

Estudio experimental de las propiedades mecánicas y físicas de madera plástica obtenida a partir de mascarillas quirúrgicas y tapas de plástico

Augusto Bacca-González, Cristian Otalora-Roa, Nelson Arzola-de la Peña

Grupo de Investigación en Diseño Óptimo Multidisciplinario – OptimUN, Departamento de Ingeniería Mecánica y Mecatrónica, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, Colombia.
Emails: cabaccag@unal.edu.co, cotalorar@unal.edu.co, narzola@unal.edu.co

Resumen

La presente investigación es motivada por las consecuencias ambientales del uso intensivo de mascarillas quirúrgicas durante y la postpandemia de COVID-19. En el trabajo se evalúa el uso de una mezcla de dos tipos de polímeros reciclados, 1) polipropileno – PP, proveniente de mascarillas quirúrgicas; y 2) polietileno de alta densidad – HDPE, proveniente de tapas de botellas, en la fabricación de láminas planas por prensado en caliente. Se implementa en el estudio un diseño de experimento de tipo Box – Behnken con tres factores: proporción entre los dos polímeros, temperatura y duración del proceso de prensado. Las respuestas experimentales se miden mediante ensayos de tensión normalizados y de absorción de humedad, obteniéndose el esfuerzo máximo de cada muestra (1,94 a 6,15 MPa), módulo de elasticidad (118,75 a 399,39 MPa), deformación a carga máxima (1,36 a 3,89%), tenacidad (0,03 a 0,26 MJ/m³) y absorción de humedad (0,35 a 4,32%). También se examina la calidad superficial y porosidad de las placas y su relación con las fallas presentes en las pruebas mecánicas.

Palabras clave: mascarilla quirúrgica, tapas de plástico, madera plástica, reciclado, moldeado por prensado.

Abstract

The present research, motivated by the environmental consequences of the intensive use of surgical masks during and post-pandemic of COVID-19, evaluates the use of a mixture of two types of recycled polymers, 1) polypropylene - PP, from surgical masks; and 2) high density polyethylene - HDPE, from bottlecaps, in the manufacture of flat sheets by hot pressing. A Box-Behnken design with three factors: ratio between the two polymers, temperature, and duration of the pressing process, is used in the experimental study. The experimental responses are measured by standardized mechanical tensile tests and moisture absorption tests; then the maximum mechanical strength of each sample (1.94 to 6.15 MPa), modulus of elasticity (118.8 to 399.4 MPa), deformation at maximum load (1.36 to 3.89%), toughness (0.03 to 0.26 MJ/m³) and moisture absorption (0.35 to 4.32%) are obtained. The surface quality of the plates and failure relationship with the mechanical tests are also examined.

Keywords: surgical mask, plastic caps, plastic lids, plastic wood, recycling, press molding

1. Introducción

La pandemia de COVID-19 no solo ha ocasionado un grave efecto en la salud humana, sino que también ha generado un considerable impacto ambiental, debido

al uso permanente de mascarillas quirúrgicas, que a la fecha se acumulan en su mayoría en vertederos y cuerpos de agua [1].

La OMS estimó que la actual pandemia ha colapsado incluso los sistemas de reciclaje en algunos países, principalmente por el alto consumo de miles de millones de mascarillas y guantes. Según las estadísticas, en el año 2020 se consumieron en promedio mensual 129.000 millones de mascarillas y 65.000 millones de guantes, además de otros desechos médicos y empaques de comida, de los cuales un 12% termina en procesos de incineración y un 70% en vertederos y océanos [2].

El principal segmento que ha incrementado la carga de desechos de plástico al ambiente se ha generado por la industria de embalaje (aportando un 44,8%, de la carga total), de las materias primas implementadas en este sector, el polipropileno – PP (18,3%) y polietileno (HDPE en una proporción del 20,76% y polietileno de baja densidad - LDPE con un 30,13%), aportan aproximadamente el 70% [3]. Actualmente existen diferentes propuestas para el uso de mascarillas quirúrgicas en la fabricación de sillas, paneles de ladrillos, componentes de baterías, entre otros [4]. En la Tabla 1 se presenta un resumen de las propiedades principales del polipropileno – PP y polietileno de alta densidad - HDPE, de interés para el estudio que se desarrollará en el presente estudio [5].

Tabla 1. Propiedades mecánicas y térmicas de los polímeros PP y HDPE. Tomado de Osswald T., Menges G (2010).

