

Paneles de Madera Conglomerada Basados en Resinas Ureicas

EFFECTO DE LA DENSIDAD SOBRE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS.

Resumen: En este trabajo se estudió teórica y experimentalmente la relación entre la densidad y las propiedades mecánicas de paneles de madera conglomerada obtenidos a partir de un 88,5% de partículas de madera y un 11,5% de resina de urea-formaldehído con un 57,35% de sólidos. Se obtuvieron paneles de madera conglomerada de densidades nominales de 550, 650 y 750 Kg/m³ (A, B, y C; respectivamente) a temperatura = 150 °C, presión = 30 Kg/cm² y tiempo = 10 min. Se midieron propiedades finales como densidad, flexión y adherencia interna. Tanto la densidad como la adherencia interna de los paneles A y B resultaron estadísticamente iguales. Además, se adoptó un modelo de regresión simple que correlaciona densidad con adherencia interna, resistencia en flexión y módulo de elasticidad en flexión, respectivamente.

Palabras Claves: Paneles de Madera Conglomerada; Resina de Urea-Formaldehído; Densidad; Adhesión interna.

Abstract: This paper theoretically and experimentally studied the relationship between density and mechanical properties of particleboards obtained from 88.5% of wood chips and 11.5% of urea-formaldehyde resin with 57.35% solids. Particleboards of 550, 650 and 750 Kg/m³ nominal densities (A, B, and C; respectively) at temperature = 150 °C, pressure = 30 Kg/cm² and time = 10 min. were obtained. Final properties such as density, bending and internal bond were measured. The density and the internal bond of the panels A and B were statistically equal. Also, a simple regression model that relates density with internal bond, bending strength and flexural modulus, respectively; was adopted.

Keywords: Particleboard; Urea-Formaldehyde Resin; Density; Internal Bond.

María A. Caula⁽¹⁾, Verónica V. Nicolau^(1,2), Diana A. Estenoz⁽²⁾

⁽¹⁾UTN Regional San Francisco, Av. de la Universidad 501, (2400) San Francisco, Córdoba, Argentina.

⁽²⁾INTEC (UNL-CONICET), Guemes 3450, (3000) Santa Fe, Argentina.

Mail: andrea_caula@hotmail.com

INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

Un panel de madera conglomerada es un material compuesto por partículas de madera (refuerzo) y resina de urea-formaldehído (matriz o adhesivo). Industrialmente el proceso de producción de paneles de madera conglomerada involucra básicamente 3 etapas: i) la obtención de las partículas de madera, ii) el encolado de las partículas con la resina ureica, y iii) el prensado.

Las partículas de madera se obtienen en un cilindro descortezador que separa la corteza del tronco. Es importante clasificar las partículas para eliminar las excesivamente finas que originan gasto de adhesivo y la disminución de las propiedades mecánicas del panel. Un contenido de humedad adecuado ($< 5\%$) favorece la transferencia de calor disminuyendo los tiempos de prensado y mejorando la adhesión (Mitlin, 1968).

El encolado consiste en la atomización homogénea de la resina sobre el material lignocelulósico a fin de evitar zonas secas o con exceso de resina que ocasionen problemas de adhesión y cohesión. La adhesión se relaciona con la fuerza con que se adhiere la resina a las partículas y la cohesión con la fuerza que une a las moléculas de resina formando una película, (Mitlin, 1968).

En la última etapa se obtiene el panel de madera conglomerada por prensado y calor. El polímero se entrecruza o “cura” generándose una red tridimensional de peso molecular infinito. Los sistemas curados se denominan termoestables o termorrígidos porque son materiales insolubles e infusibles de estructura tridimensional. Usualmente, el polímero alcanza sus óptimas propiedades mecánicas como termorrígido. El mecanismo de la polimerización es una policondensación, con eliminación de agua según avanza la reacción.

Las propiedades finales de los paneles de partículas determinan su uso final y son fuertemente influenciadas por el grado de compactación, tipo de madera, la geometría de las partículas, tipo y cantidad de adhesivo, densidad, y condiciones del prensado, entre otras variables (Maloney, 1977). Por otra parte la densidad tiene un impacto en el costo final de los paneles ya que al disminuir la densidad disminuyen los costos de materia prima y de transporte como resultado del empleo de una menor cantidad de materias primas y la consecuente disminución del peso de los paneles. Por tal motivo, es de interés evaluar el efecto de la densidad sobre las propiedades mecánicas de los paneles a fin de reducir costos.

