

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ

FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA



PUCP

**ESTADO DE LA TECNOLOGÍA DEL PROCESO DE MOLDEO
ROTACIONAL DE POLÍMEROS REFORZADOS CON
FIBRAS NATURALES**

**Trabajo de investigación para la obtención del grado de
BACHILLER EN CIENCIAS CON MENCIÓN EN
INGENIERIA MECÁNICA**

AUTOR

Ademir Alejandro Vilcayauri Rios

ASESOR:

Dr. Ing. Julio Arnaldo Acosta Sullcahuamán

Lima, diciembre, 2020

Resumen

El moldeo rotacional de polímeros es un proceso seleccionado únicamente con el objetivo de fabricar objetos huecos, mediante la rotación de un molde dentro de un horno. La aparente simplicidad del proceso no incentivó la investigación ni su desarrollo. En los últimos 20 años se ha perfeccionado este proceso y sus productos, asimismo se ha ampliado la diversidad de materiales que pueden ser empleados como materia prima. Con el fin de reducir costos y tener buenas propiedades mecánicas en los productos, se fabricaron materiales compuestos reforzados con fibras naturales tales como: sisal, linaza, hoja de plátano, cáscara de arroz, salvado de trigo, agave, coco, abacá y madera, entre otras. Los investigadores estudiaron el sinterizado de diferentes matrices y fibras natural, así como el tratamiento químico del refuerzo y determinaron los parámetros de fabricación para obtener el mejor comportamiento mecánico.

El objetivo del presente trabajo de investigación es realizar una revisión sobre el estado de la tecnología del proceso de moldeo rotacional de materiales compuestos de matriz polimérica reforzados con fibras naturales.

En esta perspectiva, para todas las investigaciones exploradas, inicialmente se revisó acerca de los constituyentes empleados, así como la preparación y el tratamiento químico al que fueron sometidos. Luego, se identificó las condiciones de fabricación y los parámetros de moldeo: velocidades de giro de los ejes, temperaturas del horno, tiempos de calentamiento y enfriamiento. A continuación, se abordaron los diseños experimentales utilizados. Se presentaron los ensayos, las normas y las maquinas utilizadas. Finalmente, se realizó una comparación de las propiedades de los materiales resultantes.

Como resultado de este trabajo se ha concluido que las muestras óptimas se encuentran en el rango de 10% y 20% en peso de refuerzo, ya que con cantidades mayores a 20% de fibras no se genera una buena adhesión entre matriz y refuerzo. Se alcanzaron incrementos en el módulo elástico fue de hasta 25% respecto a la matriz e incluso de hasta 56% cuando se trata químicamente el refuerzo. Sin embargo, la reducción de la resistencia a la tracción y a la flexión pertenecen al rango de 3% a 26% y de hasta 75%, en el caso de la energía absorbida al impacto; en todos los casos, el incremento por tratamiento químico es bajo o nulo. Para obtener una muestra con alto contenido de refuerzo, con el propósito de mejorar considerablemente sus propiedades, es necesario recurrir a un tratamiento químico; pero en muestras con cantidades menores a 20% de refuerzo, dicho tratamiento no brinda beneficios y solo representa un gasto económico.

Tabla de contenido

Introducción	1
Capítulo 1. Fundamentos Teóricos.....	3
1.1. Moldeo rotacional	3
1.1.1. Etapas del proceso.....	6
1.1.2. Equipos de moldeo rotacional.....	7
1.1.3. Variables del proceso	12
1.1.4. Sinterizado del material	14
1.2. Materiales utilizados en moldeo rotacional	16
Capítulo 2. Moldeo rotacional de polímeros reforzados con fibras naturales	18
2.1. Materiales.....	21
2.2. Equipos y procedimientos.....	29
2.3. Diseños experimentales	33
2.4. Ensayos de caracterización	37
Capítulo 3. Resultados de las investigaciones sobre polímeros reforzados con fibras naturales.....	42
3.1. Inspección visual, estereoscopia y SEM.....	42
3.2. Ensayos de tracción.....	51
3.3. Ensayo de flexión.....	60
3.4. Ensayos de impacto.....	66
3.5. Ensayo de dureza	71
3.6. Ensayos de compresión.....	73
3.7. Absorción de humedad	73
Conclusiones	75
Recomendaciones	77
Bibliografía	78
Anexos	81

Índice de Figuras

Figura 1 Productos fabricados por moldeo rotacional.	4
Figura 2 Esquema de los pasos del moldeo rotacional.	6
Figura 3 Arreglo de (a) brazo recto y (b) de brazo acodado.	7
Figura 4 Esquema de funcionamiento de la maquina Rock and Roll	8
Figura 5 Máquina tipo Rock and Roll.....	8
Figura 6 Esquema de maquina carrusel (a) de 3 brazos y (b) de cuatro brazos.....	9
Figura 7 Máquina tipo carrusel.	10
Figura 8 Esquema de maquina en línea o <i>Shuttle</i>	10
Figura 9 Máquina tipo Shuttle.	11
Figura 10 Temperatura de fusión de algunos polimeros.....	13
Figura 11 Perfil tipico de temperatura durante el proceso de moldeo rotacional	14
Figura 12 Esquema de la densificación de partículas de polietileno copolímero de baja cristalinidad.....	16
Figura 13 Muestras de material compuesto fabricadas por moldeo rotacional con matriz de LLDPE y 10% de (a) lino, (b) arce y (c) cáñamo	17
Figura 14 (a) tapas de HDPE recuperado y (b) HDPE pulverizado	25
Figura 15 (a) Las fibras de sisal sobresalen de la superficie y (b) orientación y dispersión de fibras en moldeo rotacional.....	43
Figura 16 (a) Probeta moldeada de una sola capa y fibras sobresalientes hacia la parte interna y (b) doble capa moldeada con buena distribución de fibras.....	43
Figura 17 (a) Micrografía de la superficie exterior de la pieza roto moldeada donde se muestra buena dispersión de las fibras (15x) y (b) micrografía evidenciando burbujas en la superficie exterior de la muestra fabricada por moldeo rotacional (15x).	43
Figura 18 Secuencia de sinterizado de dos partículas de polímero y una fibra de sisal (25x).44	44
Figura 19 Sinterizado del conjunto de partículas de polímero y 2 fibras de sisal. (10x).....	44
Figura 20 Amplificación del sintetizado de muchas partículas y fibras de sisal. (40x).....	44
Figura 21 Moldes fabricados con fibras de linaza y BMC rechazados.....	45
Figura 22 Muestras fabricadas con partículas de madera de pino entre 150- 500 micras. Se indica el porcentaje de madera de la superficie (a) interna y (b) externa.	46
Figura 23 (a) Magnificación de las esquinas y (b) sus respectivas muestras.....	46
Figura 24 SEM de las muestras sin tratamiento (a) S20L75U y (b) S20L75T, con tratamiento (c) S20M75U y (d) S20M75T.....	47
Figura 25 Muestras de (a) material espumado y (b) reforzado con madera de arce	48
Figura 26 SEM de las muestras de (a) LLDPE, (b) LLDPE/ 0,1% de agente espumante y (c) LLDPE/ 0,1% agente espumante/20% de madera de arce.....	48

Figura 27 Superficie externa e interna del compuesto de 15% de fibras de agave fabricado a (a y c) 260°C, 20min y (b y d) 350°C y 15 min.....	49
Figura 28 Muestras fabricadas con refuerzo de salvado de trigo.....	50
Figura 29 Módulo de elasticidad para el compuesto fabricado de LMDPE con (a) fibras de sisal y (b) fibras de madera.	51
Figura 30 Módulo elástico de las muestras con 15% de refuerzo en función del tamaño de partículas de madera de pino.....	52
Figura 31 Módulo de elasticidad de los compuestos con espumas y madera de arce.	54
Figura 32 Resistencia a la tracción de los compuestos con espumas y madera de arce.	55
Figura 33 Módulo de elasticidad de los diferentes materiales usados por Arribasplata.	55
Figura 34 Resistencia a la tracción del compuesto de LMDPE y fibras de agave. Incremento en la resistencia de las muestras con fibras tratadas con NaOH y MAPE.	57
Figura 35 (a) Módulo de elasticidad y (b) resistencia a la tracción de del material compuesto fabricado con fibras de agave, coco y pino.....	58
Figura 36 (a) Módulo y (b) resistencia a la flexión según la concentración de fibras de agave y sus tamaños.	63
Figura 37 Comparación entre los resultados del ensayo de flexión del material compuesto reforzado con: agave, coco y pino.	64
Figura 38 Energía de impacto del compuesto de LMDPE – fibras de sisal (◆) y LMDPE – fibras de madera (■).	67
Figura 39 Energía de impacto absorbida por el material compuesto de (a) López-Bañuelos et al. Y (b) Cisneros-López et al.	69
Figura 40 Comparación entre los resultados del ensayo de impacto en las muestras fabricadas por moldeo rotacional y por compresión.	70
Figura 41 Comparación de los resultados del ensayo Charpy del material compuesto reforzado con fibras de agave, coco y pino.....	71
Figura 42 Comparación de dureza del material compuesto reforzado con fibras de agave, coco y pino.....	72
Figura 43 Absorción de agua para diferentes matrices termoplásticas con 10% de fibras.....	74
 Anexo A: Sinterizado y densificado de partículas	
Figura A 1 Sinterizado y densificación de polietileno copolímero.....	81
 Anexo C: Resultados	
Figura C 1 (a) Módulo de elasticidad y (b) Resistencia a la tracción según el tamaño de fibras de agave y su porcentaje en la muestra.	86
Figura C 2 (a) Módulo y (b) Resistencia del ensayo de flexion realizado por Cisneros-López et al. (2016).	87

Índice de tablas

Tabla 1 Razones de velocidad recomendados por McNeill Akron Co	12
Tabla 2 Resumen sobre los materiales compuestos fabricados con fibras naturales	28
Tabla 3 Resumen de equipos y parámetros.....	32
Tabla 4 Ensayos, normas y equipos utilizados según los autores.....	38
Tabla 5 Densidad y tamaño de burbujas de las muestras fabricadas por rotomoldeo.	50
Tabla 6 Resistencia a la tracción y Módulo de elasticidad de las muestras en buenas condiciones de Panigrahi.	59
Tabla 7 Resistencia a la flexión y módulo de las muestras elaboradas por Panigrahi.....	65
Tabla 8 Máxima fuerza obtenida en el ensayo de compresión.	73
Tabla 9 Variación de peso medida luego del proceso de moldeo.....	74
 Anexo B: Diseños experimentales	
Tabla B 1 Matriz experimental de McDowell et al.....	82
Tabla B 2 Matriz experimental de Wang et al.	82
Tabla B 3 Composición de las muestras en la experimentación de Panigrahi.....	83
Tabla B 4 Tamaños de partículas y códigos usados por Ward-Perron y Rodrigue	83
Tabla B 5 Diferentes formulaciones preparadas por moldeo rotacional para los ensayos de Ortega et al.....	84
 Anexo C: Resultados	
Tabla C 1 Resultados de la caracterización de muestras de LMDPE y fibras de pino.....	85
Tabla C 2 Resultados de caracterización de PE y fibras de abacá y plátano	86
Tabla C 3 Resultados de caracterización de LMDPE y partículas de arce	86
 Anexo D: Clasificación de las investigaciones según los ensayos y materiales	
Tabla D 1 Agrupamientos de los trabajos según el ensayo de caracterización, el tipo de refuerzo y la matriz.	88
Tabla D 2 Resultados del ensayo de tracción de las muestras óptimas de cada autor.....	91
Tabla D 3 Resultados del ensayo de flexión de las muestras óptimas de cada autor.	92
Tabla D 4 Resultados del ensayo de impacto de las muestras óptimas de cada autor.....	93

Introducción

Los procesos de moldeo de plásticos son diversos. Entre ellos se tiene el moldeo por compresión, rotacional, soplado, inyección, entre otros. El moldeo rotacional es un proceso seleccionado para el conformado de polímeros con el objetivo de fabricar objetos huecos a partir de materia prima pulverizada como pelotas, tanques, juguetes, muebles, etc. Esto se obtiene gracias a la rotación del molde sobre dos ejes perpendiculares, dentro de un horno. No se ejerce presión en el molde y solo se obtiene las piezas por el movimiento lento.

En los inicios de este proceso no se tenía un alto interés en este tipo de moldeo por considerarlo simple, en comparación con otros. Fue dejado de lado debido a que otros procesos fueron mejorando gracias al avance tecnológico, como el moldeo por compresión o inyección. Esto atrajo a los investigadores y empresas permitiendo que se difunda más esos tipos de moldeo; sin embargo, las últimas décadas ha cambiado la idea de simplicidad del moldeo rotacional y ha despertado interés en perfeccionar ese proceso y los productos que se pueden obtener (Torres y Aguirre, 2003).

La variedad de materiales utilizados se ha incrementado en las últimas dos décadas. Entre los polímeros óptimos para el moldeo rotacional se encuentra el polietileno, PVC, PA, ABS, PC, HIPS, PP, EVA, entre otros (Beltrán & Mancilla, 2012). Entre las investigaciones recientes se busca mejorar las propiedades mecánicas al incorporar fibras naturales. Los materiales compuestos con matriz polimérica y refuerzo son una alternativa para mejorar las propiedades de un producto. Con el fin de reutilizar, reducir costos para las empresas, contribuir con el cuidado del medio ambiente y mantener buenas propiedades mecánicas de los productos; se busca fabricar materiales compuestos utilizando fibras naturales tales como sisal, madera, linaza, hoja de plátano, cáscara de arroz, salvado de trigo, agave, coco y abacá.

Diversas investigaciones se han llevado a cabo en diferentes países combinando diferente matriz y fibra natural. Los autores prepararon los materiales con diferente procedimiento y en ocasiones usaron un tratamiento químico. Realizaron estudios sobre el sinterizado de estos materiales compuestos fabricados por moldeo rotacional y determinaron los parámetros de fabricación (velocidad de rotación, temperatura y tiempo en el horno, tiempo de enfriamiento, cantidad de refuerzo, tamaño de partículas, etc.). Finalmente realizaron ensayos de caracterización (tracción, flexión, impacto, absorción de agua, etc.) para determinar la muestra con mejor comportamiento mecánico.

Por ello el objetivo de este trabajo de investigación es realizar una revisión sobre el estado de la tecnología del proceso de moldeo rotacional de matriz polimérica reforzados con fibras naturales. Con este fin se han establecido los siguientes objetivos específicos:

- Describir de forma comparativa los distintos objetivos de las investigaciones realizadas sobre los materiales compuestos de matriz polimérica reforzados con fibras naturales.
- Comparar los materiales y los métodos de fabricación utilizados.
- Estudiar el diseño experimental utilizado por cada autor.
- Contrastar los resultados de las investigaciones.

Los capítulos que se presentaran son: Capítulo 1: Fundamentos teóricos, Capítulo 2: Moldeo rotacional de polímeros reforzados con fibras naturales y Capítulo 3: Resultados de las investigaciones sobre polímeros reforzados con fibras naturales.

En el capítulo 1 se describirá el proceso de moldeo rotacional y sus etapas. Luego se presentarán los equipos más comunes en la industria. Así mismo se expondrá las variables de este proceso. Para comprender de mejor manera el comportamiento del material y los eventos que ocurren conforme se produce el moldeo se explicará el sinterizado del material. Finalmente se presentará los materiales que suelen ser usados para este proceso.

En el capítulo 2 se describirán los trabajos que se han realizado con fibras naturales y que han tenido diferentes objetivos. Primero se abordará los materiales, preparación y tratamientos químicos. Posterior a ello se mostrará los equipos utilizados para fabricar las muestras y los parámetros que se mantuvieron constantes. Luego se presentará los diseños experimentales y las variables. Para culminar se identificará los equipos y normas con las que se realizaron los ensayos de caracterización.

En el capítulo 3 se presentarán los resultados obtenidos de los ensayos de caracterización de los trabajos y se realizará una comparación entre los trabajos que usaron los mismos constituyentes.

Capítulo 1. Fundamentos Teóricos

Las formas para procesar los plásticos son diversas. Se entre los más comunes se tiene el moldeo por compresión, rotacional, soplado, inyección, extrusión, laminación, conformado al vacío, calandrado, espumado, entre otros. El tipo de polímero y el proceso de transformación están relacionados. Se depende de la temperatura de fusión del plástico, la estabilidad del material formado y de la geometría o tamaño de la pieza final (Kakani,2004). El proceso que permite obtener piezas de mayor volumen es el moldeo rotacional. Se puede fabricar desde pelotas pequeñas hasta tanques de gran capacidad, por ejemplo: objetos largos de 4,5 toneladas de peso y tanques de 85 000 L (Ebnesajjad, 2015). Con este proceso es posible producir contenedores desde 0.05 L hasta más de 10 000 L (Crawford y Throne, 2002).

1.1. Moldeo rotacional

El moldeo rotacional o rotomoldeo es un proceso para transformar polvo de plásticos en piezas huecas, mediante el calentamiento de un molde en un horno. El calor transferido del horno al molde permite que el plástico se funda. El molde debe moverse para distribuir el plástico fundido en toda su superficie interna. El movimiento rotatorio que posee es biaxial, es decir que se realiza en dos ejes, todo ello para lograr una distribución homogénea. Debido a este particular movimiento en el horno se conoce a este proceso como moldeo rotacional.

El principio de este proceso podría parecer ser la utilización de la fuerza centrífuga para lograr que el plástico tome la forma del molde; sin embargo, esto no así. La diferencia frente a la fundición centrífuga es que la rotación del molde se realiza a bajas velocidades, comúnmente, entre 4 – 20 RMP (Crawford & Throne, 2002).

Entre las características de este proceso, además de la baja velocidad de rotación, se tiene la presión de trabajo cercana a la atmosférica. El calentamiento y enfriamiento del material se realiza en el molde sin necesidad de que se ejerza presión. (Beltrán y Mancilla, 2012). Otro punto distintivo de este proceso es la condición pulverizada de la materia prima. Debido a estas características se obtienen productos libres de tensión o stress, espesores delgados y bajo costo de fabricación (Crawford & Throne, 2002).

Según Nugent (2017), el moldeo rotacional permite la fabricación de una amplia variedad de productos debido a la flexibilidad del proceso y de los diseños de los moldes. Ente las aplicaciones no solo se encuentra la fabricación de simples tanques, sino también aplicaciones de mayor exigencia como la medicina o el área aeroespacial. (p. 321).

Se lista algunas áreas de aplicación de los productos fabricados por moldeo rotacional que fueron identificados por Nugent (2017, p 321).

- Agricultura: tanques de almacenamiento, equipo para pulverizado.
- Vehículos: tanques de combustible, paneles interiores.
- Área eléctrica: cámaras subterráneas.
- Productos marinos: flotadores de muelle, tanques de combustible.
- Juguetes infantiles: toboganes, estructuras para trepar.
- Recreación: juguetes, kayaks, canoas, pelotas, productos para mascotas.
- Transporte: conos, barreras de tráfico, señalizaciones.
- Manejo de materiales: tanque, barriles, tolvas.
- Industriales: tanques de productos químicos, protectores de equipos de la corrosión.

Algunos productos fabricados por moldeo rotacional se muestran en la Figura 1.



Figura 1 Productos fabricados por moldeo rotacional.

Tomado de “Mundo del Rotomoldeo”, por polímeros mexicanos (s.f).

Las ventajas del proceso de moldeo rotacional que fueron identificadas por Crawford y Throne (2002, p.9) son:

- El producto puedes obtenerse en una pieza y sin marcas de uniones.
- El producto final queda libre de tensiones residuales o stress.
- Los moldes son de bajo costo.
- El tiempo de manufactura del molde es corto.
- La producción en pequeñas cantidades en viable.
- No hay desperdicio de material, ya que todo es utilizado para fabricar el producto.
- Es posible fabricar moldes de múltiples capas.

- Con la misma maquina se puede fabricar diferentes productos.
- Facilidad para utilizar insertos en el molde.

Otras ventajas listadas por Nugent (2017, p.323) son:

- La distribución del material en las paredes de todo el molde es uniforme, comparado con otros procesos de moldeo.
- Se pueden tener un muy delgado espesor comparado con el volumen de los productos fabricados.
- El espesor puede ser solo controlado al variar la cantidad de material agregado al molde.
- Es posible obtener productos de diferentes materiales en la misma maquina y al mismo tiempo.
- La variedad de texturas en la superficie que se puede replicar es amplia.
- Los cambios de color que se requieran se pueden hacer con facilidad.

Las desventajas según Crawford y Throne (2002, p.9) son:

- El proceso requiere de un largo tiempo para el moldeo.
- Los materiales que son utilizados para el moldeo son limitados.
- Los costos de la materia prima son altos debido a que debe ser pulverizado y puede requerir de algún aditivo.
- Algunas geometrías en el moldeo son difíciles de conseguir.

Otras desventajas listadas por Nugent (2017, p.323) son:

- La carga y descarga del molde es laboriosa, incluso más para productos de geometría compleja.
- Se requiere de un agente desmoldante.
- Las superficies planas son difíciles de obtener debido al alabeo que puede ocurrir.
- Debido a la formación libre de la parte interna de la pieza fabricada es difícil controlar las dimensiones con precisión como si se puede hacer en otros moldeos.
- El producto se puede deformar durante la etapa de enfriado, lo que vulnera el cuidado en la geometría que se pueda haber tenido durante el proceso.

1.1.1. Etapas del proceso

Como fue descrito anteriormente, este proceso consta de pasos básicos: la carga, el calentamiento y rotación, el enfriamiento y el desmoldeo (Figura 2). Estos serán descritos a continuación.

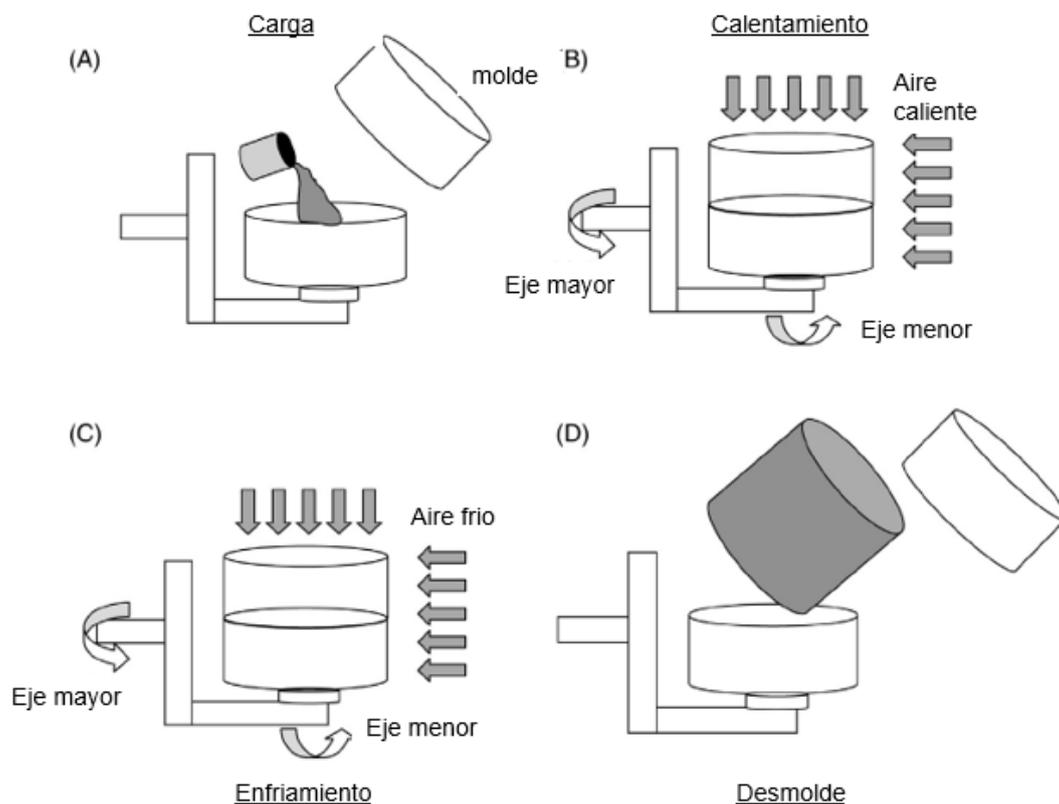


Figura 2 Esquema de los pasos del moldeo rotacional.

Tomado de “*Rotational Moulding*”, por Nugent (2017).

- La carga del molde: se introduce en el molde el polímero, previamente pulverizado. El material particulado debe tener un tamaño comprendido en un rango recomendado. Según Crawford y Throne (2002), con MESH 35 se obtiene una típica distribución de partículas al interior del molde para las máquinas de moldeo rotacional.
- Calentamiento y rotación: el molde se introduce en un horno donde la temperatura alcanza valores picos dependiendo del material con el que se desee trabajar. La rotación del molde se da en dos ejes perpendiculares. La fuerza centrípeta no es lo que influye en el moldeo, ya que la rotación es lenta (Crawford y Throne, 2002).
- Enfriamiento del molde: el polímero se ha distribuido sobre toda la superficie interna del molde. Tiene que enfriar para que solidifique y mantenga su forma.

- Desmolde: durante la reducción de la temperatura el polímero se desprende del molde. Esto permite una extracción segura de la pieza.

1.1.2. Equipos de moldeo rotacional

Para realizar el moldeo rotacional y obtener piezas huecas se requiere que el material polimérico se distribuya por completo al interior del molde. Una buena distribución es generada por la rotación del molde. Las máquinas de moldeo usadas pueden ser de eje recto o acodado (ver Figura 3). La diferencia entre estos tipos de arreglos es dependiente de la relación del número de moldes que se quieren usar, en un mismo ciclo, y el tamaño de la pieza que se quiere moldear. Si la pieza es grande solo se moldearía uno en una maquina con brazo acodado, si la pieza es pequeña se podrían moldear varias piezas en la maquina con brazo recto (Beltrán y Mancilla, 2012).

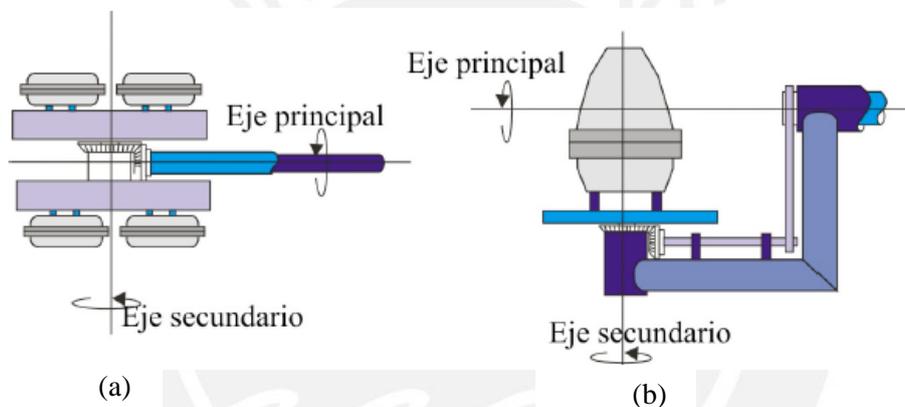


Figura 3 Arreglo de (a) brazo recto y (b) de brazo acodado.

Tomado de “*Tecnología de polímeros*”, por Beltrán y Mancilla (2012).

Además del movimiento rotatorio se requiere que se caliente el molde para fundir la materia prima. Por ello las máquinas de moldeo rotacional suelen tener un horno. Se busca calentar el aire, por ello los hornos suelen realizarlo usando resistencias eléctricas o por combustión de gas, y luego forzar el flujo de aire caliente con un ventilador (Beltrán & Mancilla, 2012).

El uso de una máquina de moldeo depende del tamaño del molde, del peso que se debe soportar el brazo, el diámetro de la esfera que crea la rotación del molde y la cantidad de piezas que se quiera fabricar (Ebnesajjad, 2015). Toda máquina debe disponer de las tres estaciones según el proceso de moldeo rotacional (carga y descarga, calentamiento y enfriamiento) (Nugent, 2017). En búsqueda de la máquina que mejor se adecue a la producción se han diseñado diferentes tipos. Estos se presentan a continuación.

- Máquina Rock and Roll

Esta máquina permite fabricar objetos largos como tanques, botes o kayaks (Rotoline, s.f). Usa un sistema tipo vaivén en un eje, con un ángulo como máximo de 45° (ver Figura 4), mientras que el giro en el otro eje es de 360° (Beltrán y Mancilla, 2012). Según Crawford y Throne (2002), es una máquina de fácil diseño y calentamiento puede ser con flamas producidas por la combustión de gas, directamente, sobre el molde o también se puede usar aire caliente con un horno que cubre el molde y con el cual realizará el movimiento de vaivén (Figura 5). De acuerdo a la investigación de Crawford y Throne (2002), se ha comprobado que la distribución del plástico, para lograr un espesor uniforme, es tan buena como las de las maquinas con rotación completa en los dos ejes.

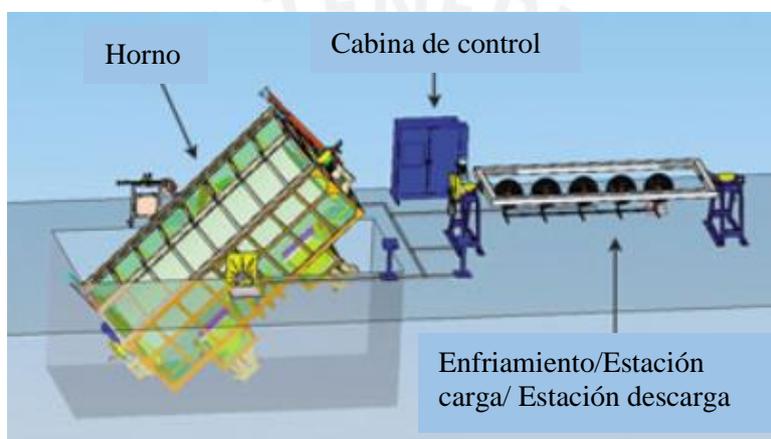


Figura 4 Esquema de funcionamiento de la maquina Rock and Roll

Tomado de “RotoSpeed – Rocking oven Machines”, por FERRY Industries INC (s.f-a).

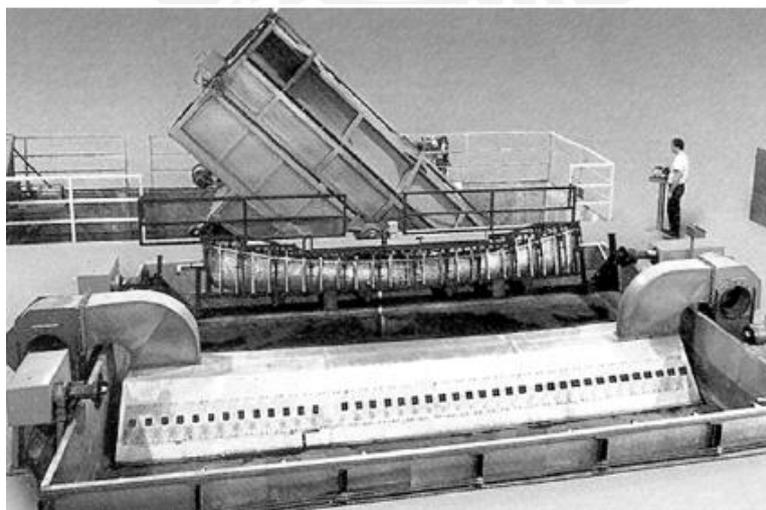


Figura 5 Máquina tipo Rock and Roll.

Tomado de “Rotational molding technology”, por Crawford y Throne (2002).

- Maquina Carrusel

Ebnesajjad (2015) y Beltrán y Mancilla (2012) concuerdan que es la maquina más común para moldeo rotacional. Tiene las tres estaciones (carga - descarga, calentamiento y enfriamiento) separadas. Funciona como un carrusel, ya que un eje central está conectado a varios ejes, o brazos, que tiene a sus extremos los moldes (ver Figura 6 y Figura 7). Cada brazo posee su propio motor para poder controlar su velocidad de forma independiente al eje central. Además, cada brazo siempre se encuentra en una estación (ver Figura 6a) y para cambiar a la siguiente, se requiere realizar un giro de 120° (Ebnesajjad, 2015). La etapa más lenta es la que controla el tiempo de permanencia en cada estación. Si es muy prolongado se puede usar 4 brazos en un arreglo de 90° (ver Figura 6b) y duplicar la estación más lenta, mejorando la productividad (Beltrán y Mancilla, 2012).

Las maquinas tipo carrusel son muy eficientes, altamente productivas y de bajo mantenimiento (Beltrán y Mancilla, 2012). La productividad se puede incrementar si se tiene más de tres brazos, pues se podría colocar más de un brazo por estación (Ebnesajjad, 2015). Con un brazo independiente se mejora la flexibilidad en la producción, ya que se puede mover a otra estación sin perturbar los otros brazos (Nugent, 2017). Realizando esto, se puede alcanzar hasta 20% más en la eficiencia comparada con los otros tipos de máquinas (Rotoline, s.f-a). Se debe tener en cuenta que, para mover el brazo independiente, la siguiente estación debería estar disponible, por ello es que se dice que no es del todo independiente (Nugent, 2017).

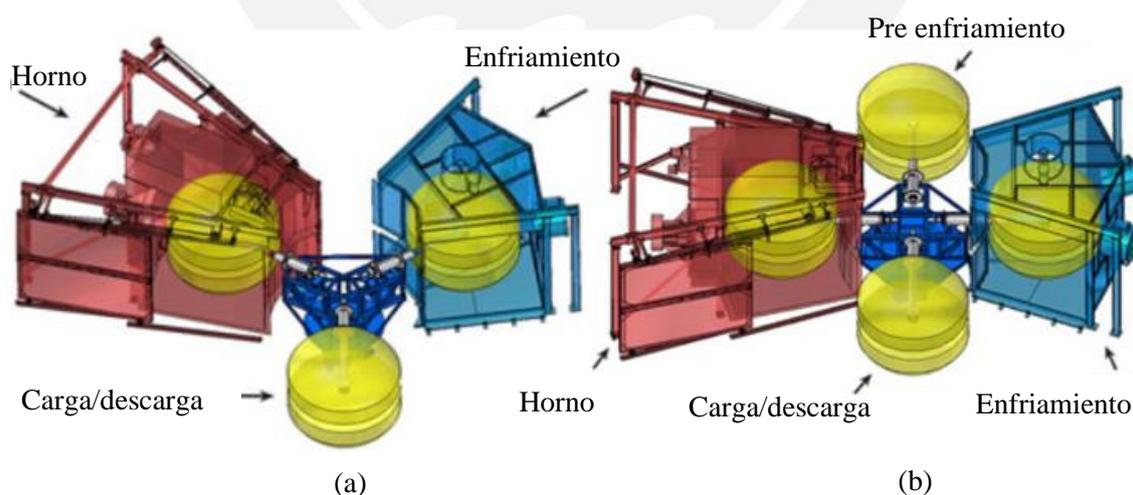


Figura 6 Esquema de maquina carrusel (a) de 3 brazos y (b) de cuatro brazos.

