

ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

**FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA Y
AGROINDUSTRIA**

**“MATERIALES COMPUESTOS DE POLIETILENO RECICLADO
CON PARTÍCULAS LIGNOCELULÓSICAS (ASERRÍN)”**

**PROYECTO PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERA
QUÍMICA**

**RENATA GUDIÑO PREDOIU
renatabgp@hotmail.com**

**DIRECTOR: ING. FRANCISCO QUIROZ
francisco.quiroz@epn.edu.ec**

Quito, diciembre 2011

© Escuela Politécnica Nacional (2011)
Reservados todos los derechos de reproducción

DECLARACIÓN

Yo, Renata Gudiño Predoiu, declaro que el trabajo aquí descrito es de mi autoría; que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional; y, que he consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

La Escuela Politécnica Nacional puede hacer uso de los derechos correspondientes a este trabajo, según lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual, por su Reglamento y por la normativa institucional vigente.

Renata Gudiño Predoiu

CERTIFICACIÓN

Certifico que el presente trabajo fue desarrollado por Renata Gudiño Predoiu bajo mi supervisión.

Ing. Francisco Quiroz
DIRECTOR DEL PROYECTO

AUSPICIO

La presente investigación contó con el auspicio del proyecto “Reciclaje de los residuos plásticos provenientes de los invernaderos del sector florícola del distrito metropolitano de Quito”, ejecutado en el Centro de investigaciones Aplicadas a Polímeros con apoyo del Fondo Ambiental del Distrito Metropolitano de Quito.

AGRADECIMIENTOS

A mis padres y hermano, Daniela, Renato y Daniel, por su cariño y apoyo infinito a lo largo de cada decisión que he tomado en mi vida.

A mi director de tesis, Francisco Quiroz, por su entrega y apoyo al presente proyecto y por compartir su conocimiento a cada instante.

Al CIAP por permitirme utilizar sus instalaciones y equipos para llevar a cabo este proyecto.

A todos los miembros del CIAP: Francisco Cadena, Iván Chango, Elizabeth Venegas, Miguel Aldás, Vladimir Valle, por la amistad brindada durante esta etapa de mi vida.

A Fernanda e Iveth por su amistad incondicional y cariño a lo largo de toda la carrera universitaria, me han llenado de buenos recuerdos y espero que sigan creciendo a lo largo de nuestra vida.

A Andrés, Francisco, Marco, Sebastián grandes amigos que siempre estarán presentes en mi vida.

A María de la Paz por contagiarme su espíritu de lucha y las ganas de cumplir sueños.

A Santiago por su apoyo y gran corazón, siempre estuvo presente con una mano amiga.

A Sylvia mi querida amiga que siempre tuvo palabras de aliento y sonrisas.

A mis tíos y primas aquí y en la distancia, por estar siempre pendientes de mi y enviarme sus buenos pensamientos.

Al resto de personas que colaboraron con este proyecto, tanto con su presencia como con sus buenos deseos.

ÍNDICE DE CONTENIDOS

	PÁGINA
RESUMEN	XIX
INTRODUCCIÓN	XXI
1. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA	1
1.1. Materiales compuestos	1
1.1.1. Definición	1
1.1.2. Historia de los materiales compuestos	4
1.1.3. Consumo en la industria de materiales compuestos	6
1.1.4. Clasificación de materiales compuestos	7
1.1.4.1. Clasificación según la forma de los constituyentes	8
1.1.4.2. Clasificación según la naturaleza de los constituyentes	10
1.1.4.3. Clasificación según el tamaño de la fase dispersa	10
1.1.5. Características del polietileno	11
1.1.6. Características de las partículas lignocelulósicas	15
1.1.7. Materiales compuestos de matriz termoplástica y partículas lignocelulósicas	17
1.2. Procesamiento de materiales compuestos	21
1.2.1. Moldeo por compresión	21
1.2.2. Moldeo por transferencia de resina (RTM)	22
1.2.3. Proceso de bobinados de filamentos	24
1.2.4. Pultrusión	26
1.2.5. Extrusión	27
1.2.5.1. Extrusión monohusillo	28
1.2.5.2. Extrusión doble-husillo	30
1.2.5.3. Tipos de mezcla	31
1.2.5.4. Alimentación	33
2. METODOLOGÍA	36
2.1. Materias primas	36
2.2. Caracterización de materias primas	40
2.2.1. Caracterización de plástico reciclado	41
2.2.1.1. Caracterización mediante espectroscopia FTIR	41
2.2.1.2. Caracterización de la película de invernadero por DSC	42

2.2.1.3.	Determinación de la densidad aparente de plástico reciclado	43
2.2.1.4.	Determinación de la densidad de plástico reciclado	43
2.2.1.5.	Determinación del grado de humedad de plástico reciclado	44
2.2.2.	Caracterización de partículas lignocelulósicas (Aserrín)	44
2.2.2.1.	Determinación de la distribución de tamaños de aserrín	44
2.2.2.2.	Determinación del grado de humedad de aserrín	45
2.3.	Pruebas preliminares	46
2.3.1.	Determinación de la temperatura de procesamiento	47
2.3.2.	Determinación de la velocidad de los husillos	48
2.4.	Pruebas de procesamiento	49
2.4.1.	Determinación de las formulaciones de material compuesto	49
2.4.2.	Procesamiento de las formulaciones	50
2.5.	Evaluación de formulaciones	50
2.5.1.	Determinación de la dispersión del material compuesto	51
2.5.2.	Determinación de las propiedades mecánicas del material compuesto	52
2.5.3.	Determinación estructural del material compuesto	55
2.5.4.	Determinación del índice de fluidez del material compuesto	55
3.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	57
3.1.	Caracterización de materias primas	57
3.1.1.	Espectrometría infrarroja	57
3.1.2.	Calorimetría diferencial de barrido	59
3.1.3.	Densidad aparente	61
3.1.4.	Densidad	61
3.1.5.	Grado de humedad	62
3.1.5.1.	Grado de humedad para el aserrín	62
3.1.5.2.	Grado de humedad para el polietileno reciclado	62
3.1.6.	Separación por tamaños	63
3.2.	Pruebas preliminares	64
3.2.1.	Temperatura de procesamiento	64
3.2.2.	Velocidad de los husillos	66
3.3.	Evaluación de formulaciones	69

3.3.1. Microscopía óptica	69
3.3.2. Pruebas mecánicas	73
3.3.3. Espectrofotometría infrarroja	89
3.3.4. Índice de fluidez	92
4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	95
4.1. Conclusiones	95
4.2. Recomendaciones	99
BIBLIOGRAFÍA	102
ANEXOS	108

ÍNDICE DE TABLAS

		PÁGINA
Tabla 1.	Variación de propiedades generales al incrementar refuerzos en un material	4
Tabla 2.	Densidad de las diferentes variedades de polietileno	14
Tabla 3.	Composición de la madera*	16
Tabla 4.	Dimensiones de fibra, chip y partícula para la madera*	19
Tabla 5.	Composición de formulaciones con base en el número de malla de la distribución de tamaños de aserrín y porcentaje de aserrín incorporado	50
Tabla 6.	Análisis de grupos funcionales del espectro infrarrojo realizado a la plástico reciclado	58
Tabla 7.	Humedad del aserrín en corridas paralelas	62
Tabla 8.	Humedad del polietileno reciclado en corridas paralelas	62
Tabla 9.	Peso de aserrín detenido de acuerdo al tamaño de partícula	63
Tabla 10.	Perfil de temperatura para el procesamiento de material compuesto	66
Tabla 11.	Velocidades de alimentación y husillo de la extrusora para las diferentes formulaciones	68
Tabla 12.	Propiedades mecánicas de las cintas provenientes de las formulaciones de material compuesto	74
Tabla 13.	Análisis de grupos funcionales del espectro infrarrojo realizado al material compuesto	89
Tabla 14.	Índice de fluidez de las formulaciones de polietileno reciclado y aserrín	93
Tabla 15.	Datos de alimentación del polietileno reciclado	112
Tabla 16.	Datos de alimentación del aserrín malla 30	112
Tabla 17.	Determinación del índice de fluidez de material compuesto al 5% de aserrín malla 30	123

Tabla 18.	Determinación del índice de fluidez de material compuesto al 10% de aserrín malla 30	123
Tabla 19.	Determinación del índice de fluidez de material compuesto al 15% de aserrín malla 30	124
Tabla 20.	Determinación del índice de fluidez de material compuesto al 5% de aserrín malla 50	124
Tabla 21.	Determinación del índice de fluidez de material compuesto al 10% de aserrín malla 50	125
Tabla 22.	Determinación del índice de fluidez de material compuesto al 15% de aserrín malla 50	125
Tabla 23.	Determinación del índice de fluidez de material compuesto al 5% de aserrín malla 60	126
Tabla 24.	Determinación del índice de fluidez de material compuesto al 10% de aserrín malla 60	126
Tabla 25.	Determinación del índice de fluidez de material compuesto al 15% de aserrín malla 60	127
Tabla 26.	Determinación del índice de fluidez de material compuesto al 5% de aserrín malla 100	127
Tabla 27.	Determinación del índice de fluidez de material compuesto al 10% de aserrín malla 100	128
Tabla 28.	Determinación del índice de fluidez de material compuesto al 15% de aserrín malla 100	128
Tabla 29.	Propiedades mecánicas de la cinta proveniente de la formulación de 5% de aserrín malla 30 y 95% de polietileno reciclado	130
Tabla 30.	Propiedades mecánicas de la cinta proveniente de la formulación de 10% de aserrín malla 30 y 90% de polietileno reciclado	130
Tabla 31.	Propiedades mecánicas de la cinta proveniente de la formulación de 15% de aserrín malla 30 y 85% de polietileno reciclado	131
Tabla 32.	Propiedades mecánicas de la cinta proveniente de la formulación de 5% de aserrín malla 50 y 95% de polietileno reciclado	131

Tabla 33.	Propiedades mecánicas de la cinta proveniente de la formulación de 10% de aserrín malla 50 y 90% de polietileno reciclado	132
Tabla 34.	Propiedades mecánicas de la cinta proveniente de la formulación de 15% de aserrín malla 50 y 85% de polietileno reciclado	132
Tabla 35.	Propiedades mecánicas de la cinta proveniente de la formulación de 5% de aserrín malla 60 y 95% de polietileno reciclado	133
Tabla 36.	Propiedades mecánicas de la cinta proveniente de la formulación de 10% de aserrín malla 60 y 90% de polietileno reciclado	133
Tabla 37.	Propiedades mecánicas de la cinta proveniente de la formulación de 15% de aserrín malla 60 y 85% de polietileno reciclado	134
Tabla 38.	Propiedades mecánicas de la cinta proveniente de la formulación de 5% de aserrín malla 100 y 95% de polietileno reciclado	134
Tabla 39.	Propiedades mecánicas de la cinta proveniente de la formulación de 10% de aserrín malla 100 y 90% de polietileno reciclado	135
Tabla 40.	Propiedades mecánicas de la cinta proveniente de la formulación de 15% de aserrín malla 100 y 85% de polietileno reciclado	135
Tabla 41.	Propiedades mecánicas de la cinta proveniente de la formulación de 30% de aserrín malla 100 y 70% de polietileno reciclado	136

ÍNDICE DE FIGURAS

		PÁGINA
Figura 1.	Diagrama esfuerzo-deformación correspondiente a los materiales compuestos y sus componentes	2
Figura 2.	Situación del mercado mundial de materiales compuestos por área geográfica	7
Figura 3.	Materiales compuestos reforzados con fibras	8
Figura 4.	Materiales compuestos estructurales	9
Figura 5.	Diferentes tipos de refuerzos en materiales compuestos	9
Figura 6.	Interacciones moleculares de los nanocomposites	11
Figura 7.	Estructura química del polietileno	12
Figura 8.	Estructura química de la celulosa	16
Figura 9.	Pared celular de la madera	17
Figura 10.	Esquema de moldeo por compresión	22
Figura 11.	Esquema de moldeo de transferencia de resina	24
Figura 12.	Esquema de bobinados de filamentos	26
Figura 13.	Esquemización del proceso de pultrusión	27
Figura 14.	Granza de material compuesto obtenida del proceso de extrusión.	28
Figura 15.	Extrusor monohusillo	28
Figura 16.	Zonas del husillo y evolución de la presión a lo largo del husillo	29
Figura 17.	Partes del doble husillo co-rotante	31
Figura 18.	Representación esquemática de las mezclas distributivas y dispersas	32
Figura 19.	Flujo del material en una tolva de alimentación	33
Figura 20.	Caracterización de materias primas	40

Figura 21.	Hojuelas de polietileno acondicionado	41
Figura 22.	Espectrofotómetro de transformadas de Fourier de marca Perkin Elmer Modelo Spectrum One del CIAP	42
Figura 23.	Calorímetro diferencial de barrido marca NETZCH	43
Figura 24.	Determinación de condiciones para el procesamiento de material compuesto	46
Figura 25.	Extrusora de doble husillo co-rotante marca JIANGYSU XINDA.	46
Figura 26.	Procesamiento de material compuesto mediante extrusión de doble tornillo	49
Figura 27.	Diagrama de flujo para la evaluación de formulaciones obtenidas de material compuesto.	50
Figura 28.	Prensa Carver modelo 11, perteneciente al CIAP	51
Figura 29.	Microscopio Thomas Scientific 1230CM con el equipo de luz Fiber-Lite MI-150 High Intensity Illuminator.	52
Figura 30.	Reómetro de torque electrónico marca HAAKE modelo Polylab System utilizado para la conformación de cintas	53
Figura 31.	Troquel perteneciente al CIAP utilizado en el corte de probetas para pruebas mecánicas de material compuesto	53
Figura 32.	Micrómetro MITUTOYO utilizado en mediciones de espesor para pruebas mecánicas de material compuesto	54
Figura 33.	Máquina de ensayos universales	54
Figura 34.	Plastómetro de extrusión empleado para la determinación del índice de fluidez	56
Figura 35.	Espectro FTIR de polietileno reciclado	57
Figura 36.	Superposición de espectros FTIR de polietileno reciclado y EVA	58
Figura 37.	Termograma obtenido del análisis de calorimetría diferencial de barrido del polietileno reciclado	59
Figura 38.	Distribución granulométrica para el aserrín	64

Figura 39.	Vista al microscopio de las formulaciones de aserrín Malla #30	70
Figura 40.	Vista al microscopio de las formulaciones de aserrín Malla #50	71
Figura 41.	Vista al microscopio de las formulaciones de aserrín Malla #60	72
Figura 42.	Vista al microscopio de las formulaciones de aserrín Malla #100	73
Figura 43.	Deformación al pico de las formulaciones realizadas con aserrín de Malla 30	75
Figura 44.	Deformación al pico de las formulaciones realizadas con aserrín de Malla 50	75
Figura 45.	Deformación al pico de las formulaciones realizadas con aserrín de Malla 60	76
Figura 46.	Deformación al pico de las formulaciones realizadas con aserrín de Malla 100	76
Figura 47.	Deformación al pico versus tamaño de partícula a diferentes concentraciones de aserrín	77
Figura 48.	Esfuerzo al pico de las formulaciones realizadas con aserrín de Malla 30	78
Figura 49.	Esfuerzo al pico de las formulaciones realizadas con aserrín de Malla 50	78
Figura 50.	Esfuerzo al pico de las formulaciones realizadas con aserrín de Malla 60	79
Figura 51.	Esfuerzo al pico de las formulaciones realizadas con aserrín de Malla 100	79
Figura 52.	Esfuerzo al pico versus tamaño de partícula a diferentes concentraciones de aserrín	80
Figura 53.	Deformación a la ruptura de las formulaciones realizadas con aserrín de Malla 30	80
Figura 54.	Deformación a la ruptura de las formulaciones realizadas con aserrín de Malla 50	81

Figura 55.	Deformación a la ruptura de las formulaciones realizadas con aserrín de Malla 60	81
Figura 56.	Deformación a la ruptura de las formulaciones realizadas con aserrín de Malla 100	82
Figura 57.	Deformación a la ruptura versus tamaño de partícula a diferentes concentraciones de aserrín	83
Figura 58.	Esfuerzo a la ruptura de las formulaciones realizadas con aserrín de Malla 30	84
Figura 59.	Esfuerzo a la ruptura de las formulaciones realizadas con aserrín de Malla 50	84
Figura 60.	Esfuerzo a la ruptura de las formulaciones realizadas con aserrín de Malla 60	85
Figura 61.	Esfuerzo a la ruptura de las formulaciones realizadas con aserrín de Malla 100	85
Figura 62.	Esfuerzo a la ruptura versus tamaño de partícula a diferentes concentraciones de aserrín	86
Figura 63.	Módulo de Young de las formulaciones realizadas con aserrín de Malla 30	87
Figura 64.	Módulo de Young de las formulaciones realizadas con aserrín de Malla 50	87
Figura 65.	Módulo de Young de las formulaciones realizadas con aserrín de Malla 60	88
Figura 66.	Módulo de Young de las formulaciones realizadas con aserrín de Malla 100	88
Figura 67.	Módulo de Young versus tamaño de partícula a diferentes concentraciones de aserrín	89
Figura 68.	Espectro FTIR de polietileno reciclado	90
Figura 69.	Espectro FTIR de material compuesto al 15% de aserrín malla 100	90
Figura 70.	Superposición de espectros de formulaciones con realizadas con 10% de aserrín en Malla 30, 50, 60 y 100	91
Figura 71.	Superposición de espectros de formulaciones con realizadas con aserrín correspondiente a la Malla 60, al 5, 10 y 15 %	92

Figura 72.	Índice de fluidez para todas las formulaciones de material compuesto	93
Figura 73.	Proceso de acondicionamiento del plástico de invernadero, previo a su procesamiento	110
Figura 74.	Espectro FTIR de material compuesto al 5% de aserrín Malla 30	115
Figura 75.	Espectro FTIR de material compuesto al 10% de aserrín Malla 30	115
Figura 76.	Espectro FTIR de material compuesto al 15% de aserrín Malla 30	116
Figura 77.	Espectro FTIR de material compuesto al 5% de aserrín Malla 50	116
Figura 78.	Espectro FTIR de material compuesto al 10% de aserrín Malla 50	117
Figura 79.	Espectro FTIR de material compuesto al 15% de aserrín Malla 50	117
Figura 80.	Espectro FTIR de material compuesto al 5% de aserrín Malla 60	118
Figura 81.	Espectro FTIR de material compuesto al 10% de aserrín Malla 60	118
Figura 82.	Espectro FTIR de material compuesto al 15% de aserrín Malla 60	119
Figura 83.	Espectro FTIR de material compuesto al 5% de aserrín Malla 100	119
Figura 84.	Espectro FTIR de material compuesto al 10% de aserrín Malla 100	120
Figura 85.	Espectro FTIR de material compuesto al 15% de aserrín Malla 100	120
Figura 86.	Espectro FTIR de material compuesto al 30% de aserrín Malla 100	121

ÍNDICE DE ANEXOS

	PÁGINA
ANEXO I: Proceso de acondicionamiento para la obtención de hojuelas de polietileno.	109
ANEXO II: Ejemplo de cálculo de los husillos de alimentación de la extrusora	111
ANEXO III: Espectros FTIR de las diferentes formulaciones de material compuesto	114
ANEXO IV: Determinación del índice de fluidez de las formulaciones de material compuesto	122
ANEXO V: Propiedades mecánicas de las formulaciones de material compuesto	129

RESUMEN

El presente proyecto de titulación tuvo como objetivo principal la elaboración de un material compuesto de polietileno reciclado proveniente de películas de invernadero y partículas lignocelulósicas, comúnmente conocidas como aserrín.

Como parte de la etapa inicial se caracterizó las materias primas por espectroscopia FTIR y calorimetría diferencial de barrido (DSC). Los resultados mostraron presencia de LDPE, LLPDE y EVA. Se logró hacer una cuantificación aproximada, determinándose en un 10% en contenido en las muestras analizadas (Taípe, 2008).

El plástico reciclado tenía un grado de humedad de 0,14% el cual se encontraba dentro de los valores permitidos para procesar polietileno, sin que sea necesaria una etapa de secado. El valor de densidad aparente determinado confirmó la dificultad de flujo que presenta este material lo que determinó la necesidad de disponer dispositivos de alimentación forzada.

Para caracterizar el aserrín se realizaron pruebas de humedad, dando como resultado 7,24% de humedad, valor apto para ser procesado como refuerzo de un material compuesto. En este estudio se trabajó con el d80 de 690 μm .

De las pruebas preliminares se estableció que el perfil de temperatura más apropiado para procesar este material se encuentra en el intervalo de 100 a 180°C, para evitar la degradación del material.

Conjuntamente se obtuvo una velocidad de alimentación y de giro del doble husillo para cada formulación, debido a su relación con la concentración de cada formulación. El rango de velocidad depende de cada formulación con diferente composición de polietileno reciclado y aserrín.

En la última etapa se evaluaron las formulaciones obtenidas en el proceso de extrusión. Para determinar la distribución y dispersión del material, se realizaron pruebas de microscopía óptica, de estas pruebas se pudo observar que a medida que disminuye el tamaño de partícula, mejoran las propiedades de distribución y dispersión del refuerzo en el material compuesto.

Con el fin de determinar la afinidad entre componentes, se realizaron pruebas mecánicas, donde se obtuvo que las formulaciones con menor tamaño de partícula tienen valores mayores de deformación a la ruptura, al mismo tiempo aquellas que tuvieron menor cantidad de aserrín también tuvieron valores más elevados de deformación a la ruptura.

Para finalizar la evaluación, se obtuvo el índice de fluidez de cada formulación, aquí se observó que existe mayor influencia por parte de la cantidad de aserrín incorporado, con variaciones máximas de 1,4 g/10 min, mientras que con el tamaño de partícula se obtuvieron variaciones de 1,0 g/10 min.

INTRODUCCIÓN

El Distrito Metropolitano de Quito, considerando las plantaciones que cultivan bajo invernadero, genera aproximadamente 500 000 kg de residuos plásticos por año (Cazar, 2010). La participación de Pichincha en la industria nacional en el sector de los plásticos corresponde al 30,3%, por lo que se debe comprometer al sector productivo a implementar técnicas de reciclaje como nuevas alternativas de crecimiento industrial (Enríquez, 2005).

Por otro lado el aserrín es considerado un desperdicio dentro de la industria de la construcción y de acabados inmobiliarios. Este tipo de desperdicios son incinerados o, en ciertos casos, enviados a rellenos sanitarios. Es importante darles un uso dentro de las mismas industrias de donde provienen.

Hoy en día las prácticas ambientales mueven todos sus esfuerzos hacia el reciclaje y la optimización de recursos, disminuyendo así desperdicios y contaminación. Por estos motivos se propone el desarrollo de un material compuesto de partículas lignocelulósicas en una matriz de polietileno reciclado (proveniente de cultivos de invernadero).

La posibilidad de obtener un material con las mejores propiedades de cada uno de sus componentes ha generado mucho interés en la industria de los polímeros, esto no siempre es posible debido a la falta de afinidad que se presenta entre los materiales de partida.

Las ventajas de los materiales compuestos de matriz polimérica reforzados con partículas lignocelulósicas son: bajo coste, alta rigidez y resistencia, resistencia al desgaste, fabricación más sencilla e incluso, en algunos casos, la fácil degradación del material (Young, 1997).

En general, los materiales compuestos poseen la gran ventaja de tener una muy baja densidad con muy buenas propiedades mecánicas, permitiendo el diseño de

elementos estructurales muy ligeros y de fácil construcción. En el sector de la construcción, ya tiene su aplicación, pero mayoritariamente como elementos secundarios, siendo una alternativa a los materiales clásicos de construcción.

Las últimas tendencias consisten en combinar los materiales compuestos con materiales tradicionales y en potenciar las matrices reciclables con las partículas naturales. El mercado mundial de materiales compuestos ha crecido desde 1994 hasta el año 2000 en el 5,7% anual en volumen de producción. Los materiales compuestos basados en matrices termoplásticas aparecieron a principios de los años ochenta. Son más recientes y también más prometedores. Sin embargo, los materiales compuestos termoestables representan aún más de las dos terceras partes del mercado (Béguin, 2002).

La búsqueda de innovación y prácticas amigables con el medio ambiente permiten que los materiales compuestos sean las nuevas apuestas de los investigadores. En el Distrito Metropolitano de Quito, es importante impartir este tipo de iniciativas, donde el sector industrial tiene una alternativa de producción con materia prima de bajo costo y buenos resultados. Reemplazando poco a poco a materiales difíciles de reciclar, que generan contaminación de suelos y costos de producción muy altos.

1. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

1.1. MATERIALES COMPUESTOS

1.1.1. DEFINICIÓN

Un material compuesto está formado por la combinación de dos o más componentes, buscando llegar a propiedades superiores a las de cada componente por sí solo. La combinación puede darse en diferente composición, los componentes mantienen sus identidades, es decir, no se disuelven ni se adhieren completamente, aunque los dos actúen en conjunto. (Rosato, 1997).

Sin embargo, existen ciertas condiciones adicionales para definir a un material como compuesto, que son las siguientes: En primer lugar, el material compuesto debe ser expresamente fabricado por la mano del hombre. De esta manera una larga lista de materiales compuestos naturales, tales como los que componen los huesos y las masas arbóreas, quedan fuera de la definición.

Como segunda condición, los materiales compuestos, deben estar conformados por materiales de diferente origen, de modo que los materiales cerámicos, por ejemplo, aunque están formados por varios componentes ya sean cristalinos o amorfos, no son considerados materiales compuestos, ya que el origen de sus componentes es muy similar.

La última condición a cumplirse es que sea un material construido por las manos del hombre, a pesar de que el hormigón armado está construido íntegramente por el hombre y tiene componentes de diferente origen, no se considera tampoco un material compuesto, por ser material clásico en la Ingeniería Civil (Miravete y Castejón, 2002).

Para formar un material compuesto, se requieren dos fases: una fase continua denominada *matriz* y otra fase dispersa denominada *refuerzo*.

Del refuerzo se obtienen mejoras en las propiedades mecánicas y la matriz aporta con resistencia térmica (usualmente mayor a la del refuerzo) y resistencia al ambiente.

Tanto la matriz como el refuerzo se encuentran separados algo llamado interfase, de la cual dependen las propiedades mecánicas del material compuesto. Es especialmente importante, ya que a partir de la interfase se determinará:

- La unión entre fibra y matriz.
- La transmisión de esfuerzos mecánicos entre ambas.

La Figura 1 presenta las propiedades mecánicas de la matriz, del refuerzo, y del material compuesto obtenido a partir de la combinación de ambos.

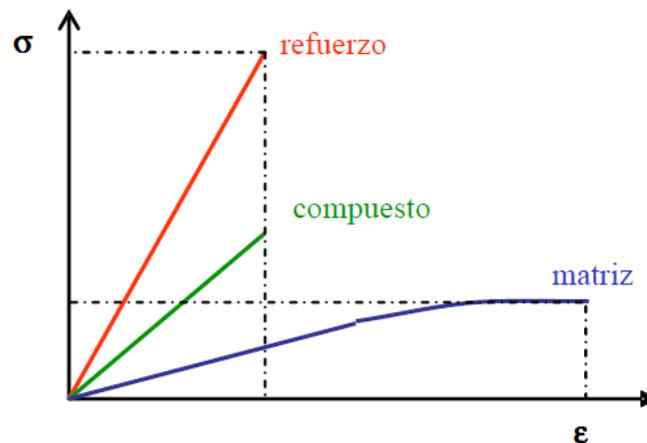


Figura 1. Diagrama esfuerzo-deformación correspondiente a los materiales compuestos y sus componentes
(Vallejos, 2006)

Además de la influencia de la interfase, las propiedades dependen de una serie de factores:

- Propiedades de la matriz y del refuerzo
- Método de producción del material compuesto

- Contenido de refuerzo
- Orientación del refuerzo

En cuanto a las posibles cargas que puede tener un material es necesario definir algunas características, por ejemplo, su clasificación:

- Inertes

Incrementan el volumen y reducen el precio.

- Activos

Incrementan alguna propiedad física específica. Aquellos que tienen una acción reforzante, suelen ser de naturaleza orgánica y los que tienen naturaleza inorgánica suele ser cargas o aditivos.

La principal diferencia entre las cargas inertes y las activas es que éstas ocasionan un incremento en la resistencia mecánica de los compuestos.

Los factores principales que determinan el empleo y selección de un determinado refuerzo son los siguientes:

- Coste
- Facilidad de dispersión
- Compatibilidad superficial
- Posible acción abrasiva con la maquinaria
- Propiedades del compuesto final

La utilización de refuerzos o cargas solo se justifica, si se consiguen mejoras en determinadas propiedades o reducción del coste en comparación al material no reforzado, o si una determinada combinación de propiedades no se puede conseguir por otras vías. En la Tabla 1 se indican las propiedades que pueden cambiar cuando se adicionan refuerzos en un material.

Tabla 1. Variación de propiedades generales al incrementar refuerzos en un material

PROPIEDADES	REFUERZOS INERTES	REFUERZOS ACTIVOS
Densidad	Aumenta	
Módulo de elasticidad	Aumenta	
Dureza	Aumenta	
Contracción de moldeo	Disminuye	
Dependencia de las propiedades mecánicas con la temperatura	Disminuye	
Coste	Disminuye	Aumenta
Tensión	No afecta	Aumenta
Resistencia al impacto	No afecta	Aumenta
Anisotropía	No afecta	Aumenta

1.1.2. HISTORIA DE LOS MATERIALES COMPUESTOS

La Biblia menciona el uso de materiales compuestos, refiriéndose a la combinación de paja con lodo para la elaboración de ladrillos. Dentro de la historia de los materiales compuestos existen tres momentos importantes que han desembocado en su desarrollo actual: el primero fue la disponibilidad comercial de los filamentos de la fibra de vidrio en 1935, el segundo fue el desarrollo de las fibras duras de aramida y carbón a finales del 1960 y comienzos de 1970 y el tercer momento fue la creación de estructuras hechas de las fibras mencionadas anteriormente (Harper, 1996).

La historia relata que los antiguos Egipcios conocían la fibra de vidrio, sin embargo la revolución de los materiales compuestos comienza en el siglo XX. En el año de 1907, el químico belga Leo Beakeland, mezcló un fenol y un formaldehído, bajo condiciones de temperatura y presión altas, obteniendo así la primera resina termoestable, nombrada *bakelita* gracias al científico que la descubrió.

Durante las tres primeras décadas del siglo XX se desarrollan otro tipo de matrices, como las resinas: poliésteres, vinil ésteres y epoxis, aplicadas al aislamiento, armamento y bisutería. A la par de este desarrollo surge la necesidad de administrar tratamientos previos a las fibras para mejorar su adhesión con la matriz. A consecuencia de esto los primeros materiales compuestos fueron las fibras de vidrio en matrices fenólicas y poliésteres, utilizadas para embarcaciones, construcciones y aplicaciones eléctricas.

Para el año de 1930, el crecimiento de la fibra de vidrio era incuestionable, ya que los requerimientos de materiales en la época no eran tan exigentes, sin embargo, había problemas de aislamiento eléctrico, distribuciones de peso y espesor. Estos problemas evitaban que los materiales compuestos puedan reemplazar a materiales como el acero, aluminio, madera y hormigón, conocidos como materiales clásicos de construcción.

A partir de las inyección de polímeros termoplásticos, en 1940 surge la inventiva de procesos de inyección para matrices termoestables y una década después se conocen la maquinaria que incluía un tornillo sinfín.

En la misma década de los cincuenta se conoce la *pultrusión* como un método automatizado, a partir de esto aumenta la producción de perfiles, ya que eran materiales con muy buena resistencia y propiedades homogéneas.

Con este antecedente aparecen nuevos procesos como el SMC (sheet moulding compound), ó preimpregnados, que consisten en combinar las fases del material compuesto en una prensa caliente. Otro tipo de procesamiento de materiales

compuestos, proveniente de esa época es el enrollamiento de filamentos, utilizado hasta el día de hoy.

En el panorama actual, la situación ha evolucionado al punto donde los materiales compuestos reemplazan a los materiales tradicionales, ya no se utilizan únicamente en el sector marítimo y aeronáutico, sino en el sector de la construcción, automovilístico, etc. Son materiales innovadores y con propiedades únicas que los hacen muy deseables, los procesos de elaboración se han automatizado y a la vez optimizado, para crear procesos amigables con el ambiente y más eficientes (Miravete y Castejón, 2002).

En la actualidad cada vez se utilizan más materiales reforzados con fibras que sean más baratos y de menor impacto medioambiental. Para conseguir esto se refuerzan los polímeros con fibras provenientes de productos naturales como el lino o la fibra de coco. La industria del automóvil, es una de las mayores beneficiarias de los materiales compuestos, donde según una directriz de la UE para el 2015 el 95% de la masa de un automóvil debe ser reutilizable. Es importante resaltar que cuando las fibras de refuerzo tienen orígenes vegetales, el impacto al ambiente total en la fabricación tiene reducciones muy positivas.

1.1.3. CONSUMO EN LA INDUSTRIA DE MATERIALES COMPUESTOS

Debido a los retos que presentan en su procesamiento los materiales compuestos no han podido reemplazar por completo a materiales clásicos como el acero, aluminio, madera y concreto. Sin embargo sus características únicas los hacen muy apetecibles, haciendo que cada día la investigación dirija sus esfuerzos hacia el desarrollo de estos materiales.

La aplicación y consumo exitoso de estos materiales tiene como base el entendimiento de las ventajas y desventajas que presentan, además de su complejo diseño, procesamiento, desempeño y su economía.

Unas de las industrias que ha logrado adaptar los materiales compuestos a sus necesidades es la industria automotriz, a pesar de solo utilizar materiales compuestos de fibra corta, en aplicaciones secundarias, es decir, en el interior el vehículo y no como parte de la carrocería o el motor (Stokke y Gardner, 2003).

De acuerdo con una investigación realizada en 1988 por el Composites Institute of The Society of The Plastics Industry las tres industrias que más consumen materiales compuestos son: los transportes terrestres, la construcción y la marina, representando el 60% de consumo total (Mallick y Newnam, 1990).

En el año de 1994 es marcado por 5,7% de crecimiento en la producción de materiales compuestos. Para el año 2000 se habían producido siete millones de toneladas y en el 2006 esta cifra creció a 10 millones de toneladas (Cámara de Comercio de Valencia, 2008).

En el 2002 la producción de materiales compuestos estaba distribuida, ampliamente en Estados Unidos liderando la industria, seguidos por el continente europeo y el continente asiático, como se puede ver en la Figura 2 América Latina para ese año ocupaba el 2% de la industria de composites.

