

# Densidad del tablero de partículas y estabilidad dimensional

Particleboard density and dimensional stability

HERNAN POBLETE, ERNESTO LONCOMILLA, LUIS INZUNZA

Inst. de Tecnología de Productos Forestales, U. Austral de Chile, Casilla 567, Valdivia, Chile.

E-mail: [hpoblete@uach.cl](mailto:hpoblete@uach.cl)

## SUMMARY

The effect of board density on dimensional stability was determined using particleboards of Canelo (*Drimys Winteri* Forst.) with densities between  $550 \text{ kg/m}^3$  and  $750 \text{ kg/m}^3$ . The boards were subjected to relative air humidities between 46% and 85% at 20 °C. Thickness and longitudinal expansion was determined; the thickness expansion was 34 times greater than the longitudinal expansion. A variation of 1% in air humidity produced a thickness expansion that increased from 0.914% to 1.195% when board densities changed from  $550 \text{ kg/m}^3$  to  $700 \text{ kg/m}^3$ . For the same density variation, a change in linear expansion from 0.027% to 0.37% was determined. Equilibrium moisture content was also determined, and was found to increase as the board density decreased.

*Key words:* Particleboard, dimensional stability, density.

## RESUMEN

Se determinó el efecto de la densidad del tablero sobre las variaciones dimensionales. Se confeccionaron tableros de Canelo (*Drimys winteri* Forst.) con densidades entre  $550 \text{ kg/m}^3$  y  $750 \text{ kg/m}^3$  y fueron sometidos a un climatizado con 20°C y diferentes humedades relativas entre 46% y 85%. Se registró la variación dimensional en el espesor y longitudinal, siendo la primera hasta 34 veces mayor que en el sentido lineal. La variación del espesor por cada 1% de cambio en la humedad relativa varió de 0,914% a 1,195% al aumentar la densidad del tablero de  $550 \text{ kg/m}^3$  a  $700 \text{ kg/m}^3$ . En el caso de la expansión longitudinal, ésta aumentó de 0,027% a 0,37%. Paralelamente se determinó la humedad de equilibrio de los tableros. La humedad de equilibrio fue mayor en los tableros de menor densidad.

*Palabras claves:* Tablero de partículas, estabilidad dimensional, densidad.

## INTRODUCCION

Los tableros de partículas poseen propiedades higroscópicas similares a la madera sólida, siendo dimensionalmente inestables cuando son expuestos al vapor de agua o agua líquida. Los tableros adsorben humedad de la atmósfera y aumentan su volumen, provocando defectos importantes y descalificadores en los productos (Kelly 1977). Ante cambios de la humedad relativa del aire, la magnitud del cambio dimensional es mayor en los tableros que en la madera. Kollmann *et al.* (1975) compararon gráficamente la estabilidad dimensional de tableros de partículas con la de madera de pino, determinando que el hinchamiento del espe-

sor del tablero fue mayor que el hinchamiento tangencial de la madera sólida. Moslemi (1974) señala que el hinchamiento en los tableros puede ser tres veces mayor al de la madera.

En los tableros las partículas no tienen una orientación definida, orientación al azar, las fibras están dispuestas en todos los ángulos posibles, pero paralelas a la superficie del tablero. Consecuentemente, la expansión lineal, paralela y perpendicular a la dirección de fabricación, no presenta diferencias importantes. Sin embargo, los cambios en este sentido son levemente mayores en los tableros que los determinados en el sentido longitudinal en madera sólida (Kelly 1977). Al comparar la variación dimensional en el espesor y lineal, Niemz

y Poblete (1996) determinaron, en tableros de partículas, cambios dimensionales 30 veces mayor en el espesor que en el sentido longitudinal.

A continuación se revisan algunos de los aspectos tecnológicos que más afectan los cambios dimensionales.

*Geometría de las partículas.* El espesor de las partículas tiene un efecto importante sobre la estabilidad dimensional de los tableros. La estabilidad del tablero en su espesor aumenta cuando se reduce el espesor de la partícula. Se indica además que cuando se aumenta la longitud de las partículas mejora la estabilidad (Kelly 1977). Post (1958) y Jorgensen y Odell (1961) determinaron que al trabajar con partículas más delgadas se mejora la estabilidad en el espesor. Con respecto a la estabilidad en el sentido longitudinal del tablero, Suchsland (1972) concluyó que la geometría de la partícula es el factor más importante para controlar la expansión lineal.

*Densidad de la materia prima.* Al producir el tablero, se comprimen las partículas a una densidad mayor que la que presentaban en estado natural. Para una densidad de tablero dada, un incremento en la densidad del material leñoso causa una baja en las propiedades mecánicas del tablero y un incremento en la expansión lineal y en el espesor (Vital *et al.* 1974).

*Adhesivo.* Larmore (1959) demostró que la cantidad de resina utilizada en la fabricación de los tableros afecta la estabilidad dimensional en espesor. Con un incremento en la cantidad de adhesivo se obtiene un menor cambio dimensional en el espesor del tablero. Con respecto a la expansión lineal, Gatchell *et al.* (1966) mencionan que sólo se reduce levemente por un aumento en el contenido de adhesivo.

*Densidad del tablero.* La densidad del tablero determina el grado de compactación de las partículas y es dependiente de la densidad de la madera y del proceso de prensado aplicado.

En términos generales, los tableros con una densidad entre 400 y 800 kg/m<sup>3</sup> se caracterizan por su buena estabilidad dimensional. Los tableros de alta densidad, > 800 kg/m<sup>3</sup>, tienen una estabilidad dimensional menor.

Se han realizado estudios sobre la influencia de la densidad en el hinchamiento, medido al sumer-

gir probetas en agua, sin que los resultados permitan sacar conclusiones unánimes. Algunos autores señalan que el grado de hinchamiento se ve incrementado ante un aumento de la densidad (Hann *et al.* 1962, Brown *et al.* 1966, Gatchell *et al.* 1966, Halligan y Schniewind 1972, Moslemi 1974, Hse 1975). Un segundo grupo de investigadores mencionan que no existe una relación clara entre la densidad y cambio dimensional (Stewart y Lehmann 1973, Suchsland 1973, Urzúa y Poblete 1980). Por el contrario, Vital *et al.* (1974) determinan que un incremento en la densidad del tablero causa una baja en el hinchamiento. Berterreche (1994) señala que, luego de períodos largos de inmersión, al penetrar el agua se vence la resistencia de la unión madera-adhesivo. Como los tableros más densos tienen una cantidad de material lignocelulósico mayor, y una mayor deformación por compactación, el hinchamiento producido también será mayor (Berterreche 1994).

Stewart y Lehmann (1973) señalan que la estabilidad dimensional está determinada por la interacción entre la densidad de la especie y la densidad del tablero. En los tableros producidos por prensado plano, los valores más bajos de densidad se registran en el centro del tablero, formando un perfil de densidad que aumenta hacia las capas más superficiales. Moslemi (1974) señala que estas diferencias de densidad resultan en diferencias en el comportamiento de la estabilidad dimensional. Las áreas de más alta densidad tienen variaciones dimensionales más altas que las áreas de menor densidad, generándose un estrés que induce a rupturas dentro de una partícula y fallas en las uniones entre las partículas.

