

UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE LA MIXTECA

“ESTUDIO MECÁNICO DE UN *COMPOSITE* ADICIONADO CON
FIBRAS DE AGAVE”

TESIS

PARA OBTENER EL TÍTULO PROFESIONAL DE:
INGENIERO EN DISEÑO

PRESENTA

AXEL RUÍZ JIMÉNEZ

CODIRECTORES

ING. OSCAR DÍAZ DE LEÓN SÁNCHEZ DR. MIGUEL CHÁVEZ GUTIÉRREZ

HUAJUAPAN DE LEÓN, OAXACA, MAYO 2016

DEDICATORIA

A mi familia, por apoyarme y creer en mi.

A mi abuelo Hilario y abuela Felicitas, por contagiarme de su felicidad, por enseñarme de la vida y por ser un ejemplo a seguir.

A mi tía Julia, por ser mi segunda madre y de quien aprendí que nuestras metas las conseguimos con esfuerzo y trabajo; por su amor y grandes consejos.

A mi madre, por su amor, por estar siempre conmigo, por sus consejos y apoyo en cada una de mis decisiones, por su determinación y ganas de luchar.

AGRADECIMIENTOS

A la Universidad Tecnológica de la Mixteca, por haber sido mi hogar durante cinco años, por brindarme conocimientos y experiencias inolvidables, porque sin ella no hubiese llegado hasta donde estoy, agradezco también, a su cuerpo docente que me apoyó durante la carrera, en especial, a mis profesores y revisores de tesis, que sin su dedicación y compromiso, mi deseo de superación y dedicación no hubiese germinado.

A mis codirectores, el Ingeniero Oscar Díaz de León Sánchez, por la entrega a su trabajo, por su dedicación y confianza. Mil gracias por los consejos brindados, por el apoyo no solo en la realización del presente trabajo, sino también, a lo largo de mi estancia en esta mi Universidad, por haber tenido el tiempo para hacerme ver que el trabajo y el esfuerzo rinden valiosos frutos, mil gracias. Al doctor Miguel Chávez Gutiérrez, por su apoyo en la realización de la presente tesis, por sus conocimientos brindados y por darme la oportunidad de conocer nuevas formas de aprendizaje, nuevos caminos de superación. Gracias por el tiempo brindado, por sus consejos, enseñanzas y por permitirme trabajar con una persona profesional y comprometida, sin su apoyo, no hubiera sido posible este trabajo.

Un reconocimiento al Instituto Politécnico Nacional, en especial, al Centro Interdisciplinario de Investigación y Desarrollo Integral Regional, Unidad Oaxaca, por brindarme las facilidades para ocupar sus instalaciones y realizar mi trabajo.

Al M.I. Juan Vélez, auxiliar de investigación del CINVESTAV Querétaro por el apoyo en el proceso de extrusión; al M. C. Frank León del CIIDIR Oaxaca por el apoyo en las microscopías por SEM; al Dr. Magdaleno Caballero Caballero, por sus atenciones, por el apoyo para la obtención de fibras y por brindarme un área de estudio; al Dr. Ángel Ramón Hernández Martínez, investigador del CFATA UNAM Juriquilla,

por las facilidades para la realización de los ensayos a tensión, al CONACYT, por el apoyo en infraestructura de los proyectos 251504 y 264110.

A los técnicos del Laboratorio Avanzado de Manufactura: C. Rodolfo Palma Guzmán, C. Javier Jiménez, C. Eustacio Miguél Díaz, C. Roberto Juan Ramírez Chavez y al C. Enrique Miguél López por su amistad y ayuda, no solo en el presente trabajo, sino durante mis años de carrera.

Mil gracias a mis amigos y compañeros que hicieron de mi estadía en la Universidad, la mejor etapa en mi vida, en especial, a mis grandes amigos: Arturo, Ignacio, Julio Cesar, Yulissa, Belén y Mónica; por tantas experiencias y excelentes momentos que vivimos juntos, por dejarme conocerlos y por aprender tanto de cada uno, por sus ganas de sobresalir y por contagiarme de su alegría; de corazón, gracias.

INTRODUCCIÓN

El estado de Oaxaca es una entidad rica en recursos naturales, biodiversidad, turismo y actividades económicas. Una de estas, es la producción de mezcal, misma que cuenta con 400 años de tradición y que, además, genera al estado ingresos anuales por más de 115 millones de dólares, apoyando a la economía de más de 42 mil familias a lo largo y ancho del territorio oaxaqueño. Como parte de la cadena productiva, la producción de mezcal genera residuos, uno de ellos es el bagazo de mezcal, mismo que al no ser tratado adecuadamente, provoca contaminación del aire, tierra y agua.

El presente tema de tesis “Estudio mecánico de un composite adicionado con fibras de agave” surgió al pensar en una vía de aprovechamiento del bagazo en el mejoramiento mecánico de materiales plásticos, reduciendo así, una porción de material que, al ser depositado a cielo abierto se convierte en un problema de salud.

La organización del presente trabajo, está dividido en cuatro capítulos, en los cuales se abordan aspectos generales y específicos para la comprensión e interpretación de resultados. De esta forma, el inicio de esta investigación parte del capítulo uno, en donde se plantea el problema a resolver, los objetivos, justificación y metas, mismas que en su conjunto, determinan la orientación del tema a desarrollar.

El capítulo dos aborda temas que conforman el marco teórico, tales como: definiciones de polímeros; materiales compuestos, sus múltiples aplicaciones y estudios; las definiciones que atañen a las propiedades mecánicas, ensayos en materiales plásticos y los procesos de conformación del material polimérico, para posteriormente, formar el material compuesto.

En el capítulo tres encontramos el desarrollo del proyecto, la parte experimental del mismo, la metodología seguida, así como la norma internacional que se ocupa para

realizar ensayos a tensión. Cabe señalar que, por la naturaleza del material obtenido, fueron llevados a cabo diversos métodos de conformación y manufactura, algunos de ellos, el proceso de extrusión e inyección.

Así mismo, en el capítulo cinco se presenta la conclusión del proyecto, en donde se señala la formulación más viable para obtener el mejor desempeño mecánico, el resultado obtenido en los ensayos a tensión, a fin de tener un parámetro de comparación con respecto a el polietileno de alta densidad, así como el trabajo a futuro propuesto, mismo que surge durante la investigación y fase experimental del trabajo. Finalmente, se señalan las aplicaciones del material compuesto como un elemento que se integra a la ingeniería y al diseño.

ÍNDICE GENERAL

INTRODUCCIÓN.....	iv
Índice de Figuras	viii
Índice de Tablas	x
Índice de Gráficos	xii
CAPÍTULO I. Aspectos Preliminares	1
1.1. Planteamiento del problema	1
1.1.1.Contexto general	1
1.1.2. Antecedentes	4
1.2. Problema de diseño a resolver e hipótesis.....	5
1.3. Justificación	5
1.3.1. Aportación al Diseño	5
1.4. Objetivos	6
1.4.1. General	6
1.4.2. Específicos	6
1.5. Metas	7
1.6. Metodología	8
1.6. Metodología de la investigación.....	8
1.6. Metodología del modelo experimental.....	9
CAPÍTULO II. Marco Teórico	10
2.1. Los Polímeros	11
2.2. Propiedades mecánicas y ensayos de materiales.....	17
2.2.1. Procesamiento por extrusión y moldeado por inyección.....	26
2.3. Materiales compuestos	30
CAPÍTULO III. Desarrollo del proyecto	36
3.1. Diseño de Investigación	37

3.1.1. Técnicas, requerimientos y procesos	37
3.1.2. Metodología del modelo experimental.....	43
3.1.2.1. Proceso para la obtención del material compuesto	44
3.2. Análisis de los resultados	61
3.2.1. Contenido de humedad	61
3.2.2. Microscopía Electrónica de Barrido	63
3.2.3. Ensayos Mecánicos a Tensión	72
CAPÍTULO IV. Conclusiones	83
4.1. Conclusiones	84
4.2. Trabajo Futuro	86
4.3. Aportación del Material Compuesto en el Diseño.....	87
ANEXOS	88
ANEXO A	89
ANEXO B	91
BIBLIOGRAFÍA	99

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 Refinación del petróleo para la obtención de monómeros (Canevarolo Júnior, 2002).	13
Figura 2.2. Sección de exploración a-a a través de un sólido sometido a la acción de varias fuerzas (Pytel & L. Singer, 2008).....	18
Figura 2.3. Componentes de los efectos internos de la sección de exploración a-a (Pytel & L. Singer, 2008)	18
Figura 2.4. Máquina de ensayos a tensión (Gere & Goodno, 2009).....	21
Figura 2.5. Diagrama Esfuerzo-Deformación (Pytel & L. Singer, 2008)....	23
Figura 2.6. Componentes de una máquina de extrusión (de un solo tornillo) para plásticos y elastómeros. (Groover, 2007).....	26
Figura 2.7. Componentes de una máquina de moldeo por inyección	29
Figura 3. 1. Probeta estandarizada para ensayos a tracción en materiales plásticos.....	38
Figura 3. 2. a) Muestra de fibras de bagazo. b) Pellets de polietileno de alta densidad.....	43
Figura 3.3. a) Fibras donadas por el palenque LANII, b) Segmento de fibra con longitud de 2 cm una vez molida por el molino para granos. c) Molino para granos convencional, d) Tamiz ELVEC número 4, e) Tamizado de fibras para obtener la dimensión requerida, f) Fibras tamizadas.....	46
Figura 3. 4. a) Fibras colocadas en el vaso de precipitados antes del primer enjuague, b) Enjuague número 2, c) Enjuague número 8).....	47
Figura 3. 5. a) Mezclador IKA RW20 con el vaso de precipitados montado en su base, b) Rotación de trabajo aplicada.....	48
Figura 3.6. Fibras extendidas después de ser estabilizadas con ácido acético para ser secarse al sol.....	49
Figura 3.7. Microscopio electrónico de barrido, JEOL JSM-IT300.....	50
Figura 3.8. Pulverizador catódico Denton Vacuum Desk V.....	50
Figura 3.9 a) Recipientes de aluminio para la colocación de muestras, b)Horno de convección por gravedad BG H-33.....	51
Figura 3.10. Extrusora Prototipo CINVESTAV.....	52

Figura 3.11 a. Troquel y boquilla de la extrusora. b) Zonas de calor en la extrusora PROTOTIPO CINVESTAV (señalados en rojo), así como depósito de enfriamiento del material compuesto.....	53
Figura 3.12 a) Material extruido continuo. b) Material segmentado con dimensiones: 5mm de longitud y 5mm de diámetro.....	54
Figura 3.13. Centro de maquinado vertical CNC, Microcut Challenger MM-430.....	55
Figura 3.14 Porta herramientas y cortador plano de tungsteno de 1/8".....	56
Figura 3.15 Taladro de banco con una de las cavidades montadas en la platina.....	56
Figura 3.16 Cavidades del molde utilizado en la inyección de probetas, así como las partes que lo conforman.	57
Figura 3.17. Inyectora vertical de émbolo.....	58
Figura 3.18 Muestra inyectada aún dentro de la cavidad del molde.....	59
Figura 3.19 Conjunto de muestras con formulación CF2.....	59
Figura 3.20 a) Muestra de HDPE durante el ensayo a tensión b) Resultados arrojados por el software de la máquina de ensayos universales.....	60
Figura 3.21 a), b), c) Corresponden a las fibras sin tratamiento con hidróxido, mientras que d), e), f) se atribuyen a las fibras con tratamiento con hidróxido.....	64
Figura 3. 22 Acercamiento a una fibra para determinar diámetro y longitud.....	65
Figura 3. 23 a) Micrografía de un corte, b) micrografía de la fractura a la probeta de ensayo.....	69
Figura 3. 24 Micrografías de fracturas; a) formulación CF1, b) formulación CF2.....	70
Figura 3. 25 Interfaz matriz-fibra en el material compuesto.....	70
Figura 3. 26 Acercamiento en una fractura para apreciar la interfaz de la matriz-fibra en el material compuesto.....	71
Figura 3. 27 Especímenes con formulaciones a) HDPE, b) CF1, c) CF2, d) CF3.....	79

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1. Temperaturas de transición vítrea Tg y Temperatura de fusión Tm del Polietileno	16
Tabla 3. 1 Dimensiones de espécimen con grosor T igual a 3.2 mm; Probeta tipo V.	39
Tabla 3. 2 Designaciones para la velocidad en ensayos a tensión.....	40
Tabla 3. 3 Condiciones de trabajo en el proceso de extrusión en materiales plásticos.	42
Tabla 3. 4 Condiciones de trabajo en el proceso de inyección en materiales plásticos.	42
Tabla 3. 5 Concentraciones de fibra y polietileno formuladas para la elaboración del extruido.	44
Tabla 3. 6 Número de Enjuagues a las que fueron sometidas las fibras para su limpieza.....	46
Tabla 3. 7 Resultados de la toma de pH en las fibras al momento de hacer el tratamiento y después de haber realizado el lavado.....	49
Tabla 3. 8 Porcentaje de humedad en las muestras con y sin tratamiento con NaOH.	61
Tabla 3. 9 Tabla con el registro de longitud y diámetro de las fibras sin tratamiento.	65
Tabla 3. 10 Tabla con el registro de longitud y diámetro de las fibras con tratamiento.	66
Tabla 3. 11 Desviación estándar para longitud de fibras sin tratamiento....	67
Tabla 3. 12 Desviación estándar para el diámetro de fibras sin tratamiento.	67
Tabla 3. 13 Desviación estándar para longitud de fibras con tratamiento...	68
Tabla 3. 14 Desviación estándar para el diámetro de fibras con tratamiento	68
Tabla 3. 15 Resultados en muestras con formulación HDPE.....	72
Tabla 3. 16 Resultados estadísticos del ensayo a tensión en las muestras con formulación HDPE.	73
Tabla 3. 17 Resultados en muestras con formulación CF1.....	74

Tabla 3. 18 Resultados estadísticos del ensayo a tensión en las muestras con formulación CF1.	74
Tabla 3. 19 Resultados en muestras con formulación CF2.....	75
Tabla 3. 20 Resultados estadísticos del ensayo a tensión en las muestras con formulación CF2.	76
Tabla 3. 21 Resultados en muestras con formulación CF3.....	76
Tabla 3. 22 Resultados estadísticos del ensayo a tensión en las muestras con formulación CF3.	77
Tabla 3. 23 Comparativo del módulo elástico entre las muestras de HDPE y las formulaciones propuestas.....	80
Tabla 3. 24 Comparativo del esfuerzo a tensión entre las muestras de HDPE y las formulaciones propuestas.....	81
Tabla 3. 25 Comparativo de porcentaje de elongación entre las muestras de HDPE y las formulaciones propuestas.....	82

ÍNDICE DE GRÁFICOS

Gráfico 3. 1 Gráficas de esfuerzo-deformación en las muestras con formulación HDPE.....	72
Gráfico 3. 2 Gráficas de Esfuerzo-Deformación en las muestras con formulación CF1.....	74
Gráfico 3. 3 Gráficas de Esfuerzo-Deformación en las muestras con formulación CF2.....	75
Gráfico 3. 4 Gráficas de Esfuerzo-Deformación en las muestras con formulación CF3.....	77
Gráfico 3. 5 Gráfica comparativa del módulo elástico en las formulaciones, con respecto al HDPE.....	80
Gráfico 3. 6 Gráfica comparativa del esfuerzo a tensión en las formulaciones, con respecto al HDPE.....	81
Gráfico 3. 7 Gráfica comparativa del porcentaje de elongación en las formulaciones, con respecto al HDPE.....	82

CAPÍTULO I

ASPECTOS PRELIMINARES

1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.1.1. Contexto General

El estado de Oaxaca cuenta con una amplia variedad de actividades económicas, dentro de las que destacan la agricultura, la ganadería y el comercio. Siendo la producción y venta de mezcal, una de las actividades más destacadas de nuestro estado.

En el año 2011 esta fue la tercera fuente de exportaciones del estado, sólo por debajo de la cerveza y el café; para este mismo año, según datos de SAGARPA el volumen de producción fue de 975 mil litros de mezcal certificado, de los cuales se exportaron alrededor de 300 mil litros a los Estados Unidos, seguido de Australia y la Unión Europea.

De lo anterior, podemos destacar el potencial agroindustrial de nuestro estado, principalmente en la producción de mezcal artesanal y, sobre todo, se observó una oportunidad para aprovechar los residuos que de esta se genera. En el proceso de producción del mezcal están involucradas las siguientes etapas: I. Recolección; II. Cocción; III. Molienda; IV. Fermentación; V. Destilación; VI. Refinado y VII. Envasado.

Este trabajo, se centró específicamente en el paso III; Molienda ya que, en este punto se genera la mayor cantidad de residuos, esta consiste en la trituración de las pencas de agave ya cocidas con ayuda de una piedra circular que es rodada por un caballo, mula o burro para obtener el jugo del bagazo. Esta acción genera residuos sólidos (bagazo de agave) los cuales son depositados en sitios cercanos a la fábrica de mezcal, colocándolos sin ningún tratamiento físico o químico en terrenos a cielo abierto, generando con ello: una descomposición paulatina, mal olor, contaminación de suelo, de paisaje y del aire ya que parte de estos desechos se incineran con el fin de preparar el terreno para el siguiente cultivo González, (2013).

Al conocer estos datos, se identificó la necesidad de aprovechar los desechos triturados ya que, tomando en cuenta que en el año 2014 se produjeron 980, 000 litros de mezcal certificado y que para la obtención de un litro se generan 231.3 gramos de fibra, significa que en el 2014 se desecharon más de 2.2 toneladas de residuos. Cabe señalar que estos constituyen una fuente de contaminación a consecuencia del volumen y a su resistencia a la degradación, la cual se lleva a cabo de dos a tres años, aunado a la cantidad extra de residuos constituidos por las puntas del agave que igualmente son tiradas en los terrenos, provocando la proliferación de roedores, contaminación de suelos y aguas, (Robles, 2011).

Al identificar el daño que la fibra de agave provoca en el medio ambiente, es conveniente señalar las características y procesos por los cuales se pueden aprovechar las fibras naturales, las cuales, en variados estudios son utilizadas como elemento de refuerzo en un material compuesto, también llamado *composite*, el cual es un material que resulta de la mezcla de dos o más elementos, pudiendo ser de matiz cerámica, metálica o polimérica.

Se denomina *composite* de matriz polimérica, a aquella mezcla formada por: un polímero y fibras de refuerzo. Un ejemplo de fibra utilizada como refuerzo de polímeros es la fibra de vidrio, la cual es impregnada en resina. Los materiales compuestos termoestables tienen propiedades muy apreciadas, debido a que son resistentes, duraderos y ligeros, (Martí, 2006).

Aunado a ello, retomado del documento: “Materiales de última generación y materiales eficientes de la Universidad de Alcalá” se conoce que las propiedades mecánicas de un *composite* son similares a las de la madera, aunque algunos se pueden “comparar” a los de los metales, con la ventaja de poseer una baja densidad, tanto por efecto de la matriz como de las fibras, actualmente se fabrican compuestos reforzados con fibras que tienen resistencias y módulos específicos excepcionalmente elevados.

Por otra parte, una caracterización, es un proceso que, mediante diversos ensayos nos permite conocer prácticamente todas las propiedades de un material (físicas, mecánicas, térmicas, eléctricas, etc.). Estas propiedades dependen de la estructura interna que poseen, principalmente tenemos que los polímeros termoestables son aquellos que en presencia de calor se combustionan, ya que el arreglo de sus moléculas es desordenado; mientras que los termoplásticos, al tener una estructura molecular lineal, en presencia de calor pueden moldearse.

En este trabajo, se utilizará como polímero termoplástico al polietileno de alta densidad para la realización de las pruebas a tensión, ya que, de este estudio se obtiene el módulo de elasticidad, parámetro que representa la capacidad del material para deformarse y relaciona el esfuerzo aplicado al material y la deformación que este genera.

1.1.2. Antecedentes

Dentro de la información encontrada sobre la fibra del agave, destacan en el área de ingeniería, el “Estudio del efecto de la fibra de bagazo de *Agave angustifolia* Haw en la resistencia a flexión y compresión del adobe compactado” Montes, J. (2009), este título corresponde a la tesis de maestría donde se muestran características mecánicas mejoradas del adobe al momento de adicionar bagazo de agave mezcalero. Otra fuente bibliográfica es la “Caracterización de propiedades mecánicas de fibras de *Agave angustifolia* Haw” Caballero, M. (2008), en el que determina la resistencia a tracción, porcentaje de deformación y módulo de elasticidad de las fibras de las hojas del agave según su ubicación. Este nos permite conocer en forma detallada las características y variaciones mecánicas de la fibra dependiendo de la ubicación en la hoja.

En el área de arquitectura tenemos que las hojas del agave son utilizadas para la creación, mediante el doblado de las mismas, de muros ecológicos. Otras fibras naturales como el bambú, henequén, etc.; han resultado útiles para la fabricación de techos, pisos, recubrimientos y paneles.

Para el caso de los materiales compuestos termoplásticos, se encontró que en el Instituto Cubano de Investigación de los Derivados de Azúcar se formularon diferentes composites empleando como matriz polimérica el polipropileno y como fibra de refuerzo, al bagazo de la caña de azúcar (Brown , et al., 2006). En este documento se encontraron descritas las diversas metodologías para la caracterización pruebas de los materiales compuestos, además de contener información sobre el uso de fibras sintéticas y naturales como; el lino, sisal, cáñamo y coco, como ocurre en Brasil, donde se han utilizado con éxito las fibras de coco como material de refuerzo en composites, para la producción de reposacabezas, asientos y otras autopartes.

1.2. PROBLEMA DE DISEÑO A RESOLVER E HIPÓTESIS

El problema a resolver recae en obtener un material compuesto en donde se aproveche el bagazo de mezcal como agente de refuerzo, además, que sea una alternativa viable para ser utilizada a la hora de diseñar un objeto, mejorando su capacidad de carga, disminuir su deformación y reducir la contaminación ambiental. Para tal efecto, es necesaria la caracterización mecánica a tensión del material, el cual tendrá como matriz polimérica al polietileno de alta densidad (HDPE), en donde se adicionarán fibras de bagazo en diferentes concentraciones. La hipótesis que se consideró depende de la cantidad de fibra de agave con respecto a la de polietileno. Formulando, tenemos que:

“Al agregar fibra de agave mezcalero en 3 concentraciones diferentes, con respecto al peso del polietileno de alta densidad, éstas aumentarán la resistencia a la tensión del material compuesto a medida que se adicione mayor porcentaje de fibras”.

1.3. JUSTIFICACIÓN

1.3.1. Aportación al diseño

Dentro de las aportaciones del presente trabajo, destacan el utilizar la fibra de bagazo de agave como material de refuerzo mecánico en un polímero termoplástico, mejorando las propiedades mecánicas del polietileno de alta densidad (HDPE) y reduciendo un porcentaje de contaminación provocado por este residuo. Otro aporte consiste en mostrar los resultados obtenidos y que estos puedan ser utilizados para reforzar o constituir alguna pieza sometida a tensión, tales como: patas de silla, apoyos en mesas y cualquier elemento que sea sometido a este tipo de carga.

Con los resultados obtenidos, se esperaría en un futuro el disminuir: cantidad de material utilizado, número de piezas del objeto de diseño, entre otras.

Aunado a ello, estéticamente los objetos de diseño al estar elaborados con composites termoplásticos, tendrían la característica de mostrar en su composición, pequeñas fibras incrustadas en los elementos que los componen, ya que, al momento de mezclar y fundir el material, se pudiese llegar a tener cierta textura formada por las fibras de agave que se encuentran en los pellets de polietileno.

1.4. OBJETIVOS

1.4.1. General

Generar un material compuesto con matriz polimérica de polietileno de alta densidad (HDPE) reforzada con fibras de agave mezcalero, el cual será caracterizado a tensión para obtener su comportamiento mecánico y reducir con ello, el porcentaje de contaminación que provoca dicho residuo agroalimentario.

