



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA  
DE MÉXICO**

---

**FACULTAD DE INGENIERÍA**

**CARACTERIZACIÓN MECÁNICA DE UN  
MATERIAL COMPUESTO DESARROLLADO A  
PARTIR DE MATERIAS PRIMAS RECICLADAS  
CONTEMPLANDO SU POSIBLE APLICACIÓN  
EN LA AGRICULTURA URBANA**

**T E S I S**

**QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:  
INGENIERO MECÁNICO**

**P R E S E N T A:**

**CÉSAR GERARDO PEÑA TAPIA**



**DIRECTOR DE TESIS  
Dr. JESÚS VICENTE GONZÁLEZ SOSA**

**CD. UNIVERSITARIA**

**2015**

## Contenido

Índice de figuras.....	4
Índice de tablas.....	6
Índice de ecuaciones.....	8
Resumen.....	9
Capítulo I. Introducción.....	10
Planteamiento del problema.....	11
Objetivo.....	12
Alcance.....	12
Justificación.....	12
Metodología de trabajo.....	13
Reflexión final.....	14
Capítulo II. Caracterización física y propiedades.....	15
Materiales.....	15
Familias de materiales.....	16
Propiedades físicas de los materiales.....	17
Propiedades químicas de los materiales.....	17
Propiedades mecánicas de los materiales.....	17
Propiedades tecnológicas de los materiales.....	18
Reflexión final.....	19
Capítulo III. Invernaderos.....	20
Generalidades.....	20
Antecedentes históricos.....	21
Situación en México.....	23
Cronología.....	24
Descripción.....	24
Discusión.....	26
Importancia de los invernaderos.....	27
Ventajas.....	27
Desventajas.....	28
Estructura.....	28

Materiales.....	32
Agricultura urbana.....	34
Reflexión final.....	35
Capítulo IV. Descripción de materiales y métodos experimentales.....	36
Material compuesto.....	36
Fibras.....	37
Matriz.....	38
Aditivos.....	39
Compuesto madera-polipropileno.....	40
Madera.....	42
Propiedades de la madera.....	43
Anisotropía.....	43
Densidad.....	43
Humedad.....	44
Contracción.....	45
Dureza.....	45
Dilatación térmica.....	45
Conductividad térmica.....	45
Conductividad eléctrica.....	46
Resistencia mecánica.....	46
Clasificación de la madera.....	47
Aserrín de pino.....	48
Polipropileno.....	49
Polipropileno reciclado.....	52
Patrones comparativos (polímeros).....	55
Ensayos mecánicos.....	56
Ensayo de flexión.....	56
Ensayo de impacto.....	57
Normatividad, elaboración de probetas y ensayos mecánicos.....	59
Reflexión final.....	60
Capítulo V. Evaluación mecánica y análisis de resultados.....	61
Análisis del ensayo de impacto.....	61

Análisis del ensayo de flexión. ....	71
Esfuerzo máximo. ....	73
Deformación. ....	78
Módulo a flexión. ....	80
Costos. ....	85
Estudio de caso. ....	88
Reflexión final. ....	92
Capítulo VI. Conclusiones. ....	93
Referencias. ....	96
Anexos. ....	99



## Índice de figuras.

Figura 1. Metodología de trabajo propuesta por el autor. ....	13
Figura 2. Esquema representativo en la elaboración de un material [2]. ....	15
Figura 3. Clasificación de las diferentes familias de los materiales [1]. ....	16
Figura 4. Diversidad de climas que presenta la República Mexicana. ....	23
Figura 5. Proporción de las principales hortalizas en México [9]. ....	25
Figura 6. Tecnificación de los invernaderos en el territorio nacional [9]. ....	26
Figura 7. Componentes básicos en una estructura de invernadero. ....	29
Figura 8. Detalle de algunos elementos estructurales en un invernadero de tipo agrícola [40]. ....	29
Figura 9. Invernadero del tipo estructura rígida [41]. ....	30
Figura 10. Arreglo de invernaderos del tipo agrícola acoplados en paralelo con estructura aerodinámica [43]. ....	31
Figura 11. Materias primas que forman parte de un material compuesto [13]. ....	37
Figura 12. Clasificación de las fibras en función de su origen [13]. ....	38
Figura 13. Diferentes matrices empleadas en materiales compuestos [13]. ....	39
Figura 14. Clasificación de los materiales compuestos “Wood Plastic Composites” [21]. .	41
Figura 15. Sistema de referencia elegido en una muestra de madera para su estudio [19]. .....	43
Figura 16. La madera tiene un desempeño visco-elástico. Se muestra un comparativo del comportamiento mecánico de la madera ante el acero y el plástico [19]. ....	46
Figura 17. Clasificación de la madera según su dureza [37]. ....	48
Figura 18. Disposición de la cadena del polipropileno isotáctico. Actualmente es el polipropileno de mayor uso debido a que proporciona una alta densidad [42]. ....	50
Figura 19. Uso aparente de los polímeros en el mercado Mexicano, año 2011 [30]. ....	53
Figura 20. Consumo aparente de los diferentes tipos de plásticos en la industria Mexicana, año 2011 [30]. ....	53
Figura 21. Esquema del ensayo a flexión. A la izquierda: flexión 3 puntos. A la derecha: flexión 4 puntos [13]. ....	57
Figura 22. Detalles de la prueba de impacto en una máquina de péndulo [16]. ....	58
Figura 23. Máquina de pruebas de impacto. Instalaciones del laboratorio de pruebas mecánicas de la Facultad de Ingeniería de la UNAM. ....	62
Figura 24. Probetas fabricadas según la norma <i>ASTM D256</i> para ensayos de impacto. ...	62
Figura 25. Comparación de las energías promedio en los ensayos de impacto. ....	63
Figura 26. Probetas de impacto ensayadas, en composición 100%PPr. ....	64
Figura 27. Probetas de impacto ensayadas, en composición 75%PPr/25%Ap. ....	64
Figura 28. Superficies próximas a la muesca de probetas de impacto donde se resaltan detalles de alojamientos de aire. Composición 100%PPr. ....	65
Figura 29. Superficies próximas a la muesca de probetas de impacto donde se resaltan detalles de porosidad y alojamientos de aire. Composición 75%PPr/25%Ap. ....	66
Figura 30. Microscopio óptico NIKON. Este equipo forma parte de los laboratorios de metalografía en la Facultad de Ingeniería, UNAM [39]. ....	67

Figura 31. Matriz de polipropileno reciclado reforzada mediante partículas de aserrín de pino, en composición 75 y 25%, respectivamente. Imagen izquierda muestra 50X, imagen derecha 20X [39].	67
Figura 32. Aglomeración de partículas maderables en la composición 65%PPr/25%Ap. Imágenes obtenidas a 20X [39].	68
Figura 33. Detalle de fusión de partículas de aserrín de pino formando hojuelas, imagen de la izquierda a 20X. Detalle a 50X de una hojuela y la matriz polimérica, imagen de la derecha [39].	69
Figura 34. Composición 60% polipropileno reciclado y 40% aserrín de pino. Aumentos a 20X y 50X [39].	69
Figura 35. Comparativo entre los valores máximos y mínimos alcanzados por el valor de la tenacidad para el material compuesto y los polímeros empleados comúnmente en invernaderos.	71
Figura 36. Probetas de flexión manufacturadas según norma ASTM D790.	72
Figura 37. Herramental involucrado en el ensayo a flexión en tres puntos. Parte inferior cruceta graduada, parte superior nariz que aplica la carga.	72
Figura 38. Comparativo entre resultados obtenidos del esfuerzo máximo teórico y experimental. Composición 100%PPr.	74
Figura 39. Comparativo entre resultados obtenidos del esfuerzo máximo teórico y experimental. Composición 75%PPr/25%Ap.	75
Figura 40. Tendencia del comportamiento teórico y experimental en el esfuerzo máximo para el material compuesto y la matriz polimérica reciclada sin reforzar.	76
Figura 41. Comparativo de la resistencia del material compuesto y polímeros comunes empleados en invernaderos.	77
Figura 42. Comparativo entre resultados obtenidos de la deformación teórica y experimental. Composición 100%PPr.	79
Figura 43. Comparativo entre los resultados obtenidos de la deformación teórica y experimental. Composición 100%PPr/25%Ap.	80
Figura 44. Comparativo de los resultados obtenidos en el módulo a flexión teórico y experimental. Composición 100%PPr.	82
Figura 45. Comparativo de los resultados obtenidos en el módulo a flexión teórico y experimental. Composición 75%PPr/25%Ap.	83
Figura 46. Tendencia del comportamiento teórico y experimental en el módulo a flexión para el material compuesto y la matriz polimérica sin reforzar.	84
Figura 47. Comparativo entre el módulo a flexión de polímeros empleados en invernaderos y el material compuesto analizado.	85
Figura 48. Comparativo de la resistencia a tracción de un material compuesto. Se emplean diferentes matrices termoplásticas sin reciclar, las cuales son comparadas con una matriz de polipropileno reciclada. En cualquiera de los casos se reforzó con fibras de madera.	91

## Índice de tablas.

Tabla 1. Ventajas y desventajas de las estructuras para invernadero [7], [8].	32
Tabla 2. Materiales empleados comúnmente en el armado de un invernadero [7], [8].	33
Tabla 3. Ventajas y desventajas ofrecidas por la madera como material de refuerzo [21].	41
Tabla 4. Clasificación de algunas especies de madera según su dureza [33].	45
Tabla 5. Conductividad térmica de algunos materiales comunes [38].	46
Tabla 6. Algunas propiedades importantes que ostentan las maderas duras y blandas [37].	47
Tabla 7. Propiedades mecánicas del aserrín [28].	49
Tabla 8. Ventajas y desventajas que posee el polipropileno [17].	51
Tabla 9. Resumen principal de las propiedades mecánicas del polipropileno de características vírgenes [27].	52
Tabla 10. Comparación de algunas propiedades mecánicas del polipropileno virgen y reciclado [28].	54
Tabla 11. Propiedades mecánicas de polímeros comúnmente empleados en invernaderos [44], [45].	55
Tabla 12. Energía absorbida por probetas durante los ensayos de impacto.	63
Tabla 13. Comparativo entre el valor alcanzado en la tenacidad por el material compuesto y los polímeros comúnmente empleados en invernaderos.	70
Tabla 14. Comparación de propiedades mecánicas de probetas sometidas a ensayos a flexión.	72
Tabla 15. Esfuerzo máximo teórico y experimental de la composición 100%PPr, para ensayo a flexión.	73
Tabla 16. Esfuerzo máximo teórico y experimental de la composición 75%PPr/25%Ap para el ensayo a flexión.	75
Tabla 17. Valores típicos del esfuerzo máximo de algunos polímeros empleados en invernaderos. Comparados con el material compuesto.	76
Tabla 18. Deformación teórica y experimental de la composición 100%PPr, para ensayo a flexión.	78
Tabla 19. Deformación teórica y experimental del material compuesto, para ensayo a flexión.	79
Tabla 20. Módulo a flexión teórico y experimental de la composición 100%PPr.	81
Tabla 21. Módulo a flexión teórico y experimental de la composición 75%PPr/25%Ap.	82
Tabla 22. Valores típicos en el módulo a flexión en materiales poliméricos empleados comúnmente en invernaderos comparado con el valor obtenido de la misma propiedad mecánica en el material compuesto.	85
Tabla 23. Conjunto de variables involucradas en el comparativo de costos en la fabricación de una probeta de impacto de material compuesto y otra elaborada con polímeros vírgenes.	87
Tabla 24. Comparativo entre costos de fabricación de una probeta de impacto a razón de diferentes materias primas.	88
Tabla 25. Valores de resistencia a tensión para polímeros vírgenes seleccionados, madera y longitud de la fibra de madera.	90

