

# EFFECTO DE LA SORCIÓN DE HUMEDAD EN LAS PROPIEDADES FÍSICO-MECÁNICAS DE LA MADERA DE CAOBA (*Swietenia macrophylla*).

**Palabras clave:** Sorción, histéresis, hinchazón, compresión tangencial, *Swietenia macrophylla*

**Key words:** Sortión, histéresis, swelling, tangential compression, *Swietenia macrophylla*

*Rosven Libardo Arévalo*<sup>1</sup>

*Roger E. Hernández*<sup>2</sup>

## RESUMEN

Muestras de caoba de la amazonía peruana fueron utilizadas para realizar experimentos de sorción a 25°C, asociados a ensayos físicos y mecánicos. Siete condiciones de sorción de humedad en adsorción y cinco en desorción fueron analizadas para establecer las diferencias, en hinchazón y compresión tangencial, entre las curvas de adsorción y de desorción. A un determinado contenido de humedad de equilibrio, los cambios dimensionales en la dirección tangencial y en volumen fueron mayores en desorción que en adsorción. De otro lado, no hubo efectos de segundo orden de la sorción en la dirección radial. Por otra parte, la relación hinchazón tangencial/radial fue baja en ambos estados de sorción, siendo menor en adsorción que en desorción. Finalmente, hubo igualmente ausencia de efectos de segundo orden para el coeficiente de deformación tangencial y para el esfuerzo de la fibra al límite proporcional en compresión tangencial.

## ABSTRACT

Moisture sorption tests, swelling and compression tangential tests at 25°C were carried out on specimens of mahogany (*Swietenia macrophylla* King) wood from Perú. The tests were performed over seven adsorption and five desorption moisture conditions, and differences in swelling and strength

between adsorption and desorption curves at a given equilibrium moisture content were evaluated. The changes dimensional in the direction tangential and in volume they were greater in desorption than in adsorption. Of another side, no there were effects of second order of the sortion in the radial direction. On the other hand, the relation tangencial/radial swelling was low in both states of sortion, being smaller in adsorption than in desorption. The results showed that second-order effects in mahogany wood were not discernible in either the tangential compliance coefficient or for the stress at the proportional limit in tangential compression.

## INTRODUCCIÓN

Diversos estudios han demostrado que el estado de sorción de humedad tiene un efecto en las propiedades físico-mecánicas de la madera (Djolani 1970; Goulet 1975; Goulet y Hernández 1987; Hernández 1993a,b; Naderi y Hernández 1999). A igual contenido de humedad de equilibrio (CHE) tales propiedades son diferentes dependiendo si la madera se encuentra en estado de adsorción o de desorción. Goulet (1968) describió este fenómeno como los efectos de segundo orden de la sorción al medir la deformación de la madera de arce en compresión radial. Para un CHE dado, la madera es mas rígida cuando el equilibrio es alcanzado ganando humedad que perdiendo humedad.

1 Profesor, Facultad de Ingeniería Forestal. Universidad del Tolima. Ibagué, Colombia. (Fax) (8) 266-6160. Teléfono (8)2668334. E-mail: rlareval@ut.edu.co

2 Profesor, Département des sciences du bois et de la forêt, Université Laval. Québec, QC. Canada, G1K 7P4. Fax(418) 656-5262. Teléfono (418) 656-5852. E-mail: Roger.Hernandez@sbf.ulaval.ca

Goulet y Fortin (1975) demostraron que la hinchazón de la madera de arce es también afectada por el estado de sorción tanto en la dirección radial como en la tangencial. Diversas magnitudes de histéresis de la hinchazón han sido reportadas para *Fagus grandifolia* y *Picea spp.* por Seifert (1972) y para *Picea sitchensis* y *Tsuga heterophylla* por Hartley y Avramidis (1996). Nueve especies tropicales estudiadas por Hernández (1993a) presentaron también histéresis de la hinchazón. En este caso, los efectos de segundo orden de la sorción de humedad variaron con la especie y con la dirección del cambio dimensional. La histéresis de la hinchazón fue proporcionalmente mayor en la dirección tangencial comparada con la radial. Recientemente, Naderi y Hernández (1999) reportaron resultados similares para el arce.

