



Disminución de emisiones de Formaldehído en la fabricación de tableros MDF

Leonardo Castelblanco Benítez

Informe de práctica para optar al título de Ingeniero Químico

Asesores

Mauricio Esteban Sánchez, Ingeniero Químico

Freddy Jaramillo Ramírez, Ingeniero Industrial

Universidad de Antioquia

Facultad de Ingeniería

Ingeniería Química

Medellín, Antioquia, Colombia

2021

Cita	Castelblanco Benítez [1]
Referencia	[1] L. Castelblanco Benítez, “Disminución de emisiones de Formaldehído en la fabricación de tableros MDF”, Trabajo de grado profesional, Ingeniería Química, Universidad de Antioquia, Medellín, Antioquia, Colombia, 2021.
Estilo IEEE (2020)	



Centro de Documentación Ingeniería (CENDOI)

Repositorio Institucional: <http://bibliotecadigital.udea.edu.co>

Universidad de Antioquia - www.udea.edu.co

Rector: John Jairo Arboleda Céspedes

Decano/Director: Jesús Francisco Vargas Bonilla

Jefe departamento: Lina María González Rodríguez

El contenido de esta obra corresponde al derecho de expresión de los autores y no compromete el pensamiento institucional de la Universidad de Antioquia ni desata su responsabilidad frente a terceros. Los autores asumen la responsabilidad por los derechos de autor y conexos.

CONTENIDO

RESUMEN.....	7
ABSTRACT.....	8
I. INTRODUCCIÓN	9
II. OBJETIVOS.....	10
III. MARCO TEÓRICO	11
IV. METODOLOGÍA	15
V. RESULTADOS Y ANÁLISIS.....	17
VI. CONCLUSIONES	23
REFERENCIAS	24
ANEXOS.....	25

LISTA DE TABLAS

TABLA I. PROPIEDADES QUÍMICAS A LA RESINA	17
TABLA II. PROPIEDADES QUÍMICAS A LA RESINA A NIVEL INDUSTRIAL	18
TABLA III. IDENTIFICACIÓN DEL SUSTRATO	18
TABLA IV. CONDICIONES DE REFINACIÓN Y DOSIFICACIÓN	19
TABLA V. CONDICIONES DE FORMACIÓN, PRENSA Y SECADO	19
TABLA VI. VALORES ESPERADOS DE PROPIEDADES	20
TABLA VII. RESULTADOS DE PROPIEDADES FISICOMECAÑICAS	21
TABLA VIII. RESULTADOS DE PROPIEDADES FISICOMECAÑICAS	21
TABLA IX. RESULTADOS DE EMISIONES DE FORMALDEHÍDO	21

LISTA DE FIGURAS

Fig. 1. Reacción de hidroximetilación	13
Fig. 2 Esquema general de reacción de condensación	14
Fig. 3 Reacción en la segunda adición de urea	14

SIGLAS, ACRÓNIMOS Y ABREVIATURAS

UdeA	Universidad de Antioquia
MDF	Tableros de densidad media
RM	Relación molar
UF	Resina urea-formaldehído
MOR	Módulo de ruptura
MOE	Módulo de elasticidad
F/U	Relación molar entre Urea-formaldehído
EPO	Dosificación eucalipto grandis, pinus patula, pinus oocarpa
AS	Ambiente seco

RESUMEN

La resina Urea-formaldehído es uno de los adhesivos más importantes en la fabricación de paneles de madera debido a su buen desempeño y bajo costo de fabricación, sin embargo, las emisiones de formaldehído en los paneles terminados ha sido una gran dificultad para su aplicación. La prueba de perforador es uno de los métodos más empleados para determinar las emisiones de formaldehído en los tableros aglomerados, en el presente estudio se realizó esta prueba en tableros MDF 9 mm fabricados utilizando resina UF con tres diferentes niveles de relación molar U/F y urea adicional como secuestrante, donde en cada nivel se caracterizó la resina mediante pruebas químicas, además los tableros se sometieron a pruebas fisicomecánicas para garantizar la calidad. En la prueba de perforador se obtuvo un valor de 14 ppm/100g en el nivel 2 lo que significó una disminución del 52% cumpliendo con la clasificación E2 de la norma europea. La calidad del tablero según los resultados de las pruebas fisicomecánicas no se vio afectada en ninguno de los niveles de los ensayos. A partir los resultados se concluyó que las condiciones del nivel 2; RM 1.10 y adición del 5% de urea, son apropiadas para lograr la reproducibilidad del ensayo en la producción en planta.

Palabras clave — Resina urea-formaldehído, relación U/F, prueba perforador, emisiones de formaldehído, tablero MDF

ABSTRACT

Urea-formaldehyde resin is one of the most important adhesives in the manufacture of wood panels due to its good performance and low manufacturing cost, however, formaldehyde emissions in finished panels have been one of the biggest difficulties for its application. The perforator test is one of the most used methods to determine formaldehyde emissions in chipboards, in the following study this test was carried out on 9 mm MDF boards manufactured using UF resin with three different levels of molar ratio U / F and additional urea as a sequestrant, where at each level the resin was characterized by chemical tests, in addition the boards were subjected to physicomechanical tests to guarantee quality. In the perforator test, a value of 14 ppm / 100g was obtained at level 2, which meant a decrease of 52%, complying with the E2 classification of the European standard. The quality of the board according to the results of the physico-mechanical tests was not affected in any of the levels of the tests. From the results it was concluded that the conditions of level 2; RM 1.10 and the addition of 5% urea are appropriate to achieve reproducibility of the test in plant production.

