

RELACIÓN ENTRE DENSIDAD Y PROPIEDADES DE TABLEROS HDF PRODUCIDOS POR UN PROCESO SECO.

RELATIONSHIP BETWEEN DENSITY AND PROPERTIES OF HDF MANUFACTURED BY A DRY PROCESS

Hernán Poblete W., Roque Vargas C.

RESUMEN

El objetivo del trabajo fue determinar las propiedades físicas y mecánicas de tableros de fibras duros con densidades entre 810 y 1117 kg/m³. Los tableros de 3 mm de espesor fueron fabricados en un proceso seco.

Se evaluaron las propiedades MOR y MOE en flexión, tracción paralela, absorción de agua, hinchamiento, hinchamiento no recuperable (*springback*), expansión lineal, expansión del espesor y humedad de equilibrio.

La expansión lineal, la expansión del espesor y la humedad de equilibrio, se determinaron luego de climatizar a 3 humedades relativas; 40, 65 y 90% con una temperatura constante de 20 °C.

Los resultados demostraron que existe una correlación entre la densidad del tablero y las propiedades tracción paralela, MOR, MOE, absorción de agua y expansión lineal. Para el caso de los ensayos mecánicos, a medida que aumenta la densidad se incrementan las resistencias. La absorción de agua tiende a disminuir cuando la densidad del tablero aumenta. La expansión lineal se incrementa con aumentos de la densidad del tablero. El hinchamiento y la expansión del espesor no presentaron una dependencia de la densidad.

Palabras clave: Tableros de fibra, HDF, densidad de tablero, propiedades físicas y mecánicas, expansión lineal y del espesor.

ABSTRACT

The aim of the work was to determine the physical and mechanical properties of HDF-boards with densities between 810 and 1117 kg/m³. Panels of 3mm in thickness, were produced by a dry process.

Bending strength (MOR and MOE), tensile strength parallel to board surface, water absorption, thickness swelling, springback, linear and thickness expansion and equilibrium moisture content were determined.

Linear expansion, thickness expansion and equilibrium moisture content were measured after climatization at 20 °C for 3 relative humidity conditions; 40, 65 and 90%.

A correlation between board density and mechanical properties, water absorption, lineal expansion was determined. With increasing panel density, higher mechanical properties and lineal expansion were obtained. Water absorption decreased when the density of the board increases. Thickness swelling and thickness expansion did not present a relationship with board density.

Key Words: Fiber boards, HDF, board density, physical and mechanical properties, linear expansion, thickness expansion.

INTRODUCCIÓN

Los tableros HDF (*High density fiberboard*) se fabrican en Chile con 3,2 mm de espesor y densidades mayores a 800 kg/m³, poseen una alta resistencia superficial. Pueden llevar un diseño estampado lo que les da un gran potencial decorativo al momento de fabricar una puerta u otro elemento. Son fabricados con adhesivos fenólicos lo que les da resistencia en condiciones de alta humedad y con un bajo contenido de corteza para mantener un color claro. Presentan expansiones que van desde 1,0 mm a 2,0 mm por metro (Goycolea, 2000). Estos tableros se elaboran a través de un proceso seco, donde en la etapa de prensado la estera tiene un contenido de humedad de aproximadamente inferior a 5-9 % (Bellido *et al*, 2003).

La densidad de los tableros es un factor importante para la producción, ya que determina la cantidad de madera y adhesivo a utilizar. Además existe un impacto en los costos de transporte ya que al disminuir la densidad disminuye el peso. La evaluación del efecto que tiene la densidad de estos tableros sobre las propiedades físico-mecánicas y determinar si es posible disminuirla es un tema actual y de importancia para la industria.

Existe una gran cantidad de variables que afectan las propiedades del tablero HDF. Son importantes la densidad de la madera y del tablero, la cantidad de corteza, los adhesivos, aditivos y la humedad ambiental.

Corteza

La presencia de corteza en tableros HDF no ha sido estudiada como lo ha sido para tableros de partículas. Las experiencias indican que al incluir corteza las propiedades físicas como el hinchamiento y la absorción de agua, se ven mejoradas. Esto debe a una acción repelente al agua de algunos compuestos de esta materia prima (Poblete, 2001). Poblete y Sánchez (1991) determinaron que las propiedades mecánicas disminuyen al aumentar la proporción de corteza. Las experiencias industriales con HDF en Chile indican que se puede aplicar hasta un 14 % de corteza con un efecto positivo en la estabilidad dimensional y una leve pérdida de las propiedades mecánicas. Este comportamiento coincide con el observado en los tableros de partículas.