Un estudio similar realizado por Djolani (1970) a temperaturas comprendidas entre 5° y 50°C demostraron que los efectos de segundo orden y la histéresis de sorción son fenómenos paralelos pero independientes. En este sentido, un incremento de la temperatura aumentará la relación de histéresis correspondiente a una humedad relativa (HR) determinada, pero ello no influirá en los efectos de segundo orden en compresión radial. Goulet y Hernández (1987) agregan que la ruptura perpendicular al grano es también afectada por el estado de sorción de humedad. La deformación de arce en la dirección axial fue evaluada por Laforest (1981) entre 13% y 18% de CHE. Los resultados indicaron que con respecto al coeficiente de deformación, los efectos de segundo orden son limitados tanto en tensión como en compresión. Hernández (1993b) reportó resultados similares para el coeficiente de deformación en compresión paralela y para la ruptura en condiciones de humedad del 6% hasta la saturación de nueve especies tropicales incluyendo caoba.

Los efectos de segundo orden de la sorción de humedad en las propiedades de la madera están aparentemente relacionados con un fenómeno de

relajamiento que ocurre en el estado de saturación o cerca a ella (Djolani 1970; Goulet y Fortin 1975). Barkas (1949) dedujo una interpretación similar pero sólo para la histéresis de la hinchazón. En pocas palabras, la teoría propone que las diferencias producidas entre las condiciones de adsorción y desorción y los efectos resultantes ocurren porque los ensayos en desorción se llevan a cabo después de alcanzado el punto de saturación mediante una previa adsorción. Los efectos de segundo orden son entonces respuestas a factores que generan una reorientación de los elementos leñosos los cuales se manifiestan como un relajamiento cerca o en el estado saturado. Consecuentemente, un mayor coeficiente de deformación y una mayor hinchazón en desorción para un mismo CHE implica una menor cohesión entre los componentes, por lo menos en el plano transversal. Esta teoría ha sido también considerada por Hernández (1993a,b) quien sugiere, sin embargo, mayores investigaciones para dilucidar el mecanismo de los efectos de segundo orden de la sorción de humedad. Recientemente, Naderi y Hernández (1999) reportaron que los efectos de segundo orden parecen ser un fenómeno de conjunto y no están limitados sólo al plano superficial de la madera.

Existe poca información disponible sobre los efectos del estado de sorción de humedad en las propiedades físico-mecánicas de maderas tropicales. La caoba es mundialmente reconocida como una madera noble, de gran estabilidad dimensional y fácil de trabajar. Por ende, el objetivo principal de este estudio es el de investigar el efecto del estado de sorción de humedad en la hinchazón y la compresión tangencial de esta madera. Las propiedades fueron evaluadas bajo doce condiciones de CHE obtenidas en un ciclo completo de sorción a 25°C.

## MATERIALES Y MÉTODOS

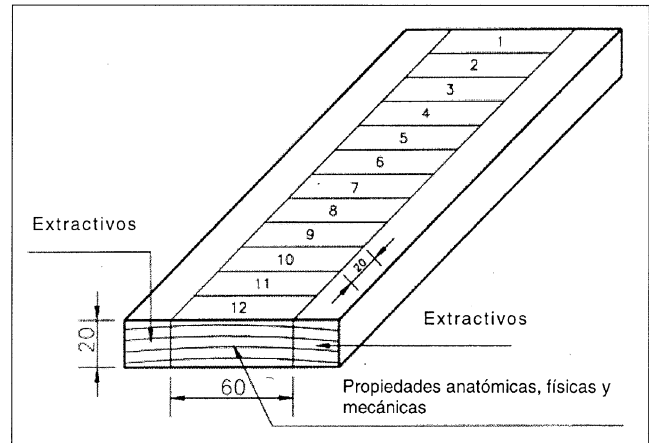
Los experimentos fueron realizados con duramen de caoba (*Swietenia macrophylla*, King) de una densidad anhidra promedia de 514 kg/m<sup>3</sup>. Ventiún piezas de madera verde libre de defectos de 93 cm

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°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 en base a la orientación y uniformidad de los anillos de crecimiento y a obtener una reducida variación de densidad entre ellas. Un mínimo de 12 probetas fueron cortadas de la parte media de cada una de ellas y con una sección transversal de 20 mm (R) x 60 mm (T) y una longitud de 20 mm (L) (**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 obtener 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 y limitar el efecto debido a la curvatura de los anillos de crecimiento.

### ENSAYOS DE SORCIÓN

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°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). Para cada uno de los 12 puntos de sorción se empleó un desecador que contenía 30 probetas cada uno. Las condiciones finales de sorción fueron realizadas con soluciones salinas saturadas o con agua



**Figura 1.** Esquema de la selección de probetas por grupo.

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 (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 la masa de las probetas fue determinada con 0.001 gramos de precisión. El contenido de humedad de equilibrio fue expresado con base en la masa anhidra.

