

**Efecto de la densidad sobre las propiedades
físico-mecánicas de tableros de fibra HDF**

ROQUE FREDY VARGAS CATALAN - cristianquil6@gmail.com

VALDIVIA
2005

CALIFICACIÓN DEL COMITÉ DE TITULACIÓN

		Nota
Patrocinante:	Sr. Hernán Poblete	6.8
Informante:	Sr. Héctor Cuevas	6.4
Informante:	Sr. Luís Vallejos	6.8

El Patrocinante acredita que el presente Trabajo de Titulación cumple con los requisitos de contenido y de forma contemplados en el reglamento de Titulación de la Escuela. Del mismo modo, acredita que en el presente documento han sido consideradas las sugerencias y modificaciones propuestas por los demás integrantes del Comité de Titulación.

Sr. Hernán Poblete W.

AGRADECIMIENTOS

Primero que nada, agradezco a Dios por haberme dado la oportunidad de estudiar y de haber culminado esta carrera. Sin duda esta etapa no hubiese sido posible sin su ayuda.

Lo anterior ocurrió a través del apoyo de muchas personas que estuvieron constantemente apoyándome en esta etapa, que por lo demás no fue para nada de fácil poder terminarla. Entre todas estas personas agradezco a mi familia, principalmente agradezco a Roxana mi querida esposa, la cual ha sido un pilar fundamental en todo lo que he obtenido, a mis Padres, a mi hermana junto a su esposo, a mis suegros, a mi prima y su familia.

Quiero también agradecer la disposición y la importante cooperación de Don Luís Vallejos, ya que a través de él he podido efectuar este trabajo con una gran empresa como lo es Masonite Corp. Junto a esto agradezco la dirección y todas las enseñanzas recibidas por mi profesor patrocinante, Don Hernán Poblete, el cual estuvo constantemente con una actitud positiva y alentadora durante todo el tiempo que nos tomó este trabajo. De igual manera, agradezco la cooperación recibida de todos los docentes y académicos del Instituto de Tecnología de Productos Forestales, por mencionar algunos, agradezco a Don Héctor Cuevas, a la profesora Alicia Fernández, a María Eugenia, al Ángel, a Manuel y a Don Guido, que gracias a su disposición este trabajo se realizó con éxito y sin ningún contratiempo.

Además quiero agradecer a Alejandra, la secretaria de mi escuela, por su buen desempeño y por toda la ayuda prestada.

No puedo dejar de lado las enseñanzas y la amistad que recibí de parte de mis compañeros durante los años de permanencia en la Universidad. Entre los cuales quiero agradecer a Mauricio Barrientos, Juan Rivera, Gabriel Durán, David Solar, Javier Zarate, Víctor Vera, Sergio Gallardo, además agradezco la invitación de mi compañero Fernando Fuentes a trabajar en el consejo de estudiantes, que fue la oportunidad que tuve, de integrarme más a la Universidad y a la carrera.

A todos ellos muchas gracias

Dedicado a mí esposa.

INDICE DE MATERIAS

	Pág.
1. INTRODUCCIÓN	1
2. MARCO TEÓRICO	2
2.1 Definición del producto en estudio	2
2.1.1 Tableros HDF proceso húmedo	2
2.1.2 Producción de tableros HDF por proceso seco en la empresa Masonite	2
2.1.3 Ventajas de los tableros fabricados por el proceso seco	5
2.2 Variables que afectan las propiedades físicas y mecánicas	6
2.2.1 La corteza	6
2.2.2 Aditivos y adhesivos	7
2.2.3 Densidad de la madera y del tablero	7
2.2.4 Humedad ambiente	8
3. DISEÑO DE INVESTIGACIÓN	11
3.1 Materiales	11
3.1.1 Tableros HDF	11
3.1.2 Equipos	12
3.2 Método	12
3.2.1 Determinación de la densidad de las probetas	13
3.2.2 Determinación del módulo de elasticidad y del módulo de rotura	13
3.2.3 Determinación de la resistencia a la tracción paralela	14
3.2.4 Determinación del hinchamiento y absorción de agua	16
3.2.5 Determinación del <i>springback</i>	17
3.2.6 Determinación de la expansión lineal y de la expansión del espesor	18
4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	20
4.1 Efecto de la densidad sobre el modulo de rotura y el modulo de elasticidad	20
4.2 Efecto de la densidad en la tracción paralela	23
4.3 Efecto de la densidad respecto, al hinchamiento, al <i>springback</i> y a la absorción de agua	24
4.3.1 Análisis del hinchamiento de los tableros	24
4.3.2 Springback (hinchamiento no recuperable)	25

4.3.3	Análisis de la absorción de agua de los tableros	26
4.4	Efecto de la densidad en la expansión en el espesor y lineal	28
4.4.1	Humedad de equilibrio	28
4.4.2	Expansión del espesor	30
4.4.3	Expansión lineal	34
4.4.4	Variaciones dimensionales en relación al cambio de humedad de equilibrio	36
4.5	Resumen de la densidad y su efecto en las propiedades analizadas	37
5.	CONCLUSIONES	39
6.	BIBLIOGRAFÍA	40

ANEXOS

1. Abstract
2. Efecto de la densidad sobre el hinchamiento y la absorción de agua a 2 hrs.
3. Regresión para el espesor del tablero respecto de la densidad.
4. Relación entre el *Springback* y densidad de los tableros.
5. Regresiones para la expansión en espesor respecto de cada clima.
6. Regresiones para la expansión lineal respecto de cada clima
7. Regresiones para la humedad de equilibrio respecto de la densidad para cada clima.
8. Poligonales que relacionan 2 rangos de densidades con la HR y la humedad de equilibrio.

RESÚMEN EJECUTIVO

El objetivo del trabajo fue determinar las propiedades físicas y mecánicas del producto que fabrica la empresa Masonite denominado *Molded Doorskins*, y evaluar el comportamiento que presenta respecto a la densidad la cual fluctuó entre 810 y 1117 kg/m³. Cabe mencionar que el producto es un tablero HDF fabricado por un proceso seco.

Se evaluaron las propiedades modulo de rotura, modulo de elasticidad, tracción paralela, absorción de agua, hinchamiento, *Springback*, expansión lineal y expansión del espesor.

Las probetas de expansión lineal y expansión del espesor, se sometieron a un climatizado con 20 °C a 3 humedades relativas; 40, 65 y 90%. Posterior a cada climatizado se determinó la expansión lineal y del espesor, además de la humedad de equilibrio.

Los resultados demostraron que existe una correlación entre la densidad del tablero y las propiedades: tracción paralela, modulo de elasticidad, modulo de rotura, 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, de la misma manera la expansión lineal disminuye a medida que la densidad aumenta. Respecto al hinchamiento y la expansión del espesor no se presentó una dependencia de la densidad.

La expansión lineal es la propiedad de mayor importancia para el uso al cual están destinados los *skins*, por esta razón para poder bajar la densidad de los tableros, primero hay que decidir por la expansión lineal, y posteriormente por las propiedades mecánicas y de absorción de agua.

Palabras clave: *Tableros de fibra HDF, propiedades físicas y mecánicas, expansión lineal y en espesor.*

1. INTRODUCCIÓN

Las nuevas tecnologías han llevado a que cada vez más surjan nuevos productos con mayores utilidades y a menores costos. Desde un buen tiempo y hasta esta parte, el área de los tableros ha ido creando innovadores productos que satisfacen las necesidades de los cada vez más exigentes consumidores, tal es el caso de los *Molded Doorskins*, que la empresa Masonite Chile aporta al mercado mundial de puertas. Estas son hechas a base de un tablero HDF moldeado (*Skins*) y un bastidor de madera de pino radiata.

Esta empresa cuenta con una política de desarrollo que incluye el estudio de las variables que afectan al proceso y al producto. Entre los temas que se plantean en la actualidad está el evaluar el efecto que tiene la densidad de los tableros HDF sobre las propiedades físico-mecánicas. Para responder a este requerimiento el presente estudio buscará analizar la relación entre densidad y las distintas propiedades del tablero.

La densidad de los tableros es un factor de suma importancia para la producción, ya que determina la cantidad de madera a utilizar en el proceso, y a su vez esta ligada al costo económico que puede generar la utilización de esta materia prima. Además hay que señalar que existe un importante impacto en lo que se refiere a los costos de transporte ya que si se disminuye la densidad de los tableros también se disminuye su peso.

Por las razones anteriores la empresa Masonite Chile planteó la necesidad de efectuar el presente estudio, cuyo objetivo principal es determinar si es posible disminuir la densidad de los tableros sin alterar las propiedades físico-mecánicas.

Para lograr dicho objetivo se plantearon los siguientes objetivos específicos:

- Evaluar la expansión lineal y el espesor de los tableros de distintas densidades, respecto a 3 humedades relativas en una cámara de clima.
- Evaluar la humedad de equilibrio generada en los tableros por causa de los distintos climas.
- Evaluar el hinchamiento, la absorción y el hinchamiento no recuperable (*Springback*), de los tableros en análisis.
- Evaluar la alteración de las propiedades: tracción paralela, módulo de elasticidad y módulo de rotura, respecto a las distintas densidades de tableros.

2. MARCO TEÓRICO

2.1 Definición del producto en estudio

Existe una amplia variedad de tableros de fibra los cuales pueden ser clasificados por el tipo de materia prima, por el método de desfibración, por el método de formación de la estera, presencia o ausencia de adhesivos, densidad del producto y clase o condiciones de uso (Poblete, 1987).

Un tablero HDF (*High Density Fiberboard*) es un tablero de fibras de alta densidad (mayor a 800 kg/m^3), que es elaborado en un proceso que en general trata los mismos principios aplicados en la producción de pulpa y papel, es decir, la disolución de la madera en haces de fibra por medio de un tratamiento termomecánico, a lo que se agrega la aplicación de un adhesivo y un prensado para consolidar la unión entre fibras.

2.1.1 Tableros HDF proceso húmedo

Un tablero HDF elaborado a través de un proceso húmedo, es aquel que se genera por el producto obtenido del entrecruzamiento de las fibras lignocelulósicas aglutinadas con la lignina contenida en las fibras o con la adición de otros aglutinantes orgánicos e inorgánicos, pudiendo elaborarse en una extensa gama de densidades y espesores (Noriega, 1996).

Estos tableros tienen densidades cercanas a 1000 kg/m^3 y espesores de hasta 5,0 mm.

En la formación de tableros por la vía húmeda, el método es similar a la formación del papel mediante un movimiento continuo, donde el agua es drenada o escurrida, formando un manto fibroso que posteriormente se seca y prensa hasta obtener el tablero. La formación del manto o estera de fibras se realiza en medio acuoso con una consistencia de 2 % y al momento de prensar, la humedad de la pulpa alcanza a valores superiores a 50 % (Bellido *et al*, 2003).

2.1.2 Producción de tableros HDF proceso seco en la empresa Masonite

Los tableros HDF elaborados a través de un proceso seco se distinguen del proceso húmedo ya que en la etapa de prensado la estera está compuesta de fibras secas, con un contenido de humedad inferior al 7%. Además se caracteriza por que la unión de fibras se logra a través de resinas sintéticas. De este proceso se obtiene un tablero característico, liso en la trascara quedando en la cara impresa la textura o veteado característico de una puerta, no así el tablero elaborado por un proceso industrial húmedo que en un lado denota la marca de la malla que filtra el agua.

A continuación en la figura 1 se presenta la línea de formación de las placas elaboradas por Masonite.

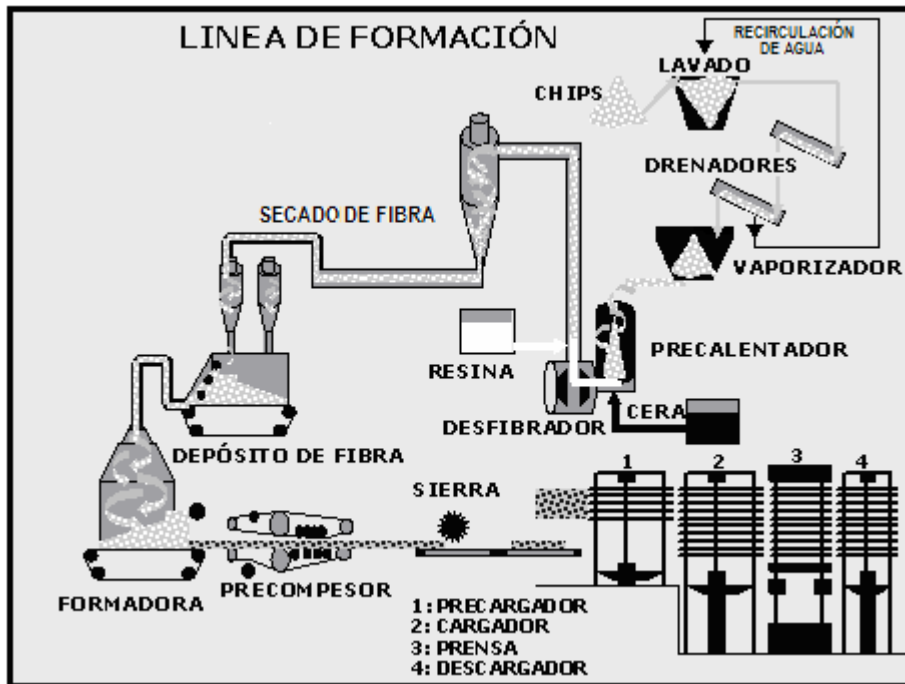


FIGURA 1: Línea de formación de placas para puertas, de la planta Masonite Chile

El desfibrado se realiza a través de un proceso termomecánico, en que se logra la separación de las fibras gracias a una etapa térmica donde las astillas entran a una cámara de precalentamiento en que son plastificadas con temperaturas cercanas a 160°C y vapor a una presión de 8 kg/cm^2 . Cabe destacar que en esta etapa se agrega cera que posteriormente disminuirá la capacidad de absorción de agua del tablero. Una vez que las astillas han sido plastificadas se transportan hacia el desfibrador. Este es un equipo, conformado por dos discos, de los cuales uno está fijo y el otro gira. Los discos del desfibrador tienen un cierto diseño de ranuras en su superficie para facilitar el desfibrado de las astillas. El proceso de desfibrado se denomina como sistema de desfibrado Asplund (Poblete, 2004).

Posterior al proceso de desfibrado se realiza el encolado donde se agrega la resina (Fenol formaldehído) a través de una unidad denominada *Blow line*, donde las fibras encoladas viajan por un conducto hacia la etapa de secado. Es importante señalar que en el secado el adhesivo puede fraguar antes de que las fibras sean prensadas, para evitar esto se puede agregar algún tipo de retardante en la etapa de encolado.

En la conformación de los tableros por vía seca, se utiliza corrientes de aire para el transporte de las fibras encoladas con adhesivos sintéticos. La humedad de la pulpa

al prensar es aproximadamente de 7 a 9 % (Bellido *et al*, 2003). De este modo es posible la formación de esteras de fibras de varias capas.

Como se observa en la figura 2, que ejemplifica el sistema de prensado aplicado por Masonite, el proceso es efectuado en una prensa de 10 pisos, donde cada piso esta compuesto por dos matrices (matriz superior y matriz inferior) con diseños de relieves característico de una puerta. Cabe agregar que cada piso posee un diseño distinto, produciéndose una gama de cubiertas para puertas de diferente tipo.