Tomado de "RotoSpeed - Fixed-Arm Turret Machines", por FERRY Industries INC (s.f-b).



Figura 7 Máquina tipo carrusel.

Tomado de “Rotomolding Machine”, por Rising Sun (s.f).

- Máquina en línea o “Shuttle”

Esta máquina trabaja en línea. El horno se encuentra en el centro y a los laterales la estación de enfriamiento y carga (Figura 8). El molde se encuentra situado sobre un carro que posee motores que permiten girar el molde en los dos ejes (Figura 9). Además, se sitúa sobre un riel para facilitar el desplazamiento entre estaciones (Ebnesajjad, 2015). Estas máquinas son ideales para iniciar en el moldeo rotacional, para probar prototipos y para incorporarla o removerla de la maquina carrusel de alta producción (Ferry Industries INC, s.f-c). Según Nugent (2017), con esta máquina se pueden hacer los tanques de grandes tamaños.

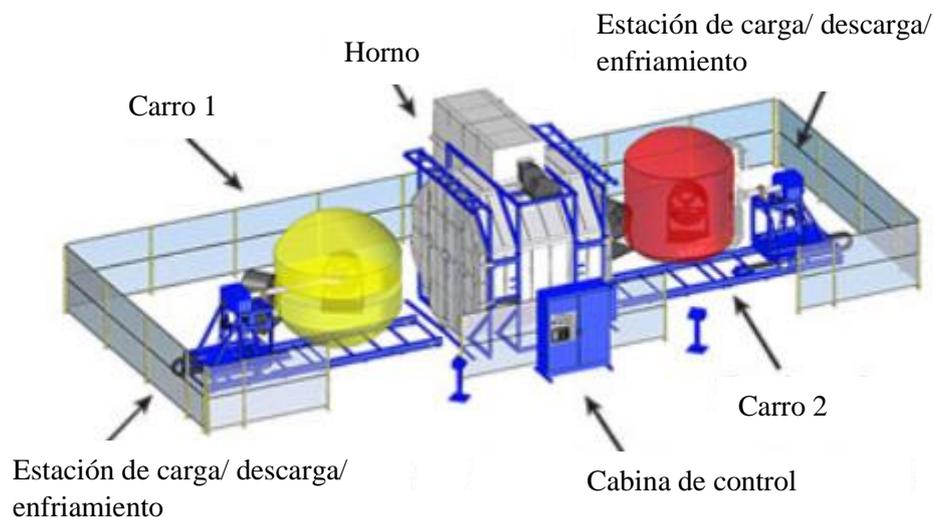


Figura 8 Esquema de maquina en línea o Shuttle.

Tomado de “RotoSpeed – In-Line Shuttle Machines”, por FERRY Industries INC (s.f-c).



Figura 9 Máquina tipo Shuttle.

Tomado de “*Máquinas de rotomoldeo*”, por Rotoline (s.f-b).

- Máquina *Clamshell*

La máquina posee solo un brazo y las tres estaciones que están combinadas, es decir que ocurren en el mismo recinto (Ebnesajjad, 2015). Por ello es conocida por usar espacio limitado (Nugent, 2017). La forma de la apertura y cierre del horno, asemejándose a una almeja, es lo que le da el nombre a esta máquina. El molde está soportado en ambos extremos de uno de los ejes de rotación. Una vez que termine el calentamiento, inicia la siguiente etapa en el mismo lugar; se reduce la temperatura con aire frío o agua pulverizada; se abre la cubierta para retirar el molde y se puede agregar más material para un siguiente ciclo (Crawford y Throne, 2002).

Existen otros tipos de máquinas para moldeo rotacional. La diferencia con las máquinas descritas previamente es la forma en la que producen el calentamiento, ya que dejan de lado el uso de aire caliente. Una de estas es la que dispone de una camisa de aceite, donde se calienta el molde directamente con líquido caliente. Según Crawford y Throne (2002), una de sus ventajas sería su mayor eficiencia, pero se ve limitado a trabajar a temperaturas no tan altas, además se las fugas que suelen ocurrir. Otra máquina es la que posee un sistema de calentamiento eléctrico incorporando cables en el interior del molde no metálico. Entre sus ventajas se tiene un mejor aprovechamiento de la energía; sin embargo, la desventaja sería el prolongado tiempo para completar el ciclo y la reducida posibilidad de realizar cambios en el molde (Crawford y Throne, 2002).

1.1.3. Variables del proceso

Entre los parámetros del proceso que se debe conocer para realizar el moldeo rotacional se encuentra la velocidad de rotación, relacionada al tamaño de la pieza que se va a fabricar; la temperatura del horno, relacionada con la temperatura de fundición del polímero se va a utilizar; el tiempo del molde en el horno y el tamaño de las partículas del material, relacionado con el sinterizado que se da en el molde.

El sistema de rotación es biaxial, donde suele usarse ejes concéntricos. El eje externo es conocido como eje mayor, brazo o principal; mientras que al eje interno se le denomina eje menor, de plato o secundario (Crawford y Throne, 2002). La velocidad registrada, por la máquina de rotomoldeo, para el eje secundario es mayor que la del eje principal. La relación entre las velocidades también es un dato fundamental para el proceso. Según Ebnesajjad (2015), el rango de velocidad usual es 1-20 RPM, el eje mayor puede alcanzar 12 RPM y el eje menor 40 RPM. Otros autores recomiendan una razón entre las velocidades de los ejes para el proceso, como Crawford y Throne (2002) quienes proporcionan una razón de velocidades común de 4:1. La ecuación (1) es la que se utiliza para determinar la razón de velocidades y la Tabla 1 presenta algunas recomendaciones según el tipo de molde que se desee fabricar.

$$\text{Razon de velocidad} = \frac{R1}{R2 - R1} \quad (1)$$

Donde: R1 = Velocidad de rotación del eje mayor (RPM)

R2 = Velocidad de rotación del eje menor (RPM)

Tabla 1 Razones de velocidad recomendados por McNeill Akron Co

Razón de velocidad	Formas
8:1	Tubos oblongos y rectos montados horizontalmente
5:1	Ductos
4:1	Cubos, bolas, cajas rectangulares, formas irregulares 3D
2:1	Anillos, llantas, maniqués, formas planas
1:2	Partes que muestran un adelgazamiento cuando se ejecutan a 2:1
1:3	Rectángulos planos, maletas
1:4	Conductos curvos, ángulos de tubería, partes que muestran un adelgazamiento a 4:1
1:5	Cilindros montados verticalmente

Nota. Tomado de “*Rotational molding technology*”, por Crawford y Throne (2002).

Para Beltrán y Mancilla (2012), la velocidad depende la geometría de la pieza moldeada. “Para geometrías esféricas se recomendó una velocidad de rotación de 12 RPM (para el eje principal) y una relación de rotación de 4:1, mientras que para piezas alargadas (montadas en el molde horizontalmente) la relación que recomiendan los fabricantes es 8:1 (y 1:5 si van montadas verticalmente)” (Beltrán y Mancilla, 2012, p.257).

Para fundir el material se requiere que se supere cierta temperatura con el calor transferido por convección entre el aire calentado en el horno y la superficie del molde. La temperatura mínima a la que se mantendrá el horno de la máquina de moldeo rotacional depende del material que se usará para moldear. En la Figura 10 se muestra diferentes temperaturas de fundido según el polímero.

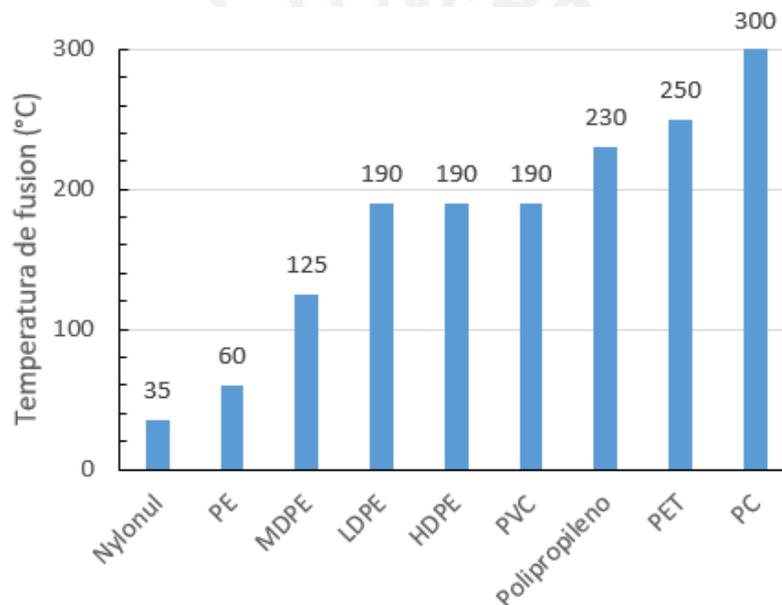


Figura 10 Temperatura de fusión de algunos polimeros.

Modificado de “*The Design and the Process Technology of a Rotational Mold*”, por Pop et al. (2019).

Según Crawford y Throne (2002) un tamaño de partícula común para moldeo rotacional es 35 mesh (500 μm) aunque se pueden usar menores dimensiones. Solo eligieron ese valor porque buscaban un equilibrio entre el costo de molido y las propiedades obtenidas luego del moldeo. En los estudios de Kontopoulou y Vlachopoulou (2001) sobre el fundido y densificado de polvo de polímeros termoplásticos, utilizan partículas de polímeros de 400 μm (menor a 40 mesh) en promedio, a pesar de ello obtuvieron algunas muestras en las que se formaron burbujas. Entre los factores que contribuyeron a esto fue la alta viscosidad de algunos polímeros que usaron.

Es importante el análisis de la viscosidad de los polímeros para el proceso, ya que el plástico fundido debe recorrer toda la superficie del molde y mientras más viscoso sea, más tiempo le tomará desplazarse por toda la superficie interna del molde y facilitará la formación de burbujas. Una característica que indica la magnitud de la viscosidad de un polímero es el índice de fluidez. Según Crawford y Throne (2002), se debería determinar el índice de fluidez del plástico adquirido, a manera de control de calidad, e incluso del polímero que ya fue moldeado, para verificar si existió degradación durante el proceso. Un índice de fluidez alto indica baja viscosidad y peso molecular del material, mientras que un polímero de mayor viscosidad y peso molecular tendrá un índice de fluidez menor (Vlachopoulos y Strutt, 2003). Con una mayor masa molecular un polímero tendrá mejores propiedades al impacto, mayor tenacidad (Crawford y Throne, 2002). El índice de fluidez se determina según la norma ASTM D1238, permite establecer la calidad del material e identificar si es apropiado para el proceso. Vlachopoulos y Strutt (2003), proporcionaron un rango típico del índice de fluidez, de un plástico para moldeo rotacional, entre 1,5-10 g/10 min, mientras que Crawford y Throne (2002) recomiendan 5 g/10 min para el polietileno, 2 g/10 min para espumas de polietileno.

1.1.4. Sinterizado del material

A medida que las partículas de plástico se van fundiendo, cambia el comportamiento al interior del molde. Las partículas forman una red y a medida que la temperatura incrementa, con constante movimiento del molde, se irán reduciendo y compactando. Este comportamiento se puede describir al estudiar la variación en el tiempo de la temperatura interior del molde. El perfil característico del moldeo rotacional se muestra en la Figura 11, curva Z.

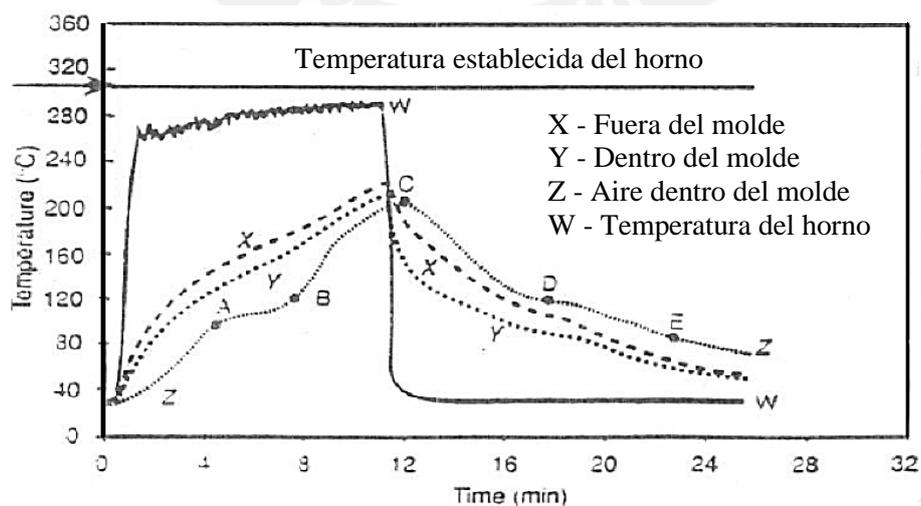


Figura 11 Perfil típico de temperatura durante el proceso de moldeo rotacional

Tomado de "Process control for rotational moulding of plastics", por Crawford et al. (1995).

A partir de la Figura 11 se identifican las siguientes etapas durante el moldeo rotacional:

- **Inducción**

Se introduce el molde dentro del horno, donde comienza a incrementar su temperatura. El polímero pulverizado se mueve libremente por toda la superficie interna del molde, mientras va incrementando la temperatura del aire. Esta etapa finaliza cuando el polvo comience a fundirse, en el punto A (Beltrán y Mancilla, 2012).

- **Sinterización**

Esta etapa está comprendida entre los puntos A-B. La temperatura ha alcanzado niveles en los que el polímero se adhiere, capa a capa, en las paredes del molde. En este periodo el material adsorbe calor para fundirse, por eso la pendiente es menor (Beltrán y Marcilla, 1998). Las partículas de polímero empiezas a coalescer, es decir que se juntan para fusionarse y forman un cuello en la unión de cada dos partículas, se esta manera se forma una red tridimensional (Spence & Crawford, 1996). Un esquema de la formación de la red es presentado en la Figura 12 (a) y (b), además se muestra las fotografías de proceso de sinterizado de polietileno copolímero en la Figura A 1 del anexo A.

- **Densificación**

En el punto B, ya se ha fundido todo el polvo; por consiguiente, la temperatura se eleva nuevamente, con una tendencia similar a la primera etapa. La textura interna es rugosa debido a que existen burbujas de aire que están atrapadas entre el polvo que se ha fundido. Se llama densificación a esta etapa, que se da entre B y C, porque se disuelven las burbujas de aire a medida que se incrementa la temperatura (Beltrán y Marcilla; 1998). En otras palabras, la red que se formó durante la etapa anterior, colapsa y los espacios dejados en el sinterizado empiezan hacer ocupados por el polímero fundido, pero también se generan burbujas que se eliminan a medida que llegan a la superficie interna del molde, dejando la superficie del plástico más suave y con mayor densidad (Spence & Crawford, 1996). La densificación de un polímero es representada en la Figura 12 (c), (d), (e) y (f), además se muestra las fotografías de proceso de densificado de polietileno en la Figura A 1 del anexo A.

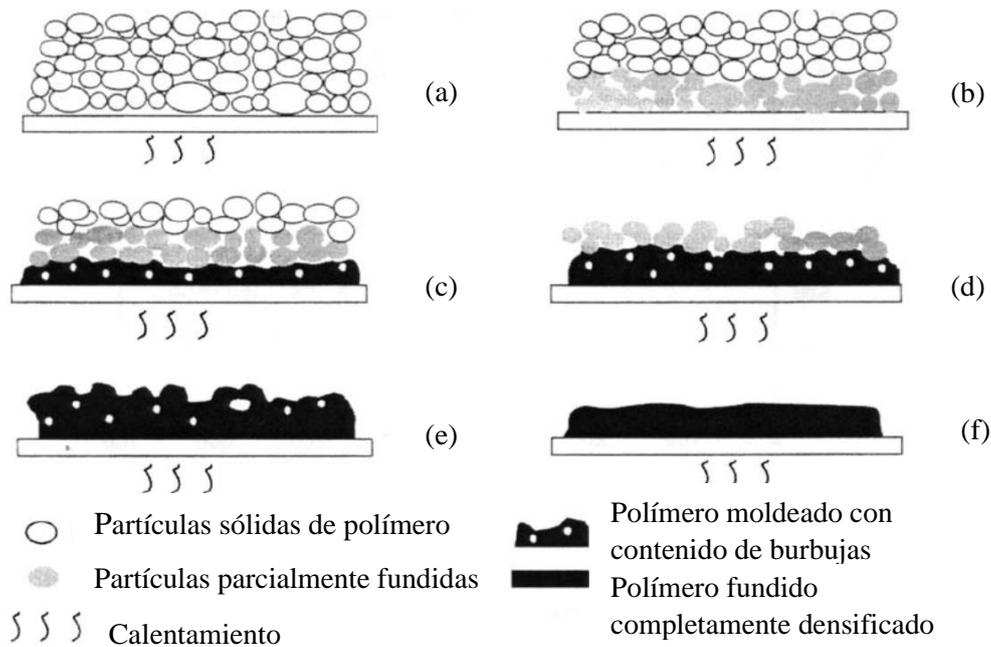


Figura 12 Esquema de la densificación de partículas de polietileno copolímero de baja cristalinidad

Tomado de “*Melting and Densification of Thermoplastic Powders*”, por Kontopoulou y Vlachopoulou (2001).

- Enfriamiento

Desde el punto C hasta D se enfría el material. Dependiendo de la forma como se realice, variará la rapidez del enfriamiento. La capa de polvo aún sigue fundida.

- Solidificación

Ocurre entre D y E. Se tiene un cascaron del material que recubre la parte interna del molde. En esta etapa el calor es trasferido al aire en el interior, por eso la temperatura decrece con lentitud. Una vez solidificado, la razón de enfriamiento ya no es crítica por lo que no existe problema al enfriar con mayor rapidez como, por ejemplo usando agua (Crawford et al., 1995).

1.2. Materiales utilizados en moldeo rotacional

En las piezas fabricadas por moldeo rotacional matriz está formada de un polímero sintético. Se puede usar polietilenos (HDPE, LDPE, LLDPE, MDPE, XLPE); PVC; etilvinilacetato (EVA); EBA; poliamidas (PA) o “nylon” (PA6, PA11, PA12); polipropileno; poliéster – elastómero; policarbonato (PC); entre otros (Pop et al., 2019). Para Nugent (2017) una de las principales razones para usar un polímero en el proceso de moldeo rotacional es su alta capacidad de transformación de polvo a solido homogéneo sin necesidad de presión.

Beltrán y Mancilla (2012) identificaron que en la actualidad los productos fabricados no solo son de capa única, sino que pueden tener varias para obtener los productos multi capas.

La Fibra de carbono y de vidrio son las más comunes como refuerzo en los polímeros. Se puede alcanzar un incremento de hasta 200% de las propiedades por el uso de fibra de vidrio (Kakani, 2004). Las fibras naturales son usadas con el propósito de reutilizar materiales orgánicos para reducir la cantidad de polímero usado. El uso de estas fibras busca no solo superar o igualar las propiedades mecánicas del material de 100% matriz polimérica, sino también, las de los materiales con fibras sintéticas.

Los materiales empleados en los procesos de moldeo de materiales compuestos son identificados como matriz y refuerzo. Ambos son materiales derivados del carbono que pueden ser orgánicos, como el caucho, la madera, fibras obtenidas de origen natural, o sintéticos, como los plásticos y fibras sintéticas (Kakani, 2004). Las investigaciones sobre materiales compuestos con fibras naturales como refuerzo surgen con el propósito de darle utilidad a materiales que contiene estas fibras y que son desechadas en los diferentes procesos, i.e., las compañías productoras de tequila desechan el agave luego de haberlas procesado; sin embargo, los estudios enfocados en el moldeo rotacional con refuerzo de fibras naturales no son muchos en comparación con los que se realizaron sobre los procesos de moldeo por compresión o transferencia de termoestables reforzados (Torres y Aguirre, 2003). Lo que ha ocasionado que sean pocos los estudios sobre este tipo de refuerzos en el moldeo racional es la pobre compatibilidad entre las fibras y la matriz, así como la alta absorción de humedad (Wang et al., 2004). En los últimos años se han llevado a cabo varios estudios utilizando matrices de diferentes polímeros, generalmente polietileno y fibras naturales como yute, sisal, cabuya, polvo de cascara de arroz, cascara de pecanas, fibras de linaza, madera, agave, hoja de plátano, entre otras (ver Figura 13).

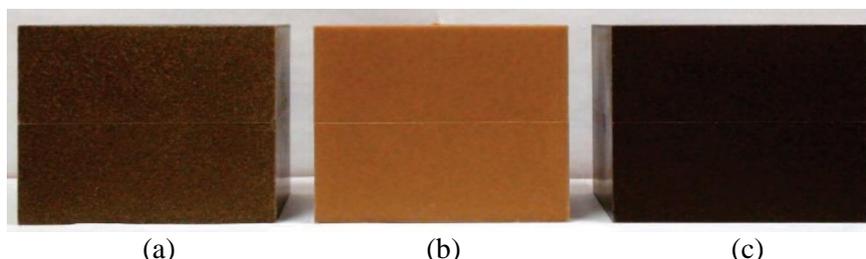


Figura 13 Muestras de material compuesto fabricadas por moldeo rotacional con matriz de LLDPE y 10% de (a) lino, (b) arce y (c) cáñamo

Tomado de “*Rotational molding of polymer composites reinforced with natural fibers*”, por Hanana y Rodrigue (2015)

Capítulo 2. Moldeo rotacional de polímeros reforzados con fibras naturales

El uso de fibras naturales como refuerzo de los polímeros termoestables, en el moldeo de estos materiales compuestos, ha sido visto como un área de investigación prometedora por sus beneficios económicos y contribución con el ambiente (Wang et al., 2004). Esto es evidenciado por el hecho de que en las últimas dos décadas han surgido diferentes investigaciones de este tipo. Un de los primeros estudios fue realizado por McDowell et al. (2001) y estuvo enfocado en determinar si la madera podría ser usada como refuerzo en el material compuesto, fabricado por moldeo rotacional. En la investigación preliminar de McDowell et al. (2001) ya se conocía el riesgo del posible quemado de las fibras de madera y degradación del polietileno, por el tiempo de calentamiento y las temperaturas que se requiere en este proceso.

Torres y Aguirre (2003) estudiaron la dispersión de las fibras en los productos del moldeo rotacional, así como la orientación, sinterizado y formación de burbujas en el material compuesto reforzado con fibras naturales tales como sisal, polvo de cascara de arroz y de pecanas. Además, para realizar la investigación incluyeron el tratamiento químico con ácido esteárico a algunas de las fibras que usaron, hecho que aún no se tenía en cuenta en la investigación de McDowell et al. (2001).

El tratamiento realizado a las fibras naturales despertó interés debido a los beneficios en la dispersión de dichas fibras y la fuerza de compresión en los productos fabricados por moldeo rotacional, como fue comprobado por Torres y Aguirre (2003). La investigación de Wang et al. (2004) se centró en estudiar los efectos de los tratamientos químicos en las propiedades de los materiales compuestos reforzados con fibras de linaza y encontrar el que permite mejor resistencia a la tracción, manteniendo baja absorción de agua. Así mismo, Torres y Díaz (2004) estudiaron la modificación física y química en las superficies tratadas.

Torres et al. (2006) basaron su estudio en determinar los parámetros para el sinterizado de materiales compuestos con refuerzo de fibras naturales y Jayaraman et al. (2007) investigaron la posibilidad de usar sisal y madera para mejorar las propiedades mecánicas considerando la longitud de las fibras como variable de estudio.

En estudios previos no se utilizó plásticos reciclados para realizar la fabricación del compuesto. Esto si fue realizado por Panigrahi (2010) quien investigó la fabricación y caracterizó el material compuesto de matriz termoplástica obtenidas de envases reciclados y fibras de linaza. Para su estudio desarrolló un procedimiento para preparar el plástico.

El tratamiento de las fibras fue con NaOH y silano, similar a los usados por Wang et al. (2004) y Torres y Díaz (2004).

López-Bañuelos et al. (2012) buscaron incorporar fibras de agave en una matriz de polietileno lineal de mediana densidad (LMDPE). Los autores no usaron tratamiento de las fibras o extrusión de los constituyentes, únicamente prefirieron la mezcla simple de las fibras y el plástico. Una característica distintiva de su trabajo fue que decidieron analizar ambas superficies, del molde fabricado, de forma independiente. En otras palabras, el ensayo de impacto y flexión fue realizado a la superficie interna y externa del molde.

En previos estudios se ha evitado usar fibras naturales húmedas. El contenido de agua en las fibras ha sido asociado al incremento de burbujas, porosidad durante la fabricación de los moldes y afectando negativamente a las propiedades mecánicas. Esto fue indicado por Ward-Perron & Rodrigue (2012a) quienes enfocaron su estudio en determinar la fabricación del material compuesto de LMDPE y madera pulverizada con contenido de humedad. Además, buscaron comprobar si la humedad se podría eliminar durante el proceso de moldeo para descartar la necesidad de secar las fibras antes de iniciar el proceso.

En el siguiente estudio de Ward-Perron y Rodrigue (2012b), estudiaron la fabricación del material compuesto de madera de pino pulverizada y LMDPE utilizando una mezcla simple de los constituyentes. No utilizaron ningún tratamiento al refuerzo, pero incluyeron diferentes rangos de tamaño de partículas en la experimentación. De esta manera buscaron determinar la influencia del tamaño de refuerzo en el comportamiento de las propiedades mecánicas.

Ortega et al. (2013) investigaron la factibilidad de usar fibras de plátano y abacá como refuerzo en una matriz de polietileno. Además, buscaron determinar la influencia en las propiedades mecánicas del tratamiento de las fibras de abacá y la incorporación de varias capas.

Raymond y Rodrigue (2013a) estudiaron el material compuesto, obtenido al utilizar madera de arce pulverizada en una matriz de polietileno, y sus propiedades mecánicas. En su siguiente estudio, Raymond y Rodrigue (2013b) utilizaron los mismos constituyentes, donde la diferencia fue la incorporación de un agente espumante. En ambas investigaciones no utilizaron un tratamiento químico para las fibras.

Como parte de las últimas contribuciones de la Pontificia Universidad Católica del Perú en el área de estudio de materiales compuestos reforzados con fibras naturales, se encuentra el trabajo de Arribasplata (2016). Realizó el estudio del sinterizado de materiales compuesto de

polietileno reciclado y madera capirona recuperada en la fabricación por moldeo rotacional, para incentivar el uso de materiales alternos que son considerados desechos. Similarmente, Quispe (2017) realizó el estudio utilizando madera de pino recuperada. En ambas investigaciones se buscó obtener los parámetros de fabricación del material compuesto que presente mejores propiedades mecánicas.

Cisneros-López et al. (2016), similarmente a López-Bañuelos et al. (2012), utilizaron LMDPE y fibras de agave, pero evaluaron la incorporación de más contenido de madera, hasta 40%. Además, buscaron mejorar la compatibilidad entre refuerzo y la matriz utilizando el tratamiento de las fibras con la solución de *maleic anhydride grafted polyethylene* (MAPE). Un año más tarde, Cisneros-López et al. (2017a), continuando con sus estudios, decidieron incluir fibras de coco y pino, para compararlos con sus resultados de agave y evaluar el comportamiento de estas nuevas fibras bajo el tratamiento con MAPE. Luego de varias investigaciones sobre el material compuesto con matriz de LLDPE, Cisneros-López et al. (2017b) en esta ocasión, buscaron evaluar la factibilidad del uso de ácido poli láctico (PLA) como matriz, reforzado con fibras de agave en la fabricación por moldeo rotacional y en el siguiente trabajo, Cisneros-López et al. (2018) compararon sus resultados con el obtenido por moldeo por compresión.

En los estudios de Hanana y Rodrigue (2018) utilizaron los mismos constituyentes que usaron Raymond y Rodrigue (2013a), LLDPE y fibras de madera de arce, pero incluyeron el tratamiento con MAPE para estudiar el efecto en las propiedades mecánicas, como lo hizo Cisneros-López et al. (2017a). También incorporaron el tamaño de fibras como variable. En el trabajo de Hejna et al. (2020), investigaron el uso de salvado de trigo como refuerzo en la matriz de LLDPE y el efecto en las propiedades mecánicas de las muestras fabricadas.

Como se ha visto, se han realizado diferentes avances en el estudio de la fabricación por moldeo rotacional de materiales compuestos reforzados con distintas fibras naturales y diferentes matrices, que generalmente son de polietileno. Si bien en algunos casos los materiales coincidían, los autores utilizaron diferente tratamiento o preparación de los materiales. Además, otros usaron diferentes condiciones de fabricación, considerando diferentes variables con la finalidad de evaluar el impacto en las propiedades mecánicas. Con el propósito de analizar con más detalle, en este capítulo se abordará los materiales usados, donde se expondrá cuáles fueron las matrices y refuerzos, los tratamientos, así como el procedimiento de preparación de las fibras y de los materiales compuestos; equipos y

procedimientos, donde se mostrará el equipo usado y los parámetros de fabricación que se mantuvieron constantes para realizar el moldeo; diseños experimentales, donde se explicará los parámetros variables y matrices experimentales para la fabricación de sus muestras; y por último, los ensayos de caracterización, donde se presentará los ensayos que realizaron, así como los equipos que utilizaron.

2.1. Materiales

En la investigación realizada por McDowell et al. (2001), la matriz utilizada fue de polietileno con un índice de fluidez de 3,6 g/10 min. Los refuerzos fueron fibras y polvo de madera, para determinar la diferencia en el comportamiento entre ambos tipos de forma del refuerzo. El tipo de madera usada no fue especificado, pero indican que las fibras las obtuvieron de residuos del corte por sierra.

El plástico usado por Torres y Aguirre (2003) fue polietileno. Sus resultados al ensayo de índice de fluidez, según ASTM D1238, fueron 2,8 y 2,5 g/10 min. Como refuerzo emplearon fibras de sisal entre 5 a 10 mm de longitud, cascara de arroz y pecanas pulverizadas. El refuerzo natural fue sometido a un tratamiento preparatorio que consistía en un lavado con una solución de alcohol por 24 horas; luego agregaron ácido esteárico, denominado “agente dispersante”; y finalmente secaron a 65°C por 24 horas. No especificaron la concentración del alcohol usado.

En el estudio realizado un año después, Torres y Díaz (2004) usaron polietileno de alta densidad, con índice de fluidez de 2,5 g/ 10 min, reforzado con las mismas fibras naturales. Además, el tratamiento preparatorio fue similar al que fue realizado por Torres y Aguirre (2003). La única diferencia fue que no se usaron ácido esteárico.

Torres et al. (2006) llevaron a cabo sus estudios usando polietileno, con índice de fluidez de 2,8 g/ 10 min. Las fibras usadas de refuerzo para moldeo rotacional fueron sisal y cabuya tratadas, con longitud entre 5 y 10 mm. El tratamiento que usaron fue un lavado con jabón no iónico con una concentración de 3% v/v a 65°C durante 1 hora. Luego, las fibras fueron enjuagadas y secadas en un horno a 65°C por 24 horas. Si se usó ácido esteárico.

Wang et al. (2004) utilizaron fibras de linaza sometidas a un tratamiento preparatorio más elaborado. Este tratamiento consiste en un lavado de las fibras en agua, con una concentración de 2% de detergente; secado a 70°C durante 24 horas; sumergidos en la mezcla de 1:2 etanol y benceno durante 72 horas a 50°C; lavado con agua destilada y secado. Luego del lavado iniciaron con el tratamiento químico. Usaron tres tipos de diferentes de tratamientos químicos. El primero consistió en sumergir en una solución de 5% de NaOH por 30 minutos,

luego en una mezcla de alcohol y agua con una concentración de 60 % y además incorporaron el agente acoplante de triethoxivinilsilano. A este procedimiento lo denominaron tratamiento de silano. El segundo tratamiento fue la benzoilación, que inicio con la inmersión de las fibras en la solución con 18% de NaOH por 30 minutos, luego en 10% de NaOH y benzoiclorado por 15 minutos, en agua, etanol por 1 hora y nuevamente en agua. El tercer tratamiento fue con peróxido que consistió en sumergir en la solución de 10% de NaOH y luego en acetona. Además de la preparación de las fibras, realizaron la preparación del material compuesto. Luego del tratamiento de las fibras, las molieron y secaron a 80°C durante 24 horas. Prepararon las mezclas, utilizando un mezclador de comida, que contenían 90% de polietileno (lineal de baja densidad (LLDPE), alta densidad (HDPE) o LLDPE/HDPE) y 10% de fibras de linaza, ambos porcentajes en peso. Por último, agregaron 5% de agentes acoplantes de silano a cada mezcla y prosiguieron a realizar la extrusión de la mezcla a 175°C. Finalmente, el material resultante fue convertido en pellets y molido. Además de utilizar diferentes tratamientos químicos, la preparación del material compuesto es una diferencia adicional, ya que ningún otro autor, antes descrito, realizó este procedimiento.

Jayaraman et al. (2007) usaron una matriz de polietileno lineal de media densidad (LMDPE), con un índice de fluidez de 4,0 g/ 10 min; refuerzos de fibras de madera (1,5 mm - 4 mm) y de sisal (10 mm). Los materiales fueron mezclados en un equipo a una temperatura entre 140°C – 150°C, a 70 RPM durante 15 minutos. El material resultante fue granulado en partículas de 2 mm y molido hasta alcanzar un tamaño entre 0,5 mm y 1 mm.

Panigrahi (2010) realizó la clasificación de los plásticos reciclados en 3 categorías; sin embargo, solo utilizó dos de estas para el estudio de la fabricación por moldeo rotacional. Ambas categorías son conformadas por plásticos que ya sufrieron una primera transformación por moldeo por soplado o *blow molded* (BM). La diferencia fue el color. Estos fueron: plásticos blancos (BMW) y plásticos coloreados (BMC). La primera categoría, BMW, fue integrada por materiales de polietileno de alta densidad (HDPE); mientras que la segunda categoría, BMC, fue conformada por materiales de polietileno lineal de baja densidad (LLDPE), polietileno de alta densidad (HDPE) y polipropileno (PP).