***Keywords* — Urea-formaldehyde resin, U / F ratio, perforator test, formaldehyde emissions, MDF board**

I. INTRODUCCIÓN

Dexco es una multinacional brasileña productora de paneles de madera y de losas y metales sanitarios de Sur América, esta empresa adquirió las acciones de Tablemac en el 2012 e inauguró la primera planta de MDF en Colombia; situada en Barbosa-Antioquía, uniendo una compañía de tradición colombiana con la experiencia internacional de Dexco. La compañía se encarga de la producción de los tableros desde el cultivo de bosques, fabricación de la resina hasta la venta de producto terminado.

MDF por sus siglas en inglés “Medium Density Fibreboard” corresponde a tableros de fibra de madera de densidad media; este material es utilizado en diversos sectores como la construcción, fabricación de muebles, artesanías, entre otros. El tablero MDF es creado a partir de tres materias primas: madera, resina y parafina. La madera es obtenida principalmente de dos especies de árboles: pino y eucalipto. La parafina aporta propiedades necesarias para el corte y maquinabilidad. Se utiliza una resina de Urea-formaldehído, uno de los adhesivos más importantes para la fabricación de paneles de madera debido a su buen desempeño y bajo costo de fabricación, sin embargo, las emisiones de formaldehído en los paneles terminados ha sido una gran dificultad para su aplicación.

Actualmente existen diversas investigaciones que han buscado solucionar el problema de las emisiones de formaldehído mediante diferentes técnicas, una de ellas es la disminución de la relación molar entre Urea-formaldehído agregando urea adicional en el proceso de fabricación de la resina. Con el fin de evaluar la efectividad de dicha técnica en la disminución de las emisiones se realizarán pruebas de las emisiones de formaldehído en la fabricación de los tableros, donde se evaluará el comportamiento durante el proceso y el producto terminado, sabiendo que estos tableros están regulados por la ley europea EN 622-5.

II. OBJETIVOS

A. *Objetivo general*

Evaluar la reducción de emisiones de formaldehído de los tableros MDF durante su fabricación

B. *Objetivos específicos*

- Desarrollar una resina UF MDF en laboratorio con relación molar 1.10 para la fabricación de tableros MDF.
- Realizar pruebas de fabricación en planta de tableros MDF de 9 mm de espesor con la resina preparada.
- Evaluar la densidad, tracción interna, porcentaje de humedad, hinchamiento a 8 h, hinchamiento a 24 h, prueba MOR, prueba MOE en proceso y producto terminado MDF.
- Evaluar la replicabilidad de las muestras preparadas
- Determinar emisión de formaldehído en tablero mediante la prueba perforador

III. MARCO TEÓRICO

Los tableros MDF son fabricados a partir de fibras de madera, estas son mezcladas con parafina y resina para posteriormente obtener los tableros mediante procesos termomecánicos. Existen diversos tipos de tableros diferenciados por los materiales de los que están hechos los cuales proporcionan diferentes propiedades, texturas, densidad, color, etc. Las amplias cualidades de estos tableros como: su densidad, rigidez y maquinabilidad, los han convertido en una alternativa ideal frente a la madera contrachapada o el tablero de partículas; los tableros MDF proporcionan mayor estabilidad dimensional sin veta predominante como la de la madera [1]. El MDF se usa ampliamente en aplicaciones de construcción y arquitectura como: carpintería, partes de puertas y pisos laminados. Los paneles de MDF se fabrican con una variedad de propiedades físicas y dimensiones, lo que brinda la oportunidad de diseñar el producto final con las características y la densidad específicas de MDF [2].

Las propiedades fisicomecánicas de los tableros terminados son evaluadas con diferentes pruebas que permiten identificar si el producto final cumple con las especificaciones necesarias, algunas de estas son:

Medición del porcentaje de hinchamiento: esta prueba se realiza de acuerdo con la norma EN 317, que consiste en la inmersión de las probetas en agua destilada por 8h y 24h, se mide espesor en la intersección de las diagonales antes y después de la inmersión [3].

Prueba MOE: el módulo de elasticidad es calculado siguiendo la norma EN 408, consiste en medir la deformación que se produce al aplicar dos cargas verticales sobre el canto de la pieza, que se encuentran a una distancia entre ellas de una longitud igual a seis veces la altura de la cara de la pieza [4].

Prueba MOR: el módulo de ruptura también es calculado según la norma EN 408, por lo que se aplican dos cargas simétricas a una longitud central en la pieza igual a la de la prueba MOE, para la prueba MOR se miden los tiempos hasta la rotura de la probeta [4].

Prueba de perforador: mediante esta prueba se evalúan las emisiones de formaldehído, consiste en retirar formaldehído en probetas de 110 g de MDF a partir de una destilación utilizando tolueno al

99% como agente separador. Este líquido perforador resultante es analizado mediante espectrofotometría.

La madera es obtenida de maderas duras y blandas, como el pino y eucalipto, aunque también se han introducido alternativas ecológicas como el bambú y la paja. El primer paso de la producción de tableros es la limpieza de la madera de materiales metálicos como alambres o clavos, luego se retira la corteza de los troncos y se corta la madera en astillas, estas se lavan para eliminar materiales no metálicos como piedras y arena para después triturar las astillas y obtener las fibras. Posterior al proceso de preparación de fibras sigue la etapa de prensado, en esta se agrega el adhesivo a las fibras y se da forma a los tableros mediante la aplicación de calor y temperatura, con los tableros formados se realizan las diferentes pruebas necesarias para garantizar la calidad y finalmente se dan acabados y se inicia el proceso de almacenamiento y embalaje [5].

La resina UF es la más común en la industria de tableros MDF, esta cumple la función de adhesivo que proporciona unión fuerte de la fibra y ventajas como baja inflamabilidad de la resina, ausencia de color en el polímero curado, además, la solubilidad en agua permite que las resinas UF puedan tener producción a granel y más económica comparada con alternativas como el metileno difenil polimérico (p-MDI) [6].