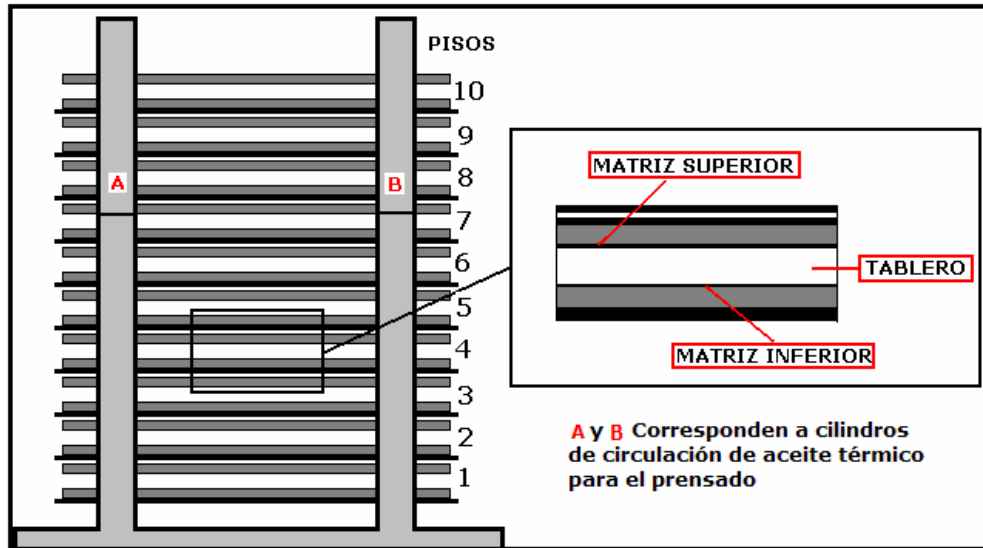


FIGURA 2: Figura representativa de la prensa

Mediante el prensado en caliente la estera se seca intensamente, con lo que se provoca el fraguado del adhesivo y se obtiene un tablero compuesto por 2 *Skins* que en definitiva serán los que formarán la puerta.

El tablero obtenido después de este proceso posee un espesor de 3,20 mm aproximadamente, con una alta densidad que supera los 1050 kg/m³, esto las hace muy resistentes a deformaciones dimensionales, y con los diseños y modelos logrados con estas tecnologías se convierten en un real aporte a la decoración y ambientación de las casas (Goycolea, 2000).

En la figura 3 se demuestra el tablero que se obtiene posterior al prensado, y que en definitiva conformara la puerta.

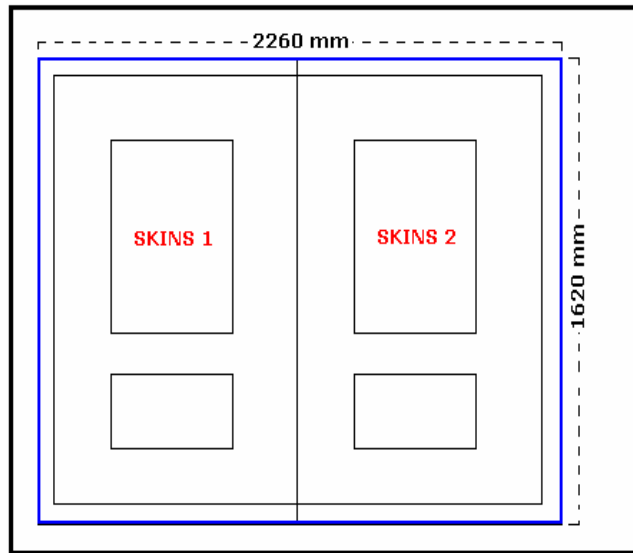


FIGURA 3: Tablero obtenido después del prensado (compuesto por 2 skins)

Desde la segunda mitad de los años 90 se comienza en Chile la comercialización y luego la elaboración de puertas basadas en un tablero moldeado de alta densidad, de fibra de madera. Esta tecnología nació en los Estados Unidos, en la década de los 60 para dar una solución innovadora a las puertas del tipo “*Flush Door*” (Goycolea, 2000).

2.1.3 Ventajas de los tableros fabricados por el proceso seco

Las ventajas que se pueden inferir de estos tableros se pueden identificar desde dos puntos de vista, compararlo como tablero o como producto (puerta). A continuación se enunciarán una serie de ventajas que presenta el tablero HDF al momento de compararlo con otros productos de la competencia:

- Son Tableros dimensionalmente estables. Normalmente tienen dilataciones que van desde 1,0 mm a 2,0 mm por metro. Esto quiere decir, que una puerta fabricada con estas placas que posea 2000 mm de alto podría tener una dilatación máxima de 4,0 mm; en otro tipo de puertas huecas, fabricadas con el mismo sistema constructivo, se pueden encontrar dilataciones superiores a los 8,0 mm en el alto.
- Poseen una gran resistencia superficial lo que se ve reflejado en la resistencia al impacto, en comparación con sus competidores como las de MDF o HDF por proceso húmedo.
- Poseen un bajo relieve, que los hace fácilmente apilables, optimizando espacio y transporte. Además tienen menos probabilidades de ser dañados durante su manipulación.

- Todas las puertas fabricadas con tableros de puertas moldeadas son pre pintadas, con lo que se obtiene un producto que requiere una terminación muy simple (dos manos diluidas de pintura). En cambio, las puertas fabricadas con MDF y, sobre todo, con MDF ruteado, necesitan una terminación muy compleja, lo que incluso llega a duplicar el costo de terminación, si se compara con las puertas moldeadas.
- Como son tableros que tienen un diseño estampado con un estilo propio, poseen un gran potencial decorativo al momento de fabricar una puerta.
- Poseen un color estéticamente aceptable, ya que son fabricados a base de adhesivos fenólicos y con la baja presencia de corteza, lo que influye de manera directa en el color de la placa. Esto facilita el uso como para la fabricación de puertas interiores.
- Se obtienen tableros de mayor dureza y de elevadas densidades.

2.2 Variables que afectan las propiedades físicas y mecánicas

Existe una gran cantidad de variables que afectan las propiedades del tablero. En el caso de los fabricados por Masonite las variables más importantes son; la cantidad de corteza, los adhesivos y aditivos, densidad de madera y del tablero y la humedad ambiental.

2.2.1 Corteza

La presencia de corteza en tableros HDF no ha sido mayormente estudiada como lo ha sido para tableros de partículas. Las experiencias con corteza en tableros de partículas indican que las propiedades físicas como el hinchamiento y la absorción de agua se ven mejoradas al momento de incluir más corteza en el tablero, esto se ve reflejado por una acción repelente al agua de algunos compuestos químicos presentes en la corteza (Poblete, 2001).

Poblete y Sánchez (1991) estudiaron la incorporación de corteza en tableros de partículas, y determinaron que las propiedades mecánicas, en especial la flexión, aceptan hasta un 10% de corteza en la fabricación del tablero. Con este porcentaje, se cumple con las exigencias de la norma.

En la planta de Masonite se ha llegado a aplicar hasta un 14 % de corteza. En la práctica ha provocado un efecto positivo respecto a la estabilidad dimensional, ya que ha disminuido la absorción de agua y el hinchamiento de los tableros. Sin embargo ha determinado una disminución de las propiedades mecánicas. Este comportamiento comprueba la teoría que se aplica para los tableros de partículas.

2.2.2 Aditivos y Adhesivos

El adhesivo es, junto con la madera, el constituyente más importante en el tablero. Las propiedades del tablero dependen en gran medida de las materias primas madera y adhesivo y de las reacciones que se produzcan entre ellas. El tipo de adhesivo, la cantidad y la composición de la mezcla de adhesivo y aditivos, determina las propiedades y el uso que se dará al tablero.

En el caso de los tableros de partículas, se han hecho estudios que demuestran que la cantidad de adhesivo utilizado en la fabricación de los tableros afecta la estabilidad dimensional en el espesor. Con un incremento en la cantidad de adhesivo se obtiene un menor cambio dimensional en el espesor del tablero (Larmore 1959).

Con respecto a la expansión lineal, se menciona que solo se reduce levemente la expansión por un aumento en el contenido del adhesivo (Gatchell *et al* 1996).

En el caso de Masonite el adhesivo que se utiliza es Fenolformaldehido, y se ha observado que mientras más cantidad de adhesivo se agregue menor es la absorción de agua y el hinchamiento.

Como se mencionó anteriormente, en el proceso de desfibrado se agrega como aditivo repelente al agua parafina sólida fundida. Este aditivo ayuda a mejorar las propiedades físicas del tablero. La conformación de la puerta se logra gracias a la unión entre batiente y la placa. Esta se realiza con adhesivo Polivinilacetato el cual esta hecho a base de agua (Masonite, 2005).

2.2.3 Densidad de la madera y del tablero HDF

Algunos autores señalan que la densidad influye en el volumen de material a compactar, en el consumo de adhesivo, en las propiedades de resistencias mecánicas y en el acabado superficial del tablero (Vital *et al*, 1974).

Es necesario señalar que si se desea obtener una misma densidad final de tablero, utilizando madera de distinta densidad, sería necesario comprimir en una proporción mayor a la madera de baja densidad respecto a la madera de alta densidad. En otras palabras, el volumen de madera a incorporar en un tablero, para una densidad determinada, varía dependiendo de la densidad de la materia prima (Poblete, 2001).

El efecto de la densidad de la madera es un factor que no debe estar ajeno en este análisis. Por esta razón hay que señalar que estos tableros están compuestos por una mezcla de materias primas (lo que se puede observar en el cuadro 2), alguna de las cuales han sido producto de otros procesos que sin duda pueden influenciar en la densidad de la materia prima. Este antecedente es de consideración en el sentido de que al usar materias primas de baja densidad resultan tableros de mayor estabilidad dimensional (Peredo y Lizama, 1993).

En un proceso de HDF, el largo de fibra cobra importancia debido a que muchas de las propiedades de los tableros se deben a las dimensiones y proporciones de estas. Diaz-vaz (2003) destaca la importancia de las dimensiones, el largo, diámetro y el ancho de la pared celular respecto a las propiedades de la madera y en el uso que se les puede dar. Es así, por ejemplo, la dimensión en el largo de fibras es considerada importante como elemento de juicio en la evaluación de la materia prima. Las dimensiones transversales; diámetros de las células y el espesor de las paredes celulares, son también de alto interés por la estrecha relación que tienen con un sinnúmero de propiedades físicas y mecánicas (Diaz-vaz, 2003).

Stegmann y Durst (1964), demostraron que en tableros de partículas, aumentos en la densidad de la madera producen una disminución en la resistencia a la flexión. Este trabajo se realizó utilizando tableros de distintas densidades.

Además se agrega a esto la relación que existe entre la densidad del tablero y las variaciones dimensionales. Tanto en el sentido lineal como en el espesor, ante un aumento en la densidad del tablero se genera un aumento en la expansión (Poblete, *et al* 2000).

En el mismo sentido, Vital *et al.* (1974) afirma que un incremento en la densidad de la materia prima genera una disminución de las propiedades mecánicas del tablero y un aumento en la expansión lineal y en el espesor.

En lo que respecta a la variación dimensional en el espesor y lineal, en tableros de partículas se demostró que los cambios dimensionales son 30 veces mayor en el espesor que en el sentido longitudinal (Niemz y Poblete, 1996). Es interesante llevar este análisis a los tableros HDF ya que en este caso las fibras que componen el tablero generarán un efecto desconocido y que se investiga en el presente trabajo.

Se puede afirmar entonces que los tableros HDF al ser de mayor densidad que los tableros de partículas poseen mayor material lignocelulósico, por ende los efectos en la compresión de la madera serán mayores.

2.2.4 Humedad Ambiente

Hay que señalar, que la humedad ambiente es el factor más relevante al momento de analizar las causas de los cambios dimensionales de la madera y de los tableros elaborados a base de madera.

La madera se seca hasta alcanzar un estado de equilibrio con las condiciones del ambiente a que está expuesta. La humedad de equilibrio varía según la temperatura y humedad atmosférica. Cabe destacar que la humedad de equilibrio depende de la zona geográfica y además cambia a lo largo del año. Referente a esto, el cuadro 1 muestra las diferencias de humedad de equilibrio que se dan en distintas ciudades de Chile. Esta información que está orientada a madera de *Pinus radiata*, se puede utilizar como referente para tableros a base de madera, y de esta forma ver que el

comportamiento de un tablero ante su estabilidad dimensional estará fuertemente influenciado por el clima de la zona geográfica en que se encuentre.

CUADRO 1: Humedad de equilibrio (HE) en madera de *Pinus radiata* para algunas ciudades de Chile (Mc Manus, 2000)

Ciudades	HE (%)
Iquique	14.2
Chuquicamata	6.3
Antofagasta	14.3
Copiapó	14.5
La Serena	17.1
Valparaíso	15.0
Santiago	14.4
Chillan	16.9
Concepción	19.2
Temuco	17.3
Valdivia	18.9
Osorno	18.6
Puerto Montt	20.6

En el proceso de climatización a la humedad de equilibrio, el tablero sufre una dilatación, la que se traduce en una deformación. Por esta razón es importante que el tablero se trabaje una vez que haya adquirido la humedad de equilibrio y se encuentre estable.

Es aquí donde cobra importancia la etapa de climatizado, en un proceso por el tiempo que se estime necesario para cada tipo de tablero. Este proceso es de gran importancia para la elaboración de los *molded doorskins*, donde se integra una etapa de humectación para llegar a una humedad mayor a la obtenida en la prensa (Goycolea, 2000).

La estabilidad dimensional del tablero ya sea en el ancho o el largo, se genera en la medida que este capte o pierda humedad. Cabe agregar que la estabilidad dimensional del tablero se logrará una vez que logre la humedad de equilibrio con el ambiente, siendo éste el momento más apropiado para la instalación del tablero, minimizando así sus deformaciones.

Uno de los factores que ha llevado a reemplazar la madera por otros materiales, es su inestabilidad dimensional que se presenta al momento de enfrentarse a condiciones ambientales variables. Esto se acentúa aun más cuando los tratamientos superficiales y de protección de la madera no son los adecuados.

La influencia que tiene la madera en la estabilidad dimensional y la humedad de equilibrio de los tableros es muy importante ya que las propiedades del producto final son consecuencia de las propiedades originales de la materia prima.

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 mas bajos de densidad se registran en el centro del tablero, formando un perfil de densidad que aumenta hacia las capas más superficiales. Además se señala que estas diferencias de densidad resultan en diferencias en el comportamiento en la estabilidad dimensional. Las áreas de más alta densidad tienen variaciones dimensionales mas altas que las áreas de menor densidad, generándose un estrés que induce a rupturas de las fibras (Poblete, *et al.* 2000).

Como material higroscópico la madera intercambia constantemente vapor de agua con la atmósfera que la rodea, de tal forma que a cada pareja de valores higrotérmicos del aire (temperatura y humedad relativa) le corresponde un contenido de humedad, denominado humedad de equilibrio higroscópico. La madera para lograr estabilidad dimensional, deberá tener una humedad lo más aproximada a la de equilibrio higroscópico correspondiente a las condiciones higrotérmicas de servicio (Mc Manus, 2000).

3. DISEÑO DE INVESTIGACIÓN

El estudio se efectuó gracias al material que fue facilitado por la empresa Masonite Chile. 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.