1.4.2. Específicos

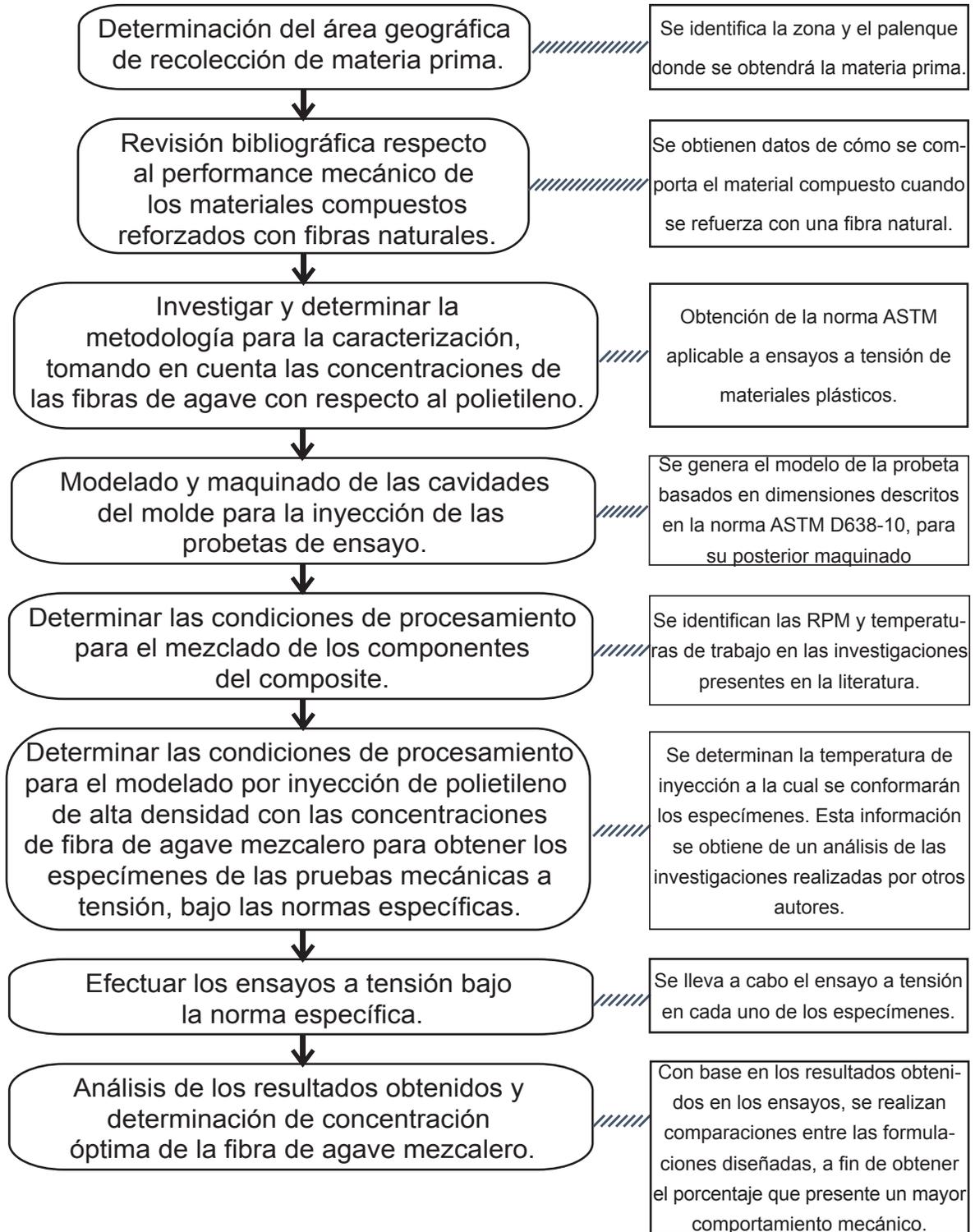
1. Seleccionar el área geográfica de recolección de la fibra de agave mezcalero.
2. Establecer las mezclas de polietileno de alta densidad y fibras de agave para la obtención del material compuesto, tomando en cuenta como variable: la concentración de las fibras con respecto al polietileno.
3. Definir los parámetros de operación en el proceso de extrusión e inyección para la conformación del material compuesto.
4. Definir las condiciones aplicables a ensayos mecánicos a tensión para la caracterización del material compuesto.
5. Determinar el comportamiento mecánico del material compuesto a tensión.
6. Interpretar el desempeño mecánico del material compuesto, así como sus ventajas y futuras aplicaciones.

1.5. METAS

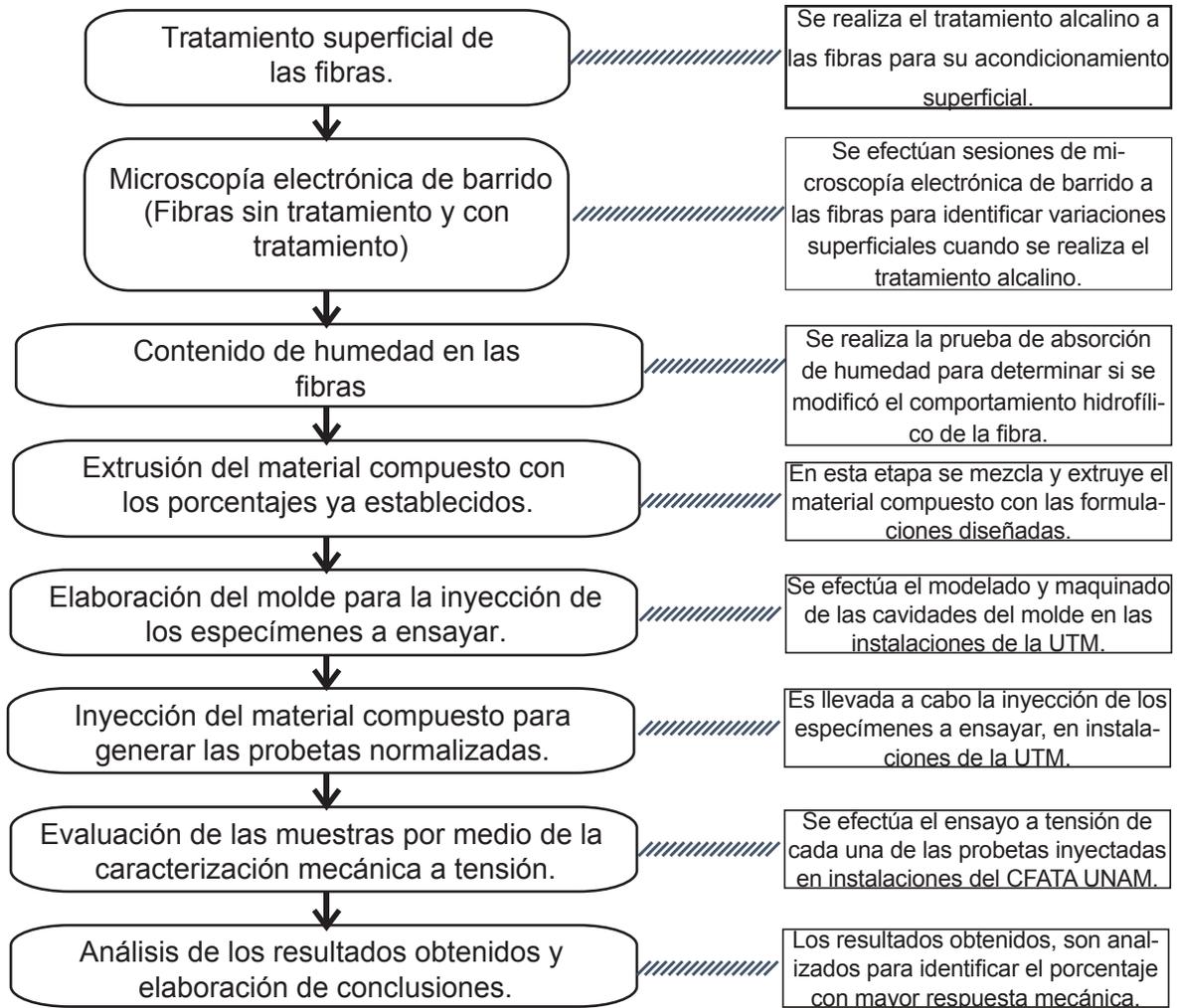
1. Realizar una consulta bibliográfica de las regiones de producción de mezcal en el estado, a fin de obtener la zona idónea para la obtención de las fibras de bagazo.
2. Realizar un análisis de la literatura para generar una tabla en donde se especifiquen las formulaciones diseñadas para el material compuesto.
3. Identificar los parámetros de conformación de materiales plásticos documentados en la literatura para llevar a cabo la extrusión e inyección de las probetas de ensayo.
4. Con base en la investigación bibliográfica realizada, obtener las normas aplicables a ensayos a tensión en materiales plásticos, así como las especificaciones de las probetas de ensayo.
5. Llevar a cabo la extrusión del material compuesto con las formulaciones previamente definidas.
6. Modelar y maquinar en software CAD-CAM las cavidades del molde para la inyección de los especímenes a estudiar.
7. Llevar a cabo la inyección del material compuesto, a fin de generar las probetas normalizadas para su posterior caracterización.
8. Realizar la caracterización mecánica a tensión de los especímenes con las formulaciones diseñadas.
9. Analizar los resultados obtenidos en los especímenes, específicamente el módulo de elasticidad y el porcentaje de elongación.
10. Generar gráficas comparativas del módulo de elasticidad y porcentaje de elongación obtenido en cada una de las muestras.

1.6. METODOLOGÍA:

1.6.1. Metodología de la investigación



1.6.2. Metodología del modelo experimental



CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

2.1. Los polímeros

Los polímeros han existido en la naturaleza desde hace millones de años, incluso, desde que la vida inicio, ya que, junto al ADN, el ARN, las proteínas y los polisacáridos, juegan un papel crucial en la vida. Desde los primeros años, el hombre ha explotado a los polímeros de origen natural como materiales para proveerse de ropa, decoración, herramientas, armas entre otros (Young & Lovell, 2011). Como parte de la historia, algunos datos que sobresalen por su impacto en la ciencia y en la industria destacan los siguientes: En 1820, Thomas Hancock descubrió que el caucho natural se vuelve más fácil de moldear cuando se le aplican fuerzas de cizallamiento, años después y aprovechando este comportamiento, en 1839, Charles Goodyear encontró que las propiedades elásticas del caucho natural pueden ser mejoradas, patentando así, la vulcanización. En 1846 y 1868 se desarrollaron formas de sintetizar celuloide a partir del nitrato de celulosa.

El primer polímero totalmente sintético fue desarrollado por Leo Hendrik Baekelan, nombrando al nuevo material como bakelita, aunado a esto, en 1911 y 1912 surgieron el poliestireno y el PVC (Young & Lovell, 2011), empezando así con los deseos de modificar elementos naturales y crear con ello materiales novedosos y útiles a la industria, el comercio y la actividad diaria en los hogares. Para comprender de una mejor manera el tema, es necesaria la explicación de algunos términos y características. La palabra polímero es un concepto extenso que ha sido estudiado bajo diversas perspectivas, definiéndose como se muestra a continuación:

Polímero proviene de las raíces griegas poli (muchos) y mero (unidades de repetición). Así, un polímero es una macromolécula compuesta por muchas (decenas de miles) de unidades de repetición denominadas meros, ligadas por un enlace covalente. La materia prima para la producción de un polímero es el monómero, es decir, una molécula con una unidad de repetición.

Dependiendo del tipo de monómero (estructura química), de la cantidad de monómeros por cadena y el tipo de enlace covalente, se puede dividir a los polímeros en tres grandes clases: plásticos, elastómeros y fibras (Canevarolo Júnior, 2002).

Otros autores definen a los polímeros, como aquellas moléculas gigantes o macromoléculas formadas por la unión química de moléculas más pequeñas denominadas monómeros, a manera de largas cadenas. Estos monómeros (unidades moleculares básicas de un polímero) se unen entre sí a través de una reacción (síntesis) química llamada polimerización, para integrar cadenas poliméricas (Ríos Soberanis, 2012). Una tercera definición dicta lo siguiente: Un polímero es un material compuesto de moléculas formadas por muchas unidades repetidas de alguna unidad simple. Otro término que solía describir a tal molécula era una macromolécula, la cual presenta una masa molecular alta. Lo que todos los polímeros tienen en común es que están químicamente contruidos por repeticiones de una unidad básica “mero”, el cual está unido químicamente a otros del mismo tipo para formar moléculas de una, dos o tres dimensiones (Clements, 1988).

El origen de los monómeros como formas básicas para la obtención de los polímeros sintéticos, en su mayoría son producto de múltiples reacciones químicas propiciadas por el hombre, partiendo del petróleo y de sus diversas refinaciones. Uno de los productos que más convienen en la producción de polímeros es la nafta, esta se obtiene después de un “cracking” térmico apropiado (800°C), generando fracciones gaseosas, conteniendo moléculas saturadas e insaturadas (Canevarolo Júnior, 2002). Las moléculas insaturadas (etileno, propileno, butadieno, buteno, isobuteno, etc.) son separadas y aprovechadas para la síntesis de polímeros.

La figura 2.1. muestra la secuencia de primera generación (es decir, para la obtención de monómeros) característica de la industria petroquímica (Canevarolo Júnior, 2002).

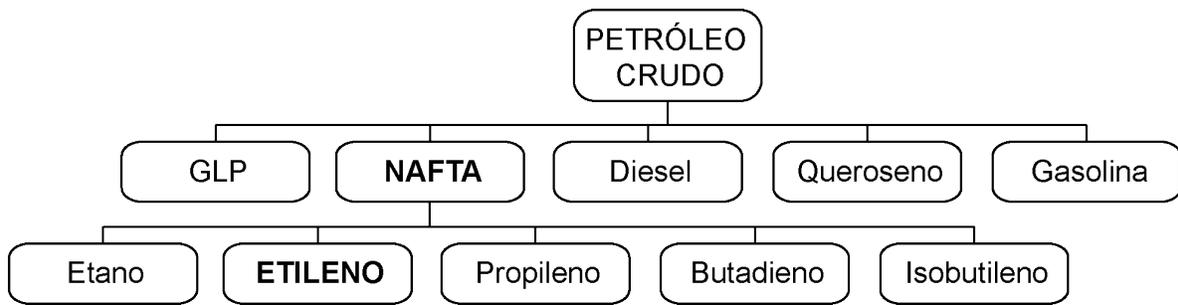


Figura 2.1. Refinación del petróleo para la obtención de monómeros (Canevarolo Júnior, 2002).

Siguiendo la línea de los diversos tipos de polímero y para efectos de análisis en el tema central de esta investigación, es pertinente hacer referencia al subconjunto formado por los plásticos, los cuales se definen como aquellos materiales poliméricos de alta masa molecular, sólidos como productos acabados (Canevarolo Júnior, 2002).

La mayor parte de los plásticos son productos de la química orgánica, es decir, tienen como componentes principales, átomos de carbono C (junto con nitrógeno N, hidrógeno H, oxígeno O y azufre S) (Von Meysenbug, 1981). Un alto porcentaje de plásticos se producen de forma sintética, aunque algunos son productos naturales modificados. En la literatura existen diversas clasificaciones de los plásticos, mismas que se formulan dependiendo de características específicas, una de ellas divide a los plásticos en dos ramas: “los termoplásticos y los termofijos” (Canevarolo Júnior, 2002).

- Los termoplásticos son aquellos que tienen la capacidad de amoldarse y fluir cuando son sometidos a un aumento de temperatura o presión. Cuando es retirado, el polímero se solidifica en un producto con formas definidas. Nuevas aplicaciones de temperatura y presión producen el mismo efecto de amoldecimiento y flujo. Esta alteración es una propiedad física reversible. Ejemplos de termoplásticos son: polietileno (PE), poliestireno (PS), poliamida (Nylon), etc.

- Los materiales termofijos, también llamados termorígidos o termoendurecidos son aquellos que se vuelven moldeables al aplicarse calor una única vez, ya que al presentarse el proceso de curado o enfriado, éstos tienen una transformación química irreversible, con una formación de ligaciones cruzadas, tornándose rígido. Posteriores aplicaciones de calor no alteran sus características físicas, o sea, no se ablanda, volviéndose infusible e insoluble. Ejemplo de termofijos son la baquelita, resinas epóxicas.

Como se ha señalado anteriormente, los plásticos tienen múltiples características, tanto físicas como químicas; hablando de sus propiedades físicas, en concreto, de su desempeño mecánico, los termoplásticos y termofijos se subdividen, formando los siguientes grupos:

- Termoplásticos convencionales: Son polímeros de bajo costo, bajo nivel de exigencia mecánica, alta producción, y fácil de procesar. La producción mundial de estos termoplásticos corresponde al 90% del total. Ejemplo de estos son: poliolefinas (PP, HDPE, LDPE), poliestireno (PS) o policloruro de vinilo (PVC).
- Termoplásticos especiales: Son polímeros con un costo ligeramente mayor que los convencionales y con algunas características mejoradas. En esta clase entran los copolímeros como: (EVA), (SAN), (PTFE), (PMMA). Dos de ellos, (PMMA y SAN) presentan una alta transparencia, y el (PTFE) describe una alta estabilidad térmica y química.
- Termoplásticos de ingeniería: La fabricación de piezas de estos plásticos está destinada para aplicaciones en dispositivos mecánicos (engranes, piezas técnicas para la industria electrónica y automovilística, etc.) presentan alta resistencia mecánica (rigidez) y excelente estabilidad dimensional.

Como ejemplos se tienen: las poliamidas, (PET), (PBT), (PC), (ABS).

- Termoplásticos especiales de ingeniería: En aplicaciones donde hay altas temperaturas y la exigencia es mayor son utilizados polímeros con grandes cantidades de anillos aromáticos en su cadena principal, los cuales aumentan su estabilidad térmica para un uso ininterrumpido a temperaturas por encima de los 150°C. Como ejemplos están aquellos que contienen azufre (PPS), (PEEK), poliamidas y polímeros de cristal líquido y polimérico.

Partiendo de lo ya expuesto y profundizando en el tema central de este trabajo, es pertinente exponer las características del polietileno, mismo que será tomado como matriz en la obtención del material compuesto, término que se explicará con más detalle en los siguientes apartados.

El polietileno es un material termoplástico formado por la polimerización del etileno bajo condiciones de temperatura y presión controladas. Es fácil de trabajar en procesos de extrusión e inyección por su estabilidad a la temperatura, buenas características de flujo e inercia en metales. Es un material inerte a los solventes y corrosivos químicos, se encuentra en aplicaciones de tuberías y conductos. La permeabilidad a la humedad es baja y su absorción de agua es casi nula, he aquí su carácter hidrofóbico (Mantell, 1958).

Normalmente el polietileno es traslúcido, duro, no es afectados por el agua y cuentan con cadenas largas químicas (ASM International, 1988). En la industria, las clases de polietileno más comunes son: de baja densidad y de alta densidad, denominándose así por la longitud de su cadena principal y, por ende, por su alto peso molecular.

(Clements, 1988) Señala en la tabla 2.1 las características de temperatura de transición vítrea T_g , la temperatura de fusión T_m y la estructura química.

Por otra parte, (Von Meysenbug, 1981) señala que el polietileno de alta densidad presenta una cristalinidad del 75%, densidad de 0.94 g/cm³, temperatura a la cual comienza a ablandarse es de 120 °C y cuenta con un carácter hidrofóbico (repelente al agua).

Nombre Químico	T _g °C	T _m °C	Estructura Química
Polietileno			
De alta densidad	-90 a -20	137	$\left(\begin{array}{cc} \text{H} & \text{H} \\ & \\ -\text{C} & -\text{C}- \\ & \\ \text{H} & \text{H} \end{array} \right)_n$
De baja densidad	-110 a -20	115	

Tabla 2. 1 Temperaturas de transición vítrea T_g y Temperatura de fusión T_m del Polietileno.

2.2. Propiedades mecánicas y ensayos de materiales

El comportamiento mecánico de un polímero depende en gran parte de su estructura molecular, así, las propiedades mecánicas de los polímeros son caracterizadas por el modo en cómo estos materiales responden a las sollicitaciones mecánicas aplicadas, pudiendo ser de tensión o deformación (Canevarolo Júnior, 2002). Para comprender lo que implica tal comportamiento, es necesario analizar diversos conceptos que servirán como base para realizar una interpretación de las modificaciones que un polímero o un plástico presenta durante y después de haber sido afectada por una fuerza exterior en un punto o puntos determinados.

El objetivo principal de la mecánica de materiales es la investigación de la resistencia interna de un cuerpo, es decir, de la naturaleza de las fuerzas que se originan en su interior para equilibrar el efecto de las fuerzas aplicadas exteriormente (P. Popov, 1982). Todas las fuerzas que se ejercen sobre un elemento, incluso las fuerzas reactivas causada por los apoyos o soportes y el peso del propio cuerpo se consideran fuerzas externas.

Conociendo esto, es posible deducir que la forma en que internamente reacciona un cuerpo depende tanto de la magnitud, la dirección y la ubicación en que se aplica la fuerza. Uno de los datos fundamentales que se debe conocer es la magnitud o intensidad de las fuerzas en las diversas porciones del corte en el cuerpo, pues la resistencia a la deformación y la capacidad de los materiales para resistir fuerzas dependen de estas intensidades (P. Popov, 1982).

Para el análisis de las fuerzas internas se considera un cuerpo sólido de forma cualquiera en el que actúa una serie de fuerzas, como se representa en la Figura 2.2. Por otra parte, se conoce que la resistencia de materiales estudia la distribución interna de esfuerzos que produce un sistema de fuerzas exteriores aplicadas. Para ello se suele hacer un corte ideal en el sólido para una sección de exploración,

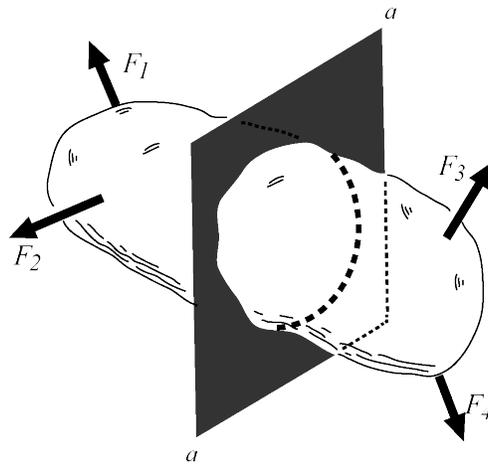


Figura 2.2. Sección de exploración a-a a través de un sólido sometido a la acción de varias fuerzas (Pytel & L. Singer, 2008)

buscando qué fuerzas deben actuar en esta sección para mantener el equilibrio de cuerpo libre en cada una de las dos partes en que ha quedado dividido el cuerpo (Pytel & L. Singer, 2008). En general, el sistema de fuerzas internas equivale a una fuerza y un par resultantes que, por conveniencia, se descomponen según la normal y la tangente a la sección, como se muestra en la siguiente figura.

Lo anterior señala tanto la sección, como la dirección de las componentes de la fuerza y el momento. Así, el primer subíndice indica la cara sobre la que actúan las componentes y el segundo la dirección de cada una de ellas.

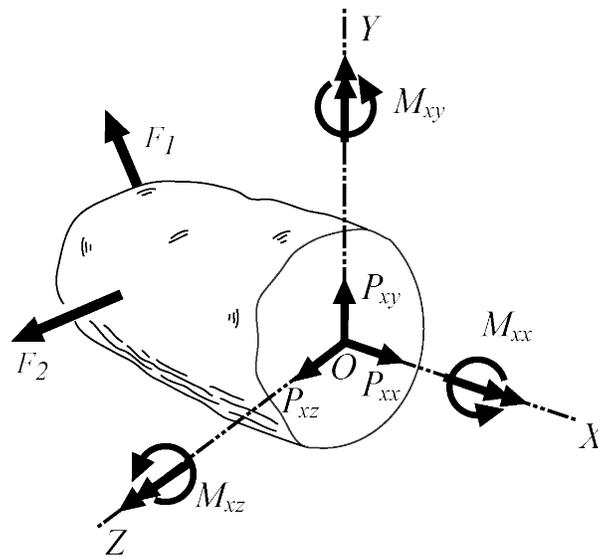


Figura 2.3. Componentes de los efectos internos de la sección de exploración a-a (Pytel & L. Singer, 2008)

Con base en lo anterior y tomando en cuenta que cada componente representa un efecto distinto de las fuerzas aplicadas sobre el sólido, éstos reciben un nombre especial, que se indica a continuación:

- P_{xx} Fuerza axial: Esta componente corresponde la acción de tirar (o de empujar) sobre la sección. Tirar (o jalar) representa la fuerza de extensión o tracción que tiende a alargar el sólido, mientras que empujar representa una fuerza de compresión que tiende a acortarlo.
- P_{xy} , P_{xz} Fuerzas cortantes: Son componentes de la resistencia total al deslizamiento de la porción de sólido a un lado de la sección de exploración respecto a la otra porción.

Uno de los efectos resultantes de la aplicación de una carga se denomina esfuerzo, mismo que es definido como una intensidad de fuerza distribuida en una superficie (P. Popov, 1982), los esfuerzos se miden en unidades de fuerza por unidad de área. El número de esfuerzos existentes son proporcionales a las fuerzas que se apliquen a una unidad de área, para este apartado se darán las características de los esfuerzos a tensión.

La fórmula general de un esfuerzo simple es la siguiente:

$$\sigma = \lim_{\Delta A \rightarrow 0} \frac{\Delta F}{\Delta A} \quad (2.1)$$

Donde F es una fuerza normal y A es el área respectiva alrededor del punto. Se acostumbra denominar a los esfuerzos normales que originan tracción o estiramiento en la superficie, como esfuerzos de *tensión*, (P. Popov, 1982).