En cuanto a la estabilidad dimensional y su relación con las condiciones climáticas, Niemz y Poblete (1996) estudiaron tableros de fibras (MDF) y de partículas con diferentes densidades y variaron la humedad relativa del aire entre 40% y 95%, manteniendo la temperatura constante en 23°C. Las condiciones del estudio de Niemz y Poblete (1996) no permiten observar una relación clara entre la densidad del tablero y el cambio dimensional. Berterreche (1994) tampoco encuentra una relación entre la densidad y la variación en el espesor luego de someter tableros de diversas densidades, entre 570 y 655 kg/m<sup>3</sup>, a climas con 70% y 90% de humedad relativa.

Considerando lo planteado anteriormente, y la necesidad de conocer el comportamiento de la estabilidad dimensional ante cambios climáticos

controlados, se planteó el presente estudio. Además, como objetivo específico, se consideró determinar los cambios dimensionales ante variaciones de la humedad relativa del aire, dejando constante la temperatura y variando la densidad del tablero. Para efectuar el estudio se escogió la especie Canelo, ya que en estudios anteriores se presenta como una madera de buenas aptitudes y es un recurso que puede constituirse en la base para el desarrollo de este tipo de industrias en la zona sur del país.

## MATERIAL

*Madera.* Para la confección de los tableros se utilizaron trozas de diámetro inferior a 20 cm de Canelo (*Drimys winteri* Forst.).

*Adhesivo.* Se utilizó urea-formaldehído. El producto correspondió a Adelite UT-60, proporcionado por la empresa Oxiquim S.A., se aplicó en solución con un 61% de sólidos, con la adición de un catalizador ( $\text{NH}_4\text{Cl}$ ) en solución al 20% y en una proporción de 0,5%. El catalizador fue aplicado sólo en la capa media. No se consideraron agentes hidrófobos que puedan interferir en los cambios dimensionales.

## METODO

*Preparación de las partículas.* Las trozas de Canelo fueron astilladas y procesadas en una viruteadora de anillos. Las partículas fueron secadas hasta un contenido de humedad promedio de 4% base madera seca. Las partículas se tamizaron y separaron para obtener material para la capa media y capa externa del tablero. Debido a la influencia del tamaño de la partícula sobre la estabilidad dimensional, se efectuó un control estricto de la geometría a fin de caracterizar el material usado y descartar su efecto sobre las variaciones dimensionales.

*Densidad, geometría y valor de pH de las partículas.* Para determinar la densidad básica se relacionó el peso anhidro y el volumen medido por desplazamiento de agua. Tratándose de una mezcla homogénea de partículas, se asumió que no existe un efecto de la densidad de la madera sobre las variaciones dimensionales de los tableros.

Para la caracterización de la geometría, se tamizaron tres muestras de 100 g con cinco tamices de 4 - 2,79 - 2,0 - 1,0 y 0,5 mm de paso. De cada fracción obtenida se tomaron partículas al azar a las que se midieron el largo y espesor. Los valores promedio de cada clase de tamaño se ponderaron por su participación porcentual en el peso del total y se calculó el Coeficiente de Esbeltez.

La determinación del valor pH se realizó en suspensiones de agua destilada y madera. Se emplearon muestras de 10 g que se mezclaron con 100 ml de agua destilada. Las mediciones se efectuaron después de 4 horas de agitación mediante un pH-metro.

*Fabricación de tableros.* Se fabricaron tableros con cuatro niveles de densidad; 600  $\text{kg/m}^3$ , 650  $\text{kg/m}^3$ , 700  $\text{kg/m}^3$  y 750  $\text{kg/m}^3$ . Para cada densidad se fabricaron cuatro repeticiones. Debido a las diferencias internas de densidad que se producen en los tableros, para mejorar la exactitud del estudio, la medición de densidad se realizó posteriormente en cada probeta.

Los tableros se elaboraron considerando las siguientes características que permanecieron constantes:

Espeor:	16 mm
Número de capas:	3
Proporción de las capas:	Capa media de 60%, Capas externas de 40%
Adhesivo:	7,8%; Capa media: 7%; Capa externa: 9%
Catalizador:	Cloruro de amonio (Sol.: 20%)
Presión máxima:	4,5 $\text{N/mm}^2$ aplicada durante 1 min.
Presión media:	1,2 $\text{N/mm}^2$ aplicada durante 2 min.
Temperatura de prensado:	190°C
Tiempo de prensado:	15 segundos/mm de espesor del tablero

Se tuvo especial cuidado de no alterar las condiciones de prensado para evitar el efecto que pudiese tener en las variaciones dimensionales.

*Preparación de las probetas.* Las probetas para la medición del cambio dimensional en el espesor tuvieron 50 mm de arista por 16 mm de espesor y se extrajo una muestra de 20 probetas por tablero. Las probetas requeridas para la medición de la variación longitudinal tenían 200 mm de largo por 25 mm de ancho por 16 mm de espesor y se extrajo una muestra de 18 probetas por tablero.

*Climatizado de las probetas.* Las probetas se climatizaron en una cámara de clima Heraeus programable (precisión de  $\pm 3^{\circ}\text{C}$  y  $\pm 4\%$  de humedad relativa) hasta alcanzar peso constante. Se consideró una temperatura constante de  $20^{\circ}\text{C}$  y cuatro condiciones de humedad relativa, 46%, 59%, 72% y 85%. El primer acondicionamiento se realizó a  $20^{\circ}\text{C}$  con 65% de humedad relativa, según lo especifica la norma DIN 50014, para luego continuar con el esquema de climatizado dispuesto.

*Determinación de variaciones dimensionales.* La primera medición se realizó luego de un acondicionado a clima normal ( $20^{\circ}\text{C}/65\%$  HR según DIN 50014), luego se climatizó a la temperatura establecida en el estudio ( $20^{\circ}\text{C}$ ) y con la humedad relativa más baja (46%). En etapas sucesivas se fue elevando la humedad relativa del aire hasta completar el ciclo con un 85% de humedad relativa.

Las variaciones del espesor y longitudinal se determinaron con registradores digitales, con una precisión de 0,001 mm. Las mediciones se realizaron una vez que las probetas alcanzaron peso constante en cada condición climática. La variación dimensional, obtenida con cada nivel de humedad relativa del aire, se calculó por diferencias de medida con respecto a la condición de más baja humedad (46%).

Una vez realizada la medición con la última condición de climatizado (85%), las probetas fueron llevadas a estado anhidro en estufa a  $103^{\circ}\text{C}$ . Las variaciones dimensionales se calcularon de acuerdo a la siguiente fórmula:

$$E = \frac{(d_1 - d_0)}{d_0} \times 100$$

Donde: E = Expansión (%);  $d_1$  = Dimensión a 46%, 59%, 72%, 85% y 0 % de humedad relativa;  $d_0$  = Dimensión inicial, a 46% de humedad relativa.