3.1 Materiales

3.1.1 Tableros HDF

Se utilizó el producto que fabrica la empresa Masonite, denominado *Molded Doorskins (skins)*, el cual es un tablero que tiene como promedio 3,0 mm de espesor.

La composición de la materia prima madera empleada para la fabricación de los tableros se indica en el cuadro 2:

CUADRO 2: Composición de materia prima.

Producto	Cantidad (%)
Chip verde	5
Chip verde con corteza	40
Chip seco	33
Viruta proceso	5
Corteza proceso	7
Chip de aroma	10
Total	100

Los skins enviados por la empresa en total fueron 30, los cuales llegaron clasificados en 5 grupos de densidades distintas, y en cada grupo 6 skins de distinto diseño. Hay que agregar que poseen una capa de pintura color blanco a base de agua en la cara exterior. En el cuadro 3 se presenta un detalle del número de tableros y las densidades nominales.

Por ser un tablero moldeado que posee relieves característicos de una puerta, fue necesario extraer de los skins solamente las zonas planas de este, de donde se obtuvieron las probetas.

Para los efectos de este estudio fue necesario extraer un total de 940 probetas distribuidas para los ensayos de flexión, tracción, hinchamiento y expansión lineal. Lo que se presenta en el cuadro 4.

CUADRO 3: Skins enviados por la empresa

Grupo	Densidad nominal (kg/m ³)	Nº Skins
1	1040	6
2	1000	6
3	960	6
4	920	6
5	880	6

CUADRO 4: Número de probetas por ensayo

Ensayo	Nº Probetas
Flexión (MOE y MOR)	200
Tracción	200
Hinchamiento, absorción y Springback	140
Expansión (Lineal y en Espesor)	400

Todas las probetas fueron clasificadas y enumeradas para mantener una identificación de cada una de ellas.

3.1.2 Equipos

Los equipos necesarios para efectuar este estudio fueron los siguientes:

- Cámara Heraeus programable (Precisión \pm 3°C y 4%)
- Máquina universal de ensayos mecánicos
- Estufa para secado (Precisión 1°C)
- Balanza de Precisión (Precisión 0.01g)
- Equipos de medición (Mitutoyo): Medidores digitales para espesor y longitud. Precisión: 0.001mm.

3.2 Método

Se efectuaron ensayos mecánicos y físicos de acuerdo con las normas y procedimientos que se señalan en cada descripción. En el análisis de los resultados se consideró cada probeta como un pequeño tablero, a cada probeta se le determinó la densidad y el resultado del ensayo respectivo.

3.2.1 Determinación de la densidad de las probetas

Los ensayos 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 a clima normal de 65 % HR y 20° C. De esto se pudo determinar que se obtuvieron densidades superiores a los rangos nominales enviados por la empresa, estas fluctuaron entre 810 kg/m³ y los 1117 kg/m³.

3.2.2 Determinación del módulo de elasticidad y del módulo de rotura

Para determinar el módulo de elasticidad y el módulo de rotura fue necesario efectuar el ensayo de flexión, el cual se realizó con referencia a la norma DIN 52352 para tableros de fibras duros de espesores menores a 6,0 mm. Este ensayo se caracteriza por los soportes de apoyo ya que estos son planos, lo que permite una mayor área de apoyo fijo que evita el deslizamiento de la probeta. Además se efectuó un control del espesor de cada probeta.

Este procedimiento se llevó a cabo en la máquina universal de ensayos mecánicos, y a través de un software se permitió calcular los módulos de elasticidad y de rotura a la flexión estática, los que fueron adecuadamente corregidos respecto a las dimensiones reales de las probetas. Dicho ensayo se presenta en la figura 4.

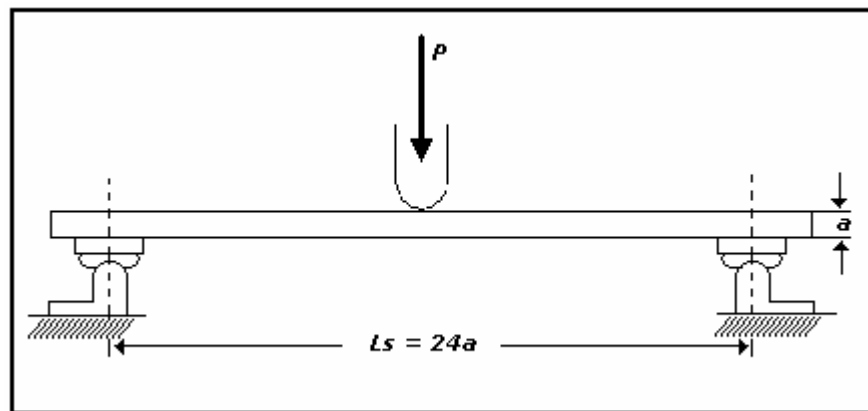


FIGURA 4: Ensayo de flexión para tableros duros (DIN, 52352)

El módulo de elasticidad y el módulo de rotura a la flexión estática se calculó de acuerdo con las siguientes relaciones:

$$MOE = \frac{Pl * L^3}{4 * fl * b * h^3}$$

Donde:

- MOE: Módulo de elasticidad a la flexión estática (kg/cm²)
- Pl: Carga en el límite de proporcionalidad (kg)
- fl : Deformación en el límite de proporcionalidad (mm)
- L : Distancia entre el centro de los apoyos (cm)
- b: Ancho de la probeta (cm)
- h: Espesor de cada probeta (mm)

$$MOR = \frac{3 * Q * L}{2 * b * h^2}$$

Donde:

- MOR: Módulo de rotura a la flexión estática (kg/cm²)
- Q: Carga máxima obtenida durante el ensayo (kg)
- L : Distancia entre el centro de los apoyos (cm)
- b: Ancho de la probeta (cm)
- h: Espesor de cada probeta (mm)

3.2.3 *Determinación de la resistencia a la tracción paralela*

Para realizar un análisis de esta propiedad se adaptó la norma DIN 52377, que esta orientada para tablero contrachapado y madera sólida. Esta adaptación se genera ya que no existen normas que verifiquen esta propiedad para tableros duros por proceso seco.

Se logró diseñar una probeta que mantiene la forma original de la norma pero con dimensiones inferiores. Lo que se observa en la figura 5.

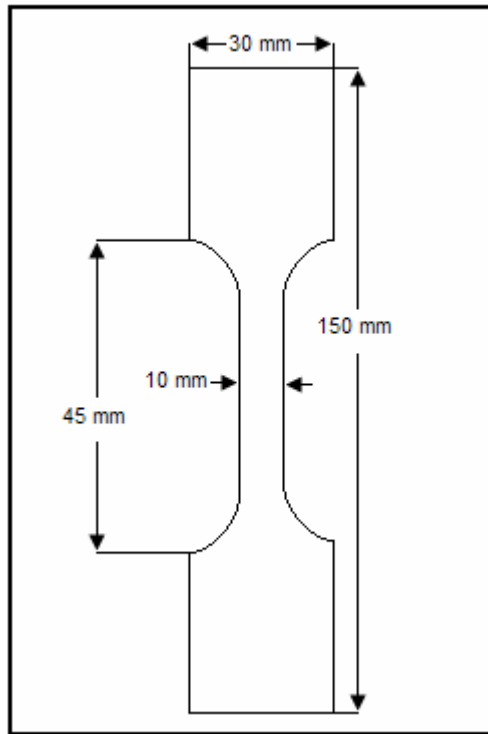


FIGURA 5: Adaptación de la probeta de tracción paralela

Este ensayo permitió obtener la resistencia que presenta el tablero a la tracción paralela a través de la siguiente relación:

$$T = \frac{Q}{b * h}$$

Donde

T: Resistencia a la tracción paralela (kg/cm^2)

Q: Carga máxima soportada por la probeta a la tracción (kg)

b: Ancho de la probeta aproximadamente 10 mm

h: Espesor en el centro de cada probeta (mm)

A lo anterior hay agregar que tanto para el ensayo de módulo de elasticidad como para el ensayo de módulo de rotura y para el ensayo de resistencia a la tracción paralela, se obtuvieron valores en unidades de kg/cm^2 , los cuales se transformaron a unidades de N/mm^2 .

3.2.4 Determinación del Hinchamiento y Absorción de agua

Respecto al hinchamiento se utilizó la norma DIN 52 350, y para el caso de la absorción de agua la norma requerida fue DIN 52 351. Junto a esto hay que agregar, que se determinó el espesor y el peso antes y después de una inmersión en agua por 2 y 24 horas en ambos ensayos lo que se efectuó a temperatura y presión ambiente.

Se obtuvieron un total de 140 probetas representativas de los tableros enviados por Masonite.

Al momento de evaluar los respectivos ensayos se utilizó la norma DIN 687.50, que estipula límites máximos de hinchamiento y de absorción.

En la figura 6 se esquematiza la probeta utilizada para llevar a cabo dichos ensayos. Cabe destacar que tanto para los ensayos a 2 y 24 horas se utilizó la misma probeta. Para el caso del ensayo por 24 horas se consideró el ensayo por 2 horas.

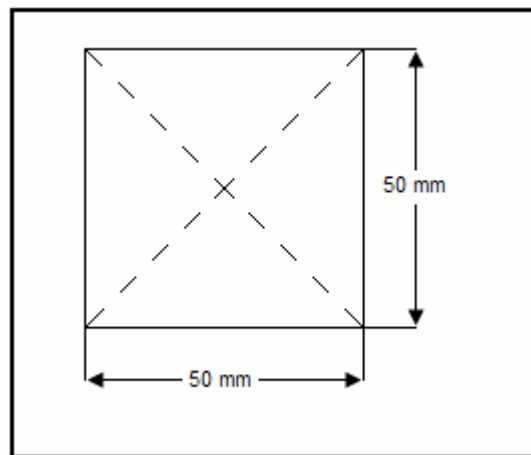


FIGURA 6: Probeta utilizada para los ensayos de Hinchamiento, Absorción y *Springback*.

A esta probeta se le efectuó la medida del espesor en el centro del tablero, lo que se realizó con el objetivo de realizar los controles en el mismo punto. El hinchamiento se pudo obtener gracias a la siguiente relación:

$$Gt = \left[\frac{t_2 - t_1}{t_1} \right] * 100$$

Donde

Gt: Hinchamiento (%)

t₁ : Espesor de la probeta antes de inmersión (mm)

t₂ : Espesor de la probeta después de inmersión (mm)

El ensayo de absorción de agua obtuvo a través de la misma probeta tomando en cuenta las diferencias de peso tanto para 2 horas como para 24 horas. Esto se logró medir con la siguiente relación:

$$Ap = \left[\frac{p_2 - p_1}{p_1} \right] * 100$$

Donde

Ap: Absorción (%)

p₁ : Peso de la probeta antes de inmersión (g)

p₂ : Peso de la probeta después de inmersión (g)

3.2.5 Determinación del Springback

Para determinar el *springback* de tableros HDF, se utilizaron parte de las mismas probetas definidas para el ensayo de hinchamiento y absorción, de las cuales se tenía el dato de espesor en condiciones normales (20° C, 65% HR) antes de la inmersión en agua.

Posterior a la inmersión (24 horas) se llevaron las probetas a peso anhidro para climatizarlas en la cámara de clima a 20° C y 65 % HR, donde después de dos semanas se controló nuevamente el espesor.

La relación utilizada para obtener el *Springback* se presenta en la siguiente fórmula:

$$S = \left[\frac{e_f - e_i}{e_i} \right] * 100$$

Donde

S : *Springback* al hinchamiento máximo (%)

e_f: Espesor posterior al hinchamiento (mm)

e_i : Espesor inicial según condiciones normales (mm)

3.2.6 Determinación de la 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. Para este ensayo se utilizaron 400 probetas la cual se presenta en la figura 7:

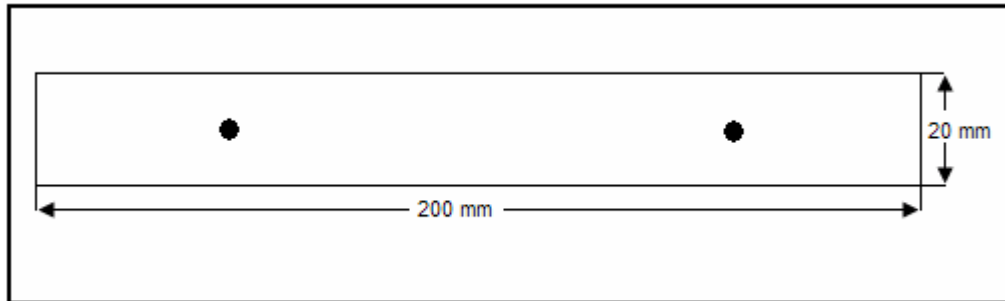


FIGURA 7: Probeta de expansión lineal norma EN 318

Para este caso fue necesario identificar 2 puntos, a través de marcas a 3 cm. de cada extremo, con el objetivo de realizar las medidas en los mismos puntos. De esta manera se obtuvo un promedio del cambio dimensional en el espesor. Además se controló el largo de la probeta a través de un equipo que midió hinchamiento longitudinal (Mitutoyo), para este control también se efectuó una marca en uno de los cantos de cada probeta para controlar el largo en el mismo punto.

Las probetas fueron tratadas en la cámara de clima Heraeus programable a diferentes condiciones de humedad relativa del aire hasta alcanzar la humedad de equilibrio (peso constante). Lo que se efectuó exponiendo las probetas a climas de 40; 65; y 90% de Humedad Relativa y a una temperatura constante de 20 °C lo que se evaluó respecto al estado anhidro de las probetas en una condición anhidra (peso seco en estufa por 24 horas a $103 \pm 2^\circ \text{C}$).

Esta propiedad se pudo obtener gracias a la relación que a continuación se presenta.

$$E_L = \left[\frac{d_1 - d_2}{d_2} \right] * 100$$

Donde

EL: Expansión lineal (%)

d₁ : Dimensión a 40, 65 y 90% HR (mm)

d₂ : Dimensión inicial, base a peso anhidro (mm)

La variación dimensional del espesor de las probetas se determinó a través de la siguiente relación:

$$E_e = \left[\frac{d_1 - d_2}{d_2} \right] * 100$$

Donde

E_e: Expansión del espesor (%)

d₁ : Dimensión a 40, 65 y 90% HR (mm)

d₂ : Dimensión inicial, base a peso anhidro (mm)

También se controló la humedad de equilibrio de las probetas en los distintos climas, la cual se pudo obtener a través de la relación que a continuación se presenta:

$$HE = \left[\frac{p_1 - p_2}{p_2} \right] * 100$$

Donde

HE: Humedad de equilibrio (%)

p₁ : Peso a 40, 65 y 90% HR (g)

p₂ : Peso anhidro (g)

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Antes de cualquier análisis es relevante recordar que no existe en la literatura estudios que relacionen la influencia de la densidad en tableros HDF respecto a sus propiedades físicas y mecánicas, es por ello que estudios realizados en tableros de partículas y tableros MDF cobran importancia al momento de ser utilizados como referencia en los ensayos.

Cabe agregar que para facilitar el análisis de los resultados, los tableros fueron agrupados respecto a 6 rangos de densidades, que fueron; menores o iguales a 880 kg/m^3 , $881 \text{ a } 920 \text{ kg/m}^3$, $921 \text{ a } 960 \text{ kg/m}^3$, $961 \text{ a } 1000 \text{ kg/m}^3$, $1001 \text{ a } 1040 \text{ kg/m}^3$ y las mayores o iguales a 1041 kg/m^3 . Esto fue necesario ya que se analizó a cada probeta como un par de datos independientes, densidad/propiedad.