Existen numerosos trabajos que relacionan las propiedades mecánicas de los paneles con su densidad (Hiziroglu et al., 2005; Hayashi et al., 2003; Hua y Jin., 2006; Hesch, 1993; y Zhou, 1990). Por otra parte, Elash et al. (2012) emplearon un método de regresión lineal multivariable que correlaciona la densidad y el contenido de resina con el módulo de elasticidad en flexión y la adherencia interna. Sin embargo, el efecto de la densidad sobre las propiedades mecánicas depende de cada proceso en particular.

El objetivo de este trabajo fue estudiar el efecto de la densidad sobre las propiedades mecánicas tales como adherencia interna y flexión para paneles de partículas obtenidos de acuerdo al proceso de producción de la empresa Tableros del Paraná S.A. (Fighiera, Santa Fe). Para ello se obtuvieron paneles de madera conglomerada de densidades nominales de 550, 650 y 750 Kg/m³ a partir de un 88,5% de partículas de madera y un 11,5% de resina de urea-formaldehído con un 57,35% de sólidos y las mediciones de las propiedades mecánicas se correlacionaron estadísticamente con la densidad.

METODOLOGÍA

Materias Primas

Se emplearon las siguientes materias primas: virutas de Eucaliptus colorado con un tamaño de partícula de 0,18 a 1,68 mm (Tableros del Paraná S.A.), resina de urea-formaldehído (Arauco, Argentina) con una viscosidad $\mu = 470$ cp, pH = 8,1 y contenido de sólidos totales de 65,6%, y sulfato de amonio comercial.

Caracterización de la Resina

Para la caracterización de la resina se midió el formaldehído total libre (F_T), la viscosidad, y la densidad.

La medición del F_T se realizó de acuerdo al método volumétrico del sulfito (Walker, 1964). En un Erlenmeyer de 250 ml se colocaron 1,3 g de resina y 50 ml de solución de sulfito de sodio

1 M. El F_T presente en la resina reacciona con la solución de sulfito de sodio para generar hidróxido de sodio que se titula con una solución de HCl 1 N en presencia de timolftaleína como indicador. El contenido de F_T se obtuvo a partir de la siguiente expresión:

$$F_f (\% \text{ p/p}) = \frac{3 \times N \times f \times V}{m} \quad (1)$$

donde m es la masa de resina (g), y N, f, y V son la normalidad, el factor de corrección, y el volumen gastado (ml) del HCl, respectivamente.

Para determinar viscosidad se empleó el método de la Copa Ford con orificio N° 4. La copa de 100 ml se llenó y enrasó con resina a $T = 25$ °C y se cronometró el tiempo de vaciado por gravitación a través del orificio.

Por último se midió la densidad de la resina a 25 °C empleando un densímetro de vidrio.

Catálisis de la Resina de Urea-Formaldehído

Se usó una solución saturada de sulfato de amonio (43,2 %p/p) como catalizador y el tiempo de gelificación de la resina se ajustó entre 60-70s.

En un tubo de ensayo se colocaron 5 ml de resina catalizada al 0,87% v/v con sulfato de amonio 43,2 %p/p, se lo sumergió en un baño a 100 °C y se cronometró el tiempo de transformación de la resina en gel bajo agitación manual con varilla de vidrio.

Armado de los Paneles

Se obtuvieron 12 tableros de 300 mm x 300 mm y 20 mm de espesor de densidades nominales 550 (A), 650 (B) y 750 (C) Kg/m³, a partir de las recetas y condiciones de procesamiento provistas por la empresa Tableros del Paraná S.A. que se muestran en la Tabla 1.

	A	B	C
<i>Receta:</i>			
Virutas, (g)	876	1035	1200
Agua, (g)	13	16	18
Resina, (g)	100	119	137
Catalizador, (ml)	0,67	0,79	0,91
<i>Condiciones de curado:</i>			
Temperatura, (°C)	150	150	150
Presión, (Kg/cm ²)	30	30	30
Tiempo, (min.)	10	10	10

Tabla 1. Paneles de madera conglomerada: Recetas y condiciones de curado.