Ahora bien, puesto que existen fuerzas cortantes, mismas que actúan paralelamente al plano del área donde se aplica, éstas generan los esfuerzos cortantes, los cuales se expresan de la siguiente manera:

$$\tau = \lim_{\Delta A \rightarrow 0} \frac{\Delta V}{\Delta A} \quad (2.2)$$

Así, en la fórmula, A representa el área y V es la componente de la fuerza paralela la sección del corte.

En lo expuesto anteriormente, se señaló que al aplicarse una carga axial o cortante se provoca un esfuerzo, mismo que afecta no solo al área de aplicación, sino a la longitud del sólido en cuestión, haciéndolo más largo en tensión.

En general, el alargamiento de un segmento es igual a su longitud dividida entre la longitud total L y multiplicada por el alargamiento. Esta cantidad se denomina *alargamiento por unidad de longitud*, o deformación unitaria (Gere & Goodno, 2009) y se denota con la siguiente formula:

$$\epsilon = \frac{\delta}{L} \quad (2.3)$$

Al igual que en los esfuerzos, en las deformaciones si el sólido está en tensión, la deformación unitaria se denomina deformación por tensión, que representa el alargamiento del material. Aunado a esto, sabemos que la deformación unitaria normal es la razón de dos longitudes, por lo tanto, es adimensional, es decir, no tiene unidades.

Una vez conocidas las generalidades y particularidades de las propiedades mecánicas, es oportuno hablar sobre los diversos ensayos que se les pueden realizar a los materiales, esto con la finalidad de determinar cómo se comportan cuando son sometidos a cargas y obtener así diagramas de esfuerzo- deformación, resistencia, elasticidad, etc.

El procedimiento más común es colocar probetas del material a analizar en máquinas de ensayo, aplicar las cargas, mismas que pueden ser estáticas o dinámicas dependiendo de la propiedad mecánica que se desee y finalmente se miden las deformaciones resultantes (por ejemplo, variaciones en la longitud, estructura, diámetro, etc.) del material. En la figura 2.4. se muestra una máquina para ensayos de tensión, la muestra de ensayo se coloca entre las dos mordazas grandes de la máquina y luego se carga a tensión. Después de cargar las muestras, los datos obtenidos son procesados por un software y se registran las deformaciones unitarias y se tabulan y grafican los resultados.

En una muestra apropiadamente diseñada, la falla sucederá en su parte prismática donde la distribución del esfuerzo es uniforme y la probeta está sometida sólo a tensión pura (Gere & Goodno, 2009). Las probetas que son objeto de estudio en ensayos se deben de estandarizar, esto con el fin de comparar los resultados. Los parámetros a estandarizar son: dimensiones de las muestras y los métodos de aplicación de caras.



Figura 2.4. Máquina de ensayos a tensión (Gere & Goodno, 2009)

Una de las principales organizaciones normativas en Estados Unidos de América es la *American Society for Testing and Materials* (ASTM), una sociedad técnica que publica especificaciones y normas para materiales y pruebas. Otras organizaciones normativas son: The American Standards and Association (ASA) y The National Institute of Standards and Technology (NIST).

En las muestras para tensión estándar de la ASTM conforme se aplica fuerza al espécimen, éste responde a dicha carga de manera específica, así, se mide y se registra la carga axial, ya sea de forma automática o bien tomando una lectura de una carátula para determinar con ello su deformación (Gere & Goodno, 2009).

Hablando de un ensayo estático, la carga se aplica lentamente hasta obtener una ruptura en la muestra. Por lo contrario, en un ensayo dinámico la carga se aplica de forma rápida y en ciertos casos, de manera cíclica. Después de realizar un ensayo de tensión y de determinar el esfuerzo y deformación unitaria para variar magnitudes de carga, se traza el diagrama del esfuerzo en función de la deformación unitaria. Ese diagrama esfuerzo-deformación unitaria es una característica del material que se ensaya y contiene información importante sobre sus propiedades mecánicas y el tipo de comportamiento (Gere & Goodno, 2009).

Los diagramas esfuerzo-deformación de los materiales varían en forma considerable, sin embargo, es posible distinguir algunas características comunes entre los diagramas de distintos grupos de materiales, y dividirlos en dos amplias categorías, habrá así materiales dúctiles y materiales frágiles. Los materiales dúctiles como el acero estructural, se caracterizan por su capacidad de fluir a temperaturas normales, mientras que los frágiles como el hierro colado o el vidrio se caracterizan por el fenómeno de que la fractura ocurre sin un cambio notable previo de la tasa de alargamiento. Además, que, la deformación unitaria al momento de la fractura es mucho menor para los materiales frágiles que para los dúctiles (Pierre Beer, Jhonston, Jr., Dewolf, & Mazurek, 2010).

En la figura 2.5 se muestra un gráfico de esfuerzo-deformación; se puede observar que no aparecen representadas las fuerzas y los alargamientos totales, sino las fuerzas unitarias o esfuerzos y los alargamientos unitarios o deformaciones, ya que sólo se pueden comparar las propiedades de una muestra con la de la otra si se reducen los valores observados a unos puntos de referencia comunes (Pytel & L. Singer, 2008).

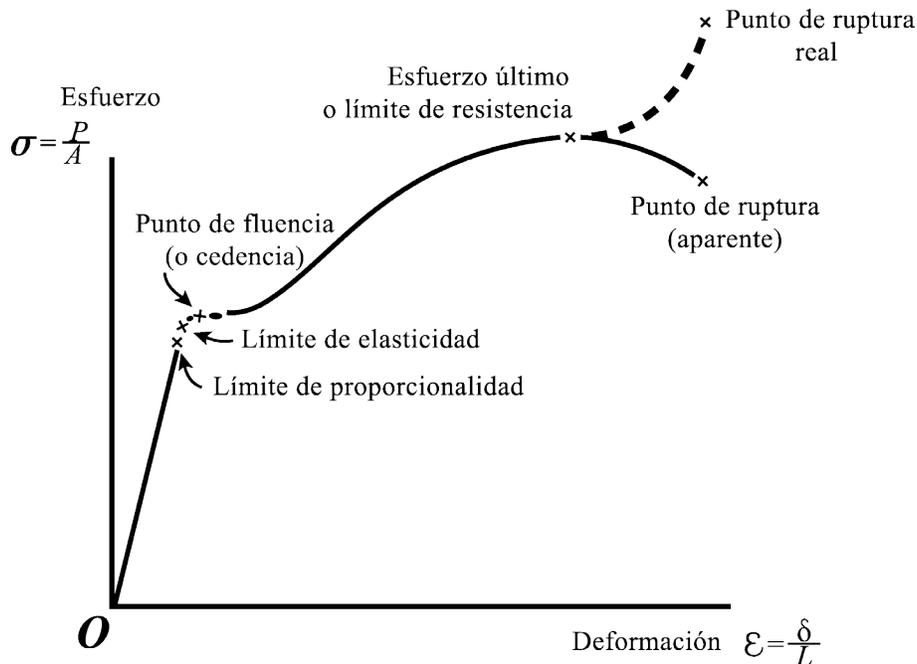


Figura 2.5. Diagrama Esfuerzo-Deformación (Pytel & L. Singer, 2008).

Para poder comprender el diagrama, es pertinente ampliar la información de cada uno de los elementos que le conforman, como se define en (Pytel & L. Singer, 2008):

- En la figura anterior se observa que, desde el origen O hasta un punto llamado límite de proporcionalidad, el diagrama es un segmento rectilíneo, de donde se deduce la conocida relación de proporcionalidad entre el esfuerzo y la deformación.
- El límite de elasticidad (o límite elástico) es el esfuerzo más allá del cual el material no recupera totalmente su forma original al ser descargado.

- El punto de fluencia es aquel en que aparece un considerable alargamiento o fluencia del material sin el correspondiente aumento de carga que, incluso, puede disminuir mientras dura la fluencia.
- El límite aparente de proporcionalidad, está estrechamente asociado al punto de fluencia.
- El esfuerzo último, o bien el límite de resistencia es la máxima ordenada de la curva esfuerzo-deformación.
- El punto de ruptura o esfuerzo en el punto de ruptura, es cuando el material presenta una falla.

Finalmente, para poder interpretar la información que se obtiene con la implementación de ensayos en los materiales, es fundamental comprender el módulo de elasticidad y, por ende, la ley de Hooke.

La ley de Hooke involucra sólo la parte recta del diagrama de esfuerzo-deformación, esta porción indica que el esfuerzo es directamente proporcional a la deformación, y puede escribirse de la siguiente manera:

$$\sigma = E \varepsilon \quad (2.4)$$

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} \quad (2.5)$$

El coeficiente E se denomina *módulo de elasticidad* del material involucrado, o también *módulo de Young*. Como la deformación es una cantidad adimensional, el módulo E se expresa en las mismas unidades que el esfuerzo (Pierre Beer, Jhonston, Jr., Dewolf, & Mazurek, 2010).

Gráficamente E se interpreta como la pendiente de una recta que va desde el origen hasta un punto de posición incierta en un diagrama de esfuerzo-deformación.

Físicamente el módulo elástico representa la rigidez (resistencia a la deformación) del material a una carga impuesta.

Finalmente, y con ayuda de los conceptos anteriores, es pertinente interpretar la información obtenida en los ensayos y conocer las propiedades y el comportamiento mecánico que un material sufre cuando se aplica una carga. Dentro de los materiales susceptibles a que se le realice un ensayo a tensión destacan los materiales compuestos y en específico, aquellos que presentan una matriz polimérica, mismos que se abordarán posteriormente.

2.1.1. Procesamiento por extrusión y moldeado por inyección

La extrusión es un proceso de compresión en el que se fuerza al material a fluir a través de un orificio practicado en un troquel a fin de obtener un producto largo y continuo, cuya sección transversal adquiere la forma determinada por la del orificio. Como proceso para dar forma a polímeros, se emplea mucho para termoplásticos y elastómeros (rara vez para termofijos) para producir en masa artículos tales como tubería, ductos, mangueras y formas estructurales (tales como molduras para ventanas y puertas), hojas y película, filamentos continuos, así como recubrimientos para alambres y cables eléctricos. Para estos tipos de productos, la extrusión se lleva a cabo como proceso continuo; el extruido (producto extruido) se corta después con las longitudes deseadas (Groover, 2007).

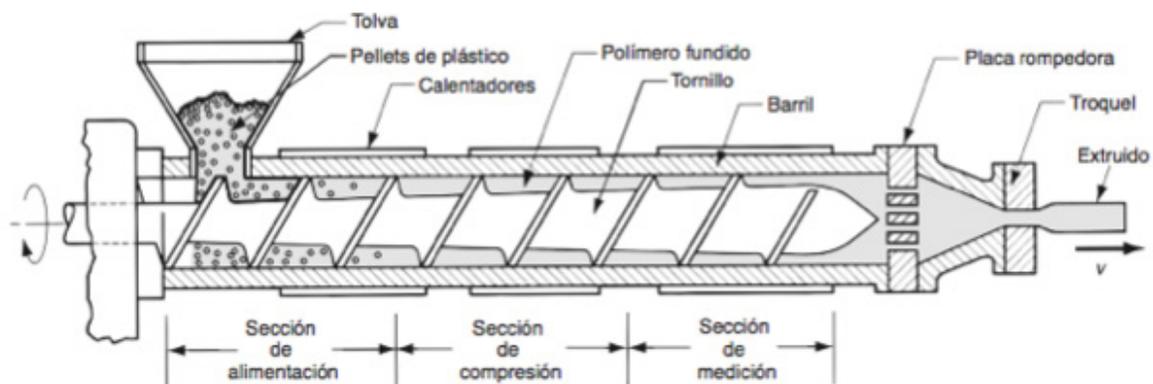


Figura 2.6. Componentes de una máquina de extrusión (de un solo tornillo) para plásticos y elastómeros. (Groover, 2007)

En la figura 2.6. se aprecian los componentes de una máquina extrusora, en donde se señala que en el extremo del barril opuesto al troquel se localiza una tolva que contiene el material que se alimenta. Los *pellets* se depositan por gravedad al tornillo rotatorio, cuya rosca mueve al material a lo largo del barril. Se utilizan calentadores eléctricos para fundir al inicio los pellets solidos; después, la mezcla y el trabajo mecánico del material generará calor adicional, lo que mantiene fundido al material.

El material se hace avanzar a lo largo del barril hacia la abertura del troquel, por medio de la acción del tornillo extrusor. El avance del polímero a lo largo del barril lo hace llegar en última instancia a la zona muerta. Antes de llegar al troquel, el material fundido pasa a través del paquete de la pantalla, una serie de mallas de alambre sostenidas por una placa rígida (llamada placa rompedora) que contiene agujeros axiales pequeños.

El paquete de la pantalla sirve para 1) filtrar los contaminantes y grumos duros del fundido, 2) generar presión en la sección de medición y 3) forzar al flujo del polímero fundido y borrar de su “memoria” el movimiento circular impuesto por el tornillo. Esta última función tiene que ver con la propiedad viscoelástica del polímero; si el flujo no se forzara, el polímero repetiría su historia de girar dentro de la cámara de extrusión, y tendería a rotar y distorsionar el extruido.

Por otra parte, el moldeo por inyección es un proceso con el que se calienta un polímero hasta que alcanza un estado muy plástico y se le fuerza a que fluya a alta presión hacia la cavidad de un molde, donde se solidifica. Entonces, la pieza moldeada, se retira de la cavidad. Es común que el ciclo de producción dure de 10 a 30 segundos, aunque no son raros ciclos de un minuto o más. Asimismo, el molde puede contener más de una cavidad, de modo que en cada ciclo se producen molduras múltiples (Groover, 2007).

Una máquina de moldeo por inyección consta de dos componentes principales: 1) la unidad de inyección de plástico y 2) la unidad de sujeción del molde. La unidad de inyección es muy parecida a un extrusor. Consiste en un barril al que se alimenta desde un extremo por una tolva que contiene un suministro de pellets de plástico. Dentro del barril hay un tornillo cuya operación sobrepasa la del tornillo extrusor en el siguiente aspecto: además de girar para mezclar y calentar el polímero, también actúa como martinete que se mueve con rapidez hacia delante para inyectar plástico fundido al molde.

Una válvula sin retorno montada cerca de la punta del tornillo impide que el fundido fluya hacia atrás a lo largo de las cuerdas de aquel. En una etapa posterior del ciclo de moldeo, el martinete vuelve a su posición original. Las máquinas antiguas de moldeo por inyección usaban un martinete simple (sin cuerdas de tornillo), pero la superioridad del diseño del tornillo recíproco ha llevado a que se adopte con amplitud.

La unidad de sujeción se relaciona con la operación del molde. Sus funciones son:

1. Mantener las dos mitades del molde alineadas en forma correcta una con otra.
2. Mantener cerrado al molde durante la inyección, por medio de la aplicación de una fuerza que lo sujeta lo suficiente para resistir la fuerza de inyección.
3. Abrir y cerrar el molde en los momentos apropiados del ciclo de inyección.

La unidad de abrazadera consiste en dos placas, una fija y otra móvil, y un mecanismo para mover esta. El mecanismo básicamente es una prensa de potencia que funciona por medio de un pistón hidráulico o dispositivos de palanca mecánica de varios tipos.

De forma general, el proceso de moldeo por inyección responde de la siguiente manera: el molde se cierra y sujeta, después se inyecta material fundido a presión hacia la cavidad del molde, una vez terminada esta acción, el plástico se enfría y comienza a solidificarse cuando se encuentra con la superficie fría del molde, acto seguido, el tornillo gira y se retrae con la válvula de retención de vapor abierta para permitir que entre nuevo material al tornillo, entre tanto, el polímero en el molde se solidificó por completo y finalmente el molde se abre y la pieza es expulsada. (Groover, 2007).

A continuación, se muestra una imagen de los componentes principales de una máquina de inyección.

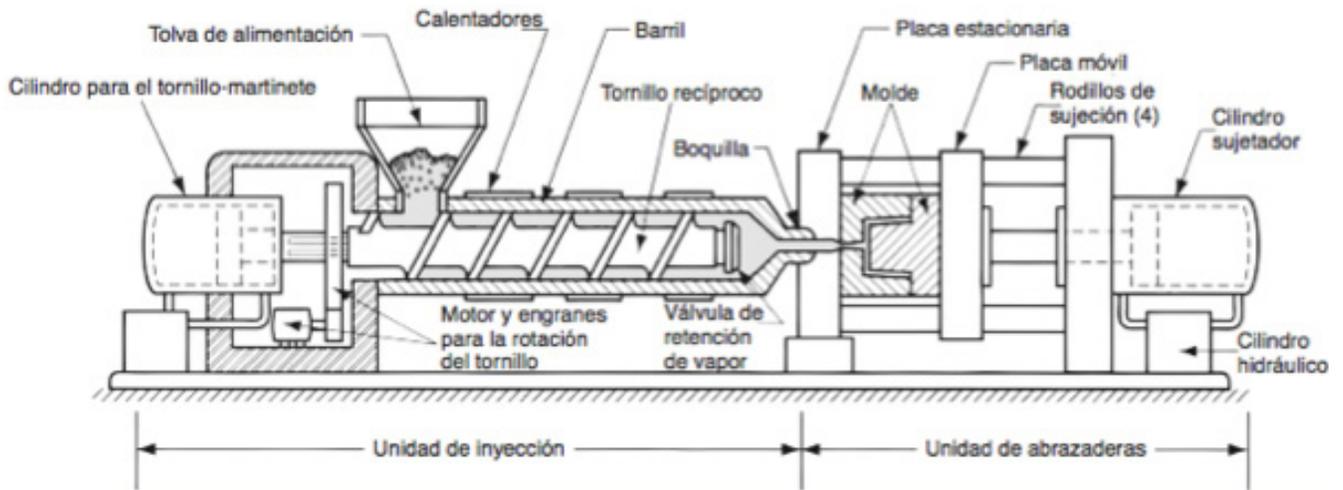


Figura 2.7. Componentes de una máquina de moldeo por inyección.

2.2 Materiales Compuestos o “Composites”

Hoy día, los avances en la tecnología y la necesidad de combatir las problemáticas ambientales crean en el hombre la urgencia por crear e investigar nuevos materiales que sustituyan y mejoren los ya existentes, partiendo de esta idea, surgen los materiales compuestos o también llamados “*composites*”.

El papel de los materiales compuestos en aplicaciones modernas se ha tornado cada vez más importante, debido a que sus propiedades físicas, químicas y mecánicas no se presentan de manera usual en los materiales tradicionales. Los materiales compuestos se obtienen al llevar a cabo combinaciones de materiales de distinta naturaleza para conseguir una mezcla de propiedades mecánicas o físicas.

Un material compuesto es creado por una síntesis sintética de dos o más componentes –una carga seleccionada o agente de refuerzo y una matriz compatible– a fin de obtener propiedades y características específicas. Los componentes al igual que la interface entre ellos usualmente pueden ser identificados físicamente. Las propiedades del material compuesto no pueden ser mostradas por cualquiera de los componentes si es que actúan solos (Rosato, 1982).

Una de las características de los compuestos es que la matriz sirve para mantener el relleno, mismo que soporta las cargas y las uniformiza a lo largo del compuesto. En la actualidad se pueden producir una infinidad de materiales compuestos combinando diferentes materiales de matriz con diferentes rellenos, no obstante, el uso común hace referencia a materiales que utilizan polímeros, metales o cerámicos como matriz y con una amplia variedad de rellenos.

En cuanto a la clasificación de un compuesto, existen diversas variantes, una de ellas, (Mott, 2009) crea grupos representados por el tipo de material de la matriz, descrita a continuación.

- Compuesto de matriz de polímero (PMC, por sus siglas en inglés): Los PMC se utilizan por su alta resistencia y rigidez, baja densidad y relativamente bajo costo en aplicaciones aeroespaciales, automotrices, eléctricas, etc. Los compuestos más comunes incluyen: poliéster – vidrio (fibra de vidrio convencional), epoxi – vidrio, poliamida – vidrio y epoxi – aramida.
- Compuesto de matriz metálica (MMC): Se refieren por su alta resistencia, alta rigidez, resistencia a la abrasión, estabilidad dimensional, conductividad eléctrica y térmica, habilidades para operar a altas temperaturas y tenacidad. Típicamente se utilizan en aplicaciones aeroespaciales y automotrices. Ejemplo de ellos son: AL – Si (Carburo de silicio), Ti – Sic, Al – B, Al – C (carbón), Al – grafito, etc.
- Compuesto de matriz de cerámica (CMC): Se prefieren los compuestos de este tipo por su alta resistencia, alta rigidez y alta tenacidad a la fractura con respecto a los de sólo cerámica y por su capacidad para operar a altas temperaturas y baja dilatación térmica. Son atractivos para hornos, motores y naves aeroespaciales. Los compuestos más comunes incluyen carbón – carbón (C-C), carburo de silicio – carbón (SiC-C), cerámica variada – carburo de silicio, carburo de silicio - aluminosilicato de litio (SiC-LAS).

Por otra parte, y a diferencia de la anterior, se señala que existe una clasificación en base a sus componentes estructurales, siendo esta: fibras (compuestas por fibras en la matriz), laminares (compuesta por capas de materiales y de partículas (compuesta de partículas en la matriz) (Rosato, 1982).

Dentro de los materiales comunes utilizados para la matriz se encuentran las resinas de poliéster, fenólicas, epóxicas, silicones, alcanos, melanina, poliamidas, policarbonato, polietileno, polipropileno y poliestireno.

El objetivo de crear un material compuesto es el combinar características similares y no similares de materiales en orden para desarrollar características deseadas. Desde que los compuestos pudieron ser diseñados para proporcionar una casi ilimitada selección de características, se han empleado en prácticamente todas las industrias (Rosato, 1982).

Dentro de las ventajas que conllevan el uso de compuestos, destacan las siguientes:

- Una cuidadosa selección de la matriz y los materiales de relleno permite obtener una superior resistencia a la corrosión.
- Los cambios dimensionales originados por cambios de temperatura típicamente son mucho menores para los compuestos que para los metales.
- Algunos compuestos tienen una mayor resistencia al desgaste que los metales.
- Las estructuras compuestas a menudo pueden hacerse en una pieza de forma compleja, lo que reduce el número de partes en un producto y el número de operaciones requeridas.

Actualmente se está dando paso a una creciente cultura del aprovechamiento y mejoramiento de los materiales compuestos, de entre todos, destacan en el segmento de artículos de consumo: raquetas de tenis, cascos, rodilleras. En cuanto a equipos de transporte: cuadros de bicicletas, ruedas y asientos de bicicletas, bolsas de aire, estructuras de apoyo en automóviles y carrocerías en camiones. Además, tienen uso en sistemas aeronáuticos, aeroespaciales y en instalaciones eléctricas.

Recientemente se ha mostrado un especial interés en los compuestos reforzados con fibras tanto naturales como sintéticas, también llamadas fibras de alto desempeño o

materiales no tejidos. Las fibras de tipo industrial son utilizadas como reforzamiento de elementos de compuestos flexibles, como en llantas de automóviles o cinturones, también en compuestos rígidos como en los cascos de barcos (Warner, 1995).

Para tratar el tema de fibras de reforzamiento y compuestos reforzados con las mismas, necesitamos conocer y comprender el concepto de fibra, las propiedades y sus ventajas al ser utilizadas como un agente de refuerzo en los materiales compuestos.

Se denominan fibras a aquellos elementos naturales o artificiales con las que se pueden obtener hilados, tejidos, mallas, cuerda y otras manufacturas semejantes. Estas fibras son, generalmente, muy cortas, de menos de 50 mm de largo, con espesores del orden de las 50 micras (Lasheras Esteban & Sánchez-Marin Pizarro, 1971).

Las fibras pueden clasificarse en dos grupos: fibras naturales y artificiales, las fibras naturales son aquellas que se obtienen directamente en la naturaleza solamente con pequeñas manipulaciones mecánicas, mientras que las artificiales son aquellas que se producen por transformaciones químicas. A su vez, las fibras naturales se dividen en fibras que proceden de los tallos de las plantas (como el lino, el cáñamo, yute), procedentes de los frutos de las plantas (ejemplos son: el algodón y el coco) y finalmente las que proceden de las hojas de las plantas (el sisal, el agave, abaca), además de las fibras provenientes de animales, como el pelaje (Lasheras Esteban & Sánchez-Marin Pizarro, 1971).

Dentro de las fibras procedentes del tallo y hojas, encontramos a la fibra de agave, la cual se utilizó en este proyecto para formular un material compuesto. Las fibras que se emplearon fueron tomadas de la especie *Agave Angustifolia* Haw, misma que presenta buen comportamiento cuando se somete a tracción, la fibra se tomó de los residuos provenientes de la industria mezcalera.