Tabla 26. Resultados de resistencias a tensión para diferentes matrices termoplásticas vírgenes. .... 90

## Índice de ecuaciones.

Ecuación 1. Cálculo de la densidad en la madera [19].	43
Ecuación 2. Cálculo de la densidad específica en una muestra de madera [19].	44
Ecuación 3. Relación entre el peso seco de la madera ( $P_0$ ) y la contracción volumétrica de la madera ( $C_v$ ) [19].	44
Ecuación 4. Porcentaje de humedad presente en la madera en función del peso del agua y el peso de la madera seca [19].	44
Ecuación 5. Ecuación empleada para la determinación del esfuerzo máximo en la probeta, según la norma <i>ASTM D790</i> .	73
Ecuación 6. Ecuación empleada para la determinación de la deformación en la probeta, según la norma <i>ASTM D790</i> .	78
Ecuación 7. Ecuación empleada para la determinación del módulo a flexión en la probeta, según la norma <i>ASTM D790</i> .	80
Ecuación 8. Ecuación empleada para la obtención de los resultados experimentales del módulo a flexión.	81
Ecuación 9. Ecuación que permite obtener el valor de la porción del aserrín en la probeta.	86
Ecuación 10. Ecuación que permite estimar la resistencia a tensión de un material compuesto de matriz termoplástica y refuerzo maderable.	89

## Resumen.

Este trabajo presenta una propuesta de investigación de una alternativa en el uso de residuos orgánicos y poliméricos que habitualmente son considerados como material de reuso después de una primera aplicación industrial, de modo que la madera y el polipropileno son el centro de atención de esta tesis. Estos dos materiales se unen con el fin de fabricar un material compuesto el cual se le caracterizará y analizará para determinar su posible aplicación como material de uso común para la construcción de invernaderos del tipo urbano.

La satisfacción de la premisa anterior se llevará a cabo mediante un análisis a la propuesta de material compuesto, el cual se efectúa utilizando una matriz de polipropileno reciclado (PPr), teniendo aserrín de pino (Ap) como material de refuerzo. Este material compuesto consta de una única composición, 75% polipropileno reciclado (PPr) y 25% aserrín de pino (Ap), empleando en este último elemento una granulometría de malla 30. La elaboración de este material compuesto no contempla el uso de agentes adhesivos o aditivos. A su vez, se realizan muestras patrón en composición 100% polipropileno reciclado (PPr) para fines comparativos con su homólogo compuesto basado en productos reciclados. Estas variedades de compuestos son efectuadas por técnicas de fusión que posteriormente se lleva a moldeo por inyección para la creación de probetas de impacto y flexión según las normas *ASTM D256* y *ASTM D790*, respectivamente.

Para caracterizar el material se investigó el comportamiento de las composiciones anteriormente mencionadas bajo los ensayos mecánicos de impacto y flexión en tres puntos. La tenacidad fue caracterizada por medio de la prueba de impacto. Los resultados obtenidos para la composición 75%PPr/25%Ap son en su mayoría mayores que los arrojados por la composición 100%PPr, sólo casos aislados evidenciaron una baja tenacidad. Asimismo, se analizaron probetas ensayadas de ambas composiciones, donde se localizaron zonas críticas sobre todo en el caso de la composición 75%PPr/25%Ap. Sin embargo, lo anterior no comprometió el desempeño mecánico de los especímenes y por el contrario se evidenció la buena interacción entre las materias primas sin el uso de agentes adhesivos o aditivos. La caracterización de la resistencia así como el módulo a flexión es obtenida por el ensayo a flexión. En lo que se refiere a estos ensayos, en todos los casos la composición 75%PPr/25%Ap mostró un incremento tanto en la resistencia como en el módulo a flexión, en relación con la composición 100%PPr, finalmente los resultados obtenidos fueron comparados con propiedades homólogas de polímeros (PVC, HDPE y PMMA), empleados en invernaderos.

# Capítulo I. Introducción.

---

---

A nivel internacional la investigación referente a los materiales compuestos es ardua debido a las propiedades que éstos ofrecen. Aquellos materiales compuestos basados en elementos orgánicos como la madera y elementos poliméricos han cobrado una sentida importancia debido a que se ha perseguido un objetivo constante, el cual se interpreta como la búsqueda de una efectiva interacción entre el polímero y la madera, compartiendo como fin común con los materiales compuestos, la obtención de productos de alta resistencia y durabilidad, así como una reducción en los costos de manufactura [35], donde lo anterior se quiere obtener a partir de la reutilización de los remanentes que generan las industrias del polímero y maderera y que habitualmente se consideran como merma industrial, es así que la madera en cualquiera de sus presentaciones (viruta o aserrín) y polímeros de carácter virgen o reciclado son el centro de atención ya que éstos permiten la fabricación de materiales compuestos de características biodegradables.

Evidencias muestran y sostienen que este tipo de materiales compuestos (polímero/madera), son empleados en una gran variedad de artículos tales como: manillas de puertas y chapas, molduras, mangos de herramientas, aditamentos para escritorios, paneles para equipos eléctricos, entre otros usos, siendo así este un factor motivante ante la creación de nuevas aplicaciones destinadas a este tipo de materiales innovadores. [29]

Estudios realizados por organismos como *PEMEX* [30] y Foros Internacionales de Negocios en nuestro país como *PLASTIMAGEN* [31], así como las crecientes tendencias globales indican que América Latina y en específico México son una plataforma importante para la industria del plástico. Con base en esto es menester idear mecanismos que regulen y aprovechen el uso de residuos plásticos, donde una solución viable es no sólo reciclar plástico sino además los remanentes generados por la industria maderera del país, siendo así materias primas potenciales para la generación de material compuesto, proponiendo una alternativa eficiente de aprovechamiento ante la generación de esta clase de residuos.

Esta investigación está basada en el uso de materiales poliméricos reciclados, en específico el polipropileno reciclado y la madera de pino en su presentación de aserrín, donde ambos materiales son contemplados como desechos industriales después de una primera aplicación. Con base en lo anterior se propone el desarrollo de un análisis del efecto de la mezcla de estas materias primas

recicladadas para la fabricación de un material compuesto en una única composición (75%PPr y 25%Ap), no contemplando el uso de aditivos o adhesivos en dicha mezcla, esto con el fin de dar un seguimiento a la línea de investigación propuesta por González y colaboradores. [28], [29]

Así pues, la investigación, aplicación de tecnología y análisis sobre este material compuesto basado en materias primas recicladas, busca la implementación de éste al mercado de estructuras para invernaderos de carácter urbano. Con dicho fin se realiza la caracterización de este material compuesto bajo ensayos mecánicos que pretenden reproducir condiciones a las que se encuentra sometido un material empleado en estructura para invernadero.

Finalmente esta línea de investigación pretende cumplir con dos premisas importantes:

- *Primera.* Establecer continuidad en el desarrollo y análisis de materiales compuestos de características “verdes”, con base en materias primas recicladas sin el uso de agentes adhesivos o aditivos, así como fomentar la variedad de matrices poliméricas recicladas obteniendo nuevos compuestos de características similares.
- *Segunda.* Proporcionar un beneficio directo en el proceso de reciclaje y uso de residuos plásticos y forestales, generando un material compuesto funcional el cual al terminar su vida útil tenga un impacto positivo al medio ambiente debido a su condición de material biodegradable.

### **Planteamiento del problema.**

Actualmente se tiene una importante tendencia hacia la concientización del cuidado y conservación del medio ambiente. A partir de este movimiento se han mostrado diferentes mecanismos que permiten fomentar el cuidado hacia el planeta, algunos ejemplos de éstos son: reciclaje, control de emisiones de gases nocivos, fomento de áreas verdes, cultivos hidropónicos, entre otros. Ante lo anterior muchas personas empiezan a mostrar interés y familiarización con esta clase de movimientos ecológicos y en muchos de los casos adoptan la tendencia hacia el fomento del reciclado, uso de vehículos cero emisiones, así como una creciente concientización de azoteas verdes, donde éstas pueden sólo ser simples plantíos instalados en techumbres o también existiendo la modalidad de cosecha, donde esta última fomenta a la persona cosechar sus propias hortalizas mediante técnicas de hidroponía. Sin embargo, en el mercado de invernaderos no existen ofertas tentadoras en cuanto a estructuras pequeñas, estructuras propias que puedan ser instaladas en una azotea o en un espacio medianamente reducido. Ya que muchas de éstas son prediseñadas bajo dimensiones establecidas o en su



defecto se apela a que el diseño sea adaptado al lugar donde se quiera realizar la instalación, razón por la cual se incrementa el costo del invernadero.

Ante lo anteriormente citado se pretende analizar el comportamiento mecánico de un material compuesto obtenido a partir de productos reciclados, para su posible aplicación en elementos estructurales en invernaderos urbanos. Esta propuesta persigue dotar de un producto de características biodegradables, donde el costo de fabricación que éste tenga sea equiparable al que ofrecen productos de similar condición, abriéndose paso así en el mercado de estructuras para invernaderos urbanos de forma competitiva en pro de la procuración del ambiente.

### **Objetivo.**

Analizar y aplicar tecnología en la caracterización de un material compuesto (plástico/madera), generado a partir de productos reciclados, polipropileno y aserrín de pino, para su evaluación comparativa con materiales plásticos empleados en la fabricación de estructuras para invernaderos de producción urbana. La caracterización se llevará a cabo mediante la aplicación de ensayos a flexión e impacto, siendo éstos los que ofrecen la información necesaria a partir del tipo de solicitaciones a las que se encuentra sometida una estructura para invernadero. Los ensayos mecánicos se efectuarán siguiendo las consideraciones marcadas por las normas *ASTM D256*, dirigida a consideraciones referentes a los ensayos de impacto y *ASTM D790*, referida a los ensayos de flexión.