Aditivos y Adhesivos

El tipo y la cantidad de adhesivo además de la participación de aditivos, determinan las propiedades y el uso que se dará al tablero. Los HDF producidos en un proceso seco llevan además un porcentaje de emulsión de cera para dar un efecto hidrófobo. En el caso de los tableros de partículas, con un incremento en la cantidad de adhesivo se obtiene una mayor estabilidad dimensional del tablero y mejores propiedades mecánicas (Larmore 1959; Gatchell *et al* 1966). Experiencias industriales con HDF en Chile, demuestran que aumentos de la cantidad de fenol formaldehído disminuyen la absorción de agua y el hinchamiento de los tableros.

Densidad de la madera y del tablero

La densidad de la madera y del tablero influyen en el volumen de material a compactar, en el consumo

de adhesivo, en las propiedades y en el acabado superficial del tablero (Vital *et al*, 1974).

El volumen de madera a incorporar en un tablero, para una densidad determinada, varía dependiendo de la densidad de la materia prima (Poblete, 2001). Estos ajustes afectan las propiedades físicas y mecánicas significativamente. En general, aumentos en la densidad de la madera producen una disminución en las propiedades mecánicas (Stegmann y Durst, 1964; Vital *et al*, 1974).

Se ha determinado que, tanto en tableros de partículas como de fibras (MDF), los cambios de la densidad del tablero provocan cambios importantes de las propiedades físicas y mecánicas. En general, un aumento de la densidad del tablero produce incrementos de la flexión y de la tracción, una disminución de la absorción de agua y un aumento en la expansión, tanto lineal como en el espesor (Poblete, 2001; Poblete *et al* 2000).

Humedad Ambiente

La humedad ambiental es el factor más relevante al momento de analizar las causas de los cambios dimensionales de la madera y de sus productos. En el proceso de climatización para alcanzar la humedad de equilibrio, el tablero sufre un cambio dimensional, lo que se traduce en una deformación. La estabilidad dimensional del tablero se logrará una vez que logre la humedad de equilibrio, siendo éste el momento más apropiado para la puesta en servicio del tablero. Este proceso es importante en el caso de los HDF, por lo que se integra una etapa de humectación al final del proceso de fabricación (Goycolea, 2000).

La influencia que tiene la madera en la estabilidad dimensional y la humedad de equilibrio de los tableros es importante ya que las propiedades del producto final son consecuencia de las propiedades originales de la materia prima. Uno de los factores que ha llevado a reemplazar la madera por otros materiales es la inestabilidad dimensional que se presenta al momento de enfrentarse a condiciones ambientales variables.

Niemz y Poblete (1996) estudiaron el comportamiento de tableros de partículas y MDF ante cambios de la humedad ambiental y concluyen que los tableros tienen humedades de equilibrio menores a la madera sólida. Además, los tableros de fibras presentan humedades de equilibrio, expansiones lineales y *springback* menores a los de partículas. Al expresar la estabilidad dimensional como cambio por cada 1 % de variación de la humedad de equilibrio, los MDF son más estables que los de partículas en la expansión longitudinal pero son similares en la variación del espesor (Niemz y Poblete, 1996).

Considerando lo señalado anteriormente se planteó la realización del presente trabajo, teniendo como objetivo general el determinar la relación existente entre la densidad de los tableros HDF y las propiedades físico-mecánicas. Específicamente se pretendió determinar la relación entre densidad y las propiedades mecánicas flexión y tracción paralela. Paralelamente se buscó establecer el grado de dependencia que existe entre el hinchamiento, incluyendo el efecto "springback", la expansión lineal y del espesor con la densidad del tablero.

METODOLOGÍA

Para evaluar el efecto de los cambios de la densidad del tablero sobre las propiedades mecánicas se ensayaron el MOR, MOE y se diseñó un ensayo para probar la tracción paralela. Las propiedades físicas fueron evaluadas por la estabilidad dimensional (expansión lineal, del espesor, hinchamiento, *springback*) y la humedad de equilibrio.

Características de los tableros

Los ensayos para analizar las propiedades (físicas y mecánicas) de los tableros, fueron efectuados en los laboratorios del Instituto de Tecnología de Productos Forestales de la Universidad Austral de Chile.

La cantidad de probetas preparadas y utilizadas para determinar el hinchamiento en las direcciones tangencial y radial, así como para calcular la densidad anhidra, fue de 193, 170 y 78, respectivamente. La cantidad de determinaciones del coeficiente de anisotropía fue de 40. En la Tabla 1 se muestra una discriminación por posición respecto de la médula y de la altura en el árbol, así como por tipo de determinación realizada.

La composición de la materia prima madera empleada para la fabricación de los tableros se indica en la tabla 1.

Tabla 1: Composición de materia prima madera.