### ENSAYOS DE HINCHAZÓN Y DE COMPRESIÓN TANGENCIAL

Una vez alcanzado cada punto de sorción, las dimensiones de las probetas en las tres direcciones principales fueron tomadas utilizando un micrómetro de 0.01 mm de precisión. Los resultados de estas mediciones permitieron establecer el porcentaje de hinchazón en dirección tangencial ( $\alpha_{TH}$ ), radial ( $\alpha_{RH}$ ) y longitudinal ( $\alpha_{LH}$ ). La hinchazón volumétrica ( $\alpha_{VH}$ ) fue estimada como la sumatoria de la hinchazón de estas tres dimensiones ( $\alpha_{TH} + \alpha_{RH} + \alpha_{LH} + \alpha_{TH} \cdot \alpha_{RH}$ ).

Los ensayos de compresión tangencial fueron realizados en una máquina Riehle equipada con una célula de carga de 340 kgs de capacidad. La

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

Experiencia	Número de grupo	Producto químico	Humedad relativa (%)	Estado de sorción	Duración n (días)	Etapas
Adsorción	1	P2O5	0	Adsorción	238	1*
	3	MgCl2	33	Adsorción	140	1*
	5	NaBr	58	Adsorción	183	1*
	7	NaCl	76	Adsorción	194	1*
	9	KCl	86	Adsorción	185	1*
	11	ZnSO4	90	Adsorción	313	1*
	12	H2O	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	H2O	100	Adsorción	80	3
	2	P2O5	0	Desorción	244	4*
	4	MgCl2	33	Desorción	147	4*
	6	NaBr	58	Desorción	148	4*
	8	NaCl	76	Desorción	151	4*
	10	KCl	86	Desorción	244	4*

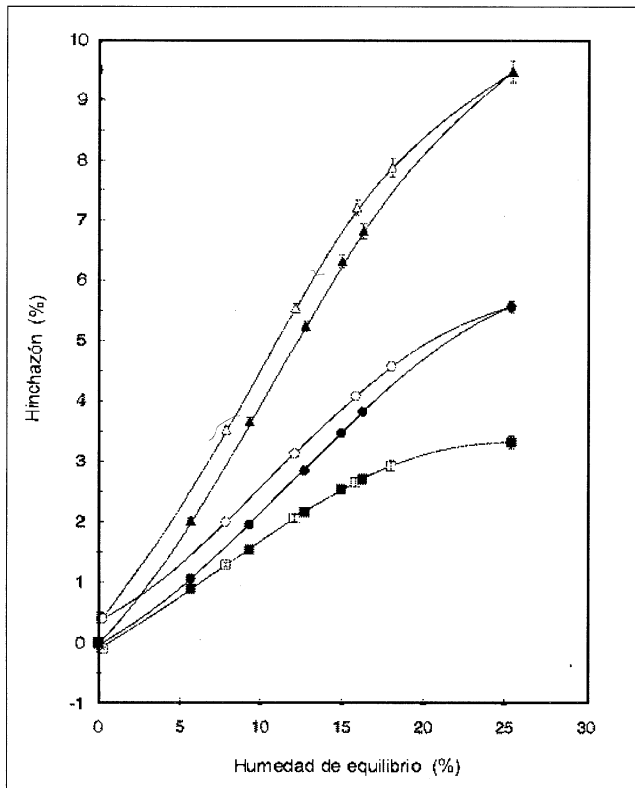
\*Etapas final

deformación fue medida, en una distancia de 40 mm localizada en la parte central de la probeta, utilizando un captor de deformación Sangamo DG1.0. Adicionalmente, la deformación total de las muestras (60 mm) fue medida con otro captor Sangamo DG1.0 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 acondicionada bajo 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 permitieron el cálculo del coeficiente de deformación tangencial ( $s_{11}$ ) cuyo recíproco corresponde al módulo de Young en la dirección tangencial. El esfuerzo al límite proporcional ( $\sigma_p$ ) fue calculado siguiendo la metodología descrita por Goulet y Veer (1975). En todos los casos el área de la probeta utilizada para los cálculos fue la determinada momentos antes del ensayo.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### SORCIÓN E HINCHAZÓN

La relación entre la hinchazón tangencial, radial o volumétrica y el CHE es presentada en la **Figura 2**. Las curvas a mano alzada fueron dibujadas teniendo en cuenta el estado de sorción. El error standard de los valores promedios de hinchazón se observan sólo en aquellos puntos donde estos exceden el tamaño del símbolo utilizado. Las curvas de hinchazón correspondientes a la adsorción y desorción muestran la histéresis característica para ambos estados de sorción. A un CHE dado, la dimensión tangencial de esta madera es mayor en desorción que en adsorción (**Figura 2**). Sin embargo, la diferencia entre las dos curvas de sorción no es discernible en el caso de la hinchazón radial. Un comportamiento similar para la misma especie fue explicado como un refuerzo de la dirección radial debido al efecto de Poisson (Hernández 1993a). La dirección tangencial es por lo tanto la responsable de la histéresis de la hinchazón observada a nivel volumétrico.