*Determinación del contenido de humedad de equilibrio.* Las probetas fueron pesadas luego de ser sometidas a cada condición climática; luego del secado en estufa a  $103^{\circ}\text{C}$  hasta peso constante, se calculó la variación de la humedad de equilibrio con las diferentes condiciones de clima. La humedad de equilibrio se calculó de acuerdo con la siguiente fórmula:

$$H_e = \frac{(P_1 - P_0)}{P_0} \times 100$$

Donde:  $H_e$  = Humedad de equilibrio (%);  $p_1$  = Peso a 46, 59, 72 y 85% de humedad relativa;  $p_0$  = Peso seco de la probeta.

*Determinación de otras propiedades de los tableros.* Por su importancia, se determinaron la densidad y el perfil de densidad de los tableros. Como un antecedente complementario, se determinaron las propiedades flexión y tracción. La densidad se determinó en cada una de las probetas de estabilidad dimensional y en las preparadas para los ensayos mecánicos. Lo anterior se realizó para obtener pares de datos (densidad-variación dimensional) que permiten un mejor análisis estadístico de la relación entre ambas propiedades. Las mediciones del perfil de densidad del tablero se realizaron por medio de radiación con rayos Gamma. Estas probetas tenían una arista de 50 mm.

## RESULTADOS Y DISCUSION

*Caracterización de las partículas utilizadas.* Las mediciones de densidad de la madera de Canelo determinaron una media de  $418 \text{ kg/m}^3$ , con un mínimo de  $375 \text{ kg/m}^3$  y un máximo de  $482 \text{ kg/m}^3$ . Los valores son similares a los registrados por Urzúa y Poblete (1980), quienes determinaron valores entre  $312 \text{ kg/m}^3$  y  $454 \text{ kg/m}^3$ , con una media de  $375 \text{ kg/m}^3$ . Pérez y Cubillos (1984) registran una densidad anhidra promedio de  $459 \text{ kg/m}^3$ .

Debe tenerse presente que, para obtener tableros con propiedades adecuadas, la densidad del tablero debe ser mayor que la de la madera, razón de compresión mayor a 1.0 (Urzúa y Poblete 1980). En el cuadro 1 se expone la razón de compresión empleada para la construcción de cada tipo de tablero. En él se observan valores muy similares a los reales aplicados en la industria chilena.

El valor de pH fue de 4,8 con un valor mínimo de 4,6 y un valor máximo de 5,1. Este valor es normal para una latifoliada creciendo en Chile. Corvalán (1987) registra con Canelo valores de pH entre 4,9 y 5,1 con madera anhidra y entre 5,8 y 6,0 en estado verde. Albin (1975) reporta un pH de 4,9 con madera en estado anhidro.

CUADRO 1

Razón de compresión para cada densidad de tablero.  
Compression ratio for each board density

Razón de compresión	Densidad de tablero (kg/m <sup>3</sup> )
1,44	600
1,56	650
1,67	700
1,79	750

Al trabajar con un adhesivo de fraguado ácido, urea-formaldehído, es conveniente contar con un cierto grado de acidez. Con ello se mejoran el fraguado y las propiedades físicas y mecánicas de los tableros. Albín (1975) señala que es conveniente aplicar catalizadores en la fabricación de tableros de partícula para disminuir el ambiente de pH y con ello facilitar el fraguado, acortando el ciclo de prensado. Teniendo en consideración lo anterior y los valores de pH registrados en el presente estudio, se optó por aplicar cloruro de amonio (0,5% en la capa media) como catalizador.

La geometría de las partículas está dada por el largo y ancho de ellas y por el coeficiente de esbeltez (relación entre ambas medidas). Los resultados pueden observarse en el cuadro 2 separados para capa media y externa.

Los valores del cuadro 2 son similares a los reportados para Canelo por Urzúa y Poblete (1980),

quienes obtuvieron valores de coeficiente de esbeltez de 66,6 y 20,9 para las partículas gruesas y delgadas respectivamente. Urzúa y Poblete (1980) determinaron en las partículas gruesas de Canelo un espesor de 0,38 mm y un largo de 25,3 mm, valores que son semejantes a los obtenidos en el presente ensayo, 0,4 mm y 20,3 mm de espesor y longitud respectivamente. En la capa externa se determinaron un espesor promedio de 0,3 mm y un largo promedio de 7,1 mm. Con este tipo de partículas Urzúa y Poblete (1980) midieron un espesor de 0,25 mm y un largo de 5,22 mm.

Considerando que a la geometría de la partícula se le atribuyen efectos importantes en los cambios dimensionales de los tableros, se tuvo especial cuidado de no alterar el tamaño entre los distintos tipos de tablero, manteniéndose constante la mezcla de partículas.

Las determinaciones de humedad de la madera al momento de fabricar los tableros arrojaron valores de 4,6% para las partículas que formaron la capa media y 7,6% para las de capa externa. Estos valores son normales en la producción industrial de los tableros.

*Caracterización de los tableros.* Para caracterizar los tableros se determinaron las propiedades mecánicas flexión y tracción y se efectuó un análisis del perfil de densidad. Las propiedades mecánicas por rango de densidad se presentan en el cuadro 3. Al efectuar un análisis de correlación entre la densidad y las propiedades se registraron R<sup>2</sup> mayores a 0,9, lo que indica la alta dependencia entre las variables.

CUADRO 2

Dimensiones y coeficiente de esbeltez (CE) de las partículas.  
Dimensions and slenderness (CE) of particles

Tamiz (mm)	CAPA MEDIA				CAPA EXTERNA			
	Participación (%)	Largo (mm)	Espesor (mm)	C.E	Participación (%)	Largo (mm)	Espesor (mm)	CE.
>4,0	37,7	28,6	0,5	68,4	-	-	-	-
4,0-2,79	14,1	26,4	0,5	61,2	0,8	22,4	0,4	36,9
2,79-2,0	15,6	15,9	0,4	44,8	4,7	13,3	0,4	28,5
2,0-1,0	23,9	12,0	0,3	37,9	37,2	11,2	0,4	28,0
1,0-0,5	5,8	5,6	0,2	29,1	30,2	5,2	0,3	20,6
<0,5	2,9	3,1	0,1	34,0	27,1	2,2	0,1	21,4
Total	100	20,3	0,4	53,6	100	7,1	0,3	24,1

CUADRO 3  
 Propiedades mecánicas de los tableros.  
 Mechanical properties of boards.

