias corridas hasta establecer modelos sin variables anatómicas autocorrelacionadas. El nivel de significancia para permanecer o salir del modelo fue del 90%. Adicionalmente, mejores resultados fueron logrados empleando las variables densidad anhidra corregida (Do') y contenido de humedad de equilibrio corregida. La primera fue incluida en los doce modelos mientras que la segunda se incluyó en los últimos diez modelos. La Do' se calculó multiplicando los valores de Do por la proporción de extractivos solubles en solventes orgánicos (ciclohexano, diclorometano,

acetona y metanol) y el CHE', dividiendo el CHE por la proporción de extractivos anteriormente definida. Los resultados de los análisis de regresión para s_{11} pueden observarse en las Tablas 3 y 4. Las variables independientes explican entre el 70% y el 91% de la variación de s_{11} medido en la parte central de la muestra y entre el 66% y el 87% de s_{11} medido en la longitud total de la probeta. La utilidad predictiva de las ecuaciones se confirma al corroborar que los coeficientes de variación (CV) están por debajo del 15% en todos los casos (desde 7% hasta 11%).

Los datos indican que los extractivos influyen s_{11} desde bajas a altas HR, especialmente aquellos solubles en diclorometano y agua caliente. Parece que los extractivos solubles en AC jugaran un papel plastificante ya que una mayor deformación es producida por un incremento de los extractos solubles en AC. De hecho éstos son solubles en agua y conjuntamente con las fracciones solubles en agua permiten por lubricación un desplazamiento de las microfibrillas (Ajuong & Breese 1999). Sin embargo, como el procedimiento de extracción en AC acumula error experimental, los extractos gravimetricamente determinados no son una medida real y por lo tanto los resultados deben ser interpretados con precaución.

Los resultados indican que las variables más importantes que explican la variación de s_{11} fueron la Do' , el FFR y los extractivos solubles en agua caliente (AC) y diclorometano (DIC). Tomando en cuenta los coeficientes beta, Do' tiene una participación relativa del 44% en el modelo mientras que FFR un 29% y DIC y AC 7% para s_{11} medido en la parte central de la muestra. Para s_{11} medido en toda la longitud de la probeta estos valores fueron de 39%, 30%, 5% y 8%, respectivamente. A manera de ejemplo y mediante una regresión simple, en la Figura 2 se observa la mayor importancia de la Do' en desorción a 33% de HR.

El FFR es el segundo parámetro en importancia, indicando un incremento de s_{11} cuando la relación altura/ancho de radios se incrementa. Este parámetro se presentó en todos los modelos establecidos, lo cual confirma su impacto sobre la variación de s_{11} . Berry *et al.* (1983) determinaron también que los radios eran aparentemente zonas débiles cuando

se cargaban tangencialmente en resistencia a la tensión. El hecho de que el FFR fuera identificado como el mejor parámetro entre todos los estudiados podría sugerir que el efecto de los radios como volumen no es importante, sino más bien cuando las células radiales están agrupadas como columnas altas. Un ejemplo de la influencia del FFR en s_{11} puede observarse en la Figura 3.

La importancia de los parámetros determinados (Do' , FFR, extractivos solubles en AC y DIC) para predecir s_{11} cuando se mide en la parte central de la probeta se confirma cuando se hace una comparación con los modelos establecidos para s_{11} medido en la longitud total de la probeta (Tabla 3). Para este caso los modelos establecidos explican entre el 66% y el 87% de la variación total de s_{11}

Tabla 3. Ecuaciones de regresión del coeficiente de deformación (s_{11}) a 25 °C, medido en la parte central (40 mm) de la probeta como una función de la densidad anhidra corregida (Do'), el contenido de humedad de equilibrio corregido (CHE'), los extractivos obtenidos mediante extracción sucesiva con ciclohexano (CYC), diclorometano (DIC), acetona (ACE), metanol (MET) y agua caliente (AC), y propiedades anatómicas de la madera de caoba.