Los componentes principales de la resina UF son urea y formaldehído, se puede obtener una amplia variedad de posibles reacciones y estructuras en las resinas; consisten en una mezcla de oligómeros y polímeros lineales o ramificados cuya base es $[(O)CNHCH_2NH]_n$ [7]. Esta resina es producida tradicionalmente por una reacción de urea y formaldehído en cuatro etapas: en la primera se realiza la adición de urea en medio ligeramente básico, en la segunda se realiza una condensación en medio ácido y en la tercera etapa se adiciona urea y se neutraliza la resina y en la última etapa se realiza el curado de la resina. La tercera etapa es de gran importancia para tener una baja relación molar de formaldehído lo que implica baja emisión de formaldehído [8].

La primera etapa o hidroximetilación, consiste en la condensación alcalina entre la molécula de urea y el formaldehído, generando las distintas especies hidroximetilurea: monohidroximetilurea (MU), 1,3-dihidroximetilurea (1,3-DMU), 1,1-dihidroximetilurea (1,1-DMU) y

trihidroximetilurea (TMU). El propósito ideal en esta etapa es la obtención de 1,3-DMU, debido a que favorece la obtención de moléculas poliméricas lineales de bajo peso molecular en la etapa de condensación. En la figura 1 se representa la reacción de hidroximetilación [8].

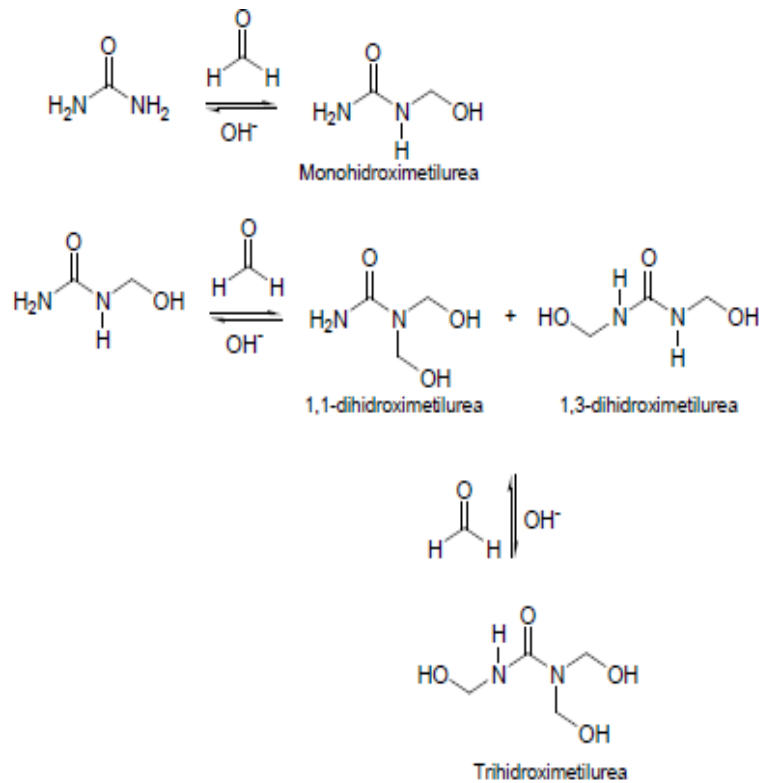


Fig. 1. Reacción de hidroximetilación [8]

La reacción de condensación entre las especies de hidroximetilurea de la etapa anterior origina pre polímeros mediante la formación de enlaces aminoetileno, también enlaces tipo éter, donde se busca favorecer los enlaces de aminoetileno y controlar el grado de condensación, debido a que a mayor condensación aumentan las moléculas de resina de alto peso molecular lo que provoca disminución de la solubilidad en agua. A continuación, se ilustra en la figura 2 un esquema general de la reacción de condensación:

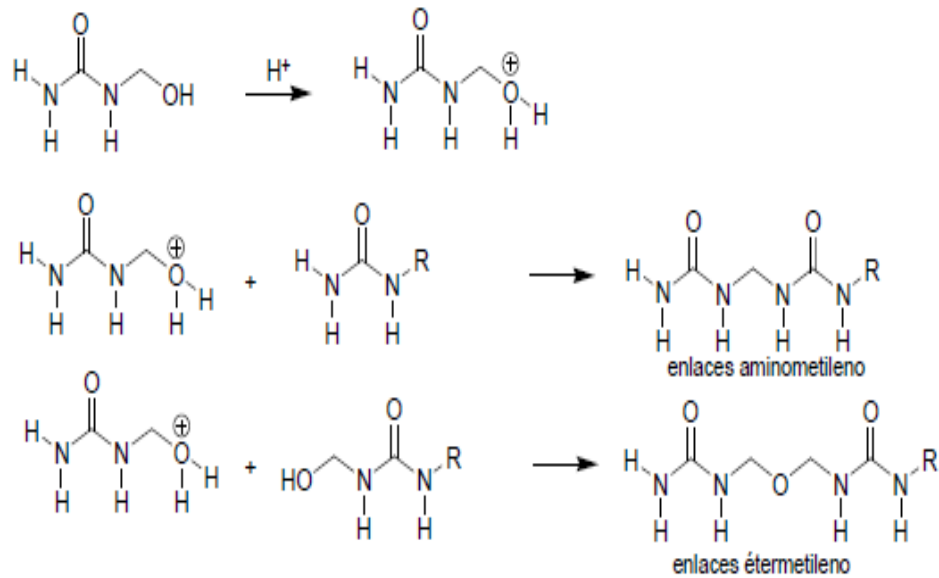


Fig. 2 Esquema general de reacción de condensación [8].