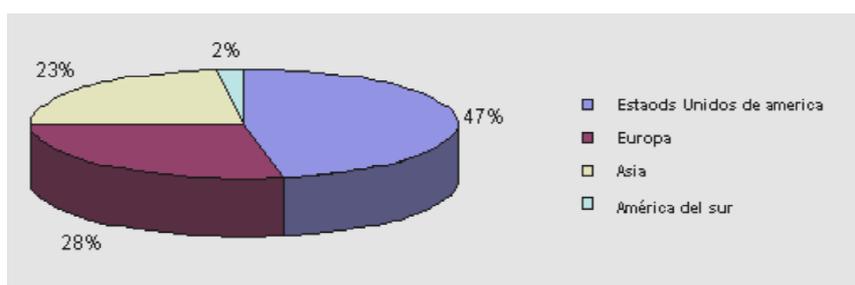


Figura 2. Situación del mercado mundial de materiales compuestos por área geográfica (Chalaye, 2002)

1.1.4. CLASIFICACIÓN DE MATERIALES COMPUESTOS

La variedad de materiales compuestos es tan extensa, que encontrar una sola clasificación para todos es ellos resulta complicado, especialmente una de

aceptación general. Por este motivo se han seleccionado aquellas que permiten alinear ciertos aspectos comunes. Es posible clasificar los materiales compuestos, según su forma, naturaleza de sus componentes y según el tamaño u orientación de su refuerzo.

1.1.4.1. Clasificación según la forma de los constituyentes

- Materiales compuestos fibrosos

Están reforzados con fibras, por esta razón, mantienen una relación longitud-diámetro elevada. El refuerzo puede tratarse de fibras continuas o discontinuas y a su vez, las fibras discontinuas pueden estar en orden aleatorio ó en orden unidireccional. Es posible observar los tipos de fibras y orientación en la Figura 3.

Ejemplo: Resina epoxi con fibra de vidrio.

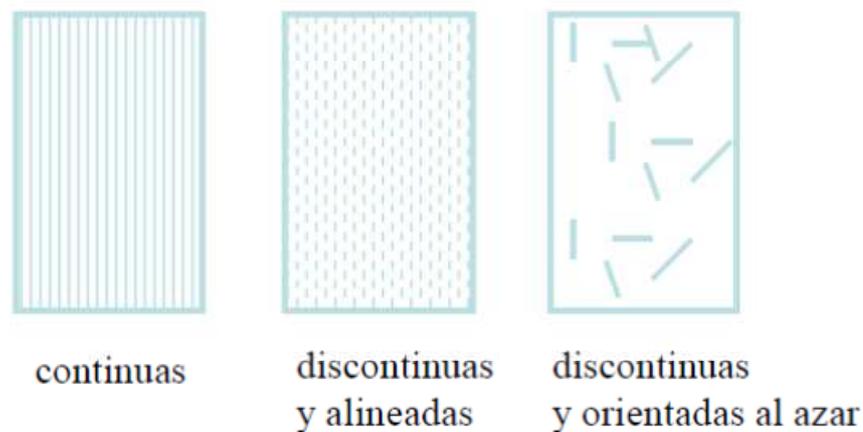


Figura 3. Materiales compuestos reforzados con fibras
(Paris *et al*, 2006)

- Materiales compuestos particulados

Están reforzados por partículas equiaxiales, esto quiere decir, que las partículas poseen las mismas dimensiones todas las direcciones.

Ejemplo: Caucho reforzado con negro de humo.

- Materiales compuestos estructurales

Estos materiales son la combinación de materiales compuestos y materiales homogéneos. Existen dos tipos de composites estructurales, el primer tipo son los materiales laminados, que se constituyen por el apilamiento de láminas paralelas, para mejorar las propiedades de esta material combinando láminas de material compuesto fibroso con diferente orientación. El otro tipo de materiales son los paneles sándwich, constituidos de núcleo y tapas (que por lo general es un polímero esponjado) como se indica en la Figura 4.

Ejemplo: Madera contrachapada.



Figura 4. Materiales compuestos estructurales
(Paris *et al*, 2006)

En la Figura 5 se identifican varios tipos de refuerzos para los materiales compuestos, si bien no se encuentran todos los tipos de refuerzo, es posible observar la diferencia entre estos.



Figura 5. Diferentes tipos de refuerzos en materiales compuestos
(Schwartz, 1992)

1.1.4.2. Clasificación según la naturaleza de los constituyentes

- Composites de matriz metálica

Las ventajas de estos materiales son: conductividad térmica, conductividad eléctrica, no absorben humedad y mayor resistencia al desgaste, por lo que aumenta su tiempo de vida útil. Su principal desventaja recae en los costos de procesamiento y materiales. Aquí se encuentran las aleaciones de aluminio, titanio y magnesio.

- Composites de matriz mineral

Tienen elevada resistencia a la temperatura y como desventajas su fragilidad y baja resistencia a choques térmicos. Por lo general su matriz es de alúmina y CSi.

- Composites de matriz orgánica

Por lo general son baja densidad, es posible obtener piezas complejas y son los más utilizados en la actualidad. Presentan la desventaja de tener poca resistencia al fuego. Estos composites corresponden a los polímeros.

1.1.4.3. Clasificación según el tamaño de la fase dispersa

- Microcomposites o composites convencionales

Se caracterizan porque el tamaño del refuerzo es del orden del micrómetro. Con este tipo de refuerzos, se puede mejorar notablemente las propiedades mecánicas, sin embargo, se presentan problemas al momento de procesar el material y existen limitantes ya que no pueden ser procesados a manera de láminas o fibras. Estos problemas surgen como consecuencia de la baja afinidad que existe entre el refuerzo y la matriz. Otro motivo para la disminución de compatibilidad se debe a la diferencia de tamaño entre los mismos, usualmente

las cadenas de los polímeros (en el caso de los materiales compuestos de matriz orgánica). Por lo tanto, existe una interfase débil entre ambos componentes que no permite la completa interacción entre ellos.

- Nanocomposites

Para disminuir los efectos causados por la diferencia de tamaño, se crearon los nanocomposites, en los cuales el refuerzo es del orden de nanómetro. El tamaño de refuerzo permite que la interacción entre la matriz y el refuerzo se dé a nivel molecular, creando una interfase más fuerte.

Las interacciones a nivel de interfase de estos dos tipos de materiales compuestos se observa en la Figura 6.

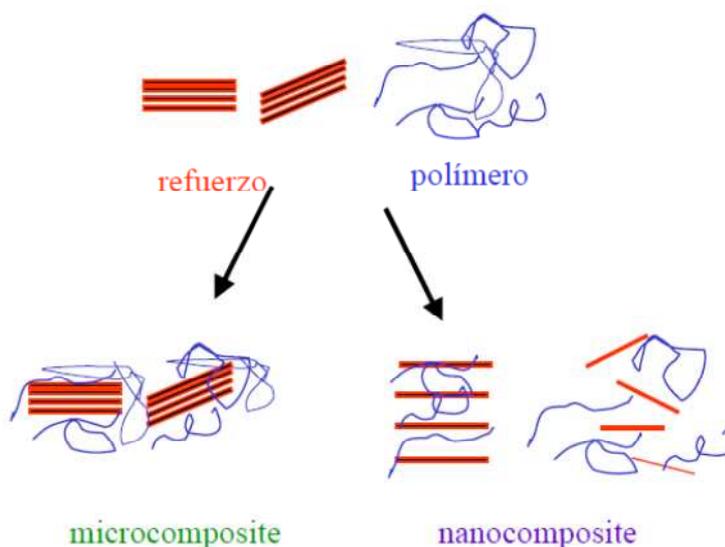


Figura 6. Interacciones moleculares de los nanocomposites
(Paris, 2006)

1.1.5. CARACTERÍSTICAS DEL POLIETILENO

El polietileno es uno de los termoplásticos más utilizados en la vida diaria, debido a sus infinitas aplicaciones en múltiples sectores.

Existen muchas variedades de polietileno, según el tipo de procesamiento y ordenamiento molecular, a continuación se presenta una breve clasificación de los tipos de polietileno más comunes, cabe mencionar que existen muchas variantes del polietileno. Su estructura química se presenta en la Figura 7.

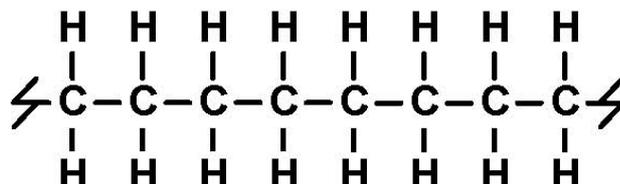


Figura 7. Estructura química del polietileno
(Coutinho *et al.*, 2003)

- Polietileno de Baja Densidad (LDPE)

Por la morfología que presentan sus cadenas, también es conocido como polietileno ramificado. Este variedad de polietileno posee buena resistencia a la corrosión y baja permeabilidad al agua. Generalmente es utilizado en lugares donde se requiere alta resistencia a la corrosión. En contraparte, tiene baja resistencia a la temperatura, baja rigidez y poca fuerza estructural, al ser comparado con otros polímeros.

Uno de los primeros polímeros obtenidos fue el LDPE, fue sintetizado en el año de 1939 en Gran Bretaña. Cuando se sometió al etileno a altas condiciones de presión y temperatura, en combinación de catalizadores de radicales libres, el resultado fue esta variedad de polietileno.

En el caso particular del polietileno de baja densidad es un plástico semicristalino, flexible, blanquecino, inodoro e insípido, de tacto parafínico, con excelentes propiedades eléctricas y poca resistencia a elevadas temperaturas.

Se lo utiliza para la fabricación de bolsas de plástico, sobre todo para basura, pero también se utilizan para embalajes industriales, impermeabilización de terrenos y edificios, plantaciones agrícolas, contenedores, tuberías, debido a su buena resistencia eléctrica (alta constante dieléctrica) frente a las altas

frecuencias, se utiliza para aislar cables, como los de las antenas de los aparatos de TV (FIDA, 2005).

- Polietileno de Alta Densidad (HDPE)

Es un polímero termoplástico semicristalino. Su grado de cristalinidad se encuentra en función del peso molecular. Por su versatilidad, tiene el mayor número de aplicaciones del polietileno. Este polietileno tiene alta resistencia al impacto, baja absorción de humedad y buena fuerza extensible, estas propiedades se combinan con su peso ligero, lo cual resulta una característica muy deseable. Para obtener HDPE se realiza la polimerización de etileno a baja presión y en presencia de catalizadores.

- Polietileno de Mediana Densidad (MDPE)

Es un polímero con facilidad para ser procesado mediante extrusión con excelentes propiedades mecánicas aún en medios agresivos y temperaturas bajas. Por estos motivos, es empleado en la elaboración de tuberías subterráneas para transportar gas natural, las cuales se identifican mediante el color amarillo.

- Polietileno de Baja Densidad Lineal (LLDPE)

Es un copolímero obtenido por copolimerización de α -olefinas como el 1-buteno, 1-hexeno ó 1-octeno con polietileno, con una estructura molecular lineal. Se considera como un polímero termoplástico con alta dureza y resistencia, que consiste en una larga cadena que proporciona soporte lineal, con ramificaciones laterales cortas. Las propiedades de este polietileno están en función del peso molecular y de la distribución de pesos moleculares. Su rápido crecimiento se debe a la inserción en el mercado de las películas, utilizadas en plantaciones tipo invernadero.

- Polietileno de Peso Molecular Ultra-Alto (UHMWPE)

Esta variedad de polietileno tiene un peso molecular de tres a seis millones de gramos por cada gramo-mol. Entre sus propiedades se encuentran: alta resistencia química, resistencia a la abrasión, largo tiempo de vida útil, resistencia al impacto y a la fatiga. El UHMWPE tiene un alto nivel de entrecruzamiento, lo que impide el deslizamiento a nivel macromolecular, este es uno de los principales motivos para su alta resistencia a la temperatura. La presentación más común es en grandes láminas, las cuales suelen sustituir el hielo de las pistas de patinaje.

En la Tabla 2 se indican las densidades de los diferentes tipos de polietileno.

Tabla 2. Densidad de las diferentes variedades de polietileno

	Polietileno de baja densidad (LDPE)	Polietileno lineal de baja densidad (LLDPE)	Polietileno de alta densidad (HDPE)	Polietileno de ultra alto peso molecular (UHMWPE)
Densidad a 23°C (g/cm³)	≤ 0,920	0,918 - 935	0,941 - 0,965	0,940

*Naranjo *et al*, 2008

El polietileno de baja densidad, junto con su variedad lineal, es uno de los plásticos más utilizados en agricultura, siendo su porcentaje del 58,7% en el 2001 en relación con los demás polímeros. Su producción a nivel mundial era de sesenta millones de toneladas en el 2005 (Peirano y Pereira, 2009).

Los productos que más se fabrican a partir del PEBD para la agricultura son:

- Acolchados de suelos

Es una cubierta parcial o total, de suelos activamente agrícolas. Esta cubierta permite proteger cultivos, disminuir el tiempo de cosecha, mejorar rendimientos y evitar el contacto del cultivo con el suelo.

- Túneles de cultivo

Están hechos de LPDE y de un copolímero llamado EVA. A partir de estos túneles de cultivo se mejora el rendimiento y se consigue una maduración del cultivo en tiempos más cortos.

- Invernaderos

Los invernaderos protegen los cultivos de alteraciones climáticas y de las radiaciones solares. Uno de los principales componentes de los invernaderos, es el LDPE, sin embargo y a partir de los requerimientos, hoy en día se utilizan mezclas con copolímero EVA y LLDPE.

La densidad aparente de los residuos plásticos en forma de película, luego de ser sometidos a una reducción de tamaño, puede estar entre los 100 y 150 kg/m³, lo que dificulta tanto su almacenamiento como su posterior alimentación a las diferentes unidades de procesamiento. (Goodship, 2007). En el caso del polietileno de baja densidad se recomienda que el perfil de temperaturas empleado en una unidad de extrusión esté entre 140 y 210 °C (Osswald *et al.*, 2006). Al mismo tiempo el perfil de temperatura debe ser ascendente, esto significa que la temperatura más baja se encuentre en la zona de alimentación y la más alta en la boquilla (Goodship, 2007).

1.1.6. CARACTERÍSTICAS DE LAS PARTÍCULAS LIGNOCELULÓSICAS

Los principales componentes de la madera son:

- Celulosa

Pertenece a los polisacáridos, es el compuesto mayoritario, representando alrededor del 50% de la madera.

- Lignina

Este polímero resulta de la unión de alcoholes fenilpropílicos y algunos ácidos. Aporta con dureza y protección a la masa arbórea.

- Hemicelulosa

Actúa como agente aglutinante entre las fibras de la madera. Aunque estos tres compuestos no son los únicos componentes de la madera, si son los mayoritarios, el resto perteneciente al 1% corresponde a resinas, grasas y otros compuestos, que varían en función de procedencia de la madera (Vignote, 2006).

En la Tabla 3 se observa la composición general de la madera, existen trazas de otros compuestos, pero resultan muy variables para ser considerados.

Tabla 3. Composición de la madera*

COMPUESTO	COMPOSICIÓN (%)
Celulosa	~50
Hemicelulosa	~25
Lignina	~25

*Vignote, 2006

En la Figura 8 es posible apreciar la estructura química de la celulosa y los antes mencionados grupos hidroxilo.

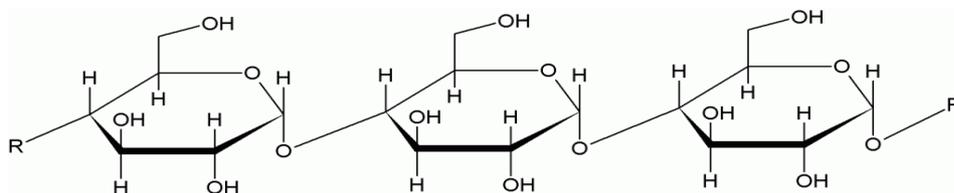


Figura 8. Estructura química de la celulosa
(Guillén y Garrido, 1987)

La pared celular es la capa más externa y rígida, brinda soporte para su contenido, da forma, con micro fibrillas de celulosa en diversos ángulos para

formar capas que se pueden impregnar de sustancias de acuerdo a su situación por ejemplo: lignina, calcio, pectina, etc. La pared celular de la madera está constituida mayormente por celulosa y hemicelulosa, estos compuestos contienen grupos hidroxilo los cuales le dan higroscopicidad a esta parte de la célula. En la Figura 9 se encuentra un esquema de la pared celular de la madera.

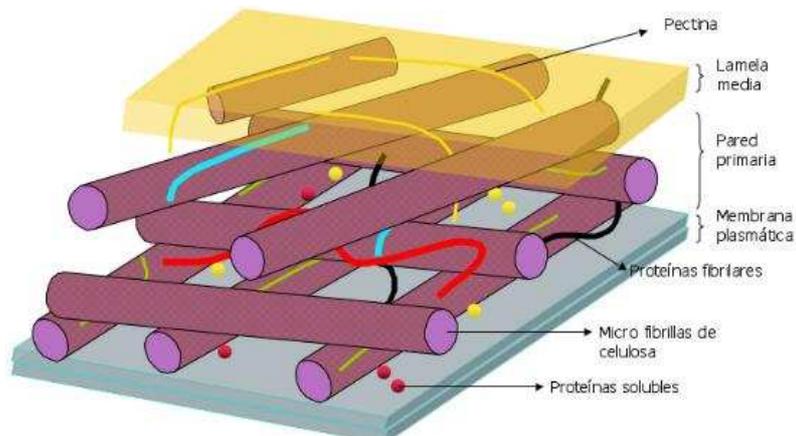


Figura 9. Pared celular de la madera
(Araújo *et al*, 2009)

Por otro lado, la lignina presente en la célula trabaja como un agente de adherencia es una molécula relativamente hidrofóbica. Esto significa que las paredes celulares de la madera tiene una gran afinidad por el agua pero la capacidad para absorberla es limitada por la presencia de lignina. El agua tiene un gran efecto en la madera, en relación a sus propiedades y a su uso (United States Departement of Agriculture, 2010).

1.1.7. MATERIALES COMPUESTOS DE MATRIZ TERMOPLÁSTICA Y PARTÍCULAS LIGNOCELULÓSICAS

La utilización de elementos de origen vegetal, en especial de contenido lignocelulósico, dentro de los materiales compuestos va en aumento, esto se debe a varias características como bajo costo, baja abrasión, reciclable, biodegradable y desechable (Gañán y Mondragón, 2003).

Los materiales lignocelulósicos poseen muchas ventajas como su dureza y rigidez, bajo gasto de energía para su transformación y son renovables. Sin embargo, existen varias desventajas en comparación a otros materiales:

- Es un material que interactúa con el agua y tiene baja estabilidad en respuesta a cambios de humedad.
- Es biodegradable, especialmente cuando está húmedo, debido a la sensibilidad que puede tener por el ataque de hongos y más factores.
- Es fotosensible, esto es importante respecto a la integridad de la superficie de los materiales.
- Favorece a la combustión, en especial en presencia de llama.

Cuando se desea combinar en un material compuesto, refuerzos provenientes de lignocelulosa en matrices termoplásticas, se desean tres cosas en particular:

- Que la matriz “moje” la partícula.
- Que la superficie del refuerzo, en este caso el aserrín, interactúe con la matriz.
- Que durante el proceso de fusión del termoplástico se integren las partículas en la matriz. Que la superficie de ambos componentes permitan un proceso de enlaces entre partículas adyacentes, completando el proceso de interacción del material compuesto.

La madera tiene tres presentaciones cuando se habla de composites: fibra, chip y partícula. En la Tabla 4 se observan las dimensiones que debe cumplir cada presentación para ser catalogada como fibra, chip o partícula.

Tabla 4. Dimensiones de fibra, chip y partícula para la madera*

PRESENTACIÓN	LONGITUD (mm)	ESPESOR (mm)
Fibra	> 50	3 – 5
Chip	10 - 50	500 – 200
Partícula	< 4	10 – 20

* Gilbert, 1994

A diferencia de otros materiales compuestos que contienen refuerzos sintéticos, los materiales compuestos provenientes de la celulosa permiten una tasa de refuerzo-matriz mucho más elevada, es decir, es posible introducir mayor cantidad de aserrín dentro material compuesto. Esto conduce a que la distribución sea más dispersa que en otros casos, de hecho se ha sugerido que a menudo no es distribuida uniformemente, sino más bien se habla de una distribución localizada en forma de gotas, creando puntos de unión entre las fibras adyacentes o partículas, formando una película desigual con 5 a 10 veces la variación entre las regiones de alta y baja concentración a un nivel microscópico.

Por lo tanto, el agua, por la cual la madera tiene una gran afinidad, es fácilmente capaz de obtener acceso a los sitios hidrofílicos en las superficies de las partículas y de allí se mueve por difusión molecular hacia la pared celular.

Durante la fabricación de materiales compuestos, las partículas de madera (aserrín) están sometidas a esfuerzos de cizalla y compresión considerable, por lo que se hacen más densas (los espacios de las células tubulares se aplanan hasta cierto punto, de modo que el espacio de luz se reduce) y se deforman de su estado de relajación.

Se ha demostrado que mucha de la tensión asociada con esta deformación es retenida dentro de las partículas después de que el material compuesto ha sido formado, la partícula no puede alcanzar su estado de relajación debido a que la fuerza de la matriz que sostiene a la misma (Gilbert, 1994).

Una característica física de la madera que afecta su interacción con los polímeros termoplásticos en materiales compuestos es su higroscopicidad. Generalmente, las partículas de madera a temperatura ambiente y humedad relativa, tienen un contenido de humedad del 5% a 12%. El contenido de humedad puede variar del verano al invierno dependiendo de las condiciones climáticas particulares.

Las partículas de madera utilizadas en materiales compuestos de madera y plástico deben secarse hasta obtener del 0 al 10% de contenido de humedad, para ser procesadas adecuadamente.

Los combustibles utilizados para la madera seca, incluyen gas natural, el petróleo y el combustible de la misma madera. Ciertos sistemas de extrusión están diseñados para secar la madera en el tornillo. Debe tenerse en cuenta que las partículas de madera seca presentan un peligro de explosión, debido a la estática producida por las misma partículas.

La ventilación en la cámara de extrusión es importante para eliminar la humedad de manera que no afecte negativamente a la mezcla de los componentes. Junto con la humedad, componentes volátiles serán liberados de la madera, estos componentes contribuyen al olor de la madera emitida durante el proceso de extrusión. Algunos extractos volátiles de la madera son los terpenos emitidos por el pino y el ácido acético (olor de vinagre) emitido de ciertas maderas duras como el roble.

Las partículas lignocelulósicas están limitadas en el tratamiento térmico a una temperatura de unos 225 °C antes de la descomposición térmica. La descomposición térmica de la madera suele ser detectada por un olor de "leña quemada" y la decoloración (oscurecimiento) de la mezcla resultante. La mayoría de termoplásticos comunes de polietileno, polipropileno, poliestireno y PVC son fácilmente transformados en madera plástica porque la temperaturas de fusión están por debajo de la temperatura de descomposición térmica de la madera (Stokke y Gardner, 2003).

1.2. PROCESAMIENTO DE MATERIALES COMPUESTOS

A continuación se detallan los principales procesos por los cuales es posible obtener materiales compuestos.

1.2.1. MOLDEO POR COMPRESIÓN

El moldeo por compresión usualmente emplean moldes hembra (molde) y moldes macho (contramolde). Estos moldes tienen una geometría determinada, diseñada en función de la pieza ó parte estructural que se desee obtener.

Las etapas de la compresión por moldeo son:

- Colocar el refuerzo en el molde, en la orientación deseada.
- Colocar la cantidad de resina adecuada dentro del molde.
- Aplicar presión hidráulica y suministrar calor.
- Retirar la pieza moldeada.

La función de la temperatura es administrar fluidez a la resina, lo cual permite óptimas condiciones de curado. Mientras que la presión permite el conformado de la pieza.

Como principales ventajas:

- Piezas de simple fabricación con mínimo trabajo de elaboración.
- Costos mínimos para preparar las piezas.
- Poco material de desperdicio.

- Reducción de terminaciones secundarias.

Como principales desventajas:

- Se requiere automatización para la preparación de las preformas, ya que tienen que ser hechas, calentadas y cargadas hacia el molde.
- Las rebabas que se crean entre la línea de separación de los moldes, puede ser pesadas y difíciles de extraer.

A continuación en la Figura 10 se puede visualizar el proceso de moldeo por compresión.

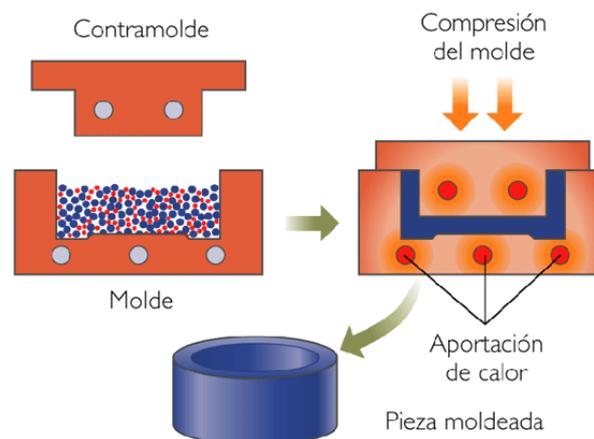


Figura 10. Esquema de moldeo por compresión
(Maldonado, 2011)

1.2.2. MOLDEO POR TRANSFERENCIA DE RESINA (RTM)

Para el moldeo por transferencia de resina se utiliza un molde que posee entrada para la inyección de resina y varias salidas para poder evacuar el aire que se encuentra en el interior del molde.

Las etapas de moldeo por transferencia de resina son:

- Colocar el tejido de fibras en el molde.
- Cerrar el molde.
- Inyectar la resina, para ser absorbida por las fibras y llenar por completo las cavidades del molde.
- Aplicar calor para completar el proceso de curado.
- Abrir el molde y retirar la pieza.

Como principales ventajas:

- Es posible utilizar fibras continuas y largas.
- Se pueden obtener formas complicadas.
- Tiempos de curado relativamente cortos.
- Permite el moldeo de fibras en seco, con lo que se consigue mejor orientación y mejoras en las propiedades mecánicas.
- Menor tendencia a formar defectos.
- Menor emisión de partículas volátiles.

Como principales desventajas:

- El flujo de la resina a través del molde es más complejo, en ocasiones puede modificar la orientación deseada.
- El grado de complejidad de los moldes y equipos los hace más costosos.

- Los moldes están más expuestos a la abrasión, lo que implica más costos en el mantenimiento.
- El material residual en los ductos de aire no se puede reutilizar.

El proceso de moldeo de transferencia de resina se esquematiza en la Figura 11.

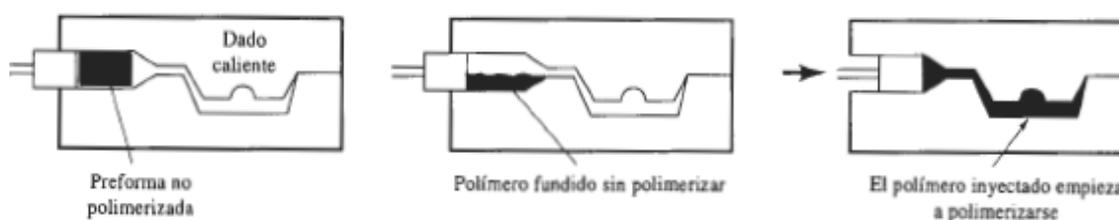


Figura 11. Esquema de moldeo de transferencia de resina
(Montalvo, 2009)

1.2.3. PROCESO DE BOBINADOS DE FILAMENTOS

Se utiliza este proceso para obtener cilindros huecos con alta resistencia. En resumen la fibra es cubierta con resina líquida, para luego ser moldeada en un cilindro.

Las etapas del bobinado de filamentos son:

- Proporcionar un baño de resina a la fibra.
- Bobinar la fibra sobre el cilindro del tamaño adecuado.
- Curar la pieza a temperatura ambiente o a temperatura elevada en hornos.
- Una vez moldeada la pieza retirar del cilindro ó mandril.

Como principales ventajas:

- Se obtienen altos grados de orientación.
- Alta resistencia a la tracción.
- Estas propiedades permiten usos como almacenamiento de combustibles, recipientes a presión, incluidos tanques químicos y cubiertas de motores de cohetes.

Como principales desventajas:

- Este proceso se limita a la forma del cilindro.
- Se encuentra dificultad en el procesamiento por el control de las formas geométricas de las fibras.
- Costo del cilindro en función del tamaño.
- La pieza resultante no tiene buena estética.
- Limitación en el uso de las resinas, ya que solo se pueden usar aquellas con baja viscosidad.
- Solo permite trabajar con fibras continuas.
- No es posible dar obtener piezas bioorientadas.

El proceso de bobinado se puede observar en la Figura 12.

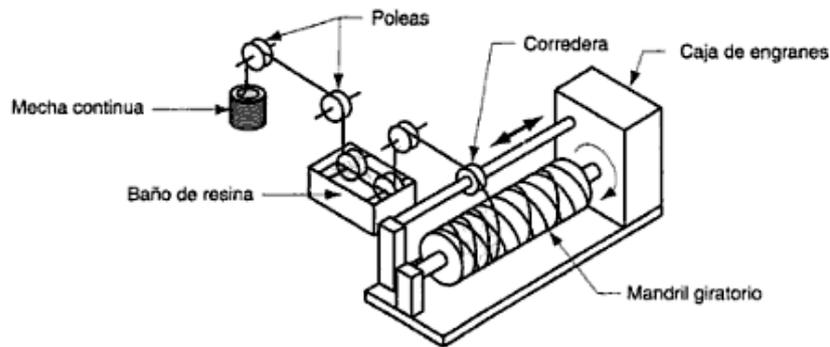


Figura 12. Esquema de bobinados de filamentos
(Groover, 1997)

1.2.4. PULTRUSIÓN

La pultrusión es una de las maneras más comunes de procesar materiales compuestos. Se trata de mojar las fibras en un baño de resina, para posteriormente halar de ellas, para que atraviesen un molde de curado. (Santiago *et al.*, 2003).

Las etapas de la pultrusión son:

- Bañar las fibras en la resina escogida como matriz.
- Halar de la resina para atravesar el molde de curado, en esta etapa se alcanza la temperatura de activación de la reacción química.
- Cortar el material compuesto para cumplir los tamaños requeridos.

Como principales ventajas:

- Existe una reducción en el material de desperdicio.
- Posibilidad de pigmentar el producto.

- Obtención de varios tipos de perfiles.
- Es un proceso continuo.

Como principales desventajas:

- Este proceso solo sirve para volúmenes de producción altos, debido a la inversión.
- Se limita a la producción de perfiles, no es posible obtener otro tipo de formas.
- Los productos obtenidos solo tienen una orientación.

En la Figura 13 se muestra el esquema del proceso de pultrusión.

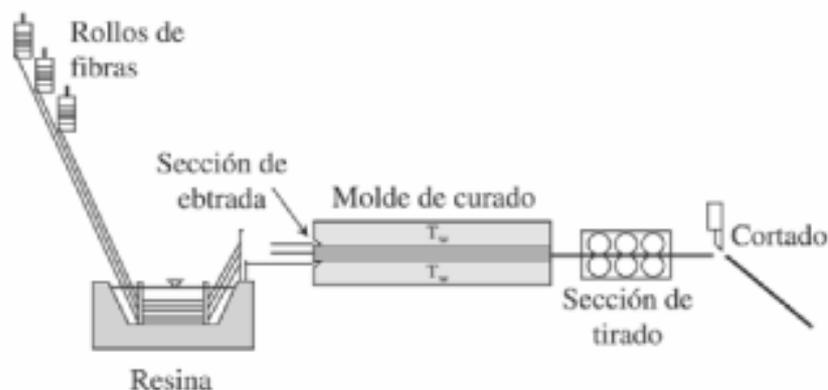


Figura 13. Esquematización del proceso de pultrusión
(Santiago *et al.*, 2003)

1.2.5. EXTRUSIÓN

La extrusión es método para procesar polímeros, en el cual el material fundido es obligado a pasar por una boquilla, la cual determinará la forma que el material tendrá al final del proceso, a través de este tipo de procesamiento se obtienen

perfiles (Morton, 2003). Finalmente después de un proceso de enfriamiento y corte es la granza que se observa en la Figura 14.



Figura 14. Granza de material compuesto obtenida del proceso de extrusión.
(Callister, 2002)

La extrusora tiene como misión fundir, homogeneizar y mezclar el polímero y su refuerzo para posteriormente darle la forma deseada. Una extrusora consta de varios elementos básicos: la tolva, el husillo y la boquilla. Sus principales desventajas son: las piezas a obtener son de sección transversal constante y La mayoría de productos requieren procesos posteriores de acabado.

1.2.5.1. Extrusión monohusillo

La Figura 15 muestra un esquema básico de una extrusora monohusillo.

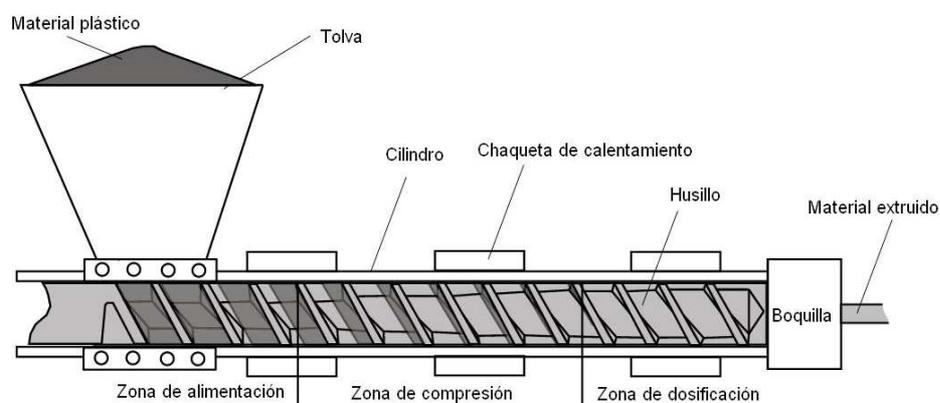


Figura 15. Extrusor monohusillo
(Osswald *et al.*, 2006)

El husillo o tornillo tiene la función de cargar, transportar, fundir, homogeneizar y dar la presión suficiente para que el plástico salga por la boquilla. Para lograr su objetivo el husillo está dividido en tres zonas (Morton, 2003):

- Zona de alimentación

Aquí es donde se transporta el material y se precalienta, debido a la temperatura y al rozamiento entre la granza.

- Zona de compresión o plastificación

La altura de los filetes del husillo se reduce progresivamente para compactar el material y expulsar el aire atrapado hacia la zona de alimentación. En esta zona, los gránulos de polímero son comprimidos y están sujetos a fricción y esfuerzos cortantes, se logra una fusión efectiva.

- Zona de dosificación o bombeo

La profundidad del canal permanece constante, el material fundido se homogeniza y alcanza la presión necesaria para salir a través de la boquilla.

Estas zonas se diferencian en el Figura 16.