Variables de evaluación		
Polímeros	PP	PE
Temperatura vítrea Tg (°C)	-20	-125
Temperatura de fusión Tm (°C)	170	135
Temperatura de degradación (°C)	287	-
Densidad (g/cm ³)	0,9/0,907	0,941/0,965
Resistencia a la tracción (N/mm ²)	21/37	18/35
Alargamiento a rotura (%)	20/800	100/1000
Módulo de elasticidad (N/mm ²)	1100/1300	700/1400

En este escenario se propone la reutilización de mascarillas quirúrgicas, en combinación con otros polímeros de desecho, como materia prima en la fabricación de madera plástica, contribuyendo a la disminución del impacto ambiental y a la reactivación económica. Se mezclan dos tipos de materiales reciclados de alto impacto ambiental, comprobando las propiedades mecánicas y físicas de la mezcla mediante ensayos de tensión, dimensionales y de absorción de agua.

El propósito de la presente investigación es llevar a cabo un estudio experimental sobre la viabilidad de reutilización de las mascarillas quirúrgicas, en combinación con otro material plástico reciclado, para la obtención de madera plástica mediante un proceso controlado de prensado en caliente. La contribución fundamental va orientada a la disminución del impacto ambiental provocada por el uso intensivo de

este elemento de bioprotección en los últimos años y que ha sido impulsada por la pandemia de COVID-19.

2. Materiales y métodos

Inicialmente se seleccionaron y limpiaron las tapas usadas provenientes de envases de plástico, y en el caso de las mascarillas se retiraron previamente el clip nasal y bandas de sujeción (se utilizaron mascarillas nuevas con 100% de polipropileno, provenientes de lotes de producción con defectos, de la empresa BackSide-Medical). Por otra parte, se trituraron las tapas en un molino de corte Retsch modelo SM100 (aplicando un tamaño de tamiz con aberturas cuadradas de 4 mm) y se seccionaron las mascarillas quirúrgicas con una cortadora eléctrica Polar/Mohr modelo 115CE (programada para realizar cortes cuadrados de 10 mm). Posteriormente, se mezclaron estos dos materiales utilizando un tambor de mezclado, a tres niveles de proporción entre los polímeros, de acuerdo con el diseño experimental (DdE) propuesto.

Para la obtención de las placas se definió como variable fija experimental de fabricación la presión de prensado aplicada mediante una prensa hidráulica, ajustando el valor de carga de compresión a 30 kN. La fuerza aplicada es sensada mediante una celda de carga ubicada en la parte inferior del molde.

Los factores experimentales utilizados en el DdE son el tiempo de prensado o moldeo (10 min, 15 min y 20 min), la temperatura de proceso (165°C, 180°C y 195°C) y la proporción de la mezcla (2:1, 1:1 y 1:2, relacionando PP : HDPE), siendo el material de mayor interés el polipropileno (PP) que permitirá identificar el alcance del uso de las mascarillas quirúrgicas en procesos de reciclado. El rango de temperaturas seleccionando para el DdE se encuentra cercano a la temperatura de fusión del polímero con punto de fusión más alto, con el fin de conseguir que los componentes se fundan entre sí, sin alcanzar la temperatura de degradación, evitando encontrar a su vez fracciones de material quemado en la pieza. Se comprobó la temperatura generada en la zona de moldeo mediante una termocupla tipo J (instalada en la zona de control de las resistencias eléctricas del molde), y también mediante el uso de una cámara termográfica, como método de comprobación de la uniformidad del campo de temperatura en las superficies de trabajo del molde.

El DdE fue acotado bajo un modelo Box- Behnken de 13 puntos utilizando tres bloques experimentales, el cual es un diseño de tipo superficie de respuesta; este no cuenta con factorial incrustado, como sí sucede con los modelos convencionales. En la Tabla 2 se muestra el resumen del conjunto de mezclas y parámetros utilizados para el estudio experimental.

Tabla 2. Diseño de experimentos Box-Behnken para la fabricación de las placas de polímeros según los tratamientos experimentales establecidos.

Distribución de los tratamientos y los niveles de los factores experimentales en el DdE				
Placa / Tto.	Proporción (PP:PE) [%:%]	Temperatura [°C]	Tiempo [min]	
P1	(-1) 33.3:66.6	(-1) 165	(0) 15	
P2	(+1) 66.6:33.3	(-1) 165	(0) 15	
P3	(-1) 33.3:66.6	(+1) 195	(0) 15	
P4	(+1) 66.6:33.3	(+1) 195	(0) 15	
P5	(-1) 33.3:66.6	(0) 180	(-1) 10	
P6	(+1) 66.6:33.3	(0) 180	(-1) 10	
P7	(-1) 33.3:66.6	(0) 180	(+1) 20	
P8	(+1) 66.6:33.3	(0) 180	(+1) 20	
P9	(0) 50:50	(-1) 165	(-1) 10	
P10	(0) 50:50	(+1) 195	(-1) 10	
P11	(0) 50:50	(-1) 165	(+1) 20	
P12	(0) 50:50	(+1) 195	(+1) 20	
P13	(0) 50:50	(0) 180	(0) 15	

* Entre paréntesis se muestran los niveles codificados de los factores experimentales