Básicamente, los paneles se obtuvieron en 2 etapas:

Encolado: Primero se mezclaron la resina, el agua, y el catalizador bajo agitación manual con varilla de vidrio. Luego, se esparcieron las partículas de madera sobre una gran superficie y se pulverizaron con la resina catalizada [Fig. 1a)]. Seguidamente, la mezcla se

colocó dentro de una bolsa de polietileno y se realizó una vigorosa agitación manual para favorecer la distribución homogénea de la resina en las partículas.

Prensado: Se usó una prensa hidráulica de laboratorio que emplea vapor como fluido calefactor y agua como fluido refrigerante. Como molde se emplearon 3 marcos superpuestos de 300 mm x 300 mm (área interna) y 20 mm de espesor sobre una chapa de acero. La mezcla de partículas encolada se distribuyó en forma homogénea en el interior del molde y se comprimió en frío. Seguidamente se descomprimió y se retiró el marco superior [Fig. 1 b)]. El proceso de compresión, descompresión y eliminación de marco se volvió a repetir hasta que toda la mezcla quedó comprimida dentro del último marco. Finalmente, se calentó de acuerdo a las condiciones de la Tabla 1 [Fig. 1 c)] y al finalizar el ciclo de curado se desmoldó [Fig. 1 d)].

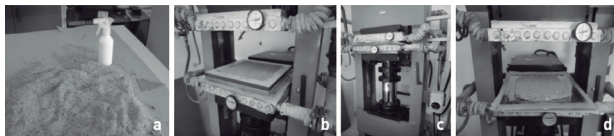


Figura 1. Proceso de obtención de los paneles: a) Encolado, b) Prensado en frío, c) Curado, y d) Desmolde.

Se midieron densidad y propiedades mecánicas tales como flexión y adherencia interna de todos los paneles.

Medición de Propiedades Finales

Densidad

Se realizaron ensayos según la norma ASTM D1037 - 12. A tales efectos se ensayaron 4 muestras de A, 4 muestras de B y 5 muestras de C de 153 mm x 76 mm y 20 mm de espesor. Se utilizó un calibre para medir las probetas y una balanza marca Kretz de 0,1 Kg de precisión para pesarlas.

Adherencia Interna (Tracción Perpendicular al Plano)

Se realizaron ensayos según la norma ASTM D1037 - 12 para determinar la cohesión del panel en la dirección perpendicular al plano. Se ensayaron 5 muestras de A, B y C respectivamente. Se utilizaron muestras cuadradas de 52-53 mm de largo (d); 52-53 mm ancho (b). Los ensayos se realizaron en una máquina universal de ensayos Shimadzu modelo DSS-10 T

[Fig. 2a)], utilizando una celda con capacidad de carga de 500 Kg marca Shimadzu n° 22.771, y a una temperatura de $18 \pm 0,5$ °C, una humedad relativa de $72 \pm 5\%$, y a una velocidad de travesa de 2 mm/min. La celda se calibró con cargas de 10 y 20 Kg en las mismas condiciones del ensayo. Se fijó una longitud calibrada de 20-23 mm.

La adherencia interna (σ_r) se obtuvo a partir de la siguiente expresión:

$$\sigma_r [\text{MPa}] = \frac{P_{\text{max}}}{bd} \quad (2)$$

donde P_{max} es la carga máxima de ruptura [5-31 Kg].

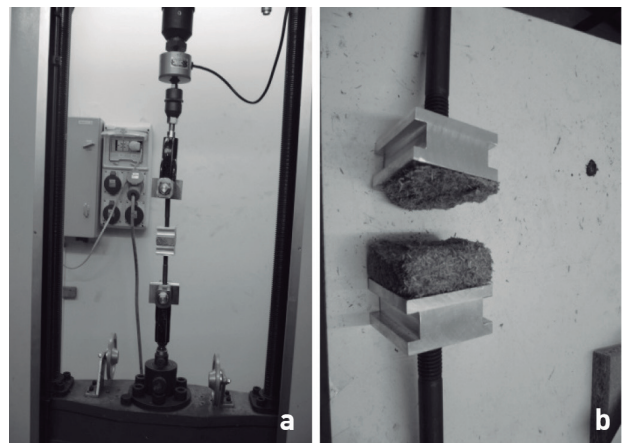


Figura 2. Adherencia interna: a) Ensayo, y b) Fotografía de una probeta ensayada en tracción perpendicular al plano.