Los plásticos que utilizó Panigrahi (2010) fueron contenedores de bebidas, por ello fue requerido la preparación del plástico reciclado. Este procedimiento consistió en separar los materiales contaminantes e innecesarios como líquidos residuales, partes metálicas, entre otros; limpieza; clasificado de los plásticos en las categorías mencionadas; búsqueda de las piezas

más grandes para que sean cortadas en piezas más pequeñas; lavado con agua y detergente; secado; molido hasta obtener partículas de 1 mm y luego pulverizado.

Las fibras de linaza, usadas como refuerzo, fueron sometidas a un tratamiento químico con NaOH y silano. Según Panigrahi (2010), con el tratamiento Alcalino (NaOH) se obtiene una superficie más rugosa en las fibras al eliminar adhesivos naturales en las fibras. Esto permite el bloqueo de las fibras con la matriz. El procedimiento que siguió fue, primero, un lavado con agua; luego hizo hervir agua en un contenedor junto las fibras por 20 minutos; sumergió las fibras en 5% de solución de NaOH durante 30 minutos; enjuagó con agua destilada y secó. Con el tratamiento con silano optimizó la dispersión del refuerzo logrando un mejor enlace entre las fibras. El procedimiento que realizó para este segundo tratamiento químico fue sumergir las fibras en la mezcla de etanol 60%, agua 40% y silano 5% durante 1 hora; enjuagado con agua destilada y secado. Finalmente, las fibras fueron cortadas hasta 1mm y secadas para reducir la humedad a menos de 2%.

Una vez que se tuvo el plástico y las fibras listas, Panigrahi (2010) preparó el material para la fabricación del material compuesto. Este se realizó en cuatro grupos. Mezcló las fibras con el plástico pulverizado (BMW), de esta manera conformando el primer grupo; el segundo grupo fue producto de la combinación de las fibras y BMC; el tercer grupo lo obtuvo de la extrusión de las fibras con BMW y el último grupo fue de la extrusión de las fibras con BWC. El material no extruido fue mezclado y cortados hasta magnitudes de 1mm y 0,5 mm. En todos los casos el contenido de fibras fue 10% en peso.

López-Bañuelos et al. (2012) utilizaron matriz de polietileno lineal de mediana densidad (LMDPE) con un índice de fluidez de 5,0 g/10 min y una densidad de 0,936 g/cm³. Las fibras usadas como refuerzos fueron de agave y requirieron de un proceso de refinado para poder eliminar la pulpa que contiene. A modo de preparación, para la extracción de la pulpa, tuvieron que lavar las fibras con agua durante 24 horas para suavizarlas y facilitar la extracción. Una vez que extrajeron la pulpa tuvieron que secarlas bajo exposición al sol durante 2 días; destrenzadas y tamizadas. El tamaño de las fibras usadas fue de 50 mesh (40 – 50 mesh) y 100 mesh (70 – 100 mesh). López-Bañuelos et al. (2012) utilizaron los rangos indicados para categorizar las fibras como 50 o 100 mesh. Finalmente, secaron las fibras a 90 °C durante 24 horas. La mezcla de las fibras y el plástico fue simple durante 5 minutos.

Ward-Perron y Rodrigue (2012a) usaron polietileno lineal de mediana densidad (LMDPE) con una densidad de 938 kg/m³, índice de fluidez de 3,5 g/10 min y temperatura de

fundición de 128°C. El refuerzo usado fue madera pulverizada y tamizada hasta obtener partículas entre 150 y 500 μm . Debido a la intención de estudiar la humedad en las fibras, prepararon dos grupos de material, secas y húmedas, bajo diferentes condiciones. El primer grupo, “partículas secas”, las colocaron por 2 semanas en un ambiente a 23°C y 55% de humedad relativa. El segundo grupo, “partículas húmedas”, fue el caso crítico y las colocaron en un ambiente a 23°C y 100% de humedad relativa, durante 15 horas, tiempo suficiente para que alcance el equilibrio.

En la investigación realizada tiempo después, Ward-Perron y Rodrigue (2012b), utilizaron el mismo plástico para la matriz (LMDPE; 938 kg/m^3 ; 3,5 g/10 min). Como refuerzo usaron la madera de pino pulverizada. En este segundo estudio usaron 4 rangos de tamaño de partículas: 0 - 150 μm , 150 - 500 μm , 500 - 1000 μm , 1000 - 1700 μm . La mezcla de los constituyentes fue realizada durante 4 minutos y no usaron ningún tratamiento químico previo.

Ortega et al. (2013) utilizaron polietileno con índice de fluidez de 8,0 g/10 min y densidad de 934 kg/m^3 . Las fibras de refuerzo fueron de plátano y abacá. Solo las fibras de abacá fueron sometidas a un tratamiento químico con NaOH (107°C y 0,15 MPa). Los autores indican que, realizar el tratamiento con las condiciones mencionadas, mejora la estabilidad térmica. La mezcla de las fibras naturales y el polietileno fue molida.

Raymond y Rodrigue (2013a) usaron LLDPE con un índice de fluidez de 3,3 g/10 min y 938 kg/m^3 de densidad. El refuerzo fue madera pulverizada de arce con densidad de 1408 \pm 8 kg/m^3 . El tamaño de partícula de los constituyentes se encontraba entre 125 – 250 μm . En su siguiente estudio, Raymond y Rodrigue (2013b) utilizaron los mismos constituyentes con el mismo índice de fluidez, densidad y tamaño de partículas, pero incorporaron un agente espumante (Celogen 754A) en una cantidad de 0,1% en peso y la mantuvieron constante en la fabricación del material compuesto. Los materiales fueron mezclados de 3 a 4 minutos. En ambas investigaciones no aplicaron ningún tratamiento químico al refuerzo y no las secaron, ya que indicaron que todo el contenido en las fibras se eliminaría durante la fabricación debido a las altas temperaturas.

En el trabajo de Arribasplata (2016) se utilizó HDPE para la matriz de las muestras moldeadas. Debido a que parte del objetivo era incentivar el uso de materiales considerados desechos, HDPE lo obtuvo de tapas de botellas brindadas por una empresa. Como se vio anteriormente en la investigación de Panigrahi (2007), el uso de material reciclado requiere de un procedimiento para limpiar y clasificar los plásticos según el tipo y color. Para simplificar

esta etapa, Arribasplata (2016) utilizó un lote de tapas de botellas para asegurar que estén fabricadas bajo las mismas condiciones y solo simuló el reciclado. Debido al hecho que el material virgen ya fue usado para elaborar las tapas por el proceso de inyección, ya considera que han cumplido con su propósito de fabricación, por lo que realizó un cortado y pulverizado de las tapas. Con ello obtuvo el material reciclado que usó para el proceso de moldeo rotacional (ver Figura 14). El HDPE recuperado tenía un índice de fluidez de 1,814 g/10 min, densidad de 955 kg/m³, temperatura de inicio de fusión de 122,1°C y final de fusión de 138,3°C. El tamaño de partículas que usó fue menor a 500 µm (Mesh 35) siguiendo la recomendación de Crawford y Throne (2002). El refuerzo fueron partículas de madera capirona recuperada a partir de los restos de corte en las fábricas de muebles. La densidad de la madera usada fue 711 kg/m³. El tamaño de partículas fue una variable por lo que usó 3 rangos: 1000 - 2000 µm, 500 - 1000 µm y menor a 500 µm. No realizó tratamiento químico del refuerzo.



Figura 14 (a) tapas de HDPE recuperado y (b) HDPE pulverizado

Tomado de “*Estudio del sinterizado de materiales compuestos de polietileno reciclado y madera pino recuperada fabricados mediante moldeo rotacional*”, por Quispe (2017).

Quispe (2017) estudió el sinterizado del material compuesto de HDPE recuperado y madera de pino fabricados mediante moldeo rotacional. La matriz de polietileno obtenida y preparada de la misma manera que Arribasplata (2016), simulando el reciclado (ver Figura 14). El HDPE tenía un índice de fluidez de 1,5 g/10 min, densidad de 955 kg/m³, temperatura de fusión de 132,7°C y un tamaño de partículas menor a 500 µm. La madera de pino recuperada la obtuvo de los procesos de arranque de viruta de los talleres. La densidad de la madera de pino fue 477 kg/m³. El tamaño del refuerzo fue una variable por lo que las clasificó en 3 rangos: 500 - 1000 µm (Mesh 18), 297 - 500 µm (Mesh 35) y menor a 297 µm (Mesh 50). No realizó ningún tratamiento químico al refuerzo y tampoco un secado previo, ya que aseguro que la humedad se eliminaría durante la etapa de calentamiento del proceso.

En la investigación de Cisneros-López et al. (2016), usaron LMDPE y fibras de agave, como López-Bañuelos et al. (2012). El índice de fluidez de la matriz fue 5 g/10 min y densidad de 930 kg/m³. Las fibras fueron sometidas a una preparación que consistió en un lavado con una refinadora, centrifugado, secado al sol durante 48 horas, cortado y tamizado hasta conseguir fibras de dimensiones entre 297 y 400 µm. Incluyeron dos tratamientos químicos para las fibras. El primero fue la mercerización. En una solución de 2% de NaOH fueron mezcladas las fibras durante 15 minutos a 25°C. Las fibras fueron enjuagadas con agua destilada varias veces y secadas a 80°C por 24 horas usando un horno. El siguiente tratamiento fue el que usó *maleic anhydride grafted polyethylene* (MAPE) que no había sido usado por ningún otro autor citado antes. Prepararon una solución con 1% en peso de MAPE disuelto en Xileno a 90°C donde agregaron las fibras y las sometieron a constante agitación durante 30 minutos. Luego filtraron y secaron durante 5 días a 80°C en un horno. Previo al inicio del moldeo rotacional, el material mezclado fue secado nuevamente para reducir la humedad.

Un año más tarde, en su siguiente estudio, Cisneros-López et al. (2017a) utilizaron los mismos materiales usados previamente, con las mismas características; sin embargo, añadieron a la investigación las fibras de coco y pino como refuerzo. Las partículas de pino las usaron sin ningún tratamiento preparatorio, pero las fibras de coco y agave si fueron sumergidas en agua durante 24 horas. Esto lo realizaron para eliminar materia extraña en las fibras como polvo, sales e impurezas. Las fibras de agave fueron lavadas con una refinadora, como lo hicieron en estudios previos, las fibras de coco solo fueron limpiadas manualmente, pero ambas fibras fueron centrifugadas y secadas al sol durante 48 horas. El tamaño de fibras de agave estuvo en el rango de 297 µm y 400 µm; las de coco, 210 µm y 250 µm; y las de pino entre 400 µm y 595 µm. El procedimiento para el tratamiento de las fibras con NaOH y MAPE fue el mismo (procesos, tiempos, temperaturas, y etapas) que Cisneros-López et al. (2016).

Luego de varias investigaciones usando LMDPE como matriz, Cisneros-López et al. (2017b), buscaron evaluar la factibilidad de usar ácido poliláctico (PLA) como nueva matriz en la fabricación, por moldeo rotacional, del material compuesto reforzado con fibras de agave. El PLA usado tuvo un índice de fluidez de 80 g/10 min, una densidad de 1240 kg/m³ y una temperatura de fusión entre 188 – 210°C. El índice de fluidez es mucho mayor al de los polímeros que se solía usar como matriz anteriormente (HDPE, LLDPE, LMDPE, etc.) que variaron entre 2,5 y 8 g/10 min. Esto indica que el PLA es mucho menos viscoso al ser fundido. La preparación de las fibras de agave fue la misma que usaron Cisneros-López et al. (2016) un año antes, pero no usaron ningún tratamiento químico. El PLA

tuvo que ser pulverizado hasta obtener partículas entre 297 y 400 μm , que es el mismo que tiene las fibras al finalizar la preparación. La mezcla de ambos constituyentes fue realizada por 5 minutos a 3750 RPM y requirió de un secado previo a 60°C por 48 horas para extraer la humedad. Este secado lo repitieron justo antes de realizar el moldeo. Un año más tarde, en el siguiente trabajo de Cisneros-López et al. (2018) continuaron usando PLA reforzado con agave, pero con el fin de comparar sus nuevos resultados obtenidos mediante la fabricación por moldeo rotacional con el moldeo por compresión. La matriz tenía el mismo índice de fluidez y densidad; sin embargo, tenía una temperatura de fusión de 170°C. ambos constituyentes fueron sometidos a la misma preparación que en los trabajos anteriores del autor.

Hanana y Rodrigue (2018) usaron LLDPE con índice de fluidez de 6,8 g/10 min y densidad de 936 kg/m^3 . El refuerzo fue polvo de madera de arce clasificado entre 3 grupos: 125 - 250 μm ; 250 - 355 μm y 355 - 500 μm . El tratamiento con MAPE fue el mismo (temperatura, tiempo, concentración) que el usado en la segunda etapa por Cisneros-López et al. (2016). Luego filtró, secó (a 60°C) y mezcló por 5 minutos a 3320 RPM.

Hejna et al. (2020) usaron LLDPE con índice de fluidez de 6 g/10 min. El refuerzo natural fue salvado de trigo con una densidad de 1272 kg/m^3 . No fueron sometidas a tratamiento químico. El tamaño de partículas de LLDPE y de las partículas de refuerzo se encontraron en el rango 200 - 500 μm , aunque en algunos grupos de fibras de salvado de trigo obtuvieron tamaños superiores e inferiores a dicho rango.

En la Tabla 2 se puede ver un resumen de los diferentes autores y los materiales que usaron para la fabricación del material compuesto, también se muestran algunas características de la matriz y refuerzo como la densidad, tamaño de partículas, índice de fluidez y el tratamiento que tuvieron las fibras en algunos trabajos.

Tabla 2 Resumen sobre los materiales compuestos fabricados con fibras naturales

Autor	Material Compuesto		Tratamiento - preparación
	Matriz	Refuerzo	
McDowell et al. (2001)	PE 3,6 g/10 min	Fibras y polvo de madera	Sin tratamiento químico de las fibras.
Torres y Aguirre (2003)	PE 2,8 y 2,5 g/10 min	Fibras de sisal, polvo de cascara de arroz y pecanas. (5 – 10mm)	Con tratamiento químico de las fibras con ácido esteárico.
Torres y Díaz (2004)	HDPE 2,5 g/ 10 min	Fibras de sisal, polvo de cascara de arroz y pecanas. (5 – 10mm)	Sin tratamiento químico de las fibras. Solo lavado con alcohol.
Wang et al. (2004)	LLDPE; HDPE LLDPE/HDPE	Fibras de linaza	Las fibras fueron sometidas al tratamiento de silano, benzoilación y peróxido.
Torres et al. (2006)	PE 2,8 g/ 10 min	Fibras de sisal y cabuya. (5 – 10mm)	Con tratamiento químico de las fibras. Lavadas, secadas y sumergidas en ácido esteárico.
Jayaraman et al. (2007)	LMDPE 4,0 g/ 10 min	Fibras de madera (1,5 mm – 4 mm) 400 kg/m ³ y de sisal (10 mm) 1450 kg/m ³	Sin tratamiento químico de las fibras. Solo Mezclado a 145°C, granulado y molido (0,5 y 1mm)
Panigrahi (2010)	HDPE (grupo 1 - BMW) LLDPE, HDPE y PP (grupo 2 - BMC)	Fibras de linaza (0,5 - 1mm)	Las fibras fueron tratadas con NaOH y silano. 4 mezclas preparadas. BMW – fibras; BMC – fibras; BMW – fibras (extruido); BMC – fibras (extruido).
López-Bañuelos et al. (2012)	LMDPE 5,0 g/10 min 936 kg/m ³	Fibras de agave (40 - 100 mesh)	Sin tratamiento químico de las fibras. Separaron 2 grupos según el tamaño de fibras.
Ward-Perron y Rodrigue (2012a)	LMDPE 3,5 g/10 min 938 kg/m ³	Polvo de madera (150 y 500 µm)	Sin tratamiento químico de las fibras. Partículas secas (amb de 23°C y 55%HR) y partículas húmedas (amb. de 23°C y 100%).
Ward-Perron y Rodrigue (2012b)	LMDPE 3,5 g/10 min 938 kg/m ³	Polvo de madera de pino (0 - 1700 µm) 1389 – 1509 kg/m ³	Sin tratamiento químico de las fibras. Separaron 4 grupos según el tamaño de fibras.
Ortega et al. (2013)	PE 8,0 g/10 min 934 kg/m ³	Fibras de abacá y plátano	Con tratamiento químico con NaOH (107C y 0,15 MPa).
Raymond y Rodrigue (2013a)	LLDPE 3,3 g/10 min 938 kg/m ³	Polvo de madera de arce (125 – 250 µm) 1408 kg/m ³	Sin tratamiento químico ni secado de las fibras.
Raymond y Rodrigue (2013b)	LLDPE 3,3 g/10 min 938 kg/m ³	Polvo de madera de arce (125 – 250 µm) 1482 kg/m ³	Sin tratamiento químico ni secado de las fibras. Se uso un agente espumante.
Cisneros-López et al. (2016)	LMDPE 5,0 g/10 min 930 kg/m ³	Fibras de agave (297 - 400 µm)	Con tratamiento químico de las fibras con NaOH y MAPE.
Arribasplata (2016)	HDPE reciclado 1,814 g/10 min 955 kg/m ³	Polvo de madera de capirona (500 µm o menor) 711 kg/m ³	Sin tratamiento químico de las fibras.

Continuación de Tabla 2 Resumen sobre los materiales compuestos fabricados con fibras naturales

Autor	Material Compuesto		Tratamiento - preparación
	Matriz	Refuerzo	
Quispe (2017)	HDPE reciclado 1,5 g/10 min 955 kg/m ³	Polvo de madera de pino (297 - 500 μm) 477 kg/m ³	Sin tratamiento químico de las fibras.
Cisneros-López et al. (2017a)	LMDPE 5,0 g/10 min 930 kg/m ³	Fibras de agave (297 - 400 μm); fibras de coco (210 - 250 μm); Polvo de pino (400 - 595 μm)	Con tratamiento químico de las fibras con NaOH y MAPE.
Cisneros-López et al. (2017b)	PLA 80 g/10 min 1240 kg/m ³	Fibras de agave (297 - 400 μm) 1430 kg/m ³	Sin tratamiento químico de las fibras.
Hanana y Rodrigue (2018)	LLDPE 6,8 g/10 min 936 kg/m ³	Polvo de madera de arce (125 - 500 μm)	Con tratamiento químico de las fibras con MAPE. Separaron 3 grupos según el tamaño de fibras.
Cisneros-López et al. (2018)	PLA 80 g/10 min 1240 kg/m ³	Fibras de agave (297 - 400 μm) 1430 kg/m ³	Sin tratamiento químico de las fibras.
Hejna et al.(2020)	LLDPE 6 g/10 min	Salvado de trigo (200 - 500 μm) 1272 kg/m ³	Sin tratamiento químico de las fibras.

2.2. Equipos y procedimientos

McDowell et al. (2001) no brindaron información sobre la máquina de moldeo rotacional usada, tampoco las velocidades de rotación, pero si menciona que utilizaron 2 hornos, cuya diferencia fue la potencia, y la temperatura para la fabricación de 250°C. Además, usaron un rango, para la temperatura del aire interno del molde, de 180°C - 220°C. Este último rango de temperatura, se infiere, fue definido por unos ensayos previos, ya que McDowell et al. (2001) demostraron que a 145°C no se logra el sinterizado completo, argumentaron que a 180°C recién existe una buena formación de la muestra y a 220°C se empieza a evidenciar quemaduras en la parte exterior de la muestra.

Torres y Aguirre (2003) usaron una máquina de moldeo rotacional pequeña de laboratorio con un molde de acero inoxidable, además indicaron que las velocidades variaron entre 30 y 100 RPM. El horno fue usado en el rango de 130 - 220°C. La máquina utilizada para la investigación realizada por Torres y Díaz (2004) fue la misma que la empleada por Torres y Aguirre (2003) en sus estudios; sin embargo, para esta ocasión la razón de velocidad fue 4:1 y el rango fue 10 - 60 RPM. Wang et al. (2004), usaron para los ensayos, una maquina tipo carrusel y un horno a 250°C durante 30 minutos.

Jayaraman et al. (2007) emplearon una máquina de laboratorio tipo Rock and Roll con un molde de aluminio. La razón de velocidad fue 5:1 y la velocidad del eje longitudinal fue 5 RPM. El horno lo mantuvieron a 250°C hasta tener una temperatura del aire interior del molde de 180°C. Luego enfriaron con aire forzado hasta 40°C.

La máquina usada por Panigrahi (2010) no fue especificada, únicamente, indica que existió rotación en 2 ejes y a 35 Hz. La temperatura del horno fue 216°C; sin embargo, en algunos casos usó 210°C y 218°C. La permanencia de las muestras en el horno fue 30 minutos.

López-Bañuelos et al. (2012) experimentaron utilizando una máquina de laboratorio con un molde de acero inoxidable. La razón de velocidad fue 1:4, donde la velocidad del eje mayor fue 3,5 RPM. La temperatura del horno que usaron no fue única y dependió del tiempo que permanecía el material en el molde. Mientras más sea la temperatura menos tiempo se requerirá en el horno (15 minutos a 350°C) y si menos es la temperatura, el tiempo será mayor (20 minutos a 260°C). Con enfriamiento redujeron la temperatura hasta 60°C.

En el estudio de Ward-Perron y Rodrigue (2012b), especificaron que la máquina usada fue de tipo “*shuttle*” y un molde de aluminio. La razón de velocidad fue 4:1. El calentamiento en el horno fue hasta 260 °C por 21 minutos. El enfriamiento lo realizaron por 24 minutos con aire forzado. También indujeron un flujo de aire al interior del molde para realizar un enfriamiento más rápido y evitar defectos.

La máquina usada por Ortega et al. (2013) fue de tipo carrusel, de la marca Ferry Rotospeed, con un molde de aluminio. La razón de velocidad fue 8:2. La temperatura del horno fue de 300°C y el calentamiento lo realizaron hasta tener una temperatura del aire interno del molde de 190°C. El enfriamiento se llevó a cabo hasta alcanzar una temperatura de 70°C.

Raymond y Rodrigue (2013a) usaron una máquina de moldeo rotacional tipo *Shuttle* y moldes de aluminio. La razón de velocidades fue 4:1. El calentamiento fue realizado con un horno a 270°C durante 21 minutos y el enfriamiento durante 24 minutos. Además, los autores enfriaron el molde con un flujo de aire desde el interior para evitar defectos en la geometría. En el siguiente estudio de Raymond y Rodrigue (2013b) incorporaron un agente espumante, usaron la misma máquina de moldeo, los mismos parámetros (4:1 / 270°C y 21 min / 24 min) y la misma técnica de enfriamiento al interior del molde. Un dato destacado que brindaron y que otros autores suelen omitir, fue que usaron un tubo de ventilación en el molde de 12,5 mm de diámetro. Además, agregaron fibras de vidrio en el tubo para evitar la pérdida de material mientras el molde rota. Esta técnica también fue recomendada por Crawford y Throne (2002).

Arribasplata (2016) usó una máquina de tipo *Shuttle*. Las muestras fabricadas fueron elaboradas con una razón de velocidad de 4:1, 8 RPM en el eje mayor y 10 RPM en el eje menor. La temperatura del horno, el tiempo en el horno y el tiempo de enfriamiento fueron parte de las variables y las determinó en base a la metodología que planteó. Las muestras óptimas fueron fabricadas con 300°C en el horno por 25 minutos y el enfriamiento siempre fue con aire forzado durante 20 minutos.

Quispe (2017) usó una máquina de tipo *Shuttle* con moldes cilíndricos de material según AISI 316. La razón de velocidad fue 4:1, 8 RPM en el eje mayor y 10 RPM en el eje menor. La temperatura del horno y el tiempo de calentamiento fueron parte de las variables y las determinó en base a su metodología. Las muestras óptimas fueron fabricadas con 320°C en el horno por 28 minutos. El enfriamiento con aire forzado lo realizó durante 20 minutos.

Los experimentos de Cisneros-López et al. (2016) y (2017a) fueron llevados a cabo usando una máquina de moldeo rotacional a escala de laboratorio con un molde de acero inoxidable. La razón de velocidad fue 1:4, donde el eje mayor giraba a 3,5 RPM. El calentamiento lo realizaron en un horno a 260°C por 20 minutos. El enfriamiento fue realizado por 25 minutos con aire forzado. En el estudio en el que usaron PLA como matriz, Cisneros-López et al. (2017b) usaron la misma máquina con la razón de velocidad de 4:1, donde el eje mayor giraba a 3,5 RPM y 2,7 RPM en el eje menor. El calentamiento fue realizado a 300°C por 24 minutos y enfriado por 24 minutos con aire forzado. En el siguiente estudio con PLA, Cisneros-López et al. (2018) los parámetros fueron los mismos, pero en esta ocasión consiguieron medir la temperatura del aire al interior del molde que alcanzó 210°C.

Hanana y Rodrigue (2018) fabricaron sus muestras usando una máquina a escala de laboratorio, modelo 22 de la marca Medkeff-Nye, con un molde de aluminio. La razón de velocidad fue 4:1. El calentamiento se realizó a 280°C durante 20 minutos y el enfriamiento con aire forzado por 38 minutos.

En la fabricación de muestras con LLDPE y salvado de trigo, Hejna et al. (2020) usaron una máquina tipo *Shuttle* con una razón de velocidad de 1:2, 5 RPM en eje mayor y 15 RPM en el eje menor. La temperatura del horno fue 200°C durante 25 minutos. El enfriamiento de las muestras fue con aire forzado por 30 minutos.

En la Tabla 3 se puede ver un resumen de los diferentes autores y los parámetros de fabricación reportados para la fabricación de sus muestras material compuesto.

Tabla 3 Resumen de equipos y parámetros

Autor	Material compuesto	Tipo de maquina	Razón de velocidad	Velocidad de los ejes	Temperatura y tiempo en el horno	Temperatura o tiempo de enfriamiento
McDowell et al. (2001) *	PE/madera	No se menciona	-	-	250°C	-
Torres y Aguirre (2003)	PE/sisal	No se especifica	-	30 – 100 RPM	130 – 220°C	-
Torres y Díaz (2004)	HDPE/sisal	No se especifica	4:1	10 – 60 RPM	-	-
Wang et al. (2004)	LLDPE/HDPE/linaza	Tipo carrusel	-	-	250°C /30 min	-
Jayaraman et al. (2007) *	LMDPE/madera/sisal	Tipo Rock and Roll	5:1	5 RPM (eje mayor)	250°C	40°C
Panigrahi (2010)	HDPE/linaza	No se especifica	-	-	210-218°C /30 min	-
López-Bañuelos et al. (2012)	LMDPE/agave	No se especifica	1:4	3,5 RPM (eje mayor)	350°C /15 min 260°C /20 min	60°C
Ward-Perron y Rodrigue (2012b)	LMDPE/madera de pino	Tipo Shuttle	4:1	-	260°C /21 min	24 min
Ortega et al. (2013) *	PE/abacá/plátano	Tipo carrusel	8:2	-	300°C	70°C
Raymond y Rodrigue (2013a)	LLDPE/madera de arce	Tipo Shuttle	4:1	-	270°C /21 min	24 min
Raymond y Rodrigue (2013b)	LLDPE/madera de arce	Tipo Shuttle	4:1	-	270 °C /21 min	24 min
Cisneros-López et al. (2016)	LMDPE/agave	No se especifica	1:4	3,5 RPM (eje mayor)	260°C /20 min	25 min
Arribasplata (2016)	HDPE/madera capirona	Tipo Shuttle	4:1	8 RPM (eje mayor) 10 RPM (eje menor)	300°C /25 min	20 min
Quispe (2017)	HDPE/madera de pino	Tipo Shuttle	4:1	8 RPM (eje mayor) 10 RPM (eje menor)	320°C /28 min	20 min
Cisneros-López et al. (2017a)	LMDPE/agave/coco/pino	No se especifica	1:4	3,5 RPM (eje mayor)	260°C /20 min	25 min
Cisneros-López et al. (2017b)	PLA/agave	No se especifica	4:1	3,6 RPM (eje mayor) 2,7 RPM (eje menor)	300°C /24 min	24 min
Hanana y Rodrigue (2018)	LLDPE/madera de arce	No se especifica	4:1	-	280°C /20 min	38 min
Cisneros-López et al. (2018) *	PLA/agave	No se especifica	4:1	3,6 RPM (eje mayor) 2,7 RPM (eje menor)	300°C /24 min	24 min
Hejna et al. (2020)	LLDPE/salvado de trigo	Tipo Shuttle	1:2	5 RPM (eje mayor) 15 RPM (eje menor)	200°C /25 min	30 min

(*) Pocos autores lograron medir la temperatura del aire en el molde debido a la dificultad que representa:
 McDowell et al. (2001) → 180 – 220 °C, Jayaraman et al. (2007) → 180 °C, Ortega et al. (2013) → 190 °C, Cisneros-López et al. (2018) → 210 °C

2.3. Diseños experimentales

Por un lado, para la fabricación de las muestras con fibras de madera y polietileno, McDowell et al. (2001) variaron el porcentaje en peso de la madera, llegando a usar: 2,5%, 10%, 20%, 40% y 60%. Luego moldearon 2 muestras por cada porcentaje; para el caso de 20% de fibras madera se fabricó una muestra adicional. Por otro lado, las muestras con la mezcla de polietileno y polvo de madera fueron solo 3, ya que utilizaron los porcentajes de 2,5%, 10% y 20%. Además, hicieron una muestra con 100% de polietileno a modo de referencia. El total de piezas moldeadas fue 15 y la distribución de estas se puede ver en la tabla matriz del experimento mostrado en la Tabla B 1 del anexo B.

Torres y Aguirre (2003), utilizaron 30 g de la mezcla de HDPE y las fibras naturales. Cada muestra con una variación en el porcentaje en peso entre 0% y 50% del refuerzo. También observaron que, durante el proceso de moldeo, existió separación entre el polímero y las fibras, por ello agregaron una segunda capa únicamente de polímero.

La matriz experimental formulada por Wang et al. (2004), mostrada en la Tabla B 2 del anexo B, consistió en tres tipos de tratamiento: benzoilación, tratamiento de silano y tratamiento con peróxido y como referencia incluyeron las fibras sin tratar. Los polímeros fueron LLDPE, HDPE y HDPE/LLDPE. Considerando los tipos de tratamiento y las matrices se generaron 12 combinaciones. Teniendo en cuenta que moldearon 5 muestras para cada combinación, en total fabricaron 60 muestras por moldeo rotacional. A diferencia del diseño experimental aplicado por McDowell et al. (2001) y Torres y Aguirre (2003); Wang et al. (2004) no variaron el porcentaje de fibras en sus muestras, sino que decidieron mantener en 10% en peso de fibras de linaza. Así mismo, no usaron las fibras y el plástico como tal para el moldeo rotacional, sino que fue el resultado mezclar las fibras y el plástico mediante extrusión para luego pulverizarlo (esto fue descrito en la sección 2.1 Materiales).

Para la fabricación de cada muestra, Torres y Diaz (2004) utilizaron un porcentaje variable entre 3 y 30% en volumen de contenido de refuerzos. Torres et al. (2006) usaron solo 10% y 20% en peso del porcentaje de fibras y en los ensayos realizados por Jayaraman et al. (2007) emplearon porcentajes en peso desde 5% hasta 25%, con incrementos de 5 %, de fibras de madera y también para las fibras de sisal.

Todas las combinaciones formuladas por Panigrahi (2010), contenían 10% en peso de fibras de linaza tratadas químicamente, 85% de plástico y 5% de agente desmoldante. Por ejemplo, la composición de la muestra 1 tenía 85% de polietileno reciclado, 10% de fibras de

linaza y 5% de desmoldante (sin extraer); la muestra 5 tenía 85% de polietileno reciclado, 10% de fibras de linaza y 5% de desmoldante, además la mezcla fue extraída. Panigrahi (2010) solo fabricó 8 muestras, dos de las cuales correspondieron a 100% de polietileno reciclado para ser usadas como referencia (ver Tabla B 3 del anexo B).

López-Bañuelos et al. (2012) prepararon muestras de 450g y para ello utilizaron mezclas del LMDPE con 5%, 10% y 15% en peso de fibras agave. Las muestras las fabricaron siguiendo los porcentajes descritos con fibras tamizadas en mallas de 50 mesh, 100 mesh y con la combinación de ambas (fibras de 50 mesh y fibras de 100 mesh) en proporción 1:1.

Ward-Perron y Rodrigue (2012b) consideraron el tamaño de partículas como una variable, por ello clasificaron las partículas de madera en 4 grupos según su tamaño: 0 – 150 μm , 150 – 500 μm , 500 – 1000 μm y 1000 – 1700 μm ; además usaron combinaciones de estos grupos de partículas. Por ejemplo, las muestras con código A tenían 100% de fibras con tamaño entre 150 – 500 μm ; en la muestra E, el contenido de madera era de 75% de partículas entre 150 – 500 μm y 25% entre 500 – 1000 μm ; la muestra G estaba compuesta por partículas de madera de tres grupos, 25% entre 0 – 150 μm , 50% entre 150 – 500 μm y 25% entre 500 – 1000 μm . En la Tabla B 4 del anexo B, se puede identificar las mezclas de partículas que hicieron, así como el código que le asignaron a cada una. Así mismo, variaron el contenido de partículas de madera de pino en 5%, 10%, 15% y 20% en peso.

Ortega et al. (2013) fabricaron solo 9 combinaciones entre sus muestras y en todas mantuvieron un contenido de 5%, en peso, de las fibras (ver Tabla B 5 del anexo B). Solo 6 de las combinaciones las fabricaron con dos capas y el resto con tres. Entre las muestras con dos capas hubo un par por cada tipo de fibras (plátano, abacá y abacá con tratamiento químico con NaOH). La diferencia entre los pares fue el contenido de polietileno en cada capa, 600g para la primera capa – 200g para la segunda capa y viceversa, i.e., la muestra 1 estaba conformada por una primera capa de 600 g de PE y la segunda capa de 200 g de PE combinado con 5 % de fibras de plátano; la muestra 2 estaba conformada por una primera capa solo de 200 g de PE y la segunda capa de 600 g de PE combinado con 5 % de fibras de plátano. En las 3 muestras con 3 capas, mantuvieron la cantidad de polietileno para cada capa (400g la primera, 200g la segunda y 200g la tercera capa). En todos los casos la segunda capa contenía las fibras naturales.