Las propiedades mecánicas de las placas fabricadas se realizaron de acuerdo con lo establecido en las normas de ensayo mecánico a tracción ASTM D638-14 [6] (con geometría “Tipo I”), mientras que el porcentaje de absorción de agua se determinó según el procedimiento establecido en la norma ASTM D570-98 [7]. El equipo utilizado para la prueba de tensión fue una máquina universal de ensayos mecánicos marca Shimadzu (modelo AG250KN), la velocidad se establece siguiendo las indicaciones de la “Tabla 1” de la norma, a 5 mm/min, la longitud calibrada se definió mediante una galga extensométrica a 50 mm, y la deformación se obtuvo con un extensómetro de contacto SES 1000, marca Shimadzu. El ensayo a tensión es necesario para establecer las características principales de respuesta del material, en las propiedades de esfuerzo, deformación, módulo de elasticidad y la tenacidad.

Las muestras ensayadas durante las pruebas mecánicas fueron analizadas de manera cualitativa para relacionar el tipo de falla con la porosidad y calidad superficial de forma óptica mediante un estereomicroscopio Nikon modelo SMZ800, el cual cuenta con una cámara modelo DS-Fi2.

También se obtuvo un segundo grupo de muestras para identificar la absorción de agua de las diferentes placas, extrayendo muestras con un tamaño de 76,2 x 25,4 mm (manteniendo el espesor obtenido de las placas, con un valor promedio de espesor de todas las muestras de 3,6 mm). Luego las muestras fueron puestas en un horno a una temperatura de 50°C por un periodo de 24 horas, para luego ser enfriadas en un

desecador. Las muestras son pesadas en una balanza analítica para garantizar una alta exactitud en la medición.

Una vez obtenidos los materiales y mezclados según el modelo de DdE seleccionado, se prepararon los equipos para acondicionar la prensa hidráulica a la temperatura y presión establecidas por el diseño experimental. En la Figura 1 se muestra el proceso general para la obtención de las placas; mientras que en la Figura 2 aparecen indicados los componentes principales de la prensa hidráulica utilizada para la fabricación de las placas de mezcla de polímeros.



Figura 1. Procesamiento de las materias primas hasta la obtención del producto y ciclo de reciclado. Fuente: elaboración propia.

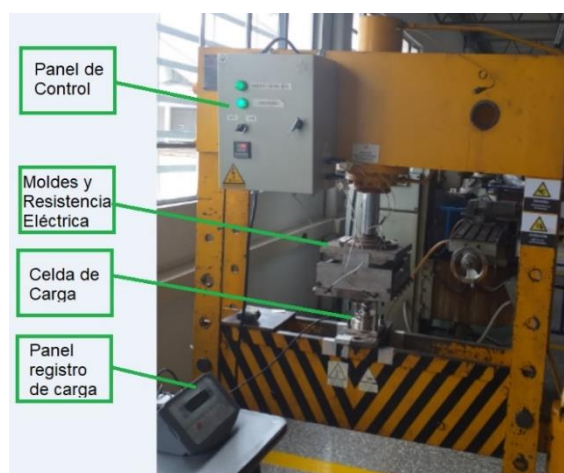


Figura 2. Elementos principales de control de la prensa hidráulica. Fuente: elaboración propia.

3. Resultados

En la Figura 3 se muestra el conjunto de placas obtenidas en función de los trece tratamientos experimentales definidos por el DdE.

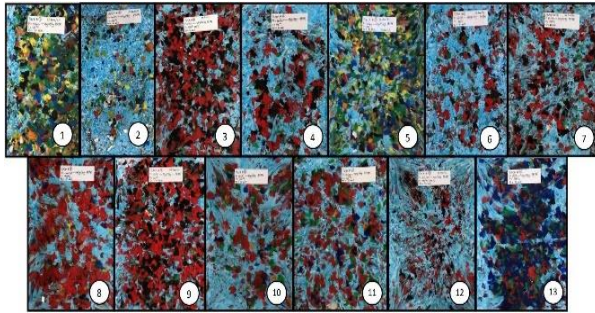


Figura 3. Secuencia de placas fabricadas mediante una mezcla de polímeros provenientes de mascarillas y tapas de botellas recicladas. Fuente: elaboración propia.

En la Figura 4 se muestra, de izquierda a derecha, una de las probetas mecanizada partiendo de una de las placas obtenidas por prensado en caliente, su montaje en la máquina de ensayo a tensión, y su ensayo hasta la falla durante la ejecución de la prueba mecánica.



Figura 4. Probeta de ensayo, instalación de prueba mecánica a tensión y falla del material (de izquierda a derecha). Fuente: elaboración propia.