Densidad (kg/m <sup>3</sup> )	Tracción (N/mm <sup>2</sup> )		Flexión (N/mm <sup>2</sup> )			
			MOR		MOE	
	Promedio	DE	Promedio	DE	Promedio	DE
550 - 600	0,61	0,038	15,3	1,2	1507	134
600 - 650	0,67	0,082	18,1	2,6	1881	162
650 - 700	0,68	0,061	21,6	2,6	2062	152
> 700	0,68	0,082	24,8	1,5	2118	181

En cuanto al perfil de densidad, éste presentó la forma típica para este tipo de tablero. En la figura 1 se presenta el perfil de densidad para el tablero de menor densidad, 602 kg/m<sup>3</sup>, en comparación con el tablero de mayor densidad, 766 kg/m<sup>3</sup>. Todos los tableros presentaron curvas semejantes, ubicándose entre las curvas que se presentan en la figura 1. Entre tableros de distintas densidades la

curva del perfil de densidad se vio desplazada a medida que se aumentaba la densidad del tablero, es decir, tableros más densos registraron valores más altos en todo el perfil. En todos los casos se presentó el punto máximo de densidad entre 2 a 3 mm bajo la superficie del tablero, disminuyendo gradualmente hasta llegar a un punto mínimo en un tramo de ± 5 mm alrededor del centro.

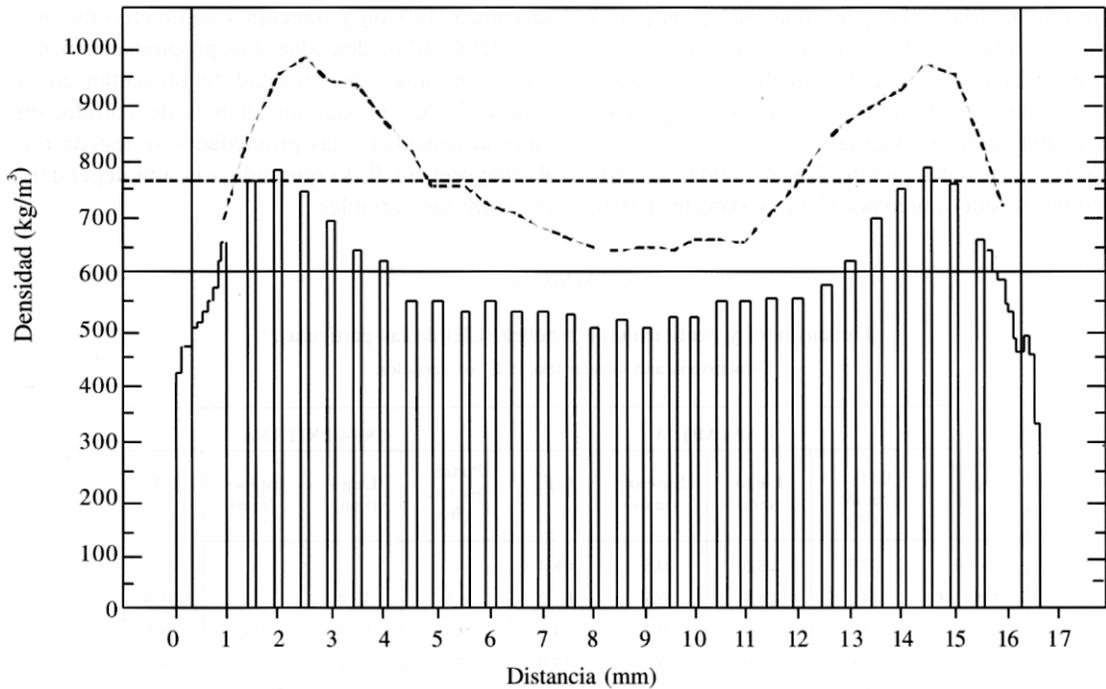


Figura 1. Perfil de densidad de dos tableros de partículas con densidades medias de 602 kg/m<sup>3</sup> (barras) y 766 kg/m<sup>3</sup> (línea segmentada).

Density profile of boards with mean densities of 602 kg/m<sup>3</sup> (bars) and 766 kg/m<sup>3</sup> (segmented line)

Un parámetro importante de controlar en el perfil de densidad es la relación entre la densidad más alta y la densidad en el centro del tablero. La relación entre estos valores, que está muy relacionada con las propiedades mecánicas del tablero, no mostró diferencias significativas para los distintos tratamientos. Lo anterior significa que el proceso de densificación durante el prensado no sufrió alteraciones por las diferencias en las densidades de tablero que se pretendía obtener.

*Expansión en el espesor.* Las variaciones de esta propiedad se entregan en el cuadro 4. La medición se realizó en base al espesor del tablero a una humedad relativa del aire de 46%, perma-

neciendo la temperatura constante, 20°C. En el cuadro 4 los valores negativos corresponden a contracciones ocurridas en los tableros al ser llevados al estado anhidro.

Como era de esperar, al examinar los valores presentados en el cuadro 4 se observa que al aumentar la humedad relativa del aire aumenta el espesor del tablero. Lo anterior se ve confirmado al realizar un análisis de varianza con un nivel de confianza del 95%. Gráficamente la relación puede observarse para los cuatro niveles de densidad en la figura 2. Las regresiones ajustadas para cada tipo de tablero entre humedad relativa y expansión en el espesor se presentan en el cuadro 5.

CUADRO 4

Expansión en el espesor calculado sobre la base de la medida del espesor a una humedad relativa del aire de 46%.

Thickness expansion calculated as a percentage of thickness at 46% relative air humidity.

Densidad (kg/m <sup>3</sup> )	Unidad	Humedad relativa (%)					
		46%	59%	65%	72%	85	0%
550 - 600	mm	0,000	0,057	0,101	0,267	0,640	-0,153
	%	0,000	0,350	0,617	1,637	3,919	-0,944
600 - 650	mm	0,000	0,061	0,107	0,279	0,672	-0,086
	%	0,000	0,372	0,654	1,707	4,106	-0,527
650 - 700	mm	0,000	0,061	0,103	0,295	0,757	0,078
	%	0,000	0,372	0,624	1,790	4,593	0,469
> 700	mm	0,000	0,065	0,112	0,303	0,819	0,114
	%	0,000	0,390	0,675	1,832	4,943	0,684

CUADRO 5

Regresiones para la expansión en el espesor en función de la humedad relativa del aire.

Regressions for thickness expansion depending on relative air humidity.

Densidad (kg/m <sup>3</sup> )	Ecuación de regresión	R <sup>2</sup>	p	e
550 - 600	$E = 7,588 - 0,308 * HR + 0,003115 * HR^2$	0,99	0,003	0,113
600 - 650	$E^e = 7,813 - 0,318 * HR + 0,003232 * HR^2$	0,99	0,002	0,115
650 - 700	$E^e = 9,794 - 0,391 * HR + 0,003875 * HR^2$	0,99	0,003	0,146
> 700	$E^e = 10,915 - 0,432 * HR + 0,004255 * HR^2$	0,99	0,002	0,149

Ee = Expansión en el espesor (%); HR = Humedad relativa (%); R<sup>2</sup> = Coeficiente correlación;

p = Nivel de significancia al 5%; e = Error estándar de la estimación.