Junto a esto se consideró como a manera de resumen evaluar las propiedades respecto a valores enteros de densidad (capítulo 4.5), todo esto es con el fin para una futura toma de decisión.

4.1 Efecto de la Densidad sobre el Módulo de Rotura (MOR) y el Módulo de Elasticidad (MOE)

Respecto a la resistencia que presentaron los tableros a la flexión, se observó que existe una dependencia muy clara de la densidad. Esto ha sido estudiado anteriormente para tableros de partículas. Rijo (1988) pudo observar la misma dependencia, logrando determinar que existe una alta correlación entre la resistencia a la flexión y la densidad, y además esta se puede tomar como un indicador del valor aproximado que pueda obtenerse en el ensayo de flexión. Poblete (1987) al analizar la resistencia mecánica de tableros de partículas producidos con mezclas de especies chilenas, también observó dicha tendencia, ya que se logró determinar que la resistencia a la flexión aumenta con la densidad del tablero. A esto se incluye, que la tendencia ya ha sido demostrada anteriormente por otros estudios (Vital *et al.*, 1974; Poblete, 1979).

En base a lo analizado en este estudio, se logró observar que el comportamiento presentado en tableros de partículas también se presenta en tableros de fibra HDF.

Respecto al módulo de rotura y el módulo de elasticidad, estos se obtuvieron gracias a la flexión estática, y por ello se explica su directa relación, ya que a medida que aumenta la resistencia de los tableros a la flexión por causa de la densidad, aumentan también en cierta medida los valores de módulo de rotura y módulo de elasticidad. Es necesario señalar que los tableros en estudio se logran romper ante la flexión con una carga promedio de 43.3 N/mm^2 , y la medida de la rigidez corresponde a un promedio de 3905.57 N/mm^2 , lo que se obtuvo de un amplio rango de densidades. Todo esto se manifiesta en el cuadro 5.

CUADRO 5: Tabla de estadígrafos obtenidos para el MOE y el MOR

Estadígrafos	Densidad (Kg/m ³)	MOE (N/mm ²)	MOR (N/mm ²)
Promedio	977,25	3905,57	43,30
Valor máximo	1106,39	5367,20	61,20
Valor mínimo	836,60	2513,54	24,88
Desv. Estándar	61,84	589,0	7,24

Referente a estas propiedades también se realizaron regresiones, las cuales permitieron analizar en que grado se relacionó la variable densidad con las propiedades de MOR y MOE. En las figura 8 y 9 se aprecia el comportamiento de los tableros ante dichas variables.

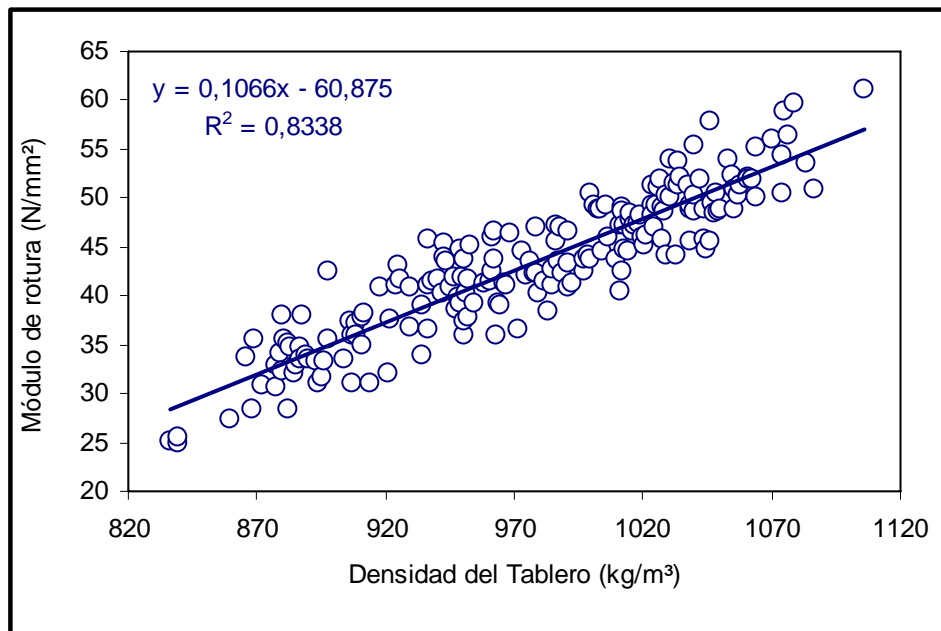


FIGURA 8: Efecto de la densidad del tablero respecto al MOR

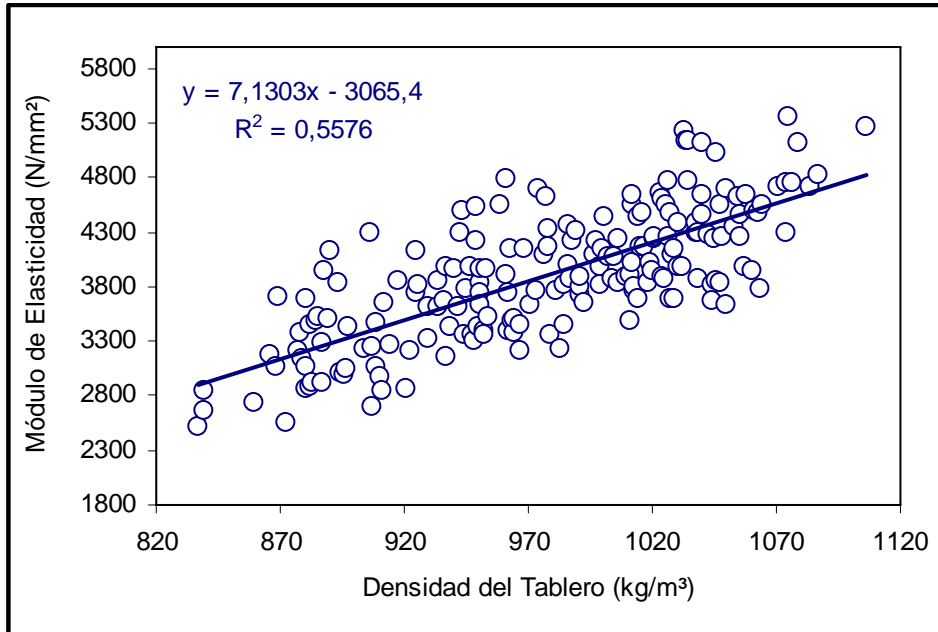


FIGURA 9: Efecto de la densidad del tablero respecto al MOE

Gracias a estas regresiones se pudo encontrar que la densidad logra explicar la variación del MOR en un 83,4%, siendo menor esta relación para el MOE ya que la variable en estudio lo explica en un 55,8%.

A continuación en el cuadro 6 se observa el efecto de dichas propiedades ante los incrementos de densidad. Estos datos son representativos de las 200 probetas ensayadas.

CUADRO 6: Tabla de valores promedios para 6 rangos de densidades

Dens. Kg/m ³	MOE N/mm ²	MOR N/mm ²
≥ 880	3041,84	30,82
881 - 920	3326,39	35,02
921 - 960	3757,04	41,03
961 - 1000	3974,02	43,56
1001 - 1040	4240,34	48,16
≤ 1041	4427,63	51,97

En un estudio efectuado para tableros MDF de densidades que fluctuaron entre 547,2 y 774,1 kg/m³, se logró determinar que a medida que aumenta la densidad se incrementa la resistencia que presentan los tableros respecto al MOE y MOR a la flexión, (Eleotério, 2000). Con esto se corroboran los resultados obtenidos en este estudio ya que la tendencia presentada por tableros de fibras HDF demuestra que a

medida que haya un incremento en la densidad se mejoran las propiedades mencionadas.

Respecto a esto es necesario establecer que los comportamientos tanto para tableros de fibra MDF y tableros de fibra HDF por proceso seco, presentan la misma tendencia al modificar la variable densidad.

4.2 Efecto de la Densidad en la Tracción paralela

Respecto a esta variable no fue posible su comparación con otros tableros ya que para este efecto la probeta diseñada no corresponde a ninguna norma establecida para tableros HDF (Figura 5) ya que no existe una norma que evalúe esta variable.

En el cuadro 7 se observan los estadígrafos correspondientes a esta variable, y en la figura 10 se presenta la regresión resultante de esta relación.

CUADRO 7: Tabla de estadígrafos para el ensayo de tracción paralela

Estadígrafos	Dens. kg/m ³	Tracc. N/mm ²
Promedio	975.21	26.9
Valor mínimo	829.5	13.9
Valor máximo	1103.1	37.9
Desv. Estándar	66.1	5.5

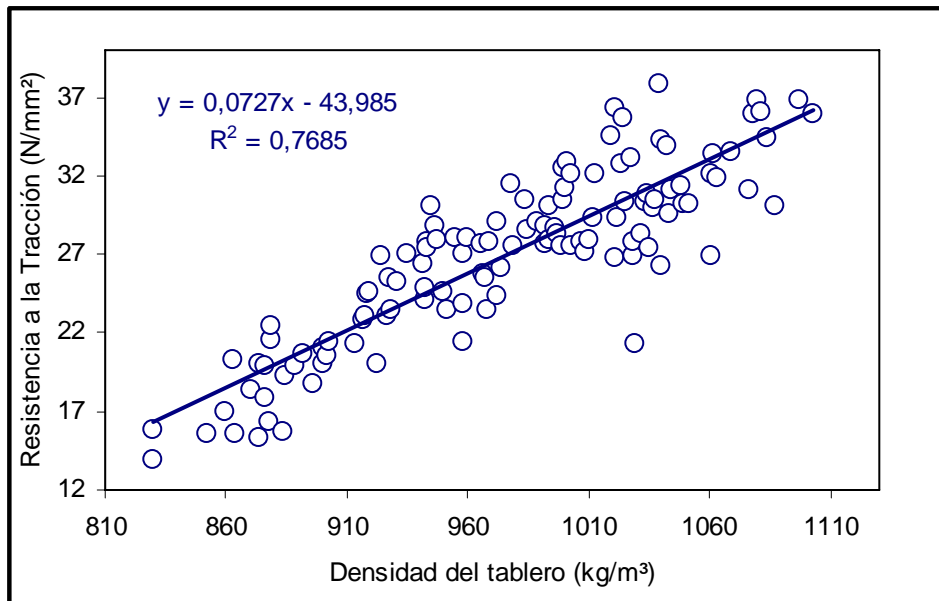


FIGURA 10: Efecto de la densidad respecto a la tracción paralela

En este análisis es necesario destacar que a medida se mejora la densidad de los tableros hay un aumento de la resistencia de los tableros a la tracción paralela.

4.3 Efecto de la Densidad sobre el hinchamiento, *Springback* y absorción de agua

El hinchamiento y la absorción que presentaron los tableros no fueron diferentes a la tendencia que poseen otros tableros (partículas y MDF) respecto a la densidad.

4.3.1 Análisis del hinchamiento de los tableros

Las probetas obtenidas para efectuar el ensayo de hinchamiento fluctuaron en un amplio rango de densidades, entre 849,6 kg/m³ y 1118,02 kg/m³. Con esto se deja de manifiesto que las 140 probetas ensayadas eran todas distintas ya que no hubo ningún valor de densidad que fuera igual a otro. Esto es por que de todas las variables de proceso solo la densidad fue intervenida, manteniéndose todo el resto de variables constantes.

En el cuadro 8 se presentan los estadígrafos obtenidos para el hinchamiento a 2 horas y para el hinchamiento a 24 horas, siendo de mayor consideración para este análisis, el hinchamiento máximo por 24 horas de inmersión en agua.

CUADRO 8: Tabla de estadígrafos para el ensayo de hinchamiento

Estadígrafos	Dens. (kg/m ³)	Hinch. (%) 2 horas.	Hinch. (%) 24 horas.
Promedios	986,96	7,62	20,14
Mínimo	849,57	3,42	16,52
Máximo	1118,01	13,19	25,17
Desv. Estándar	60,48	1,66	1,76

El rango en el cual estuvieron los valores de hinchamiento máximo a 24 horas fue entre 16,52% y 25,17%, y con una dispersión de los datos de 1,76%. Esto permite concluir que los tableros logran incrementar su dimensión en espesor a una inmersión por 24 horas, en un 20,14% de su espesor inicial.

El análisis de regresión que se aprecia en la figura 11, demostró que la relación entre hinchamiento y densidad del tablero no fue significativa para 24 horas de inmersión en agua. Lo mismo ocurrió en el ensayo a 2 horas (ver anexo 2).

Tal como se observa en la regresión, la variable densidad explica tan solo en un 6.4 % a la propiedad de hinchamiento por 24 horas, Similar comportamiento fue observado por Poblete y Peredo (1990). Según lo señalado se logra concluir que la

variable densidad no afecta más allá de un 6,4 % a la propiedad de hinchamiento máximo.

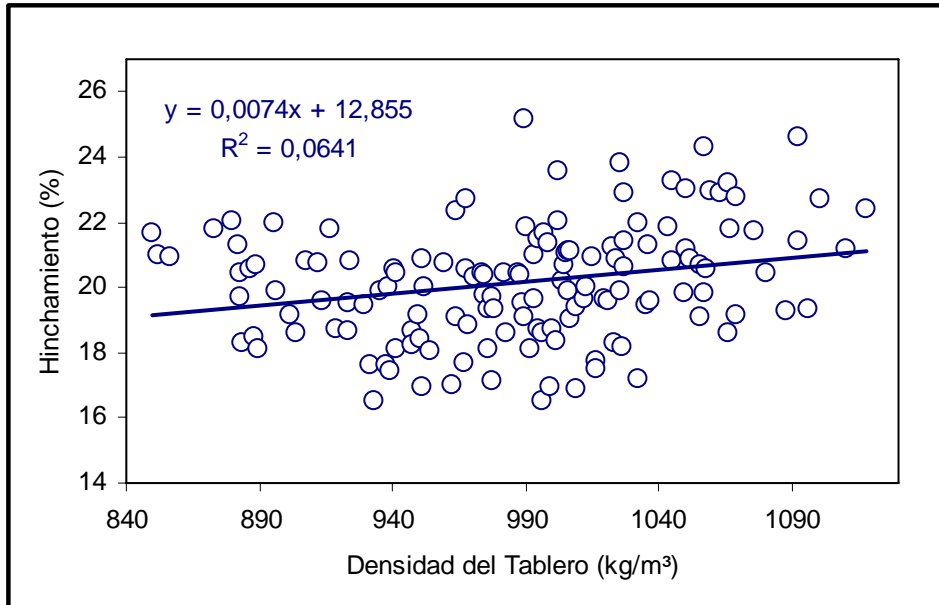


FIGURA11: Efecto de la Densidad del Tablero sobre el Hinchamiento a 24 horas

El parámetro que fija la norma (DIN 687.50) estipula que para tableros duros el hinchamiento no debe ser mayor al 18% sumergido por 24 hrs. y para tableros utilizados en la construcción el límite es de un 20% como máximo. Con referencia a esto el 92,1% de las probetas ensayadas que estuvieron distribuidas entre 849,6 kg/m³ y 1118,02 kg/m³ de densidad, superó los límites fijados por la norma.