La segunda adición de urea se lleva a cabo en condiciones ligeramente alcalinas. La urea reacciona con el formaldehído libre para formar más especies de hidroximetilurea, además ocurre la transhidroximetilación que consiste en la migración de grupos hidroximetilo de las cadenas poliméricas. La reacción que ocurre en la segunda adición de urea se ilustra en la figura 3.

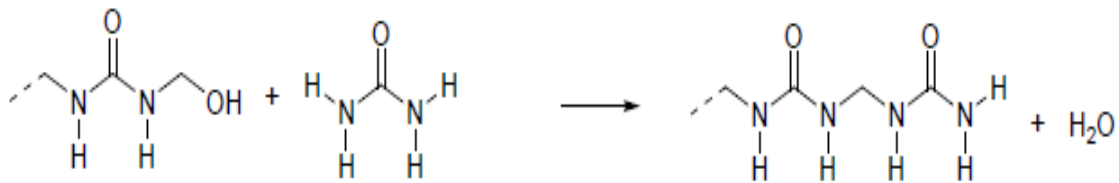


Fig. 3 Reacción en la segunda adición de urea [8].

El proceso de curado, descrito de manera sencilla, es una continuación de la reacción de condensación que se realiza bajo condiciones ácidas alcanzadas con adición de endurecedores como ácidos disociados en agua, en esta etapa se da el prensado en el cual se mezcla las fibras con la resina para posteriormente agregar presión y temperatura y realizar acabados con el fin de obtener tableros aglomerados secos MDF [8].

IV. METODOLOGÍA

A. Revisión del estado del arte: artículos científicos, manuales técnicos, patentes, expertos de la compañía

B. Determinación y ejecución de pruebas preliminares a nivel de laboratorio.

Definir posibles contratiempos en ejecución.

Evaluación de riesgos asociados a las pruebas de salud, económicas y ambientales.

Verificación de instrumentos necesarios para prueba experimental.

Medición de propiedades químicas de la resina: viscosidad Brookfield y copa Ford, pH, % sólidos, densidad, tolerancia al agua, tiempo de gel y capacidad buffer

Pruebas de replicabilidad experimental.

Análisis de resinas.

C. Evaluación de conveniencia de urea.

Síntesis de resina con una relación molar de 1.15 y 0% de agregado de urea nivel 0.

Ejecución de nivel 1 de experimentación con relación molar 1.10 y 0% Urea.

Ejecución de nivel 2 de experimentación con relación molar 1.10 y 5% Urea.

Medición de propiedades químicas de la resina de niveles 0,1 y 2: viscosidad Brookfield y copa Ford, pH, % sólidos, densidad, tolerancia al agua, tiempo de gel y capacidad buffer.

Comparación entre los niveles 0, 1 y 2

D. Determinación de propiedades y condiciones de proceso.

Selección de condiciones de formación, prensa y ejecución de pruebas para cada nivel de experimentación.

Determinación de las condiciones, dosificación y secado: Presión diferencial, potencia específica, %resina sólida/fibra seca, %resina diluida, % parafina sólida/fibra seca, temperatura de entrada etapa 1, temperatura de entrada etapa 2, densidad fibra, peso manta, velocidad línea, temperatura de plato 1, 2 y 3

E. Producción industrial de prueba en MDF.

Construir tableros 9 mm con dosificación de resinas propuestas.

Realización de pruebas fisicomecánicas: densidad, tracción interna, calibre promedio, % humedad, % hinchamiento 8 h, % hinchamiento 24h, % absorción 24h,

prueba MOR, prueba MOE, prueba tornillo en cara.

Medición de emisiones de formaldehído a través de prueba perforadora y desecadora.

F. Socialización de resultados y definición de mejoras con responsables del proceso.

Comparación de pruebas, ventajas, desventajas y ajustes.

G. Determinación del plan de implementación escalado según los resultados obtenidos y basado.

H. Preparación del informe técnico

V. RESULTADOS Y ANÁLISIS

A. Propiedades químicas de la resina a escala de laboratorio

Inicialmente se midieron las propiedades químicas de la resina preparada a escala de laboratorio a RM 1.10 y 1.15, se comprobó la factibilidad de los ensayos de la resina a escala industrial mediante 10 réplicas en las mediciones con una varianza inferior al 5% en las propiedades. Las propiedades medidas fueron viscosidad Brookfield y copa Ford, pH, % sólidos, densidad, tolerancia al agua, tiempo de gel y capacidad buffer. Los resultados de estas se reportan en la tabla 1.

TABLA I.
PROPIEDADES QUÍMICAS A LA RESINA

Propiedades químicas a la resina								
Característica resina	Viscosidad Brookfield (cP)	Viscosidad copa Ford (s)	pH a 25°C	% Sólidos	Densidad (g/ml)	Tolerancia al agua	Tiempo de gel	Capacidad Buffer (ml)
Estándar	60-110	20-30	7.2-9	56-60	1.210-1.230	1-6	60-90	25-40
RM 1.15	108	28	8.4	58.4	1.225	4.6	82	30
RM 1.10	100	27	8.5	57.61	1.22	4.6	85	31

B. Evaluación conveniencia de urea

La resina estándar con la que se fabrican los tableros presenta una RM 1.15, para este estudio se fabricó adicionalmente una resina con RM 1.10. Posterior a la fabricación de ambas resinas se realizaron las adiciones de urea correspondientes a cada nivel de experimentación mencionado en la sección metodología: nivel 0 RM 1.15 y 0% de agregado de urea; nivel 1 RM 1.10 y 0% urea; nivel 2 RM 1.10 y 5% urea.