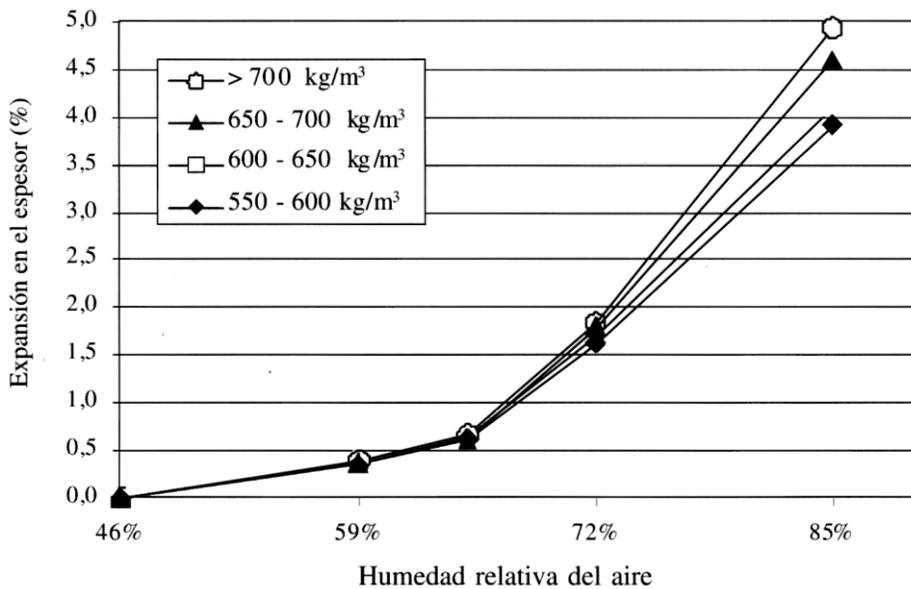


Figura 2. Variación del espesor en función de la humedad relativa con 20°C para cada nivel de densidad.

Thickness variation with different relative air humidity at 20 °C for the different board densities.

En el cuadro 5 puede observarse que existe un alto grado de asociación entre las variables expansión en el espesor y humedad relativa para un nivel de confianza del 95%. Esta relación se ve respaldada por la literatura, en la cual existe unanimidad sobre la tendencia de las curvas y el alto grado de correlación (Kelly 1977).

Con respecto a la relación existente entre la densidad de los tableros y el grado de expansión del espesor para cada condición climática, se observa en el cuadro 5 un aumento de la expansión a medida que aumenta la densidad del tablero. La tendencia de las variaciones dimensionales se presenta en la figura 3.

Las poligonales de la figura 3 muestran cómo al aumentar la densidad se provoca un cambio dimensional mayor, con densidades menores hay una mayor estabilidad dimensional. Lo anterior se observa en todos los niveles de humedad relativa estudiados. Esta tendencia es más clara cuando la humedad relativa final es más alta.

Al someter la relación entre la expansión en el espesor y la densidad del tablero a un análisis de varianza, se determinó para un nivel de confianza de 95% que existe una diferencia significativa de cambio dimensional con cada humedad relativa aplicada. Para precisar el grado de asociación que

existe entre la densidad del tablero y la variación dimensional, se calculó una regresión lineal entre estas dos variables para cada humedad relativa del aire (ver cuadro 6).

En el cuadro 6 se aprecia un alto grado de asociación de las variables expansión en el espesor y densidad, registrándose coeficientes de correlación ( $R^2$ ) mayores a 0,7. El valor  $p$  indica que las correlaciones son significativas con un intervalo de confianza de un 95% de probabilidad.

El aumento de la variación dimensional con aumentos de la densidad del tablero se debe a que al aumentar la densidad del tablero se requiere una mayor compresión durante la etapa del prensado, lo que origina mayores tensiones en el tablero, las cuales se liberan durante exposiciones a alta humedad relativa. Al someter los tableros a incrementos de la humedad relativa del aire, se provoca una recuperación parcial de la forma original de la estructura de la madera. Moslemi (1974) menciona que la variación dimensional se origina por la liberación del estrés en las partículas comprimidas y señala que el proceso es causado por un aumento de la humedad en el tablero. Adicionalmente, Moslemi (1974) señala que la mayor expansión en tableros más densos se ve agravada a medida que la especie utilizada tiene menor densidad, esto

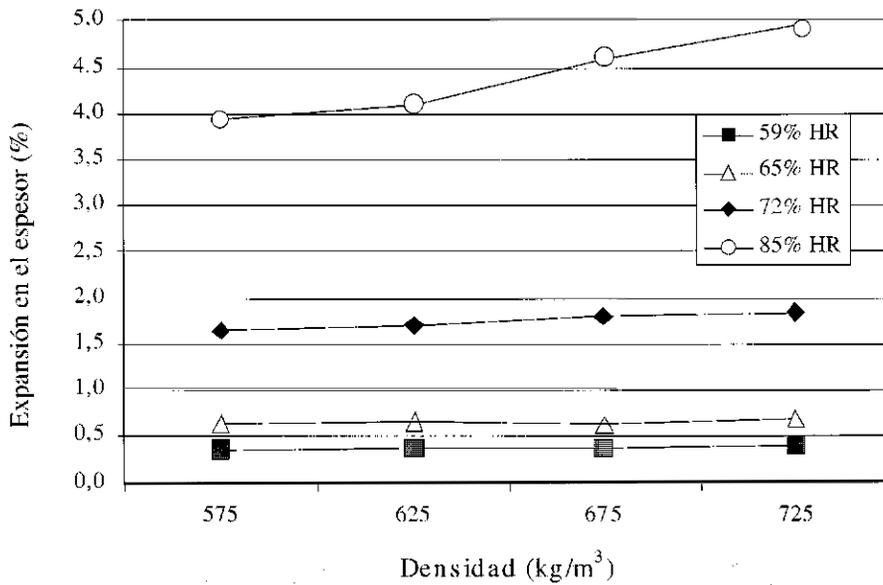


Figura 3. Variación del espesor en función de la densidad del tablero.  
Thickness variation depending on board density.

CUADRO 6

Regresiones para la expansión en el espesor en función de la densidad.  
Regressions for thickness expansion depending on board density.

Humedad relativa	Ecuación de regresión	R <sup>2</sup>	p	E
59%	$Ee = 0,215 + 0,00024 * D$	0,94	0,054	0,006
65%	$Ee = 0,4553 + 0,000288 * D$	0,70	0,310	0,024
72%	$Ee = 0,8731 + 0,001336 * D$	0,99	0,008	0,000
85%	$Ee = -0,23645 + 0,007118 * D$	0,99	0,013	0,099

Ee = Expansión en el espesor (%); D = Densidad del tablero (kg/m³); R<sup>2</sup> = Coeficiente de correlación; p = Nivel de significancia al 5%; e = Error estándar de la estimación.

debido a la mayor razón de compresión que se emplea para fabricar el tablero. En el caso del presente estudio, si bien no cambia la densidad de la madera, al aumentar la densidad del tablero se ha provocado un aumento de la razón de compresión (ver cuadro 1).

Debe tenerse en cuenta que las tensiones, producidas por una mayor compresión de las partículas al aumentar la densidad del tablero, se podrían liberar más fácilmente si se aplica una menor cantidad de adhesivo. De esta manera, el efecto de la

variación de la cantidad de adhesivo es un tema interesante de analizar en el futuro.