En términos generales interviniendo otras variables (ceras, resinas, presión de prensado, etc.) durante el proceso de fabricación es posible que se logre modificar el hinchamiento de estos tableros, es por esto que la densidad no es un factor que por sí solo sea determinante para el hinchamiento en espesor en tableros HDF por proceso seco. A esto se agrega que los tableros analizados presentaron un recubrimiento de pintura al agua en la cara exterior.

4.3.2 *Springback (Hinchamiento no recuperable)*

A través de una regresión se logró determinar que la relación que presentan las variables densidad y *Springback* es casi insignificante (Ver anexo 4). Por lo que se puede determinar que la densidad no es una variable que explique el hinchamiento no recuperable de los tableros.

En el cuadro 9 se puede apreciar el *Springback* de tableros HDF obtenido en este estudio.

CUADRO 9: Estadígrafos obtenidos del ensayo de *Springback*

Parámetro	Densidad (kg/m ³)	<i>Springback</i> (%)
Promedio	990,13	18,07
Mínimo	849,57	10,40
Máximo	1118,02	23,96
Desv. estándar	59,23	2,83

4.3.3 Análisis de la absorción de agua de los tableros

Respecto a este ensayo, se obtuvo que para la absorción por 24 horas de inmersión en agua se generaron valores de absorción que fluctuaron entre el rango de 20,54 % y 41,44 %, con una dispersión de los datos de 3,49 %. De esto se pudo obtener que ante la absorción máxima, los tableros incrementan su peso en aproximadamente un 27,94 %.

Lo anterior queda planteado en el cuadro 10, que resume los estadígrafos para la absorción por 2 horas y para la absorción por 24 horas.

CUADRO 10: Tabla de estadígrafos para el ensayo de absorción de agua

Estadígrafos	Densidad (kg/m ³)	Abs. (%) 2 horas	Abs. (%) 24 horas
Promedios	987,95	10,83	27,94
Mínimo	849,57	6,21	20,54
Máximo	1118,02	18,04	41,44
Desv. Estándar	60,51	2,09	3,49

A diferencia del ensayo de hinchamiento, la absorción de agua fue notoriamente diferente, ya que se logró determinar que a medida que aumenta la densidad de los tableros la absorción de agua disminuye. De la misma manera Poblete y Peredo (1990) analizaron esta misma tendencia, cuando se estudió el efecto de las propiedades físicas y mecánicas en tableros de partículas de diferentes especies chilenas.

En la figura 12 se logra ver claramente la tendencia de los tableros.

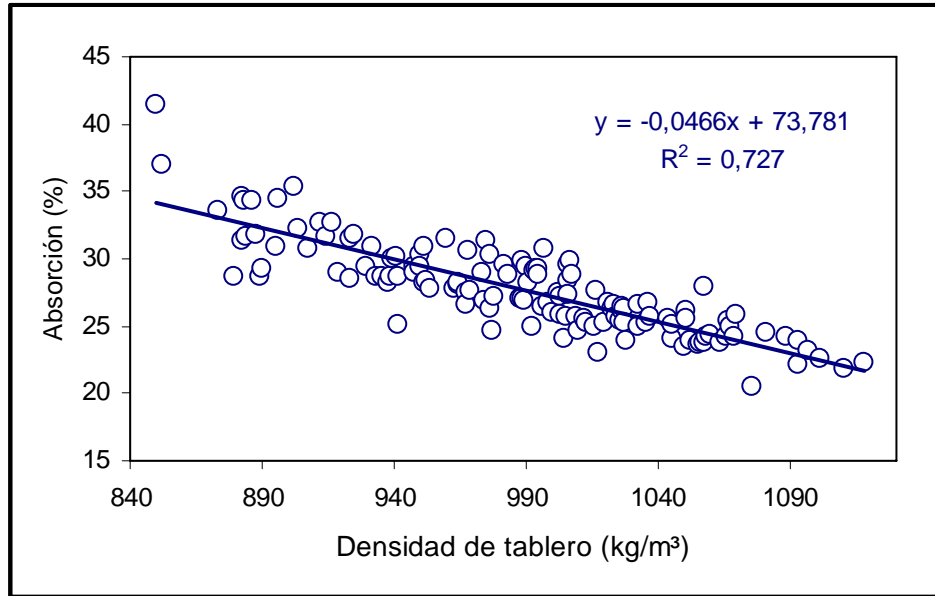


FIGURA 12: Efecto de la densidad de los tableros sobre la absorción a 24 horas

En la ecuación de regresión se determinó que el modelo propuesto se ajusta a la variable en un 72.7% y se logra ver que es estadísticamente discernible el modelo utilizado. Lo que lleva a concluir que la densidad explica a la absorción de agua a 24 horas en un 72.7%, siendo más importante que el resto de variables que no fueron modificadas durante el proceso de fabricación de los tableros (*skins*), como por ejemplo: adhesivos, ceras, presión de prensado, etc.

El mismo comportamiento fue analizado para tableros sumergidos durante 2 horas, (Ver Anexo 2) en que se comprobó la misma tendencia.

Junto a lo anterior es importante señalar que los tableros superiores a 940 kg/m³ de densidad cumplen la norma DIN 687.50, que estipula para tableros duros la absorción durante 24 horas de inmersión en agua no debe ser mayor al 30%. Lo que también se puede interpretar afirmando, que de las probetas ensayadas, el 22,1% no superó el límite exigido por la norma.

A manera de conclusión del análisis del hinchamiento y la absorción se puede señalar entonces, que el efecto de la densidad en los tableros de fibra HDF fabricados a través de un proceso seco no explica el hinchamiento máximo de los tableros, pero en el caso de la absorción máxima esta es una propiedad claramente dependiente de la densidad, hecho que se puede apreciar en la figura 13, donde se compara el efecto sobre todas las probetas ensayadas, las que se encuentran ordenadas en 6 rangos de densidades, donde se logra ver manera gráfica manera dicho comportamiento.

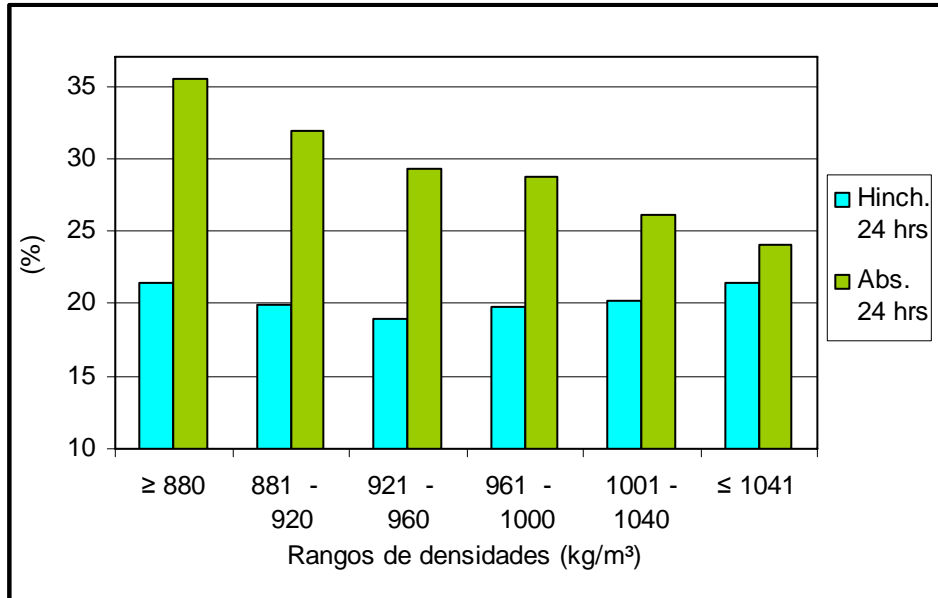


FIGURA 13: Efecto de la densidad en el hinchamiento y la absorción máxima

4.4 Efecto de la densidad en la expansión en el espesor y lineal

Es importante recordar que para efectuar este análisis fue necesario evaluar un total de 400 probetas las cuales fueron fabricadas con distintas densidades nominales.

4.4.1 Humedad de equilibrio

Con respecto a esto en un estudio efectuado por Niemz y Poblete (1996), se logró determinar la estabilidad dimensional y la humedad de equilibrio para tableros MDF de distintas densidades junto a la relación con tableros de partículas, donde se pudo observar que la humedad de equilibrio de tableros de partículas es relativamente mayor a la de los tableros de fibra MDF, lo cual se explica por la permanencia en la lignina en la superficie de las fibras durante el desfibrado termomecánico en la producción de tableros de fibra. Lo que se debe a que la humedad de equilibrio que presenta la lignina es menor al resto de los componentes principales de la madera.

Lo dicho anteriormente es útil para efectuar este análisis, ya que los tableros HDF por proceso seco son obtenidos por desfibrado termomecánico donde se genera el mismo efecto explicado por Niemz y Poblete para tableros MDF.

En el cuadro 11 se pueden apreciar los estadígrafos obtenidos para un total de 400 probetas, las cuales con el fin de facilitar el análisis fueron agrupadas en los 6 rangos de densidades. En dicho cuadro se puede observar una tendencia a disminuir la humedad de equilibrio respecto al incremento de la densidad. Por lo tanto se observa una relación entre densidad y humedad de equilibrio.

La humedad de equilibrio presentada en los tableros HDF aumentó a medida que la humedad relativa se fue incrementando, esto se debe a que en humedades relativas mas bajas el ambiente es mas seco, caso contrario se presenta en humedades relativas mas altas ya que el ambiente es mas húmedo, esto influye de manera directa en la humedad de equilibrio que se esté analizando.

CUADRO 11: Humedad de equilibrio (%) de los tableros agrupados en 6 rangos de densidades.

Rangos de densidades kg/m ³	Estadígrafos	Humedad Relativa (%) de climatizado a 20° C		
		40	65	90
≥ 800	Promedio	6.69	8.43	17.57
	Máximo	7.27	9.07	18.52
	Mínimo	6.33	8.07	16.62
	Desv. Estándar	0.31	0.31	0.52
881 - 920	Promedio	6.55	8.30	17.49
	Máximo	7.15	8.98	18.69
	Mínimo	6.31	7.98	16.26
	Desv. Estándar	0.19	0.20	0.67
921 - 960	Promedio	6.56	8.29	17.17
	Máximo	7.06	8.81	18.74
	Mínimo	6.13	7.80	16.13
	Desv. Estándar	0.20	0.21	0.62
961 - 1000	Promedio	6.50	8.23	17.03
	Máximo	6.69	8.65	17.88
	Mínimo	6.17	7.87	15.76
	Desv. Estándar	0.17	0.17	0.49
1001 - 1040	Promedio	6.57	8.29	17.19
	Máximo	7.13	8.95	18.08
	Mínimo	5.80	7.80	15.93
	Desv. Estándar	0.30	0.28	0.55
≤ 1041	Promedio	6.33	8.05	16.61
	Máximo	6.97	8.66	17.93
	Mínimo	5.71	7.46	15.43
	Desv. Estándar	0.25	0.23	0.61

A través, de las regresiones efectuadas para las tres humedades relativas respecto a la variable densidad, se pudo determinar que la relación que se presenta para un 90% HR es mayor que la presentada para 40 y 65% HR, esto es útil para determinar que ante un incremento máximo de la humedad relativa, la densidad es relevante, no así para condiciones de 40 y 65% HR.

En el cuadro 12 se expresan las ecuaciones obtenidas de dichas relaciones.

CUADRO 12: Regresiones para la humedad de equilibrio (He) en función de la densidad de los tableros

Humedad relativa (%)	Ecuación de regresión	R ²
40	$H_e = -0,0012(\text{Densidad}) + 7,7348$	0,097
65	$H_e = -0,0014(\text{Densidad}) + 9,5959$	0,123
90	$H_e = -0,0042(\text{Densidad}) + 21,212$	0,173

Gracias a la figura 14 se logra observar de manera clara el similar comportamiento que presenta la densidad de los tableros respecto a la humedad de equilibrio presente en los 3 climas. Además se puede observar que el incremento de la humedad de equilibrio entre los climas de 65 a un 90% HR es notoriamente mayor al incremento generado entre los climas de 40 a un 65% HR.

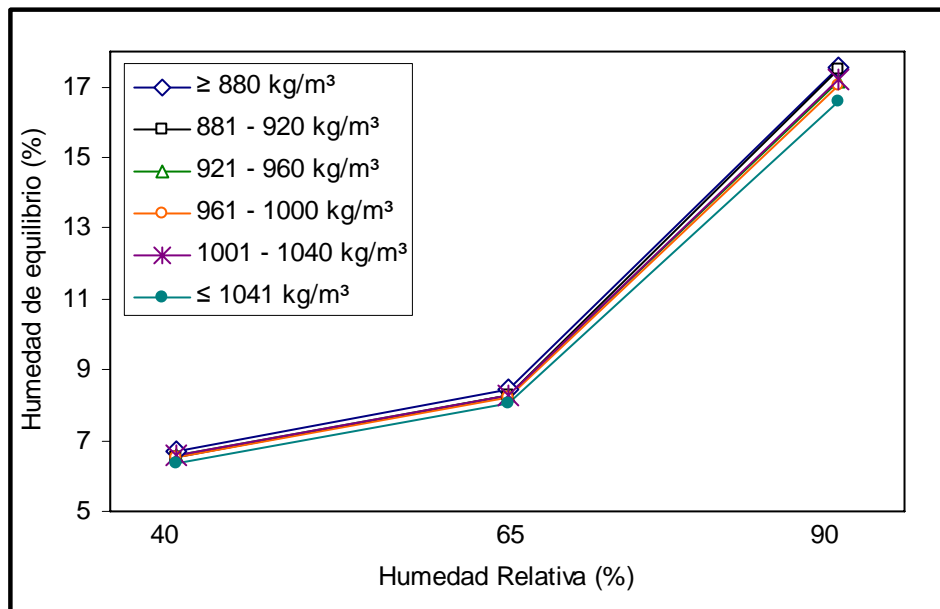


FIGURA14: Relación del contenido de humedad y humedad relativa respecto a los rangos de densidades.

4.4.2 Expansión del espesor

Las mediciones se efectuaron en base a un 0% de humedad relativa, permaneciendo la temperatura constante, 20°C. El promedio total generado por las 400 probetas generó una expansión en espesor de -0.5, 0.02 y 12.56% para los climas de 40, 65 y 90% HR respectivamente.

En el cuadro 13 se aprecian los estadígrafos obtenidos para los 6 rangos de densidades. Los valores negativos corresponden a un *springback* generado en las probetas, al ser llevadas a un estado de 0% HR, después de los ensayos en los climas de 40, 65 y 90% HR. Además se puede observar que al aumentar la humedad relativa del aire aumenta la expansión en espesor del tablero, lo que es natural que se haya generado, ya que la madera por su característica higroscópica capta las moléculas de agua en mayor medida cuando hay mas agua en el ambiente, lo que explica el aumento en el espesor ante un incremento en la humedad relativa.