### **Alcance.**

Se entregará un reporte de corte académico, el cual mostrará las propiedades físicas y mecánicas que ostenta el material compuesto, donde los resultados obtenidos serán comparados con propiedades homólogas de materiales poliméricos empleados en invernaderos.

### **Justificación.**

La problemática a la que se enfrenta la industria maderera y la del plástico en nuestro país en lo que se refiere al aprovechamiento íntegro de su materia prima, permite que material contemplado como desecho industrial forme parte de un material compuesto constituido por madera, aserrín en este caso, en conjunción con polipropileno reciclado, buscando encontrar un mercado de aceptación en el rubro de invernaderos urbanos.

Para lograr este propósito es indispensable realizar una investigación y evaluación que permita determinar las propiedades físicas y mecánicas del material compuesto, tal que, la recopilación de propiedades características sean comparadas con propiedades de materiales afines en el mercado específico de los

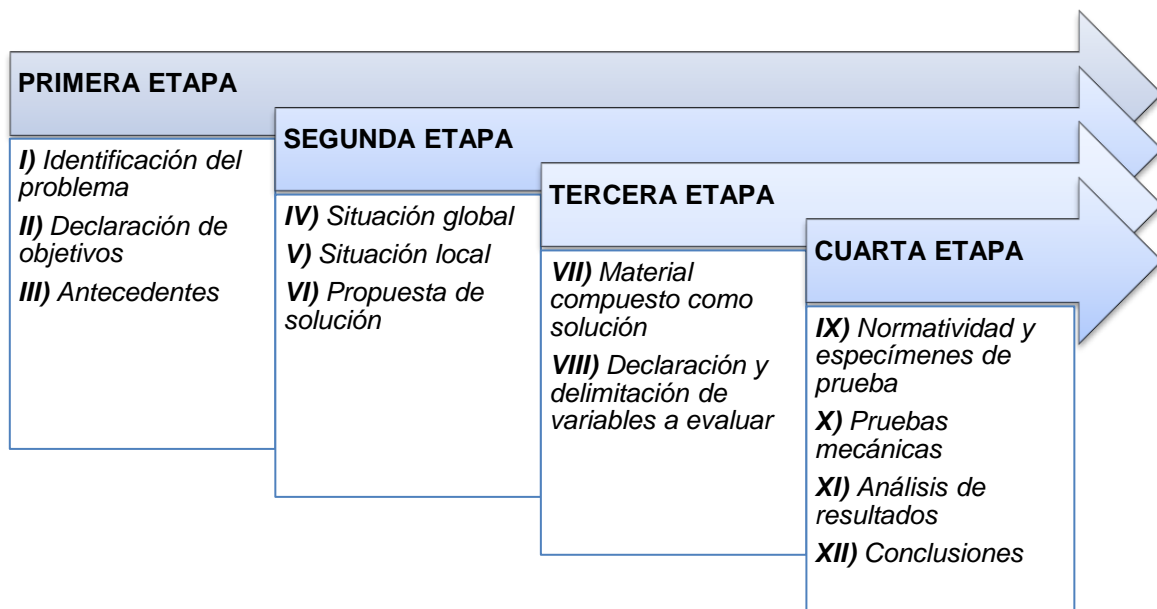
invernaderos urbanos, permitiendo así determinar la factibilidad del empleo de este material compuesto a nivel estructural.

El binomio que forman estos dos componentes pretende dotar de un material compuesto fiable para la construcción de invernaderos del tipo urbano, además siendo un material de características biodegradables el impacto que éste tenga hacia el medio ambiente será favorable.

### **Metodología de trabajo.**

En el rubro de la ingeniería es común encontrar procesos que son definidos de forma paso a paso, los cuales tiene por objetivo la determinación de una solución ante una problemática estipulada. Si bien esta clase de métodos se encuentran fielmente respaldados mediante trayectorias ya establecidas y comprobadas, siempre se puede intentar moldear una metodología de trabajo propia, la cual permita adecuar las herramientas, tiempos y medios de trabajo de la mejor manera para quien ejecuta la metodología, favoreciendo así un mejor desempeño en la recopilación de resultados.

El presente trabajo emplea una metodología la cual permite establecer un plan y tiempo satisfactorios en el desarrollo del proyecto en cuestión. Siendo así, se establecen cuatro etapas de investigación y desarrollo de actividades acordes a los requerimientos solicitados.



**Figura 1. Metodología de trabajo propuesta por el autor.**

La figura 1 muestra la alternativa propuesta y empleada por el autor para la caracterización de un material compuesto (PPr/Ap). En cada una de las cuatro etapas establecidas se desarrollan rubros, mismos que permiten una fluidez en la continuidad de la investigación.

### **Reflexión final.**

Este capítulo ha dado a conocer el propósito que persigue realizar una investigación a un material compuesto basado en materias primas de reuso que comúnmente son contempladas como merma industrial. No obstante, dentro de los alcances propuestos por este trabajo no se contempla la elaboración ni análisis de algún elemento estructural para invernadero, debido a la condición inicial de caracterización del material compuesto, es importante dar a conocer las propiedades que éste ostenta, sobre todo mecánicas ya que son éstas las que permiten la factibilidad de la elaboración o no de la propuesta. Siendo así menester caracterizarle, enfatizando particularmente en las propiedades mecánicas que posee este material compuesto. Así pues, el siguiente capítulo tendrá a bien definir todo aquello relacionado con la caracterización y propiedades que posee cualquier tipo de material.

## Capítulo II. Caracterización física y propiedades.

---

---

Según el diccionario de la *Real Academia Española*, la palabra *caracterizar* hace referencia a la determinación de los atributos peculiares de alguien o algo, de modo que claramente se distinga de los demás.

Así pues, a partir de la anterior definición lo que pretende este trabajo es lograr la caracterización de un material compuesto, mediante el empleo de ensayos de impacto y flexión, con fines comparativos con materiales poliméricos empleados en estructuras de invernaderos.

### **Materiales.**

Se puede definir a un material como una porción de materia trabajada en su estado natural, sea en forma simple o en conjunto por el hombre para la fabricación de objetos en busca de un beneficio tecnológico e industrial. El proceso de elaboración que sufre cada material, le advierte poseer una cierta microestructura la cual propiamente determina su comportamiento físico, químico y mecánico. [1]

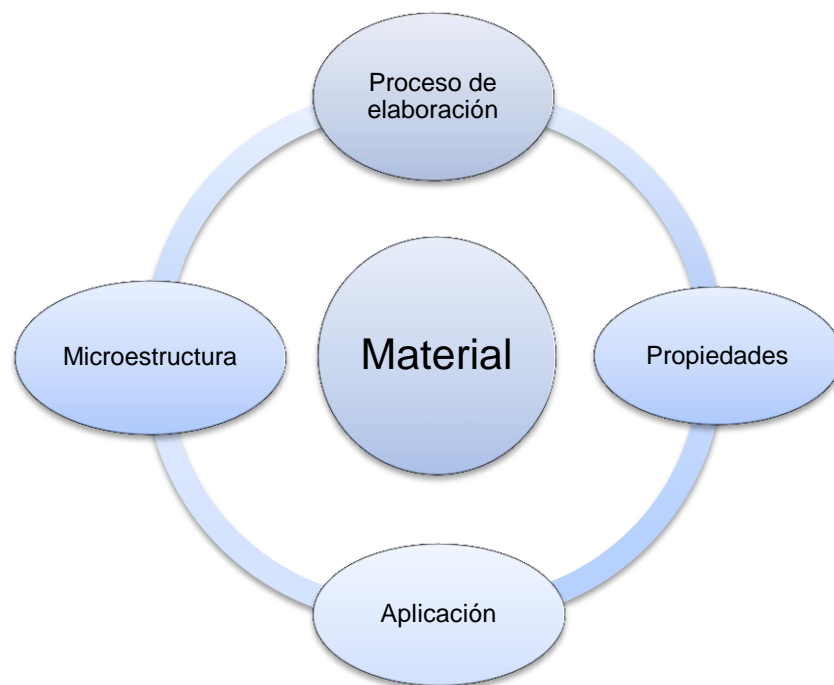


Figura 2. Esquema representativo en la elaboración de un material [2].

Los materiales pueden ser estudiados a partir de su microestructura, con lo cual se pueden predecir las propiedades que éstos pueden tener, así como el mejor proceso de manufactura al que se les puede someter para obtener un material de excelente calidad y prestaciones y así tener una aplicación específica, esto se puede ver resumido en la figura 2.

### Familias de materiales.

La selección de materiales no es propiamente un proceso sencillo, tomando en cuenta la gran variedad de los mismos. La elección ha de radicar en las propiedades que deberá desempeñar el material en una aplicación en específico, así como el proceso de fabricación del material, ya que éste implica el valor agregado que el material tenga. [2]

Los materiales son clasificados en grandes familias:

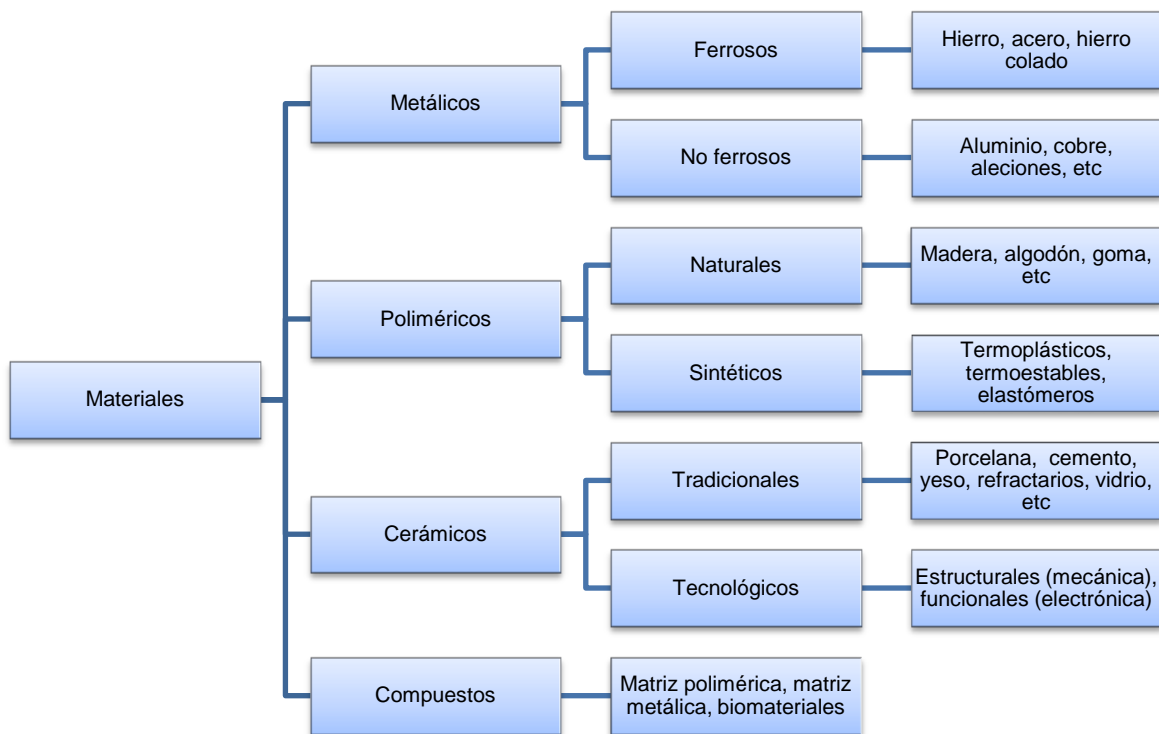


Figura 3. Clasificación de las diferentes familias de los materiales [1].