Raymond y Rodrigue (2013a) variaron el porcentaje del refuerzo de madera de arce, sin tratamiento, entre 0 y 25% en peso. Luego Raymond y Rodrigue (2013b) usaron un agente

espumante que se mantuvo constante en 0,1% en peso y la cantidad de madera de arce usada en las muestras fue 0%, 5%, 10%, 15%, 20% en peso.

En el diseño experimental de Arribasplata (2016) las variables fueron la temperatura del horno, el tiempo en el horno, el porcentaje en volumen de madera capirona (10%, 15%, 20%, 25% y 30%) y tamaño de las muestras, según los rango de la sección 2.1 Materiales. La experimentación la realizó en 3 etapas. La primera etapa consistió en una serie de ensayos de moldeo preliminares para determinar la temperatura y tiempos de calentamiento. Las muestras de esta etapa las elaboró a ensayo y error. Mantuvo constante el tamaño de partículas y la cantidad de madera (10%). Además, una característica que determinó las muestras aceptables fue el grado de degradación de la madera. En esta etapa, halló que a una temperatura de 300°C y 18 minutos es una condición crítica. Con un tiempo inferior a la misma temperatura no obtuvo una sinterización completa y con un tiempo mayor a 27°C la muestra se degradó. Cuando culminó esta etapa estableció la temperatura de horno en 280°C, 300°C y 320°C; y el tiempo de calentamiento en 19, 22, 25 y 28 minutos. La segunda etapa consistió en determinar el efecto de la proporción en volumen de madera capirona, para ello mantuvo constante la temperatura del horno en 300°C y el tamaño de partículas menor a 500 μm , pero varió las proporciones de madera (0%, 10%, 15%, 20%, 25% y 30%) en volumen y usó los tiempos determinados en la primera etapa. Las probetas fueron sometidas al ensayo de tracción. Al finalizar determinó que 25 minutos en el horno a 300°C con 15% de madera permite obtener mejores propiedades de tracción. La tercera etapa consistió en evaluar el efecto del tamaño de partículas. Mantuvo la temperatura en 300°C y el porcentaje de madera en 15%, pero varió los tiempos de calentamiento según lo determinado en la primera etapa y el tamaño de fibras en 2000 – 1000 μm y 1000 – 500 μm .

Quispe (2017) también realizó una experimentación por etapas para evaluar las variables de fabricación de las muestras de HDPE y madera de pino. La primera etapa consistió en determinar la influencia del contenido de madera (0%, 5%, 10%, 15%, 20% y 25% en volumen) en las muestras y el contenido máximo. También variaron el tiempo de calentamiento (19, 22, 25 y 28 minutos) manteniendo el horno a 300°C constante. En la segunda etapa evaluó como influye la temperatura de calentamiento en el sinterizado para ello vario la temperatura del horno en 280°C, 300°C, 320°C, 340°C y 350°C, así como los tiempos según la primera etapa. En la tercera etapa analizó la influencia del tamaño de las fibras y para ello utilizó el porcentaje óptimo de madera (15%) y la temperatura del horno (320°C) hallado en la primera y segunda etapa. En total tuvo que fabricar 336 probetas.

Las muestras de Cisneros-López et al. (2016) y (2017a) contenían un peso de 400 g en total (LMDPE + fibras). En ambos estudios la cantidad de fibras de agave, coco y pino, según corresponda, fueron variadas desde 0% hasta 40% con incrementos de 10% en peso. Además, fabricaron muestras con tratamiento y sin tratamiento. En el trabajo de Cisneros-López et al. (2017b) hecho con PLA y fibras de agave realizaron la misma variación del contenido de los constituyentes. Cisneros-López et al. (2018) también usaron la misma variación, pero el peso total de las muestras fue 350 g.

Hanana y Rodrigue (2018) usaron un contenido de partícula de madera de arce en sus muestras, variando en 10% 20% y 30% en peso. Además, incluyeron el tamaño de fibras como variable. Por ello las clasificaron en 3 tamaños con distintos nombres: el grupo “S” comprendía las partículas entre 125 – 250 μm ; el grupo “M” entre 250 – 355 μm y el grupo “L” entre 355 – 500 μm . Usaron combinaciones entre los grupos de tamaños de fibras. Estas fueron SM, MM, LM sin tratamiento y SM, MM, LM con tratamiento con MAPE. Todas las combinaciones involucran a las fibras de tamaño mediano (M). Para realizar las combinaciones de fibras, usaron una variable denominada razón de fibras (100/0, 75/25, 50/50, 25/75, 0/100). Las muestras fueron catalogadas con el código “SaLxT”. Donde S y L representan el tamaño de las fibras y “T” indica que tiene tratamiento. En el código de las muestras, “a” representa el porcentaje en peso del contenido de partículas y “x” la razón de fibras, i.e., la muestra “L20M25T” indicó que la muestra contenía 20% de fibras de madera de arce tratadas y entre las fibras el 25% fue de tamaño “M” y 75% de “L”.

Hejna et al. (2020) solo variaron el contenido de fibras de salvado de trigo en 2,5%, 5%, 10% y 20% en peso. El peso total de las muestras fue 100g.

2.4. Ensayos de caracterización

Se presenta en la Tabla 4 los equipos usados por los diferentes autores para realizar los ensayos de caracterización. Así mismo se indican las normas usadas y algunas características adicionales como las velocidades de ensayo. Algunos autores no indicaron el equipo que usaron para llevar a cabo los ensayos a las probetas, así que se indica solo con la palabra “realizado” en dicha tabla.

A partir de la revisión de los diferentes trabajos se identificó que solo algunos realizaron un tipo de ensayo, razón por la cual no se presentan en la tabla sino se describen a continuación:

- McDowell et al. (2001), Torres y Aguirre (2003), Wang et al. (2004) y Quispe (2017) realizaron ensayos de humedad. McDowell et al. (2001) solo indican que realizaron el ensayo, pero no indican el equipo que usaron ni la norma. Torres y Aguirre (2003) solo midieron la variación de peso. Wang et al. (2004) realizaron sus ensayos según ASTM D570-99, pero no indican el equipo usado. Quispe (2017) realizó el ensayo de absorción de humedad según ASTM D1037-12.
- Torres y Aguirre (2003) fueron los únicos que realizaron un ensayo de compresión a sus muestras. Lo realizaron en una máquina hidráulica universal de ensayos marca Instron, con una velocidad de 1,3 mm/min.
- Cisneros-López et al. (2017a), (2017b) y (2018) realizaron ensayos de dureza al material compuesto de con un durómetro de Titanio 0-90 HD con la escala Shore D. Hejna et al. (2020) hicieron ensayos de dureza según ISO 868 y usaron un durómetro Zwick 3131 de la marca Zwick Roell para determinar la dureza Shore tipo D.
- Wang et al. (2004) realizaron ensayos de calorimetría diferencial de barrido para lo que usaron un equipo Parkin Elmer de la marca *TA Instruments* en modo dinámico (50°C-200°C; 10°C/min) y las probetas (6–10 mg). Arribasplata (2016) y Quispe (2017) usaron el calorímetro diferencial Jupiter STA 449 F3 Netzsch. Cisneros-López et al. (2018) para sus ensayos de calorimetría usaron el equipo modelo Q100 de la marca *TA Instruments*, programado para calentar las probetas (4–6 mg) a 10°C/ min de 30 a 180°C bajo nitrógeno.

Tabla 4 Ensayos, normas y equipos utilizados según los autores.

Autor	Inspección visual y estereoscopia	SEM	Ensayo de tracción	Ensayo de impacto	Ensayo de flexión	Ensayo de densidad
McDowell et al. (2001)	Realizado	-	-	Realizado	Realizado	-
Torres y Aguirre (2003)	Zeiss estereomicroscopio	-	-	-	-	-
Wang et al. (2004)	-	-	Según ASTM D638-99 con Maquina hidráulica universal de ensayos marca Instron (5 mm/min)	-	-	-
Torres y Díaz (2004)	Realizado	-	-	-	-	-
Torres et al. (2006)	Realizado	-	-	-	-	Realizado
Jayaraman et al. (2007)	-	-	Según ASTM D 638-00 con Maquina universal de ensayos marca Instron modelo 5567	Según ASTM 6110-97 con Máquina de impacto Ceast modelo Resil 25	-	-
Panigrahi (2010)	Realizado	-	Según ASTM D638	-	Según ASTM D790	-

Continuación de Tabla 4 Ensayos, normas y equipos utilizados según los autores.

Autor	Inspección visual y estereoscopia	SEM	Ensayo de tracción	Ensayo de impacto	Ensayo de flexión	densidad
López-Bañuelos et al. (2012)	Estereomicroscopio Olympus SZ6	JOEL modelo JSM-840 ^a	Según ASTM D 638 con Máquina universal de ensayos marca Instron modelo 4411 (5mm/min)	Según ASTM D5420 con Máquina de impacto Garner	Según ASTM D790 con Máquina universal SFM-10 United	Picnometro a gas marca Quantachrome Ultrapyc 1200e
Ward-Perron y Rodrigue (2012b)	Realizado	-	Según ASTM D 638 con Máquina universal de ensayos modelo 5565 (5mm/min)	Según ASTM D256 con Máquina IT 504	Según ASTM D790 con Máquina universal de ensayos modelo 5565 (5mm/min)	Picnometro a gas marca Quantachrome Ultrapyc 1200e
Ortega et al. (2013)	Realizado	-	Según UNE 527-2:1997 con máquina de tracción universal marca Instron 4411. (5 mm/min)	Según ISO 6603-2:2000 con máquina de impacto de CEAST Fractovis (equipado con dardo de 18,65 kN)	Según UNE 178:2011 con máquina de tracción universal marca Instron 4411 a (10 mm/min)	-
Raymond y Rodrigue (2013a)	Realizado	-	Según ASTM D 638, con maquina universal para ensayos modelo 5565 marca Instron, (10 mm/min)	-	Según ASTM D 790, con maquina universal para ensayos modelo 5565 marca Instron, (10 mm/min)	Picnómetro a gas marca Quantachrome Ultrapyc 1200

Continuación de Tabla 4 Ensayos, normas y equipos utilizados según los autores.

Autor	Inspección visual y estereoscopia	SEM	Ensayo de tracción	Ensayo de impacto	Ensayo de flexión	densidad
Raymond y Rodrigue (2013b)	Realizado	JEOL modelo JSM – 840 ^a	Según ASTM D 638, con maquina universal para ensayos modelo 5565 marca Instron, (10 mm/min)	-	Según ASTM D 790, con maquina universal para ensayos modelo 5565 marca Instron, (10 mm/min)	Picnómetro a gas marca Quantachrome Ultrapyc 1200e
Cisneros-López et al. (2016)	-	TESCAN modelo MIRA3 LMU	Según ASTM D 638, con maquina universal para ensayos modelo 3345 marca Instron, (5 mm/min)	Según ASTM D6110 con Máquina de impacto Ceast modelo 9050. Entalla hecha con Instron Ceast 6897 manual	Según ASTM D 790, con maquina universal para ensayos modelo 3345 marca Instron, (2 mm/min)	-
Arribasplata (2016)	Estereoscopio Leica S6D con cámara Leica DFC320	Quanta SEM 650 con detector EDS	Según ASTM D 638, con maquina Zwick/Roell Z050	-	-	Según ASTM D2395-14
Quispe (2017)	Estereoscopio Leica S6D	-	Según ASTM D 638, con maquina Zwick/Roell Z050	-	-	Según ASTM 729-13

Continuación de Tabla 4 Ensayos, normas y equipos utilizados según los autores.

Autor	Inspección visual y estereoscopia	SEM	Ensayo de tracción	Ensayo de impacto	Ensayo de flexión	densidad
Cisneros-López et al. (2017a)	-	TESCAN MIRA3 LMU	Según ASTM D 638, con maquina universal para ensayos modelo 3345 marca Instron, (5 mm/min)	Según ASTM D6110 con Máquina de impacto Ceast modelo 9050. Entalla hecha con Instron Ceast 6897 manual	Según ASTM D 790, con maquina universal para ensayos modelo 3345 marca Instron, (2 mm/min)	-
Cisneros-López et al. (2017b)	-	TESCAN MIRA3 LMU	Según ASTM D 638, con maquina universal para ensayos modelo 3345 marca Instron, (1 mm/min)	Según ASTM D6110 con Máquina de impacto Ceast modelo 9050. Entalla hecha con Instron Ceast 6897 manual	Según ASTM D 790, con maquina universal para ensayos modelo 3345 marca Instron, (1 mm/min)	Picnómetro a gas marca Quantachrome Ultrapyc 1200e. La densidad aparente obtenida según ASTM D2395-14
Hanana y Rodrigue (2018)	-	JEOL modelo JSM – 840 ^a	Según ASTM D 638, con maquina universal para ensayos modelo 5565 marca Instron, (10 mm/min)	Máquina de impacto Tinius Olsen modelo Impact 104. Entalla hecha con maquina automática maca Dynisco modelo ASN 120m	Según ASTM D 790, con maquina universal para ensayos modelo 5565 marca Instron, (2 mm/min)	Picnómetro a gas marca Quantachrome Ultrapyc 1200e
Cisneros-López et al. (2018)	-	TESCAN MIRA3 LMU	Según ASTM D 638, con maquina universal para ensayos modelo 3345 marca Instron, (1 mm/min)	Según ASTM D6110 con Máquina de impacto Ceast modelo 9050. Entalla hecha con Instron Ceast 6897 manual	Según ASTM D 790, con maquina universal para ensayos modelo 3345 marca Instron, (1 mm/min)	Picnómetro a gas marca Quantachrome Ultrapyc 1200e. La densidad aparente obtenida según ASTM D2395
Hejna et al. (2020)	-	TESCAN MIRA3 LMU	Según ASTM D 638, con maquina Zwick/Roell Z020, (50 mm/min)	-	-	Según ISO 1183

Capítulo 3. Resultados de las investigaciones sobre polímeros reforzados con fibras naturales

En tanto que los investigadores usaron diferentes tipos de matrices y refuerzos, se realizaron distintos ensayos de caracterización para verificar la compatibilidad del plástico con las fibras naturales y la influencia en las propiedades mecánicas del material compuesto resultante. A continuación, se presentarán los resultados de dichos ensayos, por ejemplo, inspección visual, estereoscopia, SEM, tracción, flexión, impacto, absorción de humedad, entre otros. Así mismo uno de los propósitos es comparar los resultados de los autores agrupados según el tipo de refuerzo natural que usaron: madera (pino, arce, capirona); agave; linaza; abacá; plátano; coco; sisal y salvado de trigo (ver Tabla D 1 del anexo D).

3.1. Inspección visual, estereoscopia y SEM.

La fabricación de muestras por moldeo rotacional suele desarrollarse con mucho cuidado por el riesgo a que resulten defectuosas y tengan que ser rechazadas. Algunos de los problemas comunes suelen ser la segregación entre los constituyentes por el movimiento del molde, impidiendo una distribución homogénea; exceso en la temperatura que podría generar la degradación del refuerzo; un tiempo reducido en el horno que ocasiona una falta de densificación y generación de burbujas. Por tal motivo se requiere de observar las muestras para identificar algún defecto antes de someterla a un ensayo mecánico. La observación puede realizarse a simple vista, si se requiere más aumentos se usa el estereoscopio y si se quiere un mayor detalle se realiza un análisis de microscopía electrónica de barrido (SEM).

A. Refuerzo de sisal

En la investigación de Torres y Aguirre (2003), y Torres y Díaz (2004), observaron que, durante el proceso de moldeo, existió separación entre el polietileno y las fibras, pues estas tendían a dirigirse hacia el interior del molde en lugar de mantenerse combinadas con el plástico. Ver Figura 15a. Por ello optaron por agregar una capa extra de polímero para cubrir las fibras expuestas en la parte interna, de la forma ilustrada en la Figura 16. Otra solución que hallaron fue agregar las fibras durante el moldeo con ayuda de un acoplamiento al molde; sin embargo, este diseño no fue detallado. Ambos autores, a partir de la inspección de las muestras fabricadas con refuerzo de fibras de sisal tratadas y matriz de HDPE, demostraron que existió una tendencia isotrópica. Adicionalmente, para obtener mayor detalle de la orientación y dispersión de fibras, realizaron un análisis con estereoscopio de una de las muestras fabricadas (Figura 15b y Figura 17a). Las marcas circulares del mecanizado de la base del molde fueron replicadas en el polímero (Figura 17a).

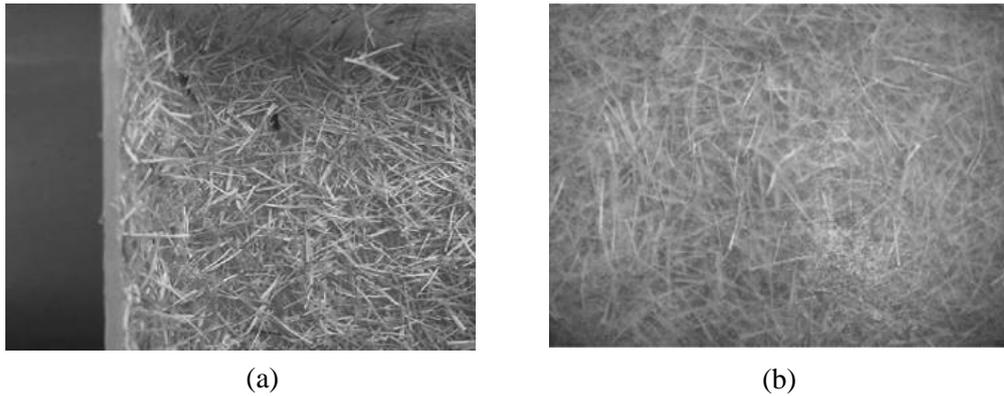


Figura 15 (a) Las fibras de sisal sobresalen de la superficie y (b) orientación y dispersión de fibras en moldeo rotacional.

Tomado de “*Morphological characterisation of natural fibre reinforced thermoplastics (NFRTTP) processed by extrusion, compression and rotational moulding*”, por Torres y Díaz (2004).

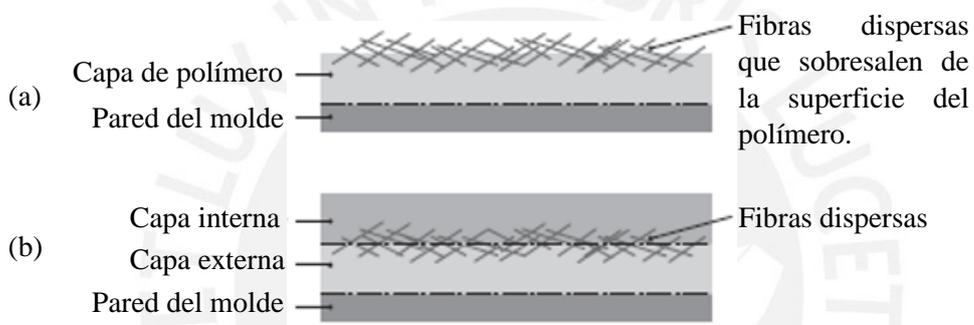


Figura 16 (a) Probeta moldeada de una sola capa y fibras sobresalientes hacia la parte interna y (b) doble capa moldeada con buena distribución de fibras.

Tomado de “*Rotational moulding and powder processing of natural fibre reinforced thermoplastics*”, por Torres y Aguirre (2003).

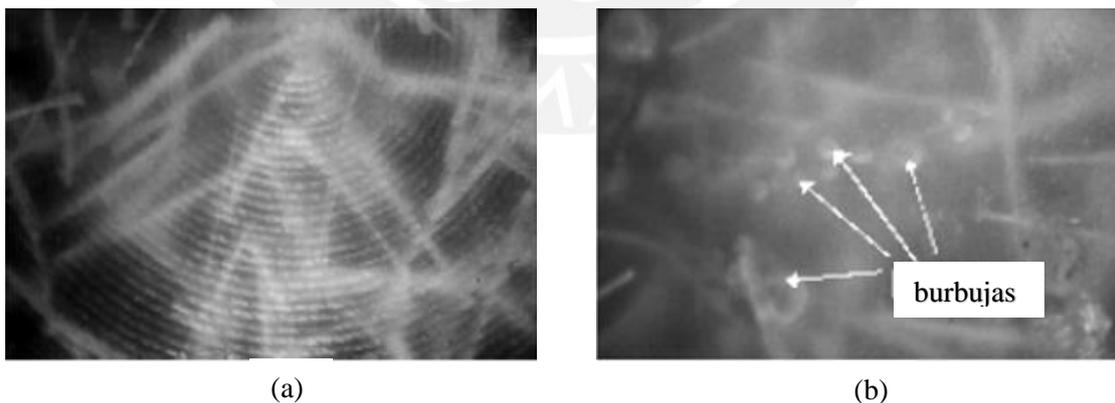


Figura 17 (a) Micrografía de la superficie exterior de la pieza roto moldeada donde se muestra buena dispersión de las fibras (15x) y (b) micrografía evidenciando burbujas en la superficie exterior de la muestra fabricada por moldeo rotacional (15x).

Tomado de “*Rotational moulding and powder processing of natural fibre reinforced thermoplastics*”, por Torres y Aguirre (2003).

Torres y Aguirre (2003) y Torres y Díaz (2004) reportaron la existencia de burbujas al interior del material compuesto de fibras de sisal y matriz de HDPE (Figura 17b), además indicaron que esa muestra presentaba índices de degradación de las fibras.

En la investigación realizada por Torres et al. (2006) sobre el sinterizado de partículas de polietileno y fibras de sisal, determinaron que se genera una separación entre dos partículas, inicialmente juntas y una fibra de sisal conforme se incrementa la temperatura del conjunto. Cuando se enfría el material la distancia entre las partículas se reduce, pero no vuelven a su posición original (Figura 18). Atribuyeron este efecto a una de las causas de la generación de burbujas en la fabricación del compuesto con refuerzo de fibras. El estudio realizado con las partículas fue verificado cuando analizaron el sinterizado de muchas partículas de PE y dos fibras de sisal (Figura 19). Observaron la presencia de mayor número de cavidades en las zonas adyacentes a las fibras a diferencia de la zona entre fibras (Figura 20).

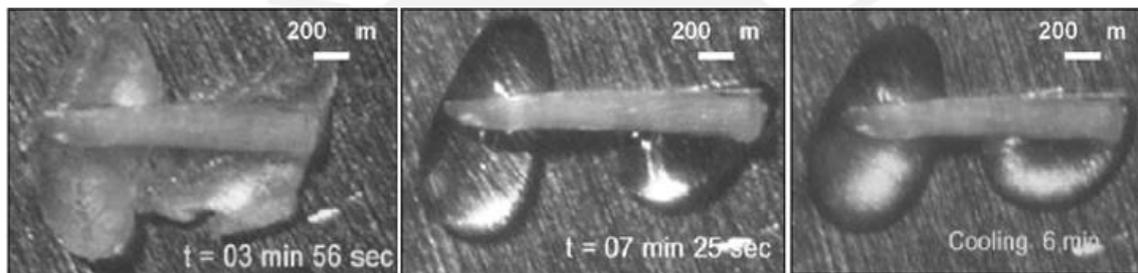


Figura 18 Secuencia de sinterizado de dos partículas de polímero y una fibra de sisal (25x).

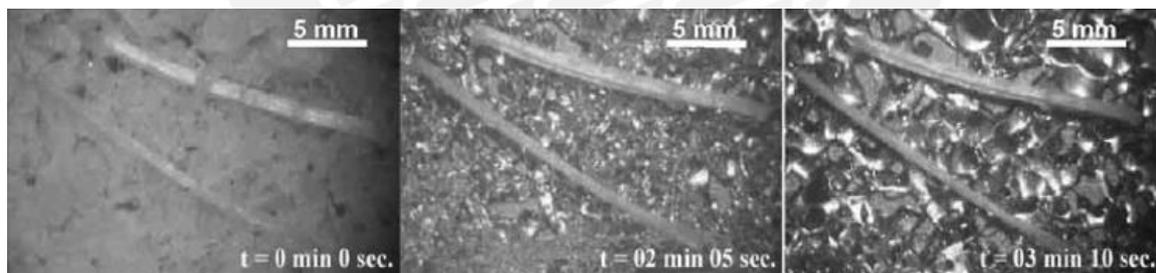


Figura 19 Sinterizado del conjunto de partículas de polímero y 2 fibras de sisal. (10x).

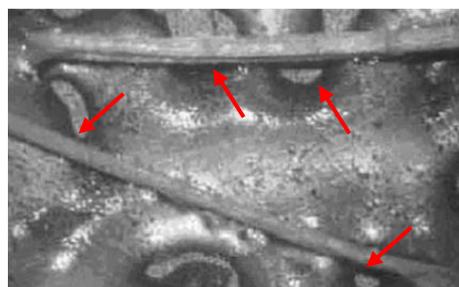


Figura 20 Amplificación del sinterizado de muchas partículas y fibras de sisal. (40x).

Figura 18, 19 y 20 tomadas de “Melt densification of polymeric powder beds filled with natural fibres”, por Torres et al. (2006).

B. Refuerzo de Linaza

Panigrahi (2010) solo obtuvo 3 buenas muestras (1, 5 y 7) a partir de las 8 fabricadas cuya composición se indica en la Tabla B 3 del anexo B. En general, las muestras que contenían “BMC” (*Blow molded colored*), denotación para plásticos de diferentes colores reciclados y usados previamente en moldeo por soplado, que fueron y no extruidos, sufrieron una fundición incompleta. El autor decidió no aumentar la temperatura del horno porque a mayor temperatura se inicia la degradación de las fibras de linaza. Estas muestras fueron las identificadas con el número 2, 3, 4, 6 y 8 de la Tabla B 3 del anexo B. Las muestras descartadas se rompían con facilidad sin necesidad de una gran fuerza (Figura 21a) lo que llevó a Panigrahi (2010) excluirlas de los ensayos. Adicionalmente, los moldes retirados presentaron aglomeraciones de fibras en la parte interna como se puede ver en la Figura 21b. Así mismo observó que no se presentaron las bolas de fibras en los moldes 2, 5 y 1 debido a que se evitó extruyendo el material previamente y usando fibras de menor tamaño (0,5 mm).

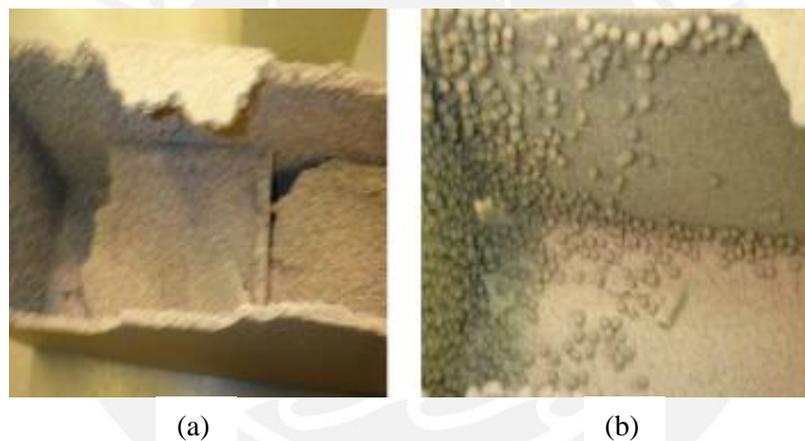


Figura 21 Moldes fabricados con fibras de linaza y BMC rechazados

Tomado de “*Mechanical performance of recycled thermoplastic and flax fiber based composite*”, por Panigrahi (2010).

C. Refuerzo de madera

Mediante inspección visual, McDowell et al. (2001) encontraron picaduras en la superficie exterior de las muestras fabricadas con madera pulverizada; sin embargo, las muestras hechas con fibras de madera no presentaron esta imperfección. Además, determinaron que, a diferencia de las muestras hechas con polvo de madera, las muestras hechas con fibras de madera no fueron cubiertas en su totalidad, quedando expuestas, y fue más evidente en muestras con mayor contenido de porcentaje de madera.

Ward-Perron y Rodrigue (2012b) informaron que hasta 15 % de madera de pino usada en los moldes permitieron una buena adhesión entre los constituyentes (Figura 22). De forma

similar, Raymond y Rodrigue (2013a) obtuvieron muestras con buena apariencia, desde 5 hasta 20% de madera de arce pulverizada, es decir con buena dispersión y homogeneidad; sin embargo, las muestras con 25% de madera mostraron una falta de LLDPE para cubrir las partículas de madera, como se muestra en la Figura 23.

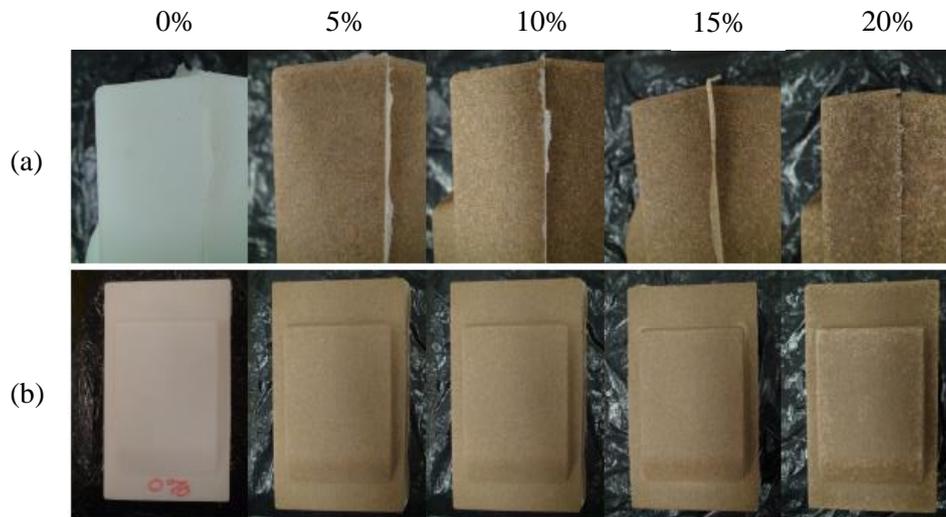


Figura 22 Muestras fabricadas con partículas de madera de pino entre 150- 500 micras. Se indica el porcentaje de madera de la superficie (a) interna y (b) externa.

Tomado de “*Natural fiber reinforced thermoplastics (NFRTTP) processed by rotomolding*”, por Ward-Perron y Rodrigue (2012b).

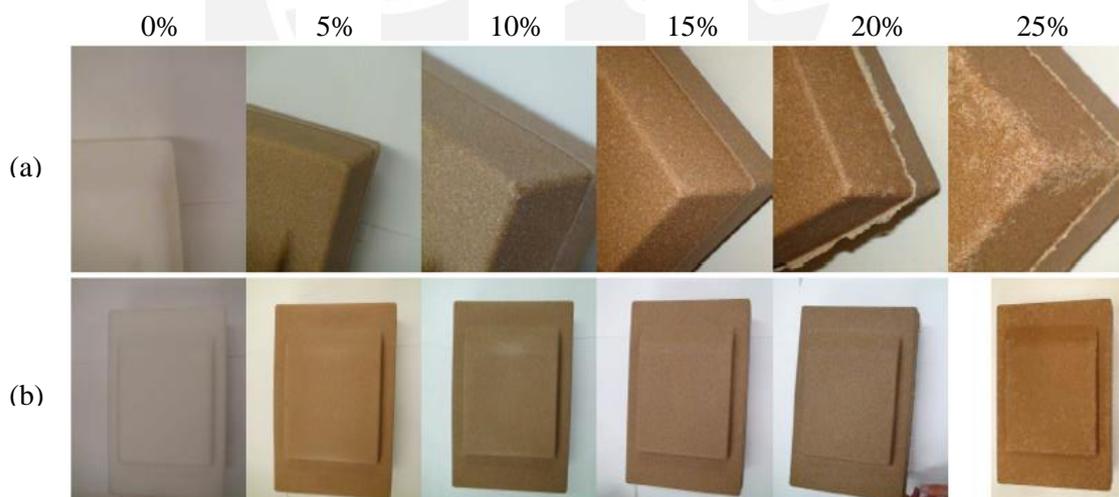


Figura 23 (a) Magnificación de las esquinas y (b) sus respectivas muestras.

Tomado de “*Wood Plastics Composites Produced by Rotomolding*”, por Raymond y Rodrigue (2013a).

A partir de las muestras con partículas de madera de pino y arce, fabricadas por Ward-Perron y Rodrigue (2012b) y Raymond y Rodrigue (2013a) respectivamente, determinaron que el exceso de refuerzo genera escases del material de la matriz. Por este

motivo no se puede dar una adhesión completa en las muestras con altas concentraciones de madera. Esto genera un desprendimiento de las partículas ante el contacto.

En el análisis SEM realizado por Cisneros-López et al. (2017a) a las muestras con partículas de madera de pino, agave y coco, determinaron que se generan cavidades por la separación entre el refuerzo y la matriz cuando realizaron la extracción de una pieza para el análisis. Esto ocurrió en las muestras con fibras sin tratamiento, mientras que en las que si fueron tratadas la adhesión fue mayor, por ello no se formaron cavidades. Además, identificaron buena distribución entre las fibras de coco y agave en la matriz debido al uso de tratamiento químico con NaOH y MAPE. Con el uso de partículas de pino, no identificaron diferencias notorias entre las muestras con refuerzo tratado y sin tratamiento químico.

Hanana y Rodrigue (2018) fabricaron muestras con LLDPE y partículas de **madera de arce**. Las muestras optimas fueron las que contenían 20% de refuerzo. En el análisis de las imágenes obtenidas por SEM observaron porosidades y cavidades formadas por la separación de las fibras de la matriz, que se pueden confundirse con porosidades (Figura 24a y c). Además, pudieron identificar que la distribución fue mejor en las muestras con fibras combinadas, ya que las de menor tamaño se distribuyen entre las de mayor longitud. El tratamiento de las fibras con MAPE les permitió obtener una morfología homogénea en la cual casi no existió cavidades formadas por la extracción de la muestra para realizar el análisis SEM (Figura 24b y d).