Producto	Cantidad (%)
Chip verde - <i>Pinus radiata</i>	5
Chip verde con corteza - <i>Pinus radiata</i>	40
Chip seco - <i>Pinus radiata</i>	33
Viruta proceso - <i>Pinus radiata</i>	5
Corteza proceso - <i>Pinus radiata</i>	7
Chip de aroma - <i>Acacia spp.</i>	10
Total	100

El desfibrado se realizó en un proceso termomecánico industrial, con un precalentamiento a 160° C y vapor a una presión de 8 kg/cm² y un equipo Defibrator. En esta etapa se agregó cera para disminuir la capacidad de absorción del tablero. El encolado se realizó en *blow line*, con fenol formaldehído (5%). Los tableros, con 3,2 mm de espesor, se fabricaron con 5 densidades nominales entre 880 kg/m³ y 1040 kg/m³. Se elaboraron 6 repeticiones por tipo, dando un total de 30 tableros. De los tableros se obtuvieron un total de 940 probetas para los diferentes ensayos.

Determinaciones

Al determinar las propiedades, a cada probeta se le determinó la densidad formándose pares de datos, densidad-propiedad, que formaron la base para realizar los análisis de correlación.

Densidad de las probetas. Las determinaciones de densidad se efectuaron a todas las probetas en estudio, por lo tanto cada una de ellas representa un par de datos densidad/propiedad. La densidad se midió luego de climatizar a 65 % HR y 20° C.

Módulo de elasticidad y del módulo de rotura (MOR y MOE).

El ensayo para determinar el módulo de elasticidad y el módulo de rotura en flexión se realizó de acuerdo con la norma DIN 52.352. Este ensayo se caracteriza por los soportes de apoyo planos, lo que permite una mayor área de apoyo fijo que evita el deslizamiento de la probeta. Para los cálculos se efectuó un control del espesor de cada probeta. Para evaluar los resultados se utilizó la norma DIN 68.754.

Tracción paralela. Para realizar un análisis de esta propiedad se adaptó la norma DIN 52.377, concebida para tableros contrachapados y madera sólida. Esta adaptación se realizó por la ausencia de normas para esta propiedad en tableros de fibras duros. Se logró diseñar una probeta que mantiene la forma original de la norma pero con dimensiones inferiores (Figura 1).

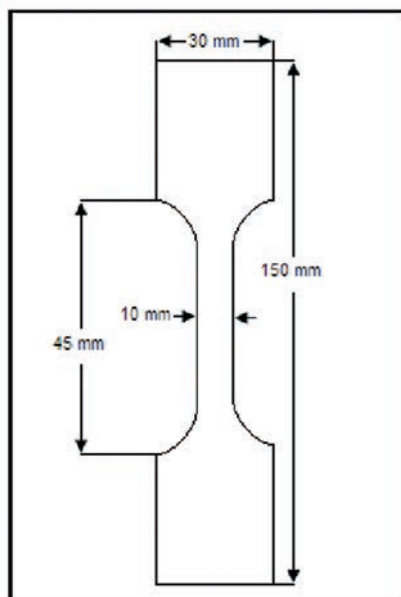


Figura 1: Adaptación de la probeta de tracción paralela

El cálculo de la resistencia a la tracción paralela se calculó como el cociente entre la carga máxima y la sección de corte.

Hinchamiento y Absorción de agua. Se utilizó la norma DIN 52.350, y para el caso de la absorción de agua la norma DIN 52.351. Se determinó el espesor y el peso antes y después de una inmersión en agua por 2 y 24 horas a 20 °C. Para evaluar los resultados se utilizó la norma DIN 68.754.

Springback. Para determinar el *springback* se midió el espesor en condiciones normales (20°C, 65% HR) y luego de una inmersión en agua (24 horas) se llevaron las probetas a peso anhidro para finalmente climatizarlas en la cámara de clima a 20°C y 65 % y se controló nuevamente el espesor. La relación utilizada para obtener el *springback* se presenta en la siguiente fórmula:

$$S = \frac{E_2 - E_1}{E_1} * 100 \quad (1)$$

Donde

S : *Springback* (%)

E_2 : Espesor final, posterior al tratamiento (mm)

E_1 : Espesor inicial (mm)

Expansión Lineal y de la Expansión del Espesor. La metodología aplicada para determinar la expansión lineal se realizó de acuerdo a la norma EN 318 en probetas de 200 mm por 20 mm. La variación del espesor se determinó en dos puntos de la probeta, a 30 mm de cada extremo.

Las probetas fueron tratadas en una cámara de clima con una temperatura de 20 °C a diferentes condiciones de humedad relativa (40%, 65% y 90%) hasta obtener peso constante. Al final de los

tratamientos se llevaron a estado anhidro (24 horas a $103 \pm 2^\circ \text{C}$) para calcular la humedad de equilibrio y usar las dimensiones en estado anhidro como referencia para calcular la expansión. El cálculo de expansión se realizó de acuerdo con la ecuación siguiente:

$$E = \frac{D_1 - D_2}{D_2} * 100 \quad (2)$$

Donde

E : Expansión (%)

D_1 : Dimensión a 40, 65 y 90% HR (mm)

D_2 : Dimensión inicial, en estado anhidro (mm)

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Al determinar la densidad por probeta se pudo constatar que fluctuó entre 810 kg/m^3 y 1117 kg/m^3 .