En la figura 3 se muestran las diferentes formas en que puede ser clasificado un material. Metales, polímeros, cerámicos y compuestos son pues las principales

familias que albergan en ellas mismas clasificaciones alternas de materiales con diferentes características físicas, químicas y mecánicas.

### **Propiedades físicas de los materiales.**

Se define así a aquella propiedad que puede ser medida y observada sin que ésta cambie en su composición o identidad.

- **Masa volumétrica.** Es la masa de la unidad de volumen, donde ésta es diferente para cada material.
- **Dilatación térmica.** Es el aumento del volumen que sufre un cuerpo debido al incremento de la temperatura.
- **Punto de fusión.** Se trata de la temperatura a la que un material pasa del estado sólido al líquido.
- **Conductividad térmica.** Es la capacidad que poseen los materiales para propagar el calor.
- **Conductividad eléctrica.** Es la capacidad que poseen los materiales para permitir el tránsito de la corriente eléctrica a través de ellos.

### **Propiedades químicas de los materiales.**

Se considera una propiedad química cuando la composición química de una sustancia cambia.

- **Resistencia a la corrosión.** Es la capacidad de resistencia que ostenta un material ante la acción corrosiva de agentes exteriores.
- **Alotropía.** Propiedad que poseen ciertos materiales, los cuales disponen de diferentes estructuras cristalinas en función de la temperatura, confiriéndoles diferentes propiedades.
- **Composición química.** Esta propiedad de los materiales es un factor que diversifica las características físicas, mecánicas y tecnológicas de los mismos.

### **Propiedades mecánicas de los materiales.**

Las propiedades mecánicas de un material son aquellas las que hacen referencia a los efectos de los esfuerzos en el material, debido a sollicitaciones externas. Para comprender el comportamiento de los materiales se han de realizar pruebas directamente en la pieza examinada o en piezas patrón.

- **Prueba de tracción.** Este tipo de ensayo constituye uno de los más empleados para la caracterización de los materiales. El ensayo de tracción permite obtener una cantidad importante de propiedades como esfuerzos máximo y de ruptura, límite de cedencia, deformaciones homogénea y

máxima, entre otras, siendo éstas necesarias en el cálculo y diseño estructural.

- **Prueba de compresión.** Este tipo de pruebas son similares al ensayo de tracción. Se emplea en materiales de características frágiles o materiales que se encuentren sometidos a esta clase de sollicitaciones. Los resultados y características obtenidos mediante este tipo de pruebas son equivalentes a los ensayos de tracción.
- **Prueba de dureza.** Este tipo de ensayos evalúan la dureza de un material mediante la medida de la impresión ejercida por la presión en la superficie del material por medio de un indentador (piramidal, cónico o esférico).
- **Prueba de impacto.** Los ensayos de impacto permiten caracterizar la fragilidad de un material. El ensayo consiste en la ruptura de un espécimen con una muesca (la muesca tiene por objetivo crear un concentrador de esfuerzos en el material), mediante la aplicación de una carga repentina y dinámica.
- **Prueba de fatiga.** Los ensayos de fatiga caracterizan la capacidad de un material a la resistencia ante una sollicitación del modo cíclico. Existen varios modos de ensayo como flexión, tracción, torsión, etc. Los resultados obtenidos son graficados en curvas de Wöhler.

### **Propiedades tecnológicas de los materiales.**

Este tipo de propiedades representan el comportamiento de los materiales a distintos procesos de mecanizado en una máquina-herramienta.

- **Ductilidad.** Capacidad que poseen los materiales para ser deformados plásticamente sin presentar ruptura en forma de hilos.
- **Maleabilidad.** Capacidad que poseen los materiales para ser deformados plásticamente sin presentar ruptura en forma de láminas.
- **Soldabilidad.** Es la capacidad que poseen algunos materiales de unirse entre sí, esto debido a un adecuado proceso de calentamiento y compresión.
- **Fusibilidad.** Todos los materiales tiene la posibilidad de fundirse, pero sólo algunos alcanzan un buen grado de fluidez. [3], [4], [5], [6]

## **Reflexión final.**

En este capítulo se ha revisado información básica relevante a los materiales, así como sus distintas designaciones por familia. También fueron descritas las diferentes propiedades que puede ostentar un material, donde a partir de dicha descripción se comprende mejor el objetivo que tiene resaltar una o varias propiedades de éste. Es pues, este ejercicio denominado como caracterización.

El capítulo siguiente describe el devenir de han tenido los invernaderos desde sus inicios en la antigua Roma hasta los modernos modelos empleados actualmente. Asimismo se da un breve reconocimiento al vínculo que México tiene con los invernaderos. Por otra, parte se dan a conocer características como: ventajas y desventajas, materiales y formas, siendo estos conceptos de vital importancia en el proceso de caracterización del material compuesto.



## Capítulo III. Invernaderos.

---

---

### Generalidades.

El concepto de invernadero se comprende como *“una estructura empleada para el cultivo y/o protección de plantas y cosechas, la cual optimiza la transmisión de radiación solar bajo condiciones controladas para mejorar el entorno del cultivo y cuyas dimensiones posibilitan el trabajo de las personas en su interior”*.

En lo que respecta al cultivo protegido éste se puede entender como un sistema especializado en el cual se tiene un control del medio alterando condiciones tales como temperatura, radiación solar, suelo, viento, humedad y composición atmosférica.

Estas técnicas de protección permiten la obtención de un cultivo de plantas o cosechas obteniendo un alto valor añadido modificando su entorno natural ofreciendo una prolongación en el periodo de recolección, estabilización en las producciones, aumento en los rendimientos del producto así como una mejora en la calidad del mismo y de la disposición de productos cuando la producción al aire libre se encuentre limitada.

Así pues, entiéndase que el objetivo genérico de la protección de un cultivo es la modificación del entorno natural de manera parcial o total, mediante el empleo de diversas técnicas. Esta diversidad de técnicas se resume a continuación:

- I. *Reducción de la necesidad del agua.* El empleo de diversos tipos de protección (restos orgánicos, grava, arena, lámina plástica, etc.) permite reducir pérdidas de agua por evaporación, así como limitar el crecimiento de la mala hierba.
- II. *Protección a bajas temperaturas.* Pueden ser del tipo individuales (para cada planta) o masiva (líneas de plantas o parcelas enteras). Este ejercicio se logra mediante campanas, túneles, cubiertas planas o invernaderos.
- III. *Reducción de la velocidad del viento.* Se emplean cortavientos como setos tanto en forma natural o artificial, sin embargo, no es la única manera de protección ya que también se encuentran los túneles e invernaderos.
- IV. *Limitar el impacto de climas áridos y desérticos.* El empleo de invernaderos en regiones áridas o desérticas va encaminado al aislamiento del medio natural permitiendo la creación de un microclima óptimo para la horticultura.
- V. *Reducción de daños ante plagas, malas hierbas y predadores.* En entornos aislados (como invernaderos) es más fácil la defensa fitosanitaria.

- VI. *Extensión de las áreas de producción y prolongación de los ciclos de cultivo.* La producción de cultivos se ha incrementado mediante el empleo de invernaderos de diverso nivel de sofisticación, incorporando áreas nuevas a la producción hortícola y alargando en el mercado la presencia de productos fuera de época.
- VII. *Aumento en la producción, mejora de la calidad y preservación de los recursos.* De manera paralela al incremento de las cosechas en un cultivo protegido, el uso de los recursos (suelo, agua, luz solar, energía y dióxido de carbono), es más eficiente que en un cultivo tradicional.
- VIII. *Control climático capaz de optimizar la productividad y calidad del producto.* La manipulación de variables como la temperatura, humedad, dióxido de carbono y la iluminación, permiten el aumento y una mejor calidad en el producto.
- IX. *Estabilización de productos de alta calidad.* El empleo de técnicas de protección permite evitar correr riesgos habituales de la horticultura tradicional, asimismo facilita un suministro regular hacia los mercados, ampliando por ende los calendarios de comercialización de muchas especies. [7]

En la actualidad la protección a cultivos va más allá de un simple control de plagas, climatización o riego, sino además esta técnica ha permitido ofrecer diversas ventajas al sector agrícola posicionándolo a éste inclusive como pilar estable de una economía.

### **Antecedentes históricos.**

Los primeros indicios documentados referidos a la protección de cultivos se remontan a la época del Imperio Romano, durante el reinado del emperador Tiberio César, se tiene conocimiento que se empleaban pequeñas estructuras móviles para el cultivo de pepino, las cuales se exponían al exterior si el tiempo era propicio o se guardaban a cubierto ante las inclemencias climáticas. Eran empleadas láminas de mica y alabastro como material de cerramiento. Estas técnicas de cultivo desaparecieron junto con el declive del Imperio Romano y no fue hasta la época del Renacimiento (Siglo XVI al XVIII) que aparecieron los precursores de los invernaderos, de manera inicial, en Inglaterra, Holanda y Francia hasta arribar a Japón y China. Estructuras que apelaban a la sencillez, compuestas por madera o bambú, cubiertas con paneles de vidrio o papel aceitado o en su defecto campanas de vidrio para cubrir cosechas con camas calientes.

Con el devenir del tiempo, en el hemisferio Norte se comenzaron a emplear paredes de ladrillo (en el lado Norte), fueron entonces construidos los primeros invernaderos, cuya cubierta era sólo de un agua, la cual era orientada hacia el

Sur. En esta clase de invernaderos se dan los primeros indicios de innovación al ser incluidos sistemas de regulación de temperatura, durante el periodo nocturno las cosechas eran protegidas con mantas de paja y/o caña, éstas fungían como aislantes, sin embargo su empleo era limitado. Posteriormente, durante el Siglo XIX nacen los primeros invernaderos con cubierta a dos aguas, mismo que para dicho momento se comienzan a generalizar en cultivos de vid, melones, melocotones y fresas. Para finales de este Siglo se introduce la cosecha de tomates obtenida en invernaderos.