**Figura 2.** Hinchazón de la caoba en función del CHE a 25°C. Los símbolos llenos y vacíos corresponden a los estados de adsorción y desorción mientras que triángulos, círculos y cuadrados corresponden a la hinchazón volumétrica, tangencial y radial respectivamente.

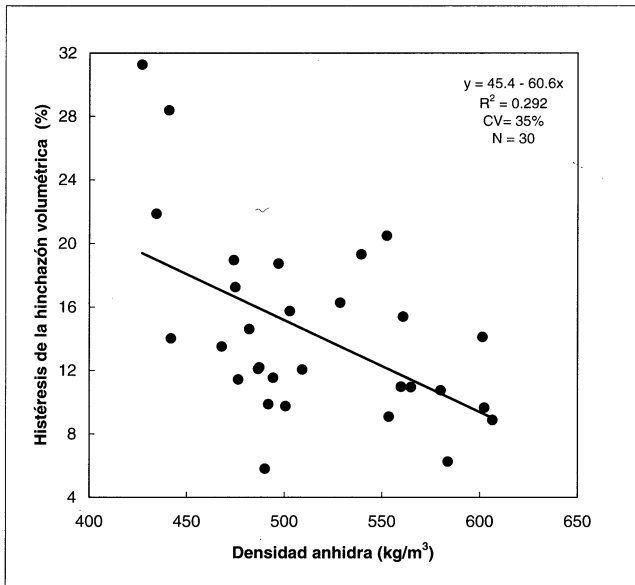
Esta investigación corrobora resultados anteriores sobre la existencia de la histéresis de la hinchazón en la madera de arce (Djolani 1970; Goulet y Fortin 1975; Hernández 1993a; Naderi y Hernández 1999), *Picea spp* y *Fagus grandifolia* (Seifert 1972) y *Picea sitchensis* y *Tsuga heterophylla* (Hartley y Avramidis 1996). Previamente, Stevens (1963) reportó una similar diferencia a baja humedad (hasta

20% CH) en *Fagus grandifolia* pero probablemente no consideró esto importante ya que sus resultados también mostraron una amplia histéresis a altas humedades (por encima de 20% CH). Esta última histéresis fue atribuida a una contracción prematura de la superficie de la madera. Sin embargo, el concepto de histéresis cerca de la saturación propuesto por Goulet y Hernández (1987) implica que aún en equilibrio en desorción y por encima de 60% HR existe simultáneamente agua libre y agua higroscópica. Por lo tanto, la pérdida de agua higroscópica antes de que toda el agua libre se haya evaporado provoca una contracción por encima del punto de saturación de las fibras. Hernández y Bizoñ (1994) demostraron que el agua higroscópica y el agua libre existen simultáneamente en un amplio rango de CH por encima del punto de saturación de las fibras.

No fue posible obtener el mismo CHE para ambos estados de sorción (**Figura 2**) lo cual no facilita la comparación directa entre los valores de hinchazón. Para estimar la magnitud de la diferencia entre las curvas de adsorción y de desorción esta diferencia se expresa como una proporción de los valores en adsorción para cada tipo de hinchazón. Las diferencias estimadas a 10% de CHE se compararon con los resultados obtenidos por Hernández (1993a) (**Tabla 2**). Los efectos de segundo orden de la sorción de humedad fueron importantes en la dirección tangencial pero ausentes en la dirección radial. En el presente trabajo, las diferencias entre las curvas de hinchazón volumétrica de caoba, en términos absolutos, fue de cerca de 0.6% (volumen seco al horno) a 10% CHE. Hernández (1993a) reportó un valor de 1.1% para el mismo CHE y para el primer ciclo de sorción

**Tabla 2.** Magnitud de los efectos de segundo orden de la sorción de humedad de la hinchazón de la madera de caoba. Media y desviación standard de las diferencias entre curvas de los estados de adsorción y desorción con relación a la curva de adsorción a 10% de CHE y 25°C.