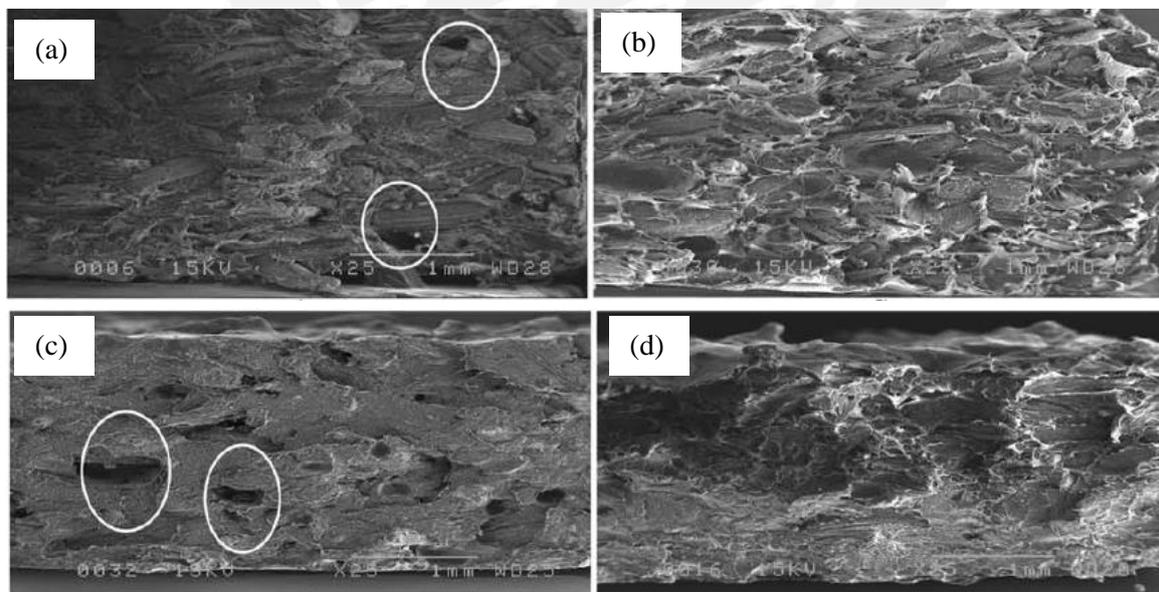


Figura 24 SEM de las muestras sin tratamiento (a) S20L75U y (b) S20L75T, con tratamiento (c) S20M75U y (d) S20M75T

Tomado de “Rotational Molding of Self-Hybrid Composites based on Linear Low-Density Polyethylene and Maple Fibers”, por Hanana y Rodrigue (2018).

El trabajo de Raymond y Rodrigue (2013b) fue realizado con una matriz de LLDPE, refuerzo de partículas de **madera de arce y un agente espumante** (ver Figura 25). Reportan que existió dificultad para evaluar las muestras debido a las cavidades que se formaron por el desprendimiento de partículas cuando extrajo una pequeña parte para realizar el análisis SEM. Estas cavidades se confundían con las que son propias del material espumado (ver Figura 26). El material de mejores propiedades mecánicas fue el que contenía 20% de refuerzo y su densidad fue la máxima ($1,480 \text{ g/cm}^3$).

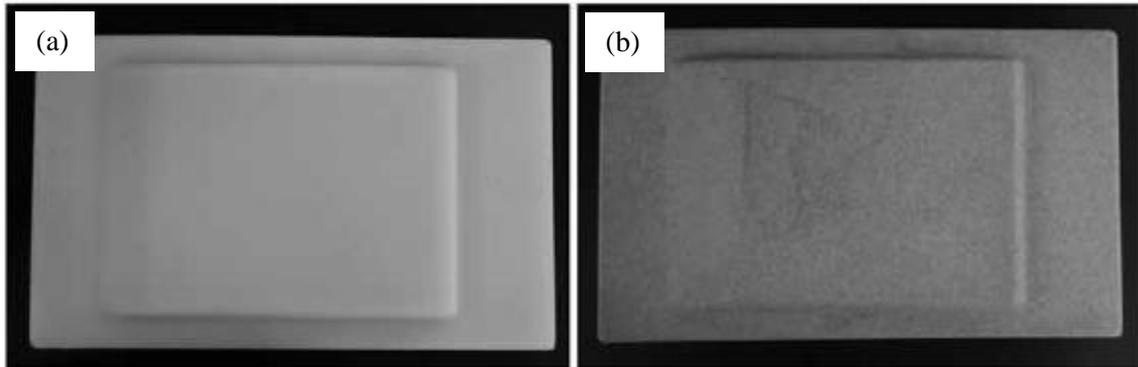


Figura 25 Muestras de (a) material espumado y (b) reforzado con madera de arce

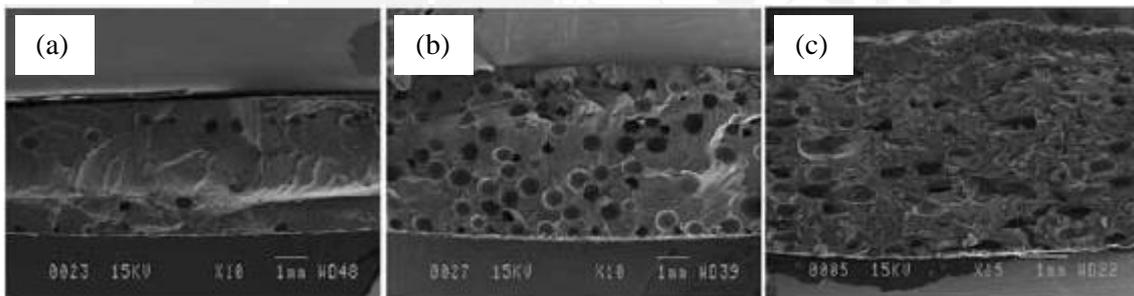


Figura 26 SEM de las muestras de (a) LLDPE, (b) LLDPE/ 0,1% de agente espumante y (c) LLDPE/ 0,1% agente espumante/20% de madera de arce

Figura 25 y 26 tomadas de “*Foams and Wood Composite Foams Produced by Rotomolding*”, por Raymond y Rodrigue (2013b).

Arribasplata (2016) y Quispe (2017) utilizaron tapas de HDPE que fueron cortadas y pulverizadas con el fin de simular el reciclado. Esto fue explicado en 2.1 Materiales. Para que no influyera en su experimentación escogieron un lote asegurando que sean fabricadas bajo las mismas condiciones. Esto incluye el color del material. El hecho de usar solo HDPE blanco permitió que la experimentación se realice satisfactoriamente, ya que al contrastar con el trabajo de Panigrahi (2010) solo obtuvo muestras con mejores propiedades en las que contenían HDPE blanco en comparación a las muestras fabricadas con material LLDPE, HDPE Y PP coloreado que en general fueron defectuosas (Figura 21).

D. Refuerzo de agave

López-Bañuelos et al. (2012) identificaron la presencia de reducida cantidad de burbujas en las muestras fabricadas a 260°C de temperatura del horno (Figura 27a); sin embargo, para las muestras fabricadas a 350°C, la cantidad de burbujas fue mucho mayor como se puede ver en la Figura 27b, además observaron que la dispersión de las fibras fue buena dando lugar a un material cuasi-isotrópico. De igual manera a otros autores, obtuvieron muestras en las que las fibras sobresalían en la parte interior del molde indicando que no hubo una correcta mezcla. López-Bañuelos et al. (2012) analizaron ambas superficies de las muestras (interna y externa) e identificaron que las muestras de LMDPE puro y moldeadas a 350°C no presentaron burbujas en ninguna de las superficies. Las muestras con mayor contenido de fibras de agave fabricadas a 350°C presentaron menor cantidad de burbujas por cm², pero con un mayor tamaño. Las muestras fabricadas a 260°C no presentaron burbujas en la superficie interna independientemente del contenido de fibras. La superficie externa si presentó un comportamiento diferente en la formación de burbujas, ya que aumentando el porcentaje de fibras, la densidad de burbujas disminuyó y también su tamaño (Tabla 5).

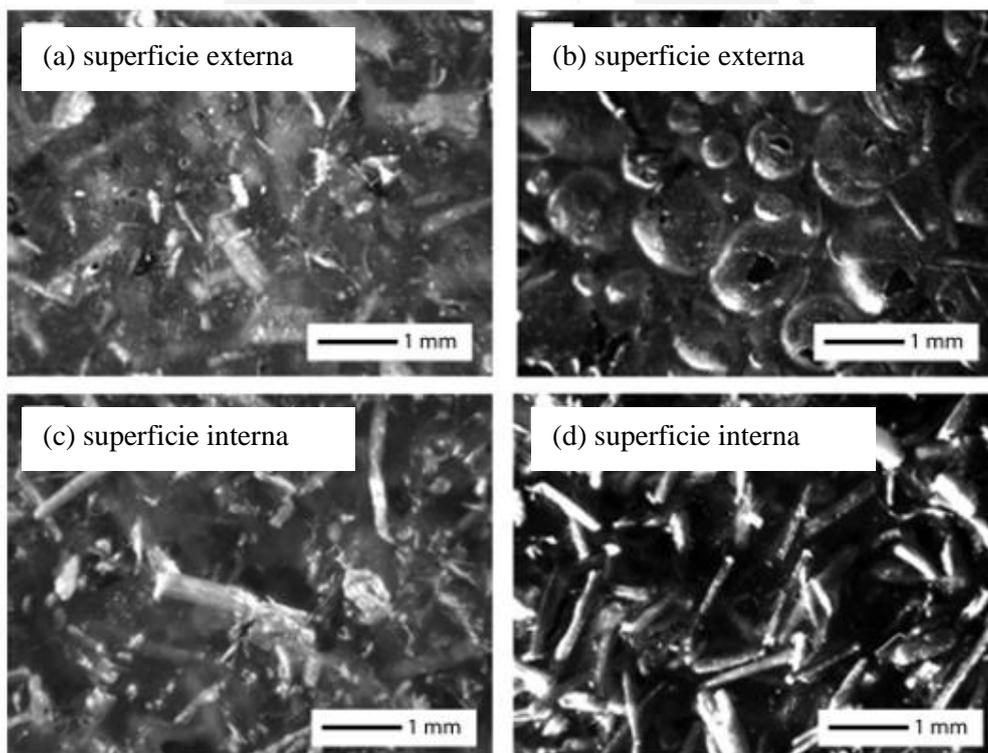


Figura 27 Superficie externa e interna del compuesto de 15% de fibras de agave fabricado a (a y c) 260°C, 20min y (b y d) 350°C y 15 min.

Tomado de “*Rotational molding of polyethylene composites based on agave fibers*”, por López-Bañuelos et al. (2012).

Tabla 5 Densidad y tamaño de burbujas de las muestras fabricadas por rotomoldeo.

Contenido de fibras (% en peso)	Tamaño de burbujas (μm)				Densidad de burbujas (burbujas/ cm^2)				Densidad (kg/m^3)	
	Interno		Externo		Interno		Externo			
	260°C	350°C	260°C	350°C	260°C	350°C	260°C	350°C	260°C	350°C
0	369	-	279	-	9,43	-	68,8	-	940	950
5	-	504	226	513	-	66,5	86,4	107	967	832
10	-	575	191	601	-	44,5	43,3	99,4	983	804
15	-	581	179	744	-	7,20	17,4	93,5	1010	891

Nota. Tomado de “*Rotational molding of polyethylene composites based on agave fibers*”, por López-Bañuelos et al. (2012).

E. Refuerzo de salvado de trigo

Hejna et al. (2020) usaron LLDPE reforzado con salvado de trigo (ver Figura 28). Las muestras presentaron una capa de plástico que recubrió la mayor parte de las fibras en la superficie interna y externa, lo que indicó que realizaron un buen procedimiento de fabricación. Existieron porosidades en la superficie de la muestra. Esto representó el mayor problema de calidad. No fue posible solucionar incluso con refuerzo de menor tamaño. La muestra que presentó mayor porosidad fue la que tenía 5% de refuerzo.



Figura 28 Muestras fabricadas con refuerzo de salvado de trigo

Tomado de “*Rotational Molding of Linear Low-Density Polyethylene Composites Filled with Wheat Bran*”, por Hejna et al. (2020).

3.2. Ensayos de tracción

Para evaluar las propiedades según el ensayo de tracción de los materiales compuesto fabricados por moldeo rotacional, todos los autores citados realizaron sus ensayos según la norma ASTM 638. Así mismo, con el fin de reportar y contrastar ordenadamente los resultados de las diferentes investigaciones, éstos se clasificaron según el refuerzo. En la primera parte se compara los autores que incorporaron la madera como refuerzo, ya que fue un constituyente común entre los trabajos. Luego se aborda los estudios con agave, linaza y otras fibras. Los resultados del ensayo de tracción de las muestras óptimas según cada autor se muestran en la Tabla D 2 del anexo D.

A. Refuerzo de Madera

Jayaraman et al. (2007) fue de los primeros autores, entre los referenciados, que realizaron el ensayo de tracción a sus probetas fabricadas con LMDPE, fibras de sisal y fibras de madera. Los trabajos anteriores no incluyeron madera como refuerzo. Como se esperaba, encontraron que el incremento de fibras reducía la resistencia la tracción, contrariamente, el módulo de elasticidad se incrementó hasta un 15% de contenido de fibras de madera y de sisal. Para ambos refuerzos el módulo fue superior a 1000 MPa (ver Figura 29).

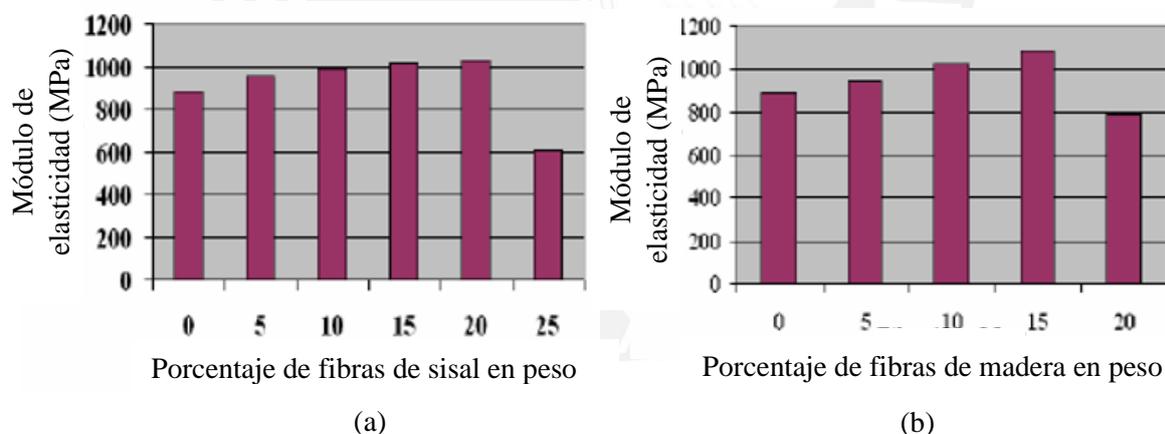


Figura 29 Módulo de elasticidad para el compuesto fabricado de LMDPE con (a) fibras de sisal y (b) fibras de madera.

Modificado de “*Natural fibre-reinforced thermoplastics processed by rotational moulding*”, por Jayaraman et al. (2007).

Ward-Perron y Rodrigue (2012b) y Cisneros-López et al. (2017a), de forma similar, usaron matriz de LMDPE reforzado con **madera de pino**. En los ensayos de tracción de Ward-Perron y Rodrigue (2012b) el módulo de elasticidad alcanzó su valor máximo con las muestras de 15% de madera de pino en todos los casos ensayados, con excepción de las muestras “D”

(50% de fibras entre 150 – 500 μm y 50% de fibras entre 500 – 1000 μm). Ver Tabla B 4 del anexo B. Las mezclas de fibras presentaron mayor incremento del módulo, destacando la muestra F y E con 215 MPa y 226 MPa (ver Tabla C 1 del anexo C). Cisneros-López et al. (2017a) obtuvieron un módulo 174 MPa con un contenido de 20% de partículas de madera de pino sin tratamiento siendo el máximo. El descenso del módulo para cantidades de 30% y 40% fue atribuida a la aglomeración de partículas por el movimiento del proceso. El módulo máximo que obtuvo entre las partículas que fueron sometidas al tratamiento con MAPE (*maleic anhydride grafted polyethylene*) fue 245 MPa con 20% de madera. Quispe (2017) también usó madera de pino; sin embargo, utilizó HDPE, polietileno de alta densidad o también llamado “polietileno lineal” según Crawford y Throne (2002); Con la metodología que planteó, consiguió fabricar un material compuesto con 1000 MPa de módulo elástico usando 15% de madera de pino sin tratamiento, tamaño de partículas M5 (297 a 500 μm) y 28 minutos de calentamiento (ver Figura 30); estos valores similares a los obtenidos por Jayaraman et al. (2007), pero muy superior a los de Ward-Perron y Rodrigue (2012b) y Cisneros-López et al. (2017a). Si bien, estos autores emplearon el mismo refuerzo no todos usaron la misma matriz y esto influyó en la diferencia de resultados.

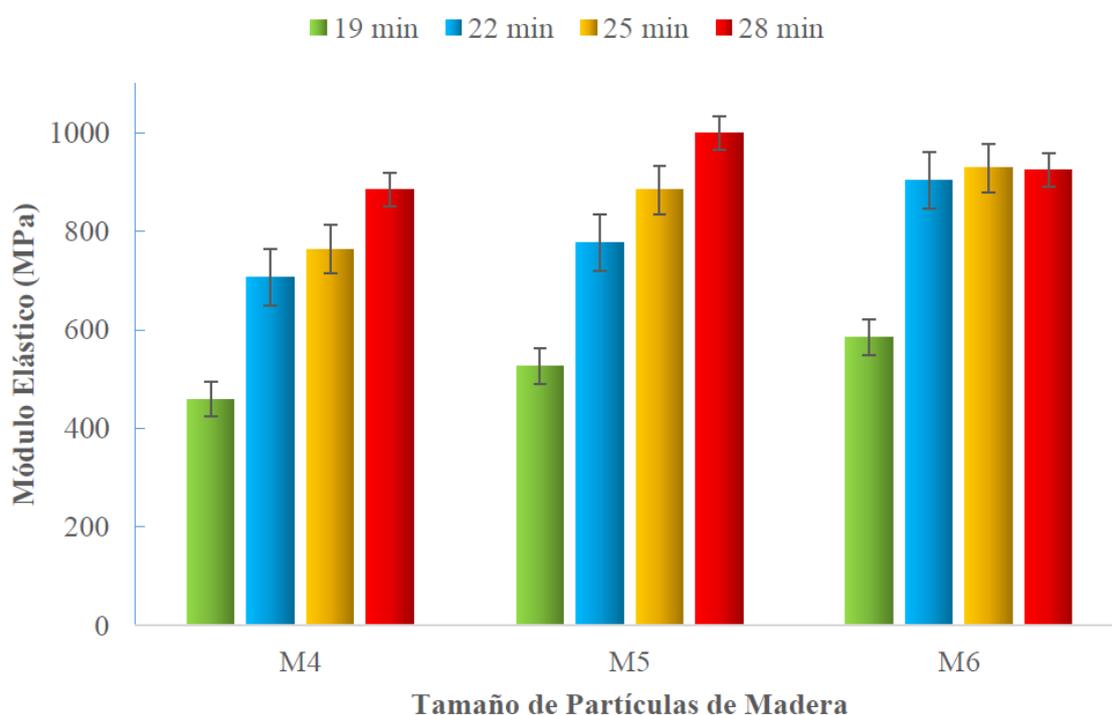


Figura 30 Módulo elástico de las muestras con 15% de refuerzo en función del tamaño de partículas de madera de pino.

Tomado de “*Estudio del sinterizado de materiales compuestos de polietileno reciclado y madera pino recuperada fabricados mediante moldeo rotacional*”, por Quispe (2017).

El LMDPE puro alcanza un módulo de 197 MPa a 172 MPa en el trabajo de Ward-Perron y Rodrigue (2012b) y Cisneros-López et al. (2017a) respectivamente, mientras que en el HDPE se encuentra entre 715 y 745 MPa según Quispe (2017). Esta diferencia en el módulo es lo que origina la variación en la magnitud de los resultados. Es importante resaltar que Jayaraman et al. (2007) también usaron LMDPE; sin embargo, el módulo de plástico puro fue superior a los 800 MPa.

En todos los trabajos la resistencia a la tracción disminuyó conforme aumentaba el contenido de partículas de pino. En el trabajo de Ward-Perron y Rodrigue (2012b) se produjo un descenso hasta alcanzar un 40% de reducción en la muestra con 20 % de madera de pino, respecto a la muestra de polietileno puro (15,6 MPa). La mejor muestra (15% de madera) alcanzó una resistencia de 9,4 MPa. Cisneros-López et al. (2017a) reportaron la existencia de una reducción desde 20,7 MPa del LMDPE puro hasta 2,9 MPa a 40% de madera. El tratamiento con MAPE no generó un mayor impacto al buscar una menor reducción de la resistencia a la tracción en las muestras con madera de pino. Solo con cantidades de 10% y 20%, la reducción fue menor comparadas con las fibras no tratadas, pero no fue tan significativo como en otros tipos de fibras. En general, para cantidades de 10 y 20% de madera, independientemente si tenían tratamiento o no, la resistencia a la tracción se mantuvo entre 15 y 20 MPa (ver Figura 35b). Con las condiciones de fabricación óptimas, Quispe (2017) obtuvo un material con 18 MPa de resistencia a la tracción perteneciente a la muestra con 15% de madera de pino.

Entre los autores que usaron partículas de **madera de arce** y LLDPE se encuentran Raymond y Rodrigue (2013a), (2013b) y Hanana y Rodrigue (2018). Raymond y Rodrigue (2013a) obtuvieron que el máximo módulo de elasticidad (237 MPa) se presentó en las muestras con 20% de madera de arce (cantidad óptima) sin tratamiento químico, lo que representa un incremento de 17% respecto del LLDPE puro (202 MPa). Hanana y Rodrigue (2018) reportaron que las muestras con mejor módulo fueron obtenidas con la mezcla de fibras de diferentes tamaños. El módulo a 20% de madera sin tratamiento fueron 238 MPa y 261 MPa, que representan el 37% y 50% mayor que el LLDPE puro (174 MPa) y fue conseguido en las muestras con código S20M75U (75% de fibras de tamaño “M” y 25% de “S”) y S20L75U (75% de fibras de tamaño “L” y 25% de “S”) respectivamente. El uso de tratamiento químico en las fibras permitió un incremento en el módulo respecto a las fibras no tratadas con MAPE. Obtuvieron 246 y 271MPa. Esta tendencia de los resultados del módulo bajo tratamiento con MAPE fue similar a las obtenidas por Cisneros-López et al. (2017a).

Raymond y Rodrigue (2013b) incorporaron un agente espumante (0,1% en peso) en sus muestras. Reportaron que las mejores propiedades las obtuvieron a 20% de refuerzo. Con dicha cantidad de madera, el módulo fue 158 MPa que representó un incremento de 24% respecto al material sin refuerzo (127 MPa) como se puede ver en la Figura 31. A pesar de fabricar un material compuesto espumado, el impacto en el módulo fue el mismo. El incremento de madera vuelve más rígido el material.

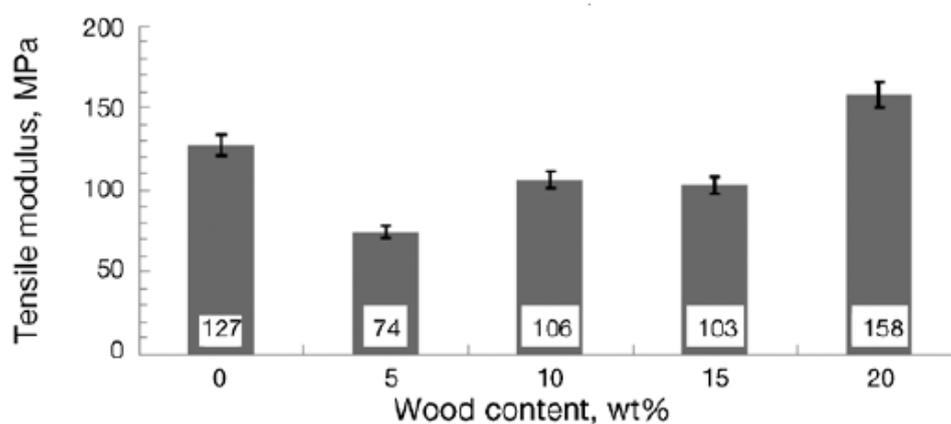


Figura 31 Módulo de elasticidad de los compuestos con espumas y madera de arce.

Tomado de “*Foams and Wood Composite Foams Produced by Rotomolding*”, por Raymond y Rodrigue (2013b)

Posterior al análisis de los resultados de la resistencia a la tracción, Raymond y Rodrigue (2013a) identificaron que a cantidades mayores a 20% de madera de arce, la reducción de esta propiedad es mucho mayor, ya que supera el 25%, i.e., a 25% de madera la resistencia es (9,2 MPa) que representa una reducción de 42,5% respecto a 16 MPa del LLDPE. A 20% de madera, que representó su mejor muestra, la resistencia fue 11,8 MPa. Hanana y Rodrigue (2018) hallaron que el uso de combinaciones entre el tamaño de fibras permite obtener una menor reducción de la resistencia. En los ensayos a las muestras S20M75U y S20L75U determinaron que presentan una resistencia de 15% y 33% mayor al compararlas con las muestras con la misma cantidad de madera, pero con 100% de partícula de tamaño “M” y “L” respectivamente. Sin embargo, son aún menores a la resistencia del LLDPE puro (15,5 MPa). El uso de tratamiento con MAPE en las fibras les permitió conseguir un incremento de hasta 56% y 42% a las muestras S20M75T y S20L75T respectivamente, respecto a su contraparte no tratada. En el material espumado fabricado por Raymond y Rodrigue (2013b), la resistencia (8,6 MPa) a 20% de madera de arce solo presenta un descenso de 21% respecto del material sin refuerzo (10,9 MPa) mostrado en el gráfico de la

Figura 32. Los autores indican que obtuvieron un comportamiento constante lo que les indicó que existió un buen contacto entre la madera y la interface de la matriz.

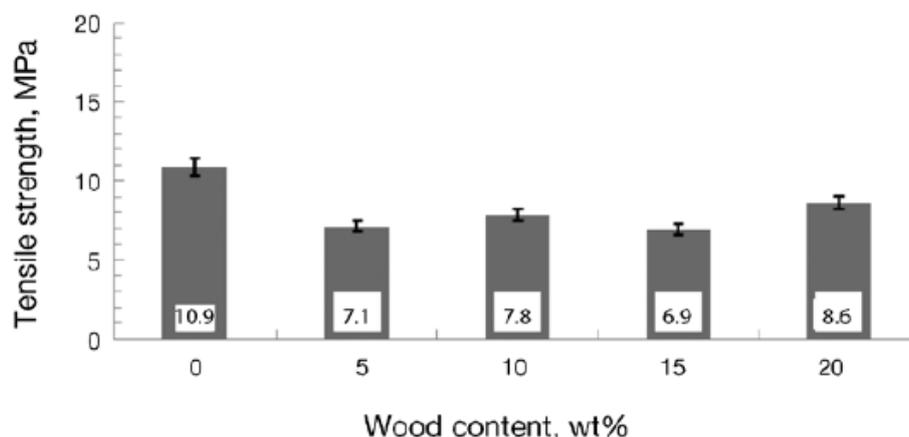


Figura 32 Resistencia a la tracción de los compuestos con espumas y madera de arce.

Tomado de “*Foams and Wood Composite Foams Produced by Rotomolding*”, por Raymond y Rodrigue (2013b).

Arribasplata (2016) utilizó **madera capirona** con matriz de HDPE recuperado. El material compuesto con propiedades óptimas lo consiguió con 15% de madera a 25 minutos en el horno a 300°C. El módulo elástico, obtenido a esas condiciones, fue 1072 MPa (Figura 33) y la resistencia a la tracción fue 16,7 MPa.

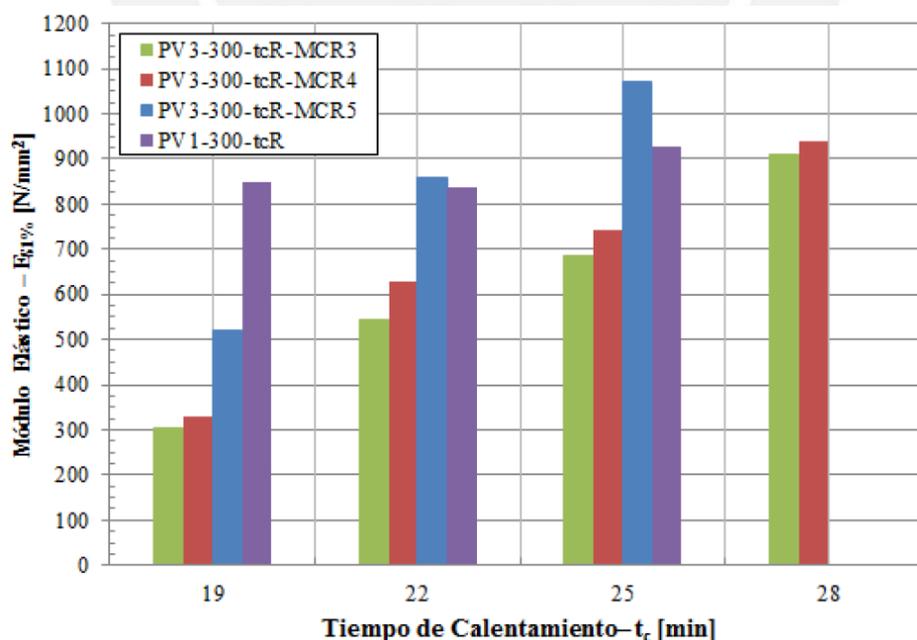


Figura 33 Módulo de elasticidad de los diferentes materiales usados por Arribasplata.

Tomado de “*Estudio del sinterizado de materiales compuestos de polietileno reciclado y madera capirona recuperada fabricados mediante moldeo rotacional*”, por Arribasplata (2016).

B. Refuerzo de agave

Entre los autores que realizaron el ensayo de tracción para caracterizar el material compuesto con matriz de LMDPE y refuerzo de agave tenemos los trabajos de López-Bañuelos et al. (2012), Cisneros-López et al. (2016) y (2017a). Similar a lo reportado por otros autores, para López-Bañuelos et al. (2012) el módulo de elasticidad fue mayor en todos los casos evaluados, comparado con el material de 100% LMDPE. Identificaron un incremento máximo de 65% en el módulo para el caso de las muestras de 10% de fibras de agave, que representó la concentración óptima. Entre estas muestras (10% de fibras de agave) la que mejor módulo presentó fue la que tenía una mezcla de fibras de 50 y 100 mesh. El módulo de elasticidad para las muestras con 10% de agave, sin tratamiento químico, se encontró entre 410 MPa y 440 MPa, obtenido a partir del gráfico de la Figura C 1 del anexo C. Cisneros-López et al. (2016) obtuvieron el módulo máximo (196 MPa) con 10% de agave no tratado, lo que representa un incremento de 14% respecto al módulo de LMDPE (172 MPa). Analizando los resultados de las muestras fabricadas con fibras tratadas con NaOH y MAPE obtuvieron que el máximo módulo se presentó a 20% de agave (263 MPa). Esto representó un incremento de 53% y 41% respecto al LMDPE y al compuesto con fibras sin tratar, respectivamente. En el trabajo de Cisneros-López et al. (2017a) con fibras no tratadas, el módulo máximo fue 196 MPa y correspondió al material óptimo con 10% de fibras de agave. De forma similar a su experimentación con partículas de pino, las fibras de agave tratadas con MAPE permitieron aumentar aún más el módulo. Para este caso el máximo módulo (262 MPa) fue obtenido a 20% de fibras tratadas (ver Figura 35a).

La reducción del esfuerzo de tracción, hallada por López-Bañuelos et al. (2012), fue de hasta 30% para el caso de 15% de fibras de agave con dimensión de 50 mesh. Ver Figura C 1 del anexo C. Adicionalmente, reportan que se consigue mejores propiedades al usar combinaciones entre partículas de menor y mayor tamaño, ya que esto genera mayores posibilidades de que se acomoden, generando una mejor compactación. En la evaluación de los resultados, con las fibras no tratadas, del trabajo de Cisneros-López et al. (2016) obtuvieron un descenso permanente en la resistencia a la tracción a medida que incrementa el contenido de fibras; sin embargo, en la evaluación de los resultados con fibras tratadas con NaOH y MAPE obtuvieron un ligero incremento de la resistencia a la tracción en las muestras con 10% y 20% de agave (Figura 34). El LMDPE tuvo una resistencia de 20,7 MPa. El material compuesto con 20% de fibras sin tratamiento presentó 17,4 MPa (reducción de 16%) y luego de ser tratadas alcanzó 23,8 MPa (incremento de 15%). Cisneros-López et al. (2017a)

consiguieron resultados similares en el comportamiento de las muestras con fibras tratadas (Figura 35b). A 20% de partículas de agave con tratamiento con NaOH y MAPE, se incrementó la resistencia (28,8 MPa) en 37% respecto a la resistencia (17,4 MPa) de las muestras con fibras sin tratar, superando al LMDPE puro (20,7 MPa).

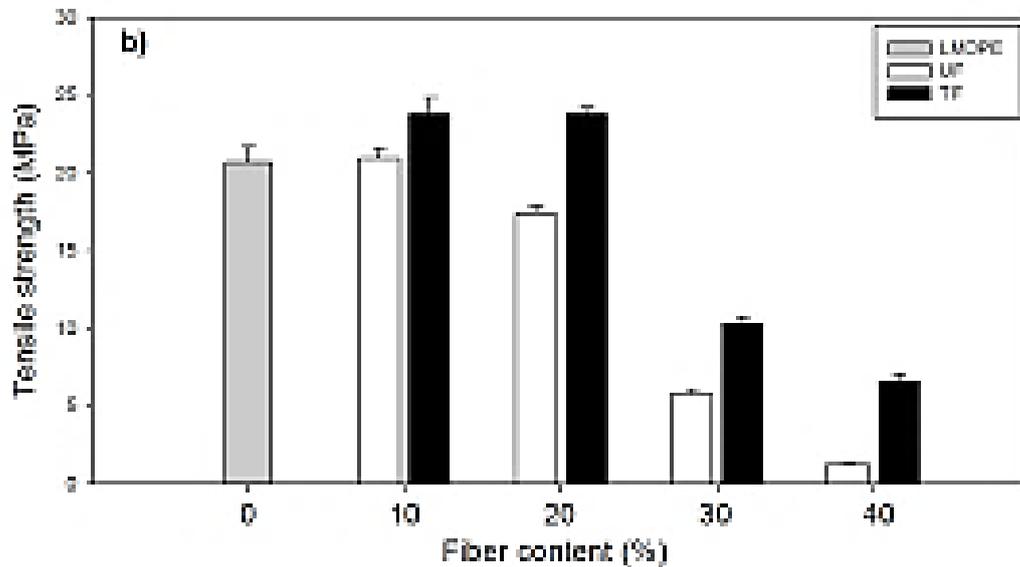


Figura 34 Resistencia a la tracción del compuesto de LMDPE y fibras de agave. Incremento en la resistencia de las muestras con fibras tratadas con NaOH y MAPE.