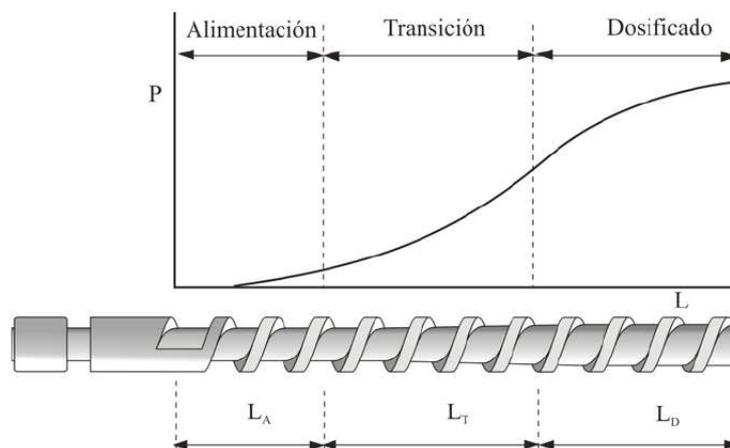


Figura 16. Zonas del husillo y evolución de la presión a lo largo del husillo (Beltrán y Marcilla, 2009)

Al finalizar el camino por el husillo el material se encuentra con tres elementos adicionales:

- Plato rompedor

Placas perforadas ó tamices metálicos.

- Cabezal o dado

Debido a que los polímeros tienen memoria de los esfuerzos de orientación de flujo, el perfil del dado suele tener el mismo perfil que el perfil deseado. Al mismo tiempo ayuda a estabilizar la presión de proceso, a esto se debe sus complejos diseños, ya que en esta sección existe la diferencia de presión entre la del husillo y la atmosférica.

- Boquilla o hilera

En esta parte se da la forma final del perfil extruido.

1.2.5.2. Extrusión doble-husillo

Por lo general la extrusión de doble-husillo permite la adaptación a los diferentes materiales y las diferentes condiciones de procesamiento. Por su disposición permite procesar materiales en diferentes formas como: granza, fibras, polvo, líquido, hojuelas y elementos geométrías irregulares (Noriega, 2008).

Una de las características más deseables de la extrusión doble-husillo son los elementos de mezcla o de transporte. En la Figura 17 se indican las diferentes partes que constituyen un doble husillo co-rotante.

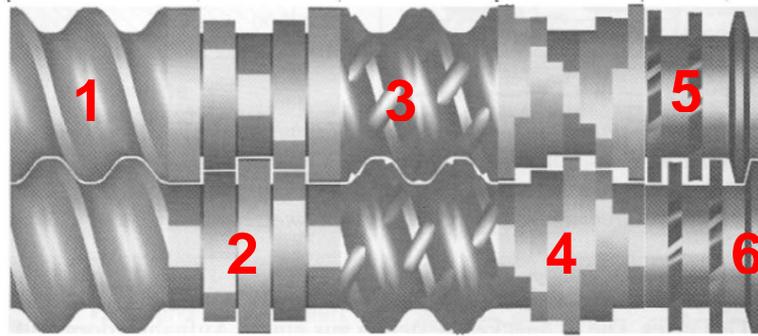


Figura 17. Partes del doble husillo co-rotante
(Noriega, 2008)

- 1: Transporte hacia adelante.
- 2: Transporte hacia atrás.
- 3: Elemento de amasado.
- 4: Elemento de mezcla.
- 5: Anillo mezclador.
- 6: Anillo de estancamiento.

Debido a estas características el doble husillo co-rotante es el más apropiado para ser utilizado en el procesamiento de materiales compuestos, sus partes permiten que el polímero y el refuerzo sean mezclados y compactados, a lo largo de husillo, dando uniformidad al material resultante.

1.2.5.3. Tipos de mezcla

Lo más importante es que el husillo que se escoja pueda crear una mezcla dispersiva y a su vez distributiva, solo así se puede obtener un material compuesto homogéneo y con propiedades representativas.

La mezcla dispersiva se logra la mejor disgregación de las partículas desde el interior del polímero. Por lo general, se requiere:

- Cambio físico en los componentes.
- Fuerzas de corte elevadas que permitan cambios físicos.
- El polímero debe aportar con fluidez y para esto se requiere que este en un estado fundido.

A continuación en la Figura 18, se puede observar las diferentes posibilidades de los resultados de una mezcla y la diferencia entre una mezcla distributiva y una mezcla dispersiva.

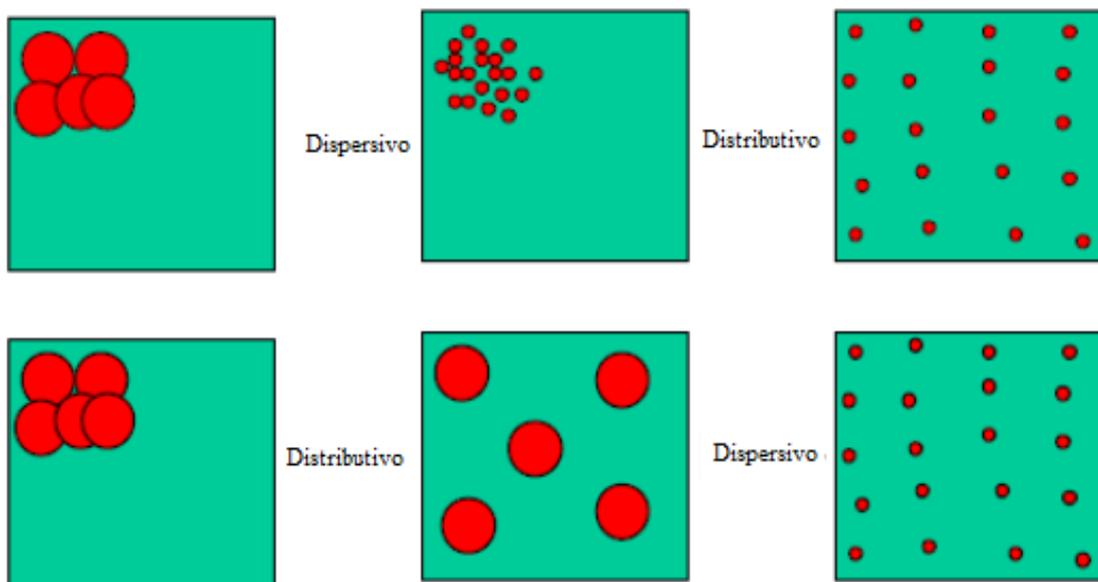


Figura 18. Representación esquemática de las mezclas distributivas y dispersas
(Polinter Venezuela, 2009)

Si posteriormente se granula el material resultante, cada grano tendrá la misma composición, partiendo del hecho de que se efectuó una mezcla correcta. En la práctica, esto es algo difícil.

La mezcla distributiva permite aumentar la uniformidad de la mezcla, a través de un proceso de redistribución, sin afectar la mezcla inicial. Su resultado es la homogenización de un compuesto en medio del otro, sin modificar las características de su fase dispersa. En palabras sencillas solo constituye un cambio de orden.

1.2.5.4. Alimentación

Otro punto importante de la extrusión es la alimentación, tomando en cuenta la variedad de componentes que se desea combinar para obtener el composite, es necesario considerar ciertos conceptos a la hora de escoger el tipo de tolvas y materiales a utilizar.

Generalmente, los sólidos en la tolva se transportan mediante el efecto de la gravedad, esto combinado con el peso del material que ingresa por la tolva. En la Figura 19, se puede observar los distintos tipos de flujo, puede ser un flujo en masa donde no hay estancamientos y este permanece constante, ó puede ser un flujo tipo embudo donde el material junto a las paredes se queda retenido.

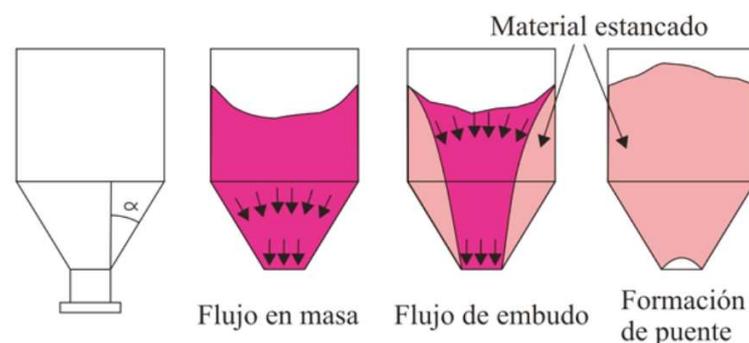


Figura 19. Flujo del material en una tolva de alimentación
(Beltrán y Mercilla, 2009)

Ciertamente, el tipo de flujo deseado es el flujo en masa, sin embargo, algunos materiales, por no decir la mayoría, tienen un flujo deficiente dando lugar a un efecto denominado “puenteo” ó “arco”, en el cual, el material se queda retenido en la garganta de la extrusora.

Los puntos más influyentes en el flujo del material serán las características del mismo y el diseño de la tolva. Las tolvas más recomendadas son las de sección circular, ya que en tolvas cuadradas o rectangulares el material es sometido a una compresión irregular, sobre todo en las esquinas de la tolva y este efecto causa la retención del material.

A continuación se tiene un breve listado de las características del material que influyen en su comportamiento en su paso por la tolva:

- Densidad aparente

Esta definición se refiere a la densidad del material incluido el aire entre sus partículas. El valor de densidad aparente, tendrá que ser menor que la densidad real. Cuando la densidad aparente representa valores menores al 30% de la densidad real, el material alimentado tendrá problemas de punteo, sin importar la geometría de la tolva. Para que un material sea transportado fácilmente, su densidad aparente debe representar mínimo el 60% de su densidad real. A medida que aumenta la densidad aparente, también reduce el volumen necesario para llenar la tolva.

- Compresibilidad

La compresibilidad se puede definir como el aumento en el valor de densidad aparente, cuando el material ha sido sometido a una presión. Los materiales con bajo factor de compresibilidad son lo más deseados, debido a que su densidad aparente no tiene altos intervalos de variación al ejercer presión sobre ellos.

- Coeficiente de fricción

Existen dos tipos de coeficientes de fricción:

- a) El coeficiente interno de fricción creado por la fricción entre las partículas de mismo polímero.

- b) El coeficiente de fricción externo causado por las partículas del polímero y la superficie de la tolva.

Para mejorar el transporte los dos coeficientes deben ser bajos, en caso de que no lo fueran se suele utilizar lubricantes, para reducir efectos de fricción.

- Distribución del tamaño de partícula (DTP):

Se busca la mayor uniformidad posible, cuando hay mucha distribución de tamaños el material tiende a empaquetarse y retener el flujo (Beltran y Mercilla, 2009).

2. METODOLOGÍA

Dentro de los límites de la provincia de Pichincha existen 3121 Has que pertenecen a cultivos florícolas (Banco Central del Ecuador, 2005). A esto suma el hecho de que es la provincia con mayor desarrollo industrial del país. A partir de estos datos es posible observar las necesidades de un continuo desarrollo sustentable con la naturaleza.

Como alternativa a los materiales clásicos, se ha desarrollado un material con un beneficio ambiental proveniente del reciclaje. Las materias primas como las películas de invernadero y el aserrín, usualmente son materiales de desechos, generando grandes costos para los usuarios, tanto de almacenamiento, como de métodos apropiados de eliminación.

El propósito de esta investigación fue de generar un material con tecnología accesible, de manera económica y tecnológica, para que pueda generar una nueva iniciativa, sobre los gremios industriales del sector.

2.1. MATERIAS PRIMAS

El presente trabajo de investigación se efectuó con los plásticos provenientes de invernaderos del Distrito Metropolitano de Quito. El material compuesto está formado de una matriz de polietileno proveniente de residuos de invernadero. La fase dispersa consiste de partículas lignocelulósicas, comúnmente conocidas como aserrín. Dentro de una primera etapa se realizaron pruebas de caracterización.

- Espectrometría IR:

Para la determinación del estado de degradación de las hojuelas, previamente acondicionadas, mediante la evaluación del índice de carbonilo en los espectros que se obtuvieron. A partir de los espectros se identificó los componentes del plástico de invernadero.

- Calorimetría diferencial de barrido

La identificación de las hojuelas se complementó con el estudio de las transiciones térmicas por calorimetría diferencial de barrido.

- Densidad aparente y densidad relativa

Debido a que las hojuelas no se presentaron como un material compacto, fue necesaria la determinación de la densidad aparente de las hojuelas, este dato fue comparado con el dato de densidad relativa. Este resultado fue utilizado al momento de la alimentación de las tolvas de la extrusora de doble tornillo.

- Grado de humedad

Mediante un procedimiento interno se evaluó el grado de humedad tanto para las hojuelas como para el aserrín, a partir de estos resultados se estableció la necesidad de realizar un proceso previo de secado.

- Separación por tamaños

Por otra parte para completar la caracterización del aserrín se separó las partículas por su tamaño. Una vez que las partículas fueron separadas se escogieron los tamaños que permitió la incorporación de la mayor proporción de material particulado al material reciclado.

La segunda etapa consintió en la realización de pruebas preliminares, mediante estas pruebas se hizo un ajuste de condiciones apropiadas para procesar en conjunto el plástico de invernadero reciclado y el aserrín.

- Temperatura de procesamiento

Se determinó los rangos de temperatura para cada una de las siete zonas de la extrusora. Estas pruebas se realizaron a través del ajuste de varios perfiles de

temperaturas, los perfiles preliminares se establecieron a partir de la información bibliográfica.

- Velocidad de los husillos

Se determinó los límites mínimos y máximos de operación de los husillos principales, mediante el ajuste de varias velocidades de alimentación. Como criterio de evaluación se tuvo la facilidad de procesamiento y el análisis visual del material extruido. De esta prueba se conocieron los límites de porcentaje de aserrín que será posible incorporar al polietileno. Una vez que fueron establecidos estos límites, se decidieron las composiciones de aserrín y polietileno de las que se compuso cada formulación de material compuesto.

En esta tercera etapa del trabajo de investigación se realizaron las pruebas de procesamiento, dentro de esta etapa se establecieron las formulaciones a procesar.

- Determinación de formulaciones

Las pruebas preliminares permitieron definir formulaciones en las que se pudo evaluar el comportamiento del aserrín en el material compuesto de acuerdo a su proporción y al tamaño de partícula. Se realizaron pruebas comparativas de los productos obtenidos para determinar las composiciones y tamaños adecuados, esto se hizo de acuerdo con los criterios que se explican en la evaluación de las formulaciones.

- Procesamiento de formulaciones

Para realizar las formulaciones se determinó las relaciones de alimentación de los materiales por la tolva. Cuando fueron establecidas las relaciones de alimentación se procedió a la etapa de extrusión de cada una de las formulaciones previamente planteadas.

La última etapa consistió en la evaluación de las formulaciones.

- Microscopía Óptica

Con la función de analizar la dispersión del material, se realizó un ensayo de microscopía óptica, con esto se pudo observar la influencia de la extrusión en la compactación y dispersión de las partículas lignocelulósicas dentro de la matriz de polietileno.

- Pruebas mecánicas

Consiste en un ensayo de tracción-deformación. En este ensayo fue posible conocer las propiedades tensiles, como su módulo de Young, tensión y deformación, estos dos últimos análisis fueron realizados una vez que las probetas llegaban al pico de sus propiedades y finalmente a la ruptura. A partir de estos datos también fue posible analizar la afinidad entre partículas y polímero. Esta prueba es la base comparativa entre cada formulación.

- Espectrometría IR

Este ensayo se realizó con la función de analizar la degradación del material compuesto, a partir de los grupos carbonilos.

- Índice de fluidez

Consiste en una prueba reológica realizada para conocer su fluidez. Es la cantidad de material (medido en gramos) que fluye a través del orificio de un dado capilar en 10 minutos, manteniendo constantes presión y temperatura estándares.

Los datos provenientes del índice de fluidez permitieron conocer el tipo de procesamiento al que puede ser sometido el material. Índices de fluidez altos indican que el material sea procesado mediante inyección, así como, índices de fluidez bajos indican que el material puede ser procesado mediante extrusión.

La parte experimental fue realizada en las instalaciones del Centro de Investigaciones Aplicadas a Polímeros, de la Escuela Politécnica Nacional.

2.2. CARACTERIZACIÓN DE MATERIAS PRIMAS

La caracterización se realizó tanto para el polietileno reciclado de invernadero previamente acondicionado, como para el aserrín. La etapa de caracterización fue necesaria para conocer las propiedades de cada materia prima al momento de ser procesadas. El proceso se llevo a cabo como se indica en la Figura 20.

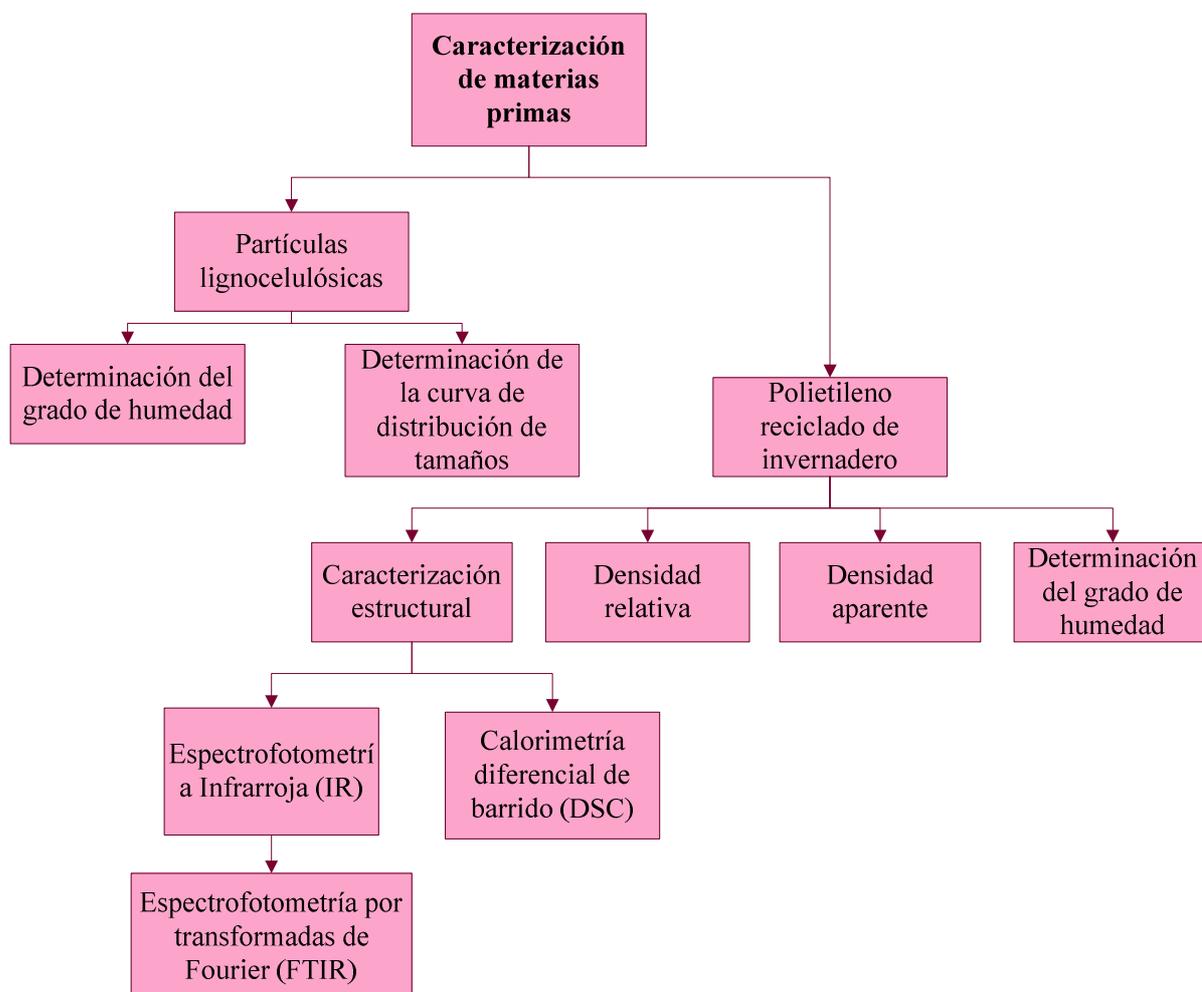


Figura 20. Caracterización de materias primas

2.2.1. CARACTERIZACIÓN DE PLÁSTICO RECICLADO

En la Figura 21 se muestra las hojuelas de polietileno reciclado que ya han sido acondicionadas para su caracterización.



Figura 21. Hojuelas de polietileno acondicionado

2.2.1.1. Caracterización mediante espectroscopia FTIR

- Se tomaron varias muestras de hojuelas de plástico de invernadero, las cuales fueron colocadas directamente en el porta-muestras.
- Debido a la variabilidad de apariencia y composición de las hojuelas de polietileno fue importante realizar varios espectros.

Los análisis de espectrofotometría se efectuaron con base en la norma ASTM D5576 – 00 “Standard Practice for Determination of Structural Features in Polyolefins and Polyolefin Copolymers by Infrared Spectrophotometry (FTIR)”.

La espectrofotometría infrarroja fue realizada en el espectrofotómetro de transformadas de Fourier marca Perkin Elmer modelo Spectrum One del CIAP, con una capacidad de análisis del rango de de números de onda comprendidos

entre los 600 y 4 000 cm^{-1} . En la Figura 22 indica el equipo utilizado para este análisis.



Figura 22. Espectrofotómetro de transformadas de Fourier de marca Perkin Elmer Modelo Spectrum One del CIAP

2.2.1.2. Caracterización de la película de invernadero por DSC

Para la realización de este análisis se tomó una muestra de 5,53 mg de plástico reciclado. Esta muestra fue pesada en la balanza analítica Denver Instrument Company modelo AA-200.

Se colocó en una celda de aluminio y está en el horno de calentamiento del equipo.

Las condiciones seleccionadas en el equipo correspondieron a una velocidad de calentamiento de 10 $^{\circ}\text{C}/\text{min}$ hasta alcanzar la temperatura de 200 $^{\circ}\text{C}$, la cual se mantuvo por 10 min, una vez que se completó este ciclo empezó el proceso de enfriamiento para que seguidamente empezar una segunda etapa de calentamiento, en las mismas condiciones anteriores.

Se procedió de acuerdo a la norma ASTM D 3418–08 Standard Test Method for Transition Temperatures and Enthalpies of Fusion and Crystallization of Polymers by Differential Scanning Calorimetry.

Para esta prueba se utilizó un calorímetro diferencial de barrido marca NETZSCH DSC modelo 204F1 PHOENIX del CIAP, el cual se observa en la Figura 23.



Figura 23. Calorímetro diferencial de barrido marca NETZSCH

2.2.1.3. Determinación de la densidad aparente de plástico reciclado

- Se dejó caer plástico dentro una probeta graduada de 1000 cm³ hasta llenarla y posteriormente se procedió a pesar, en una balanza de precisión, el contenido de la misma.
- El cálculo de la densidad se realizó dividiendo el peso del plástico para el volumen de la probeta.

La determinación de la densidad aparente se realizó con base en la norma ASTM D1895 – 96 Standard Test Methods for Apparent Density, Bulk Factor, and Pourability of Plastic Materials

2.2.1.4. Determinación de la densidad de plástico reciclado

- Se colocó una muestra de un peso determinado, en el accesorio para medir densidades Mettler Toledo, adecuado a la balanza analítica Denver Instrument Company modelo AA-200 menciona anteriormente, se midió el peso del polietileno en el aire y luego se lo sumergió en agua destilada controlando que el nivel de temperatura este entre los 21 a 25°C.

La determinación de la densidad relativa se hizo aplicando el “Principio de Arquímedes”.

2.2.1.5. Determinación del grado de humedad de plástico reciclado

- Para la determinación del grado de humedad se pesaron alrededor de 100 g de plástico, en la balanza de precisión del CIAP, en cápsulas de porcelana, taradas previamente a 100 °C durante 3 h .
- Se llevaron a una estufa a 100 °C durante 4 h para eliminar toda la humedad.
- El contenido de humedad se determinó por diferencia de pesos de la muestra antes y después del secado en la estufa.

Para este análisis se utilizó una estufa marca VENTICELL.

2.2.2. CARACTERIZACIÓN DE PARTÍCULAS LIGNOCELULÓSICAS (ASERRÍN)

2.2.2.1. Determinación de la distribución de tamaños de aserrín

- Realizando una homogenización por cuarteo, se tomaron muestras paralelas de 250 g.
- Se tomaron los tamices de los siguientes números de malla: #200, #100, #60, #50, #40, #30, #20. Estos tamaños fueron seleccionados en función de la disponibilidad de tamices y tomando en cuenta el tamaño del aserrín recolectado.

- Se colocaron de la malla de mayor abertura (#20) a la malla de menor abertura (#200), en orden descendente, en el sistema de agitación de tamices, en donde se efectuó el efecto de agitación y golpeteo durante 10 min.
- Una vez terminada la agitación, los tamices fueron separados para pesar su contenido en la balanza.
- Posteriormente se realizó la curva de distribución de tamaños, obteniendo el d80.

Para este procedimiento se utilizaron tamices que cumplen con la norma ASTM E 11-09e1 Standard Specification for Wire Cloth and Sieves for Testing Purposes y el agitador de tamices, marca Rot-Tap, ubicado en las instalaciones del DEMEX.

2.2.2.2. Determinación del grado de humedad de aserrín

- Para la determinación del grado de humedad se pesaron alrededor de 100 g de aserrín en cápsulas de porcelana, taradas previamente a 100 °C durante 3 h.
- Se llevaron a una estufa a 100 °C durante 4 h para eliminar toda la humedad.
- El contenido de humedad se determinó por diferencia de pesos de la muestra antes y después del secado en la estufa.

Para este análisis se utilizó una estufa marca VENTICELL.

2.3. PRUEBAS PRELIMINARES

Las pruebas preliminares consistieron en la determinación de condiciones para el procesamiento del material compuesto, en la Figura 24 se indica cuales fueron las condiciones que se controlaron para la optimización del proceso.

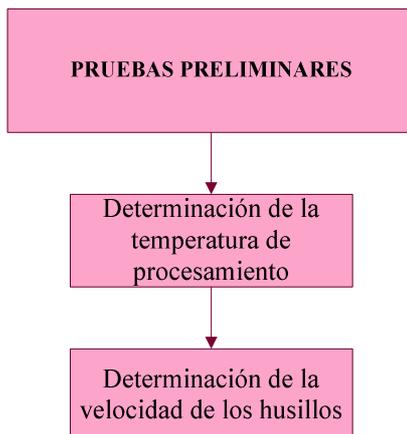


Figura 24. Determinación de condiciones para el procesamiento de material compuesto

El proceso de extrusión se realizó en una extrusora de doble husillo co-rotante marca JIANGYSU XINDA, del Centro de Investigaciones Aplicadas a Polímeros (CIAP) la cual se indica en la Figura 25.



Figura 25. Extrusora de doble husillo co-rotante marca JIANGYSU XINDA.

2.3.1. DETERMINACIÓN DE LA TEMPERATURA DE PROCESAMIENTO

Establecer las condiciones de temperatura era el punto más crítico del procesamiento, debido a que este parámetro tenía dos limitantes:

- Alcanzar temperaturas que permitan la fusión del plástico
- Controlar que la temperatura no cause degradación térmica al plástico reciclado ni al aserrín.

Como medida de seguridad se fijaron temperaturas menores al límite sugerido por la bibliografía, que para el caso del aserrín es 200°C. Caso contrario las partículas provenientes de la madera entran en un proceso de degradación térmica.

Por otro lado las temperaturas de procesamiento del polietileno de baja densidad están entre 140 y 210°C (Osswald *et al.*, 2006). Con estas consideraciones se probaron varios perfiles de temperatura en orden ascendente. El extrusor tiene un sistema de control de temperatura en siete puntos, se consideró la temperatura inicial y la final, como las más importantes, ya que el resto solo sería el resultado de un aumento gradual dentro de este intervalo.

Se establecieron cuatro casos:

- Temperatura inicial menor a 80°C
- Temperatura inicial mayor a 120°C
- Temperatura final menor a 160°C
- Temperatura final mayor a 200°C

2.3.2. DETERMINACIÓN DE LA VELOCIDAD DE LOS HUSILLOS

La determinación de la velocidad del doble-husillo se efectuó en función de las proporciones de polietileno reciclado y aserrín requeridas. Existe una relación entre los husillos de alimentación y el husillo principal.

Esta relación se debía a que la extrusora debía mantener una carga constante a lo largo del husillo. Existen problemas de alimentación por exceso o por defecto, por lo que fue necesario ajustar de manera sincronizada la alimentación de cada uno de los componentes, del material compuesto, desde las tolvas con la velocidad de giro de los dos husillos principales, so pena de tener los siguientes problemas.

- Cuando la carga aumentaba saturando el espacio de la cámara de extrusión, el motor del husillo no suministraba la energía suficiente para que sea posible girar el husillo. Esto causaba un colapso en el sistema de extrusión, activando el sistema de emergencia de la extrusora que la apagaba automáticamente.
- Cuando la carga en la cámara del husillo disminuía no existía el efecto de arrastre que le de continuidad a la salida del material a través de la boquilla, como resultado negativo los tallarines obtenidos no podían tener continuidad a través del tren de enfriamiento y pelletizado. En vez de obtener una hebra constante se obtenían tallarines de poca longitud desperdiciando el material.

Para esto se determinó velocidad de alimentación para cada material, ya que cada material posee diferente densidad aparente de los componentes.

2.4. PRUEBAS DE PROCESAMIENTO

En la Figura 26, se esquematiza la segunda etapa experimental correspondiente al procedimiento para el procesamiento de formulaciones.

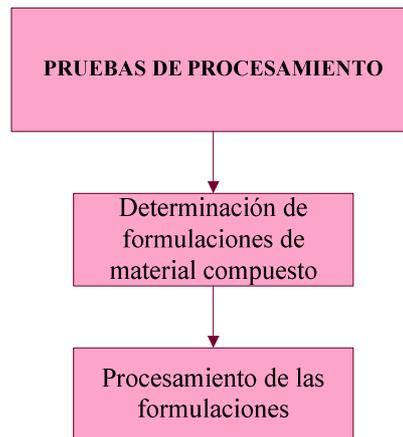


Figura 26. Procesamiento de material compuesto mediante extrusión de doble tornillo

2.4.1. DETERMINACIÓN DE LAS FORMULACIONES DE MATERIAL COMPUESTO

Para escoger los tamaños de aserrín se tomaron en cuenta varios factores:

- El tamaño del refuerzo debía cumplir con ciertos rangos de tamaño, establecidos en la Tabla 2 en el capítulo correspondiente a la revisión bibliográfica, para poder ser clasificado como partículas.
- Para que el trabajo de investigación tenga sentido era necesario seleccionar tamaños que aporten con variedad a los resultados obtenidos.
- Sugerencias de la bibliografía, varios trabajos realizados anteriormente sugerían ciertos límites de tamaño para la facilidad de procesamiento.

2.4.2. PROCESAMIENTO DE LAS FORMULACIONES

Una vez decididas las formulaciones a realizarse, los tamaños de partícula seleccionados fueron combinados en varias composiciones como se indica en la Tabla 5 a continuación. Para cada formulación se establecieron velocidades específicas con base de la composición necesitada. El cálculo de las velocidades de los husillos se encuentra en el ANEXO II.

Tabla 5. Composición de formulaciones con base en el número de malla de la distribución de tamaños de aserrín y porcentaje de aserrín incorporado

		Porcentaje de aserrín incorporado			
		5 %	10%	15%	30%
Número de malla de aserrín	# 30	Seleccionada	Seleccionada	Seleccionada	No seleccionada
	# 50	Seleccionada	Seleccionada	Seleccionada	No seleccionada
	# 60	Seleccionada	Seleccionada	Seleccionada	No seleccionada
	# 100	Seleccionada	Seleccionada	Seleccionada	Seleccionada

2.5. EVALUACIÓN DE FORMULACIONES

Para este proceso se llevaron a cabo cuatro pruebas como se muestra en la Figura 27.

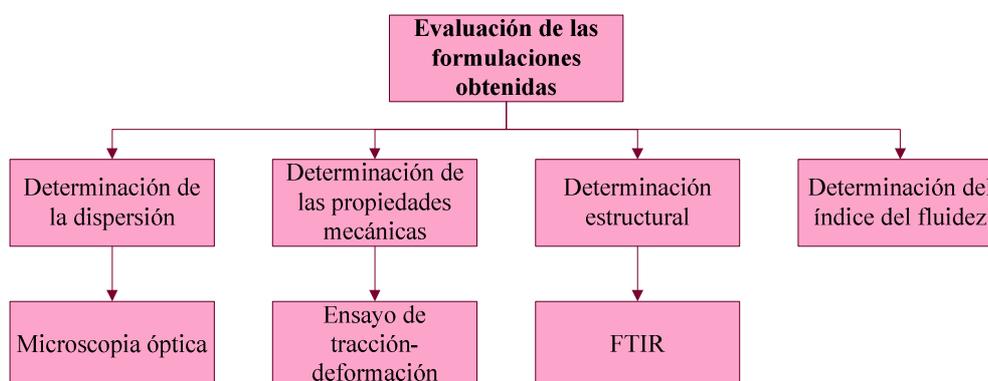


Figura 27. Diagrama de flujo para la evaluación de formulaciones obtenidas de material compuesto.

2.5.1. DETERMINACIÓN DE LA DISPERSIÓN DEL MATERIAL COMPUESTO

- Se laminó una muestra de cada formulación realizada, en la prensa Carver modelo 11 como la que se muestra en la Figura 28, a una presión de 20 000 psi y una temperatura de 190°C, por menos de 10 s.
- Para esta determinación se capturó la imagen de una película de cada formulación.

Se utilizó el microscopio Thomas Scientific 1230CM con el equipo de luz Fiber-Lite MI-150 High Intensity Illuminator (Dolan Jenner Industries) indicado en la Figura 29, perteneciente al CIAP.



Figura 28. Prensa Carver modelo 11, perteneciente al CIAP



Figura 29. Microscopio Thomas Scientific 1230CM con el equipo de luz Fiber-Lite MI-150 High Intensity Illuminator.

2.5.2. DETERMINACIÓN DE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DEL MATERIAL COMPUESTO

- Las condiciones de procesamiento se fijaron en función de las características físicas de la cinta extruida; el objetivo fue obtener un perfil que no presentase defectos: burbujas o piel de naranja.
- Para la determinación de las propiedades mecánicas del material compuesto fue necesario una segunda extrusión para obtener el material forma de cinta.
- A partir de las cinta se procedió a la conformación de probetas.

Estas probetas tenían que ajustarse a los parámetros de la norma ASTM D 882 “Standard Test Method for Tensile Properties of Thin Plastic Sheeting”, para esto se empleó la boquilla de cinta, esta segunda extrusión se realizó en el reómetro marca HAAKE (modelo PolyLab System) del CIAP el cual se indica en la Figura 30.



Figura 30. Reómetro de torque electrónico marca HAAKE modelo PolyLab System utilizado para la conformación de cintas

Previa la realización del ensayo la cinta fue troquelada con el troquel marca CEAST del CIAP que se muestra en la Figura 31, se troquelaron probetas rectangulares de 12 cm de largo y 1 cm de ancho.



Figura 31. Troquel perteneciente al CIAP utilizado en el corte de probetas para pruebas mecánicas de material compuesto

Se determinó el espesor de las probetas obtenidas empleando un micrómetro MITUTOYO el cual se identifica en la Figura 32.