Flexión

Se realizaron ensayos según la norma ASTM D1037 – 12 para obtener el módulo elástico (E_f) y la resistencia (σ_f) de los materiales. Se ensayaron 5 muestras de A, B y C respectivamente. Se utilizaron muestras rectangulares de 232 mm largo, 76-78 mm ancho (b) y con un espesor de 19-23 mm (d). Nótese que el largo de la probetas resultó menor al indicado por norma (531 mm) debido a la menor dimensión de las muestras. Los ensayos se realizaron en una máquina universal de ensayos Shimadzu modelo DSS-10 T [Fig. 3 a)], utilizando una celda con capacidad de carga de 500 Kg marca Shimadzu n° 22.771 y a una temperatura de $18 \pm 0,5$ °C, una humedad relativa de 72 ± 5 % y a una velocidad de travesa de 10 mm/min. Se fijó un Span o distancia entre soportes de 200mm (L). La celda se calibró con cargas de 10 y 20 Kg en las mismas condiciones del ensayo.

A partir de las las curvas de tensión-deformación en flexión de la Fig. 3b) se obtuvieron los módulos de elasticidad y resistencia a la flexión, según las siguientes ecuaciones:

$$\sigma_f [\text{MPa}] = \frac{3 P_{\text{max}} L}{2 b d^2} \tag{3}$$

$$E_f [\text{MPa}] = \frac{L^3}{4 b d^3} m \tag{4}$$

donde $P_{\text{max}} = 3-30$ kg y $m = \frac{\Delta P}{\Delta y}$ (N/mm) es la pendiente de tangente de la parte lineal de la curva.

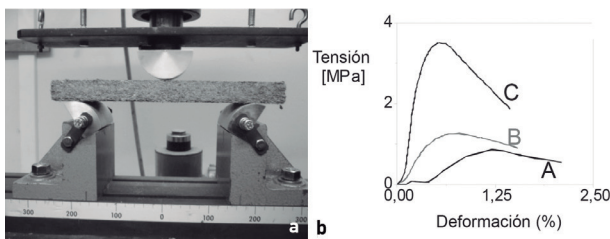


Figura 3. Flexión: a) Ensayo, y b) Curvas de tensión-deformación.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Las mediciones de densidad, viscosidad y F_T de la resina de urea-formaldehído comercial se muestran en la Tabla 2 y el tiempo de gelificación resultó de 63,6 s.

Densidad (g/cm ³)	Viscosidad (s)	F_T (%)
1,298	149	6,41

En relación a los paneles, la adherencia interna determina su calidad y en general los materiales compuestos con una gran variación del perfil de densidad vertical rompen en la zona media. La densidad en la zona de la falla es típicamente 50% menor que la densidad máxima en ambas caras (Rathke et al., 2012). En la Fig. 2 b) se muestra la fotografía de una de las probetas ensayadas. Si bien algunos de los paneles rompieron en la mitad, varios de ellos lo hicieron en la zona próxima a una de las caras como resultado de la falta de distribución homogénea de la resina y a diferencias de temperatura entre los platos de la prensa.

Con respecto al ensayo de flexión, las curvas de tensión-deformación de la Fig.3 b) muestran un comportamiento lineal elástico seguido de una zona no lineal hacia el final de las curvas. Las fibras otorgan resistencia a la tracción, mientras que la matriz le confiere resistencia a la compresión y química. En el ensayo, las fibras de la sección por encima del eje centroidal están sometidas a esfuerzos de compresión y las de abajo a esfuerzos de tracción. El principal mecanismo de falla es la tracción desarrollada en las fibras de la superficie opuesta a la de contacto. La resistencia de los materiales aumenta proporcionalmente con la densidad.

En la Tabla 3 se muestran los resultados de densidad, σ_T , σ_F y E_F .

Los resultados de la Tabla 3 se compararon estadísticamente mediante análisis de varianza (ANOVA) con un nivel de confianza del 95% ($p = 0,05$) implementando el software libre R programa versión 3.2.1. Nótese que p es el nivel de significancia. Si $p < 0,05$ existen diferencias significativas entre las muestras. Si $p > 0,05$ no existen diferencias significativas entre las muestras.