Grupo	Ecuaciones		
0% A =	$0.0019 - 0.0028 Do' + 0.00007 FFR$		
0% D =	$0.0023 - 0.0034 Do' + 0.00006 FFR - 0.00011 DIC$		
33% A =	$0.0022 - 0.0034 Do' + 0.00010 FFR - 0.00005 MET$		
33% D =	$0.0026 - 0.0039 Do' + 0.00009 FFR - 0.00005 MET - 0.00011 DIC$		
58% A =	$0.0016 - 0.0026 Do' + 0.00010 FFR$		
58% D =	$0.0018 - 0.0031 Do' + 0.00010 FFR + 0.00010 AC$		
76% A =	$0.0017 - 0.0034 Do' + 0.00010 FFR + 0.00014 AC$		
76% D =	$0.0016 - 0.0031 Do' + 0.00012 FFR + 0.00016 AC$		
86% A =	$0.0027 - 0.0039 Do' + 0.00011 FFR - 0.0021 DIC - 0.00014 CYC$		
86% D =	$-0.0018 - 0.0041 Do' + 0.00025 CHE' - 0.00040 DIC - 0.00005 PV + 0.00023 AC + 0.00007 FFR$		
90% A =	$-0.0030 - 0.0041 Do' + 0.00036 CHE' - 0.00005 PV + 0.00010 FFR - 0.00005 ACE + 0.00019 AC - 0.00026 DIC - 0.00009 RM$		
100% A =	$-0.0040 + 0.00016 CHE' + 0.00020 FFR - 0.0024 Do' - 0.00034 DIC + 0.000016 AnR$		

Grupo	Coefficientes beta	R2	CV
0% A	$-0.68 Do' + 0.37 FFR$	76.9	9.2
0% D	$-0.82 Do' + 0.31 FFR - 0.18 DIC$	83.5	7.7
33% A	$-0.76 Do' + 0.52 FFR - 0.26 MET$	81.6	8.5
33% D	$-0.88 Do' + 0.43 FFR - 0.23 MET - 0.16 DIC$	83.4	8.3
58% A	$-0.55 Do' + 0.47 FFR$	69.7	11.0
58% D	$-0.64 Do' + 0.47 FFR + 0.22 AC$	75.1	9.2
76% A	$-0.65 Do' + 0.45 FFR + 0.28 AC$	75.4	10.2
76% D	$-0.58 Do' + 0.49 FFR + 0.31 AC$	70.0	10.9
86% A	$-0.74 Do' + 0.45 FFR - 0.27 DIC - 0.19 CYC$	79.8	9.1
86% D	$-0.70 Do' + 0.55 CHE' - 0.46 DIC - 0.45 PV + 0.41 AC + 0.27 FFR$	89.1	7.1
90% A	$-0.72 Do' + 0.60 CHE' - 0.42 PV + 0.39 FFR - 0.39 ACE + 0.37 AC - 0.32 DIC - 0.13 RM$	91.2	6.7
100% A	$0.54 CHE' + 0.53 FFR - 0.30 Do' - 0.28 DIC + 0.15 AnR$	90.8	7.2

Tabla 4. Ecuaciones de regresión del coeficiente de deformación (s_{11}) a 25 °C, medido sobre la longitud total (60 mm) de la probeta como una función de la densidad anhidra corregida (Do'), el contenido de humedad de equilibrio corregido (CHE'), los extractivos obtenidos mediante extracción sucesiva con ciclohexano (CYC), diclorometano (DIC), acetona (ACE), metanol (MET) y agua caliente (AC), y propiedades anatómicas de la madera de caoba.

Grupo	Ecuaciones		
0% A =	$0.0023 - 0.0031 Do' + 0.00009 FFR$		
0% D =	$0.0024 - 0.0032 Do' + 0.00007 FFR$		
33% A =	$-0.0008 - 0.0028 Do' + 0.0005 CHE' - 0.00028 DIC + 0.00007 FFR$		
33% D =	$0.0021 - 0.0036 Do' + 0.00011 FFR + 0.00012 AC$		
58% A =	$0.0028 - 0.0042 Do' + 0.00015 FFR - 0.0008 MET$		
58% D =	$0.0023 - 0.0039 Do' + 0.00012 FFR + 0.00015 AC$		
76% A =	$0.0020 - 0.0038 Do' + 0.00013 FFR + 0.00017 AC$		
76% D =	$-0.0043 + 0.00047 CHE' - 0.0047 Do' - 0.00006 PV + 0.00028 AC - 0.0004 DIC - 0.00007 ACE + 0.00008 FFR$		
86% A =	$0.0022 - 0.0040 Do' + 0.00014 FFR + 0.00016 AC$		
86% D =	$-0.0024 - 0.0039 Do' + 0.00028 CHE' + 0.00009 FFR - 0.00005 ACE - 0.0003 DIC$		
90% A =	$-0.0044 - 0.0047 Do' + 0.00046 CHE' - 0.00007 ACE - 0.00005 PV - 0.0003 DIC + 0.00009 FFR + 0.00017 AC$		
100% A =	$-0.0060 + 0.00022 CHE' + 0.00020 FFR + 0.00004 PV$		