Figura 32. Micrómetro MITUTOYO utilizado en mediciones de espesor para pruebas mecánicas de material compuesto

- La separación de las mordazas se fijó en 70 mm y se empleó una velocidad de deformación constante de 500 mm/min.
- Para la realización de la prueba se utilizaron 10 probetas, con el fin de expresar los resultados en términos de valor promedio y desviación estándar.

Para realizar el ensayo de tracción se empleó una máquina de ensayos universales marca INSTRON (modelo 1011) como se observa en Figura 33.



Figura 33. Máquina de ensayos universales

2.5.3. DETERMINACIÓN ESTRUCTURAL DEL MATERIAL COMPUESTO

Como parte de la evaluación del material compuesto se realizó la espectrofotometría infrarroja.

Para realizar este análisis fue necesario:

- Prensar el material a una temperatura de 190 °C y una presión de 20 000 Pa.
- Una vez que el material estaba laminado fue posible colocar en el porta muestras del espectrofotómetro.

Con base en la norma ASTM D5576 – 00 “Standard Practice for Determination of Structural Features in Polyolefins and Polyolefin Copolymers by Infrared Spectrophotometry (FTIR)”.

La espectrofotometría infrarroja fue realizada en el espectrofotómetro de transformadas de Fourier marca Perkin Elmer modelo Spectrum One del CIAP.

2.5.4. DETERMINACIÓN DEL ÍNDICE DE FLUIDEZ DEL MATERIAL COMPUESTO

El índice de fluidez fue determinado para conocer el tipo de procesamiento al que puede ser sometido el material.

- Se pesó una muestra de 5 g.
- Se ajustaron las condiciones para el análisis, en este caso se estableció una temperatura de 190 °C con una carga de 10 kg, con 500 s de precalentamiento y 120 s de calentamiento. Se utilizó una carga de 10 kg debido a la poca fluidez del material compuesto.

- Se colocó la muestra en el espacio confinado para comenzar el análisis.

La determinación del índice de fluidez se realizó según la norma ASTM D1238-10 “Standard Test Method for Melt Flow Rates of Thermoplastics by Extrusion Plastometer”.

Utilizando un plastómetro de extrusión marca CEAST (modelo 6942.000) del CIAP, como se muestra en la Figura 34.



Figura 34. Plastómetro de extrusión empleado para la determinación del índice de fluidez

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1. CARACTERIZACIÓN DE MATERIAS PRIMAS

3.1.1. ESPECTROMETRÍA INFRARROJA

En la Figura 35 se presenta el espectro obtenido mediante espectroscopia de infrarrojo realizado a las hojuelas del polietileno, como parte de la caracterización de las materias primas.

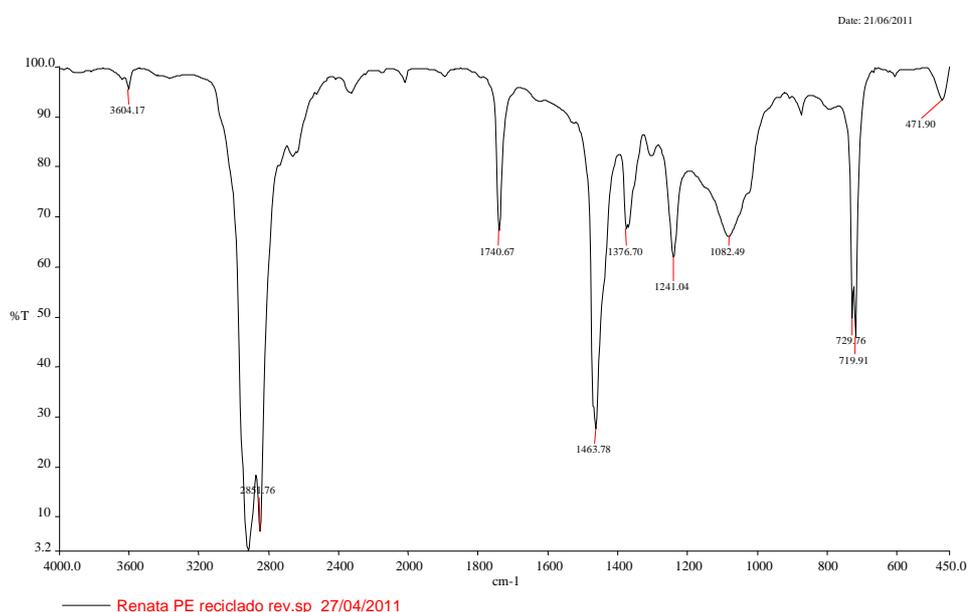


Figura 35. Espectro FTIR de polietileno reciclado

La presencia de bandas a $3\ 030 - 2\ 845\ \text{cm}^{-1}$, $1\ 470 - 1\ 450\ \text{cm}^{-1}$ y $725 - 715\ \text{cm}^{-1}$ confirman que el material en estudio se trata de un polietileno. Para completar la caracterización mediante espectroscopia del material se observa la banda ubicada en $1\ 376\ \text{cm}^{-1}$ característica de la presencia de ramificaciones con lo cual se confirma la presencia de polietileno ramificado.

La ausencia de una banda a $1\ 368\ \text{cm}^{-1}$ indica que no existe presencia de polietileno de alta densidad (HDPE). La presencia de bandas en $1\ 760 - 1\ 735\ \text{cm}^{-1}$, $1\ 470 - 1\ 405\ \text{cm}^{-1}$, $1\ 380 - 1\ 350\ \text{cm}^{-1}$, $1\ 260 - 1\ 220\ \text{cm}^{-1}$ y $1\ 070 - 1\ 015$

cm^{-1} determinan que el plástico reciclado tiene un copolímero de etilén vinil acetato EVA. Los grupos funcionales se presentan en la Tabla 6.

Tabla 6. Análisis de grupos funcionales del espectro infrarrojo realizado al plástico reciclado

Banda (cm^{-1})	Grupo funcional
2 970 - 2 900	Hidrocarburos de cadena larga propios del polietileno
2 880 - 2 840	
1 480 - 1 450	
1 390 - 1 360	
725 - 715	
1 760 - 1 735	Alquilo perteneciente a un ester
1 470 - 1 405	
1 380 - 1 350	
1 260 - 1 220	
1 070 - 1 015	

En la figura 36 se superpone el espectro obtenido con un estándar de EVA.

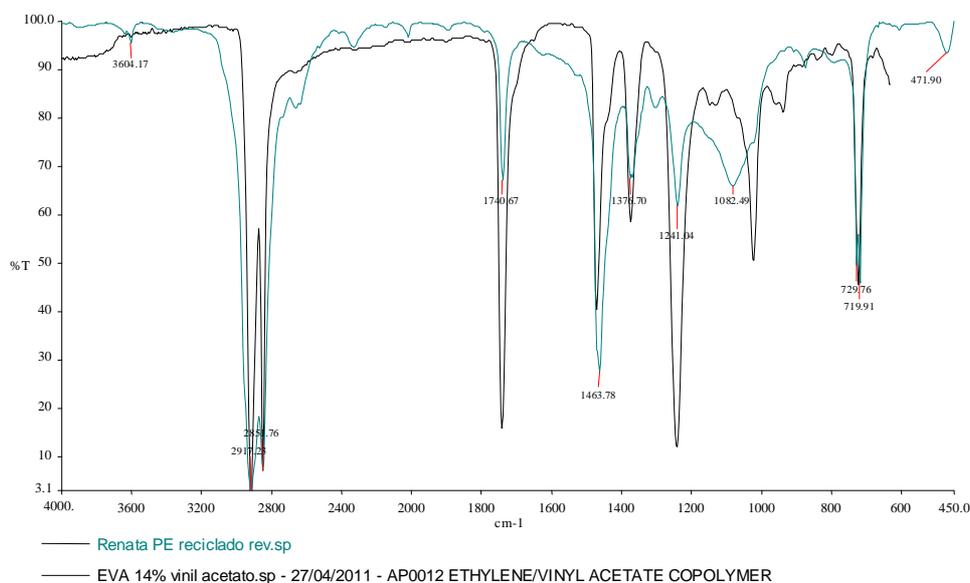


Figura 36. Superposición de espectros FTIR de polietileno reciclado y EVA

Debido a la presencia de EVA en el material reciclado, no es posible estimar el grado de degradación del plástico reciclado mediante la determinación del índice de carbonilo, como se propuso al inicio, ya que existe una interferencia entre las bandas de carbonilo inherentes al EVA y las bandas de carbonilo de las cuales se puede realizar el proceso cuantitativo. Cabe recalcar que para el cálculo del índice de carbonilo se utiliza los datos del área bajo la curva de absorbancia entre 1 650 y 1 800 cm^{-1} . Por las similitudes en la cadena de LDPE y LLDPE (Polietileno lineal de baja densidad), no es posible diferenciarlos a través de este método.

3.1.2. CALORIMETRÍA DIFERENCIAL DE BARRIDO

En el análisis de calorimetría diferencial de barrido se caracteriza el material mediante sus transiciones térmicas de las cuales las más usualmente utilizada es la temperatura de fusión. A continuación en la Figura 37 se encuentra el termograma obtenido de las hojuelas de polietileno reciclado.

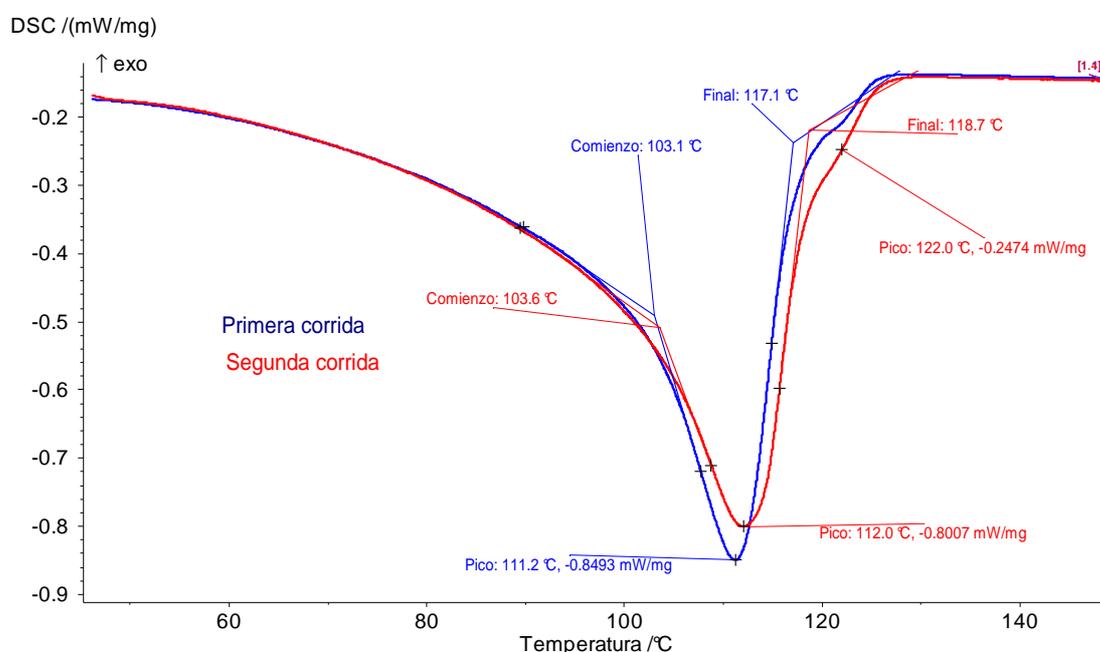


Figura 37. Termograma obtenido del análisis de calorimetría diferencial de barrido del polietileno reciclado

De acuerdo con el termograma de la segunda corrida se encuentra una transición endotérmica correspondiente a un proceso de fusión cuyo pico se encuentra a 112°C, lo cual es característico de un polietileno de baja densidad (LDPE). Los valores bibliográficos indican que el rango para los picos de fusión del polietileno de baja densidad se encuentran entre 107 y 115°C (Naranjo *et al*, 2008).

En dicho termograma también se puede apreciar un “hombro” a 122°C, que indica la presencia de polietileno lineal de baja densidad (LLDPE). Los valores bibliográficos indican que las transiciones de fusión para este material se presentan en el rango de 122 - 124°C (Naranjo *et al*, 2008).

La superposición de estas dos transiciones térmicas dificulta la cuantificación del porcentaje en el que se encuentran los dos materiales: LDPE y LLDPE. No obstante, de acuerdo con estudios previos realizados en el CIAP, se encontró que para termogramas de mezclas de LDPE y LLDPE, cuando existe una ligera inflexión en la temperatura de fusión del LDPE, como es este caso en particular, el LLDPE se encuentra en un porcentaje menor al 10% (Taipe, 2008).

El estudio de las transiciones térmicas de fusión solo es posible para materiales semicristalinos, por eso es posible detectar polímeros como LDPE, LLDPE y HDPE, sin embargo para materiales amorfos como EVA este método no es aplicable y se debería recurrir al estudio de las transiciones vítreas.

Los resultados se los ha obtenido a partir del termograma de la segunda corrida debido a que en la primera se considera la historia térmica asociada con el procesamiento del material, por lo cual en el segundo calentamiento ese historial ha sido eliminado.

Pese a lo anotado, se puede ver que la diferencia de los valores obtenidos en la primera y la segunda corrida no difieren significativamente por lo que, para este caso particular la historia térmica no tiene mayor incidencia.

3.1.3. DENSIDAD APARENTE

Mediante el procedimiento establecido en el numeral 2.2.1.3 se determinó que la densidad aparente de las hojuelas de polietileno reciclado es de 208 kg/m^3 . La densidad aparente determina la facilidad de flujo del material en la alimentación al equipo de procesamiento y es función del tamaño y forma de las partículas del material. Materiales con alta densidad aparente fluyen mejor que los que presentan valores menores de este parámetro.

Como referencia se anota que la granza de polietileno posee una densidad aparente de entre 400 a 500 kg/m^3 , con una forma cilíndrica con dimensiones que distan de $2,0$ a $4,0 \text{ mm}$ para el diámetro y de $3,0$ a $5,0 \text{ mm}$ para la longitud (Hensen, 1997) y el polietileno tiene una densidad de 920 kg/m^3 .

Según se explicó en el capítulo 1, se considera que un material presenta una baja densidad aparente cuando esta es menor al 30% de la densidad. En este caso la densidad aparente representa un 22,60% de la densidad real, con lo cual se puede advertir los problemas que este material presentará para alimentarlo al equipo de procesamiento.

3.1.4. DENSIDAD

La densidad se determinó sobre las hojuelas utilizando el equipo descrito en el numeral 2.2.1.4 que se basa en el Principio de Arquímedes. El valor de densidad así obtenido fue de $0,92 \text{ g/cm}^3$ a 23°C .

De acuerdo con la bibliografía este valor se encuentra tanto en el rango de $0,918$ - $0,935 \text{ g/cm}^3$ correspondiente al polietileno lineal de baja densidad como al del polietileno de baja densidad cuyos valores son menores o iguales a $0,92 \text{ g/cm}^3$.

3.1.5. GRADO DE HUMEDAD

3.1.5.1. Grado de humedad para el aserrín

Los valores de humedad determinados en muestras de aserrín se presentan en la Tabla 7. De acuerdo con los valores encontrados se determina que el material puede ser procesado sin un secado previo ya que la bibliografía sugiere valores de humedad del 0 al 10%.

Tabla 7. Humedad del aserrín en corridas paralelas

	Muestra A	Muestra B
Humedad (%)	7,2368	7,2452
Promedio (%)	7,2410	
Desviación estándar	0,0042	

3.1.5.2. Grado de humedad para el polietileno reciclado

La humedad del plástico debe ser reducida hasta los límites máximos permisibles para poder ser alimentado a un equipo de procesamiento. Usualmente el polietileno puede procesarse con contenidos de humedad de hasta el 1%. La presencia de una humedad superior a dicho valor ocasiona defectos físicos, como rugosidad y presencia de burbujas, y pobres propiedades mecánicas (Harper, 2000).

En la tabla 8 se exponen los datos de la humedad relativa, tomando en cuenta que el porcentaje de humedad límite es 1%, se determina que no es necesario repetir un proceso de secado para el polietileno que fue previamente acondicionado.

Tabla 8. Humedad del polietileno reciclado en corridas paralelas

	Muestra A	Muestra B
Humedad (%)	0,1468	0,1445
Promedio (%)	0,1457	
Desviación estándar	0,0012	

3.1.6. SEPARACIÓN POR TAMAÑOS

En la Tabla 9 se observan los valores de distribución de tamaños para obtener el d80 del aserrín. Para poder cubrir todo el rango de distribución de tamaños del aserrín se tomaron seleccionaron aperturas de malla de 1400 μm hasta 150 μm .

La malla 12 permitió la retención de pedazos de madera y viruta que no eran posibles de procesar mediante extrusión, además de no pertenecer a la definición de partículas. La viruta desaparecía por completo a partir de la malla 30 que posee una abertura de 600 μm .

Tabla 9. Peso de aserrín detenido de acuerdo al tamaño de partícula

Malla	Abertura (μm)	Peso retenido (g)	Porcentaje retenido (%)	Retenido acumulado (%)	Pasado Acumulado (%)
12	1400	3,1	1,25	1,25	98,75
16	1000	13,2	5,32	6,57	93,43
20	850	17,5	7,05	13,61	86,39
30	600	29,7	11,96	25,58	74,42
50	300	94,7	38,14	63,71	36,29
60	250	20,4	8,22	71,93	28,07
100	150	43,2	17,40	89,33	10,67
-100		26,5	10,67	100,00	0,00
	Total	248,3	100,0		

En la Figura 38 se aprecia la distribución granulométrica, de donde se obtiene el d80 del material particulado. Para el aserrín utilizado en el proyecto el valor del d80 se encuentra en los 690 μm , lo que indica que 80% del material tiene tamaño menor a igual a este valor. Si se toman en cuenta los tamices utilizados, este tamaño de partícula se retiene en el tamiz que corresponde a la malla 30, como se mencionó anteriormente a partir de este tamiz desaparecen los rastros de viruta inherentes al aserrín.

A partir de estas dos premisas fue posible escoger cuatro tamaños de partículas para la creación de varias formulaciones de material compuesto. Cabe mencionar

que se decidió utilizar hasta la malla 100 debido a la dificultad de manejo de partículas de inferior tamaño.

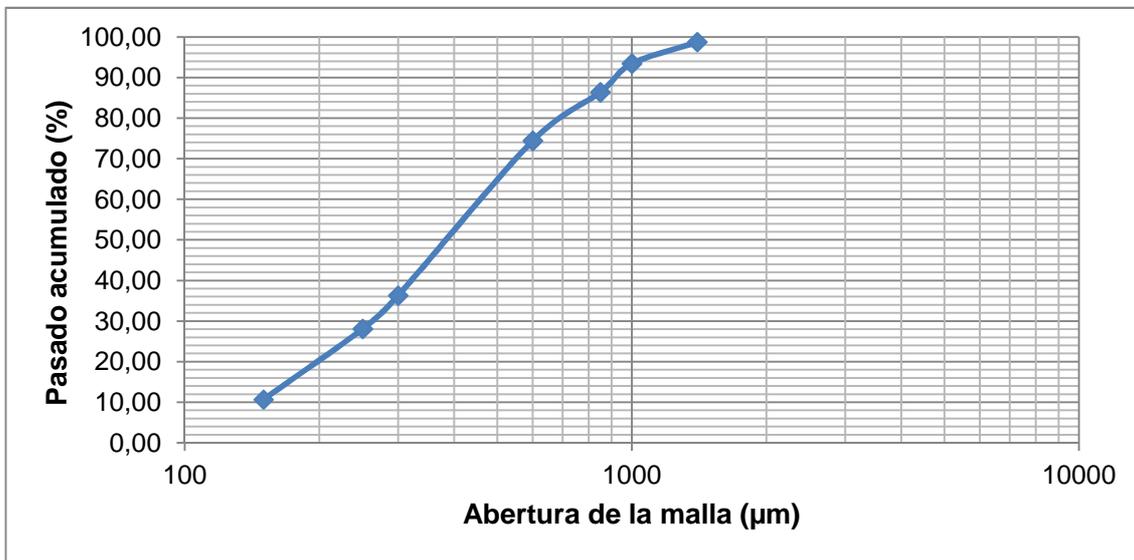


Figura 38. Distribución granulométrica para el aserrín

3.2. PRUEBAS PRELIMINARES

3.2.1. TEMPERATURA DE PROCESAMIENTO

Las recomendaciones bibliográficas sugieren que el polietileno de baja densidad reciclado tenga un perfil de temperaturas que varíe entre 140 a 210°C; por el lado del aserrín es recomendable no rebasar la barrera de los 225°C para evitar posibles problemas de degradación. Sobre la base de estas dos referencias se procedió a probar varios perfiles de temperatura para seleccionar el más adecuado para este tipo de material.

Las pruebas se realizaron en el equipo de extrusión que se describe en el numeral 2.3 el cual dispone de un control de temperaturas para las siete zonas a lo largo del husillo, desde la zona de alimentación a la boquilla. El alcance de la presente investigación es determinar la temperatura a fijar en dichas zonas y no la del material dentro de la cámara de plastificación, debido a que la fricción

existente entre el material procesado y las partes del extrusor provocan variaciones de temperatura que no pueden ser determinadas mediante los sensores.

Para fijar el rango de procesamiento se establecieron las temperaturas extremas en el extrusor: la temperatura de alimentación y la temperatura de la boquilla y las demás temperaturas se las variaría gradualmente según la extensión del rango seleccionado.

Al probar el perfil de temperatura tomado como base a partir de la bibliografía se encontró que es necesario partir de temperaturas menores a 140°C con lo cual se realizaron pruebas con las observaciones que se describen a continuación:

- Cuando la temperatura de alimentación era menor a 80°C: Dificultad en la fundición del polímero, alto gasto energético debido al trabajo realizado por los motores del husillo.
- Cuando la temperatura de alimentación era mayor a 120°C: Alta emisión de vapores provenientes del aserrín, debido a la humedad y componentes volátiles de la misma madera. Llenando la garganta de alimentación con vapor y gotas de agua. Al humedecer esta parte del equipo el material tendía a quedarse pegado en las paredes, creando ciertos puntos de acumulación no deseados.
- Cuando la temperatura de la boquilla era menor a 160°C: Dificultad en la salida del material, por la falta de fluidez del material. Poca uniformidad en las formulaciones, puntos de acumulación de aserrín en el tallarín, además de una falta de compactación. Nuevamente se observó el aumento del trabajo mecánico proveniente de los motores.
- Cuando la temperatura de la boquilla era mayor a 200°C: Degradación del material, efecto que se detectó mediante el oscurecimiento del producto y el aumento del olor a madera quemada.

Con estas observaciones se estableció el perfil de temperaturas indicado en la Tabla 10, utilizado para todas las formulaciones. Aunque existía un proceso de degradación detectado mediante el olor de las formulaciones (olor a madera quemada), con este perfil no existía la emisión de vapores en la zona de alimentación, problemas de flujo, ni sobreesfuerzo proveniente de los motores. El perfil escogido responde a las exigencias para poder procesar en conjunto los dos materiales sin que experimenten cambios drásticos de temperatura que ocasionen efectos adversos en el material.

Tabla 10. Perfil de temperatura para el procesamiento de material compuesto

Zona del extrusor	Temperatura
1 (Alimentación)	100 °C
2	120 °C
3	140 °C
4	150 °C
5	160 °C
6	170 °C
7 (Boquilla)	180 °C

3.2.2. VELOCIDAD DE LOS HUSILLOS

La velocidad de los husillos es el segundo valor controlado en la extrusión. Para esto es importante tener en cuenta la alimentación y la dosificación necesaria para que cada formulación tenga la composición deseada.

Los efectos de la velocidad, son visibles en el tallarín y su flujo. Si se utilizan velocidades muy bajas el tiempo de residencia en la extrusora abre la posibilidad de una degradación del material debido a la prolongada exposición a altas temperaturas, conjuntamente se desea un proceso que puede ser llevado a escala industrial, donde el tiempo es un factor que apremia en la industria moderna.

En contraste al utilizar velocidades muy altas se eleva la fricción causada entre el material y el interior de la extrusora, elevando la temperatura de material compuesto y al salir los tallarines el tiempo de residencia en el tren de enfriamiento no es suficiente para que estos puedan ser separados y cortados en las etapas post extrusión.

Cada formulación requiere de distintas condiciones de procesamiento, por lo cual es factible fijar las temperaturas de las zonas y variar la velocidad de rotación. Un primer motivo de esto es que cada tamaño de aserrín tiene diferentes características de flujo debido a sus variaciones en densidad aparente. El segundo motivo es que hay varias composiciones, por lo tanto diferentes dosificaciones.

Es importante mencionar los limitantes encontrados en este proceso:

- La dificultad de carga de material en las tolvas de alimentación forzada
- La relación entre la alimentación del material y la velocidad del husillo. Ya que cuando la alimentación sobrepasa a la velocidad del tornillo se satura la tolva primaria y cuando la velocidad del tornillo supera a la alimentación no existe el efecto de arrastre requerido con lo que se produce fluctuaciones en el producto obtenido.
- Por último, la capacidad de los motores del husillo y de la alimentación limitan la operación. Cuando los motores de alimentación funcionaban a velocidades menores a 1 Hz, estos se detenían al poco tiempo de ser activados. No se determinó las causas de esta falla en el equipo, sin embargo, se debía tomar en cuenta para el cálculo de la velocidad de alimentación en el Anexo II.

Por último, los flujos máxicos, velocidades de alimentación y velocidades del husillo se presentan en la Tabla 11.

Tabla 11. Velocidades de alimentación y husillo de la extrusora para las diferentes formulaciones

		Malla 30			
Porcentaje de Aserrín		5%	10%	15%	
Polietileno Reciclado	Alimentación primaria (Hz)	35	30	25	
	Flujo másico (g/s)	1,445	1,239	1,032	
Aserrín	Alimentación secundaria (Hz)	1,263	2,285	3,024	
	Flujo másico (g/s)	0,076	0,138	0,182	
Velocidad del husillo (Hz)		40	35	30	
		Malla 50			
Porcentaje de Aserrín		5%	10%	15%	
Polietileno Reciclado	Alimentación primaria (Hz)	35	30	25	
	Flujo másico (g/s)	1,445	1,239	1,032	
Aserrín	Alimentación secundaria (Hz)	1,024	1,853	2,452	
	Flujo másico (g/s)	0,076	0,138	0,182	
Velocidad del husillo (Hz)		40	35	30	
		Malla 60			
Porcentaje de Aserrín		5%	10%	15%	
Polietileno Reciclado	Alimentación primaria (Hz)	35	30	25	
	Flujo másico (g/s)	1,445	1,239	1,032	
Aserrín	Alimentación secundaria (Hz)	0,980	1,773	2,347	
	Flujo másico (g/s)	0,076	0,138	0,182	
Velocidad del husillo (Hz)		40	35	30	
		Malla 100			
Porcentaje de Aserrín		5%	10%	15%	30%
Polietileno Reciclado	Alimentación primaria (Hz)	35	30	25	20
	Flujo másico (g/s)	1,445	1,239	1,032	0,949
Aserrín	Alimentación secundaria (Hz)	0,921	1,667	2,206	4,923
	Flujo másico (g/s)	0,076	0,138	0,182	0,407
Velocidad del husillo (Hz)		40	35	30	25

En el ANEXO II se encuentra el ejemplo de cálculo para conocer las dosificaciones del polietileno y del material particulado.

3.3. EVALUACIÓN DE FORMULACIONES

3.3.1. MICROSCOPIA ÓPTICA

El método de microscopía óptica permitió determinar la distribución y dispersión del aserrín dentro del material compuesto. Para las mediciones se realizó un proceso de prensado para obtener láminas a través de las cuales pueda pasar la luz del microscopio. Sin embargo, como se indica en las fotografías tomadas a través de la lente del microscopio, además de observar las partículas de aserrín, es posible ver burbujas de aire y en ciertas fotografías material degradado (debido a las temperaturas de procesamiento). La diferencia entre la luz de una imagen a otra corresponde al espesor de la lámina obtenida, en algunos casos es posible realizar la inspección visual más fácil que en otros casos.

Para todas las figuras se ha establecido el siguiente orden: la imagen superior izquierda corresponde a la formulación con 5% de aserrín, la imagen superior derecha responde a la formulación con 10% de aserrín y finalmente la imagen inferior responde a una composición del 15% de aserrín. La cuarta figura tiene una foto adicional a la derecha que corresponde a la formulación con 30% de aserrín.

La Figura 39 corresponde a las imágenes obtenidas al microscopio de las formulaciones realizadas con material particulado retenido en la malla 30.

En las fotografías se puede observar la presencia de las partículas de aserrín las cuales pueden distinguirse por su coloración café variando de matices claros a oscuros. Adicionalmente, se distinguen la presencia de burbujas en forma de bolsas con la misma tonalidad de la matriz.

Se observa una distribución variada respecto al tamaño de partícula del aserrín. En las formulaciones correspondientes al 10 y 15% de aserrín es posible ver burbujas en la formulación. Esto puede deberse: a la humedad y presencia de elementos volátiles que crean vacíos entre el refuerzo y la matriz. Este defecto

también podría estar asociado con la falta de compactación entre los componentes del material.

De entre las formulaciones se puede observar deficiencias tanto en el mezclado dispersivo como en el distributivo, siendo este último más notorio ya que se pueden observar espacios sin aserrín y espacios con una alta concentración de aserrín, esto es menos crítico en la formulación del 5%. Esta falta de homogeneidad no permite observar mediante inspección visual las diferencias en contenido de aserrín de las formulaciones.

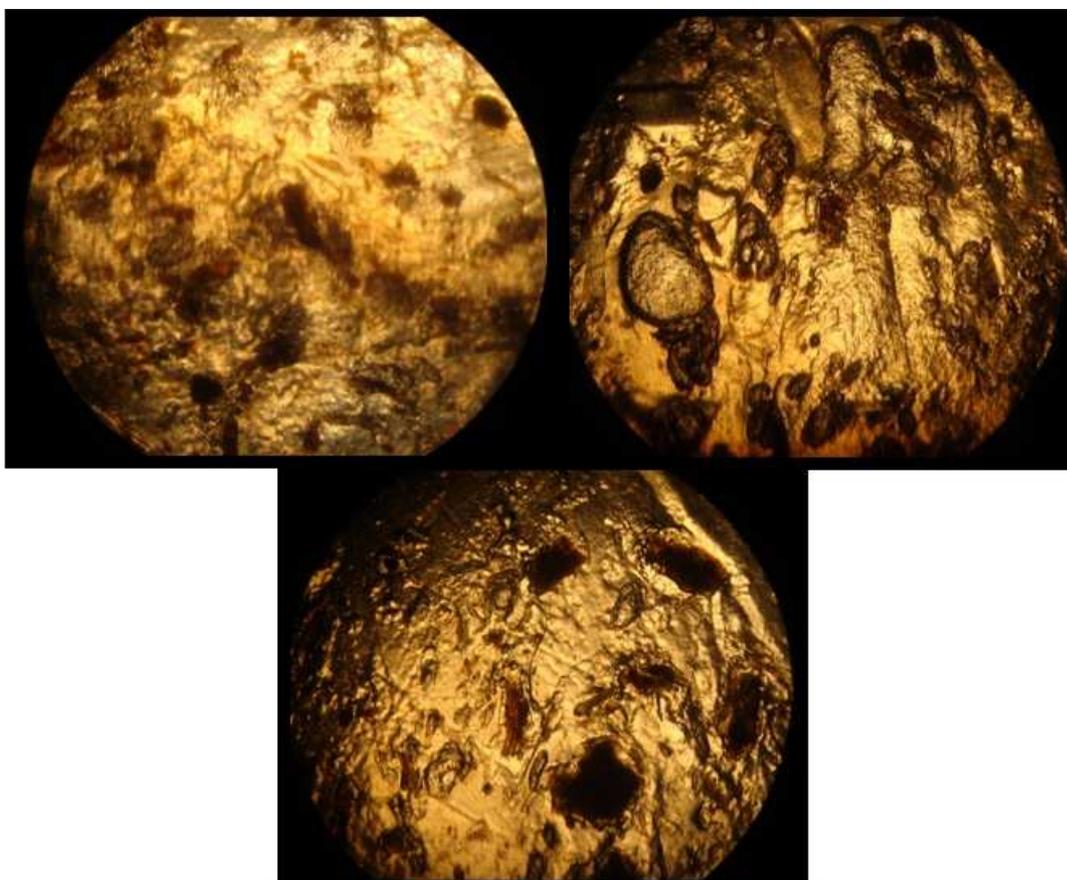


Figura 39. Vista al microscopio de las formulaciones de aserrín Malla #30

En la Figura 40 se presentan las imágenes correspondientes a la malla 50. En estas fotografías se puede apreciar una mejora significativa en cuanto al mezclado dispersivo y distributivo ya que hay mayor homogeneidad en el contenido de aserrín por parte de la matriz. Esta mejora en el mezclado es más notoria a contenidos del 10% y 15%.

En esta serie de fotos ya se puede apreciar las diferencias en composición. Es importante señalar que en este caso disminuyó el tamaño de las burbujas.



Figura 40. Vista al microscopio de las formulaciones de aserrín Malla #50

En la Figura 41 se encuentran las imágenes correspondientes a la malla 60. No existe mayor diferencia entre estas formulaciones y las anteriores, las observaciones se mantienen, con la única diferencia del incremento de burbujas que parecen rodear a ciertas partículas de aserrín. Como particularidad el tamaño de la partícula parece no tener relación con las burbujas formadas, ya que no necesariamente rodea a las de mayor tamaño, como se podría pensar inicialmente.



Figura 41. Vista al microscopio de las formulaciones de aserrín Malla #60

Por último la Figura 42 indica las imágenes obtenidas de las formulaciones realizadas con aserrín retenido en malla 100.

Se observa una buena dispersión y distribución de las partículas en la matriz. Persisten las burbujas alrededor de ciertas partículas. Como detalle particular la formulación con mayor cantidad de estos espacios de aire es la que contiene 30% de aserrín. Esta formulación además indica un proceso de degradación más avanzado, que se diferencia por el oscurecimiento notorio del material.