Elaborados los tres niveles de experimentación se procedió a realizar las pruebas químicas de la resina de cada uno, donde nuevamente se midió viscosidad Brookfield y copa Ford, pH, % sólidos, densidad, tolerancia al agua, tiempo de gel y capacidad buffer. Los resultados de las pruebas de cada nivel se reportan en la tabla 2.

TABLA II.
PROPIEDADES QUÍMICAS A LA RESINA A NIVEL INDUSTRIAL

Propiedades químicas a la resina a nivel industrial								
Característica resina	Viscosidad Brookfiel (cP)	Viscosidad copa Ford (s)	pH a 25°C	% Sólidos	Densidad (g/ml)	Tolerancia al agua	Tiempo de gel	Capacidad Buffer (ml)
Estándar	60-110	20-30	7.2-9	56-60	1.210-1.230	1-6	60-90	25-40
Nivel 0	105	26	8.2	57.3	1.210	4.6	85	28
Nivel 1	103	26	8.3	56.8	1.210	4.6	81	30
Nivel 2	95	25	8.9	57.61	1.22	4.6	65	37

C. Condiciones de formación, prensa, dosificación y secado

Previo a la fabricación de los tableros se definieron las condiciones de proceso para formación, prensa y secado, la definición de estos se realiza de acuerdo con el estándar por calibre de la compañía. La identificación del sustrato usada se reporta en la tabla 3 y las condiciones dosificación se encuentra especificada respecto a sólidos de resina, los valores establecidos para el proceso se muestran en las tablas 4 y 5.

TABLA III.
IDENTIFICACIÓN DEL SUSTRATO

Identificación del sustrato								
Niveles	ID	Año	Fecha	Hora	Calibre	Tipo	Especie Madera	Decisión
0	4602	2021	11-sep	14:30	9	AS	EPO 70-20-10 %	OK
1	4615	2021	13-sep	20:10	9	AS	EPO 70-20-10 %	OK
2	4618	2021	14-sep	06:50	9	AS	EPO 70-20-10 %	OK

TABLA IV.
CONDICIONES DE REFINACIÓN Y DOSIFICACIÓN

Niveles	REFINACION		CONDICIONES DOSIFICACION		
	Presión Diferencial	Potencia Especifica kWh/T	% resina sólida/fibra seca	% Resina diluida	% Parafina sólida/fibra seca
0	0.3	95	10.5	50	0.95
1	0.2	100	10.65	52	0.95
2	0.2	120	10.65	52	0.92

TABLA V.
CONDICIONES DE FORMACIÓN, PRENSA Y SECADO

Niveles	SECADO				FORMACION Y PRENSA				
	T entrada 1° etapa (°C)2	T entrada 2° etapa (°C)3	Humedad fibra	Densidad Fibra PLC (kg/m3)	Peso manta (kg/m2)	Velocidad línea (mm/s)	T plato 1 (°C)	T plato 2 (°C)	T plato 3 (°C)
0	156	158	9.5	27.17	7.27	293	230	231	221
1	146	137	10.1	27.69	7.24	270	233	230	219
2	135	134	9.8	29.19	7.3	275	230	230	219.8

D. Pruebas en tableros 9 mm terminados

Definidas las condiciones de proceso se procedió a solicitar la producción en planta de los tableros MDF de 9 mm según las especificaciones de cada nivel de experimentación, a los tableros terminados se les realizaron pruebas de densidad, tracción interna, calibre promedio, % humedad, % hinchamiento 8 h, % hinchamiento 24h, % absorción 24h, prueba MOR, prueba MOE y prueba tornillo en cara para determinar la conformidad mecánica del producto y se midieron emisiones de formaldehído a través de prueba perforador y desecador (JIS) para evaluar si las emisiones de formaldehído se vieron afectadas respecto a las modificaciones hechas en la fabricación de la resina. Se realizó aproximadamente una hora de producción por cada nivel experimental y se extrajo una muestra de un tablero por cada lote.

Las mediciones de densidad se realizaron de acuerdo con la norma EN 323 en probetas normalizadas a las cuales se les obtienen sus dimensiones con precisión de 0.01 mm y la masa con 0.1 g de precisión, las probetas fueron obtenidas a lo largo del espesor del tablero, con el fin de garantizar una densidad uniforme y un comportamiento homogéneo [9]

La tracción interna es la medida más importante del producto debido a que está relacionada con el enlace interno de las fibras lo que indica el comportamiento del tablero cuando es sometido a todo tipo de trabajo por los cantos y el proceso de prensado con calor, el ensayo de resistencia a la tracción se realizó de acuerdo a la norma EN 319, esta prueba implica la evaluación de la resistencia a la tracción aplicando una fuerza perpendicular distribuida uniformemente sobre la superficie de la pieza ensayada hasta que se produce la rotura. [10]

El calibre promedio es medido en secciones de arista 10cm y se obtiene el promedio todas las probetas medidas, en este procedimiento se realizaron mediciones en 23 probetas por cada nivel.

El porcentaje de humedad se midió según la norma EN 322 que consiste en la eliminación de agua de las probetas mediante calentamiento por estufa a $103 \pm 2^\circ\text{C}$ hasta alcanzar masa constante, el valor de humedad esperado para un MDF ambiente seco está entre 5% y 7%. [9]

Los porcentajes de hinchamiento 8 h y 24 h se midieron de acuerdo con la norma EN 317, se realizó la inmersión de las probetas en agua destilada por 8h y 24h y se midió espesor en la intersección de las diagonales antes y después de la inmersión

El porcentaje de absorción 24h se midió de acuerdo con la norma EN 317, que establece que las probetas normalizadas con 50 mm de arista, se sumergen en agua durante 24 h y se mide su masa antes y después de la inmersión.