Tomado de “*Fiber surface treatment as an approach to increase fiber content in agave-LMDPE composites produced by rotomolding*”, por Cisneros-López et al. (2016)

Cisneros-López et al. (2017b) y (2018) emplearon **PLA** como matriz reforzada con fibras de agave sin tratamiento. En ambos trabajos indican que 10% de fibras permiten obtener las mejores propiedades mecánicas. El módulo de elasticidad, con la proporción de fibras mencionada, presentó un ligero incremento de 1908 a 1993 MPa, comparado con el módulo del PLA. Los autores explican que el poco incremento se debe a la porosidad formada y la incompatibilidad entre los constituyentes. La resistencia a la tracción decrece casi por completo cuando se agrega 40% de fibras (de 59 MPa a 6 MPa). Cisneros-López et al. (2018) compararon los resultados de las muestras fabricadas por moldeo rotacional con muestras elaboradas por moldeo por compresión. El módulo incrementa considerablemente en el moldeo por compresión. Existió un aumento de hasta 14% con el uso de 30% de fibras (de 2030 MPa, correspondiente al PLA, a 2311 MPa). Realizando una comparación entre la reducción de la resistencia a la tracción con el mencionado para moldeo rotacional obtuvieron que a 40% de fibras existió una reducción de 53% (de 60 MPa, para el PLA, a 29 MPa).

C. Refuerzo de coco, agave y pino

Cisneros-López et al. (2017a) no solo usaron fibras de agave y pino, también fibras de coco y realizaron una comparación entre los 3 tipos de refuerzo (ver Figura 35).

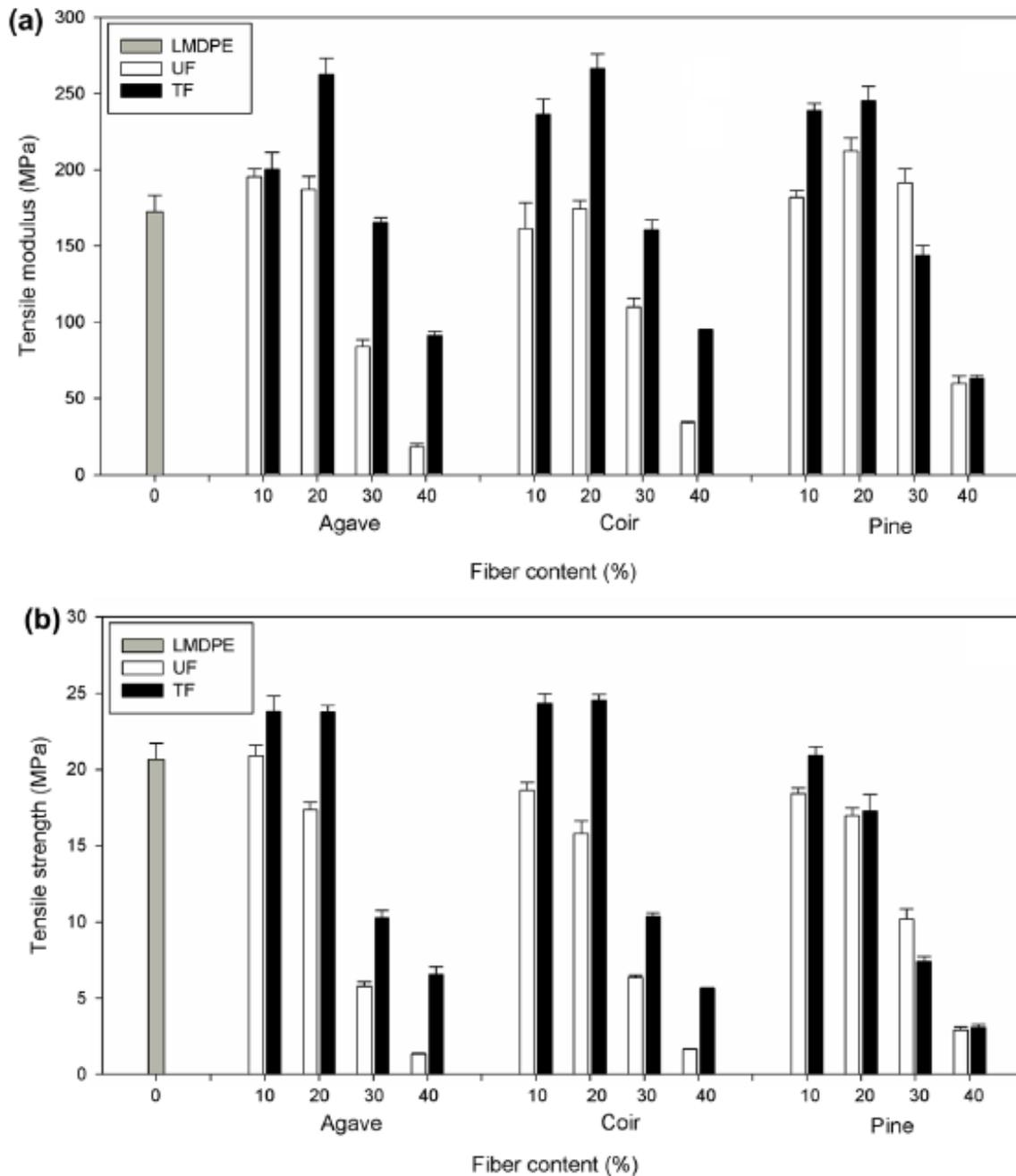


Figura 35 (a) Módulo de elasticidad y (b) resistencia a la tracción de del material compuesto fabricado con fibras de agave, coco y pino.

Tomado de “*Effect of fiber content and surface treatment on the mechanical properties of natural fiber composites produced by rotomolding*”, por Cisneros-López et al. (2017a).

El módulo fue superior para las muestras fabricadas con pino en comparación a las de agave y coco. Todas sin tratamiento. El tratamiento con NaOH y MAPE permitió obtener un módulo mucho mayor al de los casos sin tratamiento con excepción de las muestras con pino, cuyo incremento no fue considerable, i.e., las muestras con 40% de fibras agave y coco tratadas sufrieron un incremento en la resistencia a la tracción, respecto a las fibras sin tratamiento, de 391% y 242% respectivamente. Para un contenido de 20% de fibras de agave y coco tratadas existió un incremento en la resistencia a la tracción de 37% (de 17,4 a 28,8 MPa) y 55% (de 18,8 a 24,5 MPa) respecto a las muestras sin tratamiento de las fibras.

D. Refuerzo de linaza

Wang et al. (2004) y Panigrahi (2010) utilizaron fibras de linaza como refuerzo. Además, usaron matriz de polietileno y tratamiento en las fibras (ver Tabla 2). Wang et al. (2004) solo obtuvieron la resistencia a la tracción de sus muestras. Comparando los resultados de las muestras con y sin tratamiento, los resultados fueron superiores en las muestras con tratamiento, independientemente del tipo de los compuestos químicos usados. Aseguran que esto fue resultado de una mejora en la adhesión fibra-matriz y en la superficie rugosa de las fibras. En los ensayos de las muestras de 10% de fibras de linaza con matriz de LLDPE, HDPE y HDPE/LLDPE, consiguieron una resistencia máxima de 16,13 MPa, 17,43 MPa y 17,12 MPa, con el tratamiento de benzoilación, silano y peróxidos, respectivamente.

Tabla 6 Resistencia a la tracción y Módulo de elasticidad de las muestras en buenas condiciones de Panigrahi.

Muestra	Composición	Tamaño de fibras (mm)	Esfuerzo de tracción Max. (MPa)	Módulo (MPa)
1	85% BMW + 10% fibras de linaza + 5% de desmoldante (no extruido)	0,5	1,4 ± 0,1	60 ± 8
5	85% BMW + 10% fibras de linaza + 5% de desmoldante (extruido)	1	5,1 ± 0,6	240 ± 40
7	100% BMW	1	3,6 ± 0,4	140 ± 20

Nota. Modificado de “*Mechanical performance of recycled thermoplastic and flax fiber based composite*”, por Panigrahi (2010).

Panigrahi (2010) realizó ensayos de tracción solo a tres de sus moldes, ya que el resto presentó propiedades mecánicas deficientes y fueron descartadas en la inspección visual. Por un lado, se observa, de los resultados de la Tabla 6, que la muestra 5, con 10% de fibras de linaza con tratamiento químico y extruidos, presenta mejor esfuerzo de tracción (5,1 MPa) y

mayor módulo de elasticidad (240 MPa). Ambas propiedades mostraron un incremento de hasta 41,6% y 71,4% respectivamente, comparándolas con la muestra de 100% de BMW (grupo que contiene solo HDPE blanco reciclado). Por otro lado, el molde 1, presento propiedades inferiores a la referencia (molde 7). El esfuerzo de tracción se redujo a 39% y el módulo a 42,8%. Panigrahi (2010) señaló que la extrusión realizada permitió mejor distribución de los constituyentes, evitando segregación de las fibras, lo que mejoró las propiedades.

E. Refuerzo de plátano y abacá

Ortega et al. (2013) utilizaron refuerzo de 5% de fibras de plátano y abacá con tratamiento con NaOH. La resistencia se redujo hasta 43%, de 16,1 MPa a 9,1 MPa respecto al polietileno, en la muestra 6 elaborada con fibras tratadas de abacá y dos capas. El módulo incremento hasta en 188% en las muestras 1 y 5, con fibras de abacá y plátano, respectivamente, al ser comparadas con el módulo del polietileno (1,6 GPa). Ver Tabla C 2 del anexo C.

F. Refuerzo de salvado de trigo

Hejna (2020) reportó que las mejores propiedades se presentan con cantidades de 2,5% y 5% de salvado de trigo en las muestras. La resistencia para estos porcentajes de refuerzo se mantiene entre 16 y 18 MPa, que es el mismo rango al que pertenece la resistencia del polietileno usado. Es decir, no existe mucha variación al agregar este refuerzo. Atribuyen esa magnitud de sus resultados a la porosidad que se forma al incorporar el salvado de trigo.

3.3. Ensayo de flexión

Los resultados del ensayo de flexión presentados a continuación han sido realizados por los autores respectivo, siguiendo las indicaciones de la norma ASTM D790. Para reportar y contrastar los resultados de las diferentes investigaciones se clasificó según el refuerzo usado. Los resultados del ensayo de flexión de las muestras optimas según cada autor se muestran en la Tabla D 3 del anexo D.

A. Refuerzo de madera

McDowell et al (2001) utilizaron **fibras y polvo de madera** como refuerzo de la matriz de polietileno. En sus resultados del ensayo se observa que en las muestras fabricadas con 2,5 y 10% de partículas de madera se observa que obtuvieron valores máximos en el módulo cercanos a los 700 MPa. Por otro lado, el módulo en las muestras fabricadas con 2,5% de fibras de madera fue muy cercano a 800 MPa, mientras que las muestras que contenían 10% de fibras les permitió registrar un valor superior a los 700 MPa y no mayor a los 800 MPa. Para cantidades mayores a 10%, la reducción del módulo a la flexión del compuesto fue

considerable. La referencia usada por McDowell et al (2001) fue el módulo de las muestras de 100% polietileno fabricadas mediante moldeo rotacional. Existe una discrepancia entre sus resultados, ya que debería registrar un mismo valor para la referencia, ya que no contiene madera; sin embargo, en los resultados de las muestras con fibras de madera, reporta un módulo superior a 800 MPa y en los resultados con partículas de madera menor a los 600 MPa.

Ward-Perron y Rodrigue (2012b) y Cisneros-López et al. (2017a) realizaron ensayos de flexión al material con matriz de LMDPE reforzado con partículas de **madera de pino**. El módulo máximo hallado por Ward-Perron y Rodrigue (2012b) fue para las muestras con 15% de fibras de madera de pino. El comportamiento es el mismo que el módulo hallado por tracción, ya que las muestras con mezcla de fibras fueron las que destacaron, alcanzando hasta 22% mayor que el polietileno puro (554 MPa), como fue el caso de las muestras E (670 MPa) y G (676 MPa). Ver Tabla C 1 del anexo C. Además, indicaron que las propiedades de flexión incrementarían conforme se incrementa el contenido de refuerzo, pero solo hasta que exista suficiente polímero de la matriz para recubrir el refuerzo por completo. Esto no ocurrió en las muestras con 20% de madera de pino como se presentó en la Figura 22. Cisneros-López et al. (2017a) obtuvieron un módulo máximo (563 MPa) con 20% de partículas de pino sin tratamiento y eso solo representa un pequeño incremento respecto al módulo del LMDPE puro (533 MPa). El tratamiento con NaOH y MAPE en las partículas de pino no generó un incremento en el módulo (Figura 37a). La resistencia a la flexión se comporta de manera similar a la resistencia a la tracción cuando se agrega mayor cantidad de refuerzo. Las muestras con contenido de 30% y 40% de madera presentaron una mayor resistencia en comparación con otras fibras que también fueron evaluadas (agave y coco). Adicionalmente, el tratamiento de las partículas de pino tampoco generó un incremento en la resistencia. Ver Figura 37b.

Raymond y Rodrigue (2013a), (2013b) y Hanana y Rodrigue (2018) usaron matriz de LLDPE y refuerzo de **madera de arce**. Luego de los ensayos de flexión de Raymond y Rodrigue (2013a) concluyeron que la porosidad y defecto en los moldes no son de mucha importancia como en el caso del ensayo de tracción. A 20% de partícula de madera de arce sin tratamiento químico obtuvieron el mayor módulo a la flexión (827 MPa) representando un incremento de 35% respecto a el LLDPE puro (612 MPa). Los mejores resultados de Hanana y Rodrigue (2018) fueron conseguidos en las muestras con combinaciones en el tamaño de partículas. Las muestras destacadas fueron S20M75U y S20L75U con una razón de 75/25 en el tamaño de fibras. Ambos con 20% de fibras de madera sin tratamiento. El módulo

de la muestra con 100% de partículas tamaño “M” fue 823 MPa, al usar la razón de fibras mencionada (muestra S20M75U) el módulo fue 937 MPa y al someter a tratamiento químico con MAPE se incrementó a 942 MPa. De forma similar, el módulo de la muestra con 100% de partículas tamaño “L” fue 867 MPa, al usar la razón de fibras mencionada (muestra S20L75U) el módulo fue 968 MPa y luego del tratamiento se incrementó a 1043 MPa. En todos los casos el módulo del compuesto fue superior al de LLDPE puro (606 MPa). Los autores resaltan que con un contenido de 30% de fibras se pierde el beneficio del uso de la mezcla de diferentes tamaños de las partículas. Raymond y Rodrigue (2013b) utilizaron un agente espumante. La muestra optima con 20% de madera de arce presento un módulo (655 MPa) 62% mayor al del molde de material espumado sin refuerzo (408 MPa) y cercano al módulo del molde de LLDPE sin agente espumante (680 MPa).

B. Refuerzo de Agave

Entre los autores que realizaron el ensayo de flexión para caracterizar el material compuesto con matriz de LMDPE y refuerzo de agave tenemos los trabajos de López-Bañuelos et al. (2012), Cisneros-López et al. (2016) y (2017a). Debido a que durante el modelo rotacional se genera una separación entre las partículas, generando diferencias entre las superficie interna y externa del molde, López-Bañuelos et al. (2012) ensayaron ambas superficies del molde fabricado. Determinaron que, de manera similar a los resultados de sus ensayos de tracción, el módulo obtenido por flexión fue mayor para los moldes fabricados con 10 % de fibras de agave sin tratamiento para cada grupo del mismo tamaño de fibras (mesh 50, mesh 50-100, mesh 100), como se muestra en la Figura 36a. Además, identificaron que el incremento es mayor (21%) para las muestras fabricados con fibras más cortas (mesh 100); también indicaron que solo el incremento del contenido de fibras ocasiona la reducción de la resistencia a la flexión y que el tamaño de las fibras no genera impacto en esta propiedad (Figura 36b). Cisneros-López et al. (2016) solo determinaron un incremento máximo del módulo a la flexión, alrededor de 600 MPa, con 10% de madera sin tratamiento químico y con el uso de NaOH y MAPE consiguieron incrementar hasta 20% el módulo respecto al LMDPE. Ver Figura C 2a del anexo C. La resistencia a la flexión de las muestras con fibras sin tratamiento químico no presentó ninguna particularidad. Con 10% de fibras sin tratamiento consiguieron una resistencia similar a la del LMDPE. El uso del tratamiento del refuerzo si generó un mayor incremento en la resistencia conforme aumentaba la cantidad de refuerzo. Respecto a la resistencia a la flexión de las muestras con partículas sin tratamiento químico, el uso de 10% de refuerzo tratado les permitió un incremento mínimo, pero superior al de LLDPE;

con 20% de refuerzo el incremento fue de 17% (de 20,5 MPa a 24 MPa); con 30% obtuvieron un aumento de 104% (de 4,8 MPa a 9,8 MPa) y a 40% el incremento fue de 240% (de 1,5 MPa a 5,1 MPa). Ver Figura C 2b del anexo C. Cisneros-López et al. (2017a) obtuvieron resultados similares a los reportados en su trabajo previo. Las muestras con 10% de agave fueron las que presentaron un mayor incremento en el módulo. Con 30% de fibras tratadas con NaOH y MAPE obtuvieron un módulo a la flexión 116% mayor respecto a las muestras del porcentaje en contenido, pero sin tratamiento de las fibras (Figura 37a). Respecto a la resistencia a la flexión, 10% fue la cantidad de agave que resaltó entre las muestras por mantener su valor cercano al de LMDPE (23,1 MPa). Ver Figura 37b. El comportamiento de los resultados de resistencia de las muestras con tratamiento químico fue el mismo que el descrito por Cisneros-López et al. (2016).

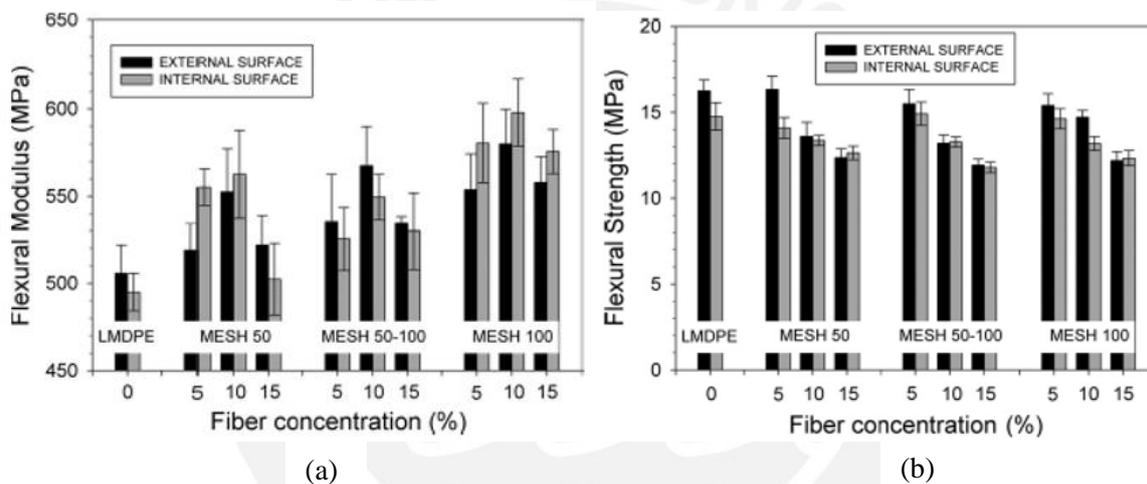


Figura 36 (a) Módulo y (b) resistencia a la flexión según la concentración de fibras de agave y sus tamaños.

Tomado de “*Rotational molding of polyethylene composites based on agave fibers*”, por López-Bañuelos et al. (2012).

Cisneros-López et al. (2017b) y (2018) usaron **PLA** con fibras de agave. El contenido de refuerzo óptimo identificado por Cisneros-López et al. (2017b) fue 10%. Con este porcentaje de fibras de agave obtuvieron un ligero incremento en el módulo (de 3511 a 3594MPa) respecto al PLA. La resistencia a la flexión, al mismo contenido de fibras, fue cercano a los 70 MPa. En el trabajo de Cisneros-López et al. (2017b) donde se comparó los resultados de moldeo rotacional con los de compresión se obtuvo un módulo de 3936 MPa, en las muestras con 10% de refuerzo. Similar al caso del ensayo de tracción, se esperaba resultados superiores en las propiedades debido a la diferencia en la naturaleza de los procesos.

C. Refuerzo de Coco, agave y pino

Cisneros-López et al. (2017a) realizaron una comparación de sus resultados del ensayo de flexión realizado a las muestras con refuerzo de madera de pino, agave y fibras de coco.

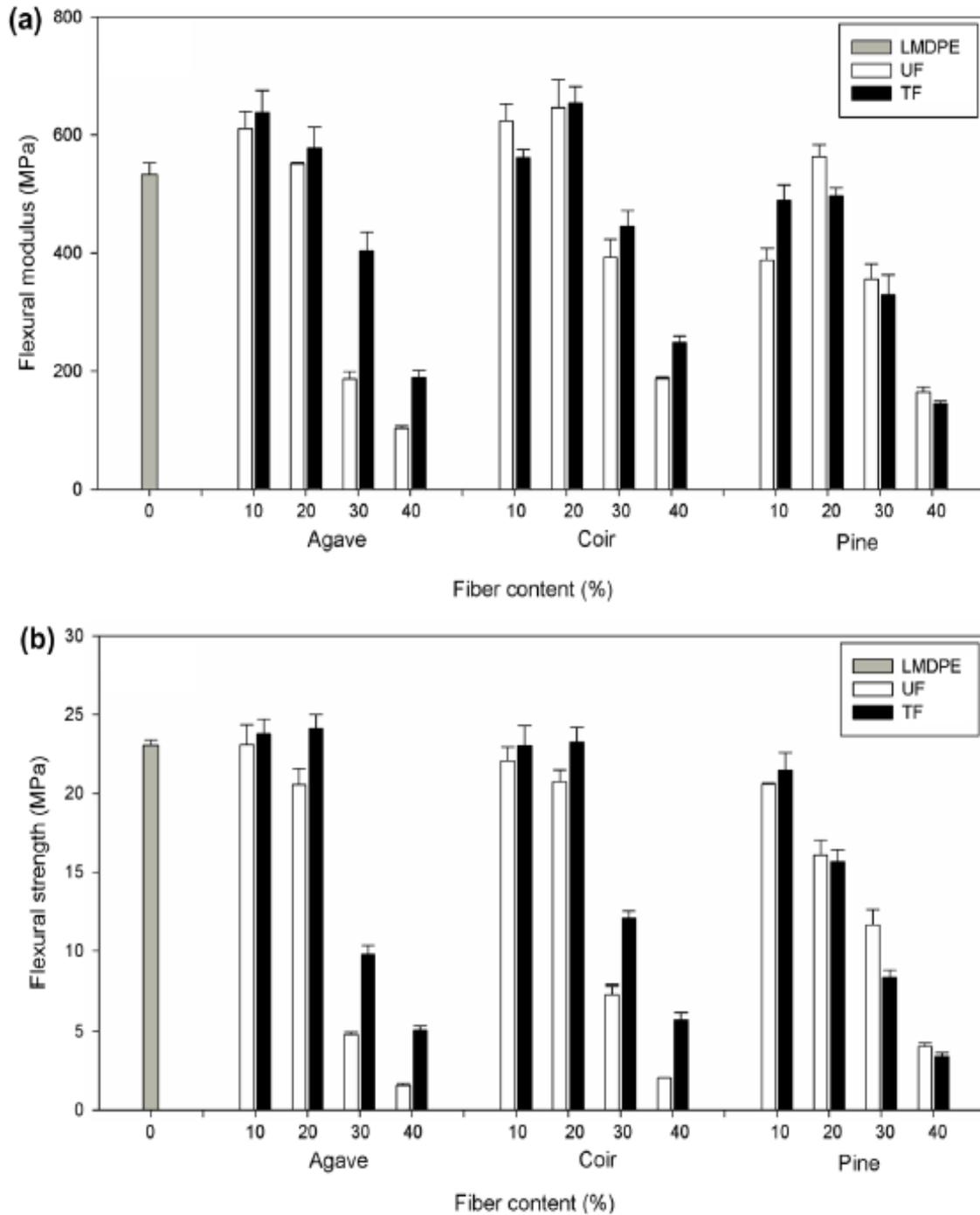


Figura 37 Comparación entre los resultados del ensayo de flexión del material compuesto reforzado con: agave, coco y pino.

Tomado de "Effect of fiber content and surface treatment on the mechanical properties of natural fiber composites produced by rotomolding", por Cisneros-López et al. (2017a).

El refuerzo sin tratamiento que les permitió obtener el mayor módulo fueron las fibras de coco. La muestra con contenido de 20% de fibras de coco sin tratar obtuvo 646 MPa siendo el máximo módulo (21% mayor respecto a 563 MPa de LMDPE) y que incremento hasta 655 MPa cuando se le realizó el tratamiento químico con NaOH y MAPE, superando a las fibras de agave y pino (Figura 37a). El tratamiento químico afecto favorablemente en el módulo de las muestras con agave en comparación a las de coco y pino, y es mucho más evidente a mayores cantidades de refuerzo. Comparando las muestras con 30% de refuerzo respecto a las fibras no tratadas, el uso de tratamiento incrementó el módulo en 116% en las muestras con agave; en las que contenían fibras de coco tratadas el incremento fue de 13% y en las muestras con pino el módulo se redujo. La resistencia a la flexión se mantuvo próximo al de LMDPE (23,1 MPa) para las muestras entre 10 y 20% de agave y coco (21,5 MPa) sin tratamiento. A mayores cantidades de refuerzo (30 y 40%) las partículas de pino son las que presentan mayor resistencia respecto a las muestras con agave y coco. El tratamiento generó una mejora en la resistencia de 17% y 11% en las muestras de 20% de agave (20,5 MPa) y coco (20,8 MPa) sin tratamiento respectivamente, pero no en las muestras con pino (Figura 37b).

D. Refuerzo de linaza

Panigrahi (2010) fabricó muestras con matriz de plástico reciclado y refuerzo de linaza. En los ensayos realizados a los 3 moldes seleccionados (1, 5 y 7), Tabla 7, se observa que la muestra 5, con 10% de fibras de linaza y plástico extruidos, presenta mejor esfuerzo de flexión (11,1 MPa) y mayor módulo (333 MPa). Ambas propiedades mostraron un incremento de hasta 52% y 82% respectivamente, en base a la muestra de 100% de BMW (grupo que contiene solo HDPE blanco reciclado). El molde 1, presento propiedades inferiores a la referencia (molde 7). El esfuerzo de flexión se redujo a 48% y el módulo a 54,6%. Panigrahi (2010) reitera que la extrusión realizada permitió mejor distribución de los constituyentes, evitando segregación de las fibras, lo que genero mejores propiedades.

Tabla 7 Resistencia a la flexión y módulo de las muestras elaboradas por Panigrahi.

Muestra	Composición	Tamaño de fibras (mm)	Esfuerzo de flexión Max. (MPa)	Módulo (MPa)
1	85% BMW + 10% fibras de linaza + 5% de desmoldante (no extruido)	0,5	3,5 ± 0,3	100 ± 10
5	85% BMW + 10% fibras de linaza + 5% de desmoldante (extruido)	1	11,1 ± 0,5	333 ± 40
7	100% BMW	1	7,3 ± 0,3	183 ± 20

Nota. Tomado de “*Mechanical performance of recycled thermoplastic and flax fiber based composite*”, por Panigrahi (2010).

E. Refuerzo de plátano y abacá

Ortega et al. (2013) lograron obtener 436,5 MPa en el módulo de flexión con el uso de refuerzo de fibras de plátano (muestra 1), ver Tabla B 5 del anexo B, lo que representa un incremento de 85% respecto al polietileno; sin embargo, la fabricación fue hecha en 2 capas. El módulo máximo entre las muestras reforzadas con abacá sin tratamiento fue 608,5 MPa y fue superior al de más muestra que usaron fibras tratadas con NaOH (296,6 MPa y 518,4 MPa). Ver Tabla C 2 del anexo C. El tratamiento no aportó beneficio al ser usado con ese refuerzo. Entre las muestras con 3 capas, las que tenían refuerzo con abacá presentaron mejor módulo (701,1 MPa) comparando con la que contenían fibras de plátano (577,9 MPa) y las que tenían abacá tratada (503,1 MPa). La resistencia a la tracción de las muestras con plátano fue 18,6 MPa. Entre las muestras con abacá, identificaron que el tratamiento tampoco genera una mejora. Sin tratamiento el resultado se encuentra entre 25 MPa y con tratamiento alrededor de 11,6 y 16 MPa.

3.4. Ensayos de impacto

A continuación, se presentan los resultados del ensayo de impacto realizados por los autores. Para reportar y contrastar los resultados de las diferentes investigaciones se clasificó según el refuerzo usado. Los resultados del ensayo de impacto de las muestras optimas según cada autor se muestran en la Tabla D 4 del anexo D.

A. Refuerzo de madera

La adición de refuerzo vuelve al material compuesto más rígido, como lo comprobaron los resultados de ensayos de tracción y flexión realizado por autores referenciados, por lo que con una mayor cantidad de fibras naturales absorberá cada vez menos energía. McDowell et al (2001) utilizaron **fibras y polvo de madera** como refuerzo de la matriz de polietileno. Reportaron que con un contenido de 10% de fibras madera existió una reducción de 72% de la energía absorbida. La adición de 10% de madera pulverizada generó una reducción similar (74%) a la de la muestra con fibras. Ambos porcentajes obtenidos respecto a los resultados de polietileno.

En los ensayos realizados por Jayaraman et al. (2007) a sus probetas hechas con LMDPE y fibras de madera o sisal, según ASTM D611, identificaron la existencia de un incremento en la energía absorbida a medida que se aumenta el porcentaje de fibras. Esto fue un comportamiento opuesto a los resultados de McDowell et al (2001). Este incremento es mayor en el material reforzado con fibras de madera (Figura 38). Además, reportan que con 5% de

sisal en las muestras existió una mejora de 17,5% en la resistencia al impacto respecto al LMDPE. Con 10% de fibras de madera obtuvieron un incremento de 47% (de 85 J/m a 125 J/m).

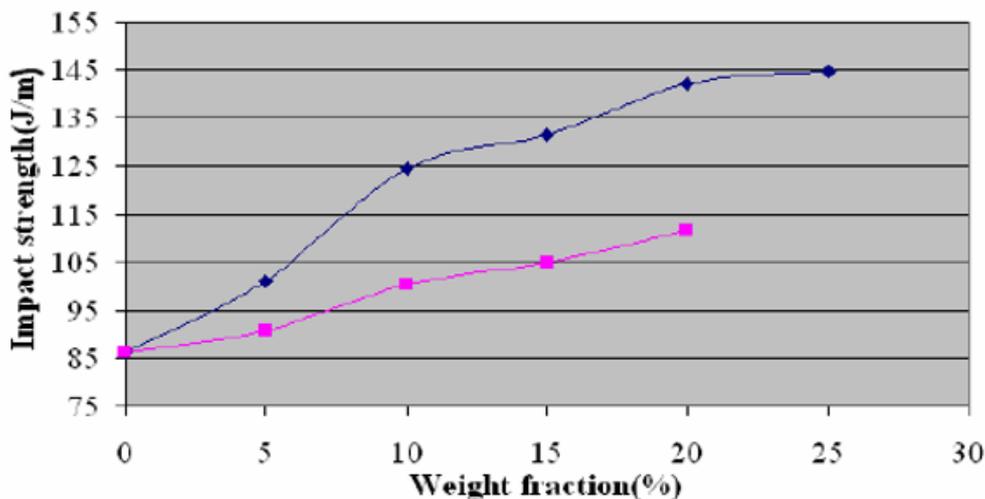


Figura 38 Energía de impacto del compuesto de LMDPE – fibras de sisal (◆) y LMDPE – fibras de madera (■).

Tomado de “*Natural fibre-reinforced thermoplastics processed by rotational moulding*”, por Jarayaman et al. (2007).

Ward-Perron y Rodrigue (2012b) y Cisneros-López et al. (2017a) realizaron ensayos de impacto según ASTM D256 (Izod) y ASTM D6110 (Charpy) respectivamente; sin embargo, ambos utilizaron **madera de pino** y matriz de LMDPE. La reducción en la energía absorbida al impacto encontrada por Ward-Perron y Rodrigue (2012b) en las probetas sin entalla fue de hasta 90% en comparación a la referencia de polietileno puro. Además, identificaron que un mayor tamaño de las fibras permite mejorar la resistencia al impacto. Esto lo comprobaron al comparar los ensayos realizados con las fibras de un mismo tamaño. Ver Tabla B 4 del anexo B. A partir de los resultados de la muestra “B” (500-1000 μm), observaron que la energía es superior, en todas las pruebas con diferente contenido de madera, respecto a las muestras “A” con un tamaño de partículas entre 150-500 μm . las muestras “C” (1000-1700 μm) eran superior a las “B”. El uso de mezcla de diferentes tamaños de fibras mejoró la resistencia al impacto en comparación a las muestras que contenían solo fibras de un tamaño. Este fue el caso de las muestras “D” y “E”. La muestra que les permitió obtener mejores propiedades fue la que contenía 15% de madera pino sin tratamiento. Ver Tabla C 1 del anexo C. Cisneros-López et al. (2017a) determinaron que con el uso de fibras de pino no se obtuvo ninguna mejora, como con otros tipos de fibras, ya que ocurrió un descenso en la absorción de energía que era menor conforme aumentaba el contenido de madera. El tratamiento químico no les ayudo a mejorar,

sino que perjudico el material, ya que, en todos los casos, la resistencia al impacto de las muestras con tratamiento fue menor a las que no tenían tratamiento (Figura 41).