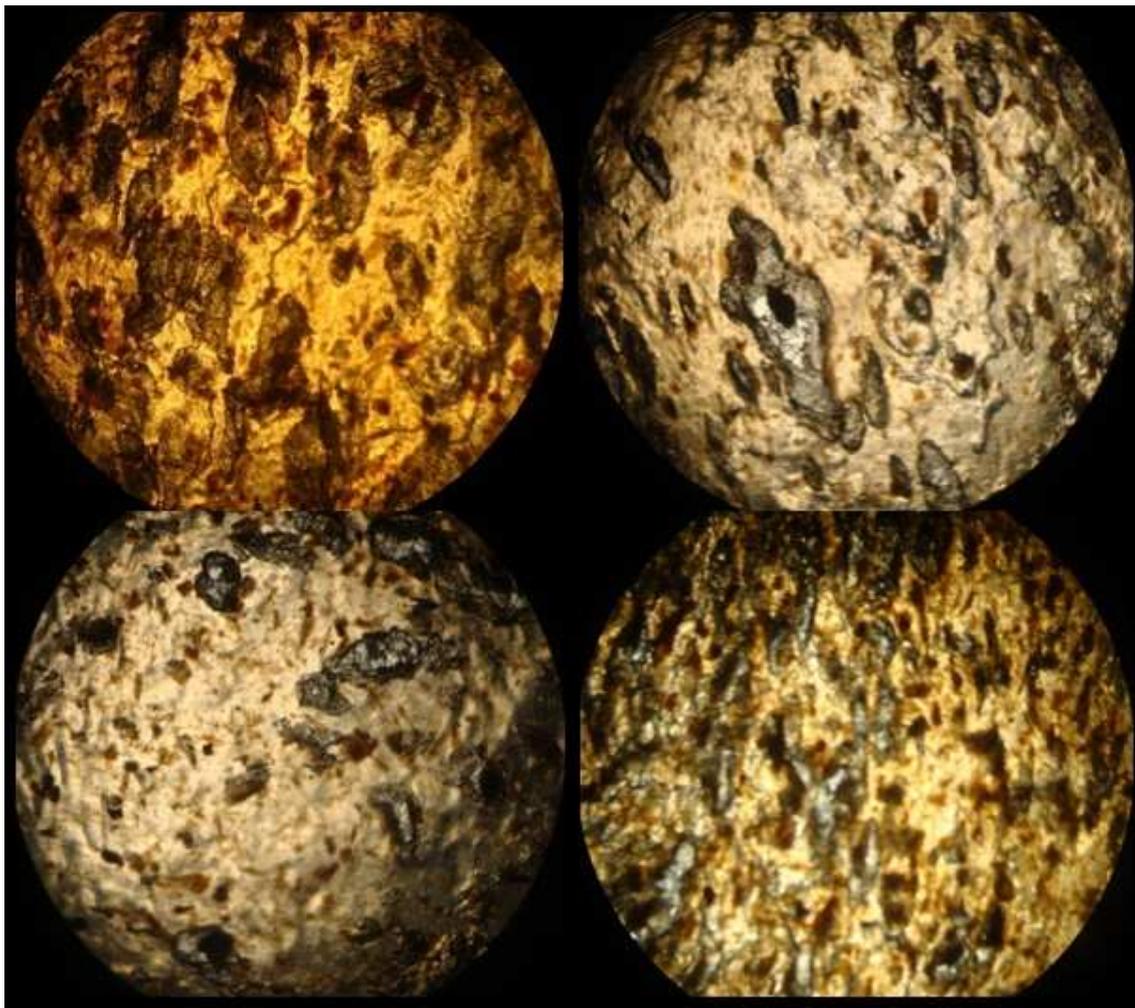


Figura 42. Vista al microscopio de las formulaciones de aserrín Malla #100

3.3.2. PRUEBAS MECÁNICAS

Las pruebas se realizaron sobre probetas obtenidas a partir de cintas extruidas en el Reómetro Haake de par de torsión. Los resultados de los ensayos son el promedio de al menos cinco probetas ensayadas. Se reportó deformación al pico, esfuerzo al pico, deformación a la ruptura, esfuerzo a la ruptura y módulo de Young también conocido como módulo de elasticidad.

En la Tabla 12 se encuentran los valores obtenidos para las propiedades antes mencionadas.

Tabla 12. Propiedades mecánicas de las cintas provenientes de las formulaciones de material compuesto

Malla 30					
Composición de aserrín (%)	Deformación al pico (%)	Esfuerzo al pico (MPa)	Deformación a la ruptura (%)	Esfuerzo a la ruptura (MPa)	Módulo de Young (MPa)
5	23,41	10,79	53,81	10,41	137,3
10	20,36	10,29	36,00	10,08	139,0
15	13,49	10,12	21,00	8,95	178,2
Desviación Estándar	5,08	0,35	16,43	0,77	23,14
Malla 50					
Composición de aserrín (%)	Deformación al pico (%)	Esfuerzo al pico (MPa)	Deformación a la ruptura (%)	Esfuerzo a la ruptura (MPa)	Módulo de Young (MPa)
5	43,43	10,11	56,94	10,11	131,8
10	30,04	10,11	40,17	9,56	135,6
15	15,83	8,13	21,87	8,38	167,7
Desviación Estándar	13,80	1,15	17,54	0,89	19,72
Malla 60					
Composición de aserrín (%)	Deformación al pico (%)	Esfuerzo al pico (MPa)	Deformación a la ruptura (%)	Esfuerzo a la ruptura (MPa)	Módulo de Young (MPa)
5	67,24	11,22	78,37	10,85	167,1
10	38,31	10,71	49,86	10,58	174,9
15	27,21	10,70	45,84	10,50	177,9
Desviación Estándar	20,67	0,30	17,74	0,18	5,57
Malla 100					
Composición de aserrín (%)	Deformación al pico (%)	Esfuerzo al pico (MPa)	Deformación a la ruptura (%)	Esfuerzo a la ruptura (MPa)	Módulo de Young (MPa)
5	83,19	11,56	100,54	11,28	152,9
10	49,56	11,13	68,23	10,59	173,3
15	27,33	9,85	61,66	10,03	191,3
30	9,69	8,43	12,73	7,86	243,7
Desviación Estándar	19,98	1,35	30,32	1,44	36,57

En las Figura 43, 44, 45 y 46 esta esquematizada la deformación al pico para cada uno de los tamaños de aserrín. La deformación al pico representa el porcentaje que el material se ha deformado, al momento que termina el comportamiento elástico del material.

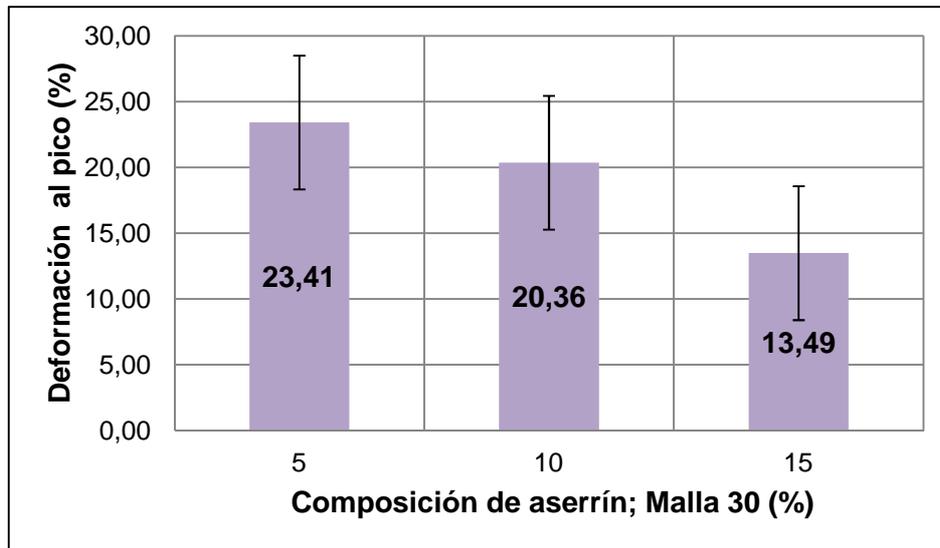


Figura 43. Deformación al pico de las formulaciones realizadas con aserrín de Malla 30

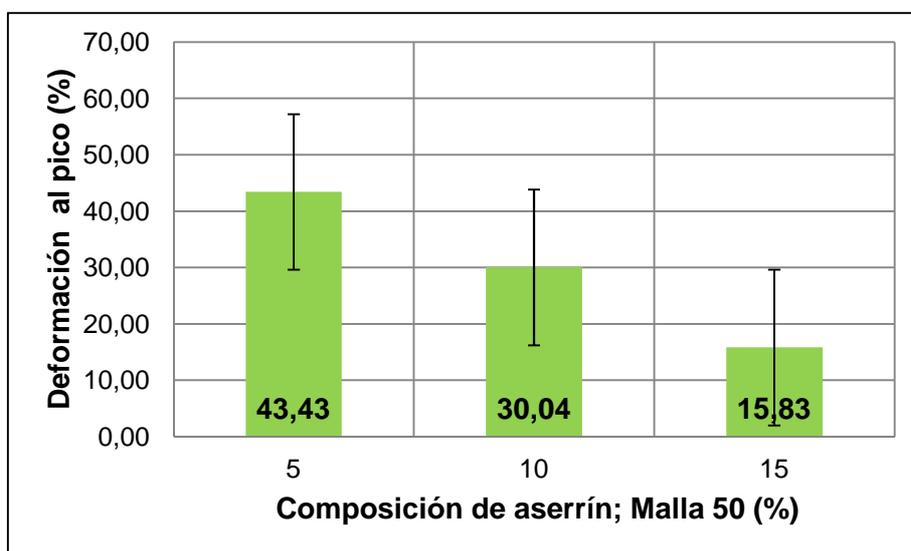


Figura 44. Deformación al pico de las formulaciones realizadas con aserrín de Malla 50

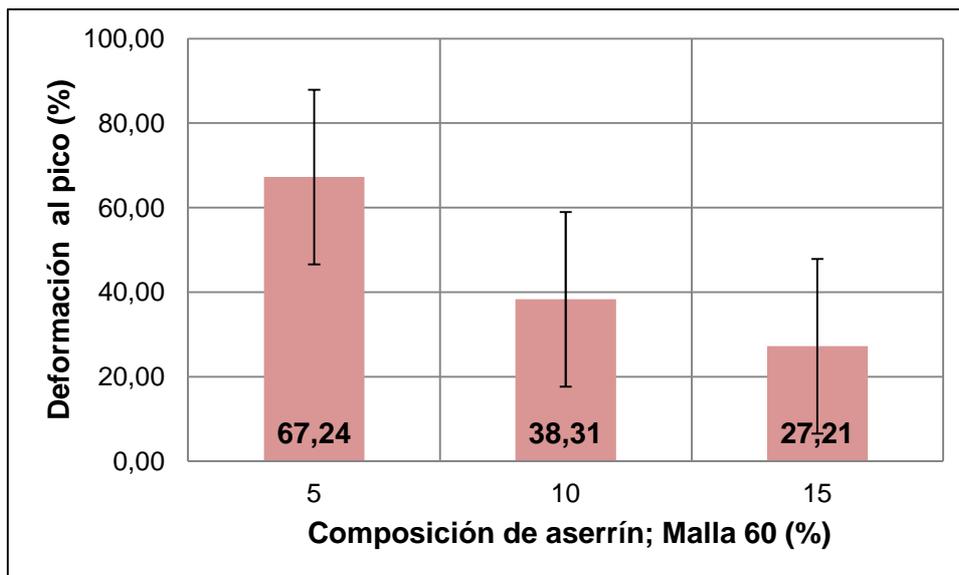


Figura 45. Deformación al pico de las formulaciones realizadas con aserrín de Malla 60

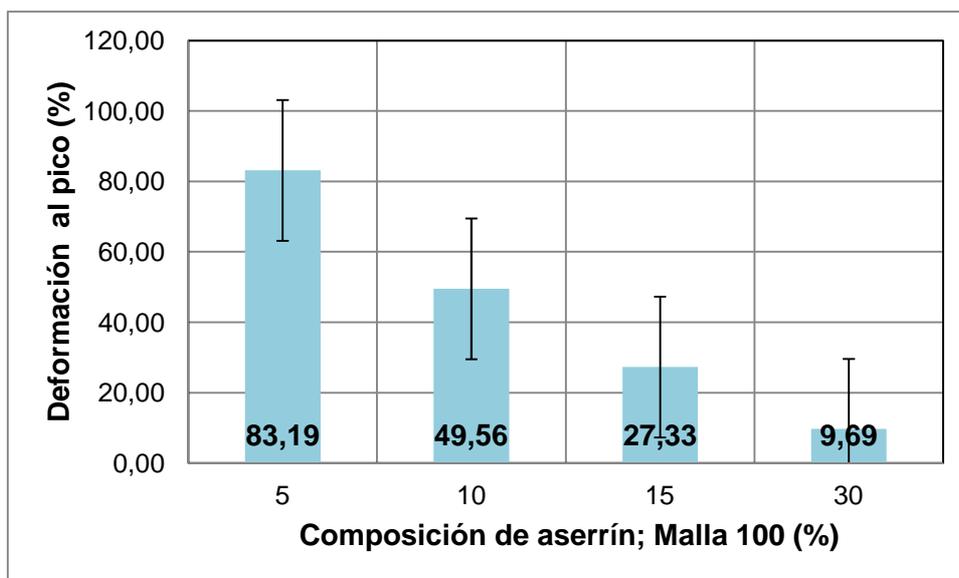


Figura 46. Deformación al pico de las formulaciones realizadas con aserrín de Malla 100

La primera observación es que esta propiedad disminuye con el incremento de aserrín, esto denota la incompatibilidad de las fases que componen el composite. Uno de los principales motivos es la diferencia de su naturaleza, el polietileno es un polímero no polar y las partículas lignocelulósicas tienen naturaleza polar. La posibilidad de crear enlaces entre estos dos componentes se dificulta, la mayoría de estudios de composites sugieren dos opciones, la primera es el uso de aditivos

compatibilizantes y la segunda opción es dar un tratamiento previo al refuerzo para cambiar su naturaleza polar.

La segunda observación proviene del tamaño de partícula, a medida que disminuye el tamaño aumenta esta propiedad, lo que quiere sugiere que a menor tamaño de material particulado mayor es la capacidad de compenetrarse en la matriz.

El estudio de esta propiedad confirma lo encontrado en las pruebas de microscopia óptica de que a menor tamaño de partícula aumentaba la posibilidad de tener una mejor mezcla tanto distributiva como dispersiva. En la Figura 47 se encuentra la comparación entre todas las formulaciones.

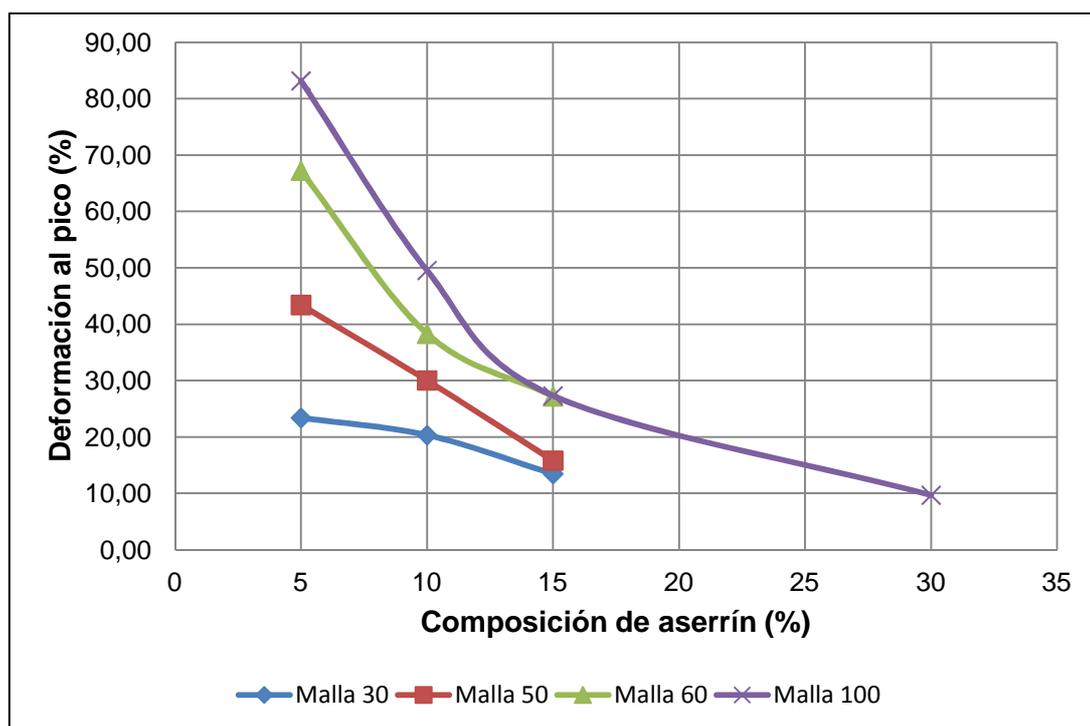


Figura 47. Deformación al pico versus tamaño de partícula a diferentes concentraciones de aserrín

Las Figuras 48, 49, 50 y 51 muestran gráficas correspondientes al esfuerzo al pico, para los diferentes tamaños de partícula.

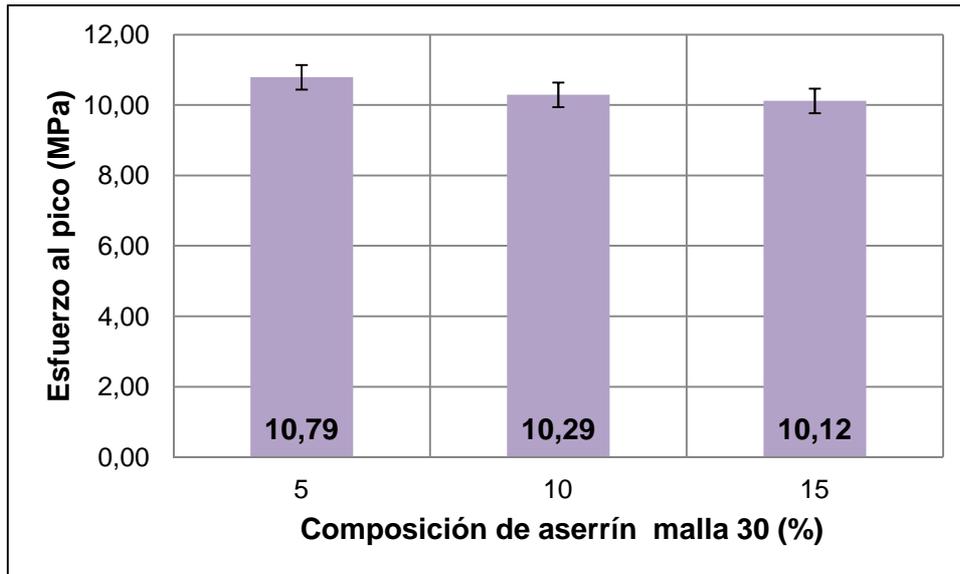


Figura 48. Esfuerzo al pico de las formulaciones realizadas con aserrín de Malla 30

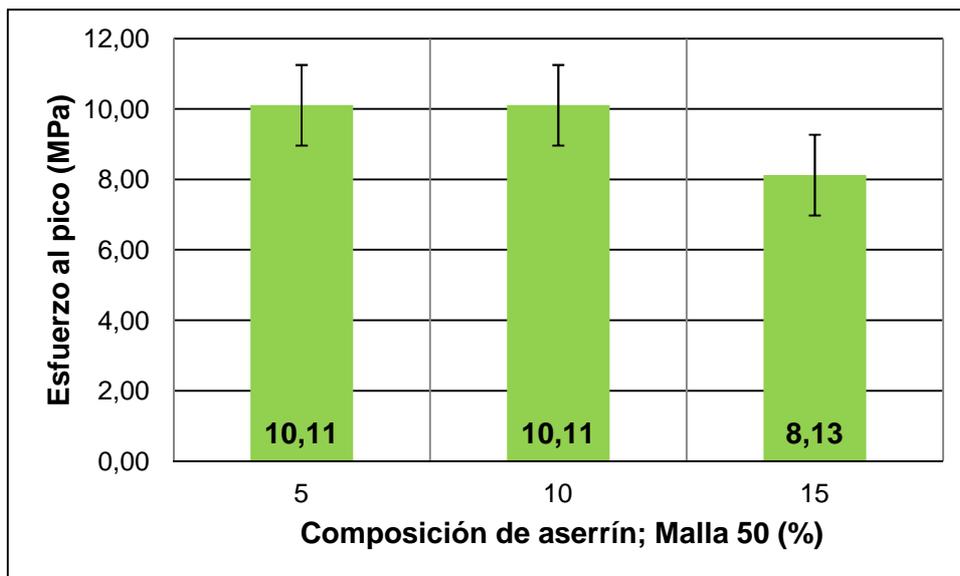


Figura 49. Esfuerzo al pico de las formulaciones realizadas con aserrín de Malla 50

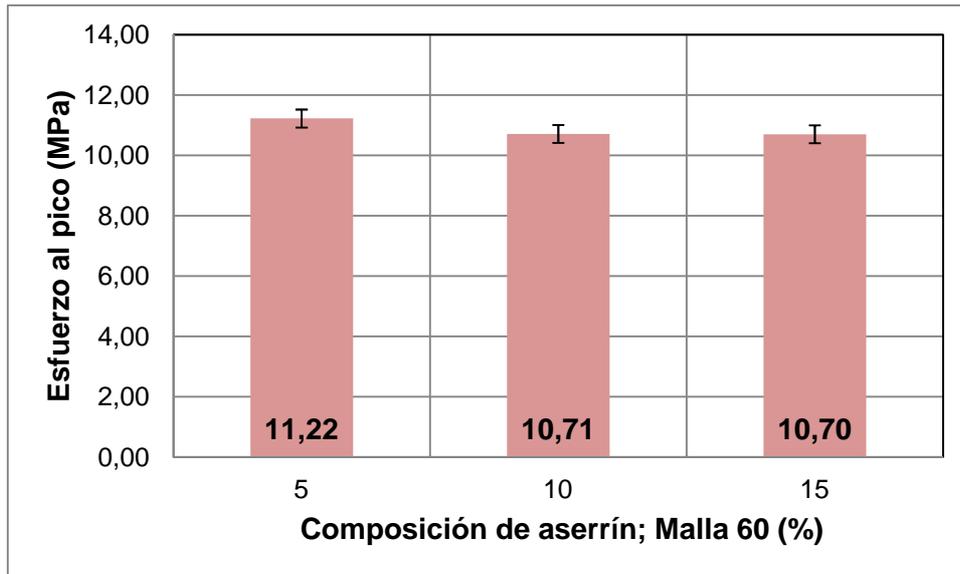


Figura 50. Esfuerzo al pico de las formulaciones realizadas con aserrín de Malla 60

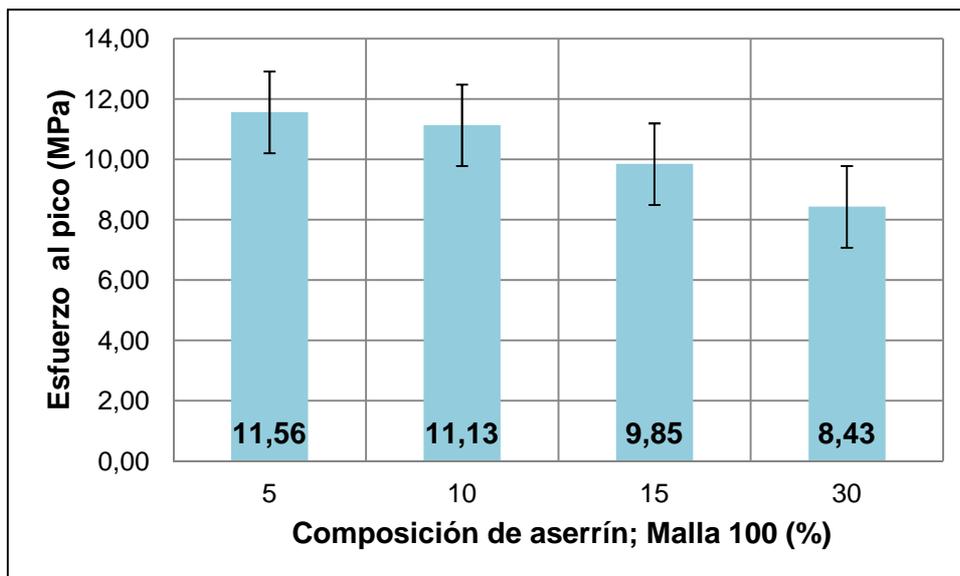


Figura 51. Esfuerzo al pico de las formulaciones realizadas con aserrín de Malla 100

Se puede observar que pese a las variaciones en composición y tamaño de partícula esta propiedad permanece razonablemente constante. No obstante, en ciertos valores de tamaño de partícula, como por ejemplo el de malla 100, se observa una ligera tendencia a disminuir el valor con el incremento del porcentaje del aserrín. En la Figura 52 se encuentra la comparación entre todas las formulaciones.

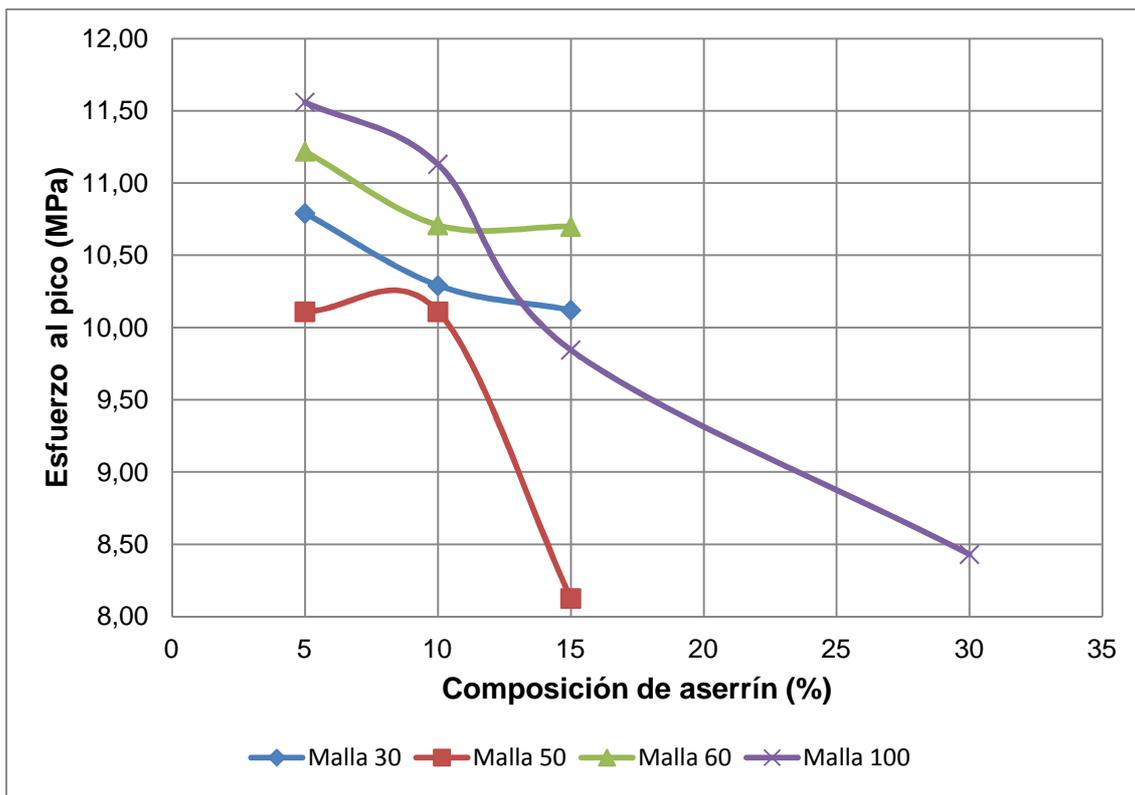


Figura 52. Esfuerzo al pico versus tamaño de partícula a diferentes concentraciones de aserrín

En las Figuras 53, 54, 55 y 56 se ha graficado la dependencia de la deformación a la ruptura respecto a la concentración de aserrín incorporado al material compuesto, cada figura a diferentes tamaños de partícula.

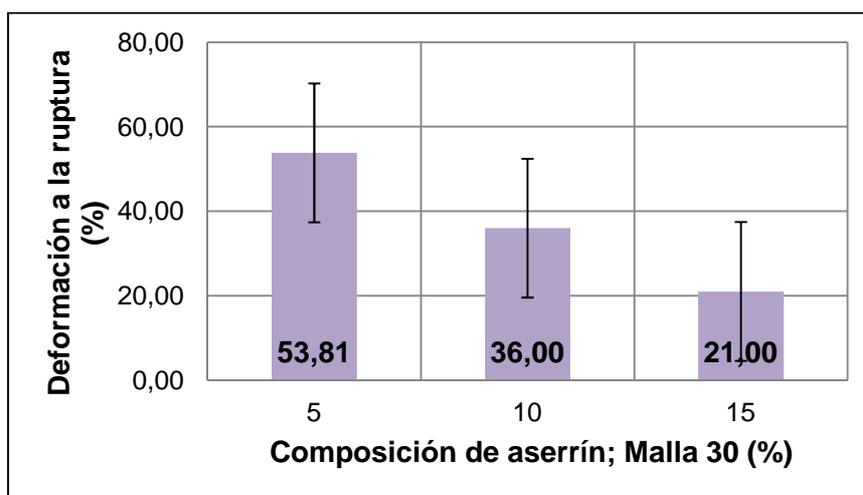


Figura 53. Deformación a la ruptura de las formulaciones realizadas con aserrín de Malla 30

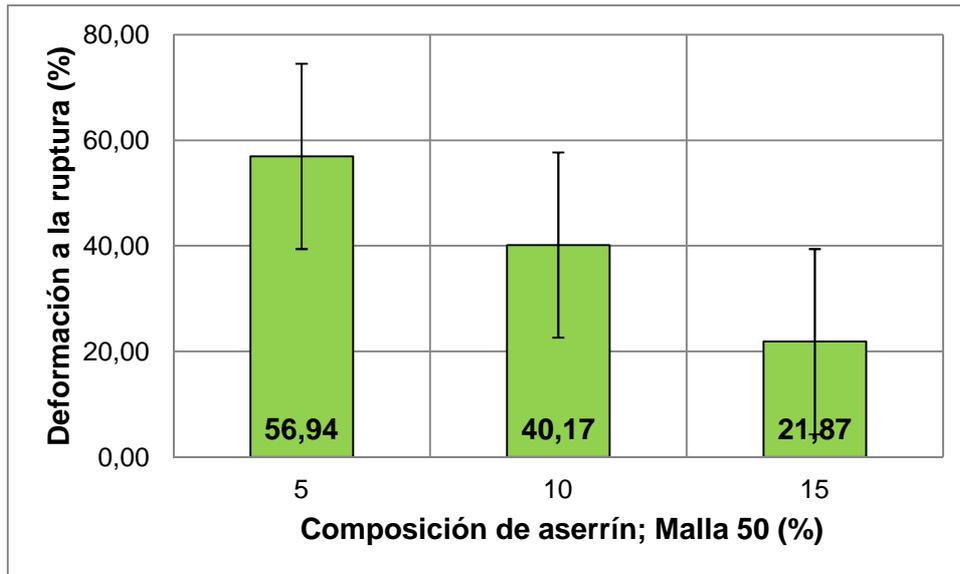


Figura 54. Deformación a la ruptura de las formulaciones realizadas con aserrín de Malla 50

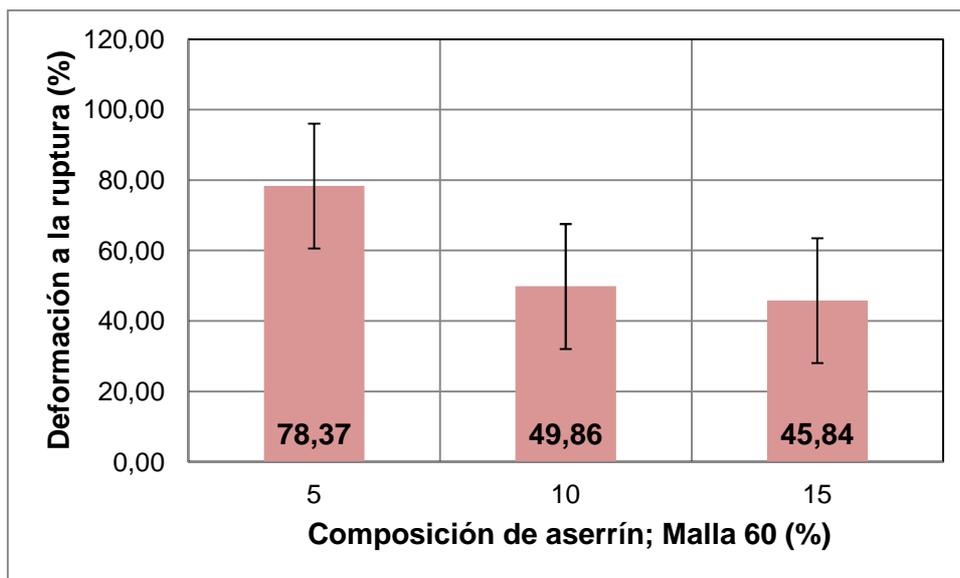


Figura 55. Deformación a la ruptura de las formulaciones realizadas con aserrín de Malla 60

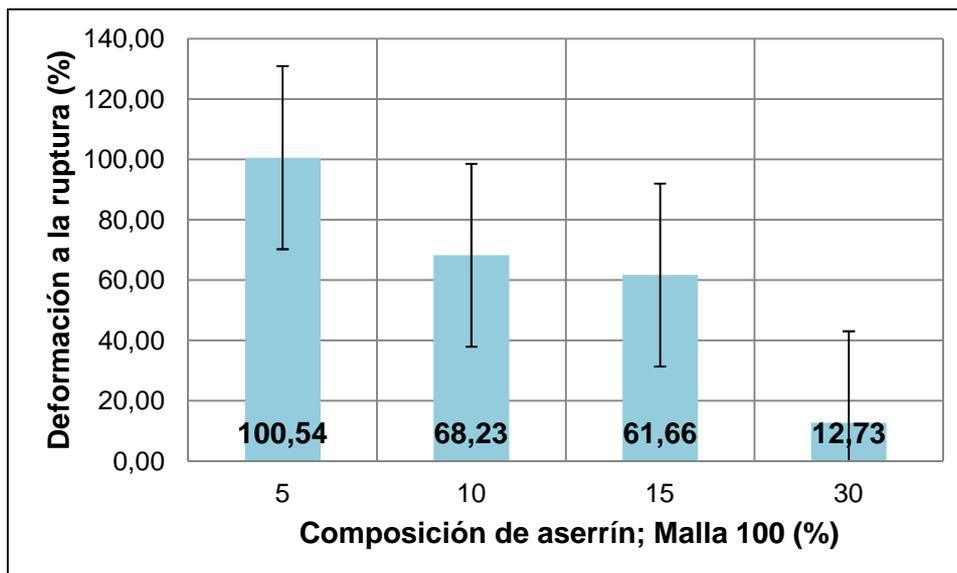


Figura 56. Deformación a la ruptura de las formulaciones realizadas con aserrín de Malla 100

De las gráficas se observa que a medida que aumenta el contenido de aserrín, disminuye el porcentaje de deformación a la ruptura. Esta tendencia se mantiene en todos los tamaños de malla.

Además se observa que existe una tendencia definida de que a medida que disminuye el tamaño de partícula aumenta la deformación a rotura, manteniéndose esta tendencia en todos los niveles de concentración de aserrín estudiados.