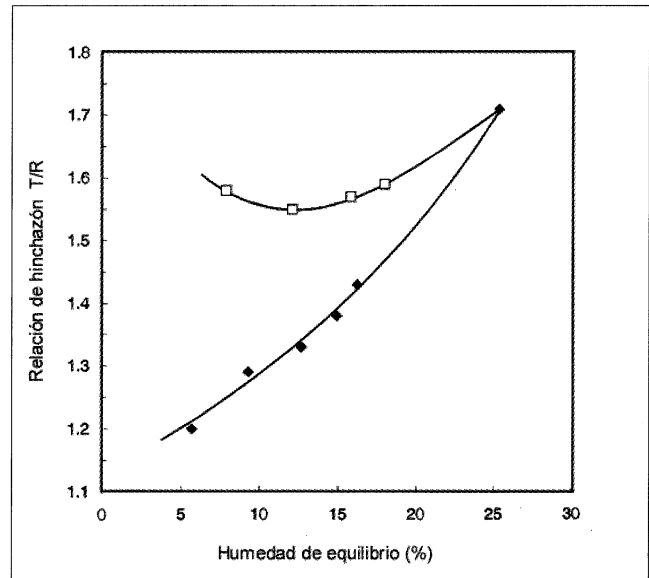
Fuente	Diferencias entre las curvas de hinchazón (%)		
	$\alpha_T$	$\alpha_R$	$\alpha_V$
Presente trabajo	20 ± 6	2 ± 7	14 ± 6
Hernández (1993a)	53 ± 30	4 ± 4	31 ± 18



**Figura 3.** Histéresis de la hinchazón volumétrica de caoba en función de la densidad anhidra.

empleado en este estudio. Dado que las técnicas experimentales fueron las mismas en los dos estudios (temperatura, número de etapas de sorción) es probable que la variación de la densidad de la madera empleada podría parcialmente explicar la diferencia entre los valores reportados. En el presente trabajo, la densidad anhidra promedio fue de  $514 \text{ t/m}^3$  comparada con  $463 \text{ t/m}^3$  obtenida por Hernández (1993a). Una regresión simple fue realizada para describir la histéresis de la hinchazón volumétrica en función de la densidad. Los resultados sugieren que la densidad de la madera tiene sólo un ligero pero significativo efecto en las diferencias entre curvas de la hinchazón volumétrica (**Figura 3**). Por lo tanto, otro parámetro importante de los efectos de segundo orden necesita ser identificado para poder explicar las diferencias entre los dos trabajos.

Se deduce de los resultados, así como de trabajos anteriores que los efectos de segundo orden de la sorción de humedad en la hinchazón podrían estar relacionados a un fenómeno de relajación que ocurriría en el estado de saturación o cerca de él. El hecho de que la dimensión tangencial fue más afectada que la radial podría explicarse de manera similar ya que esta



**Figura 4.** Relación de la hinchazón T/R de caoba en función del CHE a  $25^\circ\text{C}$ . Los símbolos llenos y vacíos corresponden a los estados de adsorción y de desorción respectivamente.

dimensión presenta la más baja resistencia en la madera. Es probable que los efectos de segundo orden se realicen en la dirección tangencial de manera tal que el plano radial podría ser reforzado por una compensación de Poisson lo cual produciría una diferencia entre curvas más baja y aún negativa en esta dirección. Con base en lo anteriormente expuesto, un mayor volumen de la madera en desorción a un CHE dado, podría implicar una más baja cohesión entre los diferentes componentes, por lo menos en el plano transversal, como ha sido propuesto por Barkas (1949) y Djolani (1970). Consecuentemente, el fenómeno de relajación debería manifestarse principalmente en la dirección tangencial. No obstante, investigación adicional es requerida con el fin de validar esta teoría.

La relación hinchazón tangencial/radial (T/R) es un parámetro utilizado para evaluar la anisotropía de la hinchazón de una madera. La relación T/R de la caoba varió desde 1.19 (33% HR) hasta 1.70 (cerca de 100% HR) para la curva de adsorción y desde 1.58 (33% HR) hasta 1.59 (86% HR) para la curva de desorción (**Figura 4**). La relación T/R de esta madera no varió a lo largo del rango higroscópico en el estado

**Tabla 3.** Valores promedios y coeficiente de variación (en cursivas) del contenido de humedad de equilibrio (CHE), coeficiente de deformación ( $s_{11}$ ) y esfuerzo al límite proporcional ( $\sigma_T$ ) en compresión tangencial de caoba en función de las condiciones de sorción a 25°C