Es pertinente recalcar el carácter hidrofílico (afín al agua) de las fibras, ya que cuentan con grupos hidroxilos que atraen a los átomos de hidrógeno. Las fibras son utilizadas frecuentemente en aplicaciones donde se demanden propiedades tanto de tensión y flexión, como de compresión y torsión. La resistencia a la torsión y flexión de una fibra incrementa cuando la sección transversal muestra un área cuadrada (Warner, 1995).

Una de las características de los materiales compuestos reforzados con fibras naturales es que la matriz sirve de forma estructural, proporcionando un soporte lateral a las fibras, las cuales previenen el pandeo o flexión. Por consiguiente, cuando un compuesto está siendo sujeto de fuerzas de tensión a lo largo del eje axial de las fibras, éstas deben de responder con una alta resistencia a la tensión.

Con información documentada en la literatura, se identifica que los trabajos realizados con materiales compuestos tratan sus propiedades físicas o químicas. Para efecto del presente trabajo de investigación y tomando en cuenta la información de las características, clasificaciones y comportamientos que muestran las fibras al ser utilizadas como material reforzante en matrices poliméricas, se realizó una consulta bibliográfica de los estudios existentes para la formulación y desarrollo del presente.

Diversos estudios han demostrado que adicionarle fibras naturales a una matriz polimérica dan como resultado, la creación de un compuesto con características mecánicas particulares, esto se debe a diversas modificaciones que se le pueden realizar tanto a la fibra, como a la matriz. Algunos de los cambios son: utilizar diferentes rangos de concentración y longitudes fibra que servirá como refuerzo, modificaciones a la superficie de la fibra, etc.

Partiendo de esta premisa, (Elzubair & Miguez Suarez, 2012) en el artículo “Comportamiento mecánico de un compuesto de polietileno reciclado y fibra de Piasava” señala que el rango de concentración que presenta un mejor desempeño

mecánico es entre un 15% y un 20%, siendo un 20% la cantidad idónea en donde la resistencia a tensión registró el dato más elevado, además de que la resistencia a la flexión fue relativamente mayor y se incrementó el módulo elástico, aunado a que se utilizaron diámetros de entre 0.25 y 0.71 mm. Otro de los datos relevantes es que las fibras de piasava sufrieron un tratamiento con hidróxido de sodio para aumentar la adhesión con el polietileno reciclado.

Otro de los casos estudiados fue: “Compuesto de polipropileno con fibra de Abaca modificada con una enzima” (Bledzki, Manum, Jaszkiwicz, & Erdmann, 2010) Señalan que el uso de un 30% de concentración de fibra y una dimensión de 5 mm aumenta de un 10 a un 35% la resistencia a flexión y se incrementó de un 5% a un 45% la resistencia a tensión. Una de las particularidades de este estudio radica en que al agregar la enzima “Fungamix” a la fibra de Abaca, esta mejora sustancialmente el comportamiento mecánico del compuesto, incrementando en 35% la resistencia a flexión y en 45% la resistencia a tensión, entre otras propiedades mecánicas estudiadas.

En ambos estudios, observamos la importancia de las fibras como medio de refuerzo en los compuestos poliméricos, que no solo le dan estabilidad, sino que mejoran sus propiedades mecánicas y en otros casos, sus características térmicas, obteniendo un compuesto con propiedades mejoradas.

CAPÍTULO III

DESARROLLO DEL PROYECTO

3.1. Diseño de Investigación

Este capítulo describe las condiciones de procesamiento a las cuales fue obtenido el material compuesto, así como las técnicas y normativas que se aplicaron para los ensayos a tensión y otros métodos para caracterizar los materiales obtenidos, con el fin de obtener un resultado reproducible.

Los parámetros de trabajo se establecieron a partir de datos reportados en la literatura. De la misma forma, para la determinación (concentración y número) de formulaciones, se consideraron los trabajos ya publicados al respecto de materiales compuestos por fibras vegetales y polietileno de alta densidad.

Además se plantea utilizar al polietileno de alta densidad (HDPE) como medio de comparación de resultados.

3.1.1. Técnicas, requerimientos y procesos

Los ensayos aplicados a materiales poliméricos deben de cumplir con diversas normas presentadas por asociaciones internacionales, una de las más reconocidas y que está presente en la mayoría de ensayos, es la ASTM (*American Society for Testing Materials*), la cual especifica los requerimientos que adoptaremos como base al realizar las actividades experimentales en la presente tesis.

Por otro lado, respecto a los ensayos a tensión, se cumplieron los requerimientos y especificaciones postulados en la norma ASTM D638-10. Dicha norma cubre los requerimientos de las propiedades a tensión en plásticos y plásticos reforzados en especímenes bajo condiciones definidas de temperatura, humedad y velocidad del ensayo (ASTM Standards International). Así, dependiendo de la naturaleza del material a analizar, la norma propone las dimensiones y formas para cinco diferentes especímenes.

Para nuestro material se especificó el uso del espécimen tipo V, debido a la naturaleza del material y a la cantidad de material disponible para el presente trabajo. Las dimensiones, tolerancia y el esquema de la probeta de ensayo son mostrados en la Tabla 3.1 y la Figura 3.1.

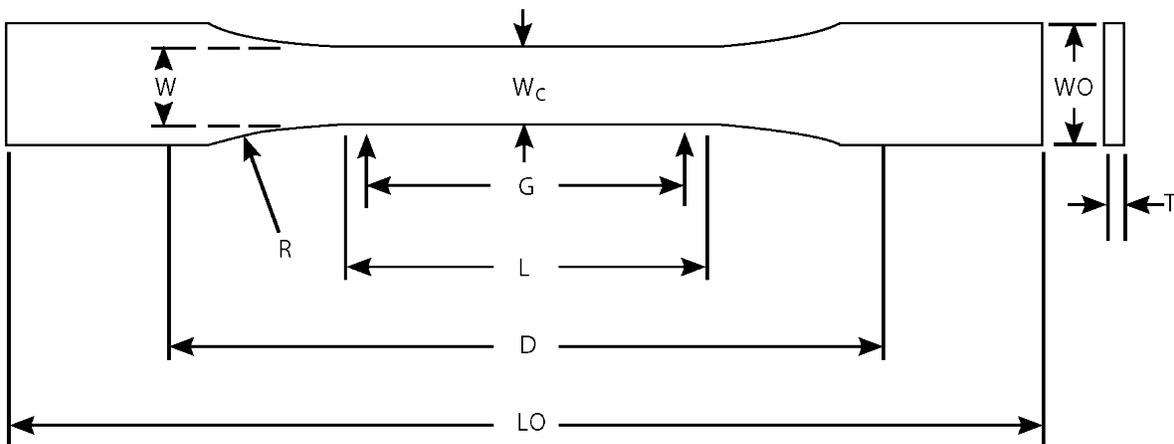


Figura 3. 1 Probeta estandarizada para ensayos a tensión en materiales plásticos.

Donde:

1. G es la longitud de prueba
2. L es la longitud la sección recta
3. D es la distancia entre mordazas
4. LO es la longitud total
5. W_c es el ancho de la sección recta
6. W_0 es el ancho total
7. R es el radio del filete
8. T es el espesor del espécimen

DIMENSIONES	ESPESOR T	TOLERANCIAS
	Especímen tipo V (mm)	
G: Longitud de probeta	7.62	± 0.02
L: Longitud de la sección recta	9.53	± 0.08
D: Distancia entre mordazas	25.4	± 5
LO: Longitud total	63.5	± 0.0
W _c : Ancho de la sección recta	3.18	± 0.03
WO: Ancho total	9.53	± 3.18
R: Radio del filete	12.7	± 0.08
T: Ancho del espécimen	3.2	± 0.4

Tabla 3. 1 Dimensiones de espécimen con grosor T igual a 3.2 mm; Probeta tipo V.

Tomando en cuenta la información anterior y sabiendo que los especímenes son colocados en la máquina de ensayos universales donde estos son sometidos a un esfuerzo axial de tracción progresivo hasta que se produce una falla o fractura en la probeta, se deben de analizar al menos cinco especímenes por cada formulación, descartando aquellas probetas que se rompan por algún defecto, o que se rompan fuera de la sección estrecha *L*.

Si ninguno de los especímenes se consigue romper adecuadamente, se deben hacer reajustes en las formulaciones y repetir las pruebas, a menos que los defectos constituyan una variable a ser estudiada.

La velocidad de la prueba a tracción será relativa al tipo de relación del movimiento de las mordazas y el material. Se adoptará la velocidad de la tabla 3.2, determinando la elección por las especificaciones del material probadas anteriormente. Cuando la velocidad no es especificada, se toma la velocidad más baja con la cual se produzca la falla dentro del lapso de cuatro minutos y medio (ASTM Standars International).

Clasificación	Tipo de Especímen	Velocidad de ensayo (mm/min)	Velocidad de deformación nominal al comienzo de la prueba (mm/mm*min)
Rígido y Semirrígido	V	1 ± 25%	0.1
		10 ± 25%	1
		100 ± 25%	10

Tabla 3. 2 Designaciones para la velocidad en ensayos a tensión.

Como ya se trató anteriormente, la ASTM cuenta con múltiples normativas que estandarizan cada uno de los estudios a realizar en materiales, por lo tanto, los especímenes deben de contar con características específicas, además deben ser acondicionados bajo ciertos parámetros de temperatura y humedad, por lo cual se siguió la norma *ASTM D618-08*, la cual dictamina las condiciones estándar en las que se debe de trabajar al momento de analizar un material plástico, mismas que deben seguirse a fin de analizar el comportamiento mecánico del compuesto que formulamos.

En general, las propiedades físicas y eléctricas de plásticos están influenciados por temperatura y humedad relativa en una manera que afecta materialmente los resultados de las pruebas. A fin de hacer comparaciones confiables entre diferentes materiales y entre diferentes laboratorios, es necesario el estandarizar las condiciones de humedad al igual que las de temperatura en los especímenes que serán sujeto de estudio. Para comprender las pruebas realizadas, se considera pertinente el definir los siguientes términos:

- Temperatura Ambiente: Es aquella temperatura que se encuentra en un rango de 20° hasta 30° C.
- Temperatura Estándar de Laboratorio: Una temperatura de 23°C.

El acondicionamiento de las muestras se lleva acabo de forma típica para los siguientes fines:

1. Para llevar el material en equilibrio con las condiciones normales o promedios de muestreo.
2. Para obtener resultados reproducibles, independientemente de los antecedentes del estudio.
3. Para someter al material a condiciones anormales de temperatura y humedad, a fin de predecir su comportamiento.

Después de revisar las normas existentes para la realización de los ensayos, fue pertinente analizar en la literatura las formulaciones, parámetros de control y condiciones de ensayo. Las tablas donde se especifica dicha información son presentadas en las tablas 3.3 y 3.4 para los procesos de extrusión e inyección, respectivamente.

Nombre del artículo	Temperatura en la Boquilla de la extrusora °C	RPM de mezclado en extrusora (Polietileno-Fibra)
Araújo, J. R., Waldman, W. R., & De Paoli, M. A. (2008). Thermal properties of high density polyethylene composites with natural fibres: Coupling agent effect. <i>Polymer Degradation and Stability</i> (93), 1770-1775.	160	250
Zhao, X., Li, R. K., & Bai, S.-L. (2014). Mechanical properties of sisal fiber reinforced high density polyethylene composites: Effect of fiber content, interfacial compatibilization, and manufacturing process. <i>Composites: Part A</i> (65), 169-174.	220 175	30 50

Elzubair, A., & Miguez Suarez, J. C. (2012). Mechanical behavior of recycled polyethylene/piassava fiber composites. <i>Materials Science & Engineering A</i> (557), 29-35.	150 160 170 180	60
Rattanawijan, W., & Amornsakchai, T. (2011). Polyethylene Composite Fibers. I. Composite Fibers of High-Density Polyethylene. <i>Journal of Applied Polymer Science</i> , 501-509.	120 180 190 215	50

Tabla 3. 3 Condiciones de trabajo en el proceso de extrusión en materiales plásticos.

Nombre del Artículo	Temperatura de Inyección °C
Zhao, X., Li, R. K., & Bai, S.-L. (2014). Mechanical properties of sisal fiber reinforced high density polyethylene composites: Effect of fiber content, interfacial compatibilization, and manufacturing process. <i>Composites: Part A</i> (65), 169-174.	170-180
Elzubair, A., & Miguez Suarez, J. C. (2012). Mechanical behavior of recycled polyethylene/piassava fiber composites. <i>Materials Science & Engineering A</i> (557), 29-35.	230
Araújo, J. R., Waldman, W. R., & De Paoli, M. A. (2008). Thermal properties of high density polyethylene composites with natural fibres: Coupling agent effect. <i>Polymer Degradation and Stability</i> (93), 1770-1775.	175 190 220
Rattanawijan, W., & Amornsakchai, T. (2011). Polyethylene Composite Fibers. I. Composite Fibers of High-Density Polyethylene. <i>Journal of Applied Polymer Science</i> , 501-509.	185

Tabla 3. 4 Condiciones de trabajo en el proceso de inyección en materiales plásticos.

3.1.2. Metodología del modelo experimental

Para los ensayos a tracción, se utilizaron especímenes compuestos de los siguientes elementos:

- Matriz Polimérica: Pellets de polietileno de alta densidad, marca *INDUMIX*, con una densidad de 945 kg/m^3 , peso molecular medio de $250,000 \text{ g/mol}$, con dimensiones de: $5 \times 5 \times 3 \text{ mm}$ respectivamente, mismos que se muestran en la figura 3.2.
- Elemento de refuerzo mecánico: Fibras de bagazo de la especie *Agave Angustifolia* Haw donada por el C. Honorio Jiménez, propietario del palenque *LANII*, ubicado en la localidad de Santiago Matatlán, Oaxaca, después del proceso de elaboración del mezcal, tal como se muestra en la figura 3.2.

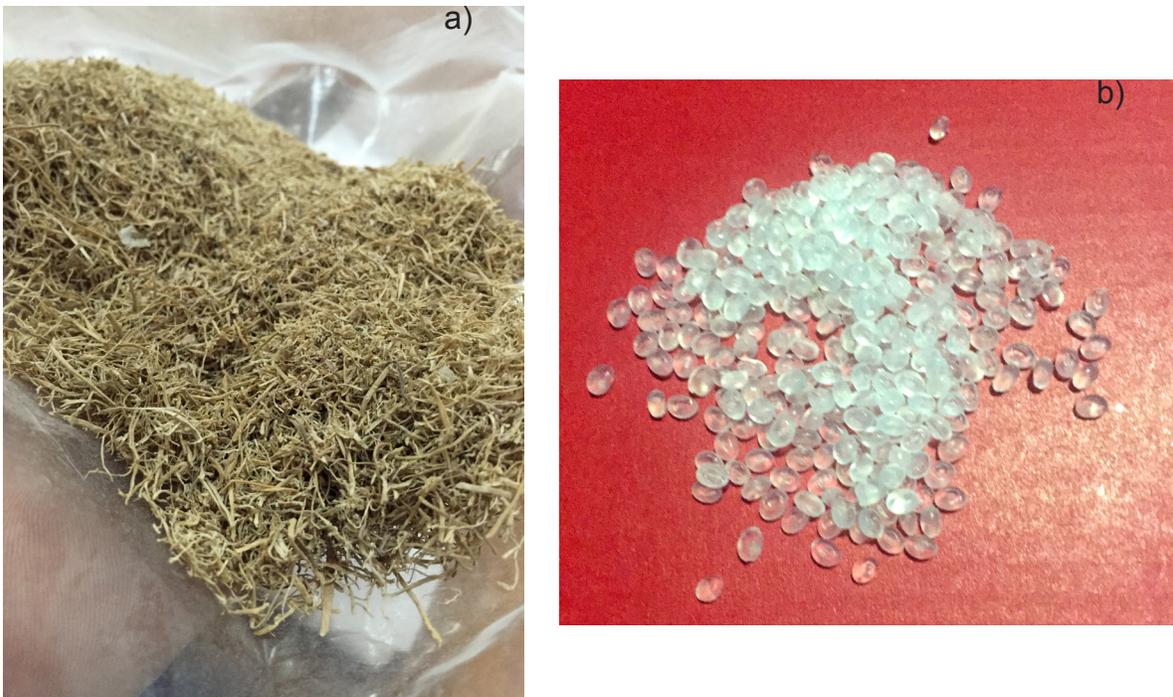


Figura 3. 2. a) Muestra de fibras de bagazo. b) Pellets de polietileno de alta densidad.

Las formulaciones son presentadas en la Tabla 3.5, indicando su nomenclatura. En ella, la concentración es expresada en porcentaje en peso de fibras de agave.

Formulación	Fibra de Agave (% en peso)	Polietileno de Alta Densidad (% en peso)
HDPE	0	100
CF1	5	95
CF2	7.5	92.5
CF3	10	90

Tabla 3. 5 Concentraciones de fibra y polietileno formuladas para la elaboración del extruido.

3.1.2.1 Proceso para la obtención del material compuesto

Tratamiento de las fibras

Las fibras de bagazo de agave mezcalero, de la especie *Agave Angustifolia* Haw, fueron sometidas a tratamientos físicos y químicos para eliminar cualquier residuo proveniente de la producción del mezcal, así mismo, para modificar su superficie y carácter hidrofílico, con el fin de lograr con ello, una mayor adhesión entre el polietileno de alta densidad y la fibra. Debido a que una buena adhesión interfacial, normalmente favorece las características mecánicas finales del material compuesto (Chávez Gutiérrez, De Paoli, & Felisberti, 2012).

Primeramente, la fibra proveniente del palenque fue segmentada en tramos de 2 cm aproximadamente (figura 3.3 a-b), ya que su longitud inicial fue de 10 cm, lo cual significaba un inconveniente debido a que con esa longitud las discos de corte del molino se atascaban. Después este paso, las fibras fueron colocadas en la tolva de un molino para granos con manivela convencional (figura 3.3 c) para reducir su tamaño, pasando de 2 cm, a tramos menores a 7 milímetros.

Una vez realizada la molienda, se utilizó un tamiz marca *ELVEC* del número 4 (figura 3.3. d), el cual mostró una abertura de 4760 micrones (4.76 mm). Las fibras se colocaron poco a poco a una razón de 10 g y se tamizó en la malla, descartando las fibras mayores a 4.76 mm. Este proceso se repitió por 4 veces para asegurar que la mayoría de las fibras tuvieran la dimensión especificada (figura 3.3 e-f).



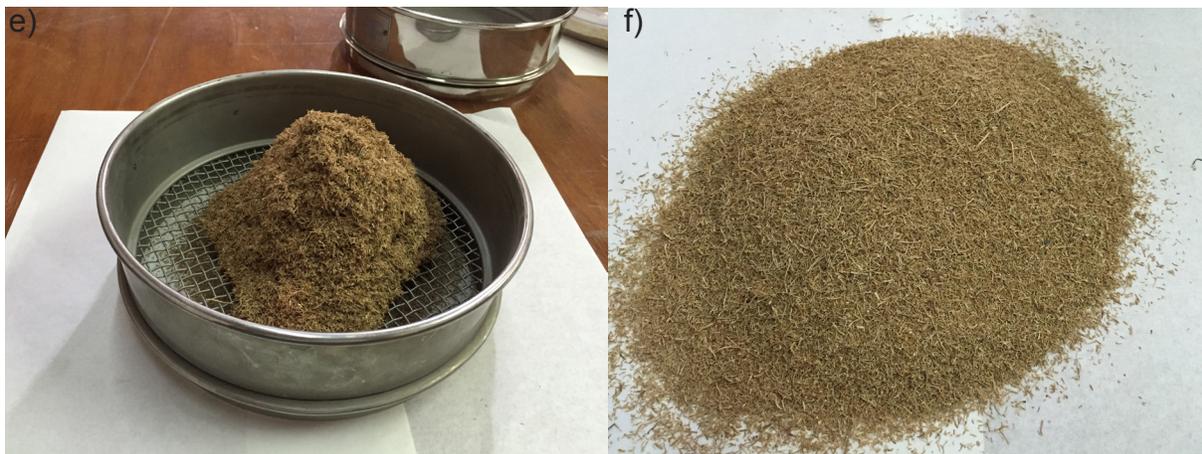


Figura 3.3. a) Fibras donadas por el palenque LANII, b) Segmento de fibra con longitud de 2 cm una vez molida por el molino para granos. c) Molino para granos convencional, d) Tamiz ELVEC número 4, e) Tamizado de fibras para obtener la dimensión requerida, f) Fibras tamizadas.

Al término, las fibras fueron pesadas y lavadas con agua de garrafón marca “Real Fortín”. Al momento de pesar, las fibras mostraron un peso de 92.4 g. Para lavarlas, todas las fibras se introdujeron en un vaso de precipitados de 1 litro y se enjuagaron repetidas veces, en la figura 3.4. se aprecia el cambio de tonalidad del agua dependiendo del enjuague, mientras que en la tabla 3.6. se señala el número de estos, así como la cantidad de agua ocupada.

Fibra	Número de Enjuague	Cantidad de Agua ml
	1-7	400
8	650	
9-10	400	
	Agua Total	4250

Tabla 3. 6 Número de Enjuagues a las que fueron sometidas las fibras para su limpieza.

Una vez concluido el paso anterior, las fibras fueron colocadas en una charola de plástico, se extendieron y se dejaron secar al sol por 48 horas.

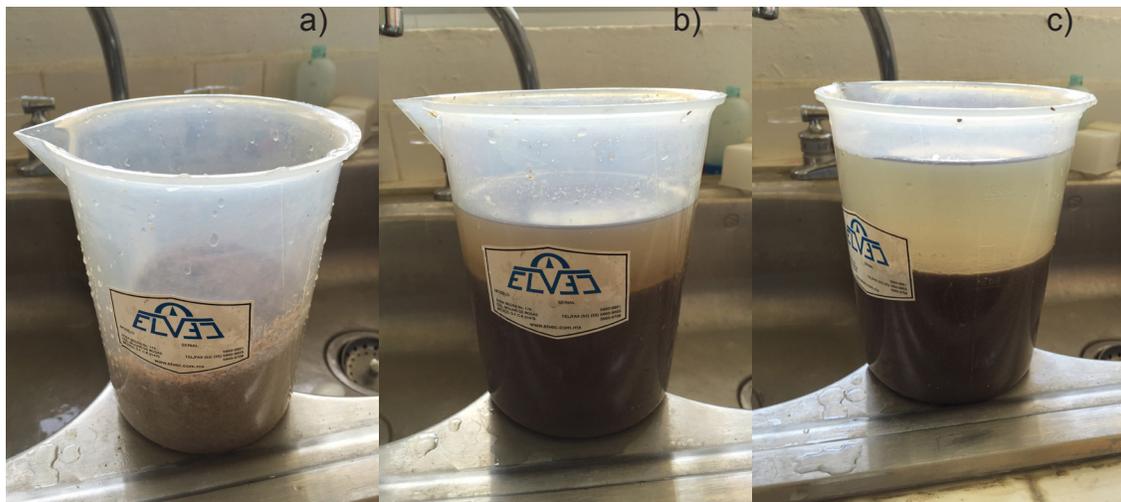


Figura 3. 4. a) Fibras colocadas en el vaso de precipitados antes del primer enjuague, b) Enjuague número 2, c) Enjuague número 8).

Ya secas, las fibras se colocaron en bolsas resellables y se pesaron con ayuda de una Balanza Electrónica de Precisión marca *OHAUS* (peso de fibras de 91.079 g). Una porción de las fibras fue utilizada para realizar el tratamiento superficial, se conservó la otra porción como blanco para tener un comparativo en las mismas, siendo 90 gramos la cantidad de fibra que fue tratada.

A continuación, se realizó el tratamiento superficial a las fibras, las cuales fueron sumergidas en una solución de hidróxido de sodio al 5%, se decidió este compuesto por la facilidad de manejo de las sustancias y porque diversos estudios presentes en la literatura señalan al tratamiento con NaOH como la limpieza más profunda y reductor de la condición hidrofílica de las fibras naturales, así también, para mejorar la compatibilidad con la matriz polimérica, que es hidrofóbica, permitiendo una mejor adhesión entre ambos componentes y con ello, una mejor respuesta a los ensayos de tensión por parte del HDPE (Chávez Gutiérrez, De Paoli, & Felisberti, 2014).

Para obtener la solución al 5% de NaOH, se utilizó un 1 litro de agua destilada marca *HYCEL* y 50 g de hidróxido de sodio marca *MEYER* en escamas. En un matraz aforado de un litro se colocó el hidróxido y poco a poco fue vertida el agua,

disolviendo las escamas con un agitador de vidrio. Después de esto, la solución se dejó reposar y se almacenó en un recipiente de plástico.

Posteriormente, las fibras lavadas y pesadas se colocaron en un vaso de precipitados y se les agregó 600 ml de solución de hidróxido. Durante la inmersión de las fibras se utilizó un mezclador con agitador de hélice marca *IKA RW20* (figura 3.5 a.), donde fue montado en la base el vaso de precipitados y se accionó el mezclador por cuatro horas para la distribución del hidróxido y las fibras, la rotación de trabajo fue de 556 RPM (figura 3.5 b.).