Un parámetro importante en la evaluación del efecto de la densidad sobre las propiedades es la forma en que se distribuye la densidad en el espesor del tablero, perfil de densidad. En este caso, por el espesor del tablero estudiado (3,2 mm) y la tecnología de análisis disponible, no se pudo analizar su efecto y no se consideró en el estudio.

Para realizar el análisis de estadígrafos básicos se establecieron 6 clases de densidad; menores o iguales a 880 kg/m^3 , entre 881 y 920 kg/m^3 , 921 a 960 kg/m^3 , 961 a 1000 kg/m^3 , 1001 a 1040 kg/m^3 y mayores a 1041 kg/m^3 .

Efecto de la densidad sobre el MOR y MOE

En la tabla 2 se presentan los promedios de ambas propiedades para las clases de densidad. Estos datos representan a 200 probetas ensayadas.

Los promedios por clase de densidad permiten verificar una estrecha relación entre el MOR, MOE y la densidad del tablero. Coincidentemente, en un estudio efectuado para tableros MDF con densidades entre 547 y 774 kg/m^3 , se determinó que a medida que aumenta la densidad se incrementa el MOE y MOR a la flexión (Eleotério, 2000). Los análisis de correlación y cálculo de regresiones se presentan en la figura 2.

Tabla 2: Estadísticas básicas de MOR y MOE por clase de densidad

Clase de densidad kg/m^3	MOE		MOR	
	N/mm^2	Dev. Est.	N/mm^2	Dev. Est.
<880	3035	366	30,8	4,2
881-920	3344	419	35,1	3,4
921-960	3709	402	40,8	3,4
961-1000	3919	415	43,4	3,6
1001-1040	4217	387	48,2	3,0
>1041	4406	414	51,9	4,0

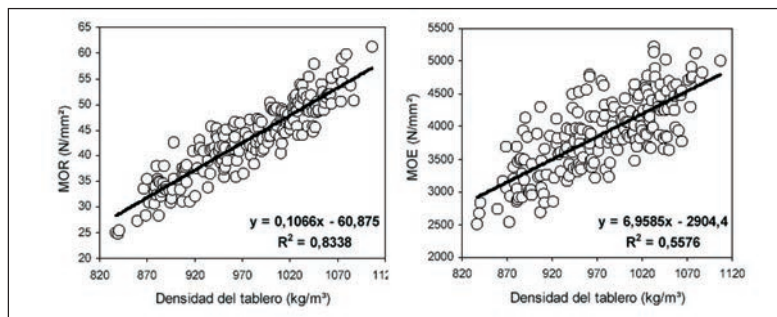


Figura 2: Efecto de la densidad del tablero respecto al MOR y MOE

La tendencia demuestra que la densidad del tablero tiene una mejor correlación con el MOR que con el MOE. En general los HDF muestran que a medida que se incrementa la densidad se mejoran estas propiedades. Poblete y Peredo (1990) obtienen resultados similares con tableros de partículas producidos con mezclas de especies chilenas.

Efecto de la densidad sobre la tracción paralela

Respecto a esta propiedad mecánica, no fue posible la comparación con otros tableros ya que la probeta diseñada no corresponde a ninguna norma establecida para tableros HDF (Figura 1).

En la tabla 3 se observan los estadígrafos correspondientes a esta propiedad. En la figura 3 se presenta la regresión resultante de esta relación.

Tabla 3: Estadísticas básicas de la resistencia a la tracción paralela

Estadígrafos	Densidad (kg/m ³)	Tracción (N/mm ²)
Promedio	975	26,9
Mínimo	830	13,9
Máximo	1103	37,9
Desv. Estándar	66	5,5