CUADRO 13: Expansión del espesor calculado sobre la base de una humedad relativa del aire de 0%

Rangos de densidades kg/m ³	Estadígrafos	Humedad Relativa (%) de climatizado a 20° C		
		40	65	90
≥ 800	Promedio	-1.093	-0.572	11.940
	Máximo	0.653	1.388	13.002
	Mínimo	-2.505	-1.976	9.880
	Desv. Estándar	1.028	1.003	1.139
881 - 920	Promedio	-1.523	-0.820	11.467
	Máximo	2.075	2.097	16.211
	Mínimo	-4.296	-3.522	8.511
	Desv. Estándar	1.470	1.196	1.834
921 - 960	Promedio	-0.905	-0.303	10.949
	Máximo	3.503	1.813	14.646
	Mínimo	-6.458	-2.666	9.323
	Desv. Estándar	1.523	1.032	1.044
961 - 1000	Promedio	-0.118	0.363	12.396
	Máximo	2.951	2.185	16.723
	Mínimo	-2.714	-1.897	9.924
	Desv. Estándar	1.270	1.083	1.597
1001 - 1040	Promedio	0.041	0.216	13.283
	Máximo	6.759	2.825	19.715
	Mínimo	-3.484	-2.713	10.278
	Desv. Estándar	1.858	1.243	1.876
≤ 1041	Promedio	-0.361	0.328	13.663
	Máximo	2.915	2.674	21.418
	Mínimo	-4.089	-2.105	10.208
	Desv. Estándar	1.366	1.087	2.484

En los promedios de expansión se logra ver que fueron muy variables, ya que no presentaron una tendencia donde se observe que exista una dependencia directa entre expansión en espesor y densidad. Lo anterior queda expresado de manera mas clara en la regresión efectuada para cada clima que se aprecia en el cuadro 14, y a través del R² se ve que la variable densidad por sí sola, explica tan solo en un 6,3%, 9.7% y un 15.8% a expansión en espesor, respecto a los climas de 40, 65 y 90% de HR respectivamente. Las gráficas de las regresiones pueden ser apreciadas en los anexos 5.

CUADRO 14: Regresiones para la expansión en el espesor (Ee) en función de la densidad

Humedad relativa (%)	Ecuación de regresión	R ²
40	$E_e = 5,6585\text{Ln}(\text{Densidad}) - 39,539$	0,063
65	$E_e = 5,5861\text{Ln}(\text{Densidad}) - 38,521$	0,097
90	$E_e = 12,792\text{Ln}(\text{Densidad}) - 75,705$	0,158

En la figura 15 se presenta la relación que existe entre la expansión del espesor y la humedad relativa respecto de cada rango de densidades. Con referencia a esto se puede decir que se genera un aumento de la expansión en el espesor a medida que aumenta la densidad del tablero, y a su vez se observa que ante un clima de 90% HR el incremento de la expansión es mayor.

Lo antes dicho se confirma gracias a una investigación efectuada por Poblete, *et. al* (2000), donde se presentó la misma tendencia para tableros de partículas. Además la figura 15 permite observar, que para los 6 rangos de densidades no existen mayores diferencias respecto a la expansión en espesor. Con esto se puede afirmar, que al variar la densidad no debería generarse un cambio mayor en el espesor, especialmente para un clima normal (20° C y 65% HR).

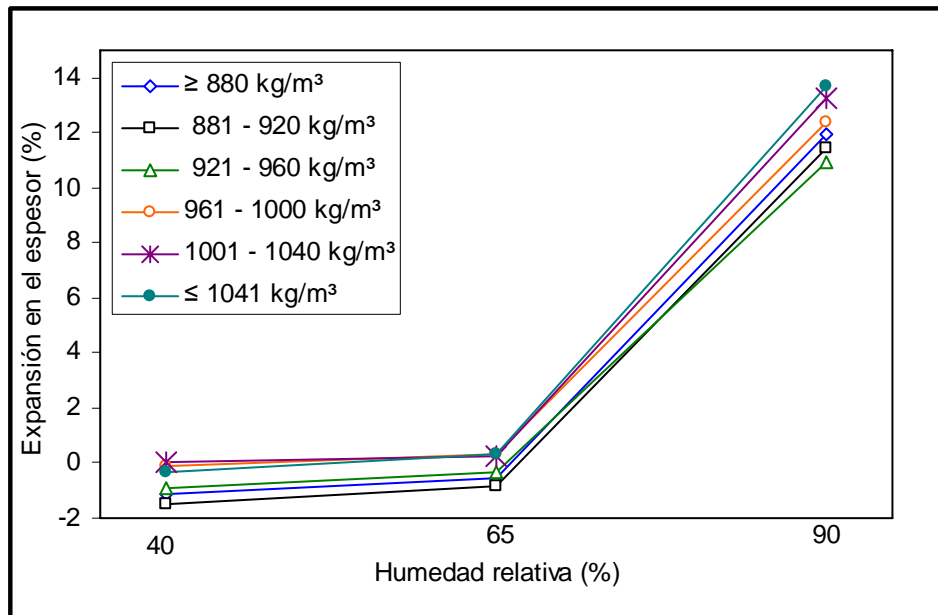


FIGURA 15: Variación del espesor en función de la humedad relativa para cada nivel de densidad.

Las poligonales de la figura 16 muestran cómo al aumentar la densidad se provoca un cambio dimensional mayor. Con densidades menores hay una mayor estabilidad

dimensional, lo que se observa en los tres niveles de Humedad Relativa estudiados. La tendencia se logra ver más claramente cuando la humedad relativa es mayor. Dicho comportamiento también se generó en el estudio realizado por Poblete, *et. al* (2000).

Además es importante notar que para tableros con densidades superiores a 961 kg/m^3 no se observa una variación significativa en el espesor tanto para 65 y 40% de HR ya que desde dicha densidad se logra mantener una estabilidad en la expansión. Para una condición de 90% de HR se logra ver que la estabilidad se genera desde tableros con densidades superiores a 1000 kg/m^3 .

Lo anterior es de utilidad, ya que permite analizar la posibilidad de bajar la densidad de los tableros ante un nivel donde la expansión del espesor no se ve mayormente alterada por la densidad.

Es importante considerar que los tableros son utilizados en su mayoría para formar una puerta de interior donde las condiciones de clima no son extremas, por lo tanto es posible la fabricación de tableros con densidades entre 961 a 1000 kg/m^3 o inclusive menores, sin que ocurran fuertes variaciones en los espesores.

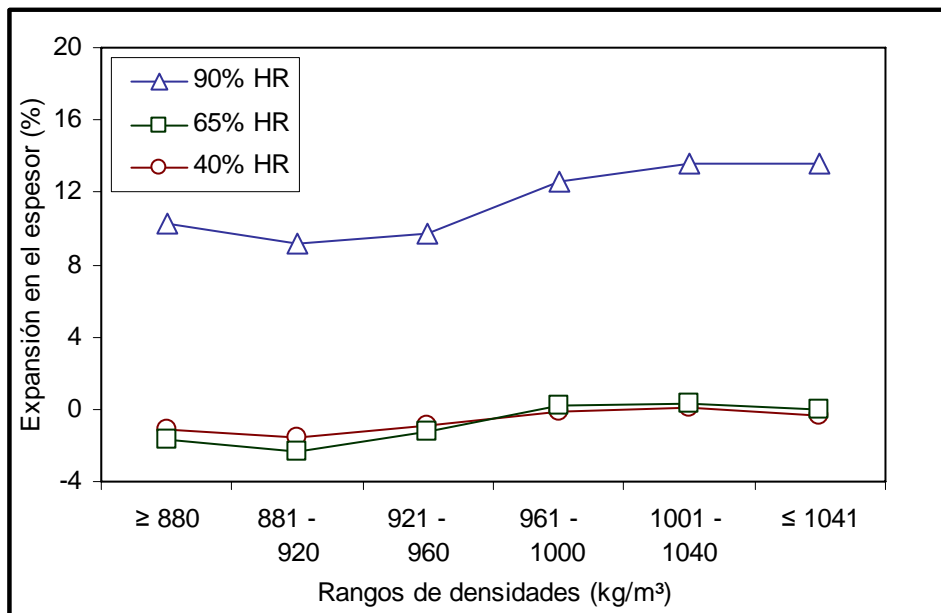


FIGURA 16: Variación del espesor en función de la densidad del tablero.

4.4.3 Expansión lineal

La expansión lineal al igual que la expansión en espesor fue calculada respecto a una humedad relativa del aire del 0 %, esto permitió observar en el cuadro 15, que a medida que aumenta la humedad relativa se incrementa la expansión lineal. El promedio total que presentaron las 400 probetas, generó una expansión lineal de 0.37, 0.50 y 0.79 % para los climas de 40, 65 y 90 % HR respectivamente.

Respecto al efecto que genera la densidad sobre la expansión lineal se aprecia que ante un aumento de la densidad hay un incremento notorio de la expansión lineal, cabe recordar que este comportamiento no se presentó en la expansión en espesor. Lo que se observa en los promedios obtenidos para cada rango de densidades.

Además es importante destacar que la variabilidad de los cambios de expansión lineal ocurridos ante el aumento de densidad son claramente inferiores a los en la expansión en espesor, esto queda planteado por la desviación estándar de cada muestra.

CUADRO 15: Expansión lineal calculado sobre la base de la medida del espesor a una humedad relativa del aire de 0%

Rangos de densidades kg/m ³	Estadígrafos	Humedad Relativa (%) de climatizado a 20° C		
		40	65	90
≥ 800	Promedio	0,294	0,413	0,733
	Máximo	0,333	0,510	0,782
	Mínimo	0,244	0,358	0,682
	Desv. Estándar	0,027	0,037	0,028
881 - 920	Promedio	0,294	0,414	0,728
	Máximo	0,374	0,501	0,836
	Mínimo	-0,139	-0,005	0,268
	Desv. Estándar	0,074	0,072	0,076
921 - 960	Promedio	0,341	0,457	0,749
	Máximo	0,417	0,532	0,829
	Mínimo	-0,325	-0,207	0,066
	Desv. Estándar	0,086	0,085	0,088
961 - 1000	Promedio	0,374	0,499	0,787
	Máximo	0,436	0,560	0,857
	Mínimo	0,263	0,384	0,679
	Desv. Estándar	0,029	0,032	0,036
1001 - 1040	Promedio	0,397	0,531	0,812
	Máximo	0,478	0,940	0,892
	Mínimo	0,309	0,449	0,734
	Desv. Estándar	0,036	0,066	0,038
≤ 1041	Promedio	0,401	0,531	0,830
	Máximo	0,493	0,622	0,924
	Mínimo	-0,084	0,068	0,326
	Desv. Estándar	0,057	0,056	0,060

A través de las regresiones efectuadas respecto a los valores obtenidos para cada clima, se pudo determinar que existe una mayor relación entre densidad y expansión lineal que para densidad y expansión en espesor. En el cuadro 16 se aprecia que la relación entre densidad y expansión lineal para un clima de un 40% se explica en un 54,3%, para un clima de 65% la variable densidad explica la expansión lineal en un 56,9% y para un clima de 90% de HR se explica en un 52,3%.

CUADRO 16: Regresiones para la expansión lineal (EL) en función de la densidad

Humedad relativa (%)	Ecuación de regresión	R ²
40	$E_L = 0,5441 \ln(\text{Densidad}) - 3,382$	0,543
65	$E_L = 0,6161 \ln(\text{Densidad}) - 3,756$	0,569
90	$E_L = 0,5535 \ln(\text{Densidad}) - 3,027$	0,523

En la figura 17 se observan las poligonales representativas para cada densidad, además se puede apreciar la dependencia que existe entre densidad y expansión lineal, generándose las mismas tendencias en las variaciones de expansión lineal para cada clima en análisis. Las gráficas de dichas regresiones se plantean en el anexo 6.

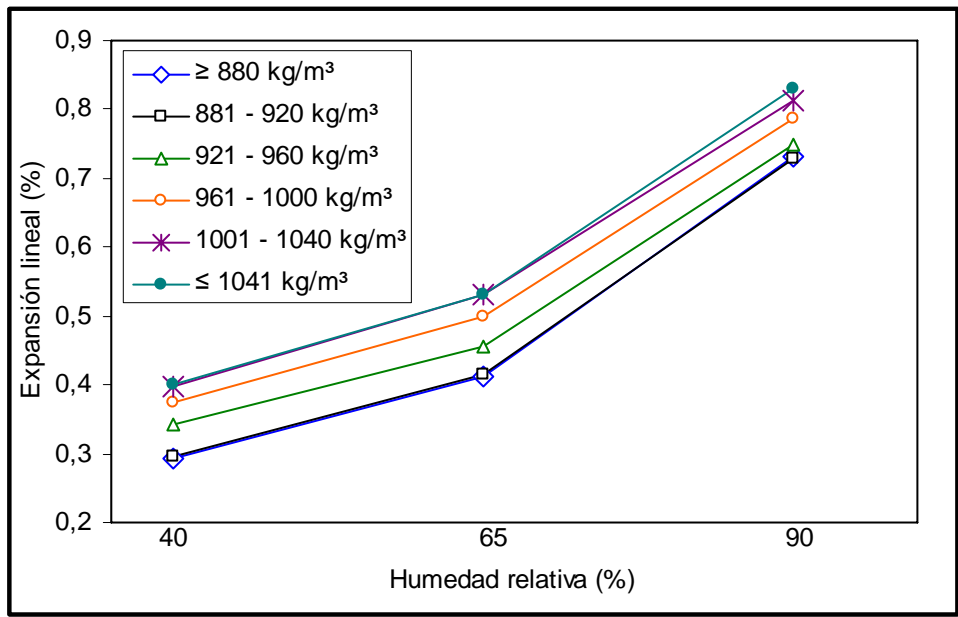


FIGURA 17: Variación de la expansión lineal en función de la humedad relativa para cada nivel de densidad.

En la figura 18 se puede apreciar que para la misma tendencia observada en expansión en espesor, que es respecto a que desde un cierto nivel de densidad no se presenta una mayor variación en la densidad, ya que las poligonales representadas tienden a estabilizarse desde el grupo de densidades que va de 961 a 1000 kg/m³, siendo mas notorio este comportamiento en los climas de 65 y 40% de HR.

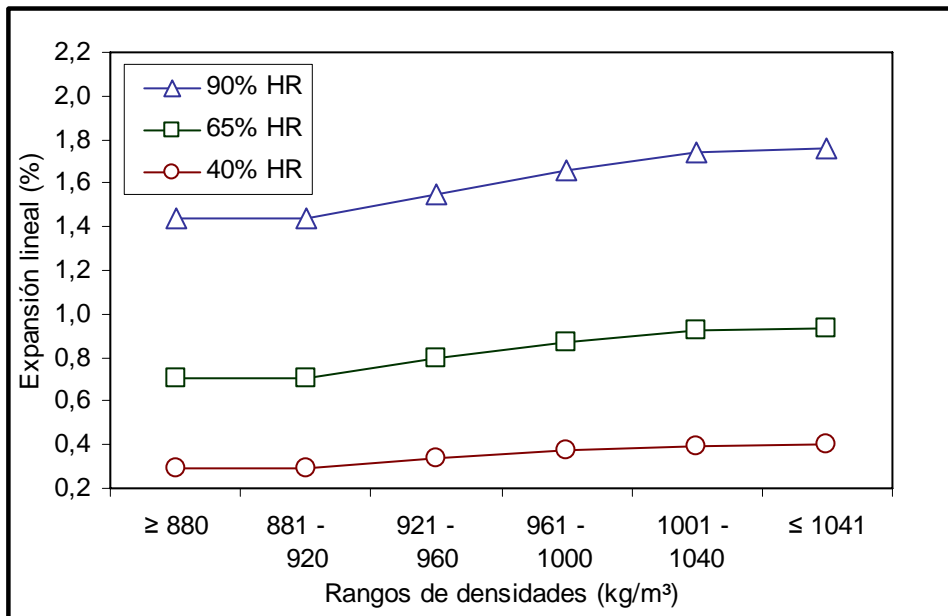


FIGURA 18: Variación de la expansión lineal en función de la densidad del tablero.