Grupo	Coefficientes beta	R ²	CV
0% A	$-0.64 Do' + 0.38 FFR$	72.1	9.0
0% D	$-0.65 Do' + 0.33 FFR$	65.8	10.1
33% A	$-0.52 Do' + 0.42 CHE' - 0.36 DIC + 0.31 FFR$	81.4	8.1
33% D	$-0.67 Do' + 0.44 FFR + 0.24 AC$	76.1	8.9
58% A	$-0.71 Do' + 0.55 FFR - 0.30 MET$	74.7	9.9
58% D	$-0.63 Do' + 0.45 FFR + 0.27 AC$	71.3	9.6
76% A	$-0.63 Do' + 0.48 FFR + 0.30 AC$	74.9	9.5
76% D	$0.82CHE' - 0.74Do' - 0.48PV + 0.46AC - 0.43DIC - 0.43ACE + 0.28FFR$	84.9	7.5
86% A	$-0.63 Do' + 0.47 FFR + 0.26 AC$	73.3	9.5
86% D	$-0.55 Do' + 0.51 CHE' + 0.30 FFR - 0.27 ACE - 0.26 DIC$	81.2	8.6
90% A	$-0.72 Do' + 0.67 CHE' - 0.45 ACE - 0.35 PV - 0.31 DIC + 0.31 FFR + 0.27 AC$	86.7	7.3
100% A	$0.67 CHE' + 0.48 FFR + 0.22 PV$	82.9	8.0

medido en la longitud total de la probeta. Por otra parte, y con relación a la influencia del CHE' en s_{11} medido en la parte central, ésta se observó principalmente a altos niveles de HR, es decir desde 87% hasta 100% de HR. La influencia en s_{11} , medido en la longitud total de la probeta, se presentó en una proporción doble y desde bajos (33%) hasta altos (100%) niveles de HR como una variable afectando

negativamente el s_{11} . La relación entre CHE' y s_{11} es bien reconocida en la literatura (Hernández 1993, Siau 1995, Zhou-Sharp *et al.* 2000). A altos niveles de humedad relativa la adsorción de humedad se realiza como vapor de agua condensada, donde la cantidad y tamaño de moléculas producirá una mayor perturbación de las microfibrillas y menor cohesión, reduciendo entonces la resistencia.

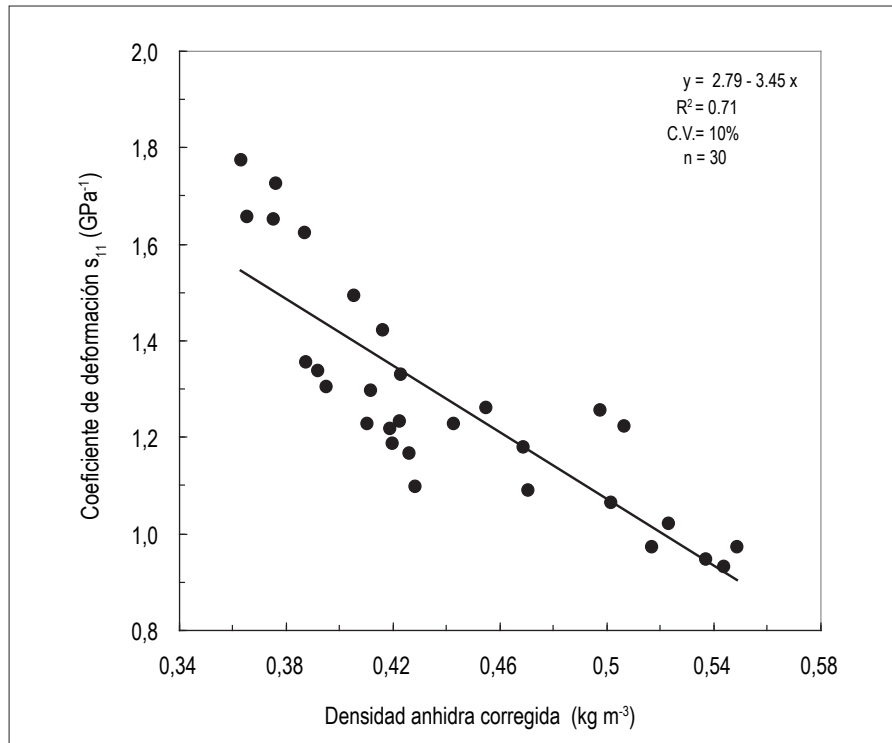


Figura 2. Coeficiente de deformación tangencial de caoba a 25 °C, en desorción a 33% de HR y medido en la parte central de la muestra como una función de la densidad anhidra corregida.