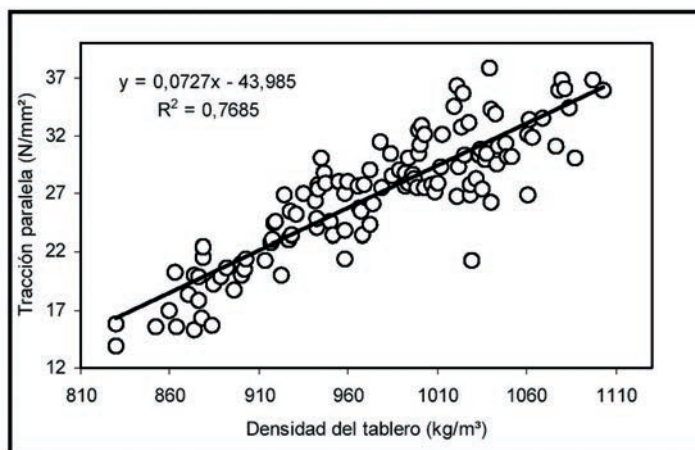


Figura 3: Efecto de la densidad respecto a la tracción paralela

Por la orientación de las fibras y la dirección de las fuerzas en el ensayo, esta propiedad entrega información respecto a la calidad de las uniones entre fibras evitando la influencia del perfil de densidad del tablero. Los resultados en la figura 3 demuestran que a medida se incrementa la densidad de los tableros hay un aumento de la resistencia a la tracción paralela. El aumento de la resistencia es importante, duplicándose al aumentar la densidad de 850 kg/m^3 a 1080 kg/m^3 .

Efecto de la densidad sobre el hinchamiento, *springback* y absorción de agua.

Estas propiedades se midieron luego de someter las probetas a un baño en agua por 2 y 24 h.

Hinchamiento.

En la tabla 4 se presentan las estadísticas básicas obtenidas. El análisis de regresión demostró que la relación entre hinchamiento y densidad del tablero no fue significativa tanto con 2 horas como con 24 horas de inmersión en agua. Los coeficientes de correlación obtenidos fueron menores a 0,1. Lo anterior se ve corroborado por las diferencias entre los máximos y mínimos y las desviaciones estándar presentadas en la tabla 4. Un comportamiento similar ha sido informado para tableros de partículas (Poblete y Peredo, 1990) y tableros de fibras MDF (Dunky y Niemz, 2002).

Tabla 4: Estadísticas básicas del hinchamiento

Estadísticos	Densidad (kg/m^3)	Hinchamiento 2 horas (%)	Hinchamiento 24 horas (%)
Promedio	987	7,6	20,1
Mínimo	850	3,4	16,5
Máximo	1118	13,2	25,2
Desv. Estándar	60	1,7	1,8

La norma DIN 68.750 estipula que para tableros duros el hinchamiento debe ser menor a 18% a las 24 h y para tableros utilizados en la construcción el límite es de 20%. El 92% de las probetas ensayadas, distribuidas entre 849 kg/m^3 y 1118 kg/m^3 , cumplió con estos límites.

Cabe agregar que, interviniendo otras variables del proceso de fabricación (ceras, adhesivo, presión de prensado, etc.) sería posible modificar el hinchamiento de estos tableros.

Springback (Hinchamiento no recuperable). En la tabla 5 se presentan los valores de *springback* obtenidos luego de una inmersión de 24 h en agua.

Tabla 5: Estadísticas básicas para springback

Parámetro	Densidad (kg/m^3)	Springback (%)
Promedio	990	18,1
Mínimo	850	10,4
Máximo	1118	24,0
Desv. estándar	59	2,8

Los parámetros calculados para esta propiedad indican que luego de la absorción y desorción el tablero se hincha y permanece con un hinchamiento de un 18 %. Este valor es una reacción normal al tratamiento aplicado. Berterreche (1994) determinó hinchamientos no recuperables de 4,5% al climatizar tableros de partículas a 90 % de humedad relativa.

El análisis estadístico determinó que la relación que presentan las variables densidad y *springback* es casi insignificante ($R^2 = 0,002$). La densidad no es una variable que explique el hinchamiento no recuperable de los tableros HDF.

Análisis de la absorción de agua de los tableros. En la tabla 6 se entregan los estadísticos para la absorción luego de 2 h y 24 h de inmersión en agua a 20°C .

Tabla 6: Estadísticas básicas para la absorción de agua

Estadígrafos	Densidad (kg/m ³)	Absorción 2 horas (%)	Absorción 24 horas (%)
Promedio	988	10,8	27,9
Mínimo	850	6,2	20,5
Máximo	1118	18,0	41,4
Desv. Estándar	61	2,1	3,5

A diferencia del ensayo de hinchamiento, en la absorción de agua se determinó que a medida que aumenta la densidad la absorción de agua líquida disminuye. Poblete y Peredo (1990) obtuvieron la misma tendencia en tableros de partículas. En la figura 4 se presentan los resultados del análisis de regresión para los ensayos a 2 h y 24 h.