Los resultados para el esfuerzo máximo, de las tres réplicas realizadas por cada tipo de tratamiento experimental, es mostrado en la Figura 5. Se observa una mayor resistencia promedio en la "Placa #13" o "P13" (6,15 MPa) y la "P9" (5,87 MPa), las cuales utilizaron la misma temperatura de calentamiento (180°C) en su proceso de fabricación. Por otra parte, las muestras "P12" (1,94 MPa) y "P11" (2,35 MPa) experimentaron la menor resistencia máxima a tensión.

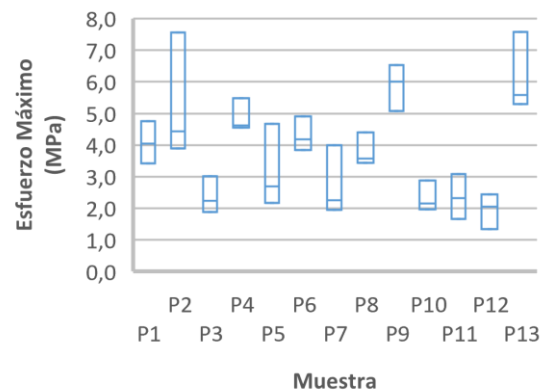


Figura 5. Resultados para el esfuerzo máximo para los distintos tratamientos experimentales. Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 6 se muestran los resultados de deformación a carga máxima obtenidas al finalizar el ensayo. La mayor deformación promedio fue obtenida en la muestra "P1" (3,89%) y el menor resultado se encontró en la muestra "P4". Cabe destacar que las probetas "P1" (4,07 MPa) y "P4" (4,89 MPa) presentaron una respuesta de esfuerzo superior al promedio de todas las muestras evaluadas (3,79 MPa).

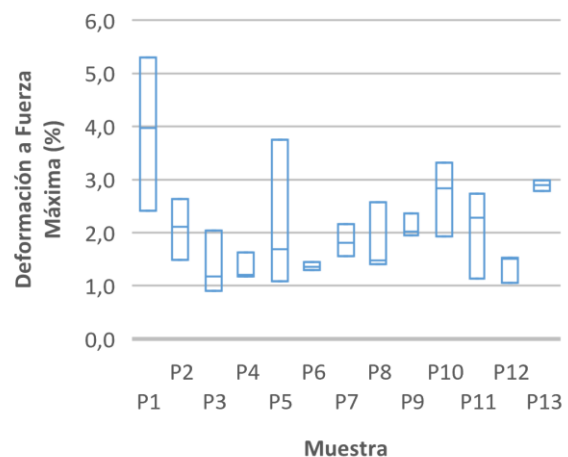


Figura 6. Resultados de deformación a carga máxima. Fuente: elaboración propia.

Con relación al módulo de elasticidad se observa que la muestra "P4" presenta la mejor respuesta (399,4 MPa) y la muestra "P10" la menor rigidez (118,8 MPa). En la Figura 7 se muestran los valores obtenidos para el módulo de elasticidad para cada uno de los tratamientos experimentales definidos en esta investigación. Por otro lado, la mayor tenacidad obtenida mediante el ensayo de tensión aparece para las muestras "P1" y "P13" (0,21 MJ/m³ y 0,26 MJ/m³ respectivamente) y la peor respuesta se presentó para las muestras "P3" y "P12" (ambas con 0,03 MJ/m³). Lo anterior es consistente con los resultados obtenidos para esfuerzos y deformaciones máximas. En la Figura 8 se muestran los resultados para la tenacidad

del material obtenido de acuerdo con los distintos tratamientos experimentales.

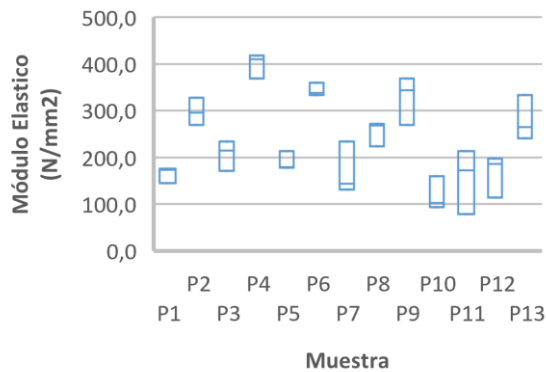


Figura 7. Resultados obtenidos para el módulo elástico. Fuente: elaboración propia.

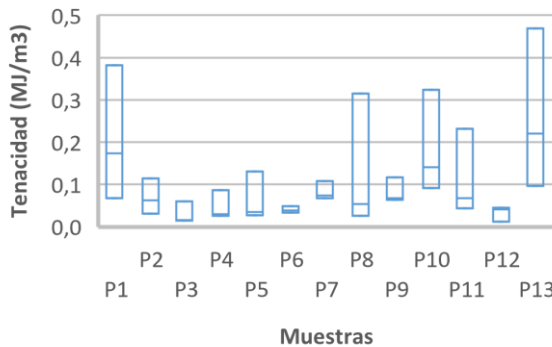


Figura 8. Resultados obtenidos para la tenacidad. Fuente: elaboración propia.