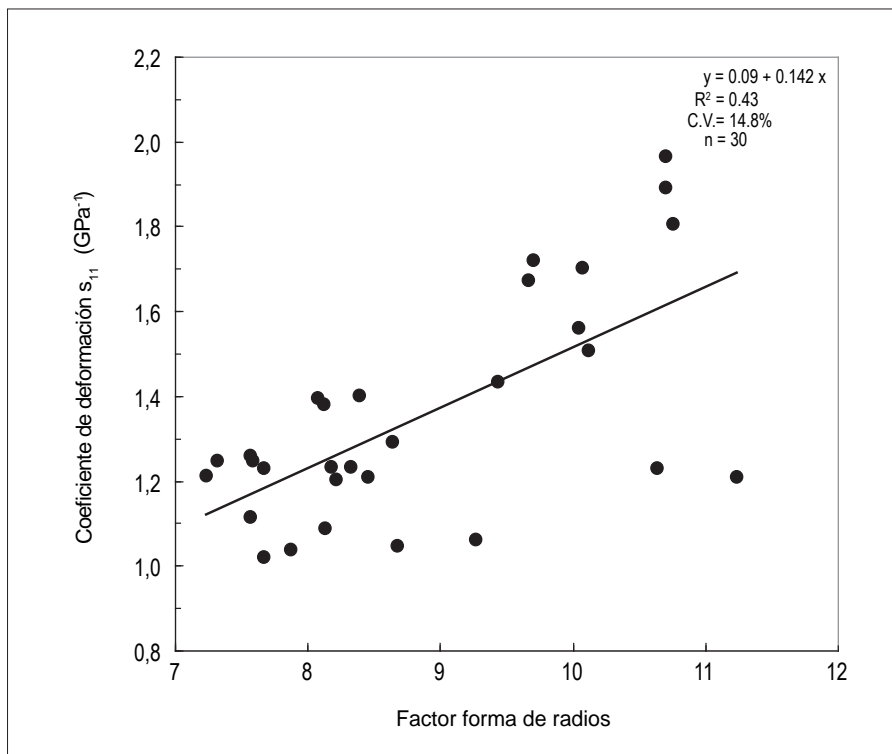


Figura 3. Coeficiente de deformación tangencial de caoba a 25 °C, en desorción a 58% de HR y medido en la parte central de la muestra (40 mm) como una función del factor forma de radios.

CONCLUSIONES

Experimentos de absorción y desorción de humedad fueron realizados con madera de caoba en un procedimiento multietápico a 25 °C. Una vez alcanzado el equilibrio se realizaron ensayos de compresión tangencial perpendicular al grano. Los resultados asociados con los análisis anatómicos y químicos conducen a las siguientes conclusiones:

1. El coeficiente de deformación tangencial (s_{11}) fue afectado principalmente por la variación de Do' y la forma de radios en la sección tangencial.
2. El esfuerzo al límite proporcional (σ_{LP}) fue afectado en gran medida por la densidad de la madera y por los parámetros radiales.
3. El s_{11} decrece mientras los extractivos solubles en diclorometano aumentan y crece con el incremento de los extractivos solubles en agua caliente.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Ajuong, EA-M. & M. Breese.** 1997. The Role of Extractives on Short-Term Creep in Compression Parallel to the Grain of Pai Wood (*Azelia africana* Smith). Wood and Fiber Science 29 (2): 161-170.
- Arévalo, R. & R. E. Hernández.** 2001. Influence of Extractives and Wood Structure on Equilibrium Moisture Content of Mahogany (*Swietenia macrophylla* King) Wood. Wood Science and Technology (inédito).
- Arganbright, D.G.** 1971. Influence of Extractives on Bending Strength of Redwood. Wood and Fiber 2 (1): 367-372.
- American Society for Testing Materials.** 1986. Standard Methods of Testing Small Clear Specimens of Timber ASTM D143. Philadelphia, Pensilvania.
- Berry, W. H., G. Ifju & T. E. McLain.** 1983. Quantitative Wood Anatomy. Relating Anatomy to Transverse Tensile Strength. Wood and Fiber 15 (4): 395-407.
- Bodig, J.** 1965. The Effect of Anatomy on the Initial Stress-Strain Relationship in Transverse Compression. Forest Products Journal 15 (5): 197-202.
- Bodig, J. & B. A. Jayne.** 1982. Mechanics of Wood and Wood Composites. Van Nostrand Reinhold. New York.
- El-Osta, M. L. M., O. A. Badran & E-M. A. Ajuong.** 1981. Crushing Strength of Three Sudanese Tropical Hardwoods in Relation to Specific Gravity, Extractive and Lignin Contents. Wood Science 13 (4): 225-232.
- Goulet, M.** 1968. Phénomènes de second ordre de la sorption d'humidité dans le bois au terme d'un conditionnement de trois mois à température normale. Seconde partie: Essais de bois d'érable à sucre en compression radiale. Note de recherches 3. Université Laval. Département d'exploitation et utilisation des bois. Québec.
- Goulet M. & G. Veer.** 1975. Pressions d'affaissement à température ambiante des bois de chêne, de bouleau et d'épinette. Notetechnique 2. Université Laval. Département d'exploitation et utilisation des bois. Québec.
- Guitard, D. & F. El Amri.** 1987. La fraction volumique en rayon ligneux comme paramètre explicatif de la variabilité de l'anisotropie élastique du matériau bois. En: Actes du 2^e colloque Sciences et Industries du Bois. Tome 1 ARBOR. Nancy. Págs. 405-412.
- Hernández, R.E.** 1989. Influence des composantes secondaires et du contrefil sur les propriétés physique-mécaniques de bois tropicaux. Ph. D. Thèse. Département des sciences du bois. Université Laval. Québec.
- Hernández, R.E.** 1993. Influence of moisture sorption on the compressive properties of hardwoods. Wood and Fiber Science. 25 (1): 103-111.
- Ifju, G.** 1983. Quantitative Wood Anatomy. Certain Geometrical-Statistical Relationships. Wood and Fiber Science 15 (4): 326-337.

- Keller, R. & F. Thiercellin.** 1975. Influence des gros rayons ligneux sur quelques propriétés du bois de hêtre. *Annals of Forest Science* 32 (2): 113-129.
- Kellogg, R. M. & G. Ifju.** 1962. Influence of Specific Gravity and Certain Other Factors on the Tensile Properties of Wood. *Forests Products Journal* 12 (10): 463-470.
- Luxford, R. F.** 1931. Effect of Extractives on the Strength of Wood. *Journal of Agricultural Research* 42 (12): 801-826.
- Maldas, D. & P. Kamdem.** 1999. Wettability of Extracted Southern Pine. *Forest Products Journal* 49 (11/12): 91-93.
- Morgan, J. W. W. & R. J. Orsler.** 1969. The Interaction of Wood With Organic Solvents. Part II. Its Significance for Extractive Location.
- Panshin, A. J. & C. De Zeeuw.** 1990. *Textbook of Wood Technology*. Vol. I. 5th edition. McGraw-Hill, New York.
- Pizzi, A. & F. A. Cameron.** 1986. Flavonoids Tannins-Structural Wood Components for Drought Resistance Mechanisms of Plants. *Wood Science Technology* 20 (2): 119-124.
- SAS Institute.** 1988. *SAS/Stat User's Guide*. 6.03 edition. SASInstitute. Cary, Carolina del Norte.
- Siau, J. F.** 1995. *Wood: Influence of Moisture on Physical Properties*. Virginia Tech. New York. Pg. 227.
- Sliker, A.** 1978. Strain as a Function of Stress, Stress Rate, and Time at 90° to the Grain in Sugar Pine. *Wood Science* 10 (4): 208-219.
- Spalt, H. A.** 1979. Water Vapor Sorption by Woods of High Extractive Content. En: *Proc. Wood Moisture Content Temperature and Humidity Relationships*. Virginia Polytechnic Institute and State University. Blacksburg, Virginia. Págs. 55-61.
- Zhou-Sharp, Y., M. Fushitani & T. Kubo.** 2000. Effect of Stress Level on Bending Creep Behavior of Wood during Cyclic Moisture Changes. *Wood and Fiber Science* 32 (1): 20-28.
- Zink-Sharp, A., J. Stelmokas & G. Hong-Mei.** 1999. Effects of Wood Anatomy on the Mechanical Behavior of Single-Bolted Connections. *Wood and Fiber Science* 31 (3): 249-263.