El porcentaje de deformación a rotura suele ser una medida de la compatibilidad que desarrollan los materiales: a mayor compatibilidad presentarán mayor deformación a rotura. De acuerdo con esto, y los resultados obtenidos, se evidencia que la disminución del tamaño de partícula mejora la compatibilidad del aserrín con la matriz. A continuación la gráfica de la deformación versus el tamaño de partícula a diferentes concentraciones de aserrín. En la Figura 57 se encuentra la comparación entre todas las formulaciones.

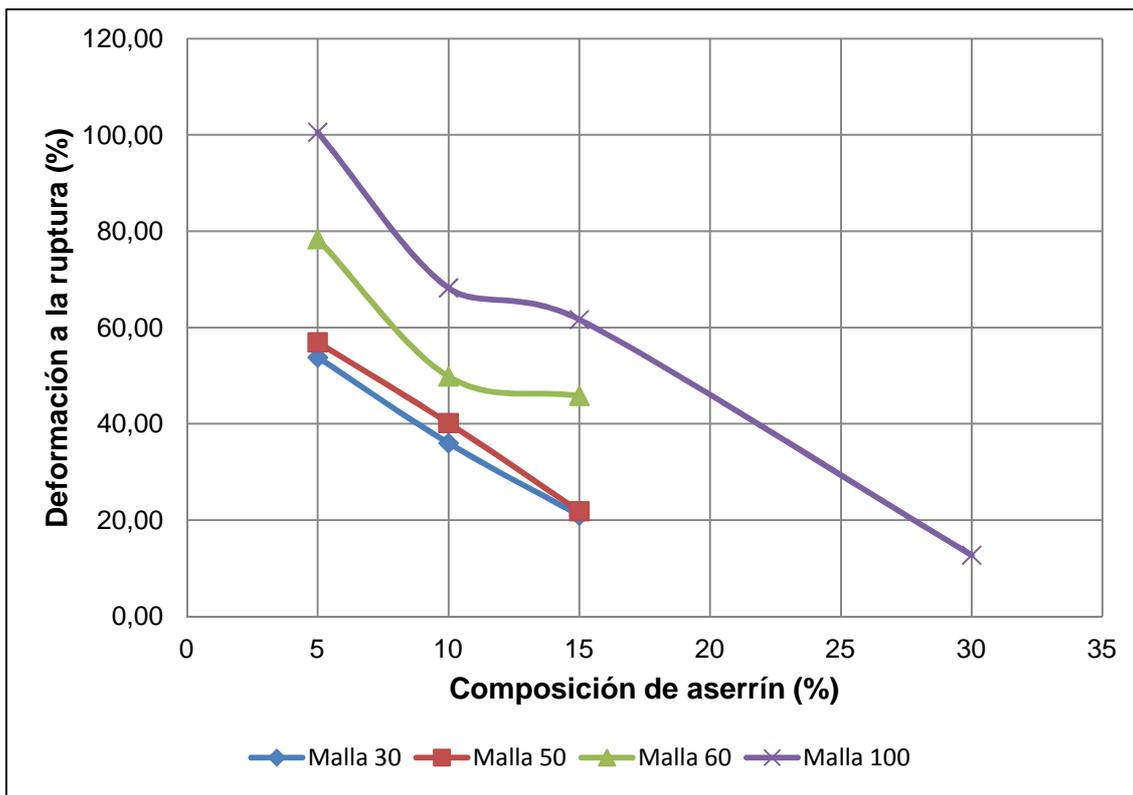


Figura 57. Deformación a la ruptura versus tamaño de partícula a diferentes concentraciones de aserrín

En la Figura 58, 59, 60 y 61 se encuentran las gráficas del esfuerzo a la ruptura en función de la concentración del aserrín, a diferentes tamaños de partícula. Si bien se puede observar una ligera tendencia a la disminución de esta propiedad con el contenido de aserrín, la variación es pequeña, por lo cual la incidencia de la cantidad de aserrín incorporado hasta los valores estudiados no es determinante en el valor de la resistencia a tracción a rotura.

En cuanto a la dependencia con el tamaño de partícula, si bien a medida que disminuye el tamaño de partícula se aprecia una tendencia a un mayor esfuerzo para llegar al punto de ruptura. Sin embargo, las variaciones tampoco son elevadas.

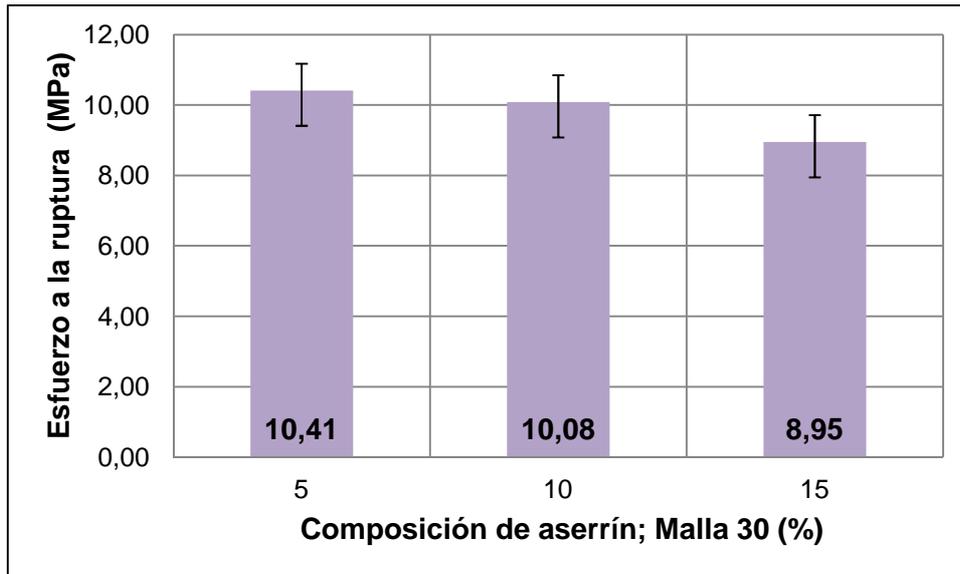


Figura 58. Esfuerzo a la ruptura de las formulaciones realizadas con aserrín de Malla 30

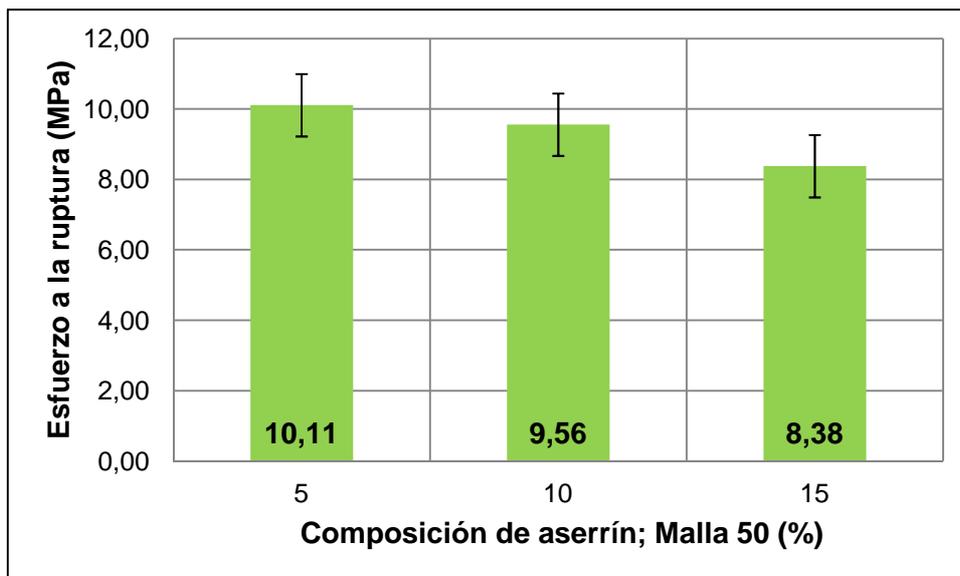


Figura 59. Esfuerzo a la ruptura de las formulaciones realizadas con aserrín de Malla 50

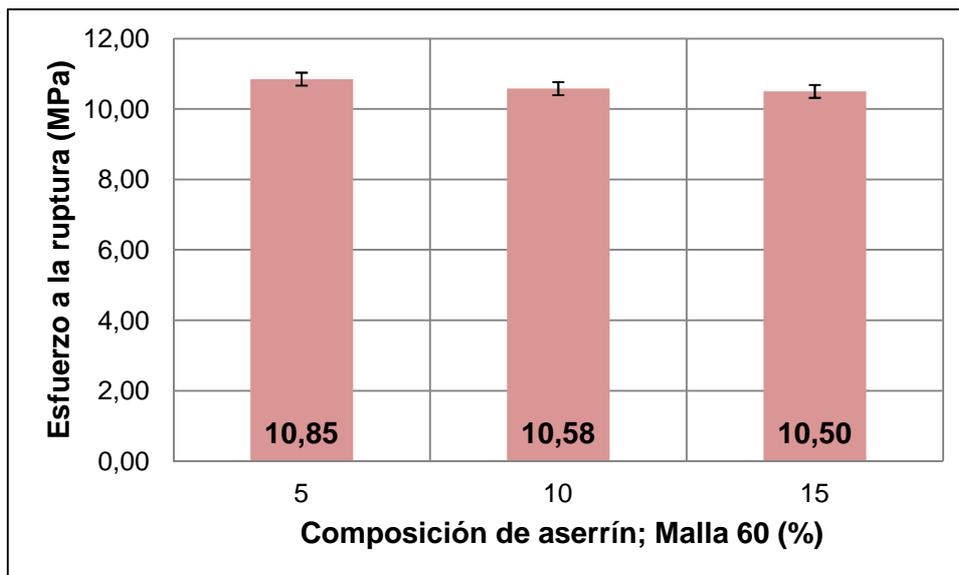


Figura 60. Esfuerzo a la ruptura de las formulaciones realizadas con aserrín de Malla 60

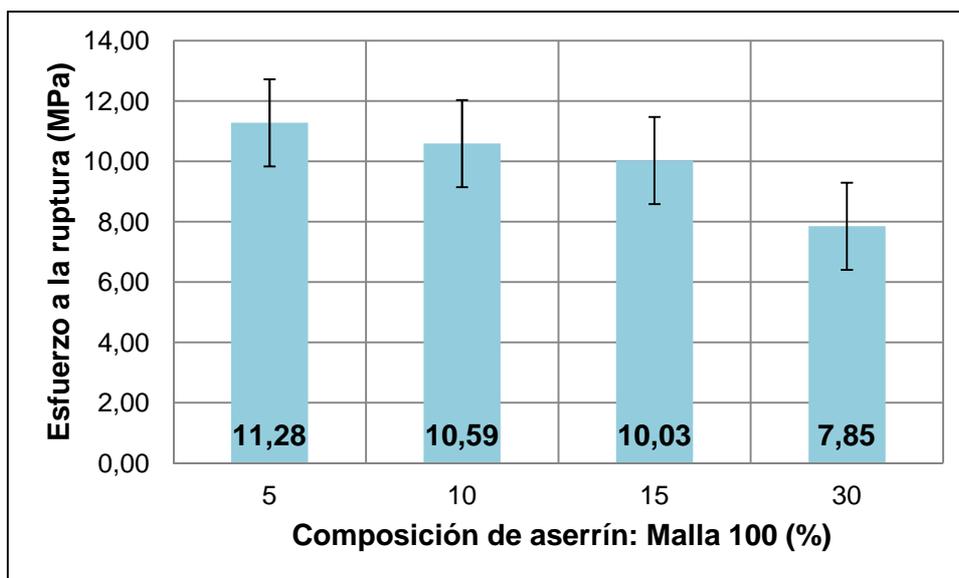


Figura 61. Esfuerzo a la ruptura de las formulaciones realizadas con aserrín de Malla 100

En la Figura 62 se encuentra la comparación entre todas las formulaciones.

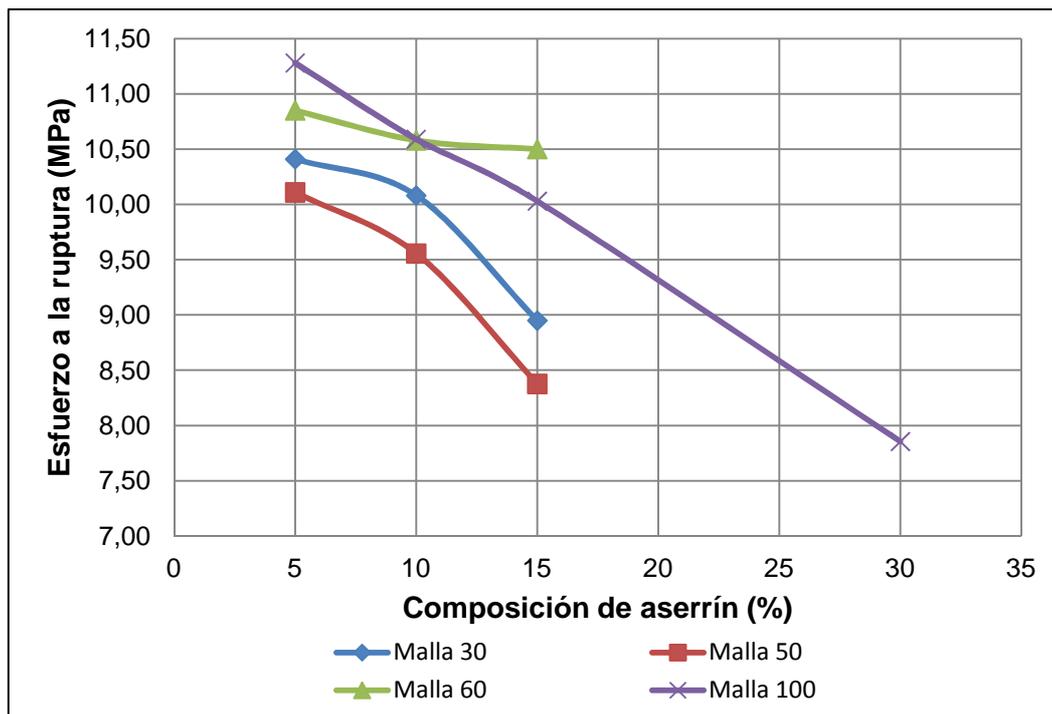


Figura 62. Esfuerzo a la ruptura versus tamaño de partícula a diferentes concentraciones de aserrín

De la Figura 63 a la Figura 66 se encuentra el módulo de Young o módulo de elasticidad.

En las gráficas se puede apreciar que, a diferencia de lo que sucede con las propiedades precedentes, aquí se observa que esta aumenta con la cantidad de aserrín existente en el material.

De lo observado se puede comentar que el incremento del porcentaje de aserrín aporta con rigidez al material compuesto, lo cual es un resultado esperado ya que usualmente las fibras o partículas se añaden con este propósito.

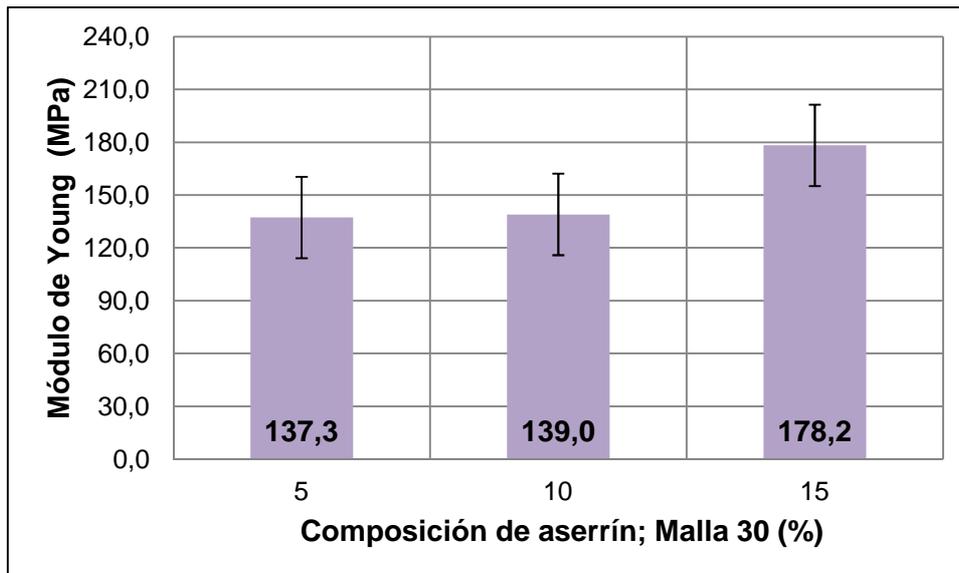


Figura 63. Módulo de Young de las formulaciones realizadas con aserrín de Malla 30

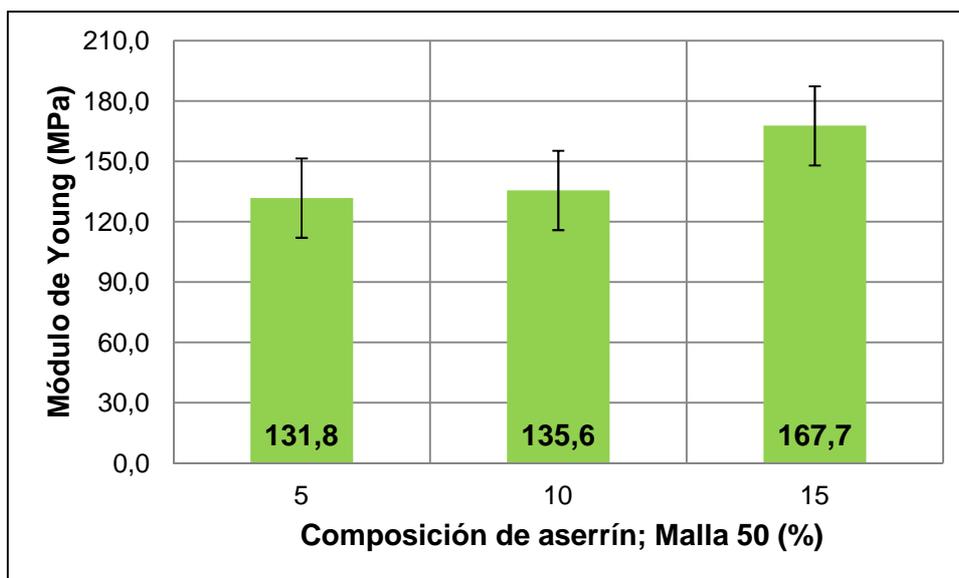


Figura 64. Módulo de Young de las formulaciones realizadas con aserrín de Malla 50

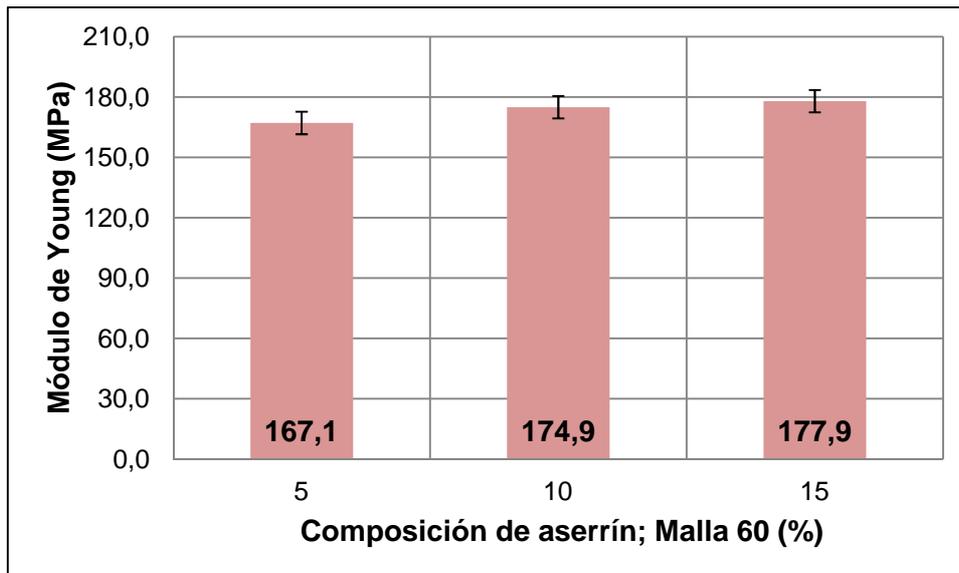


Figura 65. Módulo de Young de las formulaciones realizadas con aserrín de Malla 60

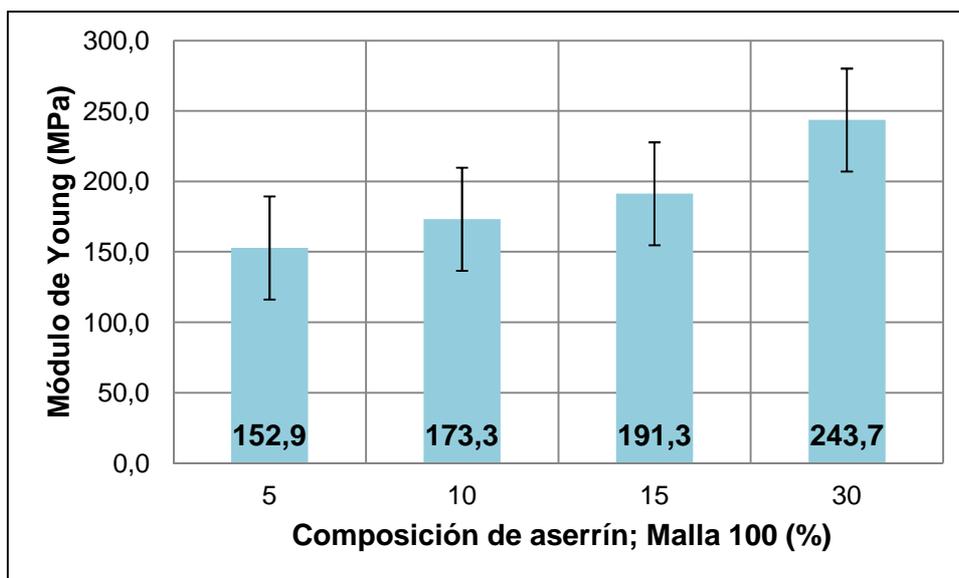


Figura 66. Módulo de Young de las formulaciones realizadas con aserrín de Malla 100

En la Figura 67 se encuentra la comparación entre todas las formulaciones.

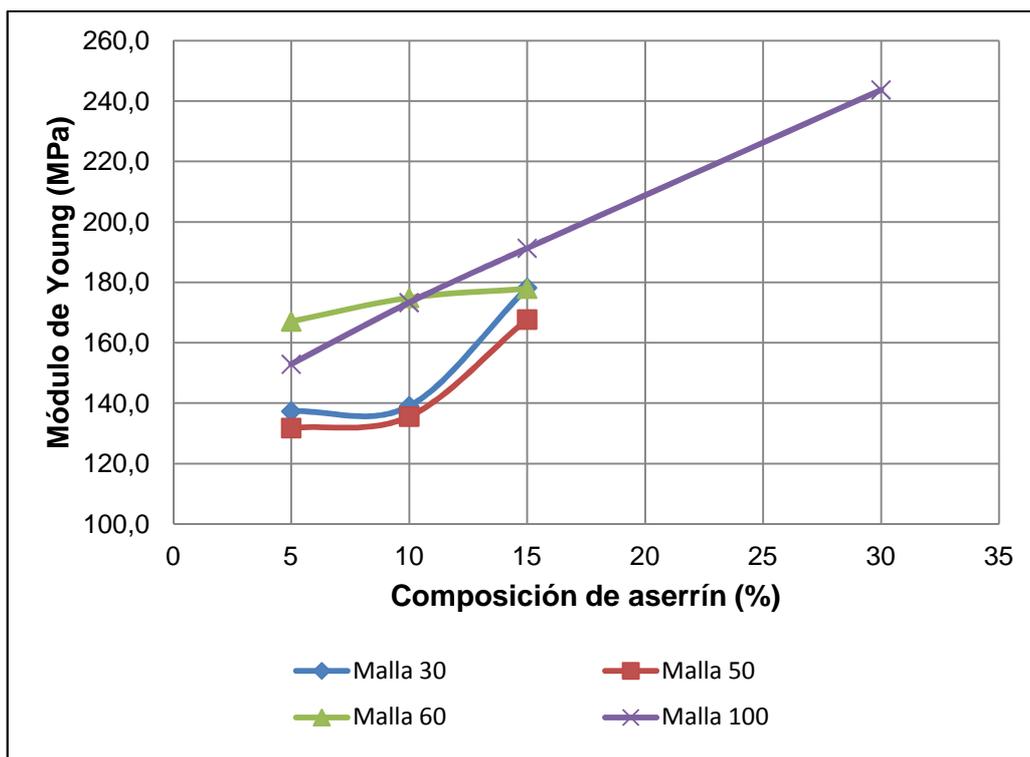


Figura 67. Módulo de Young versus tamaño de partícula a diferentes concentraciones de aserrín

3.3.3. ESPECTROFOTOMETRÍA INFRARROJA

En la Figura 68 nuevamente se encuentra nuevamente el espectro realizado al polietileno reciclado cuyo espectro se encuentra en la Figura 69, se escogió una formulación con una cantidad considerable de aserrín y también tenga un espectro donde las bandas estén más definidas.

Tabla 13. Análisis de grupos funcionales del espectro infrarrojo realizado al material compuesto

Banda (cm^{-1})	Grupo funcional
3 540 - 3 200 1 205 - 885	Hidroxi y/o Amino
3 590 - 3150 1 747 - 1 535	Humedad

Aunque exista la presencia de bandas de humedad, existe un antecedente que no permite tener resultados claros y es el hecho de que la grana de material compuesto recibió un segundo tratamiento térmico, de prensado, para poder ser analizado a través de la técnica de espectroscopia infrarroja. A pesar de esto las bandas se hacen presentes en el material.

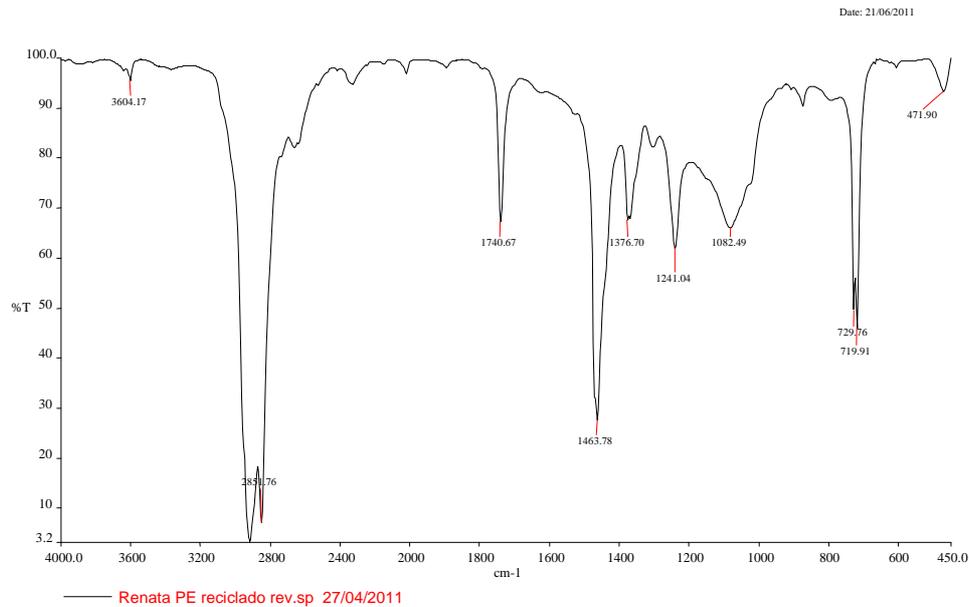


Figura 68. Espectro FTIR de polietileno reciclado

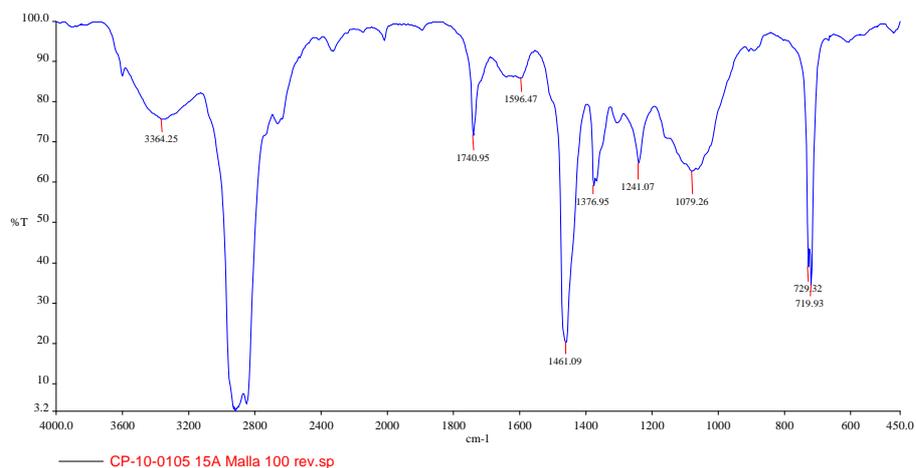


Figura 69. Espectro FTIR de material compuesto al 15% de aserrín malla 100

En comparación al primer espectro realizado, al polietileno reciclado sin ningún refuerzo, se observa que aparecen nuevas bandas respecto al material compuesto.

Dos bandas, ubicadas desde los 3 540 a los 3 200 cm^{-1} y desde los 1 205 a los 885 cm^{-1} , pertenecientes a los grupos hidroxilo y amino, característicos de la celulosa. A continuación la manifestación de bandas de los 3 590 a los 3 150 cm^{-1} y desde los 1 747 a los 1 535 cm^{-1} que provienen de la humedad contenida en el aserrín. Una vez más debido a la presencia de EVA no fue posible evaluar la degradación del material.

En la Figura 70 se encuentra la superposición de espectros para las formulaciones realizadas con 10% de aserrín a diferentes mallas.

Debido a que la espectroscopia infrarroja por transmitancia no es un método cuantitativo sino cualitativo no es posible hacer una relación entre las bandas obtenidas en los espectros y las composiciones. Al comparar espectros de una misma concentración y diferentes tamaños de malla, es importante tener mezclas distributivas y dispersivas, además el espesor de la muestra. Una muestra con diferente espesor, tendrá diferente intensidad en sus bandas.

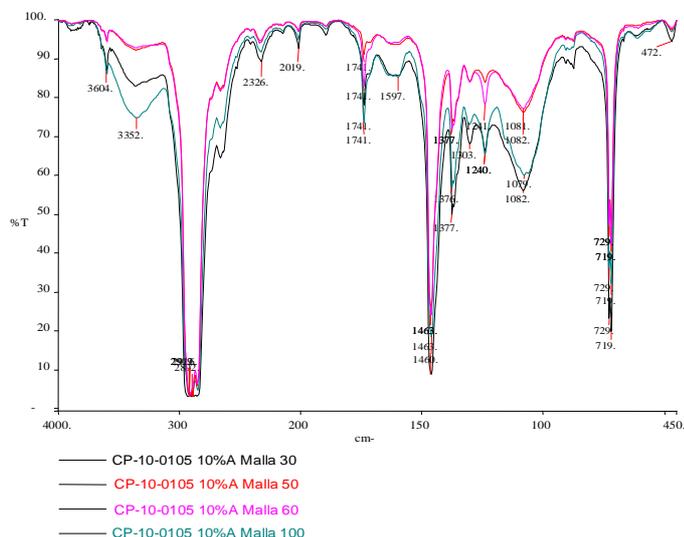


Figura 70. Superposición de espectros de formulaciones con realizadas con 10% de aserrín en Malla 30, 50, 60 y 100

En la Figura 71 se encuentran la superposición de espectros realizados con malla 60 y diferentes porcentajes de aserrín incorporado.

Cuando se comparan diferentes composiciones de aserrín, no es posible obtener resultados claros en las bandas, precisamente por la diferencia en la cantidad tanto de aserrín, como de polietileno. Cada banda tendrá su intensidad, que no representará necesariamente la cantidad de cada compuesto existente. Aunque todas las formulaciones contengan el porcentaje de aserrín, cada una tiene diferente tamaño de partícula y anteriormente mediante la microscopia óptica no todas las formulaciones tenían óptimas características dispersivas y distributivas, factores influyentes en la espectroscopia infrarroja por transmitancia.