A manera de conclusión se puede afirmar que el efecto que tiene la densidad sobre los cambios dimensionales es de consideración al momento de evaluar la expansión lineal, no así la expansión en espesor, en que la densidad para este estudio no explica este cambio dimensional.

4.4.4 Variaciones dimensionales en relación al cambio de humedad de equilibrio

Respecto a este análisis se puede decir que así como lo investigado por Poblete, *et. al* (2000), observaron que la variación dimensional en relación al cambio de humedad de equilibrio, es mayor en el espesor que la generada en sentido lineal del tablero. Similar comportamiento ocurrió en este estudio al analizar este aspecto.

En el cuadro 17 se logra ver que el promedio obtenido para la variación dimensional por cada 1% del cambio de humedad de equilibrio es de 0,0520% para la expansión lineal y de 0,17% para la expansión en espesor.

CUADRO 17: Variación dimensional por cada 1% del cambio de humedad de equilibrio del tablero

Densidades (Kg/m ³)	Variación dimensional (por cada 1%)	
	Lineal (%)	Espesor (%)
≥ 880	0.0449	0.15
881 - 920	0.0455	0.11
921 - 960	0.0502	0.15
961 - 1000	0.0548	0.25
1001 - 1040	0.0572	0.27
≤ 1041	0.0598	0.27
Promedio	0.0520	0.17

4.5 Resumen de la densidad y su efecto en las propiedades analizadas

El presente capítulo fue desarrollado principalmente como una herramienta para corroborar todo el análisis efectuado anteriormente. Es por esto que para entregar toda la información recopilada con una mayor precisión, se agruparon las densidades en 13 valores enteros que van desde los 860 a 1100 Kg/m³.

Para cada ensayo efectuado se obtuvo un valor promedio, del cual se extrajo la información presentada en el cuadro 18, donde se observa que tanto el hinchamiento máximo a 24 hrs. de inmersión en agua, como la expansión en espesor (tanto en los climas de 40, 65 y 90% HR), no presentan relación alguna con la densidad, hecho que ha sido demostrado en las regresiones efectuadas por este estudio a través del R².

Lo anterior puede ser explicado por otras variables de proceso mencionadas anteriormente como son: resinas y aditivos, capa de pintura presente en la cara exterior del skins y además de las altas temperaturas y presiones que se aplican al tablero en la etapa de prensado, lo que genera en el tablero una alta dureza y una elevada resistencia superficial, que sin duda influyen en el cambio dimensional en espesor.

Referente a las propiedades de tracción paralela, módulo de elasticidad, módulo de rotura, absorción máxima (24 horas) y expansión lineal, la densidad es una variable que afecta en alguna medida dichas propiedades.

Respecto a lo anterior es necesario buscar un cierto equilibrio el cual permita bajar la densidad de los tableros para disminuir de algún modo los costos de materia prima por tablero como los costos de transporte, sin afectar mayormente las propiedades analizadas.

CUADRO 18: Resumen de las propiedades analizadas respecto a 13 posibles densidades que la empresa podría estar efectuando

Densidades de tableros (Kg/m ³)	Propiedades Físico mecánicas para condiciones normales (65% HR, 20° C)						
	Tracción (N/mm ²)	MOE (N/mm ²)	MOR (N/mm ²)	Hin. Máx. (%)	Abs. Máx. (%)	Exp. esp. (%)	Exp. lineal (%)
860	1.56	2689	25.7	21.2	38.5	-0.40	0.42
880	1.88	3021	31.7	21.9	33.5	0.20	0.41
900	1.96	3504	34.4	19.9	32.1	-1.01	0.39
920	2.22	3416	36.4	19.9	32.0	-0.93	0.44
940	2.45	3765	40.2	18.7	29.6	-0.31	0.46
960	2.62	3523	41.1	19.2	29.1	-0.43	0.45
980	2.69	4006	43.1	19.6	28.8	-0.03	0.50
1000	2.92	3907	43.7	20.0	28.8	0.70	0.50
1020	3.03	4066	46.7	19.9	26.4	0.15	0.53
1040	3.04	4370	49.2	20.4	25.9	0.53	0.53
1060	3.11	4259	49.9	21.4	24.7	0.16	0.54
1080	3.24	4569	54.3	21.5	24.1	0.42	0.52
1100	3.43	4931	55.2	21.0	23.6	-0.24	0.53
Promedio	2.70	3933	43.3	20.1	27.9	0.02	0.50

Respecto al cuadro 18 se observa que se pueden obtener importantes propiedades desde tableros fabricados con 920 kg/m³.

5 CONCLUSIONES

A través del MOR y MOE se determinó que los tableros HDF poseen una relación dependiente de la densidad. Es necesario señalar que los tableros en estudio, son capaces de resistir una carga máxima a la flexión de aproximadamente 43.3 N/mm², y la medida de la rigidez corresponde a un promedio de 3905.57 N/mm².

La variable densidad no explica la propiedad de hinchamiento ni la propiedad de expansión en espesor, lo que puede ser causa de otras variables de proceso. Sin embargo la presencia de pintura en una de las caras de los tableros, influyó en alguna medida dichas propiedades, ya que esta capa de pintura, genera una tensión superficial en los tableros, lo cual en cierta medida puede limitar el cambio dimensional en espesor.

Completamente distinto fue el comportamiento que se presentó en la absorción de agua ya que se pudo determinar, que ante un aumento de la densidad de los tableros la absorción de agua disminuye, esto es por causa del aumento de material leñoso hay también un aumento de la resina y aditivos los cuales repelen el agua. Además se agrega que al aumentar la densidad se disminuyen los espacios vacíos donde puedan quedar depositadas las moléculas de agua. Lo que también es válido para explicar la disminución de la humedad de equilibrio ante incrementos de la densidad.

Es importante destacar que el uso final que presentaran estos tableros es para la fabricación de una puerta que comúnmente es de uso interior. Lo que al momento del análisis de las propiedades hay algunas que cobran más importancia que otras, como es el caso de la expansión lineal la cual es la propiedad de mayor relevancia para el uso final. Respecto a esta propiedad se obtuvo que, 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, de lo cual se pudo inferir que la densidad influye en la expansión lineal de los tableros, ya que esta tiende a aumentar a medida se incrementa la densidad.

Respecto a lo anterior es necesario tener en cuenta ya que no hay que dejar de considerar las otras variables analizadas, por lo que se puede bajar la densidad y disminuir los cambios dimensionales en su sentido longitudinal, pero a la vez se pueden ver afectadas las propiedades mecánicas y de absorción de los tableros, por lo tanto es importante que la empresa pueda buscar el equilibrio necesario para su producción.

Junto a lo anterior es posible disminuir la densidad de los tableros y así reducir los costos de materia prima por tablero, los costos de transporte al disminuir el peso y los costos de resinas y aditivos por la disminución de material fibroso en los tableros o *skins*.

6 BIBLIOGRAFÍA

- Bellido, M.; Egoavil-cueva, G.; Gonzáles, E. 2003. *Tableros de fibra de madera de "Tornillo" Cedrelinga cateniformis Ducke*. Depto. Industrias Forestales, Universidad Agraria La Molina. pp. 2-5
- Diaz-vaz, J. 2003. *Anatomía de maderas*. Marisa Cureo Ediciones. Universidad Austral de Chile. pp. 101
- Diaz-vaz, J.; Cuevas H. 1986. *Ensayos mecánicos de la madera*. Publicación docente N° 23. Universidad Austral de Chile.
- 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. 1996. H, P. 2000. *Influence of components variables on properties of particleboard for exterior use*. Forest Product Journal 16(4):46-59
- Goycoolea, 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
- Masonite Corporation, 2005. *Diagramas de flujo, e información relevante a la Producción*.
- Masonite Laboratorio, 2005. *Informes de propiedades físicas preparado semanalmente*. Archivos del laboratorio de la planta Masonite.
- Mc Manus, E. 2000. *Secado tecnológico de la madera*. Revista BIT. pp. 47-48
- Niemz, P.; Poblete, H. 1996. *Estabilidad dimensional y humedad de equilibrio en tableros de fibras (MDF) y de partículas*. Ciencia e Investigación forestal – Instituto Foresta. Chile. pp. 49 - 61
- Noriega, M. 1996. *Aptitud del Eucalyptus globulus en la preparación de tableros de fibrocemento*. Tesis Mg Sc. Universidad Nacional Agraria La Molina. pp.116
- Nutsh, N.2000. *Tecnología de la madera y del mueble*. Editorial reverté; S.A. pp. 380-382
- Peredo, M.; Lizama, C.1993. *Uso de Hidrófobos en la fabricación de tableros de*

- partículas con residuos de cosecha forestal*. Revista Bosque N° 14 (1). Universidad Austral de Chile, Instituto de Tecnología de Productos Forestales. pp. 3 - 12
- Poblete, H. 1979. *Inclusión de aserrín en tableros de partículas*. Revista Bosque 3(1) 39 Universidad Austral de Chile. pp 39 – 46.
- Poblete, H. 1987. *Procesos de fabricación de tableros de fibra*. Publicación docente N° 25. Universidad Austral de Chile, Instituto de Tecnología de Productos Forestales. Pp. 13 - 16
- Poblete, H.; Peredo, M. 1990. *Tablero de desechos del debobinado de especies chilenas*. Revista Bosque N° 11 (2). Universidad Austral de Chile, Instituto de Tecnología de Productos Forestales. pp. 45 - 58
- Poblete, H.; Sanchez, J. 1991. *Tableros con corteza de Pinus radiata*. Revista Bosque. (1) pp. 17 – 26
- Poblete, H.; Loncomilla, E.; Inzunza, L. 2000. *Densidad del tablero de partículas y estabilidad dimensional*. Revista Bosque (21) 2. pp. 69-83
- Poblete, H. 2001. *Tableros de Partículas*. 1ª Edición Chile Editorial El Kultrun. pp. 89-105
- Poblete, H. 2001. *Determinación de la estabilidad dimensional de tableros de fibras ante diferentes condiciones climáticas*. Instituto de Tecnología de Productos Forestales. Universidad Austral de Chile. pp. 1-6
- Poblete, H. 2004. *Tableros MDF*. Instituto de Tecnología de Ciencias Forestales. Universidad Austral de Chile. pp. 5-20
- Rijo, C. 1988. *Influencia del aumento de la densidad y nivel de adhesivo en las propiedades mecánicas de tableros de partículas de Chusquea coleu. aglomerados con ureaformaldehído*. Revista Bosque 9(1): pp 53 – 59.
- 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): pp. 33-45

ANEXOS

ANEXO 1

Abstract

ABSTRACT

The main aim of the work was to determine the physical and mechanical properties of HDF-Panels with densities between 810 and 1117 kg/m³.

MOR, MOE, tensile strength parallel to board surface, water absorption, thickness swelling, springback, linear and thickness expansion were determined.

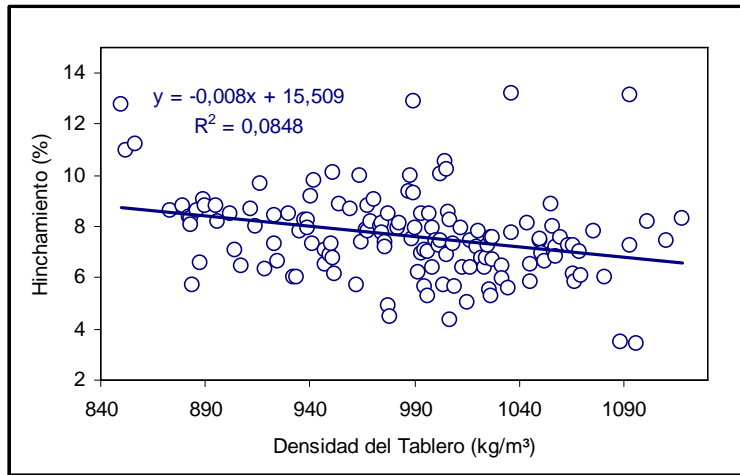
Linear expansion, thickness expansion and equilibrium moisture content were measured after acclimatization with 20 °C at 3 relative humidity's; 40, 65 and 90%.

A correlation between board density and mechanical properties was determined. It was also determined a correlation between water absorption, lineal expansion and panel density. Higher mechanical properties with increasing panel density was determined. Water absorption and lineal expansion decreased when the density of the board increases. Swelling and thickness expansion did not present a relationship with board density.

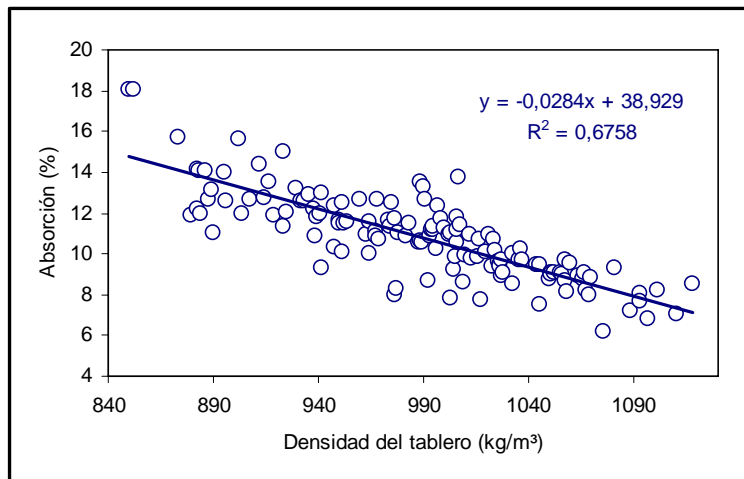
Key words: Fiber boards, HDF, board density, physical properties, mechanical properties, lineal expansion, thickness expansion.

ANEXO 2

Regresiones para densidad con hinchamiento y densidad con absorción de agua a 2 hrs.