Figura 3. 5. a) Mezclador IKA RW20 con el vaso de precipitados montado en su base, b) Rotación de trabajo aplicada.

Al finalizar el tiempo de inmersión de las fibras en la solución (240 minutos), estas fueron neutralizadas con una solución de ácido acético al 5%. Se ocuparon tiras indicadoras de pH, con el fin de verificar que las fibras tratadas, no tuvieran residuos de la base utilizada.

A continuación, se muestra la tabla de pH que presentaron las fibras:

Fibra	pH después de haber agregado ácido acético	pH después del lavado con agua destilada
		4

Tabla 3. 7 Resultados de la toma de pH en las fibras al momento de hacer el tratamiento y después de haber realizado el lavado.

Finalmente, y después de haber tomado la lectura de pH de las fibras, estas fueron extendidas en una charola de plástico y se dejaron secar al sol por un periodo de tiempo de 10 horas, tal como se señala en la figura 3.6.

Cabe señalar que para este proceso, la totalidad de actividades, manejo de sustancias y maquinaria se realizaron bajo normas aplicables de higiene y seguridad.



Figura 3.6. Fibras extendidas después de ser estabilizadas con ácido acético para ser secarse al sol.

Microscopía Electrónica de Barrido

En el presente trabajo se estudiaron 2 conjuntos de muestras, estas fueron: fibra sin tratamiento y fibra con tratamiento alcalino, para observar su morfología y tamaño mediante microscopía electrónica de barrido. Las micrografías fueron realizadas en un Microscopio Electrónico de Barrido marca *JEOL*, modelo *JSM-IT300*, bajo la modalidad de *Detector de Electrones Secundarios* SED, operado a 5, 13, 15 kV de aceleración respectivamente y teniendo un filamento de emisión de electrones de tungsteno, mismo que se muestra en la figura 3.7.

Cabe destacar que las fibras visualizadas fueron sometidas a un proceso llamado *Pulverización Catódica*, donde se les dispersó una capa de oro puro con un grosor de 20 nanómetros por 15 segundos a 30 amperes, con la finalidad de mejorar la dispersión de electrones y evitar con ello la distorsión de las micrografías provocadas por cargas estáticas. Dicho proceso se realizó en un pulverizador marca *Denton Vacuum*, modelo *Desk V*, el cual se aprecia en la figura 3.8.



*Figura 3.7 Microscopio electrónico de barrido
JEOL JSM-IT300.*



*Figura 3.8 Pulverizador catódico
DENTON Vacuum Desk V.*

Porcentaje de humedad de las fibras

Se evaluó el porcentaje de humedad de las fibras, antes y después del tratamiento alcalino, con el fin de estudiar el comportamiento hidrofílico de las fibras. La técnica consiste en determinar la masa inicial de la muestra, para posteriormente colocar la muestra en horno a una temperatura de 100°C y pesar la muestra en distintos intervalos, hasta que no exista variación significativa del peso de la muestra, la lectura final del peso se coteja con el peso inicial y se obtiene la diferencia, para así, poder conocer el porcentaje de humedad absorbida por las muestras.

El procedimiento fue el siguiente: Se hicieron pequeños recipientes de aluminio, con dimensiones: 5 X 5 X 1.5 cm (*figura 3.9 a*), donde se colocaron 0.5 g de fibra, se hicieron 3 réplicas para cada una de las muestras (fibras con y sin tratamiento) a fin de unificar resultados.

Al tener los recipientes con el peso ya indicado, se procedió a introducir dichas muestras en un horno de convección por gravedad modelo *H-33*, marca *BG*, mismo que se muestra en la *figura 3.9 b*; el cual, previamente fue calentado a 100 °C, cabe señalar que la temperatura fue constante. Las muestras fueron pesadas en una balanza electrónica de precisión marca *TECNO COR*, con capacidad de: 600 g x 0.01 g. Al utilizar las máquinas se siguieron las normas de seguridad aplicables.



Figura 3.9 a Recipientes de aluminio para la colocación de muestras.



Figura 3.9 b Horno de convección por gravedad BG, H-33

Extrusión

El mezclado de los componentes por el método de extrusión se realizó en las instalaciones del Laboratorio de Alimentos, del Centro de Investigación y de Estudios Avanzados (CINVESTAV) del Instituto Politécnico Nacional, Unidad Juriquilla, en el estado de Querétaro.

El material compuesto fue preparado con pellets de polietileno de alta densidad marca *INDUMIX*, con una densidad de 945 kg/m^3 y un peso molecular medio de $250,000 \text{ g/mol}$. El HDPE fue mezclado manualmente con fibra en los porcentajes: 5, 7.5 y 10%, debido a que, para tener resultados proporcionales, se reportan al menos 3 concentraciones diferentes distribuidas equitativamente una de la otra. Para esta actividad se utilizó una extrusora marca *PROTOTIPO CINVESTAV*, de un solo tornillo, con una configuración 1:1 y longitud de 60 cm, con un inversor de corriente alterna marca *E-TRACK*, modelo *XFC2000 Series*, con una concentración máxima de mezcla del **10%**, mostrada en en la figura 3.10.



Figura 3.10 Extrusora Prototipo CINVESTAV.

El material compuesto fue procesado bajo las siguientes condiciones: tres zonas de calor (180 – 181– 180 °C respectivamente), con velocidad de mezcla de 18 RPM. Para enfriar el material compuesto, una vez extruido se hizo pasar por un depósito

con agua corriente, a una temperatura de 23 °C. Después de haber obtenido el material, se segmentó y se dividió a manera de pellets con una longitud de 5 mm con ayuda de una cizalla manual.

En la figura 3.11 a y b, es posible apreciar el troquel de la extrusora y las tres zonas de temperatura, así como el perfil extruido, además del depósito para enfriar el material compuesto.



Figura 3.11 a. Troquel y boquilla de la extrusora.

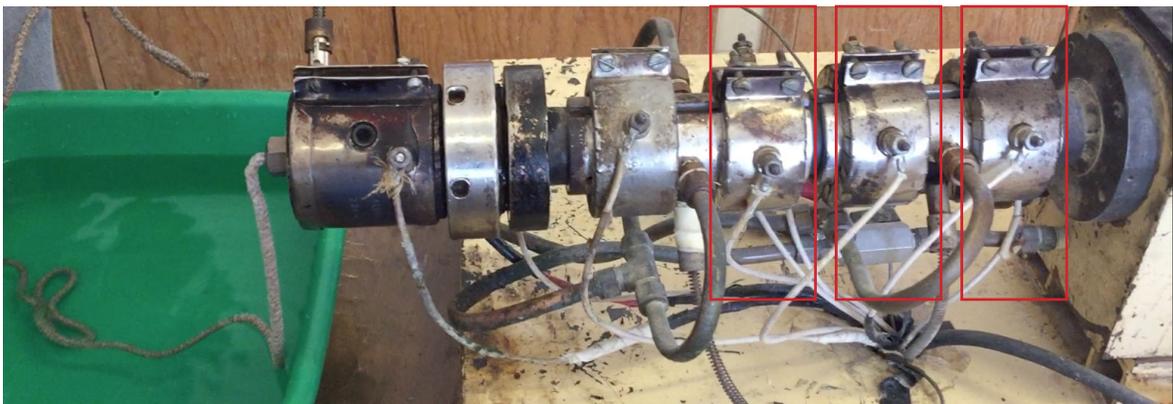


Figura 3.11 b. Zonas de calor en la extrusora PROTOTIPO CINVESTAV (señalados en rojo), así como depósito de enfriamiento del material compuesto.

Por otra parte, como ya se señaló, en la figura 3.12a es posible apreciar los segmentos del material extruido, mismos que se almacenaron en una bolsa y posteriormente, se dividieron en pellets de 5 mm de largo por 5 mm de diámetro, ya que el troquel tuvo una sección transversal circular, los cuales se visualizan en la figura 3.12b.



Figura 3.12a Material extruido continuo.



Figura 3.12b Material segmentado con dimensiones: 5mm de longitud y 5mm de diámetro.

Elaboración del Molde

El molde utilizado para la inyección de los especímenes de cada formulación se realizó en las instalaciones del Laboratorio Avanzado de Manufactura, perteneciente a la Universidad Tecnológica de la Mixteca.

El material de las dos cavidades del molde fue *ALUMINIO RECTIFICADO*, la geometría de la probeta fue modelado en el software CAD *SolidWorks 2015* bajo las especificaciones de la norma ASTM D-638 10 (**ver anexo A**) y se generó el código de maquinado en el software CAD-CAM *VISI 2012*.

Una vez obtenido el código, se ejecutó en un centro de maquinado vertical CNC marca Microcut CHALLENGER, modelo MM-430 (*figura 3.13*), bajo las siguientes condiciones: revolución del usillo: 1200 RPM.; herramienta de desbaste: cortador plano de carburo de tungsteno con 2 gavilanes, con una medida de 1/8 de pulgada (*figura 3.14*); tiempo de maquinado: 2 horas en cada cavidad.

Durante la estancia en el taller, la manipulación de herramientas y operación de maquinaria, se siguieron las normas de seguridad señaladas por el encargado de taller.



*Figura 3.13 Centro de maquinado vertical CNC,
Microcut Challenger MM-430.*

Los registros del molde se realizaron en un taladro de banco (figura 3.15a), en total se realizaron 4 barrenos dispuestos a media pulgada de cada paño exterior de la placa de aluminio, con una medida de $13/64$ " y machuelo de $1/4 - 24$ a lo largo del barreno; se utilizaron cuatro tornillos de acero de $1/4$ " con cuerda estándar.



Figura 3.14 Porta herramientas y cortador plano de tungsteno de $1/8$ ".



Figura 3.15 Taladro de banco con una de las cavidades montadas en la platina.

Tanto el canal de alimentación del molde, como la perforación donde se coloca la boquilla de la inyectora se realizaron en el Taller de Materiales y Procesos Plásticos de la misma institución, en un taladro de banco, con cortadores de las siguientes medidas: Entrada para boquilla de inyectora: cortador plano con 4 gavilanes de carburo de tungsteno de 1/2", mientras que para el canal de alimentación se hizo uso de un cortador plano con 4 gavilanes de carburo de tungsteno, de 1/8". La imagen de ambas cavidades se aprecian en la figura 3.16, así como la ubicación de los componentes del molde.

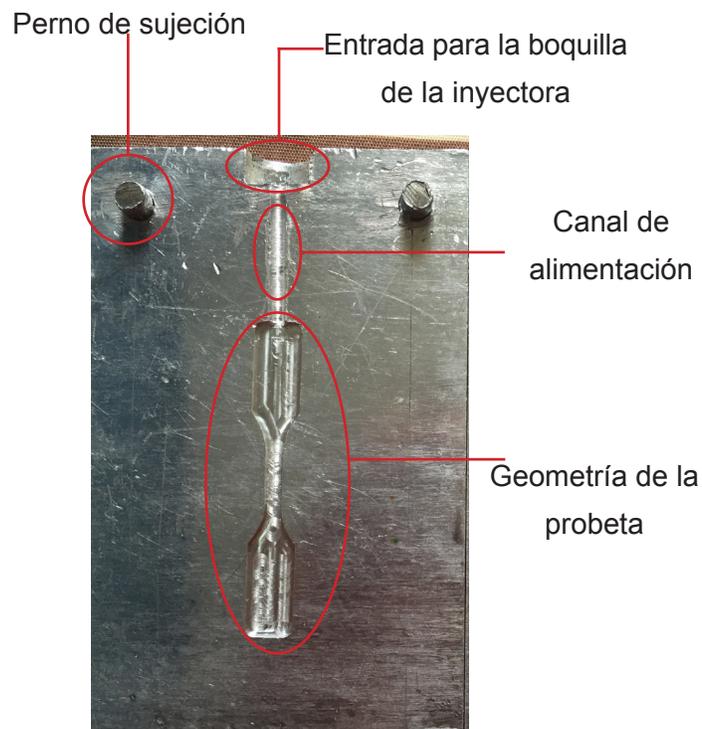


Figura 3.16 Cavidades del molde utilizado en la inyección de probetas, así como las partes que lo conforman.

Inyección del Material Compuesto

Para el moldeo por inyección de los especímenes del material compuesto, se utilizaron las instalaciones del Taller de Materiales y Procesos Plásticos pertenecientes a la Universidad Tecnológica de la Mixteca.

El equipo empleado en la conformación de las muestras fue una inyectora vertical de émbolo, a una temperatura de 190 °C, variando hasta 200 °C, esto con el fin de disminuir las burbujas formadas en los especímenes, la máquina se muestra en la figura 3.17. Cabe señalar que el proceso de inyección fue realizado bajo lo expuesto en el reglamento del taller, siguiendo normas de seguridad e higiene.

Para inyectar una muestra, se colocó el molde debajo de la boquilla de inyección y se accionó el sistema de sujeción de la máquina, después se bajó la tolva y se hizo pasar el material, con un tiempo de inyección promedio de 4 segundos hasta llenar las cavidades del molde, después se levantó la tolva y se retiró el molde para liberar la pieza.



Figura 3.17 Inyectora vertical de émbolo.

Una vez retirado el espécimen, con ayuda de una herramienta de corte, se removió el excedente de material y se procedió a inyectar nuevamente. En la figura 3.18 se observa el molde con la muestra de polietileno de alta densidad, sin el canal de alimentación, ni el excedente de material.



Figura 3.18 Muestra inyectada aún dentro de la cavidad del molde.

En la figura 3.19 se aprecia un conjunto de muestras inyectadas con el material compuesto de la formulación CF2, mismas que fueron evaluadas a fin de descartar los elementos que no cumplían con lo estipulado en la norma ASTM D-638.



Figura 3.19 Conjunto de muestras con formulación CF2.

Ensayos a tensión

Los ensayos a tensión de cada uno de los especímenes, fueron realizados en las instalaciones del Laboratorio de Pruebas Mecánicas del Centro de Física Aplicada y Tecnología Avanzada CFATA, Campus Juriquilla, de la Universidad Nacional Autónoma de México.

Para llevar a cabo las pruebas mecánicas, se empleó una máquina de ensayos universales marca *Zwick/Roell*; modelo: *Z005*, equipada con dos celdas de carga: una con capacidad máxima de 5000 N y una celda con capacidad máxima de 10000 N, a una velocidad de prueba de 100 mm/min. El ensayo se realizó a una temperatura promedio de 20.1 °C y con una humedad del 34%, aplicando una cédula de carga de 5 kN. La figura 3.20a señala las mordazas de la máquina, así como la muestra de HDPE al iniciar el ensayo, mientras que la 3.20b, el monitor donde se aprecia el software y las gráficas obtenidas por las muestras. En el Anexo A se muestran imágenes complementarias.



Figura 3.20a Muestra de HDPE durante el ensayo a tensión.

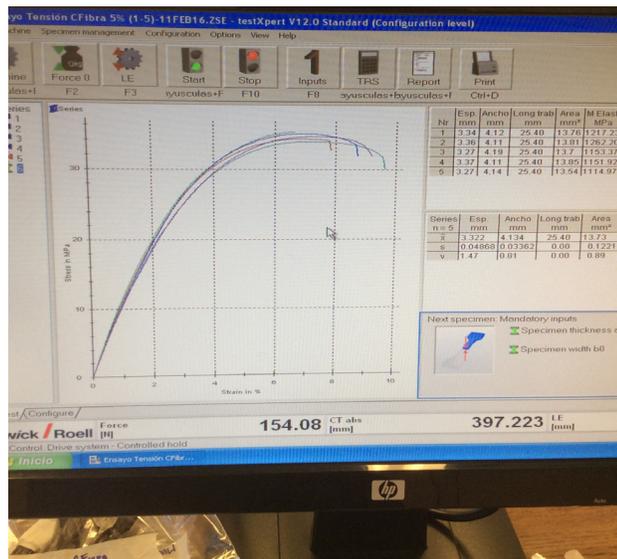


Figura 3.20b Resultados arrojados por el software de la máquina de ensayos universales.

3.2 Análisis de los resultados

De acuerdo a los procesos y estudios descritos en la metodología del proceso experimental realizados en este trabajo de investigación, se obtuvieron los siguientes resultados.

3.2.1. Contenido de humedad:

Se muestra en la tabla 3.8 los resultados correspondientes al contenido de humedad de las fibras sin tratamiento con tratamiento superficial. Observando que la diferencia en la cantidad de humedad presente en las fibras tratadas y no tratadas, no es significativa. Por lo que el tratamiento con solución alcalina no modificó significativamente el carácter hidrofílico de las fibras.

Tipo de Fibra	Número de muestra	Peso antes de ingresar al horno (g)	Peso a 4 horas (g)	Peso a 24 horas (g)	Diferencia de peso %
Sin tratamiento	1	0.50	0.49	0.48	2.17
	2	0.50	0.50	0.50	0.00
	3	0.50	0.49	0.48	2.08
Con tratamiento	1	0.50	0.48	0.48	1.96
	2	0.50	0.49	0.49	0.94
	3	0.50	0.48	0.48	1.92

Tabla 3. 8 Porcentaje de humedad en las muestras con y sin tratamiento con NaOH.

Desviación Estándar para prueba en fibras sin tratamiento			
Diferencia de peso de las fibras	Media de la Muestra	Desviación respecto a la media	Desviación respecto a la media elevada al cuadrado
0.02	0.0133	0.0067	0.00004489
0.00		-0.0133	0.00017689
0.02		0.0067	0.00004489

Concluyendo así, que la cantidad de agua absorbida por la fibra fue de:

$$0.0133 \pm 0.0094 \text{ g.}$$

Para la absorción de fibras con tratamiento tenemos la siguiente muestra:

Desviación Estándar para prueba en fibras con tratamiento			
Diferencia de peso de las fibras	Media de la Muestra	Desviación respecto a la media	Desviación respecto a la media elevada al cuadrado
0.02	0.0167	0.0033	0.00001089
0.01		0.0067	0.00004489
0.02		0.0033	0.00001089

Concluyendo así, que la cantidad de agua absorbida por la fibra fue de:

$$0.0167 \pm 0.0047 \text{ g.}$$

Este resultado señala que las condiciones de inmersión de las fibras en la solución alcalina debe de variar tal como se señala en las conclusiones, para que con ello, la condición hidrofílica tenga un comportamiento más aprovechable, sin embargo, se verá en apartados posteriores, que el tratamiento benefició en otros estudios a las fibras y a la adhesión interfacial con la matriz.

3.2.2. Microscopía Electrónica de Barrido

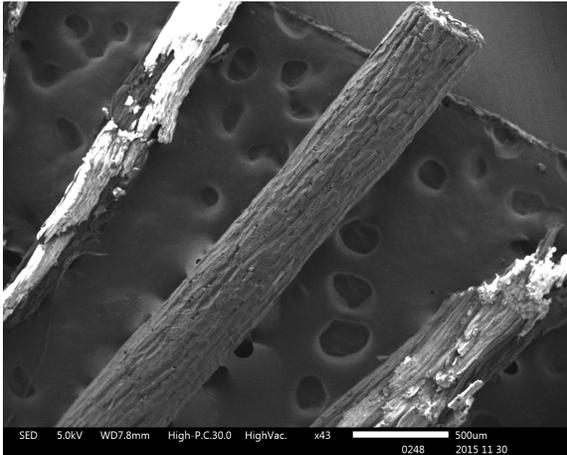
Se realizaron dos sesiones de microscopía electrónica de barrido; en la primera se identificó la condición física de las fibras, su estructura externa, longitud y diámetro; en la segunda sesión se observó la interfaz matriz-fibra mediante el corte de una muestra inyectada con ayuda de una cortadora de disco, así también, se observaron las superficies de ruptura de los especímenes.

A continuación, se muestran las microscopías señaladas, así como su interpretación.

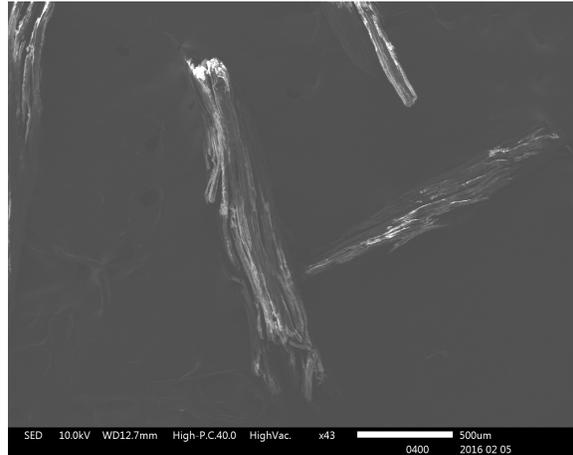
La figura 3.21 muestra un comparativo de las fibras no tratadas (izquierda) y tratadas (derecha) con solución alcalina, en las primeras, se observaron residuos en la superficie de las fibras, mismos que se señalan con elipses rojas en la micrografía c) de la figura 3.21. Estos residuos no fueron observados en las fibras tratadas (micrografía f, figura 3.21), de lo cual se puede concluir que el tratamiento resulto eficiente para retirar impurezas de la superficie de las fibras, como ceras y otros componentes como azúcares que forman parte del proceso de fermentación de las fibras de agave para la producción del mezcal, derivada de esta limpieza superficial, se espera una mejor interacción en la interfaz matriz polimérica/fibra de agave.

Además de esto, se observa un cambio en la morfología de las fibras tratadas, observando estructuras desgastadas en comparación de las fibras sin tratamiento, las cuales se presentan como fibras de forma totalmente cilíndrica (observar micrografía a), b), d) y e)).

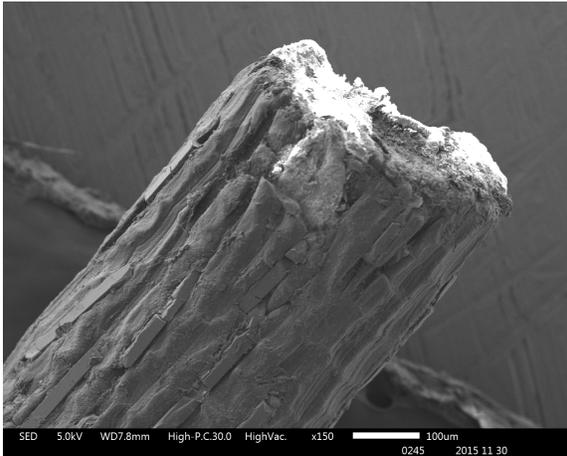
a)



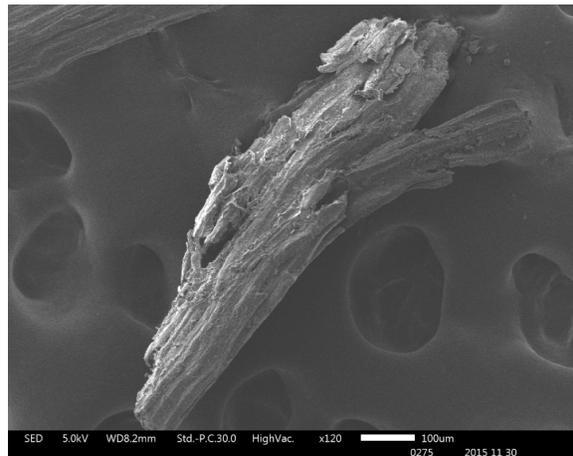
d)



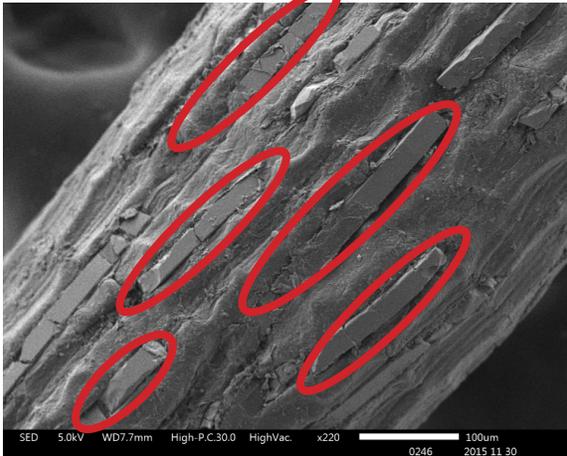
b)



e)



c)



f)

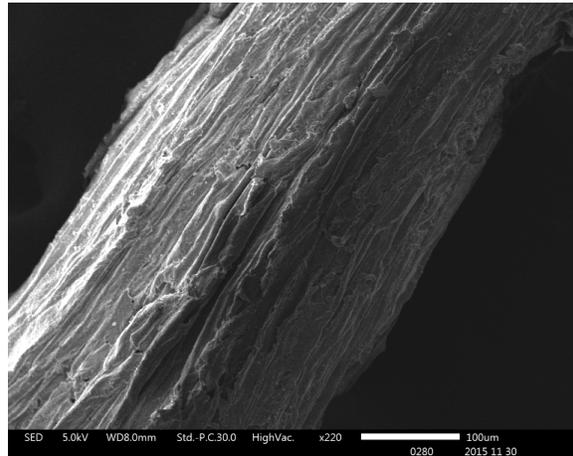


Figura 3. 21 a), b), c) Corresponden a las fibras sin tratamiento con hidróxido, mientras que d), e), f) se atribuyen a las fibras con tratamiento con hidróxido.