Tablero	Densidad	Adherencia interna	Flexión	
	d (Kg/m ³)	σ_T (MPa)	σ_F (MPa)	E_F (MPa)
A	580	0,03	0,53	75,12
	560	0,03	0,54	89,84
	500	0,04	0,34	60,58
	540	0,02	0,58	115,03
	— ^a	0,03	0,64	102,87
B	580	0,03	0,80	271,36
	576,90	0,03	0,80	191,29
	576,90	0,04	1,00	192,82
	557,70	0,03	0,96	182,74
	— ^a	0,03	0,90	194,36
C	711,54	0,03	1,24	298,35
	673,08	0,05	1,54	346,41
	740	0,11	2,51	570,05
	769	0,06	1,90	517,35
	780	0,09	1,85	564,07

^a no se realizaron mediciones.

Tabla 3. Mediciones de densidad, adherencia interna, resistencia y módulo en flexión.

Para las mediciones de densidad, adherencia interna y flexión se propuso un diseño completamente aleatorizado unifactorial donde el factor propuesto fue el tipo de paneles (A, B y C). En primer lugar, se comprobó la idoneidad de los modelos (errores independientes y distribuidos normalmente con media cero y variancia constante para todos los niveles del factor) mediante las pruebas de Levene y Shapiro ($p > 0,05$). Se observó que las mediciones de resistencia a la flexión y adherencia interna no cumplían con los supuestos de homocedasticidad y normalidad de los residuos. Por tal motivo, se realizó una transformación logarítmica de los datos (Montgomery, 2002) y se volvieron a corroborar los supuestos mediante Levene y Shapiro. En la Tabla 4

se muestran los valores medios (de densidad y de las propiedades mecánicas) y el nivel de significancia p obtenidos a partir de los ensayos en combinación con el tratamiento estadístico. Como era de esperar, se tienen diferencias estadísticamente significativas en las propiedades de los paneles ($p < 0,05$). Por tal motivo se efectuó la prueba de intervalos múltiples de Tukey para comparar medias y determinar grupos homogéneos (Tabla 5). La densidad y la adherencia interna de A y B resultaron estadísticamente iguales ($p > 0,05$).

Factor	d (Kg/m ³)	σ_T (MPa)	σ_F (MPa)	E_F (MPa)
A	545 ± 34,16	0,03 ± 0,007	0,53 ± 0,11	88,69 ± 21,62
B	572,89 ± 10,22	0,03 ± 0,02	0,89 ± 0,09	206,51 ± 36,53
C	734,72 ± 43,56	0,07 ± 0,032	1,81 ± 0,47	459,24 ± 127,73
p	$1,30 \times 10^{-5}$	$4,90 \times 10^{-3}$	$4,10 \times 10^{-6}$	$2,26 \times 10^{-5}$

Tabla 4. ANOVA.

Factores	d (kg/m ³)	σ_T (MPa)	σ_F (MPa)	E_F (MPa)
B-A	0,50	0,85	$4,28 \times 10^{-3}$	$8,00 \times 10^{-2}$
C-A	$2,13 \times 10^{-5}$	$6,26 \times 10^{-3}$	$2,80 \times 10^{-6}$	$1,90 \times 10^{-5}$
C-B	$8,41 \times 10^{-5}$	0,02	$7,68 \times 10^{-4}$	$6,60 \times 10^{-4}$

Tabla 5. Prueba de intervalos múltiples de Tukey: niveles de significancia (p).

Por otra parte, se adoptó un modelo de regresión lineal que correlaciona estadísticamente la densidad (d) con cada una de las propiedades mecánicas (Montgomery, 2002):

$$P_i = a + b d, \quad i = \sigma_T, \sigma_F, E_F \quad (5)$$

donde a , b , son las constantes de ajuste para cada propiedad mecánica. Los modelos se ajustaron a partir de las mediciones de la Tabla 3 empleando el software libre R programa versión 3.2.1. Las constantes de ajuste y el coeficiente de regresión R^2 de cada modelo se muestran en la Tabla 6. En las Fig. 4 se muestran

los resultados teóricos obtenidos con las ecs. (5) y los correspondientes valores experimentales (Tabla 4). Se observa una muy buena concordancia entre las predicciones y las mediciones.

<i>i</i>	a	b	R ²
σ_T	$-9,46 \times 10^{-2}$	$2,23 \times 10^{-4}$	0,9812
σ_F	-2,86	$6,38 \times 10^{-3}$	0,9806
E_F	-871,40	1,81	0,9680

Tabla 6. Parámetros del modelo.