Finalmente, para representar la expansión del espesor que produce la interacción de las dos variables estudiadas (densidad y humedad relativa), se ha calculado una regresión de ajuste polinomial con dos variables de entrada (ver cuadro 7).

La regresión presenta un coeficiente de correlación de 0,99, lo que indica un buen ajuste de la ecuación a los datos observados; sin embargo no es conveniente hacer con este modelo estimacio-

CUADRO 7

Expansión en el espesor en función de la densidad y humedad relativa del aire.  
 Thickness expansion depending on board density and relative air humidity.

Ecuación de regresión	R <sup>2</sup>	P	E
$E_e = 16,955 - 0,46979 * HR - 0,01558 * D + 0,003555 * HR^2 + 0,00000455 * D^2 + 0,00017844 * HR * D$	0,99	0,001	0,128

E<sub>e</sub> = Expansión en el espesor (%); HR = Humedad relativa del aire (%); D = Densidad del tablero (kg/m<sup>3</sup>); R<sup>2</sup> = Coeficiente de correlación; p = Nivel de significancia al 5%; e = Error estándar de la estimación.

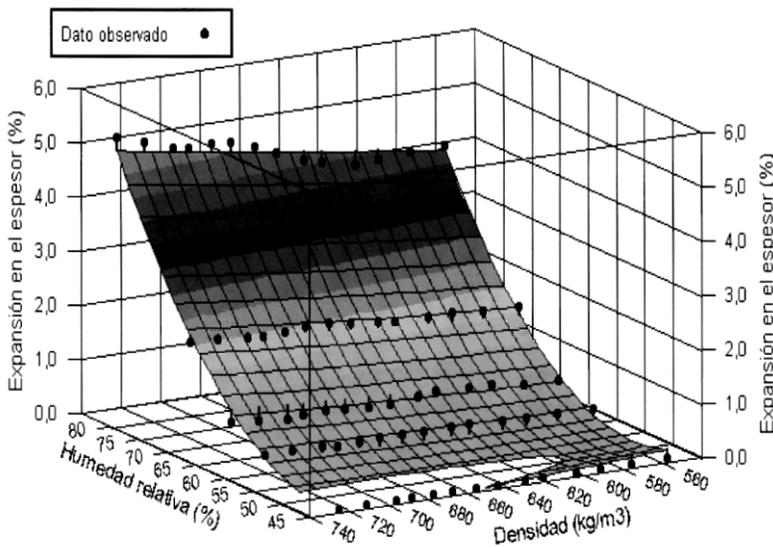


Figura 4. Representación de la regresión para expansión del espesor en función de la humedad del aire y la densidad del tablero.

Representation of the regression for thickness expansion depending on board density and relative air humidity.

nes bajo 53% de humedad relativa, debido a que en la mayoría de los casos se generan valores negativos de expansión en el espesor. El polinomio describe la trayectoria en el espacio del plano que genera la interacción de la expansión en el espesor, la humedad relativa y la densidad del tablero (ver figura 4).

*Expansión lineal.* Los resultados de la variación en el sentido lineal se entregan en el cuadro 8 en milímetros y en porcentaje. La medición se realizó en base a una humedad relativa del aire de 46%, permaneciendo la temperatura constante a 20°C.

En el cuadro 8 se observa la densidad separada en rangos y su respectivo valor de expansión lineal para cada nivel de humedad relativa estudiada. Los valores negativos corresponden a contracciones, con respecto al estado original, ocurridas en los tableros al ser llevados al estado anhidro.

La relación que existe entre la humedad relativa del aire y la expansión lineal es similar a la expuesta para el caso de la expansión en el espesor. Al examinar el cuadro 8 se observa que al aumentar la humedad relativa del aire se produce una expansión en el sentido lineal del tablero. Ello se ve corroborado en el análisis de varianza realizado con un nivel de confianza del 95%. La aso-

CUADRO 8

Expansión lineal como porcentaje de la longitud medida a una humedad relativa de 46%.

Linear expansion as a percentage of length at 46% relative air humidity.

Densidad (kg/m <sup>3</sup> )	Unidad	Humedad relativa (%)					
		46%	59%	65%	72%	85%	0%
550 - 600	mm	0,000	0,026	0,049	0,094	0,236	-0,628
	%	0,000	0,013	0,024	0,047	0,118	-0,314
600 - 650	mm	0,000	0,041	0,052	0,099	0,248	-0,619
	%	0,000	0,020	0,026	0,049	0,124	-0,310
650 - 700	mm	0,000	0,057	0,077	0,127	0,280	-0,576
	%	0,000	0,029	0,038	0,064	0,140	-0,288
> 700	mm	0,000	0,068	0,088	0,147	0,305	-0,548
	%	0,000	0,034	0,044	0,074	0,152	-0,274

ciación entre estas dos variables puede observarse en la figura 5. En el cuadro 9 se presentan las regresiones para la relación entre humedad relativa y expansión lineal, calculadas para cada tipo de tablero.

En el cuadro 9 se aprecia una alta correlación entre la humedad relativa del aire y la expansión lineal,  $R^2 > 0,99$ , para un nivel de confianza del 95%.

Los valores de expansión lineal en la figura 5 son menores a los registrados en el caso del espesor. Lo anterior se debe a la distinta orientación de las partículas durante la fabricación de los tableros, quedando ubicada la dirección longitudinal de las fibras de las partículas paralela a la dirección longitudinal del tablero. Esta disposición permite que la anisotropía de las partículas de madera actúe, expandiendo el sentido lineal en menor proporción que el sentido del espesor (Niemz y Poblete 1996).

Con respecto a la relación entre la densidad del tablero y las variaciones dimensionales en el sentido lineal, ocurre una relación similar a la de la expansión en el espesor. Un aumento de la densidad del tablero provoca un aumento en la expansión lineal. La relación se puede observar en la figura 6.

En la figura 6 las poligonales muestran que al aumentar la densidad se produce un aumento de la expansión lineal en los tableros. Ello se observa en todos los niveles de humedad relativa estudiados.

Un análisis de varianza para la relación entre la expansión lineal y el nivel de densidad de cada tablero determinó que, para un nivel de confianza de 95%, existen diferencias significativas dentro de cada humedad relativa. Esto implica que existen diferencias de expansión lineal entre tableros de distinta densidad para una misma condición climática.

La relación entre la densidad y la expansión lineal se determinó mediante una regresión lineal. Los altos coeficientes de correlación indican que existe una buena asociación entre las variables (ver cuadro 10).

Se aprecia en el cuadro 10 un alto grado de asociación de las variables expansión lineal y densidad ( $R^2 > 0,96$  en cada caso). El valor  $p$  indica que la correlación es significativa con un intervalo de confianza de un 95% de probabilidad.

Las razones por las que se expanden en mayor grado los tableros más densos en una misma condición climática son válidas tanto para el caso de expansión en el espesor como en el de expansión lineal. Resultados generales similares a los obtenidos en este punto han observado Brown *et al.* (1966), Gatchell *et al.* (1966), Halligan y Schniewind (1972), Vital *et al.* (1974) y Hse (1975).