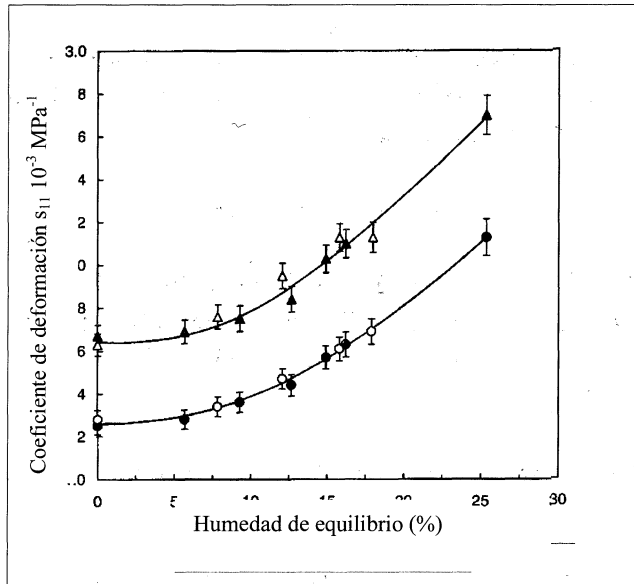
Humedad relativa (%)	CHE (%)		Parte central de la muestra				Largo total de la muestra			
			$S_{11}$ ( $\cdot 10^{-3}$ MPa $^{-1}$ )		$\sigma_T$ MPa		$S_{11}$ ( $\cdot 10^{-3}$ MPa $^{-1}$ )		$\sigma_T$ MPa	
	A'	D'	A	D	A	D	A	D	A	D
0	0	0	1.25	1.28	3.89	3.52	1.66	1.63	4.74	4.24
			18.4	18.2	19.9	24.6	16.4	16.9	16.3	21.2
33	5.67	7.8	1.28	1.34	3.02	2.88	1.7	1.76	4.0	3.45
	3.9	33.0	18.8	18.8	26.4	18.9	17.5	17.3	21.4	21.7
58	9.29	12.0	1.36	1.47	2.85	2.57	1.75	1.95	3.4	3.13
	93.2	3.2	19.4	17.5	27.1	21.1	18.6	17.0	20.1	22.2
76	12.6	15.7	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	14.9	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	

A : adsorción; D : desorción.

de desorción, indicando un alto y estable comportamiento dimensional, en este estado de sorción. El promedio de la relación T/R durante la adsorción fue más bajo (1.39) que aquel en desorción considerando inclusive el valor de T/R en el estado saturado. La diferencia entre las relaciones T/R en ambos estados de sorción confirman que el fenómeno de relajación se manifiesta principalmente en la dirección tangencial. Por lo tanto, la exclusiva presencia de los efectos de segundo orden en la dirección tangencial y su ausencia en la dirección radial contribuyen a mejorar la estabilidad dimensional de la caoba en el estado de adsorción en comparación con el estado de desorción.

### **SORCIÓN Y COMPRESIÓN TANGENCIAL**

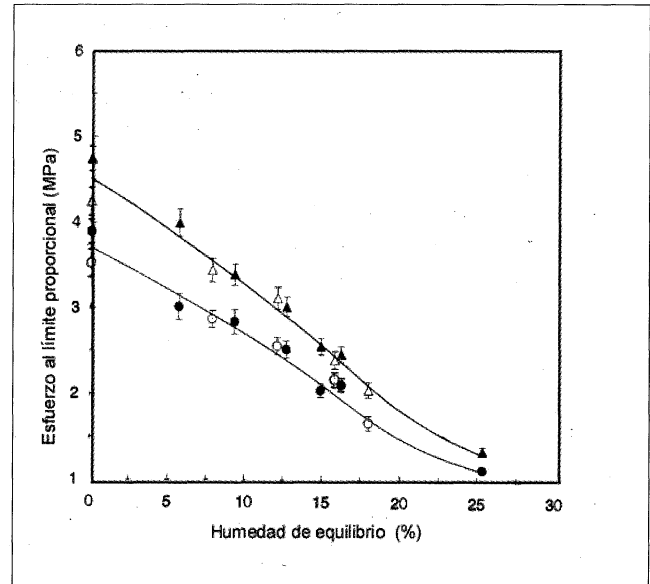
La **Tabla 3** presenta los resultados correspondientes a los ensayos mecánicos en función del CHE. Para el CHE, el uso de 30 probetas por grupo dió un error standard de la media, expresado como un porcentaje de la misma, del orden del 0.7%. Para el coeficiente de deformación tangencial ( $s_{11}$ ) el error standard de la media fue generalmente inferior al 3.5% mientras que en el esfuerzo al límite proporcional ( $\sigma_T$ ) esta dispersión aumentó hasta un 5%. Se evidencia un aumento de la dispersión para  $s_{11}$  y  $\sigma_T$  con un aumento de la HR. Este comportamiento podría estar relacionado con la existencia de una porción no