La expansión de los invernaderos desde Europa a América y Asia fue notable y la manera evidenciable fue encontrarlos en las cercanías de las grandes ciudades. Ya para el Siglo XX, el desarrollo económico permitió el impulso de la construcción de invernaderos de cristal. Holanda supo adaptarse a esta tendencia y logró superar las 5000 hectáreas mayoritariamente de tomate a mediados del Siglo XX.

Sin embargo no es hasta la aparición de los polímeros que hay una significativa expansión de la superficie de invernaderos en el Oriente (Japón y China, principalmente), así como en países mediterráneos (con España e Italia como punteros). La incursión de los polímeros en Europa genera el desplazamiento, en parte, de la producción de hortalizas en invernadero desde los países del Norte (Holanda, principalmente) al litoral mediterráneo, donde los invernaderos plastificados, mucho más económicos, favorecieron la producción a un bajo costo de hortalizas fuera de estación.

A raíz del desarrollo económico europeo en el Norte del continente se presentó un progresivo cambio en las producciones de los invernaderos, incrementándose el cultivo de las especies de flores cortadas y ornamentales, a costa de las hortalizas. [7]

En lo que respecta al Medio Oriente (antes del surgimiento del estado de Israel) en el año de 1870 se establece la primera escuela agrícola Mikvé Israel. La Estación de Investigación Agropecuaria en Tel Aviv, establecida en 1921 dio la pauta a la evolución de la misma hasta convertirse en la Organización de Investigación Agropecuaria, en la actualidad es la principal institución de investigación y desarrollo en Israel. Desde la fundación del Estado de Israel (1948), el ahorro de agua y una máxima utilización de la tierra caracterizan la agricultura de dicha región. Israel destaca en este rubro más que en ningún otro de la tecnología agrícola.

El éxito de la agricultura israelí así como el de otras regiones ha sido posible gracias a la investigación y al empleo de tecnologías avanzadas que fueron y son aplicadas en programas de roturación de tierras y riego de las mismas.

En el continente Americano, Estados Unidos entre 1925 y 1935, se contempla y se implementa el desarrollo intensivo de investigación en la modificación de los métodos fisiológicos en vegetales para la obtención de cultivos a gran escala, sin embargo esta tendencia no es implementada totalmente hasta la introducción del polietileno en 1948, ya que este polímero representó un menor costo agregado que las caras placas de vidrio. [9]

### Situación en México.

México se encuentra delimitado geográficamente por zonas tropicales y subtropicales del Hemisferio Norte, lo cual le confiere ostentar una importante variedad de climas en diversas regiones del territorio. El clima en México se encuentra delimitado por factores tales como: la altitud sobre el nivel del mar, la latitud, diversidad de condiciones atmosféricas y la distribución de tierra y agua. Con base en lo anterior se puede argumentar que el país cuenta con una diversidad de climas, los cuales de manera general se pueden clasificar, según su temperatura como cálido y templado; y de acuerdo con la presencia de humedad en el medio como húmedo, subhúmedo y seco.

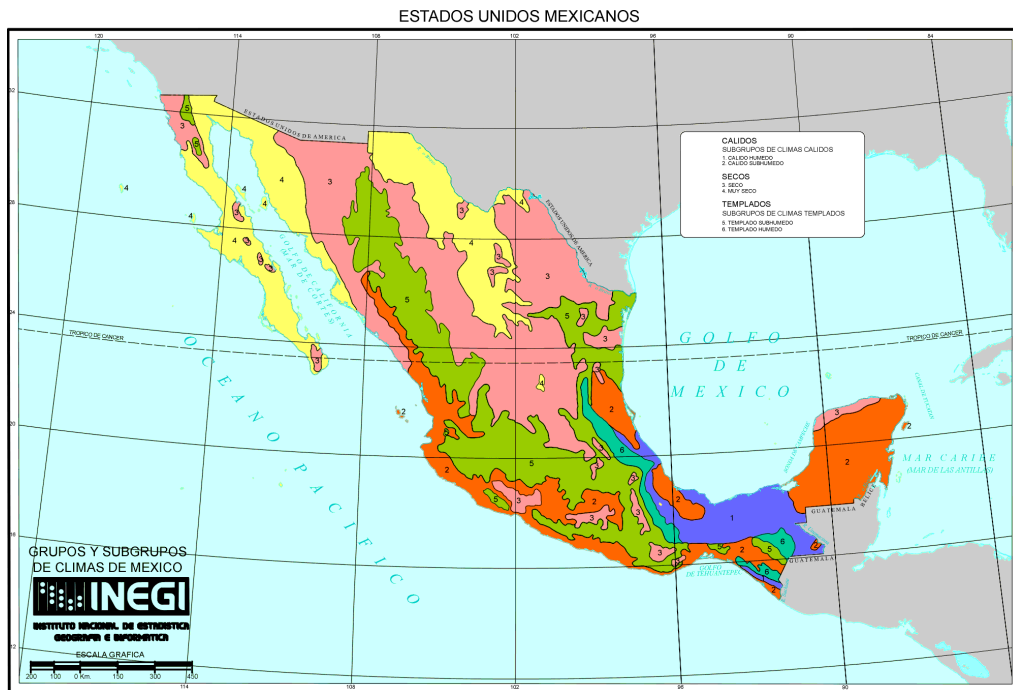


Figura 4. Diversidad de climas que presenta la República Mexicana.

México se encuentra ubicado en una zona geográfica atractiva desde el punto de vista climático. Este posicionamiento le ofrece poseer una diversidad de climas, desde aquellos que son cálidos, otros un tanto hostiles como los secos hasta terminar con los templados, tal y como se aprecia en la figura 4. Esta variedad de

climas le confieren al país la capacidad de generar cultivos tanto en modalidad de campo abierto como bajo sistemas de protección.

### **Cronología.**

Los primeros invernaderos comerciales instalados en el país fueron ubicados en el Oriente del Estado de México por emigrantes alemanes y japoneses. La casa *Matsumoto* y la familia *Barto* fueron los pioneros en cuanto a fabricación de invernaderos se refiere. [11]

Para la década de los setenta, la Comisión para el Desarrollo de las Zonas Marginadas promovió el uso y construcción de invernaderos principalmente con madera y películas plásticas. Al mismo tiempo inician programas como *Rosemex*, *Summa*, *Flora*, entre otros, los cuales adoptaban tecnologías basadas en la fibra de vidrio así como perfiles metálicos.

En la década de los ochenta, comienza una gran apertura para el desarrollo de invernaderos para viveros, floricultura y hortalizas, esto mediante la creación de diferentes empresas alojadas en el Estado de México.

En el periodo que comprende la década de los noventa, en México ya existen invernaderos de todo tipo, los cuales poseen tecnologías e innovaciones de vanguardia en cuanto a materiales, sistemas de control climático, así como equipos de riego automatizados y controles de irrigación de fertilizantes. [11]

### **Descripción.**

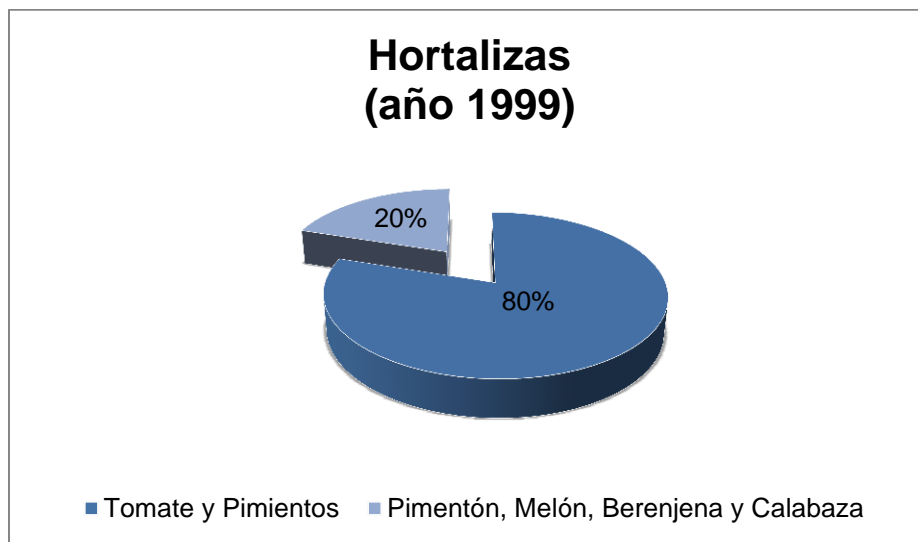
Como ya fue citado anteriormente la producción de invernaderos en México tiene su auge en la década de los setenta, sin embargo, en los últimos 20 años es cuando el crecimiento en la producción agrícola por este medio ha presentado una aceleración considerable, situación debida principalmente a la firma del Tratado de Libre Comercio de América del Norte (1994).

En un inicio se empleó muy baja tecnología como cubiertas de plástico o mallas sombra, proyectos que fueron llevados a cabo en zonas costeras. Pero durante el periodo de 1990-1995 nacen los primeros invernaderos de estructura sencilla y casas sombra, sistemas capaces de sustentar proyectos comerciales de producción de pepino europeo, tomate y pimiento en el estado de Sinaloa.

En la actualidad, la producción de hortalizas en modalidad de invernadero ha venido acrecentándose y por ende advirtiendo un desarrollo importante en estos sistemas de producción en Jalisco, Chihuahua, Zacatecas, Guanajuato, Coahuila, Estado de México entre otras entidades, esto logrado bajo programas de apoyo del gobierno para la modernización de la agricultura, tal como lo es el de *Agricultura Bajo Ambiente Controlado (ABAC)*, el cual tuvo un inicio raquíutico en

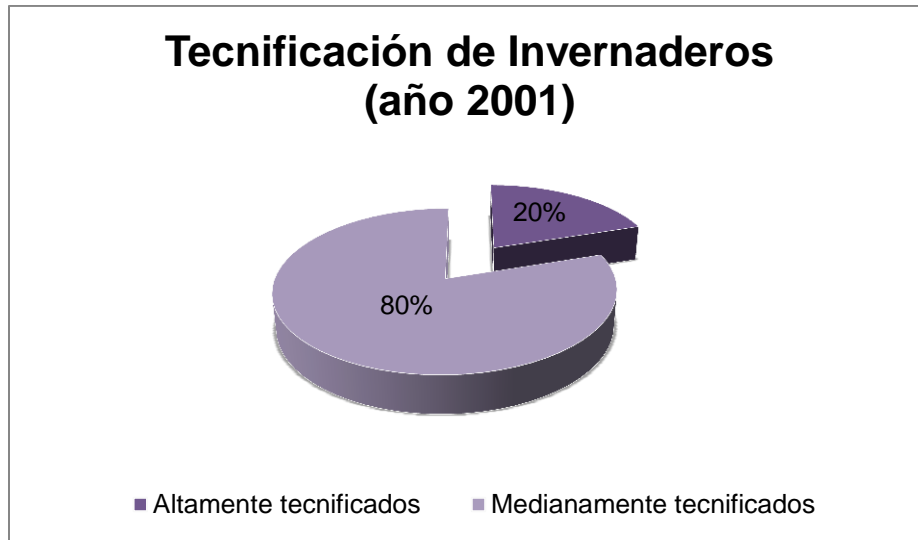
Sonora en 1999, sin embargo, para el año 2000 el programa formalizó operaciones en Baja California, Tamaulipas y Quintana Roo.