*Humedad de equilibrio.* Los resultados de la determinación de humedad de equilibrio para cada tipo de tablero y condición climática se exponen en el cuadro 11.

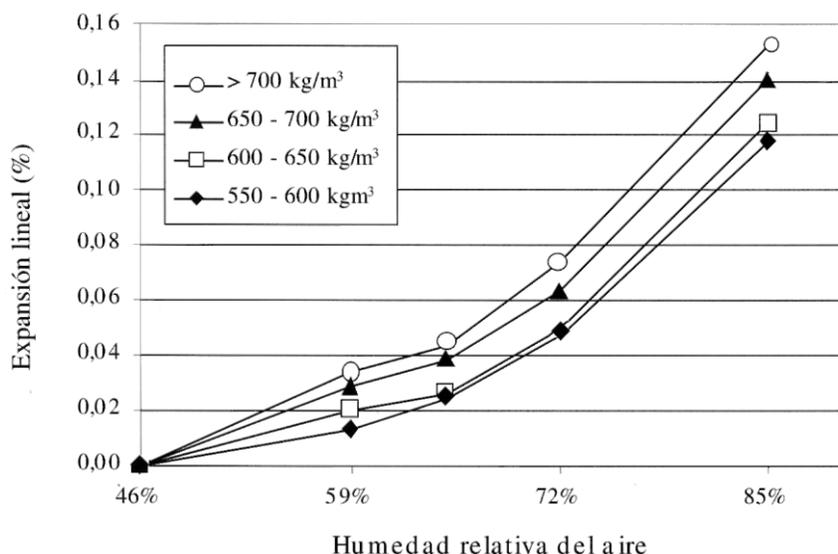


Figura 5. Expansion lineal en función de la humedad relativa del aire.  
Linear expansion depending on relative air humidity.

CUADRO 9

Regresiones para la expansión lineal en función de la humedad relativa del aire.  
Regressions for linear expansion depending on relative air humidity.

Densidad (kg/m <sup>3</sup> )	Ecuación de regresión	R <sup>2</sup>	p	E
550 - 600	$E_L = 0,203 - 0,0084 * HR + 8,6817 * HR^2$	0,99	0,001	2,578
600 - 650	$E_L = 0,1937 - 0,00809 * HR + 8,535 * HR^2$	0,99	0,008	6,170
650 - 700	$E_L = 0,1295 - 0,00617 * HR + 7,384 * HR^2$	0,99	0,006	5,924
> 700	$E_L = 0,104 - 0,0055 * HR + 7,11235 * HR^2$	0,99	0,005	5,861

$E_L$  = Expansión lineal (%); HR - Humedad relativa (%);  $R^2$  = Coeficiente de correlación; p = Nivel de significancia al 5%; e = Error estándar de la estimación

En todos los tipos de tablero se observa que a medida que aumenta la humedad relativa del aire aumenta la humedad de equilibrio. Los valores alcanzaron un máximo en la más alta humedad relativa (85%) que fue entre 11,4 y 12,1% según el tipo de tablero. Los resultados concuerdan con los de Niemz y Poblete (1995) y Poblete e Inzunza (1997).

Entre tableros de distinta densidad se observa que los de menor densidad alcanzaron una humedad de equilibrio más alta. A mayor densidad del tablero corresponde una humedad de equi-

brio menor. Halligan y Schniewind (1972) y Vital *et al.* (1974) confirman lo expuesto anteriormente. Una explicación a esta reacción de los tableros podría darse por la baja porosidad de los tableros más densos, con lo que se vería restringido el flujo de humedad desde el medio ambiente.

Con los valores de humedad de equilibrio y expansión dimensional de los tableros se calculó la variación dimensional, en porcentaje, por cada 1% de cambio de la humedad de equilibrio (ver cuadro 12).

CUADRO 10

Expansión lineal en función de la densidad por condición de humedad relativa.  
 Linear expansion depending on board density at different relative air humidity.

Humedad relativa	Ecuación de regresión	R <sup>2</sup>	p	E
59%	$E_l = -0,068169 + 0,0001418 * D$	0,99	0,005	0,000
65%	$E_l = -0,0606 + 0,000144 * D$	0,96	0,031	0,003
72%	$E_l = -0,0663 + 0,000192 * D$	0,97	0,033	0,004
85%	$E_l = -0,199 + 0,000236 * D$	0,99	0,013	0,003

$E_l$  = Expansión lineal (%);  $D$  = Densidad del tablero ( $kg/m^3$ );  $R^2$  = Coeficiente de correlación;  $p$  = Nivel de significancia al 5%;  $e$  = Error estándar de la estimación

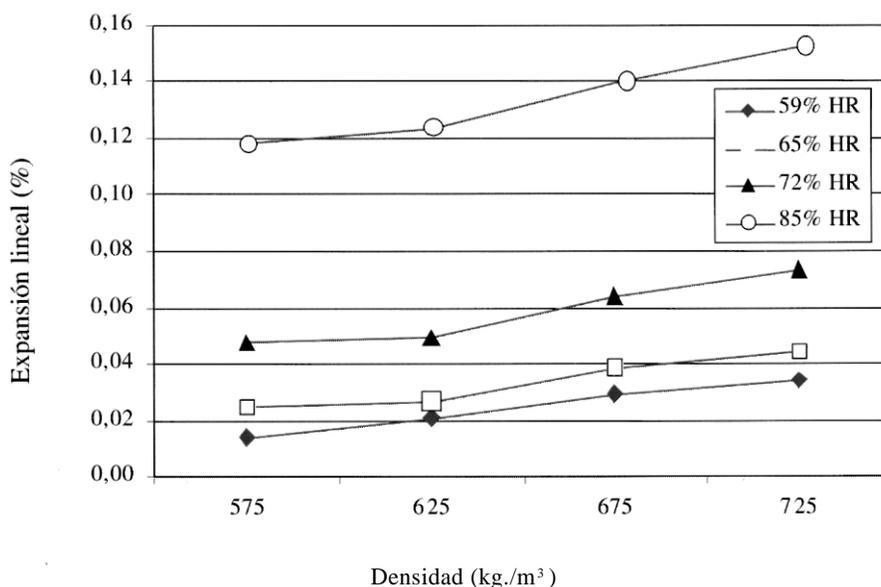


Figura 6. Expansión lineal en función de la densidad del tablero.  
 Linear expansion depending on board density.

Los valores promedios alcanzaron a un 1,041% y 0,032% de variación dimensional por cada 1% de cambio de la humedad de equilibrio del tablero para el espesor y lineal respectivamente. Estos valores son mayores a los obtenidos por Niemz y Poblete (1996), quienes determinaron valores de 0,77 y 0,031% de cambio dimensional para el sentido del espesor y lineal en tableros de Pino radiata encolados con urea-formaldehído y de densidades cercanas a 600  $kg/m^3$ . En tanto Poblete e Inzunza (1997) obtuvieron valores promedio de 0,79% en

el espesor y 0,06% lineal para tableros de Pino radiata con una densidad promedio de 650  $kg/m^3$ .