**Figura 5.** Coeficiente de deformación  $s_{11}$  de caoba en función del CHE a 25°C calculado en la parte central (40 mm) y sobre el largo total de la probeta (60 mm). Símbolos llenos y vacíos corresponden a los estados de adsorción y desorción respectivamente. Las barras indican el error standard.

viscoelástica de la curva esfuerzo-deformación aún por debajo del límite elástico tal como fue reportado por Sliker (1978). El componente no lineal viscoelástico de la curva esfuerzo-deformación podría incrementarse con el aumento del CHE. El incremento de esta porción podría conducir a una mayor variabilidad en el componente de la parte puramente elástica del esfuerzo reportado en este caso. Adicionalmente, se observó que la determinación de  $\sigma_T$  fue más complicada a medida que aumentaba el CHE.

La relación entre CHE y  $s_{11}$  puede observarse en la **Figura 5** con el estado de sorción como parámetro adicional. La figura muestra igualmente el coeficiente de deformación medido en la parte central de la probeta (40 mm) y aquel obtenido considerando toda su longitud (60 mm). La diferencia entre estos dos coeficientes indica una heterogénea distribución de la deformación dentro de la probeta. El  $s_{11}$  calculado con la dimensión total de la muestra fue en promedio 30% mayor que el  $s_{11}$  calculado en la parte central de



**Figura 6.** Esfuerzo al límite proporcional  $s_T$  de caoba en función del CHE a 25°C calculado en la parte central (40 mm) y sobre el largo total de la probeta (60 mm). Símbolos llenos y vacíos corresponden a los estados de adsorción y desorción respectivamente. Las barras indican el error standard.

la misma. Este valor es menor en comparación a aquel reportado por Hernández y Bizoñ (1994) en el caso del arce.

Por otro lado, a igual CHE, las diferencias entre las curvas de adsorción y desorción no son significativas para los dos tipos de coeficientes. Por lo tanto, respecto a  $s_{11}$  los efectos de segundo orden de la sorción de humedad pueden ser considerados como negligibles desde el punto de vista práctico ya que su presencia no es discernible para caoba. Una corrección fue realizada para expresar el  $s_{11}$  con base en la dimensión seca al horno, es decir corrigiendo el área y la distancia sobre la cual se midió la deformación.

La corrección debido a la hinchazón de la madera en el cálculo de  $s_{11}$  no afectó los resultados de las dos curvas. Las conclusiones dadas por Hernández (1993b) para  $s_{11}$  de la madera de caoba entre 12% de CHE y el estado saturado pueden extenderse entonces a todo el rango higroscópico.



La relación entre el CHE y  $\sigma_T$  se muestra en la **Figura 6**. La figura muestra igualmente el esfuerzo  $\sigma_T$  medido en la parte central de la probeta (40 mm) y aquel obtenido considerando toda su longitud (60 mm). La diferencia entre estos dos esfuerzos indica también una heterogénea distribución de la resistencia dentro de la probeta. El  $\sigma_T$  calculado con la dimensión total de la muestra fue en promedio 21% mayor que el  $\sigma_T$  calculado en la parte central de la misma. La diferencia fue así menor que aquella obtenida con el coeficiente de deformación.

Por otro lado, las curvas de  $\sigma_T$  para adsorción y desorción se presentan relativamente muy juntas la una con la otra, con diferencias realmente no significativas. La corrección del área de la probeta debido a la hinchazón para el cálculo del esfuerzo tampoco afectó significativamente los resultados de las dos curvas. Por lo tanto los efectos de segundo orden de la sorción de humedad respecto a  $\sigma_T$  son igualmente imperceptibles para la madera de caoba.