En consecuencia, el control del clima para el desarrollo de la agricultura en México es joven. De acuerdo con la Asociación Mexicana de Productores de Hortalizas en Invernadero, para el año 1999 se tenía bajo disposición de 552 hectáreas para invernaderos, ubicadas principalmente en la zona norte del país. Los principales cultivos para este referente fueron tomate (80% de la producción total) y pepinos, así como en una menor proporción pimiento, melón, berenjena y calabaza. Hacia el año 2001, se logra un crecimiento de aproximadamente 1200 hectáreas, de las cuales 80% cuentan con un nivel de tecnificación medio en tanto que el restante es altamente tecnificado.



**Figura 5. Proporción de las principales hortalizas en México [9].**

La figura 5 hace referencia a la producción de hortalizas para el periodo de 1999, donde la mayor cantidad de producto corresponde a tomate y pepino.



**Figura 6. Tecnificación de los invernaderos en el territorio nacional [9].**

En la figura 6 se referencia el nivel de tecnificación de invernaderos alcanzado por productores de hortalizas en el 2001. El 80% de los productores cuentan con un nivel altamente tecnificado a pesar de los altos costos de inversión que esto implica.

Se estima que en México hay más de 2000 hectáreas destinadas a invernaderos, asimismo se estima un crecimiento anual del 20%. En estos invernaderos, las producciones de hortalizas llegan a ser de 200 a 400 toneladas por hectárea en pepino y 200 a 600 toneladas por hectárea en tomate, de 100 a 500% más que la producción que se tiene a la intemperie, además que el producto muestra una calidad superior, lo cual augura grandes exportaciones. México presenta una gran variedad de invernaderos, de diversas dimensiones y niveles tecnológicos. El crecimiento de esta empresa ha sido exponencial sumando por cada año 200 a 250 hectáreas. [9]

### **Discusión.**

La generación de cultivos en invernadero es una técnica innovadora que se emplea en la producción agrícola principalmente, sin embargo, uno de los principales problemas para la introducción de esta tecnología en el país ha sido su alto nivel de inversión. Inversiones que se encuentran muchas veces fuera del alcance de la mayoría de los productores nacionales.

En consecuencia la apertura a la oferta y adquisición de tecnología de invernaderos a un costo accesible es parte de un paquete de accesibilidad para el sector agrícola que se ve respaldado gracias a la inclusión de nuevos materiales en el mercado, ofreciendo al agricultor la posibilidad de poseer una herramienta

útil e indispensable en la generación de hortalizas y plantas ornamentales de alta calidad.

### **Importancia de los invernaderos.**

La generalización de la técnica del cultivo protegido ha tenido sentida importancia en los últimos años en México. A las zonas que ya emplean el cultivo protegido como modalidad de sustento, se han ido añadiendo otras especializadas tanto en hortalizas como en plantas ornamentales.

Muchos agricultores han optado por el cambio de sus sistemas de producción tradicionales por sistemas de invernadero con tecnología más o menos compleja. Prácticamente, para que un sector agricultor sea rentable, éste debe ser tecnificado, mismo, el agricultor debe ser capaz de dominar técnicas de cultivo para mostrar competitividad.

Entiéndase pues, que la logística que conlleva un sistema de invernadero comprende parte fundamental de una actividad económica para la producción de un determinado producto. Lo anterior implica contemplar una serie de factores que pueden o no condicionar el éxito de la empresa.

En cualquier caso, es notoria la importancia de la incursión de los invernaderos en la producción agrícola ya que tiene y está llamando a tener en los próximos años un auge indiscutible. [8]

Sin embargo, no sólo la importancia ha venido a radicar en el sector agrícola, ahora el uso de invernaderos en ambientes urbanos ha incursionado con gran impacto, este movimiento se encuentra respaldado en parte en que muchos floricultores han establecido sus empresas en las ciudades. Pero también horticultores han aprovechado el uso de técnicas de hidroponía con la inclusión de invernaderos modificados para la reducción de pérdidas en intermediarios en cuanto a producto se refiere. Así pues, los invernaderos y su tecnología tiene un impacto favorable en el campo, sino ahora también en las ciudades.

### **Ventajas.**

- I. *Intensificación de la producción.* Se establecen las condiciones idóneas para la intensificación en los cultivos, permitiendo una mayor cantidad de producto por unidad de área de la que se puede establecer en campo abierto.
- II. *Posibilidad de generar cultivos todo el año.* Se permite la obtención de cultivos en cualquier época del año, así como la obtención de dos o más ciclos de cultivo al año, según la especie.



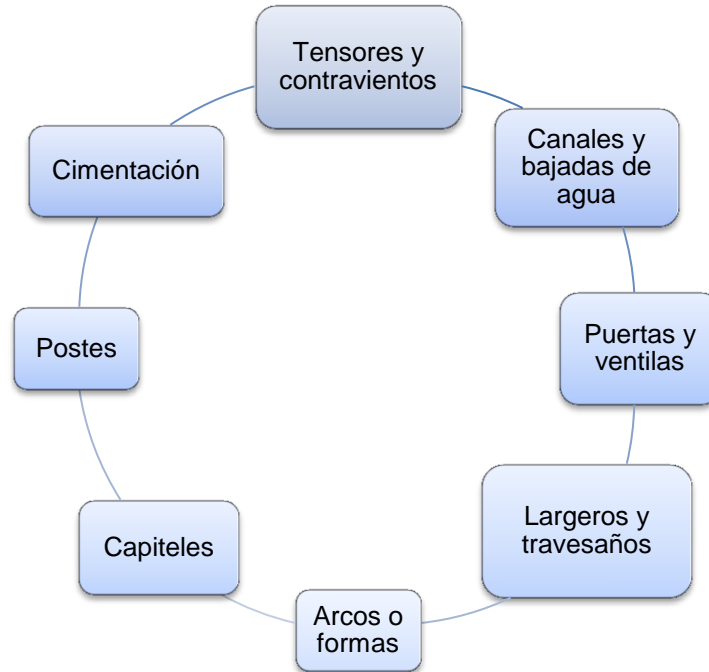
- III. *Obtención de productos fuera de temporada.* Se cuenta con el respaldo de una producción continua de productos de excelente calidad asegurando la fidelidad con los clientes.
- IV. *Obtención de productos en regiones restrictivas.* Un invernadero ofrece la posibilidad de obtener cultivos en regiones donde el clima no es el mejor para el establecimiento de una cosecha.
- V. *Aumento de los rendimientos por unidad de superficie.* El rendimiento que muestran los cultivos de invernadero directamente en suelo aumentan de dos a tres veces, comparados con cultivos a campo abierto. Si son empleados sustratos o técnicas de hidroponía, la productividad puede llegar a ser diez veces superior.
- VI. *Productos de alta calidad.* Los productos obtenidos ostentan una calidad mejor que sus homólogos obtenidos a la intemperie, ya que los primeros no se encuentran sometidos a las inclemencias del tiempo.
- VII. *Riesgos menores en la producción.* No hay variabilidad ambiental, así como factores naturales.
- VIII. *Uso eficiente del agua e insumos.* Mediante el implemento de sistemas de control de riego localizado e hidroponía, es proporcionado al producto una porción óptima de nutrientes durante cada etapa de su desarrollo.
- IX. *Control de plagas, mala hierba y enfermedades.* Facilita por mucho el control de plagas, agentes patógenos y mala hierba.
- X. *Comodidad y seguridad en el trabajo.* Las actividades de cosecha y recolección no se ven afectadas por factores meteorológicos.
- XI. *Condiciones favorables para la investigación.*

### **Desventajas.**

- I. *Alta inversión inicial.*
- II. *Alto nivel de especialización y capacitación.*
- III. *Altos costos de producción.*
- IV. *Condiciones óptimas para el ataque a patógenos.*

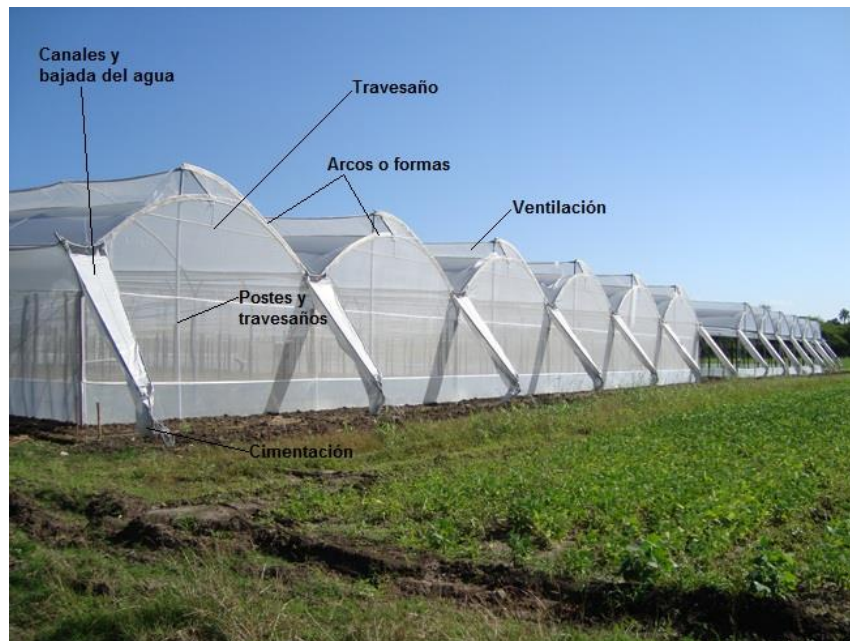
### **Estructura.**

Se considera así al conjunto de piezas que dan cuerpo al invernadero, por lo general se encuentran integradas por postes, también conocidos como puntales, columnas o pilares recibiendo éstos las cargas de sistemas de mecanización, sistemas de riego, cubiertas, así como cargas exteriores debidas al viento y a la precipitación en sus diferentes formas.



**Figura 7. Componentes básicos en una estructura de invernadero.**

La figura 7 resalta algunos de los componentes básicos e indispensables en la construcción de un invernadero para horticultura o floricultura. Principalmente resaltan elementos estructurales ya que éstos son aquellos que permiten la connotación de invernadero.



**Figura 8. Detalle de algunos elementos estructurales en un invernadero de tipo agrícola [40].**

En la figura 8 toma como patrón un invernadero de construcción aerodinámica con ventilación cenital, en dicha figura se señala algunos elementos estructurales distintivos que forman parte de cualquier tipo de invernadero.