Los valores de variación dimensional en el sentido lineal del presente estudio se enmarcan dentro de la literatura consultada, sin embargo en el sentido del espesor las variaciones registradas son mayores. Lo anterior probablemente se debe a que se trabajó con densidades más altas que provocan un aumento de las variaciones dimensionales en el tablero.

CUADRO 11

Humedad de equilibrio de los tableros alcanzada al variar la humedad relativa del aire.  
Equilibrium moisture content of boards with changes in relative air humidity.

Densidad (kg/m <sup>3</sup> )	Humedad relativa a 20°C			
	46%	59%	72%	85%
550 - 600	7,85	8,44	9,90	12,14
600 - 650	7,69	8,27	9,71	11,93
650 - 700	7,43	8,01	9,43	11,66
> 700	7,31	7,88	9,25	11,44

CUADRO 12

Variación dimensional por cada 1% del cambio de humedad de equilibrio del tablero.

Dimensional variation for a 1% change in equilibrium moisture content.

Densidad (kg/m <sup>3</sup> )	Variación dimensional (por cada 1%)	
	Lineal (%)	Espesor (%)
550 - 600	0,027	0,914
600 - 650	0,029	0,968
650 - 700	0,033	1,086
> 700	0,037	1,195
Promedio	0,032	1,041

CONCLUSIONES

Se confirma que las variaciones dimensionales en el sentido del espesor y lineal de los tableros aumentan a medida que se incrementa la humedad relativa del aire. La variación dimensional aumenta con la densidad del tablero. En el sentido del espesor la variación dimensional se ve más acentuada que en el sentido longitudinal, siendo para Canelo hasta 34 veces mayor. En el caso de Canelo la media de cambio dimensional para el espesor y lineal por cada 1% de cambio de humedad de equilibrio fue de 1,041 y 0,032% respectivamente.

Paralelo al estudio de la estabilidad dimensional, se demostró que la humedad de equilibrio aumenta a medida que se incrementa la humedad relativa del aire, siendo, para todas las condiciones climáticas estudiadas, mayor en tableros de menor densidad.

BIBLIOGRAFÍA

- ALBIN, R. 1975. "Determinación del pH en diversas especies de los renovales de la provincia de Valdivia", *Bosque* 1(1): 3-5.
- BERTERRECHE, A. 1994. Efecto de la inclusión de aserrín proveniente de sierra huincha en algunas propiedades físico-mecánicas de tableros de partículas fabricados con *Pinus radiata* D. Don. Tesis Ing. Forestal. Universidad Austral de Chile, Facultad de Ciencias Forestales. 80 p.
- BROWN, F. D. KENAGA, R. GOOCH. 1966. "Impregnation to control dimensional stability of particleboard and fiberboard", *Forest Product Journal* 16 (11): 45-53.
- CORVALAN, P. 1987. El canelo: una alternativa de desarrollo para la Décima Región. Departamento de Manejo de Recursos Forestales, Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales, Universidad de Chile. Vol. II. 75 p.
- GATCHELL, C. B. HEEBINK, F. HEFTY. 1966. "Influence of components variables on properties of particleboard for exterior use", *Forest Product Journal* 16(4): 46-59.
- HALLIGAN, F., A. SCHNIEWIND. 1972. "Effect of moisture on physical and creep properties of particleboard", *Forest Product Journal* 22(4): 41-48.
- HANN, R., J. BLACK, R. BLOMQUIST. 1962. "How durable is particleboard?", *Forest Product Journal* 12(12): 557-584.
- HSE, C. 1975. "Properties of flakeboards from hardwoods growing on southern pine sites", *Forest Product Journal* 25(3): 49-53.
- JORGENSEN, R., R. ODELL. 1961. "Dimensional stability of oak flake boards as affected by particle geometry and resin spread", *Forest Product Journal* 11(10): 463-466.
- KELLY, M. 1977. Critical literature review of relationships between processing parameter and physical properties of

- particleboard. General Technical Report FPL 10. Madison. 64 p.
- KOLLMANN, F., E. KUENZI, A. STAMM. 1975. *Principles of wood science and technology. II Wood Based Materials*. Springer Verlag. Berlin, 703 p.
- LARMORE, F. 1959. "Influence of specific gravity and resin content on properties of particleboard", *Forest Product Journal* 9(4): 131-134.
- LEHMANN, W. 1960. The effects of moisture content, board density, and press temperature on the dimensional and strength properties of flat-pressed flakeboard. School of Forestry, North Carolina State Univ., Raleigh, N. C., 106 p.
- MOSLEMI, A. 1974. *Particleboard and materials*. Southern Illinois University Press, 239 p.
- NIEMZ, P., H. POBLETE. 1995. "Untersuchungen zur gleichgewichtsfeuchte von MDF und Spanplatten", *Holz als Roh- und Werkstoff*. 53: 368.
- NIEMZ, P., H. POBLETE. 1996. Estabilidad dimensional y humedad de equilibrio en tableros de fibra (MDF) y de partículas", *Ciencia e Investigación Forestal* 10(1): 49-62.
- PEREZ, V., G. CUBILLOS. 1984. Características físico-mecánicas de canelo, ciprés de las Guaitecas, Coigüe de Chiloé y Roble del Maule. Documento de Trabajo N° 52. Corporación Nacional Forestal, Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación. Santiago, Chile, 95 p.
- POBLETE, H., L. INZUNZA. 1997. Determinación de la estabilidad dimensional de tableros de partículas ante diferentes condiciones climáticas. Instituto de Tecnología de Productos Forestales, Universidad Austral de Chile, 10 p.
- POST, P. 1958. "Effects of particle geometry and resin content on bending strength of oak flakeboard", *Forest Product Journal* 8 (10): 317-327.
- POST, P. 1961. "Relationships of flake size and resin content to mechanical and dimensional properties of flakeboard", *Forest Product Journal* 11 (1): 34-37.
- STEWART, H., W. LEHMANN. 1973. "High-quality particleboard from cross-grain, knifeplaned hardwood flakes", *Forest Product Journal* 23(8): 52-60.
- SUCHSLAND, O. 1972. "Linear hygroscopic of selected commercial particleboard", *Forest Product Journal* 22 (11): 28-32.
- TURNER, H. D. 1954. "Effect of particle size and shape on strength and dimensional stability of resin bonded wood-particle panels", *Forest Product Journal* 4 (5): 210-222.
- URZUA, J., H. POBLETE. 1980. Utilización silvoagropecuaria de los terrenos de ñadi. Informe N° 2. Factibilidad técnica de la producción de tableros de partícula utilizando especies que crecen en los terrenos de ñadi. Serie Técnica. Informe de Convenio N° 29. Convenio SERPLAC. X Región - UACH. 140 p.
- VITAL, B., W. LEHMANN, R. BOONE. 1974. "How species and board densities affect properties of exotic hardwood particleboards", *Forest Product Journal* 24(12): 37-45.