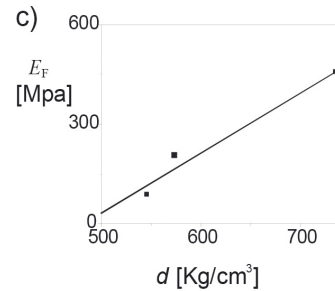
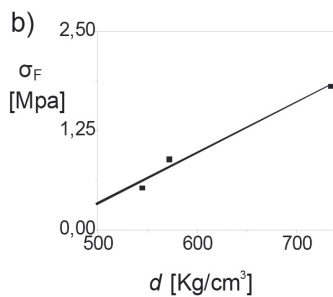
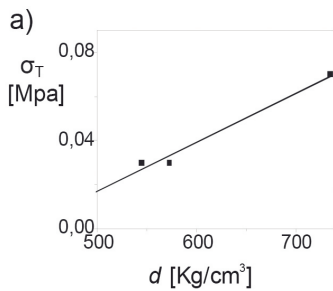


Figura 4. Curvas de correlación de la densidad con: a) σ_T , b) σ_F , c) E_F . Los puntos corresponden a las mediciones experimentales y las líneas llenas a las predicciones del modelo.

CONCLUSIONES

Se obtuvieron paneles de madera conglomerada de densidades nominales: 550, 650, y 750 Kg/cm³ y se midieron propiedades mecánicas como adherencia interna y flexión. Los ensayos mecánicos se combinaron con técnicas estadísticas a fin de una mejor evaluación de las propiedades mecánicas. Todas las propiedades aumentaron proporcionalmente con la densidad. Se emplearon modelos de regresión lineal simple para correlacionar densidad con adherencia interna, resistencia a la flexión y módulo de elasticidad en flexión, respectivamente. Los modelos son válidos para el rango de densidades estudiadas (550-750 Kg/cm³).

AGRADECIMIENTOS

A CONICET, U.N.L., U.T.N, y SeCYT, por el financiamiento. A Tableros del Paraná S.A. por el suministro de materiales y por equipamiento de laboratorio.

REFERENCIAS

- American Society for Testing and Material (ASTM), (2012). Norma ASTM D 1037 – 12. Standard test Methods for Evaluating Properties of Wood- Base Fiber and Particle Panel Materials.
- Hayashi, K., Ohmi, M., Tominaga, H. and Fukada, K. (2003). Effect of Board Density on Bending Properties and Dimensional Stabilities of MDF-reinforced Corrugated Particleboard. *J. Wood Sci. Technol.*, 49, 398-404
- Hiziroglu, S., Jarusoglu, S. and Fuengvivat, V. (2005). Surface Characteristics of Wood Composites Manufactured in Thailand. *Buil. Environ.*, 39, 1359-1364.
- Hua, Y., Jin, J. (2006). Status and Development of The Southern Type Poplar Processing Industry in Jiangsu Prpvince. *China Wood Indust.* (in Chinese with English abstract).
- Hesch, R. (1993). Correlations Among Density, Resin Content and Quality Criteria in Homogeneous boards of Bagasse. *Euro. J. Wood Prod.* 51(5), 312-318.
- Eslah, F., Enayati, A., Tajvidi, M., Faezipour, M. (2012). Regression Models for the Prediction of Poplar Particleboard Properties based on Urea Formaldehyde Resin Content and Board Density. *J. Agr. Sci. Tech*, 14, 1321-1329.
- Maloney, T. (1977). *Moder Particleboard and Dry-process Fiberboard Manufacturing*. Miller Freeman Publication, San Francisco, Calif., USA, 672 PP.
- Mitlin, L. (1968) *Particleboard Manufacture an Applicatio*. 1st edition. Novello & Company Limited Borough Green, Kent, Gran Britain.
- Montgomery, D. (2002). "Diseño y Análisis de Experimentos" Limusa-Wiley, México.
- Rathke, J., Sinn, G., Konnerth, J., Muller, U. (2012). Strain Measurements within Fiber Boards. Part I: Inhomogeneous Strain Distributios Within Mediun Density Fiberboards (MDF) Loaded Perpendicularaty to the Plane of the Board, *Materials*, 5, 1115-1124.
- Walker, J. (1964) *Formaldehyde*. 3rd edition. R. E. Krieger Publishing Company Huntington, New York.
- Zhou, D. (1990). A Study of Oriented Strand Board Made From Hybrid Poplar. *Holz als Roh-und Werkstoff*, 48, 293-296.