Debido al cambio de morfología, se realizó la medición de la longitud y del diámetro de las fibras para las fibras no tratadas y con tratamiento (Figura 3.21). Los resultados son presentados en las tablas 3.9 y 3.10, respectivamente.

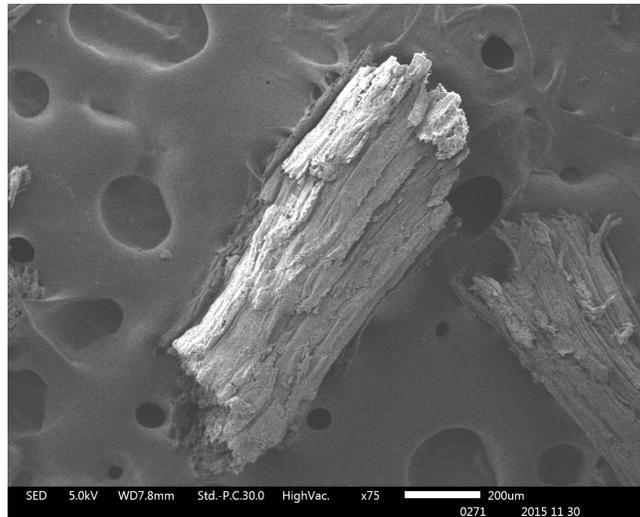


Figura 3. 22 Acercamiento a una fibra para determinar diámetro y longitud.

Fibra Sin Tratamiento de Hidróxido

Número de Muestra	Longitud de fibra (mm)	Diámetro de Fibra (mm)
1	1.4649	0.3714
2	3.1286	0.3510
3	1.0986	0.5522
4	3.0804	0.3020
5	3.8917	0.1346
6	2.2061	0.3082
7	1.7512	0.4355
8	0.9492	0.5240
9	3.4965	0.4323
10	1.8496	0.4621

Tabla 3. 9 Tabla con el registro de longitud y diámetro de las fibras sin tratamiento.

Fibras con Tratamiento de Hidróxido

Número de Muestra	Longitud de fibra (mm)	Diámetro de Fibra (mm)
1	1.1907	0.3127
2	1.8303	0.3699
3	3.0962	0.2440
4	2.3520	0.3062
5	1.7934	0.4710
6	2.8727	0.2873
7	2.1239	0.3220
8	1.5764	0.4875
9	2.9780	0.2875
10	2.1884	0.3307

Tabla 3. 10 Tabla con el registro de longitud y diámetro de las fibras con tratamiento.

Al conocer estos datos, obtenemos el promedio de las fibras y su respectiva desviación estándar, tal como se señala en las tablas 3.11 y 3.12 para las fibras sin tratamiento y 3.13 y 3.14 para las fibras tratadas. Sin embargo, debido a la dispersión del tamaño de las fibras no fue posible observar una diferencia significativa en los valores de los diámetros y longitudes de las fibras no tratadas y tratadas con solución alcalina. Sin embargo, comparando los resultados con las medidas de las fibras sin tratamiento, los cambios en la morfología siguen siendo importantes, concluyendo que el tratamiento con NaOH coadyuba a una mejor preparación de las fibras naturales al momento de formular materiales compuestos con una matriz polimérica.

Desviación estándar para la longitud de fibras sin tratamiento			
Longitud (mm)	Media de la muestra (mm)	Desviación respecto a la media	Desviación respecto a la media elevada al cuadrado
1.4649	2.2917	-0.8268	0.6836
3.1286		0.8369	0.7004
1.0986		-1.1931	1.4235
3.0804		0.7887	0.6220
3.8917		1.6000	2.5600
2.2061		-0.0856	0.0073
1.7512		-0.5405	0.2921
0.9492		-1.3425	1.8023
3.4965		1.2048	1.4515
1.8496		-0.4421	0.1954

Tabla 3. 11 Desviación estándar para longitud de fibras sin tratamiento.

Desviación estándar para el diámetro de fibras sin tratamiento			
Longitud (mm)	Media de la muestra (mm)	Desviación respecto a la media	Desviación respecto a la media elevada al cuadrado
0.3714	0.3873	-0.0159	0.0002
0.3510		-0.0363	0.0013
0.5522		0.1649	0.0272
0.3020		-0.0853	0.0073
0.1346		-0.2527	0.0639
0.3082		-0.0791	0.0063
0.4355		0.0482	0.0023
0.5240		0.1367	0.0187
0.4323		0.0450	0.0020
0.4621		0.0748	0.0056

Tabla 3. 12 Desviación estándar para el diámetro de fibras sin tratamiento.

La dimensión de la longitud media de las fibras sin tratamiento es de:

$$2.2917 \pm 0.9868 \text{ mm.}$$

La dimensión media de los diámetros de las fibras sin tratamiento es de:

$$0.3873 \pm 0.1161 \text{ mm.}$$

Desviación estándar para la longitud de fibras con tratamiento			
Longitud (mm)	Media de la muestra (mm)	Desviación respecto a la media	Desviación respecto a la media elevada al cuadrado
1.1907	2.2002	-1.0095	1.0191
1.8303		-0.3699	0.1368
3.0962		0.8960	0.8028
2.3520		0.1518	0.0230
1.7934		-0.4068	0.1655
2.8727		0.6725	0.4522
2.1239		-0.0763	0.0058
1.5764		-0.6238	0.3891
2.9780		0.7778	0.6050
2.1884		-0.0118	0.0001

Tabla 3. 13 Desviación estándar para longitud de fibras con tratamiento.

Desviación estándar para el diámetro de fibras con tratamiento			
Longitud (mm)	Media de la muestra (mm)	Desviación respecto a la media	Desviación respecto a la media elevada al cuadrado
0.3127	0.3419	-0.0292	0.0008
0.3699		0.0280	0.0008
0.2440		-0.0979	0.0096
0.3062		-0.0357	0.0013
0.4710		0.1291	0.0167
0.2873		-0.0546	0.0300
0.3220		-0.0199	0.0004
0.4875		0.1456	0.0212
0.2875		-0.0544	0.0029
0.3307		-0.0122	0.0001

Tabla 3. 14 Desviación estándar para el diámetro de fibras con tratamiento.

La dimensión de la longitud media de las fibras con tratamiento es de:

$$2.2002 \pm 0.5999 \text{ mm.}$$

La dimensión de los diámetros de las fibras con tratamiento es de:

$$0.3419 \pm 0.0915 \text{ mm.}$$

Microscopía de fractura y corte de una muestra

La siguiente serie de microscopías se realizaron con el fin de observar la interfaz existente entre los componentes del material compuesto (matriz de polietileno de alta densidad y fibra de bagazo de agave), de tal forma que se pudiera determinar los efectos del tratamiento con hidróxido de sodio en la compatibilidad fibra/matriz.

En la micrografía a) de la figura 3.23 se observa una buena adhesión interfacial, sin espacios existentes entre ambos materiales, por lo cual se infiere que el tratamiento alcalino fue eficiente para mejorar la interface. Sin embargo, algunos espacios son observados en la micrografía b), debido a que, bajo condiciones de esfuerzo mecánico que sufrió la muestra al momento de flexionarla hasta obtener una fractura, la interacción interfacial no resulta suficiente.

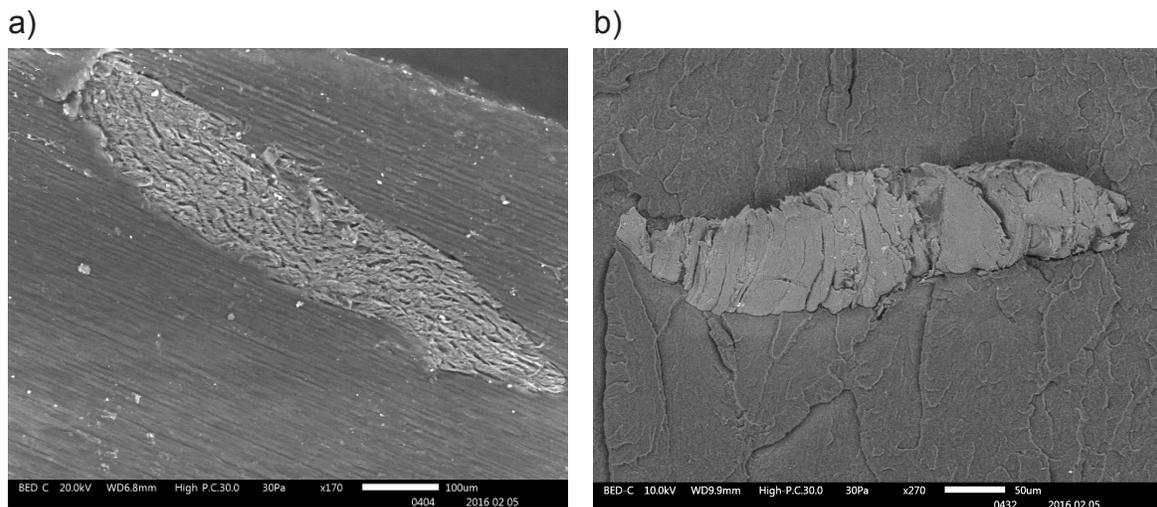


Figura 3. 23 a) Micrografía de un corte, b) micrografía de la fractura a la probeta de ensayo.

Las fracturas observadas en la figura 3.24 señalan una comparación de la interfaz matriz-fibra, además, se observa que, a distintas concentraciones de fibra en el material compuesto, la compatibilidad interfacial es modificada, ya que en en la micrografía a se nota un espacio mayor señalado con un círculo rojo, en donde

la interfaz no fue lo suficientemente alta, como para desprender el polímero y la fibra al mismo tiempo, comportamiento que se aprecia en la micrografía b, donde no se persiben espacios tan marcados, determinando que, a mayor concentración, la compatibilidad de la matriz-fibra aumenta proporcionalmente. La imagen a) corresponde a la formulación CF1, mientras que la b) se refiere a la formulación CF2.

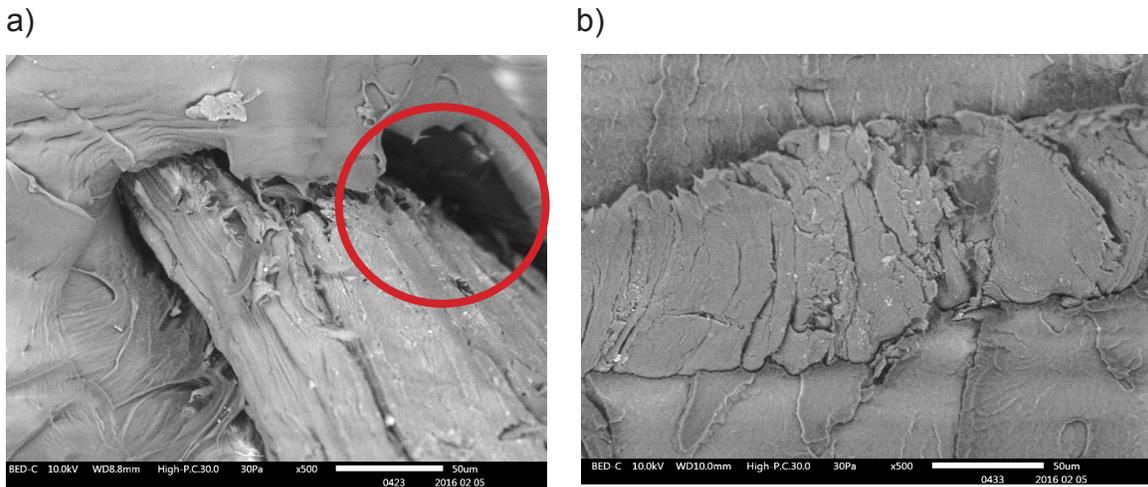


Figura 3. 24 Micrografías de fracturas; a) formulación CF1, b) formulación CF2.

En la siguiente figura, en la imagen a) podemos apreciar que la matriz falla junto a la fibra, actuando como un solo material y no de forma independiente, mientras que en la imagen b), por ser un corte, se aprecia que no existen vacíos entre la matriz y la fibras con la usencia de regiones en color negro, correspondiente a dichas zonas.

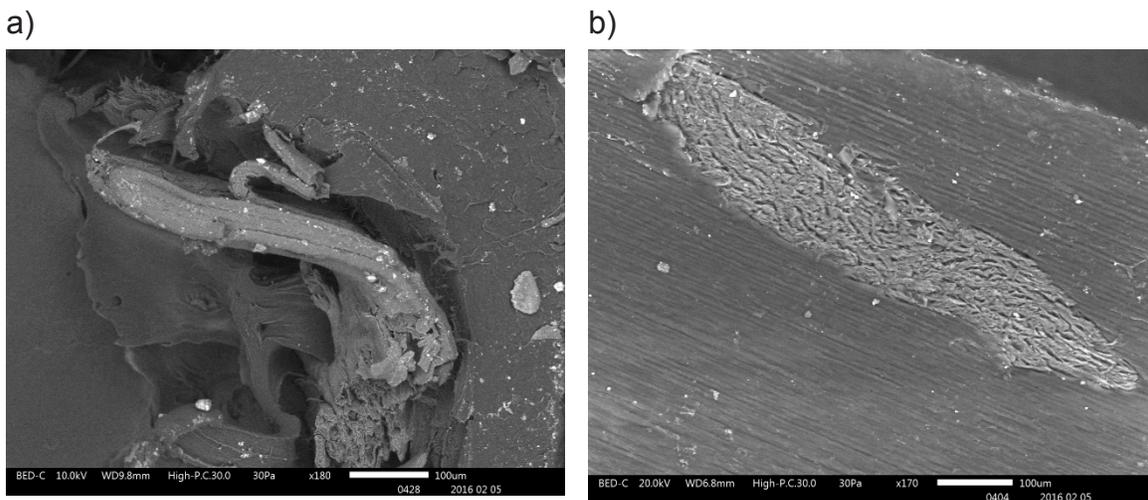


Figura 3. 25 Interfaz matriz-fibra en el material compuesto.

Finalmente, en la figura 3.26 se aprecia un acercamiento de la forma en que se adhiere el polietileno a la fibra, se localizan ciertos espacios que sugieren algunas deficiencias en la adhesión interfacial de los componentes de los materiales, así mismo, podría ser un indicativo de que las condiciones del tratamiento alcalino pudiesen ser valoradas, con el fin de mejorar la interfaz.

Aunado a ello, se identifica que la matriz se aloja en la capa superficial de la fibra, en donde los “surcos” señalados en las microscopías 3.21a y 3.21f actúan como superficie de sujeción al polímero, favoreciendo la adherencia y reforzando la conclusión de que el tratamiento alcalino en fibras naturales mejora su interfaz superficial.

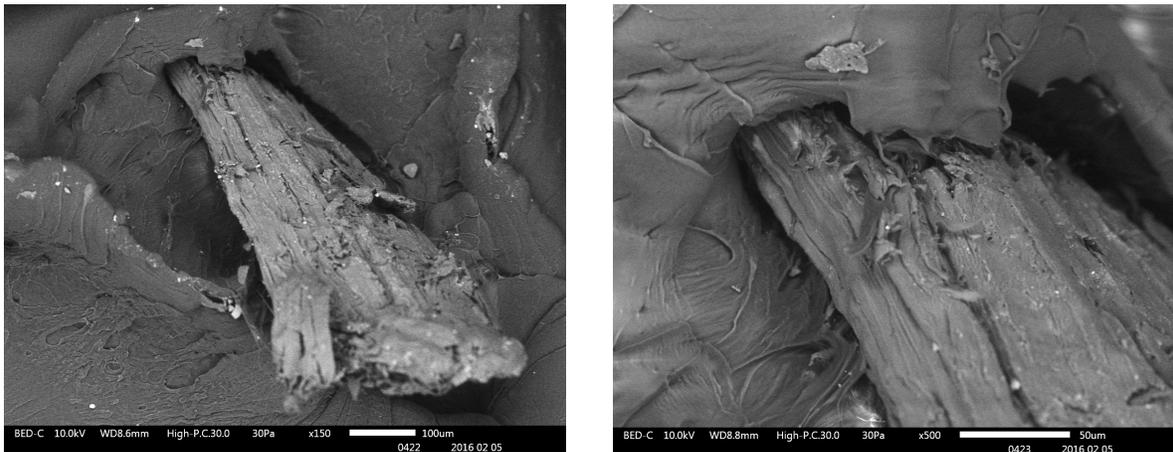


Figura 3. 26 Acercamiento en una fractura para apreciar la interfaz de la matriz-fibra en el material compuesto.

3.2.3. Ensayos Mecánicos a Tensión

A continuación, se presentan los datos obtenidos en los ensayos a tensión realizados a los especímenes preparados por el proceso de moldeo por inyección. Los parámetros que serán objeto de análisis son: modulo elástico, esfuerzo a tensión y porcentaje de elongación, mismos que se dividen dependiendo de la formulación planteada.

Muestra	Espesor mm	Ancho mm	Longitud de trabajo	Área mm ²	Modulo Elástico MPa	Esfuerzo a Tensión MPa	Elongación %
1	3.24	4.15	25.40	13.45	1286.15	35.58	13.57
2	3.26	4.1	25.40	13.37	1246.82	42.73	36.86
3	3.28	4.14	25.40	13.58	1203.83	40.20	28.98
4	3.22	4.18	25.40	13.46	1201.98	41.34	143.3
5	3.22	4.18	25.40	13.46	1217.16	39.26	14.80
6	3.25	4.2	25.40	13.65	1193.86	38.85	162.84

Tabla 3. 15 Resultados en muestras con formulación HDPE.

El gráfico 3.1 presenta el comportamiento esfuerzo-deformación de cada una de las muestras probadas para el HDPE. En la tabla 3.16 se muestra el resultado estadístico correspondiente.

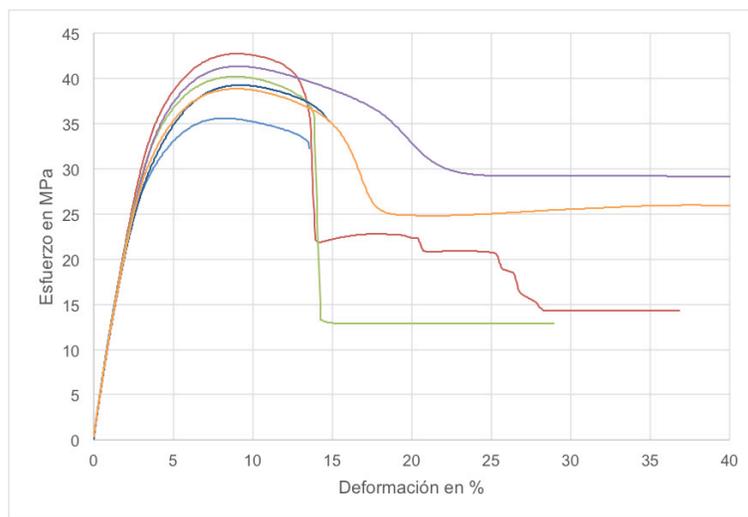


Gráfico 3. 1 Gráficas de esfuerzo-deformación en las muestras con formulación HDPE.

Series n=6	Espesor mm	Ancho mm	Longitud de trabajo mm	Área mm ²	Módulo Elástico MPa	Esfuerzo a Tensión MPa	Elongación %
x	3.245	4.158	25.40	13.49	1224.97	39.66	66.72
s	0.02345	0.03601	0.00	0.1026	35.29	2.45	67.73
n	0.72	0.87	0.00	0.76	2.88	6.18	6.16

Tabla 3. 16 Resultados estadísticos del ensayo a tensión en las muestras con formulación HDPE.

Cabe señalar que se tomarán los datos anteriores como medio de comparación en el comportamiento y desempeño mecánico de cada una de las formulaciones presentadas en este trabajo, así como para determinar la concentración idónea en la que el material compuesto supera la respuesta a tensión del polietileno de alta densidad. En el **Anexo B**, se presenta el reporte final obtenido por la máquina de ensayos universales, a fin de mostrar mayores detalles del comportamiento del material compuesto.

En el gráfico 3.2, se presenta el comportamiento mecánico para la formulación CF1 correspondiente a una concentración de 5% de fibra de agave, observando que dicho comportamiento es modificado respecto al presentado por el HDPE (grafico 3.1) al adicionar la fibra de agave. El límite de proporcionalidad no varió con respecto al HDPE, sin embargo, el límite de resistencia presenta cambios, ya que, en las formulaciones de HDPE, este se observó a una elongación del 30-35%, muy diferente a la formulación CF1, que lo presenta en un rango de 7.5-10%, disminuyendo así, la deformación del material al aplicarle la misma cantidad de carga, comparándolo con el HDPE puro.

En la tabla 3.17 se señala la serie de muestras probadas de la formulación CF1, mientras que en la tabla 3.18, se señala el resultado estadístico correspondiente. En el Anexo B se presenta el reporte final del ensayo mecánico a tensión.

Muestra	Espesor mm	Ancho mm	Longitud de trabajo	Area mm ²	Modulo Elástico MPa	Esfuerzo a Tensión MPa	Elongación %
1	3.34	4.12	25.40	13.76	1217.23	34.25	7.84
2	3.36	4.11	25.40	13.81	1262.20	35.22	6.68
3	3.27	4.19	25.40	13.7	1153.37	34.97	8.73
4	3.37	4.11	25.40	13.85	1151.92	33.87	9.64
5	3.27	4.14	25.40	13.54	1114.97	34.59	9.20

Tabla 3. 17 Resultados en muestras con formulación CF1.

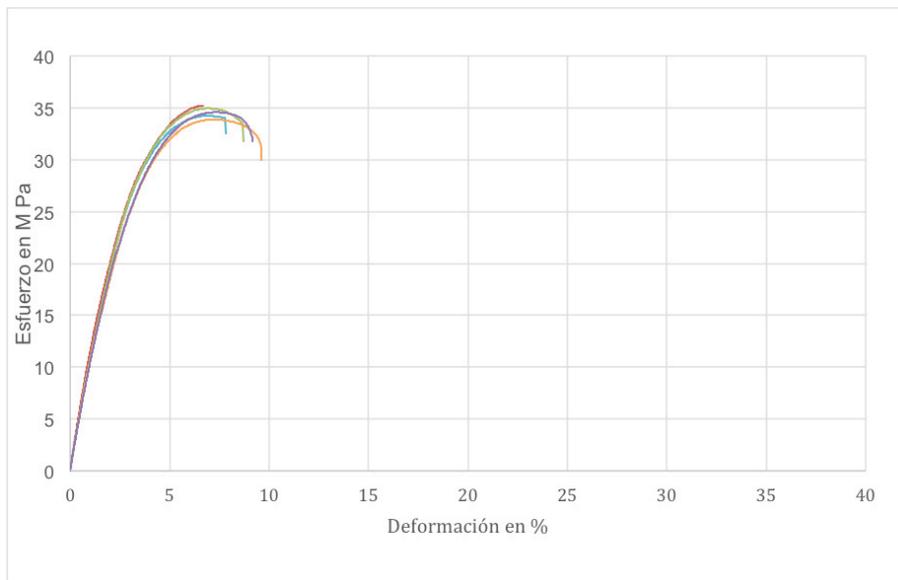


Gráfico 3. 2 Gráficas de Esfuerzo-Deformación en las muestras con formulación CF1.

Series n=5	Espesor mm	Ancho mm	Longitud de trabajo mm	Área mm ²	Módulo Elástico MPa	Esfuerzo a Tensión MPa	Elongación %
x	3.322	4.134	25.40	13.73	1179.94	34.58	8.42
s	0.04868	0.03362	0.00	0.1221	58.88	0.54	1.18
n	1.47	0.81	0.00	0.89	4.99	1.56	13.99

Tabla 3. 18 Resultados estadísticos del ensayo a tensión en las muestras con formulación CF1.

Nuevamente, se observa en la tabla 3.20, para el caso de la formulación CF2, una variación en el porcentaje de elongación, solo que, en esta formulación, a comparación de la CF1, en el gráfico 3.3. se pueden distinguir con más detalle los puntos pertenecientes a el punto de fluencia y el esfuerzo último, esto, debido al incremento de concentración de fibra. Como era de esperarse, la elongación es mucho menor a la del HDPE, sin embargo no se observa una variación significativa en el módulo de elasticidad, como en el caso de la formulación CF1.

Muestra	Espesor mm	Ancho mm	Longitud de trabajo mm	Area mm ²	Modulo Elástico MPa	Esfuerzo a Tensión MPa	Elongación %
1	3.35	4.26	25.40	14.27	1169.72	32.37	7.47
2	3.47	4.24	25.40	14.71	1082.70	29.90	7.61
3	3.28	4.2	25.40	13.78	1206.12	36.75	8.84
4	3.27	4.29	25.40	14.03	1163.37	35.66	9.70
5	3.31	4.19	25.40	13.87	1126.61	34.95	7.53

Tabla 3. 19 Resultados en muestras con formulación CF2.