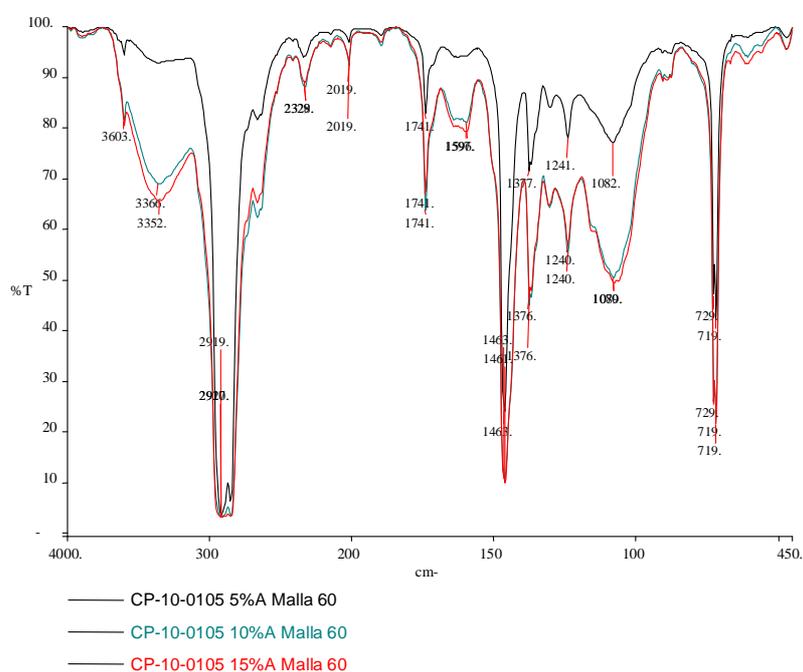


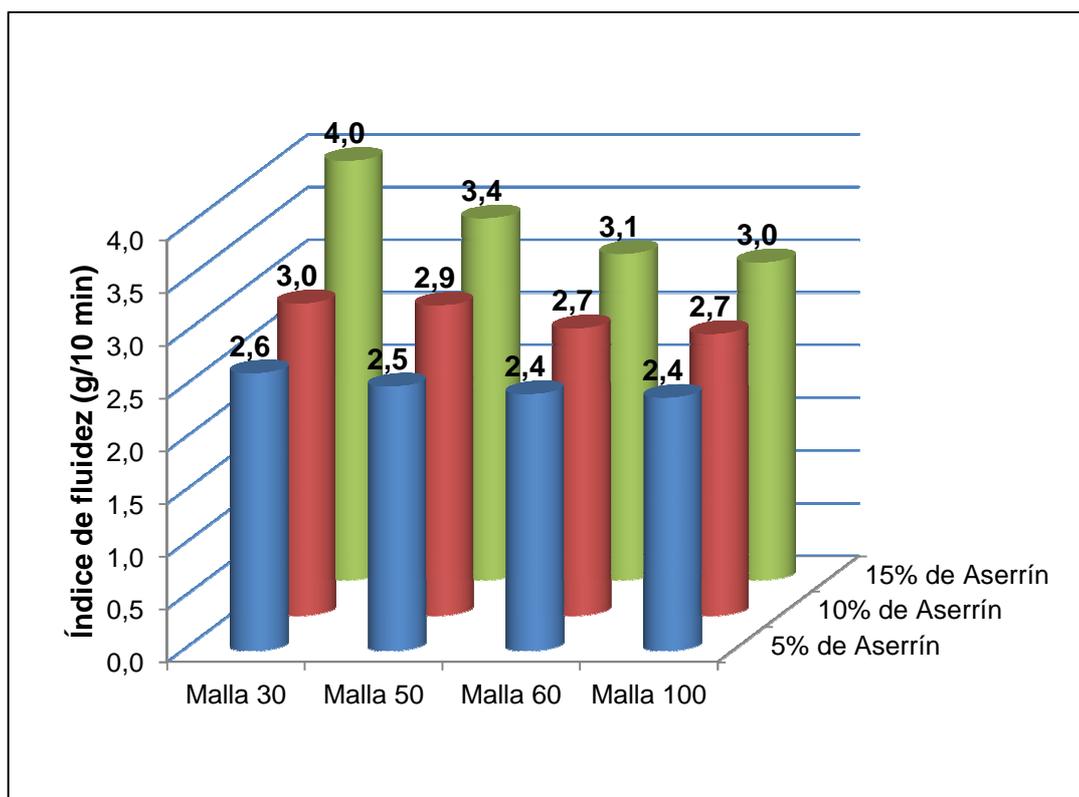
Figura 71. Superposición de espectros de formulaciones con realizadas con aserrín correspondiente a la Malla 60, al 5, 10 y 15 %

3.3.4. ÍNDICE DE FLUIDEZ

Por último se realizaron las pruebas del índice de fluidez para determinar a qué procesos se puede someter este tipo de material. Los resultados obtenidos se muestran en la Tabla 14. Para una mejor visualización del índice de fluidez de cada formulación la Figura 72 indica una comparación

Tabla 14. Índice de fluidez de las formulaciones de polietileno reciclado y aserrín

	15% de Aserrín			
	Malla 30	Malla 50	Malla 60	Malla 100
MFI medio (g/10 min)	3,976	3,431	3,093	3,013
Desviación Estándar	0,045	0,236	0,091	0,158
	10% de Aserrín			
	Malla 30	Malla 50	Malla 60	Malla 100
MFI medio (g/10 min)	2,959	2,939	2,722	2,670
Desviación Estándar	0,212	0,154	0,071	0,039
	5% de Aserrín			
	Malla 30	Malla 50	Malla 60	Malla 100
MFI medio (g/10 min)	2,632	2,506	2,434	2,400
Desviación Estándar	0,090	0,056	0,119	0,053

**Figura 72.** Índice de fluidez para todas las formulaciones de material compuesto

Como era de esperarse por las características de un material reciclado al que se le ha incorporado partículas las condiciones de ensayo se tuvieron que variar de

las convencionales establecidas por la norma ASTM D 1238 para polietilenos convencionales, por lo que las pruebas se realizaron a un nivel de carga mayor, esto es 10 kg, de esta manera se pudo mantener la temperatura en 190°C.

A medida que sube la cantidad de aserrín, se encuentran más dificultades de fluidez, esto se debe a que, en general, la incorporación de partículas o cargas determina dificultades de flujo para los termoplásticos.

Como es de esperarse, la influencia causada por el tamaño de partícula es mínima puesto que las variaciones máximas están en el orden del 1 g/10 min.

4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

4.1. CONCLUSIONES

1. Se obtuvo un material compuesto de polietileno reciclado y partículas lignocelulósicas, el cual se realizó a través de la extrusión doble husillo. Estos dos materiales pudieron combinarse sin la necesidad de tratamientos o aditivos, permitiendo que el análisis sea dirigido únicamente al aporte del refuerzo a la matriz.
2. El análisis por espectroscopia FTIR determinó que el plástico se trataba de un polietileno de baja densidad, considerando la similitud de la estructura química, entre el polietileno de baja densidad y el polietileno lineal de baja densidad, no fue posible diferenciar entre LDPE y LLDPE a través de este método. En la prueba de espectroscopia FTIR realizada a las hojuelas de polietileno reciclado se encontró, presencia del copolímero EVA. En la espectroscopia FTIR, no se puede realizar una cuantificación de las composiciones de los materiales, por este motivo a partir de este análisis solo se determinó que se trataba de un polietileno de baja densidad con presencia de EVA.
3. La presencia de EVA con una banda característica ubicada desde 1 760 hasta los 1 735 cm^{-1} interfirió con la determinación de índice de carbonilo para la evaluación de la degradación, debido a que para el cálculo del índice de carbonilo se utiliza los datos del área bajo la curva de absorbancia entre 1 650 y 1 800 cm^{-1} .
4. El método de calorimetría diferencia de barrido (DSC) confirmó que se trata de un polietileno de baja densidad ramificado, por tener el punto de fusión a los 112°C. Se determinó la presencia de polietileno lineal de baja densidad por la presencia en un hombro en el termograma a la temperatura

122°C, esta leve inflexión en la corrida realizada en el DSC indica que la presencia de LLDPE es menor a una concentración de 10% en peso.

5. Para las hojuelas de polietileno se obtuvo una densidad aparente de 208 kg/m³. Mientras que el valor de densidad real fue de 0,92 g/cm³, valor que cumple con los estándares de la densidad del LDPE. Esto quiere decir que el material en forma de hojuelas tuvo una densidad aparente que representa el 22,60% de su densidad real. Esta reducción causó un efecto de puenteo, que significó problemas al momento de la alimentación a través de la tolva al extrusor, lo que indica la necesidad de incluir alimentación forzada vertical, dentro de las tolvas, para vencer en efecto de puenteo proveniente de esta reducción de densidad.
6. A través de la separación por tamaños del material lignocelulósico, se encontró que el d80 del material fue de 690 µm, esto quiere decir que el 80% del material tiene igual o menor tamaño. Además indicó que tamaños de partícula se encontraban disponibles para el procesamiento de formulaciones
7. El perfil de temperaturas con el que se proceso el material fue: 100, 120, 140, 150, 160, 170 y 180°C, el mismo perfil se utilizo para todas las formulaciones, sin importar la cantidad de aserrín, donde la única formulación que presentó síntomas de degradación, por simple inspección visual, fue la formulación que contenía 30% de aserrín.
8. Las velocidades de alimentación y del doble husillo, fueron individuales para cada formulación, por el hecho de que cada uno tenía una diferente composición y que cada tamaño de partícula tuvo su densidad aparente. Sin embargo mediante estas pruebas se determinó que la velocidad de los motores de las tolvas de alimentación no podía ser menor a 1 Hz y la velocidad del motor del doble-husillo no podía superar los 40 Hz.

9. En las pruebas preliminares se pudo conocer las limitaciones que presentó el equipo de extrusión, tanto las limitaciones mecánicas donde se llegaba a velocidades límites fácilmente, como las limitaciones de diseño del equipo, un tren de enfriamiento que no permitió un procesos continuo, que obligaba al operador a estirar el tallarín de manera a lo largo de toda la etapa de procesamiento.
10. Para las mallas 30, 50 y 60 no fue posible incorporar más del 15% de aserrín debido a su falta de afinidad entre matriz y refuerzo, dando como resultado un material quebradizo u poco uniforme.
11. A partir de la microscopía óptica se observó que a menor tamaño de partícula mejora la distribución y dispersión del material. Existe un fenómeno de agrupamiento del material particulado que disminuye con la disminución del tamaño de particulado.
12. A través de la microscopía óptica se observó que el aserrín se quema de la formulación que contenía 30% de aserrín, fue posible ver lugares con oscurecimiento del material siendo la formulación con mayor grado de degradación, indicando que el perfil de temperaturas escogido es muy elevado para una formulación con tal porcentaje de aserrín.
13. Respecto a la deformación tanto a al pico, como a la ruptura se observan dos tendencias claras, la deformación disminuye al aumentar el tamaño de partícula y también lo hace al aumentar la cantidad de partículas lignocelulosicas. Esto lleva a concluir que el material particulado disminuye las propiedades de elongación que corresponden al polietileno reciclado, esta disminución se debe a la falta de afinidad entre la matriz y el refuerzo.
14. En la tensión o esfuerzo, para llegar al pico y la ruptura, se evidencia una tendencia a disminuir a medida que la cantidad de partículas incorporadas aumenta, cosa que no se reproduce en el sentido del tamaño de partículas

completamente. Cabe mencionar que los valores de esfuerzo no tienen mucha varianza, respecto unos de otros.

15. El módulo de Young presenta una tendencia a aumentar a medida que aumenta la cantidad de aserrín, sin embargo no existe la misma tendencia respecto al tamaño de partícula, quizá esta es la propiedad que menos responde al tamaño de partícula. Los resultados de esta propiedad indican que el material lignocelulósico aporta con dureza al material compuesto.
16. El índice de fluidez (MFI) indicó que existe una mayor influencia por parte del porcentaje de aserrín incorporado en contraposición al tamaño del aserrín. Sin embargo a medida que crece el tamaño de partícula empieza a aumentar su influencia en el índice de fluidez. El material compuesto no pudo dar resultados de MFI en condiciones normales, se tuvo que modificar estas condiciones para poder obtener resultados, debido a la alta resistencia a la fluidez por parte del material. Esto significa que se deben escoger formas de procesamiento donde el flujo de material no pase por puntos críticos de tamaño reducido, ya que sería una dificultad al proceso.
17. Se hace notar que tanto por las características de la matriz termoplástica, que en este caso se trata de un material reciclado por lo cual de forma inherente se tendrá una variabilidad de las propiedades; como por las dificultades de incorporar de manera homogénea el aserrín, los valores de las propiedades no se los puede considerar como representativos de cualquier muestra diferente a la estudiada, no obstante, son muy orientativos para disponer de una caracterización del mismo.

4.2. RECOMENDACIONES

1. Analizar la posibilidad de la utilización de aditivos para determinar las posibilidades de incorporar mayor cantidad de aserrín al material resultante. Ya que los aditivos son compatibilizantes que tienen una cabeza funcional polar afín con la partícula y una cola funcional no polar afín con el polímero. Mejorando la afinidad de los componentes y las propiedades de su interfase.
2. Estudiar tratamientos previos para las partículas, en función de mejorar su afinidad con el polímero. Ya que previos estudios sugieren que el refuerzo sea tratado para reducir la polaridad en su superficie, así adhiriéndose mejor a la matriz no polar.
3. El grado de humedad para el aserrín fue de 7,2410%, valor que se encuentra dentro de las sugerencias previamente establecidas, que indica que el porcentaje límite de humedad para ser procesado es del 10%. Mediante esta prueba se descartó la posibilidad de un previo proceso de secado para el material lignocelulósico. Para el aserrín se obtuvo un grado de humedad de 0,1457%, una vez más cumpliendo con las sugerencias de procesamiento que establecen que 1% es el límite de humedad permitida. Sin embargo para trabajos futuros se recomendaría analizar la influencia de la humedad en el material compuesto y estudiar la posibilidad de secar los materiales hasta llegar a los porcentajes más bajos de humedad para ser procesados.
4. Respecto a la compactación del material no se observó una relación, ni con el tamaño de partícula ni con la concentración de los componentes. Las burbujas se presentaron en la mayoría de composiciones y cuando estas lo hacían, siempre lo hacían rodeando a las partículas de aserrín. Para la reducción de burbujas, es importante tomar en cuenta las tres anteriores consideraciones, que ayudan a mejorar la interacción entre el refuerzo y la partícula, reduciendo espacios entre ambos componentes.

5. Crear adaptaciones al extrusor, con el fin de ofrecer alimentación forzada vertical, dentro de cada tolva, y disminuir el efecto de la densidad aparente y mejorar las ya existentes en el tren de enfriamiento.
6. Realizar pruebas complementarias de microscopia electrónica de barrido, ya que muchos estudios similares complementan con ese análisis para conocer la interacción de las partículas del refuerzo y la matriz. Ya que este método permite: la caracterización microestructural de materiales; identificación de transiciones de fases en diversos materiales tales como metales, cerámica, materiales compuestos, semiconductores, polímeros y minerales; composición de superficies y tamaño de grano y valoración del deterioro de materiales.
7. De acuerdo con las propiedades encontradas para este tipo de material, se recomienda utilizarlo en aplicaciones para perfiles gruesos ya que no se lo podría usar como un film, no solo debido a su fragilidad y falta de elasticidad, sino también porque con la presencia de aserrín no se podría formar una burbuja, que es el método usual para obtener film con polietileno. Sin embargo es posible aprovecharlo en aplicaciones el producto final sea un sólido de mayor espesor, ya que ofrece propiedades de dureza
8. Hay que tener en cuenta varios puntos para el análisis de espectroscopia FTIR, como posibles fuentes de error:
 - A medida que disminuye el número de onda, aumenta la penetración de la onda evanescente. Esto significa que la intensidad de las bandas está condicionada por la penetración de la onda y que no es la misma a través de la corrida.

- La influencia presente entre el contacto con el cristal del equipo y la superficie con la muestra, siendo una muestra irregular como este material compuesto, se dificulta aún más la tarea.
- El índice de refracción entre el cristal y la muestra, que está en función de la profundidad de penetración de la onda evanescente.
- Por estos motivos el análisis por el método FTIR se considera cualitativo, más no cuantitativo. Haciendo cualquier inferencia sobre la relación de la intensidad de la banda y la concentración de cada compuesto poco acertada. Tomando en cuenta un factor más que es el espesor de la lámina, siendo una variable muy difícil de controlar.
- Por último, vuelve el punto de las mezclas dispersivas y distributivas, donde se desconoce si la muestra a la cual se le realizó este análisis contenía las dos características mencionadas. En el caso de que no se cumpliera eso, el análisis no da un resultado representativo de la formulación analizada.

BIBLIOGRAFÍA

1. Araújo, J., Mano, B. y De Poli, M., 2009, "Fractura y Morfología de Compuestos de Polipropileno Reforzado con Fibra de Curauá", *Anales de Mecánica de la Fractura*, 26, 1, p.1.
2. ASTM D 1895 – 96, 1996, "Standard Test Methods for Apparent Density, Bulk Factor, and Pourability of Plastic Materials".
3. ASTM D 3418 – 08, 2008, "Standard Test Method for Transition Temperatures and Enthalpies of Fusion and Crystallization of Polymers by Differential Scanning Calorimetry".
4. ASTM D 5576 – 00, 2000, "Standard Practice for Determination of Structural Features in Polyolefins and Polyolefin Copolymers by Infrared Spectrophotometry (FTIR)".
5. ASTM D 792-08, 2008, "Standard Test Methods for Density and Specific Gravity (Relative Density) of Plastics by Displacement".
6. ASTM D 882-10, 2010, "Standard Test Method for Tensile Properties of Thin Plastic Sheeting".
7. ASTM D1238-10, 2010, "Standard Test Method for Melt Flow Rates of Thermoplastics by Extrusion Plastometer".
8. ASTM E 11-09e1, 2009, "Standard Specification for Wire Cloth and Sieves for Testing Purposes".
9. Banco Central del Ecuador, 2005, "Análisis sobre el cultivo de flores (III Censo Nacional Agropecuario)", http://www.sica.gov.ec/censo/contenido/analisis_flores.pdf, (Julio, 2009).

10. Béguin J., 2002, “Los materiales compuestos dinamismo e innovación”, Le 4 Pages des statistiques industrielles, 158 (1), 1. <http://www.insee.fr/esssi/4pages/pdf/4p158espagnol.pdf>
11. Beltrán, M. y Marcilla, A., 2009, “Tecnología de polímeros”, <http://iq.ua.es/TPO/Tema3.pdf>, (Mayo, 2011).
12. Callister, W.D., 2002, “Introducción a la ciencia e Ingeniería de los Materiales”, Editorial Reverté, S.A., Barcelona, España, pp 35 - 40.
13. Cazar A., 2010, “Evaluación del grado de deterioro y el nivel de contaminación de los residuos plásticos de cubiertas de invernaderos provenientes de las florícolas del Distrito Metropolitano de Quito”, Proyecto previo a la obtención de título de Ingeniería Química, Escuela Politécnica Nacional (EPN), Quito – Ecuador, p. 2.
14. Chalaye, H., 2002, “Los Materiales Compuestos. Dinamismo e Innovación”, Le 4 Pages des Statistiques Industrielles, 158, (1), 1.
15. Coutinho, M.B., Mello, I.L. y De Santa Maria, L.C. 2003, “Polietileno: Principales Tipos, Propiedades y Aplicaciones”, Polimeros: Ciencia e Tecnología, 13, (1), 1.
16. Enríquez, F., 2005, “La Dinámica Industrial y Productiva de Quito”. Proyecto Parques Industriales de Quito y la Región. http://www.hugocarrion.com/index_archivos/Docs/dinamica%20industrial.pdf, (Mayo, 2011).
17. FIDA, 2005, “Polietileno de baja densidad (PEBD)”, <http://www.fida.es:8001/fida/VisNot?id=4d3936aa77926c1f53eca49f2a769e41>, (Mayo, 2011)

18. Gañán, P. y Mondragón, I., 2003, "Surface modification of fique fibers. Effect on their physico-mechanical properties", *Polym. Comp.*, 23 (3), 383.
19. Gilbert, R. D., 1994, "Cellulosic Polymers, Blends and Composites", Hanser Publishers, Ohio, Cincinnati, Estados Unidos, pp 120 - 125.
20. Goodship, V., 2007, "Introduction to Plastics Recycling", segunda edición, Smithers Rapra, Shrewsbury, Reino Unido, pp. 54-55, 63-70, 112-119.
21. Groover, M., 1997, *Fundamentos de manufactura moderna: materiales, procesos y sistemas*, Pearson Educación, Madrid, España, p. 386.
22. Guillén, J. y Garrido J., 1987, "Algodón y Celulosa: Estructura y propiedades", <http://repositorium.sdum.uminho.pt/handle/1822/6713>, (Mayo, 2011).
23. Harper, C., 1996, "Handbook of Plastics, Elastomers and Composites", 3ra. edición, Mc Graw-Hill, Estados Unidos, pp 12- 16.
24. Harper, C., 2000, "Modern Plastics Handbook", McGraw-Hill Professional Publishing, Blacklick, Estados Unidos de América, pp. 250-255, 322-337.
25. Hensen, F., 1997, "Plastics Extrusion technology", segunda edición, Hanser Publishers, Munich, Alemania, pp. 584-625.
26. Maldonado, H., *Procesos de Fabricación: Moldeo por Compresión y Soplado*, <http://hugomaldo.blogspot.com/2011/06/moldeo-porcompresion.html>, (Mayo, 2011).
27. Mallick, P. y Newman S., 1990, "Composite Materials Technology, Processes and Properties" Hanser Publishers, Nueva York., Estados Unidos, pp 80 - 85.

28. Miravete, A. y Castejón, L., 2002, "Materiales Compuestos", Revistes Catalanes amb Accés Obert, 1 (20), 1.
29. Montalvo, L., 2009, Plásticos industriales y su procesamiento, <http://www.monografias.com/trabajos32/procesamiento-plasticos/procesamiento-plasticos.shtml>, (Mayo, 2011).
30. Morton, J., 2003, "Procesamiento de plásticos", Editorial Limusa, México, México, pp. 45, 95-105.
31. Naranjo, A., Noriega, M., Osswald, T., Rojan, A. y Sierra, J., "Plastics Testing and Characterization Industrial Applications", Hanser, Cincinnati, Estados Unidos, 2008, pp 102 - 103.
32. Noriega, M., 2008, "Plastificación con Doble Husillo: Posibilidades para los Procesos de Extrusión e Inyección", http://www.colombiaplast.com/2008/memorias/ExtrusionDoble_Husillo_MPN.pdf, (Mayo, 2011).
33. Osswald, T., Baur, E., Brinkmann, S., Oberbach, K. y Schmachtenberg, E., 2006, "International Plastics Handbook", cuarta edición, Hanser Publishers, Munich, Alemania, pp. 290, 294-297.
34. Paris, F., Cañas, J. y Marin, J.C., 2006, "Introducción al análisis y diseño con materiales compuestos", www.esiold.us.es/php/infgen/aulav/mecmat.com/MaterialesCompuestos.pdf, (Mayo, 2011).
35. Peirano, M. y Pereira, E., 2008, "Polietileno", https://www.ucursos.cl/ingenieria/2008/2/EL57C/1/material_docente/bajar?id_material=197219, (Mayo, 2011).
36. Polinter Venezuela, 2009, Consideraciones básicas del proceso de mezclado, http://www.polinter.com.ve/publicaciones/boletines/consideraciones_basicas_del_proceso_de_mezclado.pdf

37. Rosato, D. V., 1997, "Designing with Reinforced Composites, Technology-Performance-Economics", Hanser Publishers, Ohio, Cincinnati, Estados Unidos, pp 12, 23, 56.
38. Santiago, D., Lombera, G., Urquiza, S. y Moschiar, S.M., 2003, "Modelado numérico del proceso de pultrusión en materiales compuestos", Materials Research, 6 (4) 1.
39. Schwartz, M., 1992, "Composite materials Handbook", 2da edición, Editorial Mc Graw-hill, Estados Unidos, p 35.
40. Stokke, D. y Gardner, D., 2003 "Fundamental aspects of wood as a component of thermoplastics", Journal of Viny and Additive Technology, 9, (2), 96.
41. Taípe, J., 2008, "Estudio del comportamiento térmico de polietilenos por calorimetría diferencial de barrido", Proyecto de titulación previo a la obtención del título de Ingeniero Químico, EPN, Quito, Ecuador, pp. 108-109.
42. United States Department of Agriculture, 2010, "Woods Handbook", Forest Service, Forest Products Laboratory, General Report FPL-GTR-190, Madison, Wisconsin, Estados Unidos, pp 523 - 534.
43. Vallejos, 2006, "Aprovechamiento integral del cannabis sativa como material de refuerzo/carga del polipropileno", Proyecto previo a la obtención del título de Ingeniero Químico, Universitat de Girona, pp 20.
44. Vignote, S., 2006, Tecnología de la madera, Ediciones Mundi-Prensa, Barcelona, España, pp.218-239.

45. Young, R., 1997, "Utilization of Natural Fibers: Characterization, Modification and Applications", en Carvalho Francisco, "Lingocellulosic-Plastics Composites, UNESP, Sao Paulo, Brasil, p. 2.

ANEXOS

ANEXO I: Proceso de acondicionamiento para la obtención de
hojuelas de polietileno.

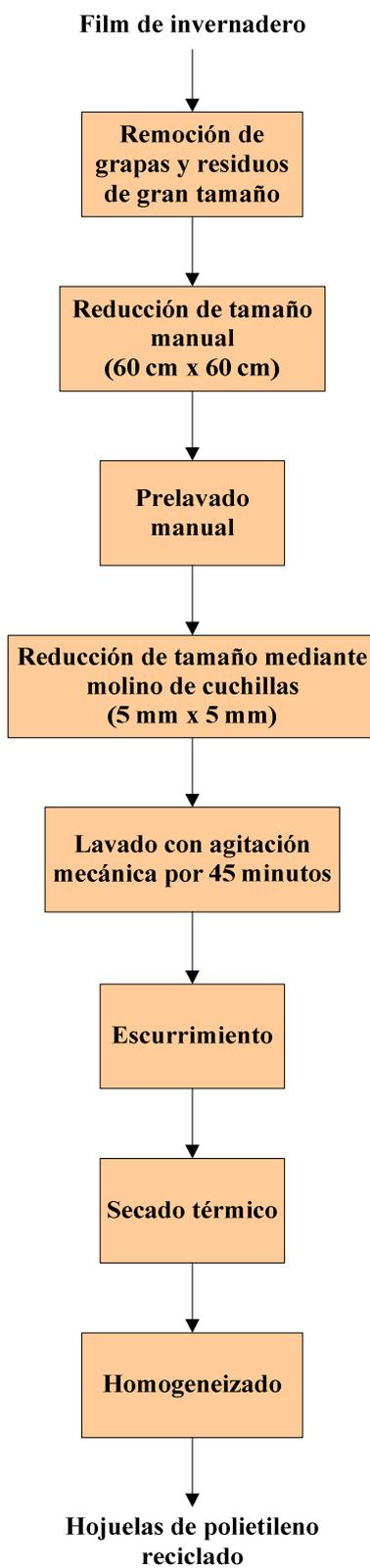


Figura 73. Proceso de acondicionamiento del plástico de invernadero, previo a su procesamiento

ANEXO II: Ejemplo de cálculo de los husillos de alimentación de la extrusora

Datos:

1) Alimentación primaria: Hojuelas de polietileno reciclado

Tabla 15. Datos de alimentación del polietileno reciclado

Polietileno Reciclado		
Tiempo [s]	Peso [g]	Flujo másico [g/s]
30,02	12,61	0,420
30,21	12,75	0,425
30,03	11,80	0,393
	Promedio	0,413
Velocidad del Husillo de Alimentación [Hz]		
	10	

2) Alimentación secundaria: Aserrín malla 30

Tabla 16. Datos de alimentación del aserrín malla 30

Aserrín malla 30		
Tiempo [s]	Peso [g]	Flujo másico [g/s]
33,40	10,39	0,311
30,65	9,35	0,305
31,22	8,97	0,287
	Promedio	0,301
Velocidad del Husillo de Alimentación [Hz]		
	5	

Para una alimentación de 95% de polietileno reciclado y 5% de aserrín, se establece una velocidad para la alimentación primaria, a partir de esta velocidad se obtiene el flujo másico de hojuelas de polietileno alimentadas.

$$35 \text{ Hz} \times \frac{0,413 \frac{\text{g}}{\text{s}}}{10 \text{ Hz}} = 1,455 \frac{\text{g}}{\text{s}}$$

Una vez que se conoce el flujo másico del polietileno reciclado, con la relación de porcentajes se obtiene el flujo másico del aserrín.

$$5\% \times \frac{1,445 \frac{\text{g}}{\text{s}}}{95\%} = 0,076 \frac{\text{g}}{\text{s}}$$

Con el flujo másico del aserrín es posible conocer la velocidad de alimentación del husillo secundario.

$$0,076 \frac{\text{g}}{\text{s}} \times \frac{5 \text{ Hz}}{0,301 \frac{\text{g}}{\text{s}}} = 1,263 \text{ Hz}$$