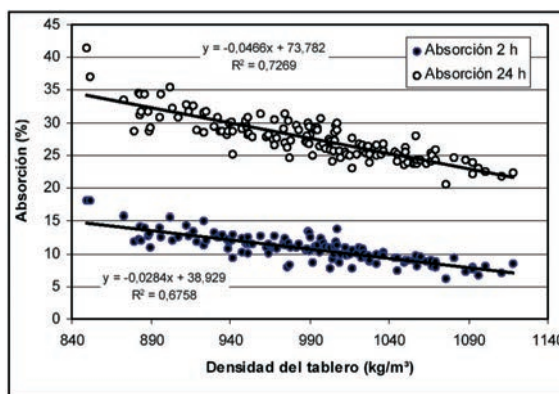


Figura 4: Efecto de la densidad de los tableros sobre la absorción

Los tableros con densidades superiores a 940 kg/m³ de densidad cumplen la norma DIN 68.750, que estipula para tableros duros la absorción durante 24 horas de inmersión en agua no debe ser mayor al 30%. De las probetas ensayadas, el 78 % superó el límite exigido por la norma.

Efecto de la densidad en la humedad de equilibrio, expansión del espesor y lineal

Estas propiedades fueron determinadas luego de un proceso de climatizado a diferentes humedades relativas del aire.

Humedad de equilibrio. En la tabla 7 se pueden apreciar los promedios por clase de densidad obtenidos para un total de 400 probetas. Las regresiones calculadas para la relación densidad de tablero con la humedad relativa presentaron coeficientes de correlación bajo 0,2 (Tabla 8).

Tabla 7: Humedad de equilibrio (%) de los tableros por clase de densidad.

Clase de densidad (kg/m ³)	Humedad relativa del aire, HR (%)		
	40%	65%	90%
<880	6,7	8,4	17,6
881-920	6,6	8,3	17,5
921-960	6,6	8,3	17,2
961-1000	6,5	8,2	17,0
1001-1040	6,6	8,3	17,2
>1041	6,3	8,1	16,6

Los resultados de la tabla 7 demuestran que la humedad de equilibrio aumentó a medida que se incrementa la humedad relativa. El incremento de la humedad de equilibrio al pasar de una humedad relativa de 65% a 90% es notoriamente mayor al incremento generado entre 40 y 65% HR. Esta tendencia es similar a la registrada por Niemz y Poblete (1996) en MDF y tableros de partículas.

Los resultados de la tabla 8 demuestran que existe una escasa relación entre densidad y humedad de equilibrio en los 3 climas ensayados.

Tabla 8: Relación entre humedad de equilibrio (HE) y densidad de tablero (D)

Humedad relativa (%)	Ecuación de regresión	R ²
40	HE = -0,0012(D) + 7,7348	0,097
65	HE = -0,0014(D) + 9,5959	0,123
90	HE = -0,0042(D) + 21,212	0,173

Expansión del espesor. Inicialmente se calcularon los valores de expansión tomando como valor base la dimensión registrada con la probeta en estado anhidro, luego de un secado a 103 °C en estufa. Al llevar las probetas a estado anhidro después del climatizado a 90% HR, se generó un *springback* con lo que los valores de expansión a 40 % de humedad son negativos, Por esta razón el cálculo de expansión en el espesor se realizó tomando como valor base la dimensión con un climatizado a 40 % de humedad. Así en la tabla 9 sólo se presentan cifras para 65 % y 90 % de humedad relativa. En la tabla 9 se presentan los promedios para las 6 clases de densidad.

Tabla 9: Expansión del espesor: cálculo basado en la dimensión en estado anhidro

Rangos de densidades kg/m ³	Estadígrafos	Humedad Relativa (%) con 20 °C	
		65	90
< 880	Promedio	0,74	13,33
	Máximo	1,13	14,90
	Mínimo	0,08	12,10
	Desv. Estándar	0,32	0,75
881 - 920	Promedio	0,83	13,30
	Máximo	2,73	15,44
	Mínimo	0,24	10,06
	Desv. Estándar	0,52	1,75
921 - 960	Promedio	0,88	12,16
	Máximo	2,54	14,48
	Mínimo	0,00	9,26
	Desv. Estándar	0,51	1,33
961 - 1000	Promedio	0,72	12,63
	Máximo	2,53	17,53
	Mínimo	0,03	9,46
	Desv. Estándar	0,42	1,66
1001 - 1040	Promedio	0,85	13,86
	Máximo	1,59	22,04
	Mínimo	0,00	10,26
	Desv. Estándar	0,29	2,10
> 1041	Promedio	0,86	13,92
	Máximo	4,15	21,95
	Mínimo	0,02	10,14
	Desv. Estándar	0,57	2,37

Los promedios de expansión fueron poco variables, no presentaron una tendencia que demuestre una relación entre expansión del espesor y densidad de tablero. Lo anterior queda demostrado por el análisis de regresión, donde los valores de R^2 son inferiores a 0,16.

En la figura 5 se presenta la relación que existe entre la expansión del espesor y la humedad relativa por rango de densidad.