Al analizar las muestras ensayadas en su zona de falla y comparar estos resultados con el nivel de porosidad en el corte lateral y las gráficas individuales de cada ensayo, se pudo evidenciar que las muestras presentan un comportamiento elástico continuo en la parte inicial del ensayo, pero a medida que la carga supera la resistencia de unión en la interface entre los dos tipos de polímeros (PP y PE), se comienza a generar una falla de tipo frágil o fragmentada en la zona de comportamiento plástico (dependiendo del porcentaje de cada mezcla). Por ejemplo, en la Figura 9 se muestra el resultado de las tres probetas del grupo de ensayo "P4", con un tipo de comportamiento frágil o de falla semi instantánea en la zona plástica. Este comportamiento se evidenció incluso para un tiempo de permanencia medio en el molde de prensado de 15 minutos. También, en esta figura se puede apreciar que entre las muestras se presentan un valor similar del módulo elástico (valor promedio de 280,0 MPa con una desviación estándar de 26,5 MPa), lo cual puede suponer un buen nivel de homogeneidad para el

rango de temperatura aplicada en el proceso de obtención de la madera plástica.

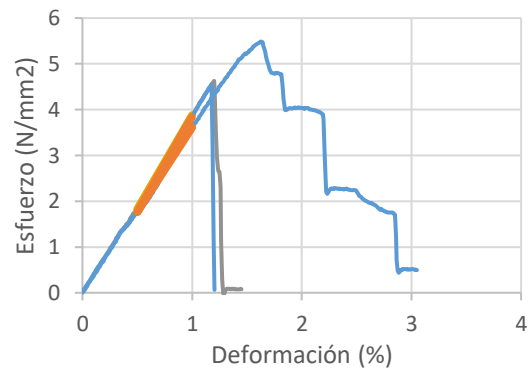


Figura 9. Curva esfuerzo-deformación de la muestra "P4". Fuente: elaboración propia.

Al revisar los defectos superficiales de las muestras del grupo "P4", se encuentran poros de relativo gran tamaño. Lo cual puede ser apreciado en la Figura 10, la cual ha sido tomada en la zona de falla transversal de las probetas.

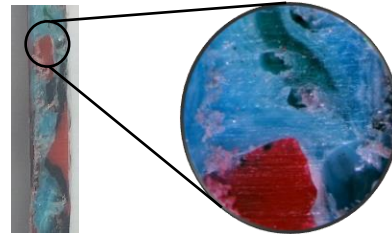


Figura 10. Zona cercana a la falla final de las muestras "P4". Fuente: elaboración propia.

En contraste, en la Figura 11, se muestra el efecto causado sobre el grupo de muestras "P1", donde se evidencia una mayor extensión en la zona plástica del material durante el ensayo a tensión (especialmente en dos de las probetas), generando un comportamiento más homogéneo, y por lo tanto un mayor porcentaje de deformación (con un promedio de 3,89%) y menor módulo elástico (con una media de 164,52 MPa y una desviación estándar de 17,25 MPa), destacando que el porcentaje del módulo elástico entre las tres probetas de este grupo difieren en un mayor porcentaje (10,48%) respecto al grupo "P4", donde se observa una diferencia de 6,63%.

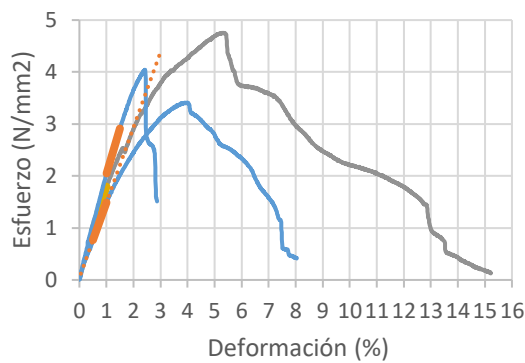


Figura 11. Curva esfuerzo-deformación de la muestra "P1". Fuente: elaboración propia.

En la Figura 12 se muestra la periferia de la zona de falla de las muestras "P1", en donde se aprecia la presencia de porosidad, pero de un menor tamaño que el obtenido con el grupo de probetas "P4".

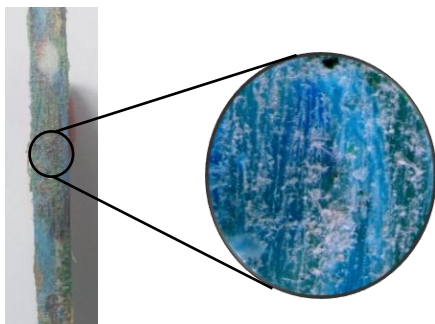


Figura 12. Zona aledaña a la falla de las muestras "P1". Fuente: elaboración propia.