ANEXO III: Espectros FTIR de las diferentes formulaciones de material compuesto

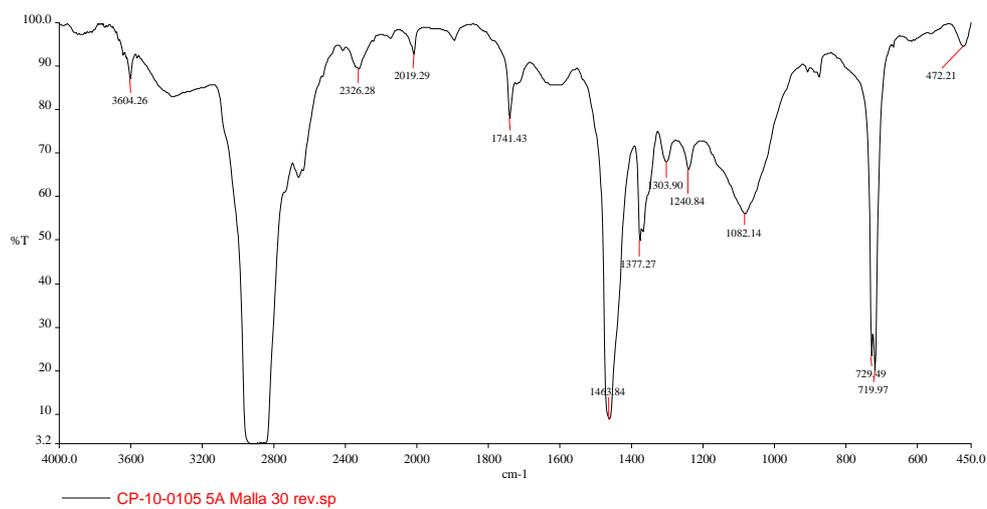


Figura 74. Espectro FTIR de material compuesto al 5% de aserrín Malla 30

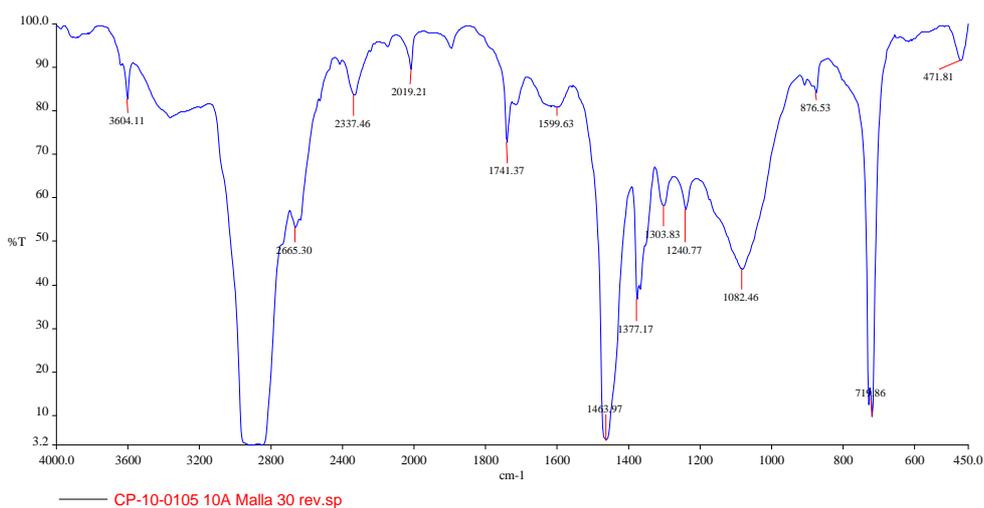


Figura 75. Espectro FTIR de material compuesto al 10% de aserrín Malla 30

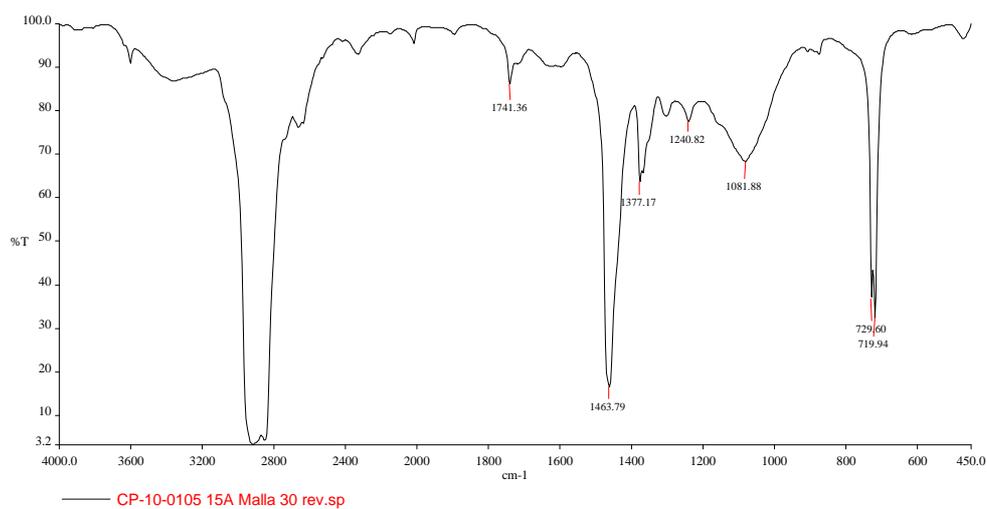


Figura 76. Espectro FTIR de material compuesto al 15% de aserrín Malla 30

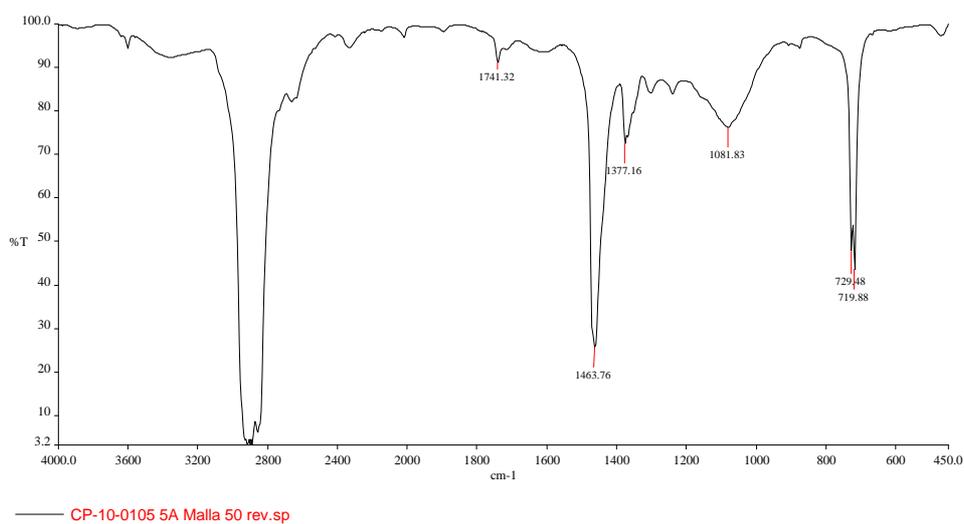


Figura 77. Espectro FTIR de material compuesto al 5% de aserrín Malla 50

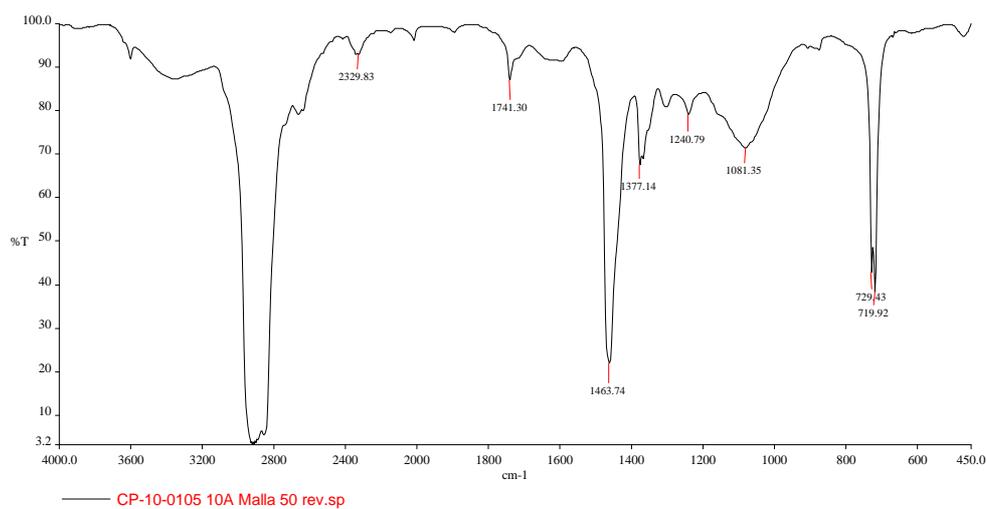


Figura 78. Espectro FTIR de material compuesto al 10% de aserrín Malla 50

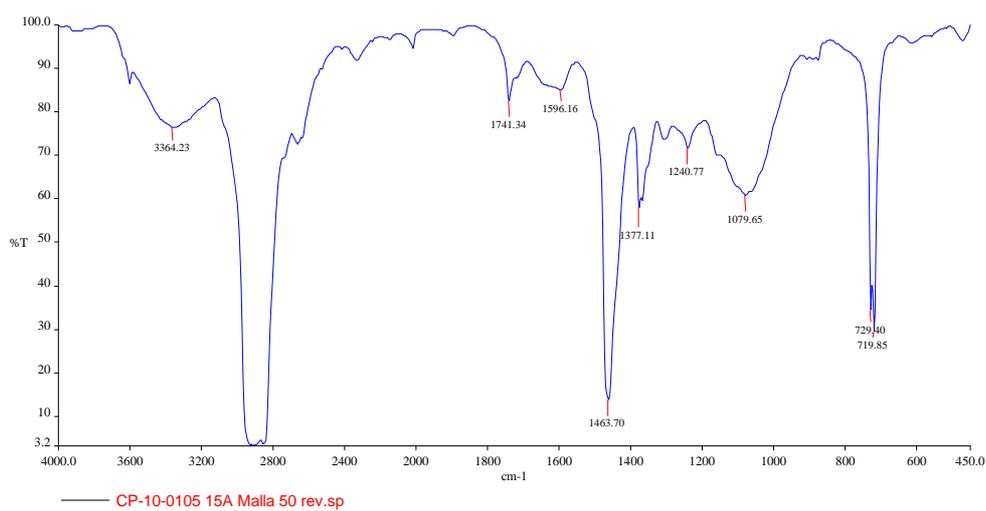


Figura 79. Espectro FTIR de material compuesto al 15% de aserrín Malla 50

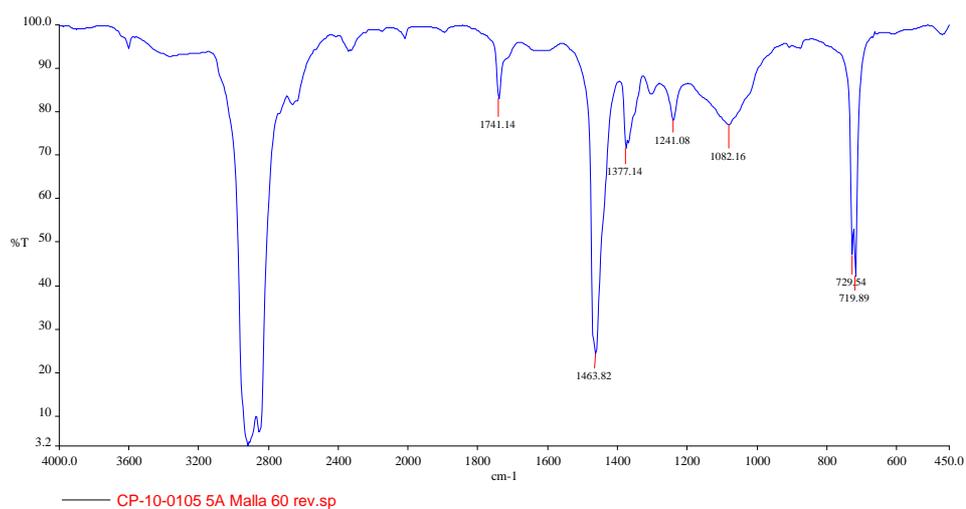


Figura 80. Espectro FTIR de material compuesto al 5% de aserrín Malla 60

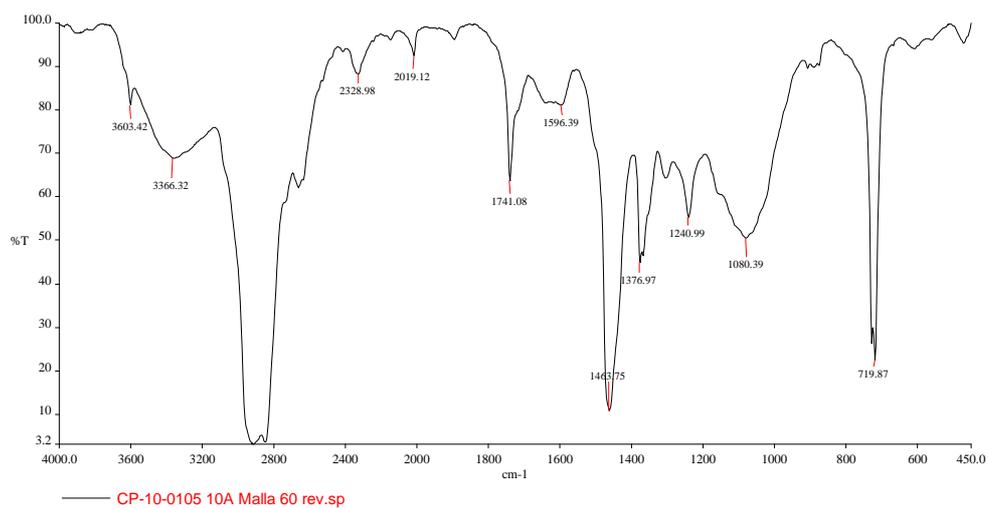


Figura 81. Espectro FTIR de material compuesto al 10% de aserrín Malla 60

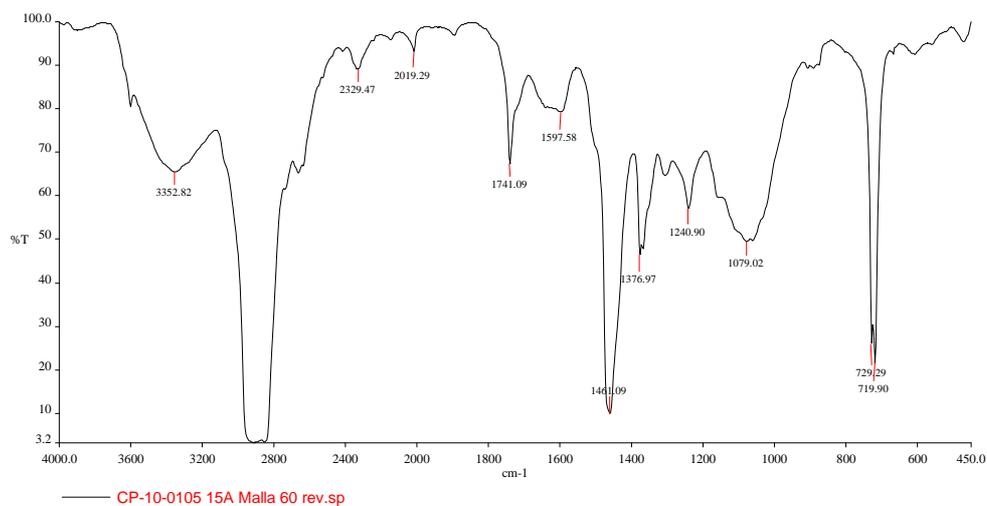


Figura 82. Espectro FTIR de material compuesto al 15% de aserrín Malla 60

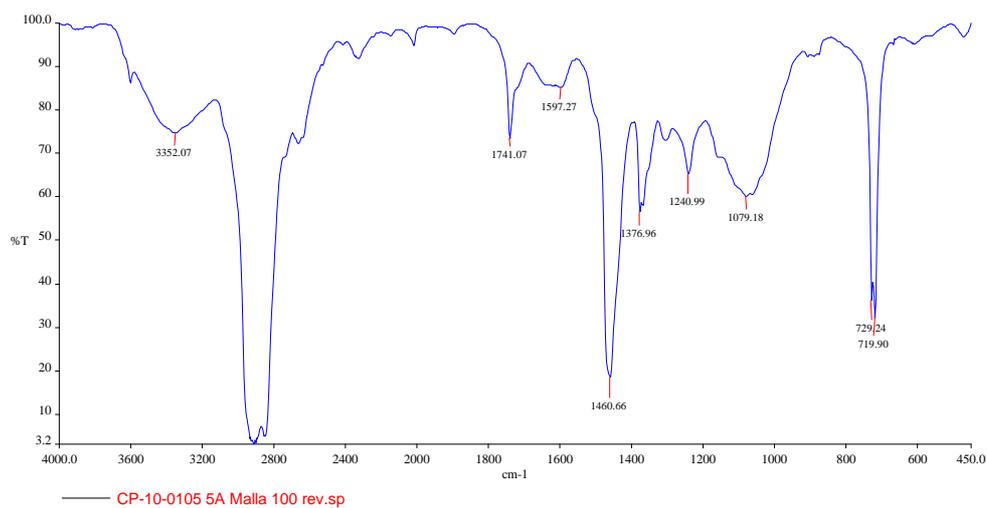


Figura 83. Espectro FTIR de material compuesto al 5% de aserrín Malla 100

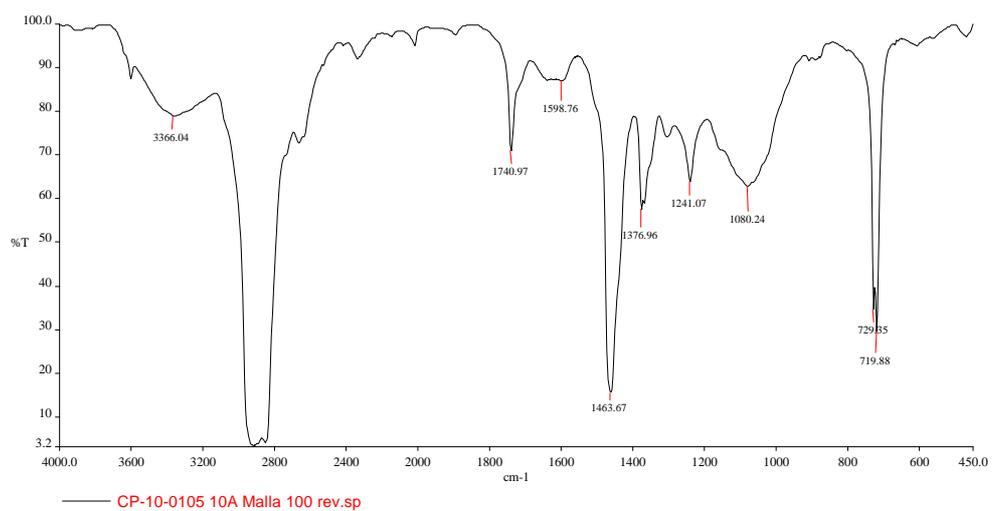


Figura 84. Espectro FTIR de material compuesto al 10% de aserrín Malla 100

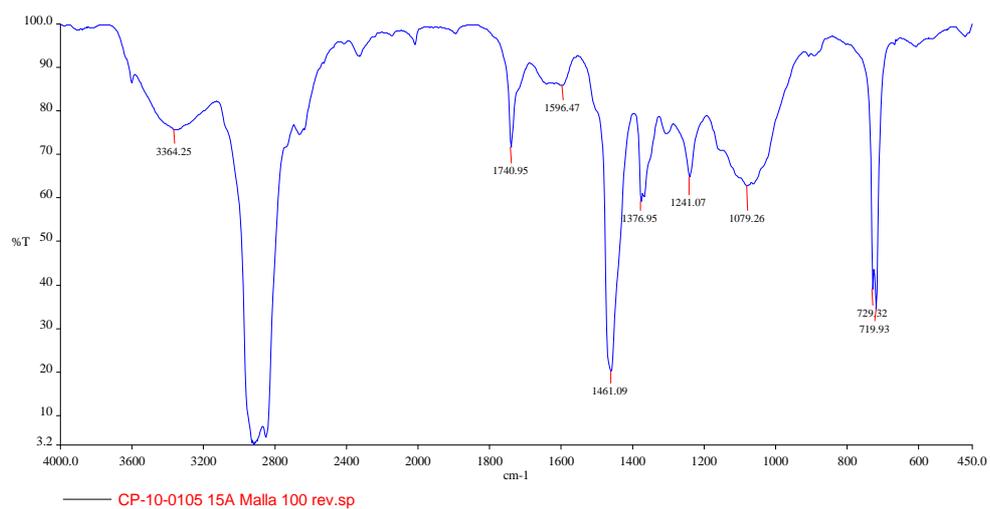


Figura 85. Espectro FTIR de material compuesto al 15% de aserrín Malla 100

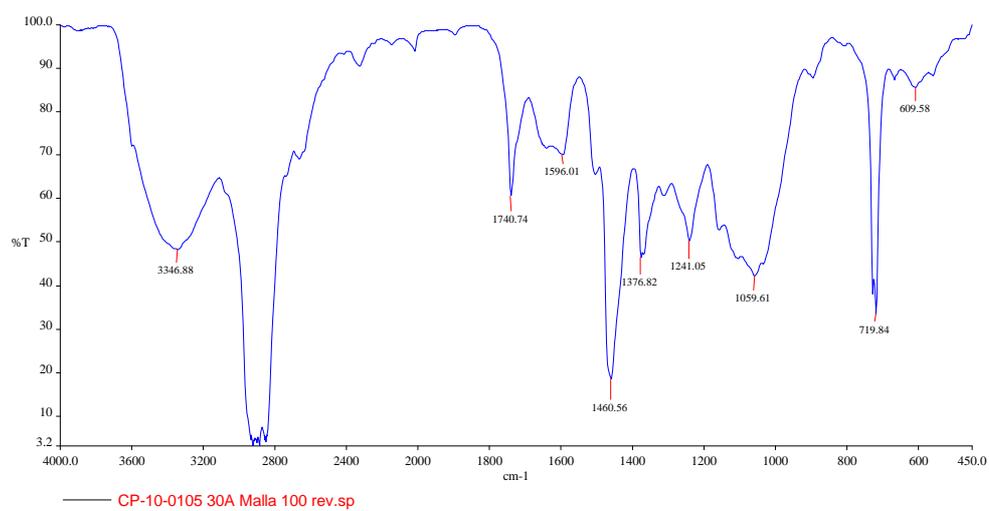


Figura 86. Espectro FTIR de material compuesto al 30% de aserrín Malla 100

ANEXO IV: Determinación del índice de fluidez de las formulaciones de material compuesto

Tabla 17. Determinación del índice de fluidez de material compuesto al 5% de aserrín malla 30

Muestra:	5% As Malla 30	Carga:	10 kg	MVR med:	3,42	
		Temperatura:	190 °C	Desviación:	0,096	
Porción	t	Desplazamiento	Peso	MVRe	d	MFI
Nº	[s]	[mm]	[g]	[cm3/10min]	[g/cm3]	g/10min]
1	15,64	1,248	0,0668	3,404	0,747	2,543
2	16,91	1,305	0,0722	3,294	0,772	2,544
3	14,93	1,244	0,0673	3,556	0,755	2,685
4	16,36	1,301	0,0756	3,395	0,811	2,754
5	15,30	1,239	0,0695	3,457	0,783	2,707
MFI med:					2,632	
Des Est:					0,090	

Tabla 18. Determinación del índice de fluidez de material compuesto al 10% de aserrín malla 30

Muestra:	10% As Malla 30	Carga:	10 kg	MVR med:	3,81	
		Temperatura:	190 °C	Desviación:	0,114	
Porción	t	Desplazamiento	Peso	MVRe	d	MFI
Nº	[s]	[mm]	[g]	[cm3/10min]	[g/cm3]	g/10min]
1	13,60	1,248	0,0648	3,915	0,725	2,838
2	15,17	1,305	0,0784	3,673	0,839	3,080
3	13,88	1,244	0,0633	3,826	0,710	2,718
4	14,10	1,301	0,0758	3,937	0,813	3,202
5	14,16	1,239	0,0688	3,735	0,775	2,895
MFI med:					2,959	
Des Est:					0,212	

Tabla 19. Determinación del índice de fluidez de material compuesto al 15% de aserrín malla 30

Muestra:	15% As Malla 30	Carga:	10 kg	MVR med:	5,21	
		Temperatura:	190 °C	Desviación:	0,101	
Porción	t	Desplazamiento	Peso	MVRe	d	MFI
N°	[s]	[mm]	[g]	[cm3/10min]	[g/cm3]	g/10min]
1	10,51	1,248	0,0673	5,066	0,753	3,814
2	10,44	1,305	0,0698	5,335	0,747	3,983
3	10,26	1,244	0,0703	5,174	0,789	4,082
4	10,57	1,301	0,0714	5,253	0,766	4,024
5	10,08	1,239	0,0675	5,248	0,761	3,991
MFI med:						3,976
Des Est:						0,045

Tabla 20. Determinación del índice de fluidez de material compuesto al 5% de aserrín malla 50

Muestra:	5% As Malla 50	Carga:	10 kg	MVR med:	3,14	
		Temperatura:	190 °C	Desviación:	0,058	
Porción	t	Desplazamiento	Peso	MVRe	d	MFI
N°	[s]	[mm]	[g]	[cm3/10min]	[g/cm3]	g/10min]
1	16,73	1,248	0,0705	3,183	0,789	2,510
2	18,02	1,305	0,0761	3,091	0,814	2,516
3	17,23	1,244	0,0708	3,081	0,794	2,448
4	17,55	1,301	0,0751	3,163	0,806	2,549
5	16,46	1,239	0,0712	3,214	0,802	2,578
MFI med:						2,506
Des Est:						0,056

Tabla 21. Determinación del índice de fluidez de material compuesto al 10% de aserrín malla 50

Muestra:	10% As Malla 50	Carga:	10 kg	MVR med:	3,81	
		Temperatura:	190 °C	Desviación:	0,098	
Porción	t	Desplazamiento	Peso	MVRe	d	MFI
N°	[s]	[mm]	[g]	[cm3/10min]	[g/cm3]	g/10min]
1	13,62	1,248	0,0742	3,910	0,830	3,245
2	15,15	1,305	0,0722	3,678	0,772	2,841
3	14,13	1,244	0,0651	3,757	0,731	2,745
4	14,37	1,301	0,0706	3,863	0,758	2,926
5	13,62	1,239	0,0710	3,884	0,800	3,107
					MFI med:	2,939
					Des Est:	0,154

Tabla 22. Determinación del índice de fluidez de material compuesto al 15% de aserrín malla 50

Muestra:	15% As Malla 50	Carga:	10 kg	MVR med:	4,44	
		Temperatura:	190 °C	Desviación:	0,173	
Porción	t	Desplazamiento	Peso	MVRe	d	MFI
N°	[s]	[mm]	[g]	[cm3/10min]	[g/cm3]	g/10min]
1	10,20	1,248	0,0650	4,282	0,727	3,113
2	10,23	1,305	0,0708	4,567	0,757	3,459
3	10,72	1,244	0,0694	4,357	0,779	3,393
4	10,12	1,301	0,0748	4,683	0,803	3,759
5	10,47	1,239	0,0654	4,326	0,737	3,188
					MFI med:	3,431
					Des Est:	0,236

Tabla 23. Determinación del índice de fluidez de material compuesto al 5% de aserrín malla 60

Muestra:	5% As Malla 60	Carga:	10 kg	MVR med:	3,08	
		Temperatura:	190 °C	Desviación:	0,109	
Porción	t	Desplazamiento	Peso	MVRe	d	MFI
N°	[s]	[mm]	[g]	[cm3/10min]	[g/cm3]	g/10min]
1	18,00	1,248	0,0691	2,958	0,773	2,286
2	18,02	1,305	0,0729	3,091	0,780	2,410
3	16,29	1,244	0,0692	3,259	0,777	2,531
4	18,16	1,301	0,0764	3,058	0,820	2,507
5	17,29	1,239	0,0658	3,059	0,741	2,268
					MFI med:	2,434
					Des Est:	0,119

Tabla 24. Determinación del índice de fluidez de material compuesto al 10% de aserrín malla 60

Muestra:	10% As Malla 60	Carga:	10 kg	MVR med:	3,67	
		Temperatura:	190 °C	Desviación:	0,15	
Porción	t	Desplazamiento	Peso	MVRe	d	MFI
N°	[s]	[mm]	[g]	[cm3/10min]	[g/cm3]	g/10min]
1	15,31	1,248	0,0652	3,479	0,729	2,537
2	14,42	1,305	0,0672	3,863	0,719	2,777
3	14,73	1,244	0,0669	3,603	0,751	2,705
4	14,72	1,301	0,0709	3,772	0,761	2,870
5	14,55	1,239	0,0691	3,635	0,779	2,830
					MFI med:	2,722
					Des Est:	0,071

Tabla 25. Determinación del índice de fluidez de material compuesto al 15% de aserrín malla 60

Muestra:	15% As Malla 60	Carga:	10 kg	MVR med:	4,06	
		Temperatura:	190 °C	Desviación:	0,099	
Porción	t	Desplazamiento	Peso	MVRe	d	MFI
N°	[s]	[mm]	[g]	[cm3/10min]	[g/cm3]	g/10min]
1	12,65	1,248	0,0662	3,934	0,740	2,913
2	12,46	1,305	0,0704	4,028	0,753	3,033
3	12,78	1,244	0,0712	4,034	0,799	3,223
4	12,38	1,301	0,0728	4,102	0,781	3,204
5	12,54	1,239	0,0680	4,201	0,766	3,219
					MFI med:	3,093
					Des Est:	0,091

Tabla 26. Determinación del índice de fluidez de material compuesto al 5% de aserrín malla 100

Muestra:	5% As Malla 100	Carga:	10 kg	MVR med:	3,21	
		Temperatura:	190 °C	Desviación:	0,171	
Porción	t	Desplazamiento	Peso	MVRe	d	MFI
N°	[s]	[mm]	[g]	[cm3/10min]	[g/cm3]	g/10min]
1	17,47	1,248	0,0630	3,048	0,705	2,148
2	17,03	1,305	0,0702	3,272	0,751	2,457
3	16,82	1,244	0,0691	3,157	0,775	2,448
4	17,85	1,301	0,0763	3,111	0,819	2,547
5	15,19	1,239	0,0648	3,482	0,730	2,542
					MFI med:	2,400
					Des Est:	0,053

Tabla 27. Determinación del índice de fluidez de material compuesto al 10% de aserrín malla 100

Muestra:	10% As Malla 100	Carga:	10 kg	MVR med:	3,41	
		Temperatura:	190 °C	Desviación:	0,146	
Porción	t	Desplazamiento	Peso	MVRe	d	MFI
N°	[s]	[mm]	[g]	[cm³/10min]	[g/cm³]	g/10min]
1	14,34	1,248	0,0710	3,592	0,794	2,853
2	14,99	1,305	0,0716	3,365	0,766	2,577
3	14,89	1,244	0,0684	3,403	0,768	2,612
4	14,75	1,301	0,0701	3,505	0,752	2,636
5	14,23	1,239	0,0705	3,206	0,794	2,547
MFI med:						2,670
Des Est:						0,039

Tabla 28. Determinación del índice de fluidez de material compuesto al 15% de aserrín malla 100

Muestra:	15% As Malla 100	Carga:	10 kg	MVR med:	3,91	
		Temperatura:	190 °C	Desviación:	0,135	
Porción	t	Desplazamiento	Peso	MVRe	d	MFI
N°	[s]	[mm]	[g]	[cm³/10min]	[g/cm³]	g/10min]
1	13,99	1,248	0,0714	3,805	0,799	3,039
2	14,47	1,305	0,0723	3,851	0,773	2,978
3	13,96	1,244	0,0696	3,803	0,781	2,970
4	13,86	1,301	0,0713	4,005	0,765	3,064
5	12,88	1,239	0,0715	4,106	0,806	3,308
MFI med:						3,013
Des Est:						0,158

ANEXO V: Propiedades mecánicas de las formulaciones de material compuesto

Tabla 29. Propiedades mecánicas de la cinta proveniente de la formulación de 5% de aserrín malla 30 y 95% de polietileno reciclado

5% de Aserrín Malla 30 - 95% de Polietileno Reciclado						
No. De Probeta	Espesor [mm]	Deformación al pico (%)	Esfuerzo al pico (MPa)	Deformación a la ruptura (%)	Esfuerzo a la ruptura (MPa)	Módulo de Young (MPa)
1	0,899	26,23	10,05	58,29	9,86	139,3
2	0,873	23,72	10,85	51,57	10,48	135,6
3	0,769	20,50	11,81	52,57	11,56	137,8
4	0,808	23,60	11,61	57,62	11,15	144,8
5	0,969	23,01	9,64	49,00	9,01	128,9
Promedio		23,41	10,79	53,81	10,41	137,3
Desviación estándar		2,04	0,95	4,01	1,02	5,8

Tabla 30. Propiedades mecánicas de la cinta proveniente de la formulación de 10% de aserrín malla 30 y 90% de polietileno reciclado

10% de Aserrín Malla 30 - 90% de Polietileno Reciclado						
No. De Probeta	Espesor [mm]	Deformación al pico (%)	Esfuerzo al pico (MPa)	Deformación a la ruptura (%)	Esfuerzo a la ruptura (MPa)	Módulo de Young (MPa)
1	0,920	18,36	10,37	36,00	10,30	126,6
2	0,912	22,89	9,74	37,00	9,28	140,7
3	0,895	25,98	10,22	36,66	10,01	131,3
4	0,878	20,60	10,31	35,62	10,15	135,7
5	0,935	13,96	10,83	34,70	10,65	160,9
Promedio		20,36	10,29	36,00	10,08	139,0
Desviación estándar		4,56	0,39	0,90	0,51	13,3

Tabla 31. Propiedades mecánicas de la cinta proveniente de la formulación de 15% de aserrín malla 30 y 85% de polietileno reciclado

15% de Aserrín Malla 30 - 85% de Polietileno Reciclado						
No. De Probeta	Espesor [mm]	Deformación al pico (%)	Esfuerzo al pico (MPa)	Deformación a la ruptura (%)	Esfuerzo a la ruptura (MPa)	Módulo de Young (MPa)
1	0,803	13,36	9,78	18,00	7,37	180,9
2	0,901	13,36	10,26	21,00	9,83	163,0
3	0,834	13,60	10,43	21,29	8,21	179,7
4	0,791	13,48	10,20	22,29	9,79	182,0
5	0,800	13,60	9,94	22,43	9,55	185,5
Promedio		13,48	10,12	21,00	8,95	178,2
Desviación estándar		0,12	0,26	1,79	1,10	8,8

Tabla 32. Propiedades mecánicas de la cinta proveniente de la formulación de 5% de aserrín malla 50 y 95% de polietileno reciclado

5% de Aserrín Malla 50 - 95% de Polietileno Reciclado						
No. De Probeta	Espesor [mm]	Deformación al pico (%)	Esfuerzo al pico (MPa)	Deformación a la ruptura (%)	Esfuerzo a la ruptura (MPa)	Módulo de Young (MPa)
1	1,126	40,04	10,20	55,86	10,29	132,4
2	1,126	42,08	9,70	55,29	9,78	134,2
3	1,128	40,16	9,48	58,00	10,70	133,7
4	1,025	45,39	10,42	58,71	10,01	124,5
5	1,026	49,48	10,76	56,86	9,79	134,4
Promedio		43,43	10,11	56,94	10,11	131,8
Desviación estándar		4,01	0,52	1,43	0,39	4,2

Tabla 33. Propiedades mecánicas de la cinta proveniente de la formulación de 10% de aserrín malla 50 y 90% de polietileno reciclado

10% de Aserrín Malla 50 - 90% de Polietileno Reciclado						
No. De Probeta	Espesor [mm]	Deformación al pico (%)	Esfuerzo al pico (MPa)	Deformación a la ruptura (%)	Esfuerzo a la ruptura (MPa)	Módulo de Young (MPa)
1	0,872	27,80	10,81	39,57	10,02	129,3
2	0,907	31,08	9,65	38,57	8,99	138,4
3	0,894	30,30	10,67	45,71	9,06	140,9
4	0,873	30,39	10,01	39,71	10,05	130,0
5	0,878	30,61	9,41	37,29	9,70	139,4
Promedio		30,04	10,11	40,17	9,56	135,6
Desviación estándar		1,29	0,62	3,24	0,51	5,5

Tabla 34. Propiedades mecánicas de la cinta proveniente de la formulación de 15% de aserrín malla 50 y 85% de polietileno reciclado

15% de Aserrín Malla 50 - 85% de Polietileno Reciclado						
No. De Probeta	Espesor [mm]	Deformación al pico (%)	Esfuerzo al pico (MPa)	Deformación a la ruptura (%)	Esfuerzo a la ruptura (MPa)	Módulo de Young (MPa)
1	1,010	16,47	7,93	19,89	8,18	172,0
2	1,010	14,82	7,77	19,86	8,14	159,9
3	1,003	15,42	8,39	20,21	8,64	162,6
4	1,022	16,00	8,41	27,13	8,50	166,6
5	1,001	16,45	8,18	22,28	8,45	177,3
Promedio		15,83	8,13	21,87	8,38	167,7
Desviación estándar		0,71	0,28	3,10	0,21	7,0

Tabla 35. Propiedades mecánicas de la cinta proveniente de la formulación de 5% de aserrín malla 60 y 95% de polietileno reciclado

5% de Aserrín Malla 60 - 95% de Polietileno Reciclado						
No. De Probeta	Espesor [mm]	Deformación al pico (%)	Esfuerzo al pico (MPa)	Deformación a la ruptura (%)	Esfuerzo a la ruptura (MPa)	Módulo de Young (MPa)
1	0,799	65,62	11,410	80,43	10,950	163,9
2	0,829	62,20	11,630	76,43	11,220	165,8
3	0,907	65,14	11,130	77,43	10,820	171,1
4	0,908	72,93	10,800	82,00	10,520	172,5
5	0,918	70,31	11,130	75,57	10,760	162,4
Promedio		67,24	11,22	78,37	10,85	167,1
Desviación estándar		4,31	0,31	2,73	0,26	4,45

Tabla 36. Propiedades mecánicas de la cinta proveniente de la formulación de 10% de aserrín malla 60 y 90% de polietileno reciclado

10% de Aserrín Malla 60 - 90% de Polietileno Reciclado						
No. De Probeta	Espesor [mm]	Deformación al pico (%)	Esfuerzo al pico (MPa)	Deformación a la ruptura (%)	Esfuerzo a la ruptura (MPa)	Módulo de Young (MPa)
1	0,955	37,81	11,81	43,14	10,83	174,1
2	0,909	41,07	11,00	49,14	10,67	170,9
3	1,043	37,81	10,08	48,00	10,17	174,2
4	1,029	37,31	10,21	51,43	10,01	177,1
5	0,923	37,57	10,47	57,57	11,24	178,4
Promedio		38,31	10,71	49,86	10,58	174,9
Desviación estándar		1,55	0,71	5,27	0,50	2,92

Tabla 37. Propiedades mecánicas de la cinta proveniente de la formulación de 15% de aserrín malla 60 y 85% de polietileno reciclado

15% de Aserrín Malla 60 - 85% de Polietileno Reciclado						
No. De Probeta	Espesor [mm]	Deformación al pico (%)	Esfuerzo al pico (MPa)	Deformación a la ruptura (%)	Esfuerzo a la ruptura (MPa)	Módulo de Young (MPa)
1	0,805	25,97	10,88	46,90	11,75	182,9
2	0,786	27,64	10,87	45,31	10,72	178,5
3	0,834	28,01	10,23	43,85	9,97	178,9
4	0,824	26,45	10,08	46,98	10,08	178,7
5	0,829	28,00	11,45	46,14	9,96	170,4
Promedio		27,21	10,70	45,84	10,50	177,9
Desviación estándar		0,94	0,55	1,30	0,77	4,56

Tabla 38. Propiedades mecánicas de la cinta proveniente de la formulación de 5% de aserrín malla 100 y 95% de polietileno reciclado

5% de Aserrín Malla 100 - 95% de Polietileno Reciclado						
No. De Probeta	Espesor [mm]	Deformación al pico (%)	Esfuerzo al pico (MPa)	Deformación a la ruptura (%)	Esfuerzo a la ruptura (MPa)	Módulo de Young (MPa)
1	1,377	85,75	11,84	100,90	11,52	155,3
2	1,260	82,43	11,62	101,60	11,49	152,3
3	1,053	81,43	11,44	94,61	11,14	144,1
4	1,190	82,77	11,24	104,00	11,02	158,1
5	1,255	83,57	11,68	101,60	11,24	154,7
Promedio		83,19	11,56	100,54	11,28	152,9
Desviación estándar		1,62	0,23	3,52	0,22	5,33

Tabla 39. Propiedades mecánicas de la cinta proveniente de la formulación de 10% de aserrín malla 100 y 90% de polietileno reciclado

10% de Aserrín Malla 100 - 90% de Polietileno Reciclado						
No. De Probeta	Espesor [mm]	Deformación al pico (%)	Esfuerzo al pico (MPa)	Deformación a la ruptura (%)	Esfuerzo a la ruptura (MPa)	Módulo de Young (MPa)
1	0,730	50,47	10,93	67,14	10,24	174,0
2	0,735	48,35	10,38	69,43	9,91	178,3
3	0,748	49,40	10,63	70,29	10,37	167,5
4	0,791	49,28	11,97	70,29	11,36	177,0
5	0,745	50,29	11,73	64,00	11,09	169,8
Promedio		49,56	11,13	68,23	10,59	173,3
Desviación estándar		0,86	0,69	2,69	0,61	4,61

Tabla 40. Propiedades mecánicas de la cinta proveniente de la formulación de 15% de aserrín malla 100 y 85% de polietileno reciclado

15% de Aserrín Malla 100 - 85% de Polietileno Reciclado						
No. De Probeta	Espesor [mm]	Deformación al pico (%)	Esfuerzo al pico (MPa)	Deformación a la ruptura (%)	Esfuerzo a la ruptura (MPa)	Módulo de Young (MPa)
1	0,839	29,56	9,72	60,29	9,91	187,8
2	0,857	25,99	9,73	64,43	9,78	201,7
3	0,837	25,99	9,81	60,29	10,17	191,3
4	0,850	25,57	9,75	58,57	10,41	188,5
5	0,819	29,55	10,25	64,71	9,91	187,2
Promedio		27,33	9,85	61,66	10,03	191,3
Desviación estándar		2,04	0,22	2,75	0,25	6,02

Tabla 41. Propiedades mecánicas de la cinta proveniente de la formulación de 30% de aserrín malla 100 y 70% de polietileno reciclado

30% de Aserrín Malla 100 - 70% de Polietileno Reciclado						
No. De Probeta	Espesor [mm]	Deformación al pico (%)	Esfuerzo al pico (MPa)	Deformación a la ruptura (%)	Esfuerzo a la ruptura (MPa)	Módulo de Young (MPa)
1	1,102	9,62	8,34	12,57	7,67	231,700
2	1,098	9,55	8,61	12,86	7,83	236,100
3	1,104	9,83	8,28	12,43	8,12	234,400
4	1,074	9,75	8,84	13,01	7,66	235,100
5	1,082	9,72	8,09	12,79	8,02	226,500
Promedio		9,69	8,43	12,73	7,86	232,76
Desviación estándar		0,11	0,29	0,23	0,21	3,86