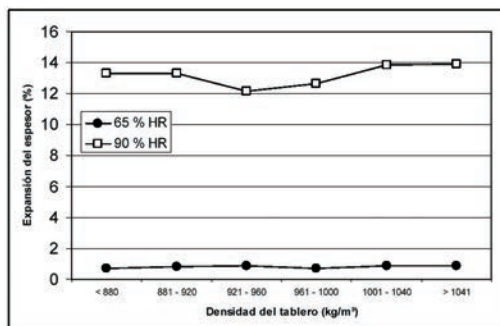


Figura 5: Expansión del espesor y humedad relativa

Niemz y Poblete (1996) y Poblete *et. al* (2000) presentan tendencias similares para tableros de partículas y MDF aunque con valores desplazados, menores. En la figura 5 se observa que entre las 6 clases de densidad no existen diferencias importantes.

Es importante considerar que estos tableros son utilizados en su mayoría para formar puertas de interior, donde las condiciones de clima no son extremas, por lo tanto es posible la fabricación de tableros con densidades bajas sin provocar expansiones importantes.

Expansión lineal. La expansión lineal es una propiedad más importante que la expansión del espesor, por las magnitudes y los efectos prácticos que puede provocar. Al igual que la expansión en espesor, fue calculada tomando como base la dimensión registrada con la probeta en estado anhidro, luego de un secado a 103 °C en estufa. En la tabla 10 se presentan los estadígrafos básicos para esta propiedad y en la figura 6 se presentan las poligonales por rango de densidad.

Tabla 10: Expansión lineal: calculo basado en la dimensión en estado anhidro

Rangos de densidades kg/m ³	Estadígrafos	Humedad Relativa (%) con 20 °C		
		40	65	90
< 880	Promedio	0,29	0,40	0,73
	Máximo	0,33	0,45	0,77
	Mínimo	0,24	0,36	0,68
	Desv. Estándar	0,03	0,03	0,02
881 - 920	Promedio	0,31	0,42	0,74
	Máximo	0,37	0,51	0,84
	Mínimo	0,21	0,33	0,64
	Desv. Estándar	0,05	0,06	0,06
921 - 960	Promedio	0,35	0,46	0,76
	Máximo	0,42	0,53	0,83
	Mínimo	0,27	0,37	0,65
	Desv. Estándar	0,03	0,03	0,03
961 - 1000	Promedio	0,37	0,50	0,79
	Máximo	0,44	0,56	0,86
	Mínimo	0,32	0,38	0,68
	Desv. Estándar	0,03	0,03	0,04
1001 - 1040	Promedio	0,40	0,52	0,81
	Máximo	0,48	0,61	0,89
	Mínimo	0,31	0,45	0,73
	Desv. Estándar	0,04	0,04	0,04
> 1041	Promedio	0,41	0,53	0,83
	Máximo	0,49	0,62	0,92
	Mínimo	0,34	0,45	0,77
	Desv. Estándar	0,03	0,03	0,03

Se destaca la menor variabilidad de los valores, inferior a la de expansión en el espesor. El promedio general de las 400 probetas fue de 0,37; 0,50 y 0,79 % para 40; 65 y 90 % HR respectivamente. Al comparar los promedios se aprecia una cierta relación entre la densidad y la expansión lineal.

En la figura 6 se aprecia la relación entre densidad y expansión lineal, demostrada por el ordenamiento de las poligonales. En la tabla 11 se presentan los resultados del análisis de regresión realizado para esta relación.

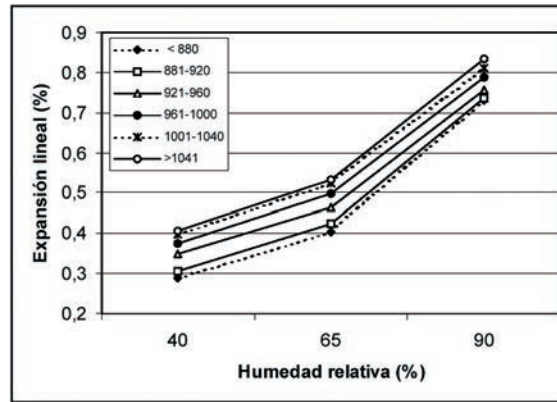


Figura 6: Relación entre expansión lineal y humedad relativa por rango de densidad.

Tabla 11: Regresiones para expansión lineal (EL) en función de la densidad (D)

Humedad relativa (%)	Ecuación de regresión	R ²
40	EL = 0,5441Ln(D) - 3,382	0,543
65	EL = 0,6161Ln(D) - 3,756	0,569
90	EL = 0,5535Ln(D) - 3,027	0,523

Los valores de R², relativamente bajos, se deben a la dispersión de los datos. Es probable que aumentando la muestra se mejore este parámetro.

En la figura 7 se presentan las poligonales con los promedios de expansión lineal en función de la densidad. Se aprecia la tendencia a aumentar la expansión a medida que aumenta la densidad.