Las pruebas MOR y MOE midieron la ruptura y la deformación respectivamente de las probetas al aplicar cargas de acuerdo con la norma EN 408

La prueba tornillo determina el sostenimiento al tornillo por la cara y el canto de MDF, es realizada según la norma EN 320 en probetas de 10 cm de arista. Es de utilidad para determinar la resistencia de los tableros en los casos donde el tornillo soporta el peso de las puertas, bandejas, estantes, entre otros.

La medición de emisiones de formaldehído se realizó a través de prueba perforador y desecador, la prueba perforadora se realizó de acuerdo con el procedimiento de la norma EN 120 que permite extraer el formaldehído de las probetas utilizando tolueno, para posteriormente identificar el formaldehído por espectrofotometría. El método desecador se realizó siguiendo la norma JIS A 1460 dónde una muestra de tablero se coloca en un desecador con un depósito de agua destilada, durante 24 horas y se verifican las emisiones de formaldehído por espectrofotometría.

Los valores esperados de las propiedades fisicomecánicas para tableros MDF 9mm se reportan en la tabla 6.

TABLA VI.
VALORES ESPERADOS DE PROPIEDADES

CALIBRE 9mm		
Propiedad	Unidad	Especificación
Densidad Promedio $\pm 3\%$	kg/m ³	680
Hinchamiento Espesor 24h, máx	%	16
Resistencia a la tracción interna Mínimo	kg/cm ²	5
Flexión (MOR) Mínimo	kg/cm ²	220
Módulo de Elasticidad (MOE) Mínimo	kg/cm ²	35000

Los resultados de las pruebas fisicomecánicas mencionadas se encuentran en la tabla 7 y 8 y los

valores de emisiones de formaldehído se reportan en las tablas 9.

TABLA VII.
RESULTADOS DE PROPIEDADES FISICOMECAICAS

Niveles	Densidad kg/m ³	Tracción interna	Calibre bruto prom.	% humedad	Hinchamiento 8 h
0	679	6.6	9.89	5.32	7.45
1	673	6	9.91	4.23	4.26
2	693	6.3	9.94	5.79	6.05

TABLA VIII.
RESULTADOS DE PROPIEDADES FISICOMECAICAS

Niveles	% hinchamiento 24 h	% absorción 24 h	MOR (kg/cm ²)	MOE (N/mm ²)	Tornillo cara (kg)
0	14.54	38.86%	233	53697	53
1	12.41	34.74%	225	61881	60
2	11.39	39.26%	241	69881	57

TABLA IX.
RESULTADOS DE EMISIONES DE FORMALDEHÍDO

NIVELES	Emisiones de formaldehído					
	Desecador	Disminución	Días de estabilización	Perforador	Disminución	Días de estabilización
	(%)	mg/L		mg/100g tab.	(%)	
0	3.31	0	7	29.3	0	7
1	4.87	-32	7	30.4	-4	7
2	3.13	36	7	14.6	52	7

E. Definición de mejoras e implementación

Se eligió de referencia el resultado de la prueba perforador debido a que es la más común en la industria MDF; esta confirmó la disminución de formaldehído cuyo valor máximo fue estimado para este ensayo en un 52%, siendo un resultado conforme con la norma europea clasificación E2 que establece que debe de estar entre 8 mg/100g a 30 mg/100g.

Se percibió un aumento de la tracción con la adición de urea para la relación molar 1.10, lo que permitió inferir que dicha sustancia significa un beneficio en la propiedad más importante para garantizar la conformidad mecánica de los tableros.

Las propiedades químicas de la resina demostraron no ser sensibles a los cambios de relación molar; debido a que se encontraron en el rango aceptado, permitiendo plantear la posibilidad de evaluar más modificaciones en RM y adición de urea para próximos ensayos en búsqueda de mejores resultados respecto a las emisiones de formaldehído y adicionalmente, este resultado abre la posibilidad de iniciar y estandarizar el uso de la resina RM 1.10 para cada uno de los calibres fabricados en planta Barbosa.

VI. CONCLUSIONES

De acuerdo con los resultados obtenidos en las pruebas químicas de la resina desarrollada con relación molar 1.10, se concluyó que cumple con las condiciones para ser usada en la fabricación de MDF debido a que se encuentra de los estándares de las propiedades.

La modificación de relación molar entre 1.15 y 1.10 no generó cambios significativos en la calidad del tablero, donde la tracción como variable principal tuvo un cambio entre los niveles 0 y 2 del 4.5% lo que permite concluir que se podrían realizar ensayos modificando la relación molar buscando mayor disminución de las emisiones de formaldehído.

Luego de observar el comportamiento de la experimentación con tableros MDF 9mm se pudo evidenciar la posibilidad de escalar el proceso a otros calibres para lograr la estandarización de la resina con relación molar 1.10 y 5% de adición de urea.

Tras definir las condiciones de formación de los tableros, se logró fabricar tableros MDF 9 mm con la resina desarrollada que cumplieron conformidad mecánica.

A partir de la experimentación realizada, se comprobó la disminución de emisiones de formaldehído en los tableros MDF 9mm en un 52% entre el nivel 0 y 2 cumpliendo la clasificación E2, lo que indica que las condiciones de relación molar 1.1 y 5% de adición de urea son apropiados para implementar el ensayo en producción en planta.