Hanana y Rodrigue (2018) realizaron el ensayo de impacto Charpy, según ASTM D6110, a sus muestras de matriz de LLDPE reforzada con partículas de **madera de arce**. De forma similar a los casos anteriores, con mayor cantidad de refuerzo se reduce la resistencia al impacto. Con 10% de madera de arce sin tratar y una razón de fibras de 75/25, consiguieron una resistencia de 7,89 kJ/m² y 9,62 kJ/m² en las muestras S10M75U y S10L75U, respectivamente. Los moldes con mejores propiedades de tracción y flexión fueron las que contenían 20% de madera con una razón de fibras de 75/25. Con esta cantidad de refuerzo el incremento reportado fue 11% y 36%, de las muestras S20M75U y S20L75U, respectivamente. Tomando como referencia los moldes con 100% de partículas tamaño “S”. El uso de tratamiento químico de las fibras si les permitió obtener mejores resultados respecto a los moldes con fibras no tratadas. Con 10% de fibras tratadas (S10M75T y S10L75T) el incremento fue de 10% y 11% respecto a las muestras S10M75U y S10L75U; similarmente para las muestras con 20% de madera tratada con MAPE.

B. Refuerzo de agave

López-Bañuelos et al. (2012) realizaron ensayos de impacto según ASTM D5420 (tipo Gardner), mientras que Cisneros-López et al. (2016) y (2017a) usaron la norma ASTM D6110 (tipo Charpy); sin embargo, todos usaron muestras fabricadas por moldeo rotacional con matriz de LMDPE y refuerzo de fibras de agave. López-Bañuelos et al. (2012) obtuvieron que la resistencia al impacto se mejora cuando las muestras contienen fibras más largas, cuando se usa un agente de acoplamiento o cuando se realiza tratamiento químico del refuerzo. Todo lo anterior es afirmado luego de comparaciones entre los resultados de las muestras bajo un mismo porcentaje de contenido de fibras de agave. Además, de los ensayos a ambas caras de las muestras, obtuvieron que la superficie externa fue más resistente, como se puede ver en la Figura 39a. Esta diferencia entre las propiedades según las caras se da porque ocurre una segregación durante el moldeo. El refuerzo se concentra en la parte interna volviéndola más rígida, mientras que la superficie externa contiene más plástico, por lo que absorbe más energía de impacto. La muestra que fue seleccionada como óptima (10% de fibras de agave sin tratar) permitió obtener una resistencia al impacto alrededor de 3 J/mm. Las muestras de Cisneros-López et al. (2016), con 10% de fibras de agave sin tratamiento les permitieron un incremento de 35% respecto al LMDPE (de 121 a 164 J/m). En su trabajo reportan que el incremento en la resistencia al impacto solo es posible a baja cantidades de refuerzo, ya que es

más fácil su distribución en la matriz. El uso de tratamiento con NaOH y MAPE solo permite una mejor respuesta con contenido de refuerzo más alto (30 y 40%), i.e., con 40% de refuerzo tratado generó un incremento de 160% (de 22,3 J/m a 58 J/m) respecto al mismo contenido de fibras sin tratamiento, pero aun así la reducción respecto al LMDPE fue 52% (Figura 39b).

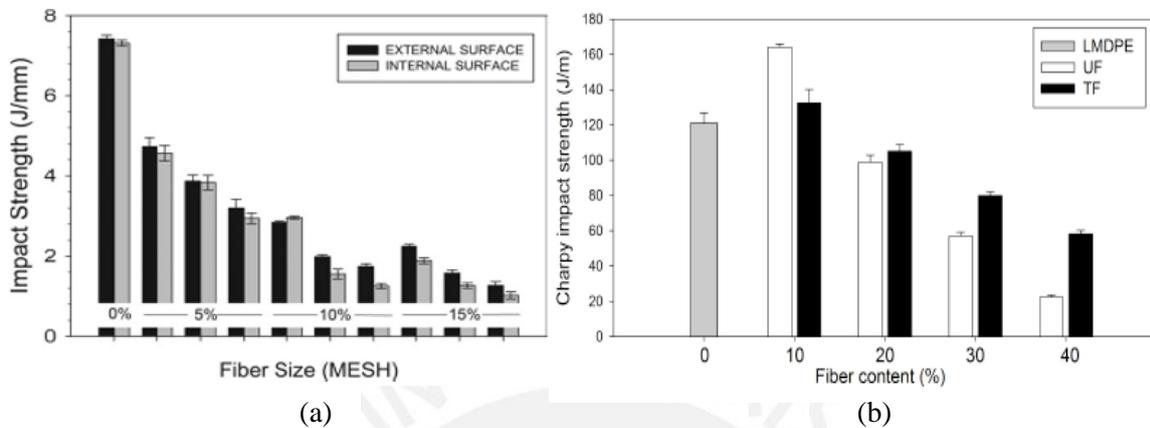


Figura 39 Energía de impacto absorbida por el material compuesto de (a) López-Bañuelos et al. y (b) Cisneros-López et al.

Figura 39(a) Tomado de “Rotational molding of polyethylene composites based on agave fibers”, por López-Bañuelos et al. (2012) y (b) de “Fiber surface treatment as an approach to increase fiber content in agave-LMDPE composites produced by rotomolding”, por Cisneros-López et al. (2016)

Cisneros-López et al. (2017b) y (2018) realizaron ensayo de impacto Charpy, según ASTM D6110, a las muestras de material compuesto de matriz de **PLA** y reforzado con fibras de agave sin tratamiento. La muestra optima de Cisneros-López et al. (2017b) contenía 10% de refuerzo. Su resistencia al impacto fue poco mayor al de PLA. El incremento fue tan solo de 4%, siendo un aumento no muy significativo. Con bajo contenido de refuerzo (10 y 20%) la resistencia al impacto se mantuvo entre 30 y 25 J/m, rango en el cual también se encontraba la resistencia del PLA. En la comparación realizada por Cisneros-López et al. (2018) entre moldeo rotacional y por compresión, determinaron que con poca cantidad de refuerzo (10%) no se obtiene una variación considerable entre las muestras fabricadas por ambos procesos; sin embargo, con altas cantidades (40%) el incremento es de hasta 71% (de 28 para PLA a 48 J/m) con moldeo por compresión. Ver Figura 40. Esta diferencia a altas cantidades de refuerzo se da porque en las muestras del moldeo rotacional suelen existir burbujas y poros perjudicando en el comportamiento ante el impacto.

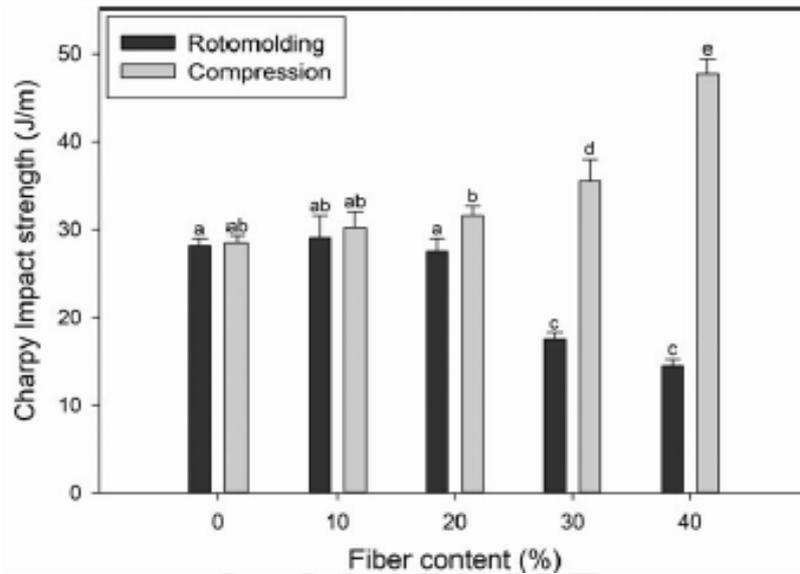


Figura 40 Comparación entre los resultados del ensayo de impacto en las muestras fabricadas por moldeo rotacional y por compresión.

Tomado de “*Polylactic acid–agave fiber biocomposites produced by rotational molding: A comparative study with compression molding*”, por Cisneros-López et al. (2018).

C. Refuerzo de coco, agave y pino

Cisneros-López et al. (2017a) realizaron una comparación entre los resultados de ensayo de impacto a los materiales compuestos reforzados con fibras de agave, coco y partículas de madera de pino. En los ensayos a los moldes con cada tipo de fibra sin tratamiento químico, obtuvieron el máximo cuando el contenido de refuerzo fue 10%. De los resultados máximos, con cada tipo de refuerzo, el que permitió un mayor incremento (35%, de 121 a 164 J/m) fue el que contenía agave (Figura 41). Parte de este resultado fue atribuido a que las fibras de agave eran de mayor longitud que las de coco y pino. Por lo que, similarmente a López-Bañuelos et al. (2012), determinaron que con un mayor tamaño del refuerzo se tiene mejor resistencia al impacto debido a la mayor resistencia que se debe ejercer cuando se intenta separarlas de la matriz. A altas cantidades de refuerzo (30 y 40%), el tratamiento químico permitió mejorar la propiedad de las muestras con agave y coco, pero no las que tenían pino. A 40% de refuerzo de agave tratado, el incremento fue 160% (de 22,3 J/m a 58 J/m) y con fibras de coco fue 77% (de 19,6 J/m a 34,2 J/m) respecto a las que no tenían tratamiento.

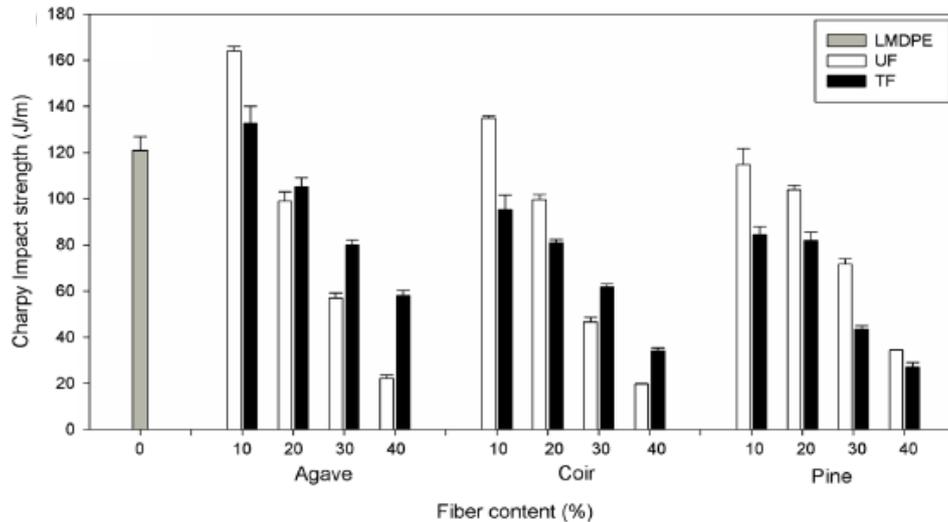


Figura 41 Comparación de los resultados del ensayo Charpy del material compuesto reforzado con fibras de agave, coco y pino

Tomado de “*Effect of fiber content and surface treatment on the mechanical properties of natural fiber composites produced by rotomolding*”, por Cisneros-López et al. (2017a).

D. Refuerzo de plátano y abacá

Ortega et al. (2013) realizaron el ensayo de impacto según ISO 6603-2:2000, que es la norma europea equivalente al ensayo tipo Gardner. Sus ensayos fueron realizados al material compuesto con matriz de polietileno y refuerzo de fibras de abacá y plátano. Con el uso de 5% de fibras de plátano y abacá se redujo la absorción de energía de impacto en 84% (de 9,3 a 1,5 J/mm) y 81% (de 9,3 a 1,8 J/mm) en las muestras 2 y 4 respectivamente. Ver Tabla B 5 del anexo B. El tratamiento químico de abacá con NaOH no fue favorable, ya que obtuvieron los menores resultados de resistencia al impacto. La fabricación en 3 capas permitió una reducción de la propiedad hasta 2,3 y 3 J/mm en las muestras con 5% de plátano y abacá, respectivamente. Ver Tabla C 2 del anexo C.

3.5. Ensayo de dureza

Cisneros-López et al. (2017a) realizaron el ensayo de dureza Shore D a sus muestras con diferentes refuerzos (**agave, coco y madera de pino**) y realizaron una comparación entre los resultados. Hallaron que, con un contenido bajo de refuerzo (10% y 20%), no obtuvieron un incremento considerable. El resultado máximo fue 63,1 shore D con fibras de coco, mientras que para LMDPE fue 60,5 Shore D. Con contenido alto de refuerzo (30 y 40%) la reducción fue mayor; sin embargo, el uso de tratamiento químico de las fibras permitió una reducción menor en los moldes con fibras de agave y coco. Con 40% de fibras de agave el incremento de la dureza por el tratamiento fue hasta 41,5 Shore D respecto a la muestra sin tratamiento

(30 Shore D). En las muestras con partículas de madera no existió algún beneficio en la dureza a altas cantidades de refuerzo (Figura 42).

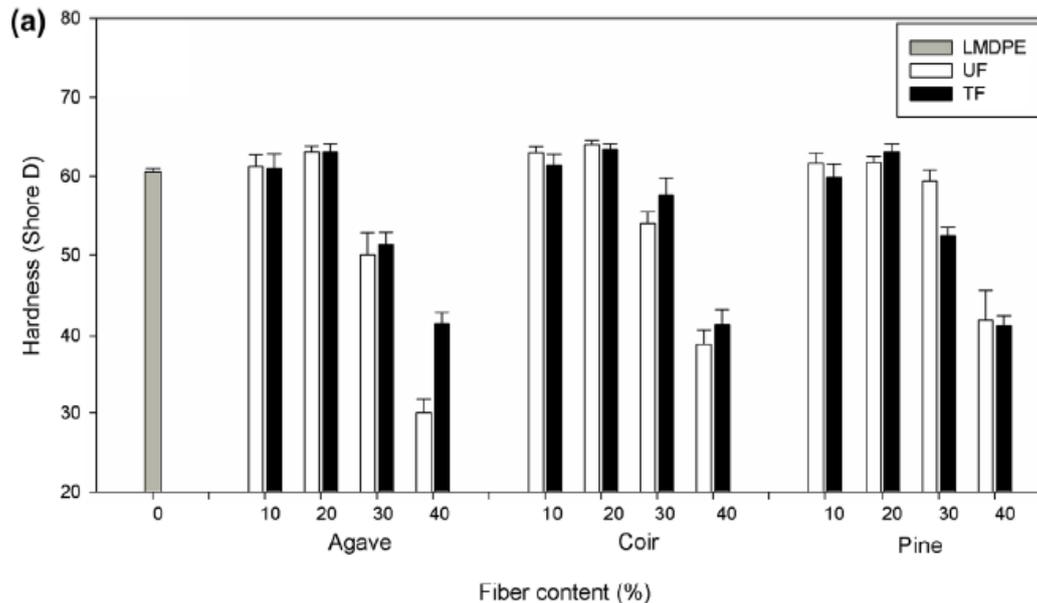


Figura 42 Comparación de dureza del material compuesto reforzado con fibras de agave, coco y pino.

Tomado de “*Effect of fiber content and surface treatment on the mechanical properties of natural fiber composites produced by rotomolding*”, por Cisneros-López et al. (2017a).

Luego de la toma de dureza Shore D a las muestras de matriz de LLDPE reforzadas con **salvado de trigo**, Hejna et al. (2020), determinaron que existió un descenso en la dureza en las muestras con baja cantidad de refuerzo (2,5% y 5%). Indican que esto fue resultado de las cavidades y poros en los moldes en esas muestras. Los moldes con contenido de 10% y 20% presentaron un ligero incremento de dureza 52 y 53 Shore D, respectivamente, comparado con el LLDPE (51,5 shore D). Explican que este aumento se dio por la compensación de los poros con las partículas de salvado de trigo, que le aportaron más rigidez.

El ensayo de dureza a las muestras de **PLA reforzado con fibras de agave** le permitió a Cisneros-López et al. (2017b) verificar que con baja contenido de refuerzo (10 y 20%) se mantiene la dureza similar a la del PLA, alrededor de 80 shore D. De forma similar a lo reportado por Cisneros-López et al. (2017a) el descenso de dureza fue mayor en sus probetas con 30 y 40% de refuerzo, hasta 40 Shore D. En la comparación con muestras fabricadas por moldeo por compresión, Cisneros-López et al. (2017b) identificaron que con 10% de fibras de agave en PLA se puede obtener la misma dureza en los moldes fabricados por ambos procesos, moldeo rotacional y compresión, y PLA. Con 20% de refuerzo se comienza a evidenciar el incremento de la muestra por moldeo por compresión mientras que la de moldeo rotacional

decrece; sin embargo, la diferencia no es demasiada. Con 30% y 40% la diferencia entre las durezas es considerable siendo superado por mucho los resultados de las muestras fabricadas por moldeo rotacional.

3.6. Ensayos de compresión

Torres y Aguirre (2003), realizaron ensayos de compresión a sus muestras cilíndricas. El eje de las muestras era perpendicular a la dirección de aplicación de la fuerza. La velocidad de ensayo fue 1.3 mm/min. “en todos los casos los moldes que fueron reforzados mostraron mayor fuerza de compresión que los no reforzados HDPE. Particularmente, la combinación de HDPE con 10% de sisal seco, con el uso de un agente dispersante (ácido esteárico) [...], muestra la fuerza de compresión más alta (1000 N). Esto corresponde a una mejora de 53% de la fuerza de compresión del polímero no reforzado”. (2003, p.208). Ver Tabla 8. Otro hallazgo fue la mayor recuperación elástica que existió en el polímero reforzado en comparación con los no reforzados, cuya recuperación es nula.

Tabla 8 Máxima fuerza obtenida en el ensayo de compresión.

Fibra de refuerzo	Contenido de fibras (% en peso)	Fuerza max. (N)
Sisal (sin pre secado)	10	810
Sisal (secado)	15	700
Sisal (secado) + ácido esteárico	10	1000
Cascara de arroz pulverizada	5	680
HDPE sin reforzar	0	650

Nota: Tomado (a) de “*Rotational moulding and powder processing of natural fibre reinforced thermoplastics*”, por Torres y Aguirre (2003).

3.7. Absorción de humedad

McDowell et al. (2001) realizaron ensayos para determinar la humedad que absorben sus muestras en los cuales determinaron que las fabricadas con **fibras de madera** tuvieron una absorción de 13% en peso y las fabricadas con polvo de madera absorben 10% en peso.

Torres y Aguirre (2003) también analizaron la absorción de humedad luego del proceso de moldeo (Tabla 9). El mayor valor que obtuvieron fue el incremento de 1,67% de variación en el peso del material compuesto reforzado con fibras secas de **sisal**. El material compuesto fabricado con HDPE y con 10% de fibras de sisal tratadas con ácido esteárico mostro una variación de 0.73% en el peso.

Los resultados de Wang et al. (2004) mostraron que con 10% de fibras de **linaza** tratadas químicamente con silano se obtuvo la mayor absorción de agua 0.07 y 0.08%,

independientemente de la matriz usada (LLDPE o HDPE). La menor absorción de agua la obtuvo el material compuesto con matriz de LLDPE y con fibras tratadas con peróxido. (ver Figura 43).

A partir del ensayo de absorción de agua realizado a las muestras con 15% de partículas de madera de pino, Quispe (2017) determinó que existe menor absorción de agua en las muestras de contenían refuerzo de menor tamaño. Explica que esto se debe a que un mayor tamaño de partículas tendrá mayor superficie para absorber agua, por lo que el equilibrio se alcanza en mayor tiempo. La muestra optima (15% de refuerzo/320°C/28 min) absorbió 0,5 % de agua con fibras de tamaño entre 297 – 500 μm .

Tabla 9 Variación de peso medida luego del proceso de moldeo

Fibra de refuerzo	Contenido de fibras (% en peso)	Variación de peso (%)
Sisal (sin pre secado)	10	-5,7
Sisal (secado)	15	1,67
Sisal (secado) + ácido esteárico	10	0,73
Cascara de arroz pulverizada	5	0,63
HDPE sin reforzar	0	1,03

Nota: Tomado (a) de “Rotational moulding and powder processing of natural fibre reinforced thermoplastics”, por Torres y Aguirre (2003).

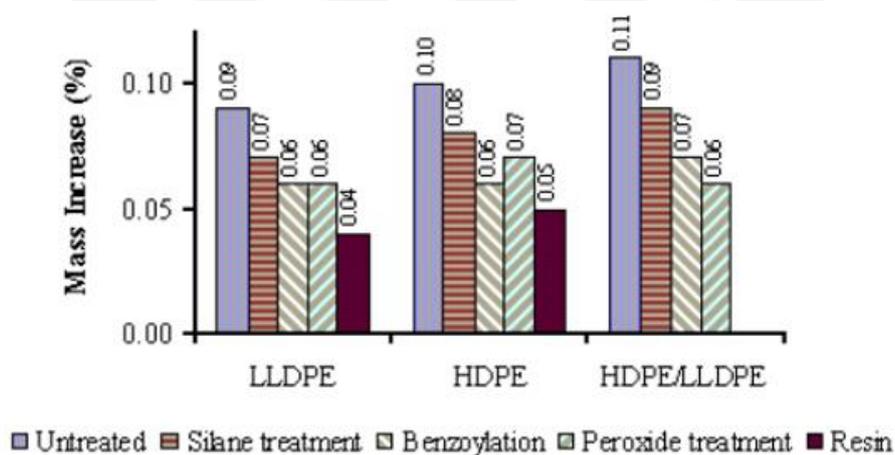


Figura 43 Absorción de agua para diferentes matrices termoplásticas con 10% de fibras.

Tomado de “Effects of chemical treatments on mechanical and physical properties of flax fiber-reinforced rotationally molded composites”, por Wang et al. (2004).

Conclusiones

Conforme se perfeccionaron los estudios sobre moldeo rotacional de materiales reforzados con fibras naturales, en los últimos 20 años, se han logrado una mayor variedad de materiales compuestos con mejores propiedades. Se estudio la factibilidad del uso de refuerzos, la dispersión de las fibras, la orientación, el sinterizado y la densificación de las piezas fabricadas. Se incluyeron diferentes tratamientos químicos del refuerzo para la modificación física y química en las superficies tratadas. Se determinó el efecto del tamaño de las fibras, el impacto de la humedad del refuerzo, la diferencia en las propiedades en ambos lados de la muestra, la incorporación de varias capas y la utilización de materiales reciclados y recuperados.

El plástico más utilizado como matriz en trabajos de investigación de nuevos materiales compuestos fabricados por moldeo rotacional es el polietileno (HDPE, LMDPE y LLDPE) con una densidad entre 934 y 955 kg/m³ e índices de fluidez en el rango de 1,5 y 2,5 g/ 10 min para HDPE; entre 3,5 y 5 g/ 10 min para LMDPE; y de 3,3 y 6,8 g/ 10 min para LLDPE.

Los tamaños de partículas más utilizados están en el rango de 297 – 500 µm (mesh 50 - mesh 35) y 125 – 297 µm (mesh 120 – mesh 50). Mezclas de mayor y menor tamaño de refuerzo se acomodan mejor, propiciando una mayor compactación y consiguientemente un incremento de las propiedades respecto a las muestras con un solo tamaño de refuerzo.

Las máquinas tipo *Shuttle* fueron las más utilizadas en la fabricación de nuevos materiales compuestos. La razón de velocidad más empleada es de 4:1. Las temperaturas de calentamiento utilizadas según el refuerzo fueron: 260°C para agave, entre 220 °C y 250 °C para linaza o sisal y entre 260 y 280 °C para madera, aunque puede ser mayor según el tipo de madera. El pico de temperatura del aire al interior del molde pertenece al rango 180 y 220 °C, el tiempo en el horno frecuentemente se encuentra en el rango de 20 a 25 minutos y el tiempo de enfriamiento con aire forzado está entre 20 y 30 minutos, independientemente del tipo de refuerzo natural.

En materiales de una capa y matriz de polietileno, las muestras con propiedades óptimas se consiguen con cantidades de refuerzo en el rango de 10% y 20% en peso. Cantidades mayores a 20% de refuerzo van en detrimento de la adhesión entre la matriz y el refuerzo. Como es de esperar, el material compuesto aumenta su modulo a la tracción y a la flexión conforme se incrementa la cantidad de refuerzo hasta alcanzar un máximo. El incremento en el módulo de elasticidad en tracción es de hasta 25% respecto al polietileno sin refuerzo,

alcanzándose valores de 1072 MPa para las muestras con matriz de HDPE y en el rango de 158 y 440 MPa con matrices de LLDPE y LMDPE. El máximo módulo elástico en flexión reportado fue 968 MPa y representa un incremento de 59,7% para la muestra de arce+LLDPE. Tanto la resistencia a la tracción como a la flexión se reducen en el rango de 3% a 26% y en la mayoría de los casos se encuentra entre 15 y 20 MPa. Por lo general, la energía absorbida al impacto se reduce a medida que se incrementa la cantidad de refuerzo; se han reportado reducciones de hasta 75% en las muestras con matriz de polietileno de una capa y excepcionalmente se reportan incrementos de 47% con madera+LMDPE y 35.5% con agave+LMDPE.

Los tratamientos químicos sobre los refuerzos naturales, realizados con el propósito de mejorar la adhesión con la matriz, fueron diversos: alcalino, benzoilación, mercerización, con silano, peróxido y MAPE (*maleic anhydride grafted polyethylene*). No obstante, ninguno brinda beneficios con cantidades menores a 20% en peso del refuerzo, ya que no generan un impacto en las propiedades mecánicas comparadas con las muestras sin tratamiento. Si bien es posible mejorar las propiedades con el tratamiento químico en muestras con cantidades mayores a 20% de refuerzo, estas propiedades son inferiores a las del plástico puro. En general los resultados fueron desfavorables, en tanto que el tratamiento químico solo permitió incrementos bajos o nulos en las propiedades. En muestras de una capa y matriz de polietileno se lograron incrementos de solo un 9% como máximo en el módulo elástico en flexión (agave+LMDPE) y un 14% como máximo en la resistencia a la flexión (agave+LMDPE); excepcionalmente también se reportaron incrementos en el módulo elástico en tracción de hasta 40,8% (pino+LMDPE) y hasta 37% en la resistencia a la tracción (agave+LMDPE) respecto a las muestras sin tratamiento. Similarmente, respecto a la resistencia al impacto, el máximo aumento fue 5% (agave+LMDPE) y en ninguno de los casos restantes el tratamiento fue favorable. Los tratamientos químicos no siempre son compatibles con ciertas fibras, como el caso de las partículas de pino tratadas con MAPE, en tanto que no existe mejora en las propiedades ni siquiera con altos contenidos de refuerzo.

Incorporar una capa adicional en el material permite mejorar las propiedades mecánicas, proteger el refuerzo e impermeabilizar las superficies. Usando dos capas se ha obtenido un módulo de elasticidad en tracción de hasta 4600 MPa (PE/plátano+PE), el que representa un incremento de 187,5% y, análogamente, para el módulo en flexión hubo un aumento de hasta 157,5% (PE/abacá+PE). A pesar de los beneficios reportados no se han realizado considerables estudios sobre la fabricación de materiales compuestos multicapa sin agentes espumantes.

Recomendaciones

Se debe realizar mayores investigaciones sobre materiales compuestos que incluyan una matriz de plásticos reciclados. Solo se han identificado pocos trabajos con esta característica, posiblemente porque el reciclado requiere procesos adicionales como: clasificación, picado, lavado y secado, lo que incrementaría el tiempo de producción. Sin embargo, usar plásticos reciclados contribuirá a la disminución de gastos por adquisición de material y reducción de los residuos plásticos generados con el consecuente cuidado del ambiente.

En los próximos trabajos sobre moldeo rotacional de materiales compuesto reforzados con fibras naturales se debería incorporar la medición de la temperatura del aire interior del molde durante el proceso. Esto ayudará a comprender mejor cada etapa del proceso de sinterizado de la matriz plástica y el refuerzo.

Con el fin de mejorar las investigaciones realizadas se pueden realizar estudios para incorporar más de una capa en las muestras para mejorar las propiedades mecánicas e impermeabilizar la capa interna de las piezas fabricadas.

No es recomendable usar tratamientos químicos del refuerzo en el intento de obtener un material con mejores propiedades mecánicas, ya que la mejora no será sustancial en comparación con el gasto económico y el tiempo utilizado en el procedimiento. Si el objetivo es incorporar la mayor cantidad posible de refuerzo (mayor a 20% en peso), si se debería realizar un tratamiento químico. En este segundo caso se mejorarán las propiedades en comparación a las muestras con alto contenido de refuerzo y sin tratamiento; sin embargo, no se alcanzará los niveles de las muestras optimas en el rango de 10% a 20% de refuerzo.

Bibliografía

- Arribasplata Seguin, A. S. (2016). *Estudio del sinterizado de materiales compuestos de polietileno reciclado y madera capirona recuperada fabricados mediante moldeo rotacional*. Pontificia Universidad Católica del Perú.
- Beltrán Lloris, M., & Marcilla Gomis, A. (1998). Moldeo rotacional (I): conceptos generales; p. 57-66; *Revista de plásticos modernos*; Vol. 76, no. 505.
- Beltrán, M., & Marcilla, A. (2012). *Tecnología de polímeros : procesado y propiedades*. San Vicente del Raspeig : Publicaciones de la Universidad de Alicante.
- Cisneros-López, E. O., González-López, M. E., Pérez-Fonseca, A. A., González-Núñez, R., Robledo-Ortíz, J. R., & Rodrigue, D. (2016). Fiber surface treatment as an approach to increase fiber content in agave-LMDPE composites produced by rotomolding. *Annual Technical Conference - ANTEC, Conference Proceedings*, 1681–1685.
- Cisneros-López, E. O., Pérez-Fonseca, A. A., González-García, Y., Ramírez-Arreola, D. E., González-Núñez, R., Rodrigue, D., & Robledo-Ortíz, J. R. (2018). Polylactic acid-agave fiber biocomposites produced by rotational molding: A comparative study with compression molding. *Advances in Polymer Technology*, 37(7), 2528–2540. <https://doi.org/10.1002/adv.21928>
- Cisneros-López, E. O., Pérez-Fonseca, A. A., Ramírez-Arreola, D. E., González-Núñez, R., González-García, Y., Robledo-Ortíz, J. R., & Rodrigue, D. (2017). Rotational molding of polylactic acid and agave fiber biocomposites. *Annual Technical Conference - ANTEC, Conference Proceedings, 2017-May*, 2257–2261.
- Cisneros-López, E. O., González-López, M. E., Pérez-Fonseca, A. A., González-Núñez, R., Rodrigue, D., & Robledo-Ortíz, J. R. (2017). Effect of fiber content and surface treatment on the mechanical properties of natural fiber composites produced by rotomolding. *Composite Interfaces*, 24(1), 35–53. <https://doi.org/10.1080/09276440.2016.1184556>
- Crawford, R. J., Nugent, P. J., & Spence, A. (1995). Process control for rotational moulding of plastics. *Annual Technical Conference - ANTEC, Conference Proceedings, 1*, 663–667.
- Crawford, R., & Throne, J. (2002). *Rotational Molding Technology*. *Plastics Design Library / William Andrew*.
- Ebnesajjad, S. (2015). Rotational Molding and Linings. In *Fluoroplastics* (Vol. 2, pp. 348–369). William Andrew. <https://doi.org/10.1016/b978-1-4557-3197-8.00012-2>
- Ferry Industries INC. (n.d.-a). *RotoSpeed - Rocking Oven Machines*. Retrieved October 2, 2020, from <https://www.ferryindustries.com/RotoSpeed/RockingOvenMachines>
- Ferry Industries INC. (n.d.-b). *RotoSpeed - Fixed-Arm Turret Machines*. Retrieved October 6, 2020, from <https://www.ferryindustries.com/RotoSpeed/FixedArmTurretMachines>
- Ferry industries INC. (n.d.-c). *RotoSpeed - In-line Shuttle Machines*. Retrieved October 7, 2020, from <https://www.ferryindustries.com/RotoSpeed/InlineShuttleMachines>
- Hanana, F. E., & Rodrigue, D. (2015). Rotational Molding of Polymer Composites Reinforced with Natural Fibers. *Plastics Engineering*, 71(7), 28–31. <https://doi.org/10.1002/j.1941-9635.2015.tb01960.x>

- Hanana, F. E., & Rodrigue, D. (2018). Rotational molding of self-hybrid composites based on linear low-density polyethylene and maple fibers. *Polymer Composites*, 39(11), 4094–4103. <https://doi.org/10.1002/pc.24473>
- Hejna, A., Barczewski, M., Andrzejewski, J., Kosmela, P., Piasecki, A., Szostak, M., & Kuang, T. (2020). Rotational molding of linear low-density polyethylene composites filled with wheat bran. *Polymers*, 12(5). <https://doi.org/10.3390/POLYM12051004>
- Jayaraman, K., Lin, R., Bose, D., & Maarouf, M. (2007). Natural fibre-reinforced thermoplastics processed by rotational moulding. *Advanced Materials Research*, 29–30, 307–310. <https://doi.org/10.4028/0-87849-466-9.307>
- Kakani, S. L. (2004). Organic Materials: Polymers and Elastomers. In *Material Science* (1st ed., pp. 555–592). New Age International Ltd. <https://ebookcentral.proquest.com/lib/bibpucp-ebooks/detail.action?docID=424097>
- Kontopoulou, M., & Vlachopoulos, J. (2001). Melting and densification of thermoplastic powders. *Polymer Engineering & Science*, 41(2), 155–169. <https://doi.org/10.1002/pen.10718>
- López-Bañuelos, R. H., Moscoso, F. J., Ortega-Gudiño, P., Mendizabal, E., Rodrigue, D., & González-Núñez, R. (2012). Rotational molding of polyethylene composites based on agave fibers. *Polymer Engineering & Science*, 52(12), 2489–2497. <https://doi.org/10.1002/pen.23168>
- McDowell G.W.G., Orr, J.F., Kissick, J., Crawford R.J. (2001). Apreliminary investigation into the use of wood fibers as a filler in the rotational molding of polyethylene, ANTEC 2001, Conference proceedings, Dallas, Texas.
- Nugent, P. (2017). Rotational Molding. In *Applied Plastics Engineering Handbook: Processing, Materials, and Applications: Second Edition* (pp. 321–343). Elsevier Inc. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-39040-8.00015-8>
- Ortega, Z., Monzón, M. D., Benítez, A. N., Kearns, M., McCourt, M., & Hornsby, P. R. (2013). Banana and abaca fiber-reinforced plastic composites obtained by rotational molding process. *Materials and Manufacturing Processes*, 28(8), 879–883. <https://doi.org/10.1080/10426914.2013.792431>
- Panigrahi, S. (2010). Mechanical performance of recycled thermoplastic and flax fiber based composite. *SAE Technical Papers*. <https://doi.org/10.4271/2010-01-2027>
- Polímeros Mexicanos. (n.d.). *Mundo del Rotomoldeo*. Retrieved October 6, 2020, from <http://www.polimers.com/rotomoldeo/>
- Pop, A. B., Pop, G. I., & Țițu, M. A. (2019). The Design and the Process Technology of a Rotational Mold. *MATEC Web of Conferences*, 299, 03004. <https://doi.org/10.1051/matecconf/201929903004>
- Quispe Dominguez, R. (2017). *Estudio del sinterizado de materiales compuestos de polietileno reciclado y madera pino recuperada fabricados mediante moldeo rotacional*. Pontificia Universidad Católica del Perú.
- Raymond, A., & Rodrigue, D. (2013a). Wood plastics composites produced by rotomolding. *Annual Technical Conference - ANTEC, Conference Proceedings*, 2, 1009–1013.