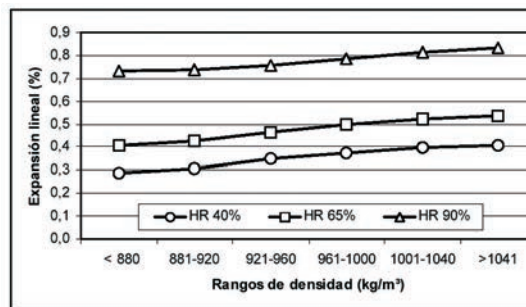


Figura 7: Expansión lineal en función de la densidad del tablero.

Aplicando la metodología planteada por Poblete, *et. al* (2000) se calculó el índice de variación dimensional, que se expresa como la variación por cada 1 % de cambio de la humedad de equilibrio. Los valores se presentan en la tabla 12.

Tabla 12: Variación dimensional por cada 1% del cambio de humedad de equilibrio

Densidades (kg/m ³)	Variación dimensional (por cada 1%)	
	Lineal (%)	Espesor (%)
< 880	0.045	0.2
881 - 920	0.046	0.1
921 - 960	0.050	0.2
961 - 1000	0.055	0.3
1001 - 1040	0.057	0.3
> 1041	0.060	0.3
Promedio	0.052	0.2

Se destaca que el índice de variación dimensional es mayor en el espesor que la generada en sentido lineal del tablero. Se observa una clara relación entre el índice de expansión lineal y la densidad del tablero. Esta relación no se da en el caso del espesor.

CONCLUSIONES

Se determinó que en tableros HDF producidos por un proceso seco, el MOR y MOE poseen una relación dependiente de la densidad. Los tableros en estudio, poseen una carga máxima a la flexión de aproximadamente 43,3 N/mm², y un promedio de 3905 N/mm² en el módulo de elasticidad.

La variable densidad no explica la propiedad de hinchamiento ni la expansión en el espesor.

Se pudo determinar, que un aumento de la densidad provoca una disminución de la absorción de agua y de la humedad de equilibrio.

El cambio dimensional generado en el sentido longitudinal de los tableros fue de 0,37; 0,50 y 0,79% para los climas de 40; 65 y 90% HR respectivamente. Se pudo comprobar que la densidad influye en la expansión lineal de los tableros, esta tiende a aumentar a medida se incrementa la densidad.

Los resultados son un aporte ya que no existen experiencias similares con HDF y permiten al fabricante ajustar la densidad reduciendo costos.

BIBLIOGRAFÍA

- Bellido, M.; Egoavil-cueva, G.; Gonzáles, E.** 2003. Tableros de fibra de madera de "Tornillo" *Cedrelinga cateniformis* Ducke. *Bosque* 24 (3): 39-44.
- 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 de Magíster. U. Austral de Chile, Valdivia Chile.
- DIN. Deutsches Institut für normung.** 1994 *DIN-Taschenbuch 60: Holzfasserplatten, Spanplatten, Sperrholz.* Beuth Verlag. Berlín.
- Dunky, M.; Niemz, P.** 2002. *Holzwerkstoffe und Leime. Technologie und Einflussfaktoren.* Springer Verlag.
- Eleotério, J.** 2000. Propriedades físicas e mecânicas de painéis MDF de diferentes densidades e teores de resina. *PIRACICABA* Estado de Sao Paulo, Brasil. pp 74 – 80.
- 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

Goycolea, P. 2000. Puertas moldeadas: nueva tecnología en puertas. *Revista BIT*. pp. 52 - 54

Larmore, F. 1959. Influence of specific gravity and resin content on properties of particleboard. *Forest Product Journal* 9(4): 131- 134

Niemz, P.; Poblete, H. 1996. Estabilidad dimensional y humedad de equilibrio en tableros de fibras (MDF) y de partículas. *Ciencia e Investigación forestal*. 10(1): 49-62

Poblete, H.; Peredo, M. 1990. Tableros de desechos del debobinado de especies chilenas. *Bosque* 11 (2): 45-58

Poblete, H.; Sanchez, J. 1991. Tableros con corteza de *Pinus radiata*. *Bosque* 12(1): 17-26

Poblete, H.; Loncomilla, E.; Inzunza, L. 2000. Densidad del tablero de partículas y estabilidad dimensional. *Bosque* (21) 2: 69-83

Poblete, H. 2001. *Tableros de Partículas*. Editorial El Kultrun.

Stegmann, G.; Durst, J. 1964. Spanplatten aus Buchenholz. *Holz-Zentralblatt*. p. 153

Vital, B.; Kehmann, W.; Boone, R. 1974. How species and board densities affect properties of exotic hardwood particleboards. *Forest Products Journal* 24(12): 33-45