## CONCLUSIONES

Experimentos de sorción de humedad en adsorción y desorción con madera de caoba fueron realizados utilizando un procedimiento multietápico a 25°C. El CHE alcanzado asociado con ensayos de hinchazón y de compresión tangencial produjo los siguientes resultados:

1. A un CHE dado, la dimensión tangencial y por lo tanto el volumen de la madera son mayores cuando el equilibrio es alcanzado en desorción que en adsorción.
2. Los efectos de segundo orden de la sorción de humedad no se presentan en la hinchazón radial.
3. La relación de hinchazón T/R para caoba es más baja en el estado de adsorción que en el estado de desorción.
4. A un CHE dado el coeficiente de deformación tangencial es similar cuando el equilibrio es alcanzado en adsorción que en desorción.
5. El esfuerzo al límite proporcional en compresión tangencial parece no ser afectado por los efectos de segundo orden de la sorción de humedad.

## AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al Consejo Nacional de Ciencia e Ingeniería del Canadá y a la Universidad del Tolima por el apoyo prestado.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

**AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. 1986.** Standard methods of testing small specimens of timber. ASTM D143. Philadelphia, Pa. USA

**BARKAS, W. W. 1949.** The swelling of wood under stress. His Majesty's Stationery Office, London, UK.

**BODIG, J. Y B.A. JAYNE. 1982.** Mechanics of wood and wood composites. Van Nostrand Reinhold, New York

**DJOLANI, B. 1970.** Hystérèse et effets de second ordre de la sorption d'humidité dans le bois aux températures de 5°, 21°, 35° et 50°C. Note de recherches N°8, Département d'exploitation et utilisation des bois. Université Laval, Québec, Canada.

**GOULET, A. 1975.** Étude des changements de densité de la matière ligneuse au cours d'un cycle de sorption d'humidité. M.Sc. Thesis. Département d'exploitation et utilisation des bois, Université Laval, Québec.

**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 du bois d'érable à sucre en compression radiale. Note de recherches N°3, Département d'exploitation et utilisation des bois, Université Laval, Québec.

**GOULET, M. Y Y. FORTIN. 1975.** Mesures du gonflement de l'érable à sucre au cours d'un cycle de sorption d'humidité à 21°C. Note de recherches N°12, Département d'exploitation et utilisation des bois, Université Laval.

**GOULET, M. Y R.E. HERNÁNDEZ. 1987.** Relaciones entre la sorción de humedad y la resistencia de la madera de arce a la tensión perpendicular a las fibras. Actas de la IX Conferencia Interamericana sobre tecnología de materiales, Santiago, Chile, Octubre 5-9, 1987, pp. 699-703.

**HARTLEY, I.D. Y S. AVRAMIDIS. 1996.** Static dimensional changes of sitka spruce and western hemlock influenced by sorption conditions. *J. Inst. Wood Sci.* 14(2),83-88.

**HERNÁNDEZ, R.E. 1993A.** Influence of moisture sorption history on the swelling of sugar maple wood and some tropical hardwoods. *Wood. Sci. Technol.* 27(5), 337-345.

**HERNÁNDEZ, R.E. 1993B.** Influence of moisture sorption on the compressive properties of hardwoods. *Wood Fiber Sci.* 25(1),103-111.

**HERNÁNDEZ, R.E. Y M. BIZOŇ. 1994.** Changes in shrinkage and tangential compression strength of sugar maple below and above the fiber saturation point. *Wood Fiber Sci.* 26(3), 360-369.

**LAFORÉST, P. YA. PLAMONDON. 1976.** Effet d'une pression hydrostatique élevée sur les

membranes du bois. Seconde partie: Propriétés hygroscopiques et mécaniques du bois. Note de recherches N°15, Département d'exploitation et utilisation des bois, Université Laval, Québec, Canada

**LAFORÉST, P. 1981.** Relation entre l'état de sorption et les déformations élastiques du bois d'érable à sucre en traction et en compression de fil. D.Sc. thesis. Département d'exploitation et utilisation des bois, Université Laval. Québec, Canada

**NADERI, N. Y R.E. HERNÁNDEZ. 1999.** Influence of wood planing on the second-order effects of moisture sorption in sugar maple. *Wood Sci. Technol.* 33(3), 215-222.

**SEIFERT, J. 1972.** Zur Sorption und Quellung von Holz und Holzwerkstoffen. Zweite Mitteilung: Das Quellungsverhalten von Holz und Holzwerkstoffen. *Holz Roh- Werkstoff* 30 (8), 294-303.

**SLIKER, A. 1978.** Strain as a function of stress, stress rate, and time at 90° to the grain in sugar pine. *Wood Sci.* 10(4):208-219

**STEVENS, W. C. 1963.** The transverse shrinkage of wood. *Forest Prod. J.* 13(9), 386-389.