Respecto a las pruebas de absorción de humedad se encontró que en general las probetas no presentaban una alta filtración de la humedad por las superficies lisas, pero sí por las zonas de alta porosidad. El valor promedio de absorción de humedad fue de 1,66% (con una desviación estándar de 0,012%), tomando como referencia el peso de la probeta.

Finalmente, utilizando el DdE propuesto de Box-Behnken se obtuvieron modelos de comportamiento de las respuestas experimentales en función de los tres factores experimentales, proporción entre ambos polímeros, temperatura y duración del proceso de prensado en caliente. Se alcanzaron modelos estadísticos empíricos con un buen ajuste para las variables de respuesta resistencia máxima a tensión y el módulo de elasticidad. Para las demás propiedades mecánicas estudiadas no fue posible ajustar satisfactoriamente un modelo estadístico.

En la Tabla 3 se presentan los resultados ANOVA para el esfuerzo máximo (con un nivel de confianza del 95% comprobado con un estudio Durbin-Watson),

encontrando una alta incidencia de la proporción de los polímeros en la mezcla y la temperatura. También, se aprecia una influencia significativa de la duración del proceso de prensado, teniendo este factor una incidencia cuadrática en el modelo de regresión.

Tabla 3. Resultados ANOVA para la respuesta esfuerzo máximo a tensión.

Análisis de varianza para el esfuerzo máximo a tensión			
Fuente	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
Prop	13,280	8,50	0,0268
T	13,756	8,81	0,0250
DP	8,8586	5,67	0,0546
Prop ²	7,1789	4,60	0,0757
Prop*T	1,2442	0,80	0,4064
Prop*DP	0,002914	0,00	0,9669
T ²	15,645	10,02	0,0194
T*DP	7,3665	4,72	0,0729
DP ²	37,531	24,03	0,0027
Bloques	0,34551	0,22	0,8078
Falta de ajuste	0,92549	0,59	0,8375
Error puro	1,5616		

Siendo:

Prop: Proporción PP: HDPE entre los polímeros [adim.]

T: Temperatura del proceso de prensado en caliente [°C].

DP: Duración del proceso de prensado en caliente [min].

La variabilidad del esfuerzo máximo en función de los factores independientes se explica en un 74,2% a través del modelo de regresión obtenido, partiendo del valor obtenido para R-cuadrado; además se tiene que la desviación estándar de los residuos fue 1,25 MPa y el error medio absoluto fue 0,71 MPa. En la Figura 13 se muestra el gráfico de efectos principales para el esfuerzo máximo a tensión.

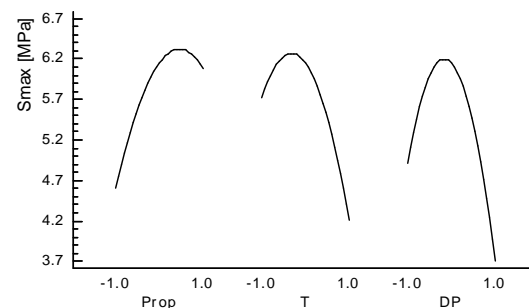


Figura 13. Gráfica de efectos principales para el esfuerzo máximo a tensión. Fuente: elaboración propia.

A continuación, se muestra el modelo de regresión, según las variables indicadas anteriormente como estadísticamente significativas (ecuación 1). Los

factores experimentales se encuentran codificados en la expresión.

$$S_{max} = 6,15 + 0,744Prop - 0,757T - 1,188T^2 - 1,841 DP^2 \quad (\text{Ec. 1})$$

Donde:

S_{max} : Esfuerzo máximo a tensión de la madera plástica (MPa).

En la Figura 14 se puede apreciar la superficie de respuesta para el esfuerzo máximo a tensión en función de la proporción de los polímeros utilizados en la mezcla y la temperatura del proceso de prensado, mientras la duración del proceso es fijada en su nivel central.

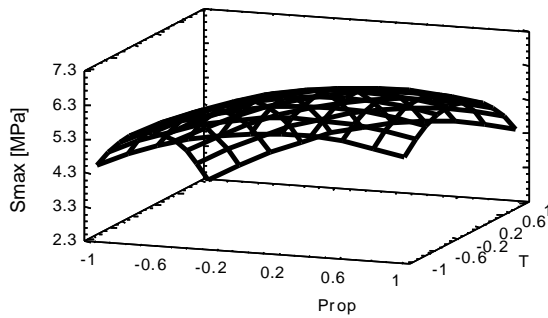


Figura 14. Superficie de respuesta para el esfuerzo máximo a tensión. Fuente: elaboración propia.

En la Tabla 4 aparecen los resultados de ANOVA para la respuesta del módulo elástico, donde destaca una alta significación del factor de proporción entre los polímeros de la mezcla y el tiempo de permanencia del material en el proceso de prensado en caliente, también se encuentra un efecto diferenciador en la interacción entre dicho tiempo de permanencia y la temperatura del proceso.