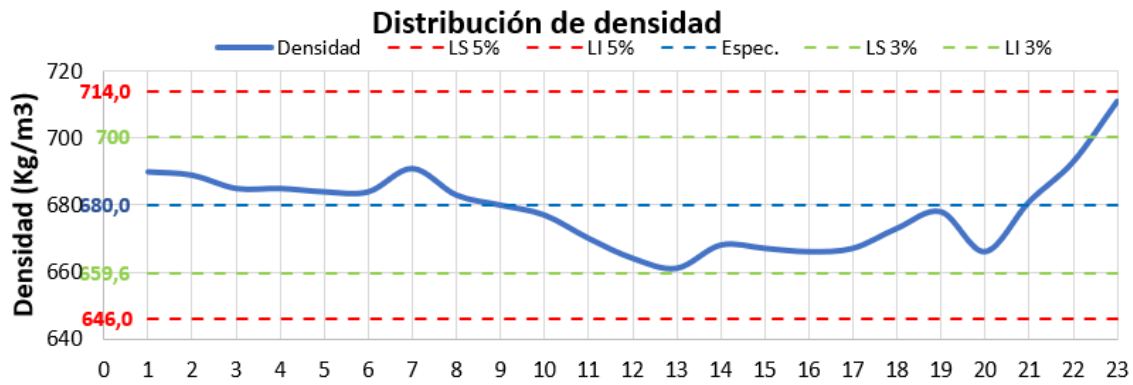
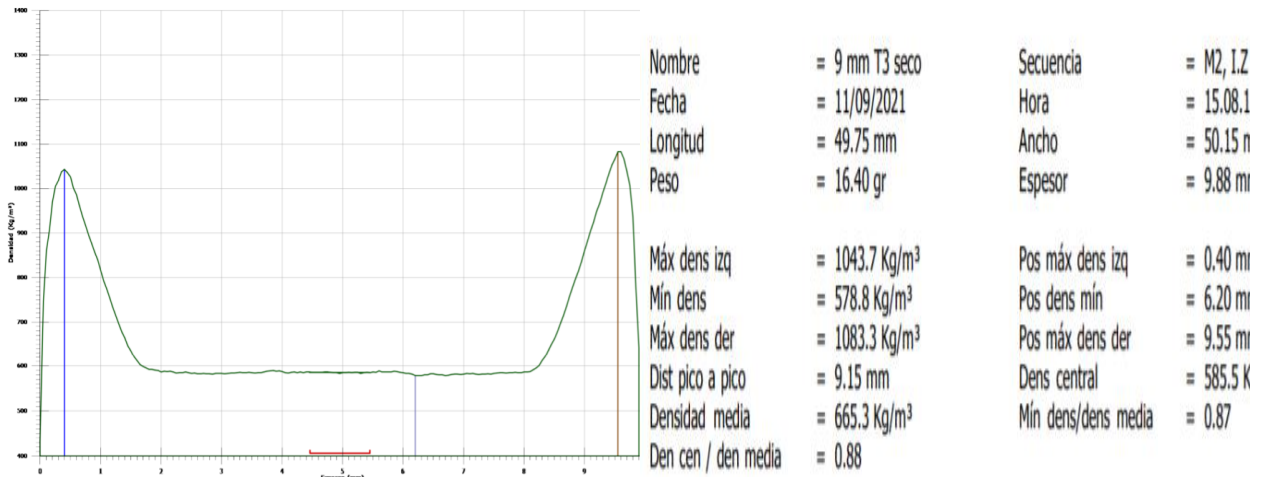
REFERENCIAS

- [1] P. A. B. Estévez, «Desarrollo , Caracterización Y Optimización De Resinas Base Urea-Formol (Uf), Como Adhesivos Para Tableros Aglomerados Con Baja Emisión De Formaldehído,» Burgos, 2012.
- [2] C. I. Campos y F. A. Rocco Lahr, «CHARACTERIZATION OF MDF PRODUCED STARTING FROM EUCALYPTUS AND NATURAL ADHESIVE POLYURETHANE,» *Maderas.Ciencia y tecnología*, vol. 6, pp. 73-84, 2004.
- [3] M. Dunky y A. Pizzl, «Wood adhesives,» *Adhesion Science and Engineering*, pp. 1039-1103, 2002.
- [4] German Engineering, «Producción de tableros de fibra de madera (MDF/HDF),» 2018. [En línea]. Available: <https://processing-wood.com/es/procesos/tableros/mdf/>.
- [5] E. Hermoso, «Caracterización de la madera estructural de Pinus sylvestris L.,» Madrid, 2001.
- [6] F. Kamke, «Wood: Nonstructural Panel Processes,» *Encyclopedia of Materials: Science and Technology*, pp. 9673-9678, 2001.
- [7] S. Kubba, «Choosing Materials and Products,» *Green Construction Project Management and Cost Oversight*, pp. 221-266, 2010.
- [8] P. Solt, P. Solt, W. Gindl-Altmutter, J. Moser, R. Mitter y H. W. van Herwijnen, «Technological performance of formaldehyde-free adhesive alternatives for particleboard industry,» *International Journal of Adhesion and Adhesives*, vol. 94, pp. 99-131, 2016.
- [9] C. Inácio de Campos y F. A. Rocco Lahr, «Caracterización del MDF producido a partir de Eucalipto y adhesivo poliuretano natural,» *Maderas: Ciencia y tecnología*, pp. 73-84, 2004.
- [10] F. Peraza y F. Arriaga, Tableros de madera de uso estructural, AITIM, 2004.