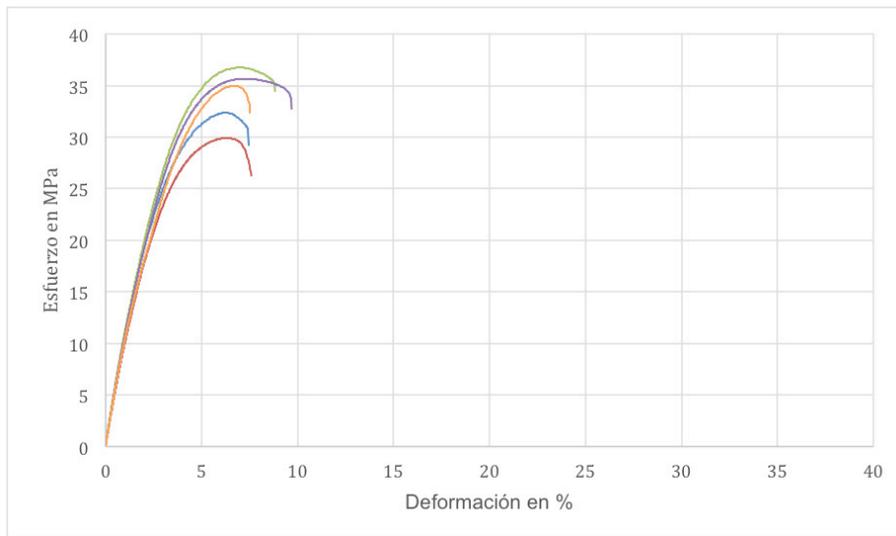


Gráfico 3. 3 Gráficas de Esfuerzo-Deformación en las muestras con formulación CF2.

Series n=5	Espesor mm	Ancho mm	Longitud de trabajo mm	Área mm ²	Módulo Elástico MPa	Esfuerzo a Tensión MPa	Elongación %
x	3.336	4.236	25.40	14.13	1149.70	33.93	8.23
s	0.08112	0.04159	0.00	0.3753	46.89	2.77	1.00
n	2.43	0.98	0.00	2.66	4.08	8.17	12.14

Tabla 3. 20 Resultados estadísticos del ensayo a tensión en las muestras con formulación CF2.

Con el gráfico 3.4 del comportamiento mecánico a tensión en los especímenes de la formulación CF3, es pertinente señalar que esta formulación fue la que obtuvo el **mejor comportamiento** mecánico a tensión, comparado con las otras formulaciones y el polietileno de alta densidad, ya que, se obtuvo un aumento significativo del módulo de elasticidad y una menor elongación, por efecto de la concentración de las fibras, como ha sido reportado por otros autores (Chávez Gutiérrez, De Paoli, & Felisberti, 2014). Además, se observa una mejor distribución de las fibras en la matriz. En la tabla 3.21 se reportan los resultados de las muestras probadas, mientras que en la tabla 3.22, se señala el resultado estadístico, así mismo, en el Anexo B se encuentra el reporte final del ensayo.

Muestra	Espesor mm	Ancho mm	Longitud de trabajo	Area mm ²	Modulo Elástico MPa	Esfuerzo a Tensión MPa	Elongación %
1	3.35	4.26	25.40	14.27	1169.72	32.37	7.47
2	3.47	4.24	25.40	14.71	1082.70	29.90	7.61
3	3.28	4.2	25.40	13.78	1206.12	36.75	8.84
4	3.27	4.29	25.40	14.03	1163.37	35.66	9.70
5	3.31	4.19	25.40	13.87	1126.61	34.95	7.53

Tabla 3. 21 Resultados en muestras con formulación CF3.

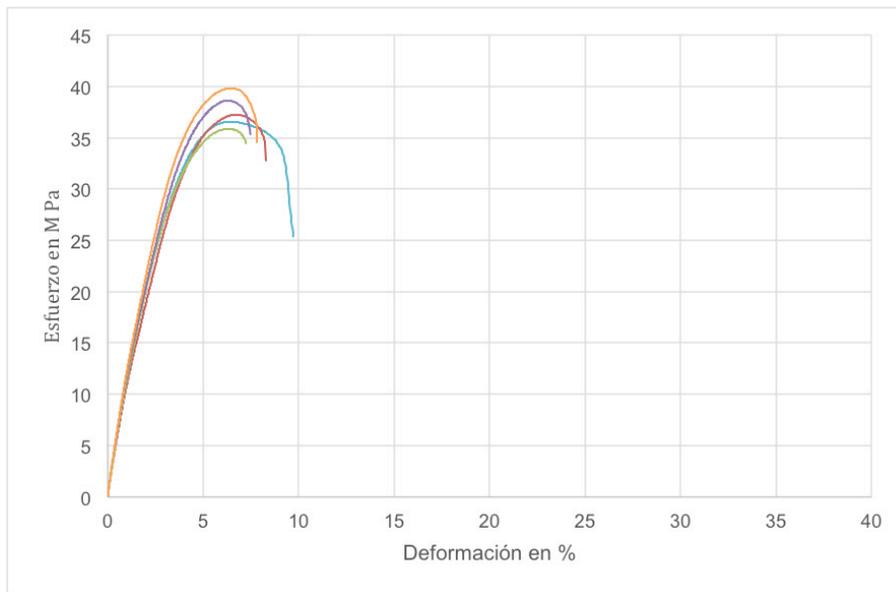


Gráfico 3. 4 Gráficas de Esfuerzo-Deformación en las muestras con formulación CF3.

Series n=5	Espesor mm	Ancho mm	Longitud de trabajo mm	Área mm ²	Módulo Elástico MPa	Esfuerzo a Tensión MPa	Elongación %
x	3.306	4.07	25.40	13.46	1275.35	37.62	8.12
s	0.03782	0.0538	0.00	0.2175	48.49	1.59	0.99
n	1.14	1.32	0.00	1.62	3.80	4.23	12.20

Tabla 3. 22 Resultados estadísticos del ensayo a tensión en las muestras con formulación CF3.

Al tener estos resultados, es evidente el mejoramiento en el desempeño mecánico del material compuesto con la formulación CF3 (10% de fibra y 90% de HDPE), no solamente en el módulo elástico, sino en el porcentaje de elongación o deformación, lo que resulta, en el reforzamiento mecánico del polietileno de alta densidad. Aunado a ello, se observa que en las formulaciones menores a 10%, el módulo elástico no aumenta, esto puede deberse a las bajas concentraciones de fibras, sin embargo, la disminución en el porcentaje de elongación es un indicativo del efecto reforzante de las fibras a bajas concentraciones (5 y 7.5 %).

Esta información indica que el material es útil para aplicarse en piezas sometidas a tensión de la industria automotriz, de construcción y en el diseño de muebles, ya que la baja deformación del material es conveniente a nivel industrial, aplicado en piezas que demanden precisión. Con el comportamiento anterior, se corroboran las aseveraciones presentes en la literatura, donde señalan que, incrementando el porcentaje de fibra, el comportamiento mecánico de matrices poliméricas y especialmente HDPE es favorecido por la presencia de fibras vegetales, como es descrito por Zhao, X y colaboradores en materiales compuestos de HDPE y fibras de sisal. Por otro lado, Elzubair y Suarez, reportan resultados similares a los presentados por este trabajo en materiales compuestos de HDPE reciclado y fibras de piassava.

En este trabajo, se vió limitado por el porcentaje máximo de mezcla en la extrusora, sin embargo, con los datos obtenidos encontramos que las propiedades mecánicas del polietileno de alta densidad son mejorados, creando analogías con las investigaciones documentadas en la literatura, en donde es evidente este mejoramiento al adicionar fibras vegetales a matrices poliméricas, ya que son las fibras quienes dotan de estructura y soporte al polímero.

Aunado a ello, la formulación CF3 tuvo un buen comportamiento mecánico, disminuyendo en 10% el uso de polietileno, reflejándose así, en una ventaja económica en la industria ya que la materia prima (HDPE) es disminuída, aunado a dar pie a investigaciones posteriores en donde, por ejemplo, se utilice HDPE reciclado con el fin de acrecentar el impacto ambiental y económico. En general, el proceso de conformación del material compuesto no es elevado, ya que ocupa maquinaria y materiales de bajo costo y bajo consumo energético, aunado a que el refuerzo es un residuo de la industria agroalimentaria, disminuyendo con ello la contaminación, debido al aprovechamiento de la fibra en el proceso de conformación del material. Por otra parte, el tratamiento alcalino del mismo no exige personal calificado o maquinarias específicas para realizar dicha conformación, ocupando elementos relativamente económicos y con una disponibilidad elevada en el mercado.

En cuanto al moldeo por inyección, es uno de los métodos de procesamiento más utilizados a nivel mundial, presente en gran parte de los elementos ocupados en la vida diaria. Por otra parte, con la formulación CF3, se obtiene una disminución del 70% de elongación del material compuesto y aumenta en un 5% el módulo de elasticidad, con respecto al HDPE.

Finalmente, se observa que, conforme se procesan cada una de las formulaciones, estas disminuyen la cristalinidad del polietileno de alta densidad debido al número de fibras inmersas en la matriz, tal como muestra la figura 3.27, esto gracias a que el material de refuerzo aumenta en concentración. Esto hace que el material formulado no solamente sirva como refuerzo, sino como un material que al inyectarse, dote al objeto de diseño de texturas, color y resistencia.



Tabla 3. 27 Especímenes con formulaciones a) HDPE, b) CF1, c) CF2, d) CF3.

En las siguientes gráficos se hace un comparativo entre las tres concentraciones, con respecto al blanco de HDPE, en sus propiedades mecánicas.

Módulo elástico

Formulación	Módulo Elástico (E) [MPa]
HDPE	1224.97 ± 35.29
CF1	1179.94 ± 58.88
CF2	1149.7 ± 46.89
CF3	1275.35 ± 48.49

Tabla 3. 23 Comparativo del módulo elástico entre las muestras de HDPE y las formulaciones propuestas.

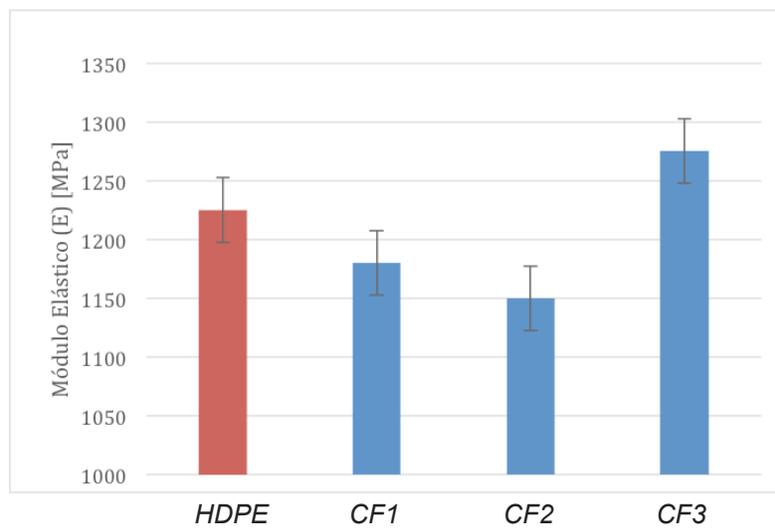


Gráfico 3. 5 Gráfica comparativa del módulo elástico en las formulaciones, con respecto al HDPE.

Esfuerzo a tensión

Formulación	Esfuerzo a Tensión (MPa)
HDPE	39.66 ± 2.45
CF1	34.58 ± 0.54
CF2	33.93 ± 2.77
CF3	37.62 ± 1.59

Tabla 3. 24 Comparativo del esfuerzo a tensión entre las muestras de HDPE y las formulaciones propuestas.

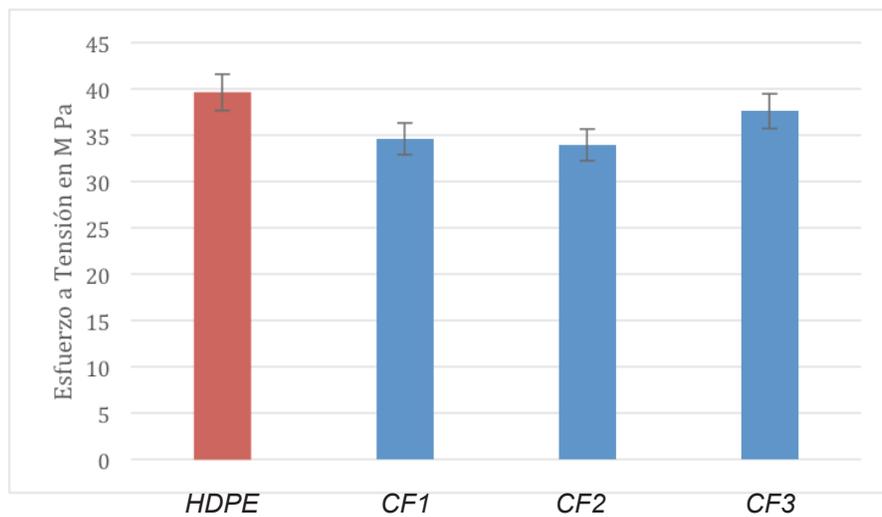


Gráfico 3. 6 Gráfica comparativa del esfuerzo a tensión en las formulaciones, con respecto al HDPE.

Porcentaje de elongación

Formulación	Porcentaje de elongación (%)
HDPE	26.88 ± 67.73
CF1	8.42 ± 1.18
CF2	8.23 ± 1.00
CF3	8.12 ± 0.99

Tabla 3. 25 Comparativo de porcentaje de elongación entre las muestras de HDPE y las formulaciones propuestas.

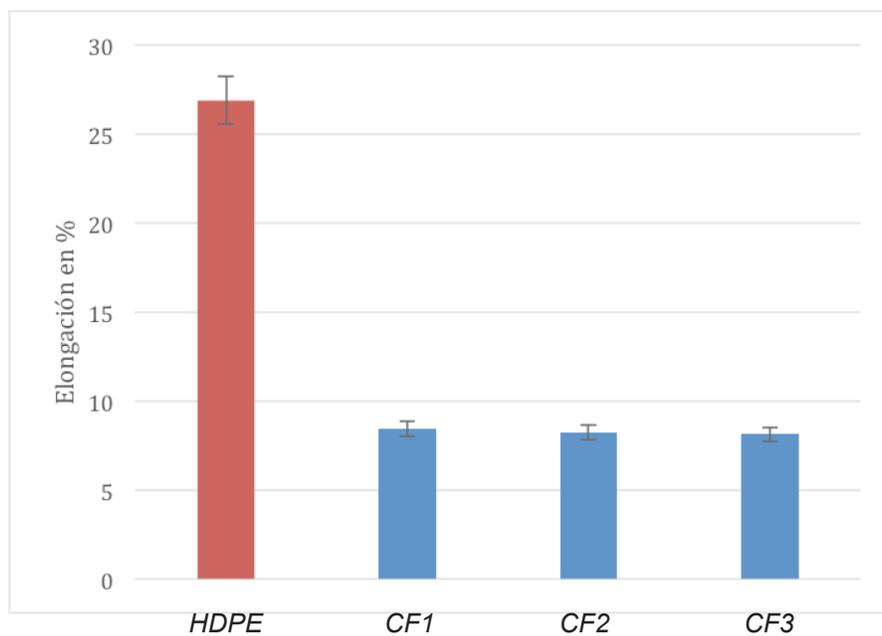


Gráfico 3. 7 Gráfica comparativa del porcentaje de elongación en las formulaciones, con respecto al HDPE.

CAPÍTULO IV

CONCLUSIONES

4.1. Conclusiones

El comportamiento mecánico a tensión del material compuesto formado por polietileno de alta densidad reforzado con fibras de bagazo de agave mezcalero, fue caracterizado para obtener el efecto de refuerzo mecánico de las fibras a distintas concentraciones, incrementadas proporcionalmente sobre la matriz polimérica de HDPE, de tal forma, que pudiera ser considerado para futuras aplicaciones, proponiendo una línea de aprovechamiento del bagazo de agave, dejando de lado su papel como residuo en la industria agroalimentaria, disminuyendo su impacto ambiental y enriqueciendo las cadenas productivas.

El *composite* preparado por el proceso de extrusión-inyección, resultó con un aumento en sus propiedades mecánicas respecto al HDPE; al adicionar un 10% en peso de fibras de bagazo de agave, especialmente en el módulo de elasticidad y el porcentaje de elongación. Sin embargo, a concentraciones menores no se observa un cambio significativo en las propiedades mecánicas, debido al bajo contenido de fibras, las cuales se dispersan en la matriz polimérica de forma no homogénea, sin ofrecer ganancia mecánica.

Aunado a ello, el tratamiento químico aplicado a las fibras de bagazo de agave con una solución al 5% de NaOH no resultó en un cambio significativo en el carácter hidrofílico de las fibras, presentando valores de contenido de humedad similares, antes y después del tratamiento, sin embargo, en las micrografías por microscopía electrónica de barrido para las fibras, es posible observar cambios significativos en la superficie y morfología de las fibras, antes y después del tratamiento (las fibras tratadas se observan limpias y con morfologías distintas a las no tratadas, que presentan morfologías cilíndricas). Además, se aprecia una buena adhesión interfacial entre fibra/matriz, ya que no se aprecian vacíos en la superficie, y se observa una inmersión de la matriz en la fibra.

Las fibras de agave mezcalero resultan útiles para reforzar mecánicamente al polietileno de alta densidad, con la ventaja de dar utilidad a un residuo agroindustrial, sin embargo, se deben hacer estudios adicionales para optimizar su uso como reforzante mecánico en materiales compuestos con distintas matrices poliméricas, así como proponer una posible aplicación.

La cristalinidad del polietileno de alta densidad se ve disminuída por la adición de fibras de refuerzo, haciendo de este material, una alternativa visual y estética a la hora de proponer un objeto de diseño, ya que, como se mostró anteriormente, la tonalidad del material final es más oscura con la formulación CF3 , mientras que con la mezcla CF1 el cambio no es significativo, obteniendo con ello una gama de colores que en la práctica, resulta favorable para el diseñador, obteniendo propuestas enriquecidas, además de observar un cambio en la textura del espécimen, ya que en la muestra de polietileno, al ser inyectado, se crean múltiples burbujas de aire y erupciones, mismas que no se aprecian en la formulación CF3, provocando estabilidad en las piezas inyectadas.

Finalmente, se reduce en 10% la cantidad de residuos provenientes de la industria del mezcal, logrando así, la reducción en la contaminación presente en los campos adyacentes a los palenques. Extrapolando este dato, para cien kilogramos de polietileno de alta densidad, con la formulación CF3, se necesitarían solamente 90 kilogramos de materia prima, ya que el 10% restante será constituida por el residuo del mezcal, mejorando mecánicamente el polietileno de alta densidad, incrementando el uso del material como refuerzo y adoptándolo como un material con propiedades únicas en cuanto a su coloración, textura y resistencia.

4.2. Trabajo a Futuro

A continuación, se proponen los siguientes trabajos futuros, mismos que surgieron como interrogantes durante el proceso de elaboración del presente trabajo y que pueden ser resueltos en proyectos posteriores.

- Optimizar los parámetros de tratamiento superficial en las fibras de agave mezcalero con solución alcalina, variando la concentración de NaOH, aumentando o disminuyendo el tiempo de inmersión de fibras, o realizar el tratamiento a temperaturas mayores a 25°C.
- Proponer otros tratamientos superficiales a las fibras, como el uso de solventes (etano, acetona, etc.) para retirar impurezas y ceras, o de tipo físico, como descarga eléctrica o vapor.
- Utilizar polietileno de alta densidad reciclado, como una opción con fines ecológicos.
- Realizar la caracterización térmica del material, incluyendo estabilidad dimensional y otras propiedades físicas.
- Realizar un estudio con el efecto de la longitud de las fibras, obteniendo materiales con fibras de diferentes tamaños.
- Realizar estudios de biodegradabilidad para determinar si existe una ventaja en el material compuesto con respecto al polietileno de alta densidad a la hora de su degradación en el ambiente.
- Realizar estudios de colorimetría para determinar si las fibras absorben o no los pigmentos adicionados a la matriz, logrando con ello un material versátil a la hora de proponer objetos de diseño.

4.3. Aplicaciones del Material Compuesto en el Diseño

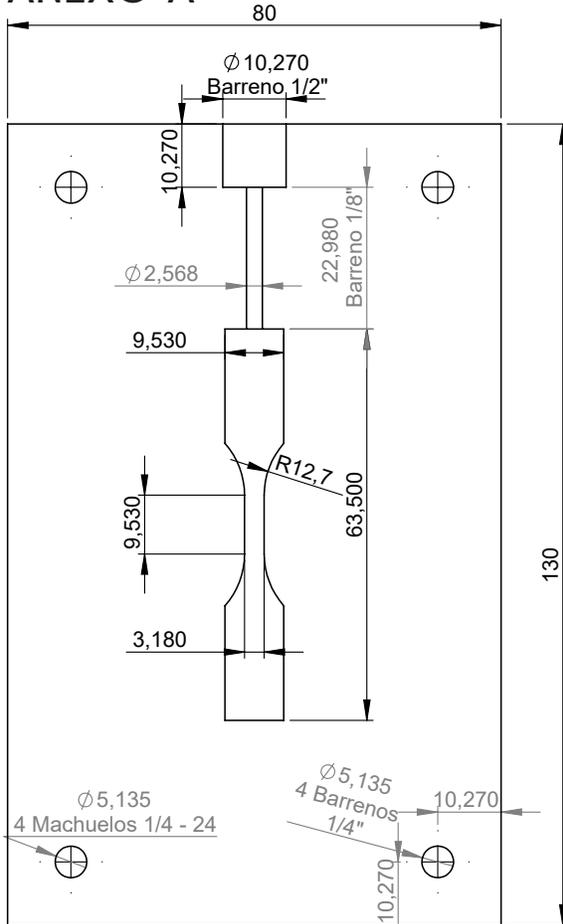
Las aplicaciones del material formulado en este trabajo son extensas, ya que no solamente se cumplió con el reforzamiento del mismo, sino que se crearon texturas diferentes y apariencias específicas al adicionar fibras de bagazo de agave a la matriz polimérica.

Dentro de los productos que se pueden conformar con las formulaciones presentadas destacan: piezas para la construcción y conducción (tuberías, conexiones mecánicas, pozos de visita, acoplamientos), láminas, cubos, cajas, embalajes, mobiliario urbano (bancos de parques, señales de tráfico, barreras, etc.), muebles en general (sillas, bancos, mesas y soportes, etc) y piezas que requieran de precisión y alta estabilidad dimensional, ya que al presentar una elongación baja, el material compuesto tiende a resistir fuerzas a tensión sufriendo una deformación mínima, entre otros.

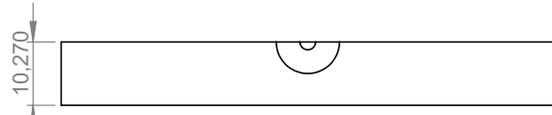
Recalcando, la propuesta presentada muestra cualidades particulares, que abarcan la apariencia, textura y resistencia, logrando con ello un material versátil y con una aportación de reducción de materia prima utilizada, así como aprovechamiento de residuos.