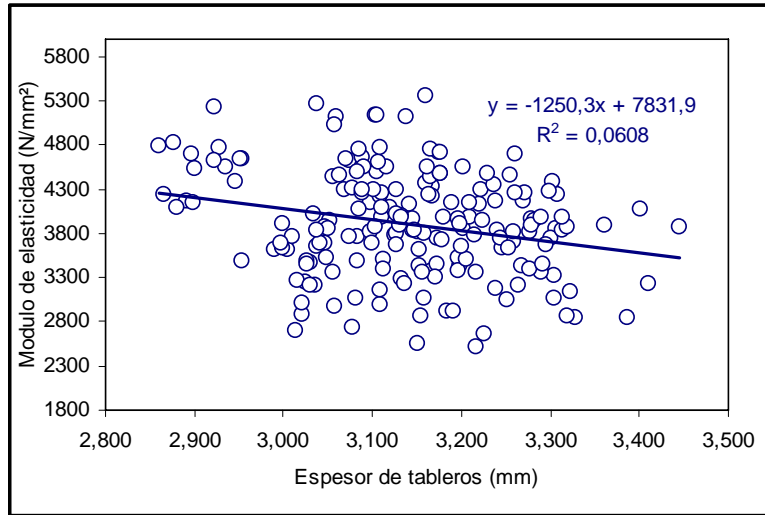
Efecto de la densidad sobre el hinchamiento a 2 hrs. de inmersión en agua



Efecto de la densidad sobre la absorción a 2 hrs. de inmersión en agua

ANEXO 3

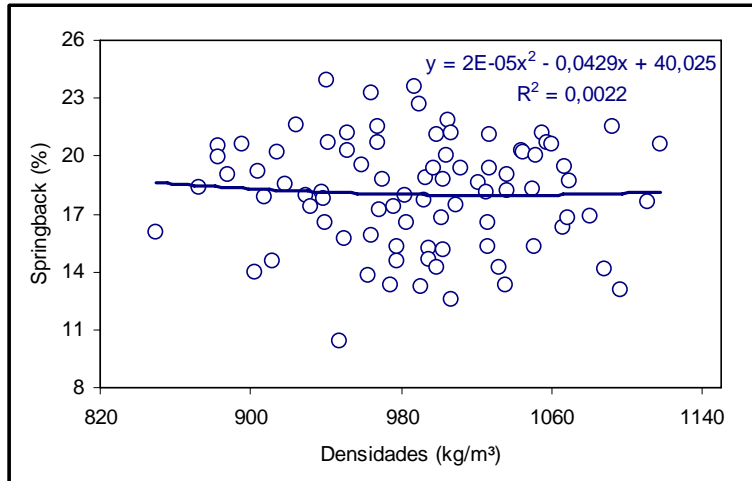
Regresión para el espesor del tablero respecto al MOE.



Efecto del espesor en el modulo de elasticidad

ANEXO 4

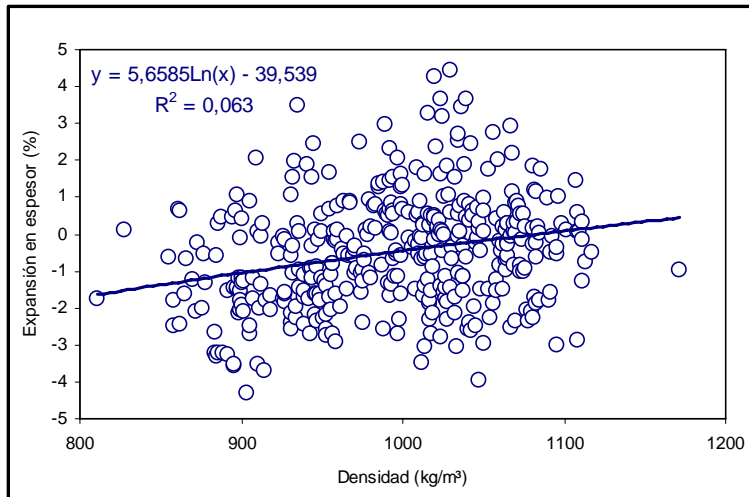
Regresión del *Springback* respecto la densidad de los tableros.



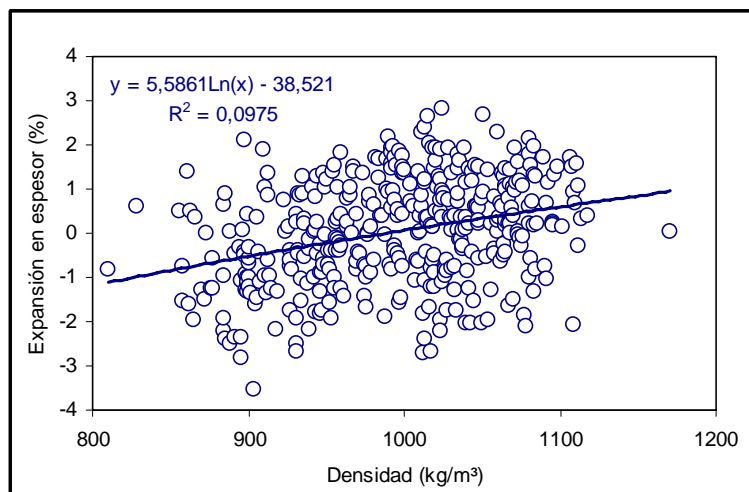
Relación entre densidad y Springback.

ANEXO 5

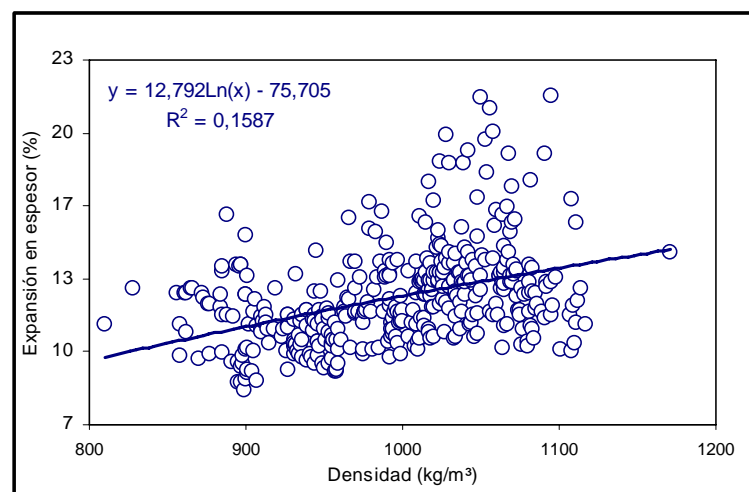
Regresiones para la expansión en espesor respecto de cada clima



Efecto de la expansión en espesor respecto de la densidad para un clima de 40% HR.



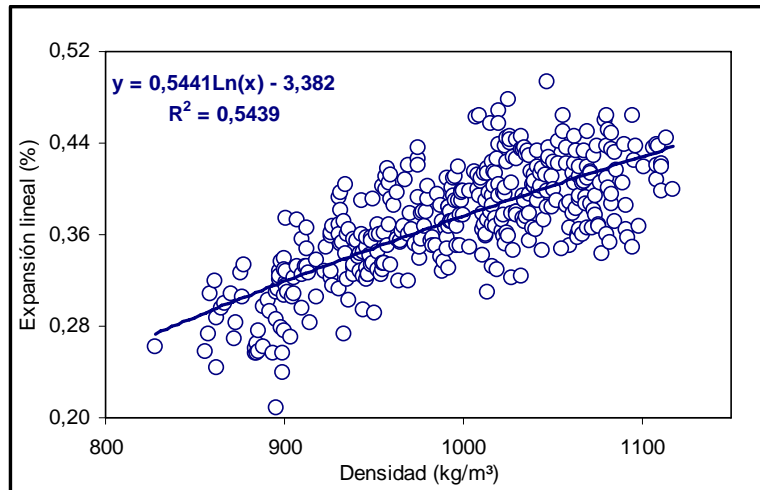
Efecto de la expansión en espesor respecto de la densidad para un clima de 65% HR.



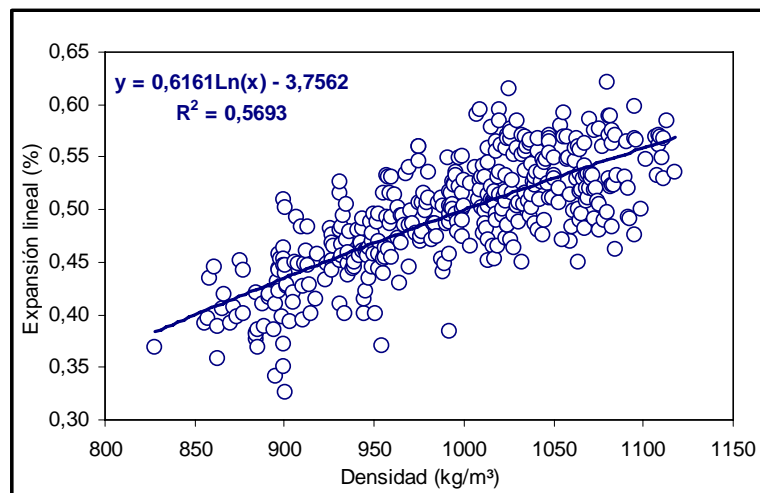
Efecto de la expansión en espesor respecto de la densidad para un clima de 90% HR.

ANEXO 6

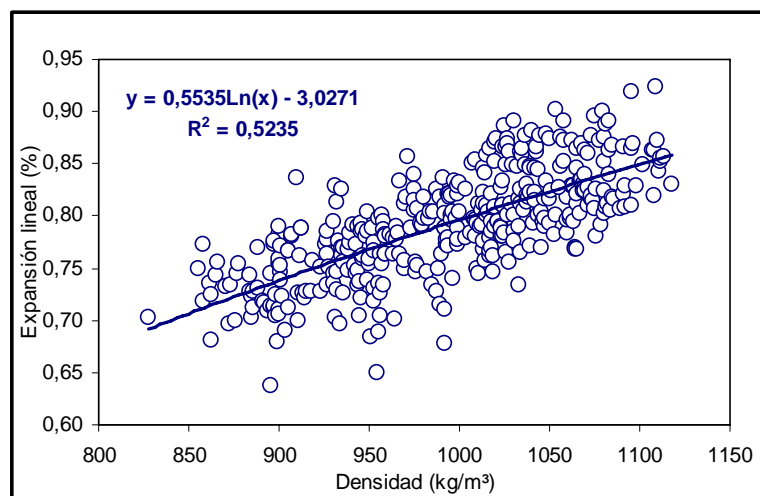
Regresiones para la expansión lineal respecto de cada clima



Efecto de la expansión lineal respecto de la densidad para un clima de 40% HR.



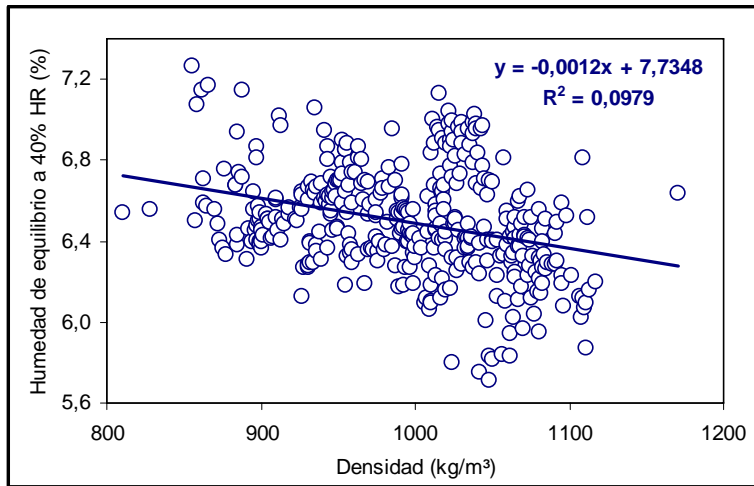
Efecto de la expansión lineal respecto de la densidad para un clima de 65% HR.



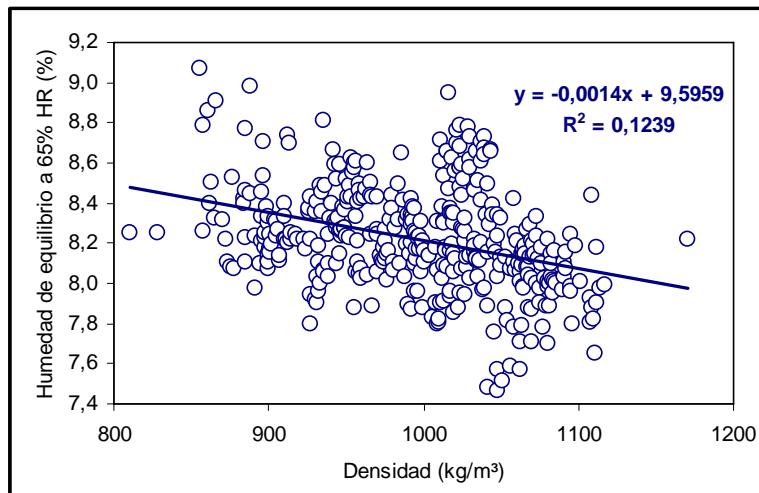
Efecto de la expansión lineal respecto de la densidad para un clima de 90% HR.

ANEXO 7

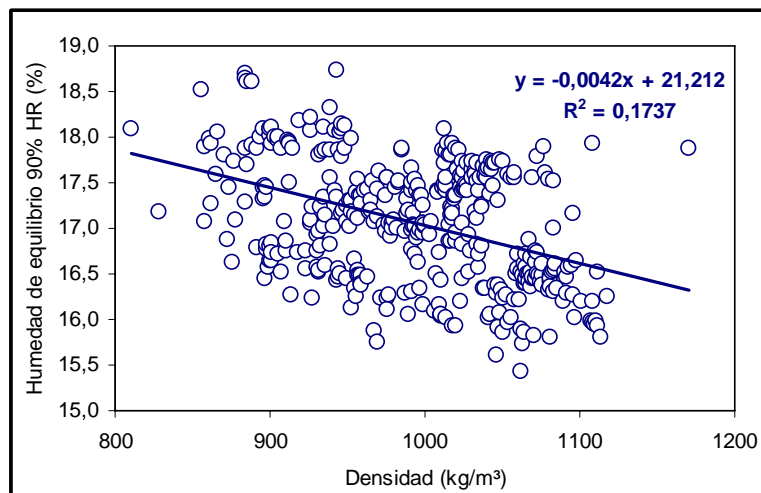
Regresiones para la humedad de equilibrio respecto de la densidad para cada clima



Efecto de la humedad de equilibrio respecto de la densidad para un clima de un 40% de HR



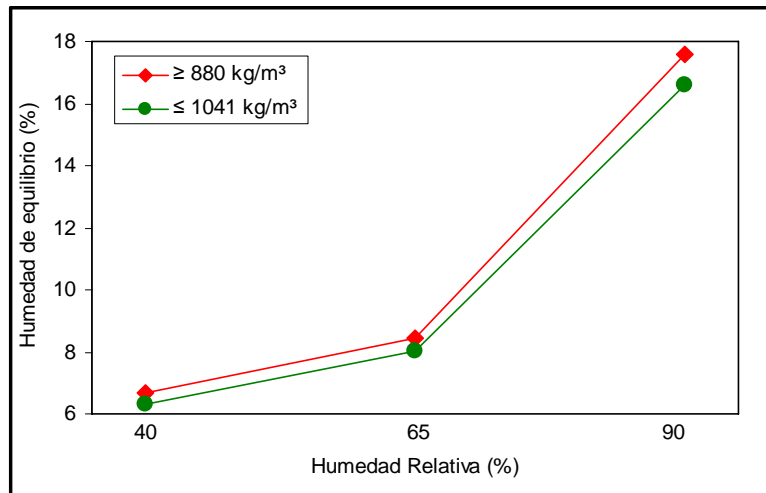
Efecto de la humedad de equilibrio respecto de la densidad para un clima de un 65% de HR



Efecto de la humedad de equilibrio respecto de la densidad para un clima de un 90% de HR

ANEXO 8

Poligonales que relacionan 2 rangos de densidades con la humedad relativa y la humedad de equilibrio



Efecto de la humedad relativa respecto de la humedad de equilibrio generada en 2 rangos de densidades.

Valores de humedad de equilibrio para cada punto

Humedad de equilibrio (%) para 2 rangos de densidades respecto a 3 HR.			
Dens. kg/m^3	40%	65%	90%
≥ 880	6,69	8,43	17,57
≤ 1041	6,33	8,05	16,61