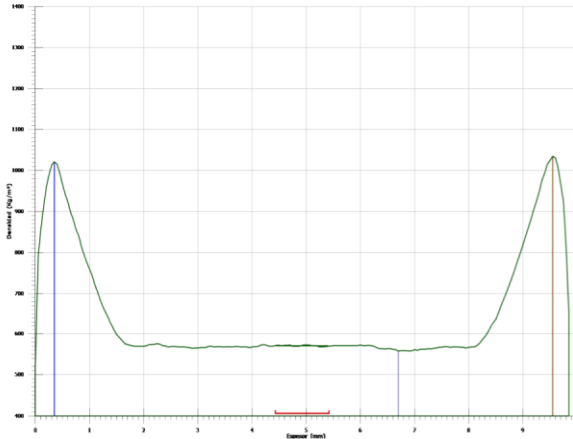
ANEXOS

Las siguientes figuras ilustran los perfiles y distribuciones de densidad de cada nivel de experimentación, de los cuales se obtuvo el valor promedio para el reporte de resultados

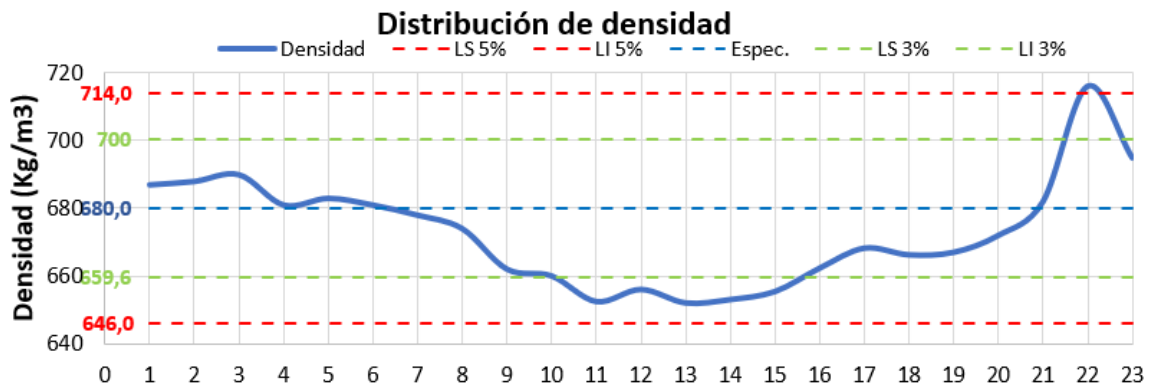
**Nivel 0
4602**



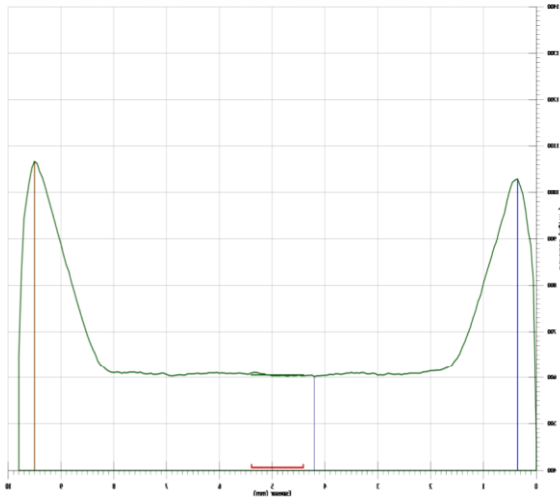
**Nivel 1
4615**



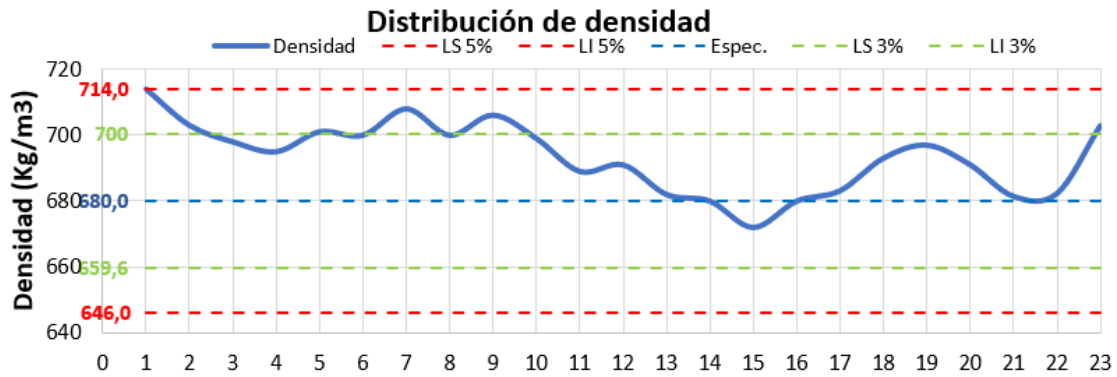
Nombre	= 9 mm T3 seco	Secuencia	= M2, I, Z
Fecha	= 13/09/2021	Hora	= 20.43.56
Longitud	= 50.96 mm	Ancho	= 50.11 mm
Peso	= 16.16 gr	Espesor	= 9.85 mm
Máx dens izq	= 1021.2 Kg/m³	Pos máx dens izq	= 0.35 mm
Min dens	= 558.4 Kg/m³	Pos dens mín	= 6.70 mm
Máx dens der	= 1034.8 Kg/m³	Pos máx dens der	= 9.55 mm
Dist pico a pico	= 9.20 mm	Dens central	= 571.0 Kg/m³
Densidad media	= 642.5 Kg/m³	Min dens/dens media	= 0.87
Den cen / den media	= 0.89		



**Nivel 2
4618**



Nombre	= 9mm T2 SECO	Secuencia	= M1 AG
Fecha	= 14/09/2021	Hora	= 07.41.35
Longitud	= 50.16 mm	Ancho	= 49.96 mm
Peso	= 16.71 gr	Espesor	= 9.80 mm
Máx dens izq	= 1029.1 Kg/m ³	Pos máx dens izq	= 0.35 mm
Min dens	= 602.0 Kg/m ³	Pos dens mín	= 4.20 mm
Máx dens der	= 1066.9 Kg/m ³	Pos máx dens der	= 9.50 mm
Dist pico a pico	= 9.15 mm	Dens central	= 605.3 Kg/m ³
Densidad media	= 680.4 Kg/m ³	Mín dens/dens media	= 0.88
Den cen / den media	= 0.89		



Nota. Fuente Archivos calidad Barbosa Dexco