Pueden ser consideradas dos formas básicas de estructuras, una rígida y otra aerodinámica. El primer diseño se encuentra en función de líneas rectas, tanto en los soportes laterales como en los que se ubican en la techumbre. Este tipo de diseño implica que se presente una considerable resistencia a los embates del viento. La estructura aerodinámica está diseñada a partir de paredes y techos con cierta curvatura misma que permite un mejor desalojo de los vientos que inciden sobre este tipo de diseño.

De importancia también es la cubierta, esta pieza está formada por arcos en el caso de que se trate de invernaderos con geometrías curvas, por el contrario las cubiertas son formadas por piezas triangulares cuando la estructura del invernadero es del tipo rígida. Estas piezas van unidas y fijas entre sí, en la parte superior del invernadero, mediante piezas denominadas largueros.



**Figura 9. Invernadero del tipo estructura rígida [41].**

La figura 9 muestra un invernadero sencillo de características geométricas rígidas, esto quiere decir que la estructura como tal ofrece una gran resistencia al viento



**Figura 10. Arreglo de invernaderos del tipo agrícola acoplados en paralelo con estructura aerodinámica [43].**

Por otro lado la figura 10 muestra un complejo de invernaderos dispuestos en arreglo en paralelo o en pila, donde la estructura en disposición es aerodinámica permitiendo un mejor desalojo de aire incidente.

Si la estructura del invernadero es empleada para la carga de cultivos, se debe considerar el peso adicional del mismo, en consecuencia se deben emplear materiales aptos capaces de soportar la carga adicional durante la producción

Los materiales usados para la construcción de invernaderos deben de ser ligeros, resistentes y esbeltos, teniendo como fin la poca proyección de sombra hacia las plantas. Además se debe tomar en cuenta que debe ser de fácil construcción, mantenimiento y conservación, asimismo, deben tener la capacidad de ser adaptables. [8]

Tabla 1. Ventajas y desventajas de las estructuras para invernadero [7], [8].

Invernadero	Ventajas	Desventajas
<b>Estructura aerodinámica</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• La resistencia contra el viento es baja</li> <li>• Pocos obstáculos en el diseño (según el modelo)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Elevados costos de instalación</li> <li>• No permiten ventilación cenital (algunos)</li> </ul>
<b>Estructura rígida</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Economía de instalación</li> <li>• Grandes cantidades de volumen de aire</li> <li>• Permiten ventilación cenital</li> <li>• Aprovechamiento de medio a alto de la radiación solar</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Sistemas de drenado deficientes</li> <li>• No hay aprovechamiento de las lluvias</li> <li>• La estructura opone alta resistencia contra el viento</li> </ul>

Básicamente qué tipo de invernadero se necesite construir en cada caso depende de factores como: zona de trabajo, tipo de flor o planta a trabajar, clima y costos de instalación. Es, por tanto, que cobra relevancia el tipo de estructura a emplear según las prestaciones que ésta ofrezca, tal y como se muestra la tabla 1.

### **Materiales.**

El empleo de materiales para la construcción de invernaderos contempla que éstos sean económicos y ligeros, así también que muestren resistencia y esbeltez, este último requisito tiene el fin de generar la menor sombra posible a las plantas. Otro punto que contempla es que tanto la construcción, mantenimiento y conservación se debe ser de manera sencilla. Asimismo, se requiere que mediante la diversidad que muestran los materiales actuales, éstos permitan la fácil modificación y adaptabilidad de la estructura si se desea expandir ésta a futuro.

Los materiales de empleo común para el armado del invernadero son las fundiciones y aluminio, aunque estos elementos se han visto desplazados por el acero. Así también se usan alambres, taquetes y tornillos galvanizados y de manera muy rara se emplea madera debido al corto periodo de vida que ésta ofrece. También es de común que se empleen placas de algún tipo de polímero para los ventanales, en sustitución del vidrio, aunque éste aún es usado.

Tabla 2. Materiales empleados comúnmente en el armado de un invernadero [7], [8].

Material	Características
<b>Acero negro<sup>1</sup></b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Hay variedad de perfiles y de calibres.</li> <li>• Este tipo de materiales son empleados en la construcción de invernaderos de baja tecnología y duración.</li> <li>• El acero negro debe protegerse a la corrosión</li> </ul>
<b>Acero galvanizado</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Tiene un periodo de vida alto.</li> <li>• Su precio es mayor en comparación con el acero negro.</li> <li>• Hay variedad de perfiles y calibres.</li> </ul>
<b>Perfiles de PTR<sup>2</sup></b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Empleados como postes debido a su robustez.</li> <li>• Presentan buena resistencia a la corrosión.</li> </ul>
<b>Madera</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Sólo se emplea para invernaderos de poca duración.</li> <li>• La madera debe someterse a tratamientos de cuidado previos para la prolongación de vida útil.</li> </ul>
<b>Polímeros</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Empleados para cubiertas plásticas o incluso para soporte estructural.</li> </ul>
<b>Vidrio</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Empleado para ventanas, ventilas y puertas.</li> </ul>
<b>Alambre, cable y tornillos</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Empleados como medios de sujeción entre los elementos estructurales.</li> </ul>

Los metales han cobrado sentida importancia en la construcción de invernaderos debido a las diferentes propiedades que éstos ofrecen sustituyendo fuertemente a la madera, principalmente en cuanto a resistencia se refiere y durabilidad. Caso similar de la incursión de los polímeros sustituyendo la fragilidad del vidrio, son pues algunas características de los materiales empleados en la construcción de invernaderos citadas en la tabla 2.

Según la *Norma Mexicana para el Diseño y Construcción de Invernaderos (NMX-E-255-CNCP-2008)*, un invernadero se define como “una construcción agrícola de estructura metálica, usada para el cultivo y/o protección de plantas, con cubierta de película plástica traslúcida que no permite el paso de la lluvia al interior y que tiene por objetivo reducir o simular las condiciones climáticas más adecuadas para el crecimiento y desarrollo de las plantas cultivadas establecidas en su interior, con cierta independencia del medio exterior y cuyas dimensiones posibilitan el trabajo de las personas en el interior”. [10]

<sup>1</sup> Se considera así al acero que sale directamente de fundición y que no sufre algún tratamiento de protección como: galvanizado, cincado, inoxidable o lacado.

<sup>2</sup> Perfil Tubular Rectangular (PTR). Corresponde a todos aquellos perfiles cuya geometría es cuadrada o rectangular. Se le emplea en la herrería, así como en la elaboración de estructuras metálicas.

Esta norma también contempla el periodo óptimo de duración de una estructura para invernadero, la cual deberá tener un tiempo mínimo de vida útil de diez años.

### **Agricultura urbana.**

Actualmente no existe una unificación en cuanto a la definición que puede hacerse a la agricultura urbana, no obstante, ésta se puede entender como una práctica agrícola principalmente referenciada a hortalizas y flores ejercida en las ciudades, donde dichas prácticas utilizan recursos como: tierra, agua, energía y mano de obra, obteniendo un beneficio y satisfacción de necesidades de la población urbana.

De forma evidente la agricultura rural y la urbana tienen marcadas diferencias, por ejemplo, la primera implica grandes superficies, grandes cantidades de producción así como una tecnología más mecanizada. En cambio la agricultura urbana es practicada a menudo en espacios reducidos, donde la producción mayoritariamente es de hortalizas que habitualmente son consumidas en la dieta de la población urbana. Otra diferencia notable, es que para los agricultores la cosecha en campo abierto o protegido es el medio de sustento que emplean para subsistir, en cambio que para la población urbana, emplear métodos de siembra es una actividad secundaria. [34]

Es así que también existe una diferencia marcada entre un invernadero agrícola y uno urbano, condiciones de espacio y tipo de planta a cosechar son parámetros que predisponen el tipo de invernadero a emplear. Pero quizá la diferencia más marcada en esta clase de invernaderos sea que los de uso agrícola sean regidos por lo que indica la *Norma Mexicana para el Diseño y Construcción de Invernaderos*, en tanto que los invernaderos del tipo urbano al no encontrarse estandarizados pueden encontrar invernaderos metálicos, poliméricos, incluso de madera y esto apela principalmente a accesibilidad económica.

No obstante, que los invernaderos urbanos ofrecen una variedad de materiales también éstos ofrecen calidad en función del material de origen, pero ésta muchas veces pasa a un segundo plano debido a la condición de uso que se le confiere a los invernaderos urbanos. Razón por la cual la inclusión de un material compuesto de características biodegradables puede generar un atractivo en el mercado afín.

## **Reflexión final.**

Hasta ahora se ha revisado todo aquello relevante a generalidades en cuanto a materiales e invernaderos se refiere. No obstante es menester conocer qué es un material compuesto, qué elementos le componen, así como describir en forma concreta al material compuesto madera/polipropileno expuesto en este trabajo. Se describirá a razón de los componentes, madera y polímero cada uno de éstos, también se hará referencia a los métodos de ensayos mecánicos empleados en la caracterización de este material compuesto, para dar término mencionando las normas que sustentan y son empleadas en la realización de este ejercicio, son pues tópicos que son sometidos a descripción en el siguiente capítulo.