Tabla 4. Resultados ANOVA para el módulo de elasticidad.

Análisis de varianza para el módulo de elasticidad			
Fuente	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
Prop	119677	52,65	0,0003
T	1078,7	0,47	0,5166
DP	20672,4	9,09	0,0235
Prop ²	3406,21	1,50	0,2668
Prop*T	2653,11	1,17	0,3215
Prop*DP	3550,77	1,56	0,2579
T ²	10271,7	4,52	0,0777
T*DP	36217,5	15,93	0,0072
DP ²	36954,0	16,26	0,0069
Bloques	846,897	0,37	0,7039
Falta de ajuste	3008,2	1,32	0,3894
Error puro	2273,16		

La variabilidad del módulo de elasticidad en función de los factores independientes se explica en un 71,4%

a través del modelo de regresión obtenido, partiendo del valor obtenido para R-cuadrado; además se tiene que la desviación estándar de los residuos fue 47,7 MPa y el error medio absoluto fue 38,2 MPa. En la Figura 15 se muestra el gráfico de efectos principales para el módulo de elasticidad.

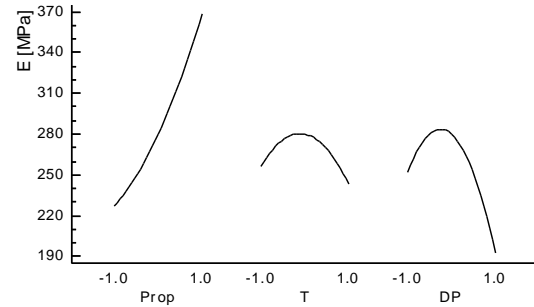


Figura 15. Gráfica de efectos principales para el esfuerzo máximo a tensión. Fuente: elaboración propia.

A continuación, se muestra el modelo de regresión de las variables que influyen en la magnitud del módulo elástico (ecuación 2). Los factores experimentales se encuentran codificados en la expresión.

$$E = 280,0 + 70,61Prop - 30,45T^2 - 29,35DP - 57,76DP^2 + 54,94 T \cdot DP \quad (\text{Ec. 2})$$

Donde:

E: Módulo de elasticidad de la madera plástica (MPa).

En la Figura 16 se puede apreciar la superficie de respuesta para el módulo de elasticidad en función de la proporción de polímeros en la mezcla y la duración del proceso de prensado, mientras la temperatura es fijada en su nivel central.

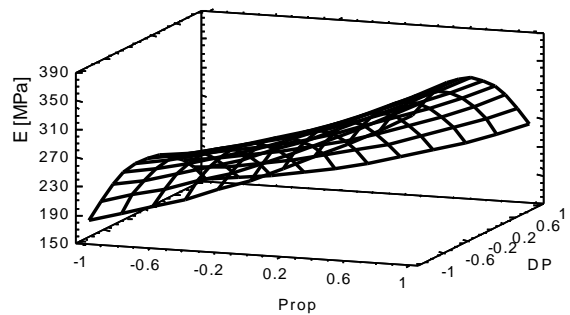


Figura 16. Superficie de respuesta para el módulo de elasticidad. Fuente: elaboración propia.

4. Discusión de Resultados

De la mezcla de materiales termoplásticos como polipropileno y polietileno se obtiene piezas con una cohesión adecuada. Lo anterior fue posible

principalmente producto a que ambos polímeros hacen parte de la misma familia de las poliolefinas, por lo que existe una sinergia molecular entre estas dos especies, y también a la selección apropiada de los parámetros del proceso. Por lo anterior, se alcanza a fabricar placas que cuentan con una resistencia máxima a tensión que varía en el rango entre 1,94 y 6,15 MPa. A pesar de que la resistencia de los componentes puros y en estado virgen es mayor, con magnitudes usualmente entre 11 y 15 MPa, los valores obtenidos son aceptables para aplicaciones de productos plásticos de baja y moderada exigencia mecánica. Para mejorar la resistencia de la mezcla a valores de los componentes puros, se recomienda que haya una homogenización previa de los componentes, donde exista un proceso incluso de mezclado en caliente y de peletizado, con el fin de asegurar una cohesión mayor entre componentes incluso con diferentes puntos de fusión. Además, se podría contemplar el uso de aditivos que mejoren las propiedades mecánicas y físicas del material polimérico.

También resulta importante resaltar que el módulo de Young o módulo de elasticidad varió entre 118,8 a 399,4 MPa y la tenacidad entre valores de 0,03 a 0,26 MJ/m³. Las muestras que mostraron un módulo de elasticidad mayor y por lo tanto mayor rigidez, fueron aquellas con mayor concentración de polipropileno y mayor temperatura de operación. Por ende, estas mismas muestras (tratamientos) fueron las que mostraron menor deformación gracias a la poca facilidad con la que cuentan las cadenas para elongar bajo este escenario. A su vez, la muestra que presentó el menor módulo elástico sufrió una deformación importante.