ANEXOS

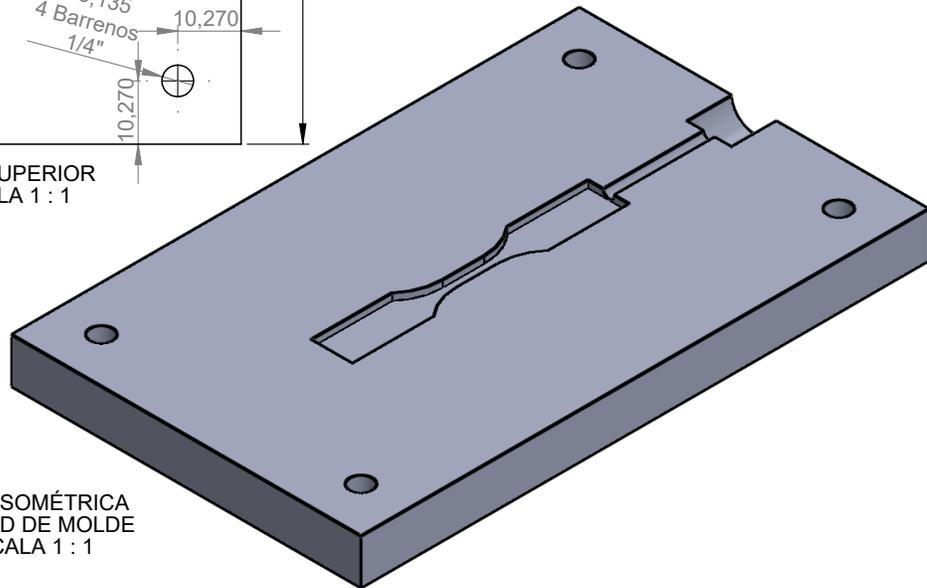
ANEXO A



VISTA SUPERIOR
ESCALA 1 : 1



VISTA FRONTAL
ESCALA 1 : 1

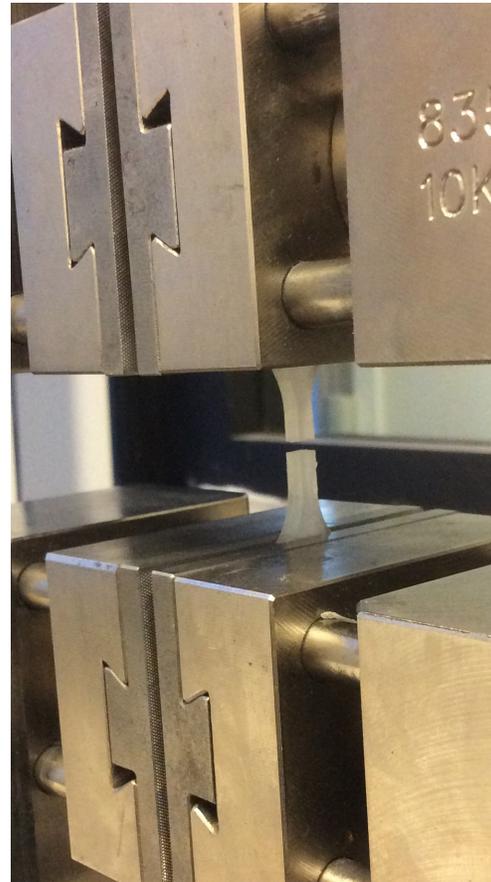


VISTA ISOMÉTRICA
CAVIDAD DE MOLDE
ESCALA 1 : 1

SI NO SE ESPECIFICA LO CONTRARIO: LAS COTAS SE ESPECIFICAN EN MM.  INGENIERÍA EN DISEÑO	UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE LA MIXTECA	TESIS PROFESIONAL: ESTUDIO MECÁNICO DE UN COMPOSITE ADICIONADO CON FIBRAS DE AGAVE
	NOMBRE: AXEL RUÍZ JIMÉNEZ	TÍTULO: VISTAS DE CAVIDAD DEL MOLDE PARA INYECCIÓN.
	MATERIAL: ALUMINIO	
	ESCALA 1:1 HOJA 1 DE 1	MAYO DE 2016



Ejemplo de preparación de micrografía antes de exportar la imagen.



Falla en la probeta con formulación HDPE justo en el área señalada para este fin.



Muestra con una fluencia elevada.



Cambio en la tonalidad del material compuesto, dependiendo de la concentración.

ANEXO B

Laboratorio de Pruebas Mecánicas

Centro de Física Aplicada y Tecnología Avanzada, UNAM

Solicitud 03-2016

Humedad prom. 34 % Temp. prom. 21.1 ° C

Parameter table:

Headline: Laboratorio de Pruebas Mecánicas

Centro de Física Aplicada y Tecnología Avanzada, UNAM

Solicitud 03-2016

Humedad prom. 34 % Temp. prom. 21.1 ° C

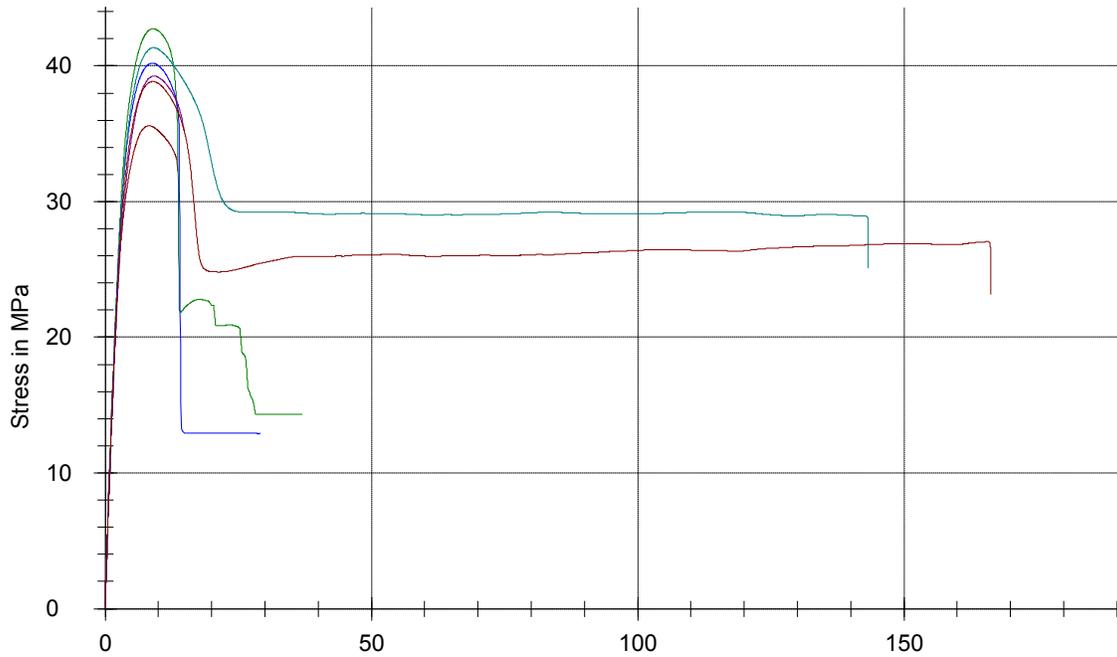
Company name: UNAM
Customer: Dra. Miriam Rocío Estévez González
Tester: M en I. Gerardo A. Fonseca Hernández
Test standard: Tensión
Specimen designation: **HDPE 100%**
Material: Polietileno de alta densidad
Load cell: 5000
Specimen holders: Mordazas 5 KN
Test requirements: vel 100 mm/min

Test speed: 100 mm/min

Results:

Nr	Esp. mm	Ancho mm	Long trab mm	Area mm ²	M Elast. MPa	σ Tension MPa	Elong. %
1	3.24	4.15	25.40	13.45	1286.15	35.58	13.57
2	3.26	4.1	25.40	13.37	1246.82	42.73	36.86
3	3.28	4.14	25.40	13.58	1203.83	40.20	28.98
4	3.22	4.18	25.40	13.46	1201.98	41.34	143.3
5	3.22	4.18	25.40	13.46	1217.16	39.26	14.80

Series Graph



Statistics:

Series	Esp.	Ancho	Long trab	Area	M Elast.	σ Tension	Elong.
n = 6	mm	mm	mm	mm ²	MPa	MPa	%
x	3.245	4.158	25.40	13.49	1224.97	39.66	66.72
s	0.02345	0.03601	0.00	0.1026	35.29	2.45	67.73
v	0.72	0.87	0.00	0.76	2.88	6.18	6.16

Laboratorio de Pruebas Mecánicas
Centro de Física Aplicada y Tecnología Avanzada, UNAM
Solicitud 03-2016
Humedad prom. 34 % Temp. prom. 20.1 ° C

Parameter table:

Headline: Laboratorio de Pruebas Mecánicas
 Centro de Física Aplicada y Tecnología Avanzada, UNAM
 Solicitud 03-2016
 Humedad prom. 34 % Temp. prom. 21.1 ° C

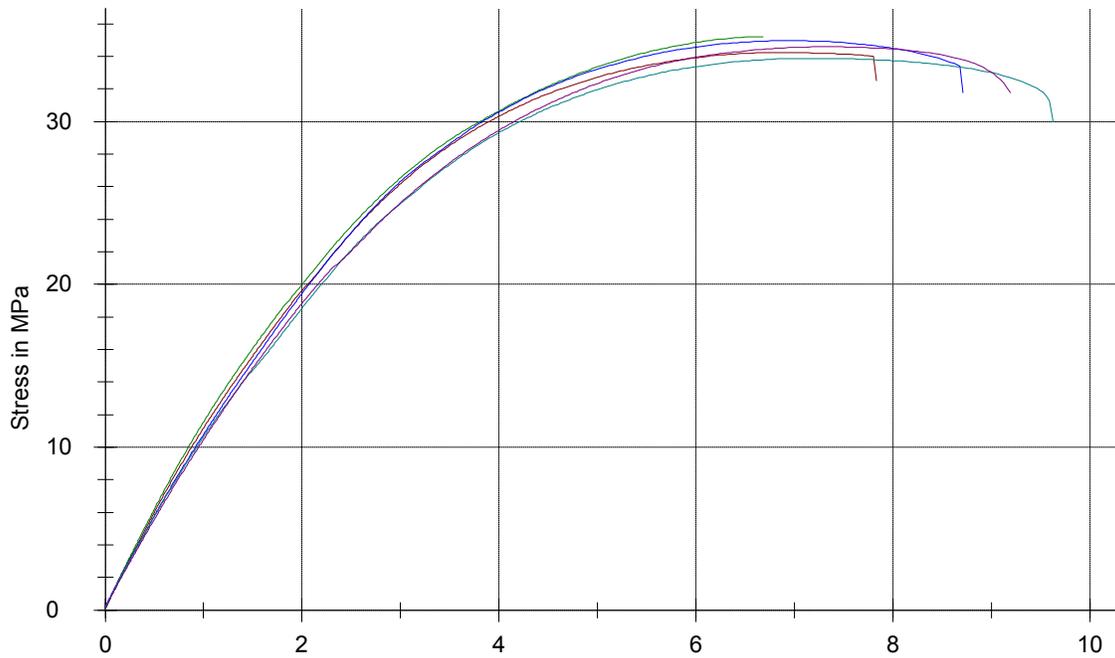
Company name: UNAM
 Customer: Dra. Miriam Rocío Estévez González
 Tester: M en I. Gerardo A. Fonseca Hernández
 Test standard: Tensión
 Specimen designation: **C FIBRA 5%**
 Material: Polietileno de alta densidad y fibra
 Load cell: 5000
 Specimen holders: Mordazas 5 KN
 Test requirements: vel 100 mm/min

Test speed : 100 mm/min

Results:

Nr	Esp. mm	Ancho mm	Long trab mm	Area mm ²	M Elast. MPa	σ Tension MPa	Elong. %
1	3.34	4.12	25.40	13.76	1217.23	34.25	7.84
2	3.36	4.11	25.40	13.81	1262.20	35.22	6.68
3	3.27	4.19	25.40	13.7	1153.37	34.97	8.73
4	3.37	4.11	25.40	13.85	1151.92	33.87	9.64
5	3.27	4.14	25.40	13.54	1114.97	34.59	9.20

Series Graph



Statics:

Series	Esp.	Ancho	Long trab	Area	M Elast.	σ Tension	Elong.
n = 5	mm	mm	mm	mm ²	MPa	MPa	%
x	3.322	4.134	25.40	13.73	1179.94	34.58	8.42
s	0.04868	0.03362	0.00	0.1221	58.88	0.54	1.18
v	1.47	0.81	0.00	0.89	4.99	1.56	13.99

Laboratorio de Pruebas Mecánicas
Centro de Física Aplicada y Tecnología Avanzada, UNAM
Solicitud 03-2016
Humedad prom. 34 % Temp. prom. 21.1 ° C

Parameter table:

Headline: Laboratorio de Pruebas Mecánicas
Centro de Física Aplicada y Tecnología Avanzada, UNAM
Solicitud 03-2016
Humedad prom. 34 % Temp. prom. 21.1 ° C

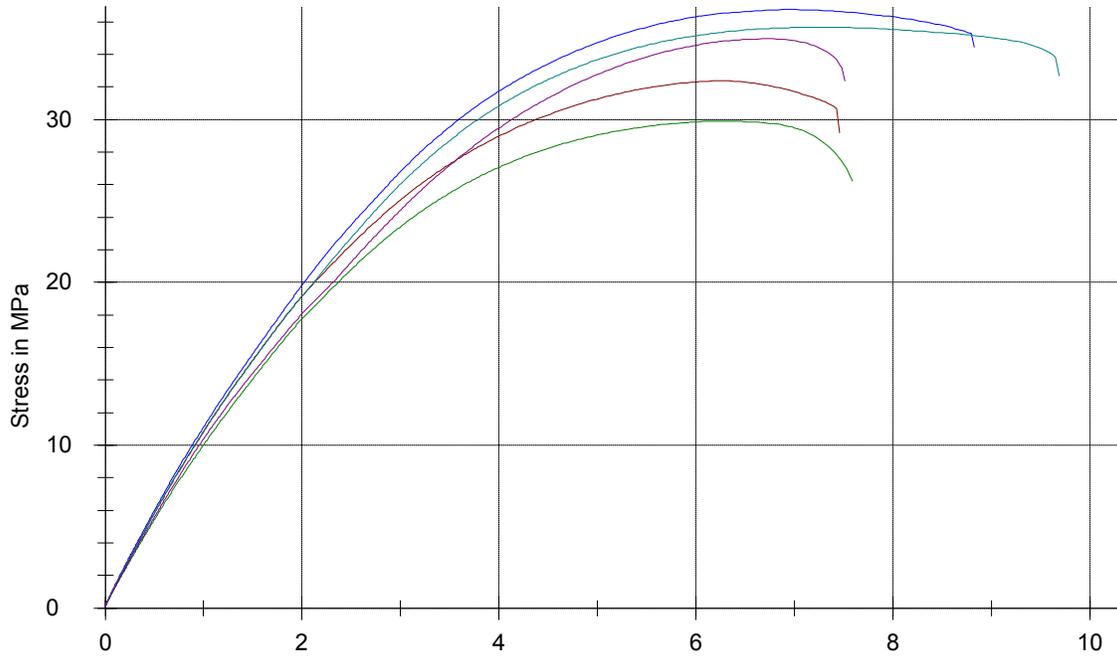
Company name: UNAM
Customer: Dra. Miriam Rocío Estévez González
Tester: M en I. Gerardo A. Fonseca Hernández
Test standard: Tensión
Specimen designation: **C FIBRA 7.5%**
Material: Polietileno de alta densidad y fibra
Load cell: 5000
Specimen holders: Mordazas 5 KN
Test requirements: vel 100 mm/min

Test speed : 100 mm/min

Results:

Nr	Esp. mm	Ancho mm	Long trab mm	Area mm ²	M Elast. MPa	σ Tension MPa	Elong. %
1	3.35	4.26	25.40	14.27	1169.72	32.37	7.47
2	3.47	4.24	25.40	14.71	1082.70	29.90	7.61
3	3.28	4.2	25.40	13.78	1206.12	36.75	8.84
4	3.27	4.29	25.40	14.03	1163.37	35.66	9.70
5	3.31	4.19	25.40	13.87	1126.61	34.95	7.53

Series Graph



Statics:

Series	Esp.	Ancho	Long trab	Area	M Elast.	σ Tension	Elong.
n = 5	mm	mm	mm	mm ²	MPa	MPa	%
x	3.336	4.236	25.40	14.13	1149.70	33.93	8.23
s	0.08112	0.04159	0.00	0.3753	46.89	2.77	1.00
v	2.43	0.98	0.00	2.66	4.08	8.17	12.14

Laboratorio de Pruebas Mecánicas
Centro de Física Aplicada y Tecnología Avanzada, UNAM
Solicitud 03-2016
Humedad prom. 34 % Temp. prom. 21.1 °C

Parameter table:

Headline: Laboratorio de Pruebas Mecánicas
Centro de Física Aplicada y Tecnología Avanzada, UNAM
Solicitud 03-2016
Humedad prom. 34 % Temp. prom. 21.1 °C

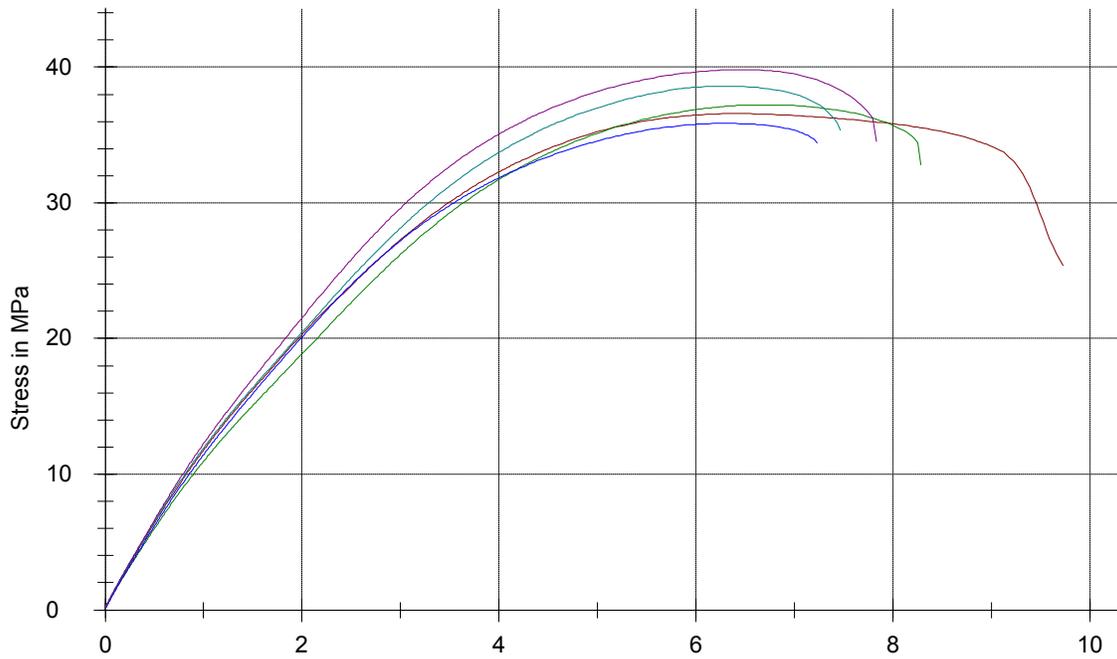
Company name: UNAM
Customer: Dra. Miriam Rocío Estévez González
Tester: M en I. Gerardo A. Fonseca Hernández
Test standard: Tensión
Specimen designation: **C FIBRA 10%**
Material: Polietileno de alta densidad y fibra
Load cell: 5000
Specimen holders: Mordazas 5 KN
Test requirements: vel 100 mm/min

Test speed : 100 mm/min

Results:

Nr	Esp. mm	Ancho mm	Long trab mm	Area Mm ²	M Elast. MPa	σ Tension MPa	Elong. %
1	3.3	3.98	25.40	13.13	1302.18	36.58	9.74
2	3.25	4.1	25.40	13.32	1203.01	37.23	8.30
3	3.3	4.12	25.40	13.6	1251.01	35.86	7.24
4	3.33	4.08	25.40	13.59	1295.83	38.61	7.48
5	3.35	4.07	25.40	13.63	1324.74	39.82	7.84

Series Graph



Statics:

Series	Esp.	Ancho	Long trab	Area	M Elast.	σ Tension	Elong.
n = 5	mm	mm	mm	mm ²	MPa	MPa	%
x	3.306	4.07	25.40	13.46	1275.35	37.62	8.12
s	0.03782	0.05385	0.00	0.2175	48.49	1.59	0.99
v	1.14	1.32	0.00	1.62	3.80	4.23	12.20

BIBLIOGRAFÍA

- ASM International. (1988). Glossary of Terms. En A. International, *Engineering Plastics* (págs. 2-47). Ohio: ASM International.
- ASTM Standards International. D 638-10 Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics.
- ASTM Standards International. D695-15 Standard Test Method for Compressive Properties of Rigid Plastics.
- Anderson , D. R., Sweeney , D. J., & Williams, T. A. (2005). Estadística para administración y Economía. México : International Thomson Editores S.A. de C.V.
- Araújo, J. R., Waldman, W. R., & De Paoli, M. A. (2008). Thermal properties of high density polyethylene composites with natural fibres: Coupling agent effect. *Polymer Degradation and Stability* (93), 1770-1775.
- Bárcenas, A. (2005). Diseño de elementos compuestos. Tesis de licenciatura. Instituto Politécnico Nacional.
- Bledzki, A. K., Manum, A. A., Jazkiewicz, A., & Erdmann, K. (2010). Polyethylene composites with enzyme modified abaca fibre. *Composites Science & Technology* , 70, 854-860.
- Brown , A., Serantes, M., Álvarez , A., Matellanes , L., Momeñe , E., Txarrolde, J. R., y otros. (2006). Desarrollo de nuevos composites termoplásticos a partir de fibra de bagazo. (I. C. Azúcar., Ed.) Redalyc.Org Red de revistas científicas de América Latina, el Caribe, España y Portugal. , XL (3), 29-34.
- Canevarolo Júnior, S. V. (2002). *Ciência dos polímeros: un texto básico para tecnólogos e engenheiros* . São Paulo : Artliber Editora.
- Chávez Gutiérrez, M., De Paoli, M.-A., & Felisberti, M. I. (2014). Cellulose acetate and short curauá fibers biocomposites prepared by large scale processing: Reinforcing and thermal insulating properties. *Industrial Crops and Products* (52), 363-372
- Chávez Gutiérrez, M., De Paoli, M.-A., & Felisberti, M. I. (2012). Biocomposites based on cellulose acetate and short curauá fibers: Effect of plasticizers and chemical treatments of the fibers. *Composites: Part A* , 1338-1346.

- Elzubair, A., & Miguez Suarez, J. C. (2012). Mechanical behavior of recycled polyethylene/piassava fiber composites. *Materials Science & Engineering A* (557), 29-35.
- Gere, J. M., & Goodno, B. J. (2009). *Mecánica de materiales*. México D.F.: Cengage Learning Editores, S.A. de C.V.
- Groover, M. P. (2007). *Fundamentos de Manufactura Moderna* (3a. Edición ed., Vol. 1). D.F., México: McGraw-Hill.
- Lasheras Esteban, J. M., & Sánchez-Marin Pizarro, J. M. (1971). *Tecnología de los materiales industriales* (Tercera ed.). Barceona, España: Ediciones Cedel.
- Mantell, C. L. (1958). *Engineering Materials Handbook* (Primera ed.). New York : McGraw-Hill Book Company.
- Martí, F. Reciclado de composites termoestables. En: X Congreso Internacional de Ingeniería de Proyectos (Valencia, 13-15 de septiembre de 2006). Valencia, 2006.
- Montes, J. (2009). Estudio del efecto de la fibra de bagazo de Agave Angustifolia Haw en la resistencia a flexión y compresión del adobe compactado. Tesis de maestría. Instituto Politécnico Nacional.
- McGraw-Hill Book Company. (1971). *Encyclopedia of Science and Technology* (Vol. 8). Filipinas: McGraw-Hill.
- Mott, R. L. (2009). *Resistencia de Materiales* (Quinta ed.). México D.F.: Pearson Educación.
- Pierre Beer, F., Jhonston, Jr., E. R., Dewolf, J. T., & Mazurek, D. (2010). *Mecánica de Materiales* (Quinta ed.). México, D.F.: Mc.Graw-Hill/Interamericana editores, S.A. de C.V.
- P. Popov, E. (1982). *Mecánica de Materiales*. México: Editorial Limusa.
- Pytel, A., & L. Singer, F. (2008). *Resistencia de materiales*. México D.F.: Alfaomega Grupo Editor.
- Rattanawijan, W., & Amornsakchai, T. (2011). Polyethylene Composite Fibers. I. Composite Fibers of High-Density Polyethylene. *Journal of Applied Polymer Science*, 501-509.

- Ramales, M. y Ortiz, E. (2007) El proceso de elaboración del Mezcal. *Bebidas Mexicanas*. México D.F.: Alfa Editores Técnicos.
- Ríos Soberanis, C. R. (Marzo de 2012). Polímeros naturales y sintéticos. *Ciencia y Desarrollo*, 62-69.
- Robles, I. (2011). Utilización de residuos orgánicos agroindustriales para la producción de sustratos agrícolas y energías renovables. Oaxaca de Juárez: Universidad Nova Universitas.
- Rosato, D. V. (1982). An overview of composites. En G. Lubin , & L. George (Ed.), *Handbook of composites* (Vol. 1, págs. 1-14). New York, New York, Estados Unidos de América: Nostrand Reinhold Company.
- Von Meysenbug, C. M. (1981). *Tecnología de plásticos para ingenieros*. España: Ediciones Urmo.
- Warner, S. B. (1995). *Fiber Science*. New York: Prentice-Hall, Inc.
- Young, R. J., & Lovell, P. A. (2011). *Introduction to polymers*. Boca Ratón, Florida: Taylor & Francis Group, LLC.
- Zhao, X., Li, R. K., & Bai, S.-L. (2014). Mechanical properties of sisal fiber reinforced high density polyethylene composites: Effect of fiber content, interfacial compatibilization, and manufacturing process. *Composites: Part A* (65), 169-174.