- Raymond, A., & Rodrigue, D. (2013b). Foams and Wood Composite Foams Produced by Rotomolding. *Cellular Polymers*, 32(4), 199–212. <https://doi.org/10.1177/026248931303200401>
- Rising Sun. (n.d.). *Rotomolding Machine*. Retrieved October 5, 2020, from <https://www.risingsunroto.com/RotomoldingMachine/>
- Rotoline. (n.d.-a). *Máquinas de Rotomoldeo Rotoline*. Retrieved October 6, 2020, from <https://www.rotoline.com/es/rotomoldeo/maquinas/carrossel>
- Rotoline. (n.d.-b). *Máquinas de Rotomoldeo Rotoline*. Retrieved October 6, 2020, from <https://www.rotoline.com/es/rotomoldeo/maquinas/shuttle>
- Spence, A. G., & Crawford, R. J. (1996). The effect of processing variables on the formation and removal of bubbles in rotationally molded products. *Polymer Engineering & Science*, 36(7), 993–1009. <https://doi.org/10.1002/pen.10487>
- Torres, F. G., & Aguirre, M. (2003). Rotational moulding and powder processing of natural fibre reinforced thermoplastics. *International Polymer Processing*, 18(2), 204–210. <https://doi.org/10.3139/217.1736>
- Torres, F. G., Carrillo, M., & Cubillas, M. L. (2006). Melt densification of polymeric powder beds filled with natural fibres. *Polymers and Polymer Composites*, 14(7), 691–699. <https://doi.org/10.1177/096739110601400703>
- Torres, F. G., & Díaz, R. M. (2004). Morphological characterisation of natural fibre reinforced thermoplastics (NFRTTP) processed by extrusion, compression and rotational moulding. *Polymers and Polymer Composites*, 12(8), 705–718. <https://doi.org/10.1177/096739110401200807>
- Vlachopoulos, J., & Strutt, D. (2003). Polymer processing. In *Materials Science and Technology* (Vol. 19, Issue 9, pp. 1161–1169). <https://doi.org/10.1179/026708303225004738>
- Wang, B., Panigrahi, S., Tabil, L., & Crerar, W. (2004). Effects of chemical treatments on mechanical and physical properties of flax fiber-reinforced rotationally molded composites. *ASAE Annual International Meeting 2004*, 6745–6755. <https://doi.org/10.13031/2013.16956>
- Ward-Perron, N., & Rodrigue, D. (2012a). Analysis of wood particle drying for rotomolding application. *Annual Technical Conference - ANTEC, Conference Proceedings*, 3, 2259–2262.
- Ward-Perron, N., & Rodrigue, D. (2012b). Natural fiber reinforced thermoplastics (NFRTTP) processed by rotomolding. *Annual Technical Conference - ANTEC, Conference Proceedings*, 3, 2263–2267.

Anexos

Anexo A: Sinterizado y densificado de partículas

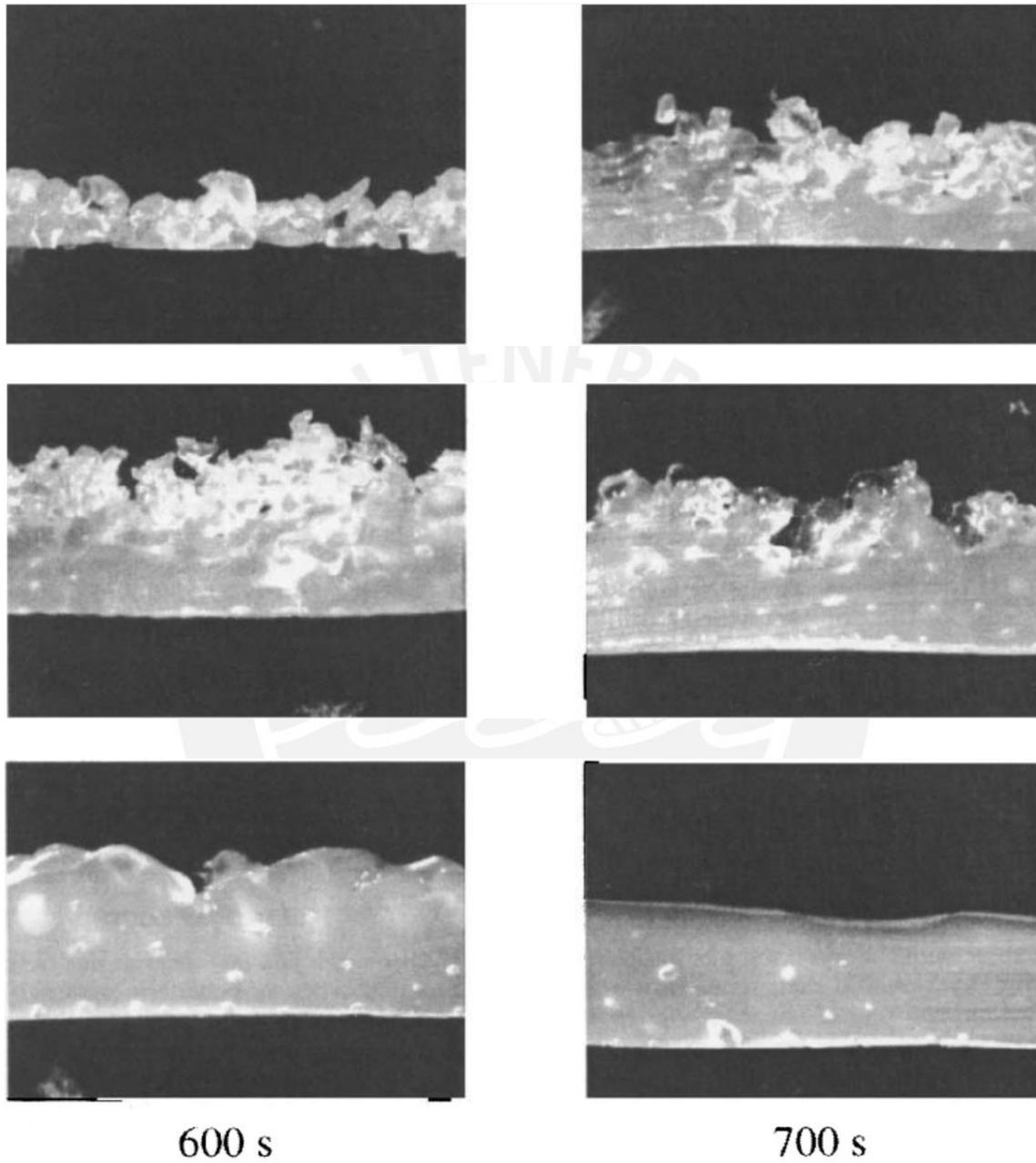


Figura A 1 Sinterizado y densificación de polietileno copolímero

Tomado de “*Melting and densification of thermoplastic powders*”, por Kontopoulou y Vlachopoulou (2001).

Anexo B: Diseños experimentales

Tabla B 1 Matriz experimental de McDowell et al.

Exp N°	Nombre	% Madera						Pico de temperatura interna del molde (C°)			Temperatura del horno (C°)		Fibras de madera	Polvo de madera
		0	2,5	10	20	40	60	145	180	220	250	300		
1	E1-9-8-0						X	X			X		X	
2	E2-9-8-0						X		X		X		X	
3	E3-9-8-0					X			X		X		X	
4	E2-27-10-0					X				X	X		X	
5	E1-10-8-0				X				X		X		X	
6	E2-1-11-0				X					X	X		X	
7	E1-27-10-0				X					X		X	X	
8	E2-7-11-0			X					X		X		X	
9	E4-7-11-0			X						X		X	X	
10	E3-7-11-0		X						X		X		X	
11	E7-7-11-0		X							X		X	X	
12	E2-10-8-0	X							X		X		X	
13	E8-7-11-0				X				X		X			X
14	E5-7-11-0			X					X		X			X
15	E6-7-11-0		X						X		X			X

Nota. Tomado de “A preliminary investigation into the use of wood fibers”, por McDowell et al. (2001).

Tabla B 2 Matriz experimental de Wang et al.

Fibras	Matriz	Porcentaje de Fibras (%)	Porcentaje de acoplamiento de silano (%)
Sin tratamiento (2% de detergente en agua)	LLDPE	10	5
	HDPE	10	5
	LLDPE/HDPE	10	5
Tratamiento de silano	LLDPE	10	5
	HDPE	10	5
	LLDPE/HDPE	10	5
Benzoilación	LLDPE	10	5
	HDPE	10	5
	LLDPE/HDPE	10	5
Tratamiento con peroxido	LLDPE	10	5
	HDPE	10	5
	LLDPE/HDPE	10	5

Nota. Modificado de “Effects of chemical treatments on mechanical and physical properties of flax fiber-reinforced rotationally molded composites”, por Wang et al. (2004).

Tabla B 3 Composición de las muestras en la experimentación de Panigrahi.

Muestra	Composición	Tamaño de fibras (mm)	Temperatura del horno (°C)	Permanencia en el horno (min)	Peso (kg)
1	85% BMW + 10% fibras de linaza + 5% de desmoldante (no extruido)	0,5	210	30	2
2	85% BMW + 10% fibras de linaza + 5% de desmoldante (no extruido)	1	218	27	2
3	85% BMC + 10% fibras de linaza + 5% de desmoldante (no extruido)	0,5	216	30	0,8
4	85% BMC + 10% fibras de linaza + 5% de desmoldante (no extruido)	1	216	30	1,3
5	85% BMW + 10% fibras de linaza + 5% de desmoldante (extruido)	1	216	30	1,3
6	85% BMC + 10% fibras de linaza + 5% de desmoldante (extruido)	1	216	30	1,3
7	100% BMW	1	216	30	1,3
8	100% BMW	1	216	30	1,3

Nota. Tomado de “*Mechanical performance of recycled thermoplastic and flax fiber based composite*”, por Panigrahi (2010).

Tabla B 4 Tamaños de partículas y códigos usados por Ward-Perron y Rodrigue

Código	Tamaño de partículas de madera (µm)			
	0 -150	150 - 500	500 - 1000	1000 - 1700
A	-	100%	-	-
B	-	-	100%	-
C	-	-	-	100%
D	-	50%	50%	-
E	-	75%	25%	-
F	-	25%	75%	-
G	25%	50%	25%	-
H	-	10%	90%	-

Nota. Tomado de “*Natural fiber reinforced thermoplastics (NFRTP) processed by rotomolding*”, por Ward-Perron y Rodrigue (2012b).

Tabla B 5 Diferentes formulaciones preparadas por moldeo rotacional para los ensayos de Ortega et al.

Estructura	Tipo de fibra	Formulación	Muestra
Dos capas	Fibras de plátano	600g de PE/ 200g de PE + 5% de fibras	1
		200g de PE/ 600g de PE + 5% de fibras	2
	Fibras de abacá	600g de PE/ 200g de PE + 5% de fibras	3
		200g de PE/ 600g de PE + 5% de fibras	4
	Fibras de abacá tratadas con NaOH	600g de PE/ 200g de PE + 5% de fibras	5
		200g de PE/ 600g de PE + 5% de fibras	6
Tres capas	Fibras de plátano	400g de PE/ 200g de PE + 5% de fibras/ 200g PE	7
	Fibras de abacá	400g de PE/ 200g de PE + 5% de fibras/ 200g PE	8
	Fibras de abacá tratadas con NaOH	400g de PE/ 200g de PE + 5% de fibras/ 200g PE	9

Nota. Tomado de “*Banana and Abaca Fiber-Reinforced Plastic Composites Obtained by Rotational Molding Process*”, por Ortega et al. (2013).



Anexo C: Resultados

Tabla C 1 Resultados de la caracterización de muestras de LMDPE y fibras de pino.

Muestra	Densidad (g/cm ³)	Propiedades de tracción			Flexión	Impacto	
		E (MPa)	σ_y (MPa)	ϵ_b (-)	E (MPa)	Sin entalla (J/mm)	Con entalla (J/mm)
LMDPE	0,922	197	15,6	4,34	554	521	45
0-150	1,509						
150-500	1,443	-	-	-	-	-	-
500-1000	1,409						
1000-1700	1,389						
A-05	0,916	189	12,4	0,84	610	140	45
A-10	0,952	175	11,4	0,64	657	95	37
A-15	0,98	177	9,4	0,38	607	69	33
A-20	1,014	167	8,2	0,37	512	53	28
B-05	0,901	202	13,3	1,07	583	165	62
B-10*	0,93	194	11,4	0,78	637	130	51
B-15	0,971	208	11,8	0,75	660	110	47
B-20	0,988	199	10,4	0,57	478	87	42
C-05	0,953	181	12,6	1,19	647	171	51
C-10	0,947	191	10,7	0,88	539	128	51
C-15	0,976	198	9,9	0,6	584	107	47
C-20	1,007	102	5,6	0,51	420	95	48
D-05	0,895	163	12	0,9	609	107	91
D-10	0,923	167	10,6	0,62	656	98	69
D-15	0,975	201	11,4	0,53	652	85	54
D-20	1,005	205	10,1	0,43	629	75	36
E-05	0,891	162	11,4	0,87	580	144	93
E-10*	0,91	213	12,3	0,7	631	99	41
E-15	0,965	215	10,9	0,41	670	83	34
E-20	0,996	205	9,5	0,37	708	58	31
F-05	0,896	202	12,3	1,05	594	152	51
F-10	0,901	200	10,7	0,8	589	96	50
F-15	0,967	226	11,7	0,57	639	107	41
F-20*	0,989	194	9,7	0,52	635	81	41
G-05	0,893	177	12,1	1	670	140	45
G-10	0,875	172	9,8	0,68	612	78	37
G-15	0,964	217	11,3	0,44	676	70	32
G-20	1,008	195	8,2	0,41	657	51	29
H-05	0,901	174	11,8	1,06	614	126	56
H-10	0,946	188	11,6	0,87	626	127	49
H-15	0,971	196	11,2	0,71	621	102	43
H-20*	0,989	189	10,1	0,56	521	82	43

Nota: Modificado de "Natural fiber reinforced thermoplastics (NFRTP) processed by rotomolding", por Ward-Perron y Rodrigue (2012b).

Tabla C 2 Resultados de caracterización de PE y fibras de abacá y plátano

Muestra	Ensayo de tracción		Ensayo de flexión		Ensayo de impacto
	Resistencia a la tracción (MPa)	Módulo de elasticidad (GPa)	Resistencia a la flexión (MPa)	Módulo de elasticidad (MPa)	Resistencia al impacto (J/mm)
PE virgen	16,1	1,6	12,9	236,3	9,3
1	12,9	4,6	18,6	436,5	1,6
2	10,3	1,5	18,3	408,5	1,5
3	16,3	1,8	22,7	608,5	2,6
4	14,4	2,3	25,1	603,6	1,8
5	13,0	4,5	15,9	518,4	2,3
6	9,1	3,6	11,6	296,6	1,2
7	12,2	4,5	20,8	577,9	2,3
8	16,7	2,2	21,5	701,1	3,0
9	11,7	4,2	20,3	503,1	2,0

Nota. Tomado de “*Banana and Abaca Fiber-Reinforced Plastic Composites Obtained by Rotational Molding Process*”, por Ortega et al. (2013).

Tabla C 3 Resultados de caracterización de LMDPE y partículas de arce

Contenido de madera (%)	Densidad (kg/m ³)	Porosidad (%)	Propiedades de tracción			Módulo de flexión
			E (MPa)	σ_y (MPa)	ϵ_b (-)	E (MPa)
0	932	0,6	202	16,0	748	612
5	908	5,6	186	13,4	83	620
10	926	6,0	202	12,9	57	692
15	963	4,5	229	12,7	41	784
20	992	3,9	237	11,8	29	827
25	1014	3,9	203	9,2	25	794

Nota. Modificado de “*Wood Plastics Composites Produced by Rotomolding*”, por Raymond y Rodrigue (2013a).

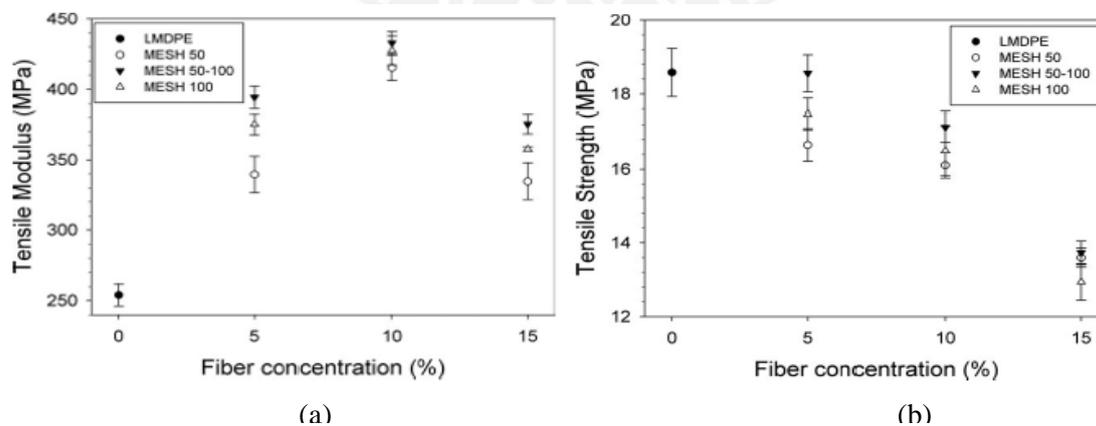


Figura C 1 (a) Módulo de elasticidad y (b) Resistencia a la tracción según el tamaño de fibras de agave y su porcentaje en la muestra.

Tomado de “*Rotational molding of polyethylene composites based on agave fibers*”, por López-Bañuelos et al. (2012).

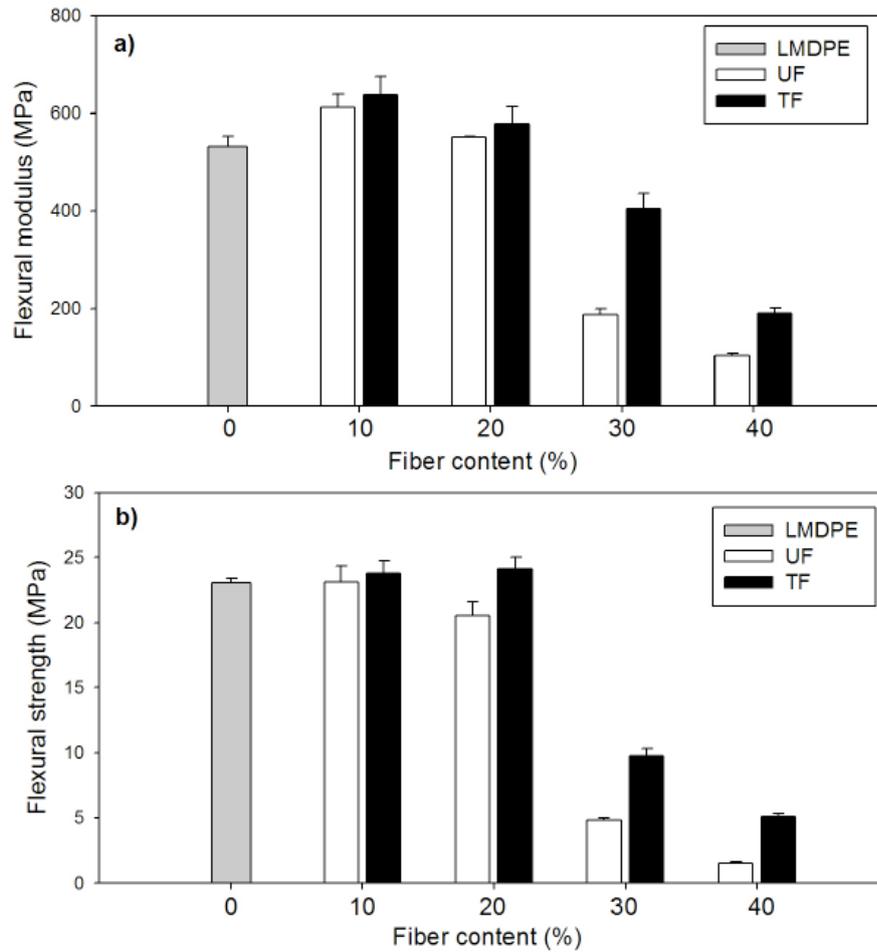


Figura C 2 (a) Módulo y (b) Resistencia del ensayo de flexion realizado por Cisneros-López et al. (2016).

Tomado de “*Fiber surface treatment as an approach to increase fiber content in agave-LMDPE composites produced by rotomolding*”, por Cisneros-López et al. (2016).

Anexo D: Clasificación de las investigaciones según los ensayos y materiales

Tabla D 1 Agrupamientos de los trabajos según el ensayo de caracterización, el tipo de refuerzo y la matriz.

SEM	Agave	LMDPE			PLA		
		López-Bañuelos et al. (2012)	Cisneros-López et al. (2016)	Cisneros-López et al. (2017a)	Cisneros-López et al. (2017b)	Cisneros-López et al. (2018)	
Madera	Pino/LMDPE	Arce/LLDPE		Capirona/HDPE			
	Cisneros-López et al. (2017a)	Raymond y Rodrigue (2013b)	Hanana y Rodrigue (2018)	Arribasplata (2016)			
Coco	LMDPE						
	Cisneros-López et al. (2017a)						
Salvado de trigo	LLDPE						
	Hejna et al. (2020)						
Ensayo de tracción	Agave	LMDPE			PLA		
		López-Bañuelos et al. (2012)	Cisneros-López et al. (2016)	Cisneros-López et al. (2017a)	Cisneros-López et al. (2017b)	Cisneros-López et al. (2018)	
	Madera	LMDPE	Pino/LMDPE		Pino/HDPE		
		Jayaraman et al. (2007)	Ward-Perron y Rodrigue (2012b)	Cisneros-López et al. (2017a)	Quispe (2017)		
		Capirona/HDPE	Arce/LLDPE				
		Arribasplata (2016)	Raymond y Rodrigue (2013a)	Raymond y Rodrigue (2013b)	Hanana y Rodrigue (2018)		
	Linaza	HDPE/LLDPE	HDPE/LLDPE/PP				
		Wang et al. (2004)	Panigrahi (2010)				
	Abacá y plátano	PE					
		Ortega et al. (2013)					
	Coco	LMDPE					
Cisneros-López et al. (2017a)							
Salvado de trigo	LLDPE						
	Hejna et al. (2020)						

Continuación de Tabla D 1 Agrupamientos de los trabajos según el ensayo de caracterización, el tipo de refuerzo y la matriz.

Ensayo de flexión	Agave	LMDPE			PLA	
		López-Bañuelos et al. (2012)	Cisneros-López et al. (2016)	Cisneros-López et al. (2017a)	Cisneros-López et al. (2017b)	Cisneros-López et al. (2018)
	Madera	PE	Pino/LMDPE			
		McDowell et al. (2001)	Ward-Perron y Rodrigue (2012b)	Cisneros-López et al. (2017a)		
		Arce/LLDPE				
		Raymond y Rodrigue (2013a)	Raymond y Rodrigue (2013b)	Hanana y Rodrigue (2018)		
	Linaza	HDPE/LLDPE/PP				
		Panigrahi (2010)				
	Abacá y plátano	PE				
		Ortega et al. (2013)				
Coco	LMDPE					
	Cisneros-López et al. (2017a)					
Ensayo de impacto	Agave	LMDPE			PLA	
		López-Bañuelos et al. (2012)	Cisneros-López et al. (2016)	Cisneros-López et al. (2017a)	Cisneros-López et al. (2017b)	Cisneros-López et al. (2018)
	Madera	PE	LMDPE	Pino/LMDPE		Arce/LLDPE
		McDowell et al. (2001)	Jayaraman et al. (2007)	Ward-Perron y Rodrigue (2012b)	Cisneros-López et al. (2017a)	Hanana y Rodrigue (2018)
	Abacá y plátano	PE				
		Ortega et al. (2013)				
	Coco	LMDPE				
Cisneros-López et al. (2017a)						

Continuación de Tabla D 1 Agrupamientos de los trabajos según el ensayo de caracterización, el tipo de refuerzo y la matriz.

Ensayo de dureza	Agave	LMDPE	PLA	
		Cisneros-López et al. (2017a)	Cisneros-López et al. (2017b)	Cisneros-López et al. (2018)
	Madera	Pino/LMDPE		
		Cisneros-López et al. (2017a)		
	Coco	LMDPE		
Cisneros-López et al. (2017a)				
Salvado de trigo	LLDPE			
	Hejna et al. (2020)			
Calorimetría diferencial	Madera	Capirona/HDPE	Pino/HDPE	
		Arribasplata (2016)	Quispe (2017)	
	Agave	PLA		
		Cisneros-López et al. (2018)		
Linaza	HDPE/LLDPE			
	Wang et al. (2004)			
Absorción de humedad	Madera	PE	Pino/HDPE	
		McDowell et al. (2001)	Quispe (2017)	
	Linaza	HDPE/LLDPE		
		Wang et al. (2004)		
	Sisal	PE		
Torres y Aguirre (2003)				

Tabla D 2 Resultados del ensayo de tracción de las muestras óptimas de cada autor

Refuerzo	Matriz	Autor	% de refuerzo	Ensayo de tracción					
				Modulo (MPa)			Resistencia (MPa)		
				Plástico	Compuesto		Plástico	Compuesto	
ST*	CT*	ST*	CT*						
Agave	LMDPE	López-Bañuelos et al. (2012)	10%	250-260	410-440	-	14-17	13-15	-
		Cisneros-López et al. (2016)	10%/20%	172	196	263	20,7	20 ^A	23,8
		Cisneros-López et al. (2017a)	10%/20%	172	196	263	20,7	20 ^A	23,8
	PLA	Cisneros-López et al. (2017b)	10%	1908	1993	-	59	45 ^A	-
		Cisneros-López et al. (2018)	10%	1908	1993	-	59	45 ^A	-
Madera	LMDPE	Jayaraman et al. (2007)	15%	900 ^A	1000 ^B	-	-	-	-
	Pino/LMDPE	Ward-Perron y Rodrigue (2012b)	15%	197	226	-	15,6	9,4	-
		Cisneros-López et al. (2017a)	20%	172	174	245	20,7	15-20	15-20
	Pino/HDPE	Quispe (2017)	15%	745	1000	-	19,68	18	-
	Capirona/HDPE	Arribasplata (2016)	15%	910	1072	-	20 ^A	16,7	-
	Arce/LLDPE	Raymond y Rodrigue (2013a)	20%	202	237	-	16	11,8	-
		Raymond y Rodrigue (2013b)	20%	127	158	-	10,9	8,6	-
Hanana y Rodrigue (2018)		20%	174	261	271	15,5	10-15	15-20	
Linaza	HDPE/LLDPE	Wang et al. (2004)	10%	-	-	-	15	-	17,43
		Panigrahi (2010)	10%	140	-	240	3,6	-	5,1
Abacá y plátano	PE	Ortega et al. (2013)**	5%	1600	-	4600	16,1	-	9,1
Coco	LMDPE	Cisneros-López et al. (2017a)	20%	172	170 ^A	170 ^A	20,7	18,8	24,5
Salvado de trigo	LLDPE	Hejna et al. (2020)	2,5% y 5%	-	-	-	16 - 18	16 - 18	-

(*). Las siglas “ST” y “CT” significan sin tratamiento y con tratamiento, respectivamente, haciendo referencia al refuerzo usado.

(**). Resultados de las muestras con dos capas fabricadas por dicho autor.

(A) No se menciona el resultado en el trabajo, pero se pudo estimar a partir del grafico presentado que el valor se encuentra alrededor del número indicado.

(B) No se menciona el resultado en el trabajo. A partir del grafico que presentan se puede indicar que el valor es superior al indicado.

El guion entre dos números (X - Y) indica que el autor proporcionó un rango o que no se pudo identificar con exactitud y por lo tanto se estima que el resultado se encuentre en el rango presentado.

La barra inclinada (/) separa los resultados óptimos, en los autores que usaron tratamiento químico en el refuerzo: (sin tratamiento/ con tratamiento)

Tabla D 3 Resultados del ensayo de flexión de las muestras óptimas de cada autor.

Refuerzo	Matriz	Autor	% de refuerzo	Ensayo de flexión					
				Modulo (MPa)			Resistencia (MPa)		
				Plástico	Compuesto		Plástico	Compuesto	
ST*	CT*	ST*	CT*						
Agave	LMDPE	López-Bañuelos et al. (2012)	10%	500 ^A	600 ^A	-	15 ^A	10-15	-
		Cisneros-López et al. (2016)	10%/20%	500 ^A	600 ^A	600 ^A	20-25	20-25	24
		Cisneros-López et al. (2017a)	10%/20%	563	600 ^A	600 ^A	23,1	23	24
	PLA	Cisneros-López et al. (2017b)	10%	3511	3594	-	93	70	-
		Cisneros-López et al. (2018)	10%	3511	3594	-	93	70	-
Madera	PE	McDowell et al. (2001)	10%	800 ^B	700-800	-	-	-	-
	Pino/LMDPE	Ward-Perron y Rodrigue (2012b)	15%	554	676	-	-	-	-
		Cisneros-López et al. (2017a)	20%	533	563	500 ^A	23,1	15 ^A	15 ^A
	Arce/LLDPE	Raymond y Rodrigue (2013a)	20%	612	827	-	-	-	-
		Raymond y Rodrigue (2013b)	20%	408	655	-	-	-	-
		Hanana y Rodrigue (2018)	20%	606	968	1043	-	-	-
Linaza	HDPE/LLDPE	Panigrahi (2010)	10%	183	-	333	7,3	-	11,1
Plátano	PE	Ortega et al. (2013)**	5%	236,3	436,5	-	12,9	18,6	-
Abacá			5%	236,3	608,5	518,4	12,9	25	16
Coco	LMDPE	Cisneros-López et al. (2017a)	20%	563	646	655	23,1	21,5	20,8

(*) Las siglas “ST” y “CT” significan sin tratamiento y con tratamiento, respectivamente, haciendo referencia al refuerzo usado.

(**) Resultados de las muestras con dos capas fabricadas por dicho autor.

(A) No se menciona el resultado en el trabajo, pero se pudo estimar a partir del grafico presentado que el valor se encuentra alrededor del número indicado.

(B) No se menciona el resultado en el trabajo. A partir del grafico que presentan se puede indicar que el valor es superior al indicado.

El guion entre dos números (X - Y) indica que el autor proporcionó un rango o que no se pudo identificar con exactitud y por lo tanto se estima que el resultado se encuentre en el rango presentado.

La barra inclinada (/) separa los resultados óptimos, en los autores que usaron tratamiento químico en el refuerzo, de la manera siguiente: (resultado sin tratamiento/ resultado con tratamiento)

Tabla D 4 Resultados del ensayo de impacto de las muestras óptimas de cada autor.

Refuerzo	Matriz	Autor	% de refuerzo	Ensayo de impacto		
				Plástico	Energía absorbida	
					ST*	CT*
Agave	LMDPE	López-Bañuelos et al. (2012)	10%	7-8 J/mm	3 J/mm	-
		Cisneros-López et al. (2016)	10%/20%	121 J/m	164 J/m	100 ^A J/m
		Cisneros-López et al. (2017a)	10%/20%	121 J/m	164 J/m	100 ^A J/m
	PLA	Cisneros-López et al. (2017b)	10%	25-30 J/m	25-30 J/m	-
		Cisneros-López et al. (2018)	10%	25-30 J/m	25-30 J/m	-
Madera	PE	McDowell et al. (2001)	10%	5-6 J/mm	1,5 J/mm	-
	LMDPE	Jayaraman et al. (2007)	15%	85 J/m	125 J/m	-
	Pino/LMDPE	Ward-Perron y Rodrigue (2012b)	15%	45 J/mm	32 J/mm	-
		Cisneros-López et al. (2017a)	20%	121 J/m	100 ^A J/m	80 ^A J/m
	Arce/LLDPE	Hanana y Rodrigue (2018)	20%	-	9 ^A kJ/m ²	9 ^A kJ/m ²
Plátano	PE	Ortega et al. (2013)**	5%	9,3 J/mm	1,5 J/mm	-
Abacá	PE		5%	9,3 J/mm	2,6 J/mm	2,3 J/mm
Coco	LMDPE	Cisneros-López et al. (2017a)	20%	121 J/m	100 ^A J/m	80 ^A J/m

(*) Las siglas “ST” y “CT” significan sin tratamiento y con tratamiento, respectivamente, haciendo referencia al refuerzo usado.

(**) Resultados de las muestras con dos capas fabricadas por dicho autor.

(A) No se menciona el resultado en el trabajo, pero se pudo estimar a partir del grafico presentado que el valor se encuentra alrededor del número indicado.

(B) No se menciona el resultado en el trabajo. A partir del grafico que presentan se puede indicar que el valor es superior al indicado.

El guion (-) entre dos números indica que el autor proporcionó un rango o que no se pudo identificar con exactitud y por lo tanto se estima que el resultado se encuentre en el rango presentado.

La barra inclinada (/) separa los resultados óptimos, en los autores que usaron tratamiento químico en el refuerzo, de la manera siguiente: (resultado sin tratamiento/ resultado con tratamiento)