De la Figura 13, se infiere que el esfuerzo máximo a tensión es directamente proporcional a la cantidad relativa de polipropileno presente en la mezcla e inversamente proporcional al incremento de la temperatura y el tiempo de duración del proceso de prensado. Luego, el polipropileno resulta ser un material de interés en mezclas de poliolefinas termoplásticas, brindando una mayor resistencia a la mezcla, en consecuencia, mayor resistencia a las piezas procesadas; aunque se señala que operar a temperaturas y tiempos de moldeo elevados no resulta del todo adecuado.

Por último, este tipo de mezcla de materiales poliméricos no cuenta con una afinidad elevada a soluciones acuosas, es decir cuentan con un factor hidrofóbico pobre, lo cual se puede corroborar con los resultados obtenidos, ya que en promedio el porcentaje de absorción de agua en peso fue del 1,66% y nunca superó el 4,32%. En los casos que existió un porcentaje más elevado de absorción de humedad, se presume que fue en consecuencia de la

porosidad de las piezas. Lo anterior es un resultado favorable, debido a que no se desea que piezas procesadas a partir de esta mezcla cuenten con una degradación mayor, un mayor desgaste o incluso procesos oxidativos por presencia de fracciones de agua en la estructura.

5. Conclusiones

En la investigación se ha implementado un proceso de prensado en caliente de bajo costo para la transformación de materias primas plásticas recicladas, provenientes principalmente de tapas de envases y mascarillas de amplio uso bajo la emergencia de COVID-19, en espacios tanto hospitalarios como no hospitalarios, obteniendo láminas que pueden usarse para la fabricación de estructuras, por ejemplo, las típicamente utilizadas en la industria de mobiliario modular.

Los ensayos mecánicos realizados, junto con la inspección visual superficial de las láminas y los ensayos de absorción de humedad y dimensionales, son algunas de las pruebas de verificación mínimas que se deben considerar en el momento de analizar este tipo de productos basados en materiales reciclados. Aunque, se resalta que la posibilidad de contar con un proceso de mezcla y peletizado previo al presando en caliente, hubiera garantizado contar con placas mucho más homogéneas y por lo tanto también probetas más homogéneas, lo cual se hubiera reflejado seguramente en valores de resistencia máxima a la tracción y una rigidez mayores del material polimérico.

Los tres factores experimentales bajo estudio resultaron estadísticamente significativos tanto para la resistencia mecánica máxima como para el módulo de elasticidad de la madera plástica. Dentro del espacio experimental se alcanza un módulo elástico óptimo de 399,4 MPa y una resistencia mecánica máxima de 5,87 MPa. Además de presentar una buena estabilidad dimensional, con una variación promedio de solo 2,34%. Por otro lado, el porcentaje de absorción de agua se mantuvo en promedio en 1,66% y nunca superó el 4,32% (peor comportamiento). Estos resultados resultan novedosos y relevantes para la fabricación de productos sostenibles de madera plástica basados en los materiales de desechos utilizados en el presente estudio, como lo son las mascarillas quirúrgicas.

Por último, se valida la factibilidad de utilizar fibras de tapabocas fabricadas a partir de resina de polipropileno en procesos de reciclaje, asumiendo que estas serían sometidas previamente a procesos de control efectivo de potenciales patógenos que residan

en ellas, los cuales garantizan que no representan un riesgo biológico. Adicionalmente, se confirma la funcionalidad de la mezcla de estas fibras con fracciones de polietileno de alta densidad, al ser componentes con una sinergia importante entre sí, se consigue obtener piezas con propiedades mecánicas y físicas adecuadas para la fabricación de productos donde se requieran exigencias mecánicas de un nivel bajo o moderado.

6. Referencias

[1] H. Du: "Environmental risks of polymer materials from disposable face masks linked to the COVID-19 pandemic", *Science of The Total Environment*, vol. 815, 2022.

[2] El uso exagerado del plástico durante la pandemia de COVID-19 afecta a los más vulnerables, 2021, Disponible en: <https://news.un.org/es/story/2021/03/1490302>

[3] H.B. Sharma: "Challenges, opportunities, and innovations for effective solid waste management during and post COVID-19 pandemic". *Resources, Conservation and Recycling* vol. 162, 2020.

[4] S. Kim: "Recycling respirator masks to a high-value product: From COVID-19 prevention to highly efficient battery separator". *Chemical Engineering Journal*. 430, (2022).

[5] T. Osswald, G. Menges: "Ciencia de polímeros para ingenieros". Hanser publications. pp. 56-61 y 585- 588, 2010.

[6] ASTM. D638-17: "Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics", 2017.

[7] ASTM. D570-98: "Standard Test Method for Water Absorption of Plastics", 1998.