## Capítulo IV. Descripción de materiales y métodos experimentales.

---

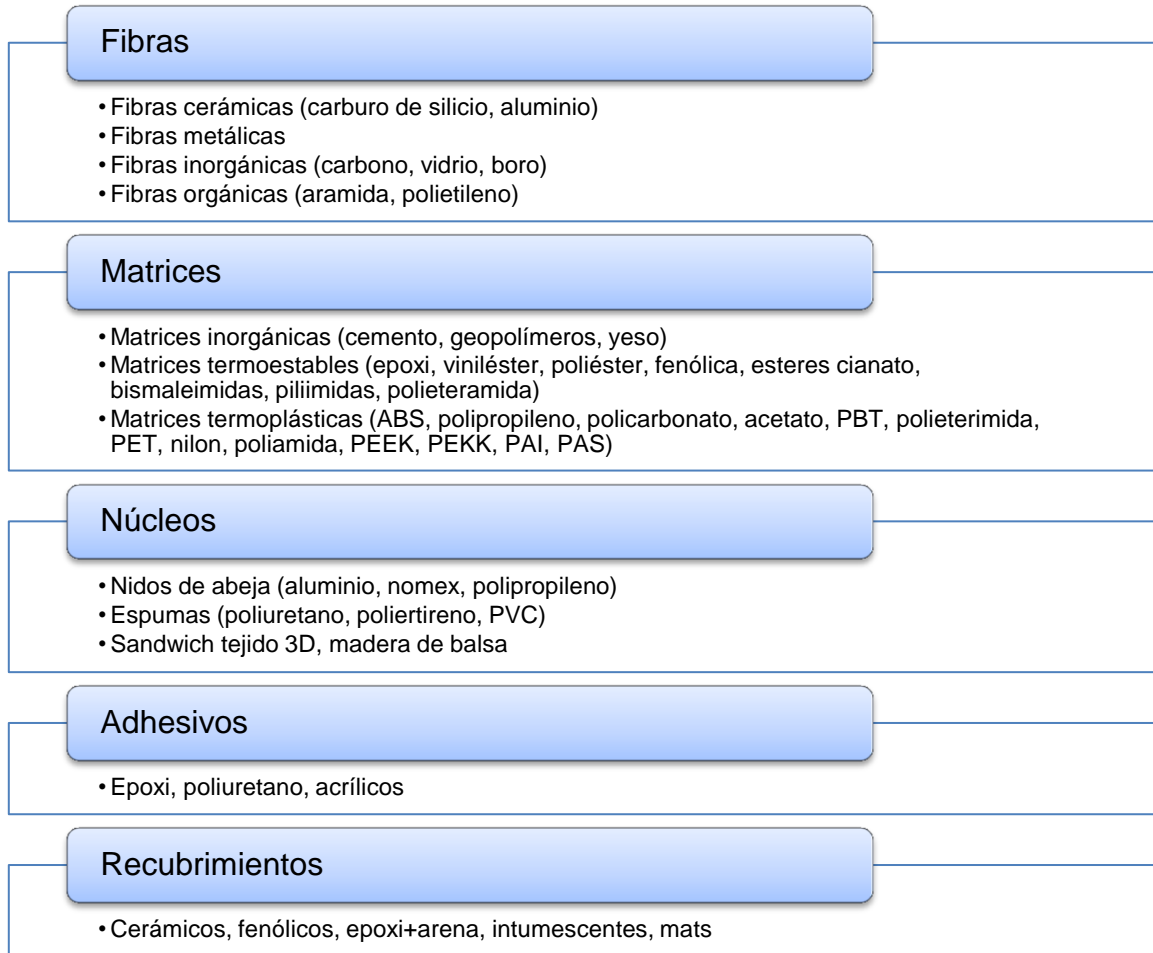
---

### **Material compuesto.**

Entiéndase como material compuesto aquel que nace de la combinación de dos o más materiales distintos, donde la conjunción de elementos como matrices, fibras y aditivos permiten la obtención de un material compuesto, el cual ostenta mejores propiedades mecánicas que los materiales que lo componen por separado.

Históricamente se tienen indicios que el origen de estos materiales fue a principios de 1960 en grandes proyectos aeroespaciales y de defensa, particularmente en Estados Unidos y Europa. A partir de entonces, este campo ha tenido avances significativos. Hoy en día los materiales compuestos han entrado a una infinidad de mercados antes exclusivos de ciertos materiales, esto debido a que los materiales compuestos ostentan una baja densidad volumétrica, atractivas propiedades mecánicas, así como una buena resistencia al desgaste. En la actualidad la industria exige nuevos procesos de manufactura que incluyan nuevos materiales, donde éstos persigan la reducción de costos o la optimización de un producto. Ante esta demanda, materiales compuestos de matriz metálica o polimérica han adquirido una notable importancia, razón por la cual han sido y son objeto de desarrollo científico y tecnológico. [22]

Siendo principalmente matrices, fibras y aditivos el corazón de un material compuesto es bien justificado conocerles más a fondo. Sobre todo cuando las diferentes combinaciones entre éstos ofrecen materiales compuestos con propiedades físicas, químicas y mecánicas interesantes.



**Figura 11. Materias primas que forman parte de un material compuesto [13].**

En la figura 11 se aprecian los principales componentes que forman parte de un material compuesto. Cada componente es crucial en el correcto desempeño del compuesto, así pues, existen una amplia gama de éstos para ofrecer una mejor conjunción al momento de generar el material compuesto.

### **Fibras.**

Se conoce como fibra al componente que sirve como refuerzo en el material compuesto, aportando resistencia mecánica, rigidez y dureza, siendo también elemento determinante para la obtención de las principales propiedades mecánicas.

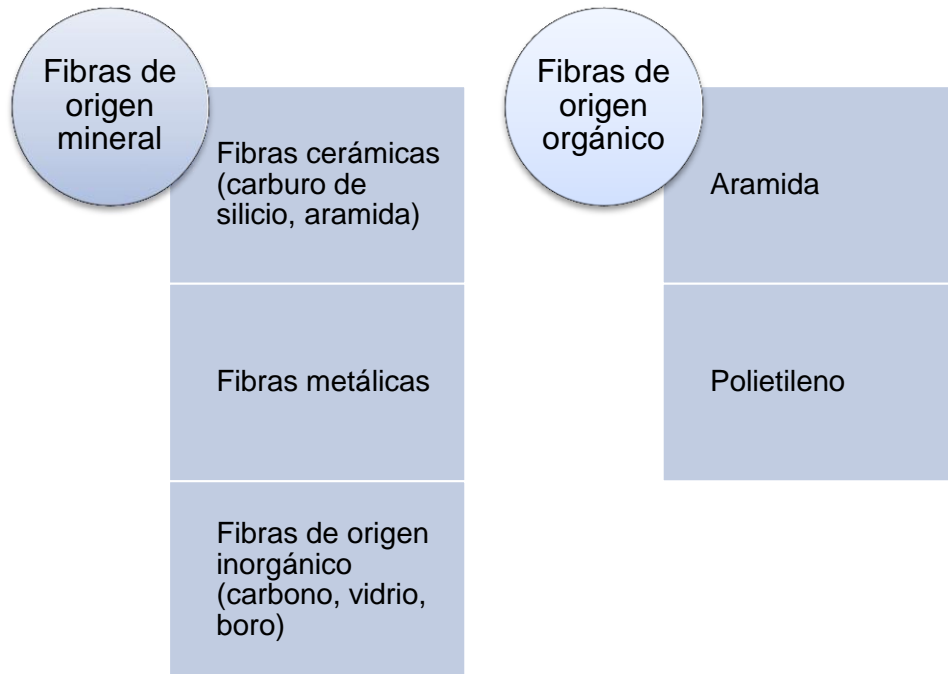


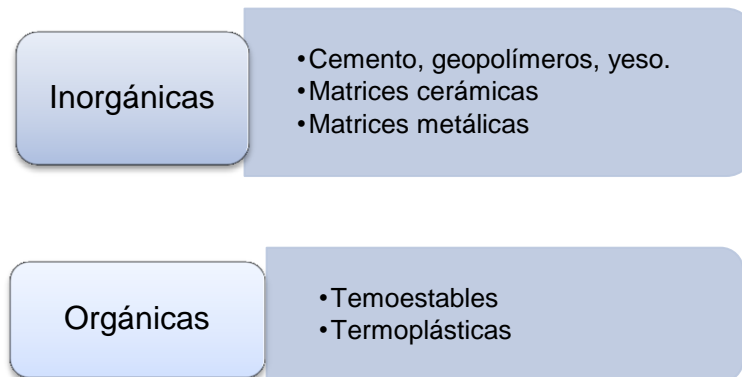
Figura 12. Clasificación de las fibras en función de su origen [13].

La figura 12 especifica los tipos de fibras que pueden ser empleadas como refuerzo en un material compuesto. Destacan principalmente dos grandes familias de fibras, orgánicas e inorgánicas o minerales.

Las fibras pueden ser clasificadas según su origen, siendo éstas de origen mineral u orgánico. Aunque existe también otro tipo de clasificación que reciben éstas y de forma general se presentan en estas tres categorías: fibras de carbono, fibras inorgánicas y fibras poliméricas. [13]

### **Matriz.**

La matriz es la fase continua del material compuesto, siendo pues el material presente en una mayor proporción ésta puede ser orgánica e inorgánica, puede también constituir una fracción volumétrica pequeña, de forma particular lo anterior se presenta en materiales compuestos poliméricos, esto se logra cuando la matriz moja el refuerzo y forma a su alrededor una fase continua. [15]



**Figura 13. Diferentes matrices empleadas en materiales compuestos [13].**

La figura 13 destaca los tipos de matrices con los que se puede trabajar en la generación de un material compuesto. Éstas pueden ser de origen inorgánico u orgánico dentro de las cuales existen diferentes tipos.

### **Aditivos.**

Se entiende por aditivo, aquella o aquellas sustancias que no modifican una estructura molecular de la matriz polimérica, ya que éstas permanecen físicamente dispersas sin mostrar perturbaciones en la estructura química del polímero. Sin embargo, las propiedades de un polímero pueden verse afectadas considerablemente ante la incorporación de aditivos.

Los aditivos se clasifican según la función principal que ejecutan:

- Aditivos que facilitan las condiciones de procesado (estabilizantes, lubricantes, promotores de flujo, etc.)
- Modificadores de las propiedades mecánicas (plastificantes, cargas reforzantes, etc.)
- Aditivos que amortizan el costo de formulaciones (cargas pulverulentas, diluyentes, etc.)
- Modificadores de las propiedades superficiales (agentes antiestáticos, agentes antibloqueo, etc.)
- Modificadores de propiedades ópticas (pigmentos, colorantes, etc.)
- Aditivos antienviejimiento (antioxidantes, foto estabilizante, fungicidas, etc.)

De forma general los aditivos deben mostrar eficiencia en su función, estables bajo el procesado y en condiciones de servicio, no alterar negativamente las propiedades del polímero.

## **Compuesto madera-polipropileno.**

El término “*Wood Plastics Composites*” (WPC), agrupa a los materiales compuestos que se encuentran constituidos por una matriz polimérica, termoestable o termoplástica y un componente de madera en cualquiera de sus formas (aserrín, fibras, etc.), actuando éste como material de refuerzo.

El uso de las fibras naturales empleadas como refuerzos en matrices poliméricas se remonta a principios del Siglo XX, con utilización de materiales derivados del textil.

El primer uso comercial de la madera como relleno en matrices poliméricas se remonta al año de 1973, con el desarrollo de un material compuesto de madera y policloruro de vinilo, denominado “*Sonwood*”, aunque una mayor repercusión tuvo el diseño del “*Woodstock*” como material de bajo costo, gran durabilidad y alta tenacidad. En su desarrollo en 1983, se extruía polipropileno con aproximadamente un 50% de viruta de madera. La madera proporcionaba al producto una mejor resistencia, en tanto que el polipropileno permitía que se empleasen los métodos tradicionales de fabricación, como la extrusión y el moldeo por compresión. [21]

Refiriéndose a la matriz polimérica, destacan dos grupos de compuestos de polímero-madera. El primero está formado por los compuestos a base de madera que utilizan una resina termoestable como adhesivo, en tanto que el segundo grupo abarca a los termoplásticos-madera y a los materiales compuestos de matrices termoestables.

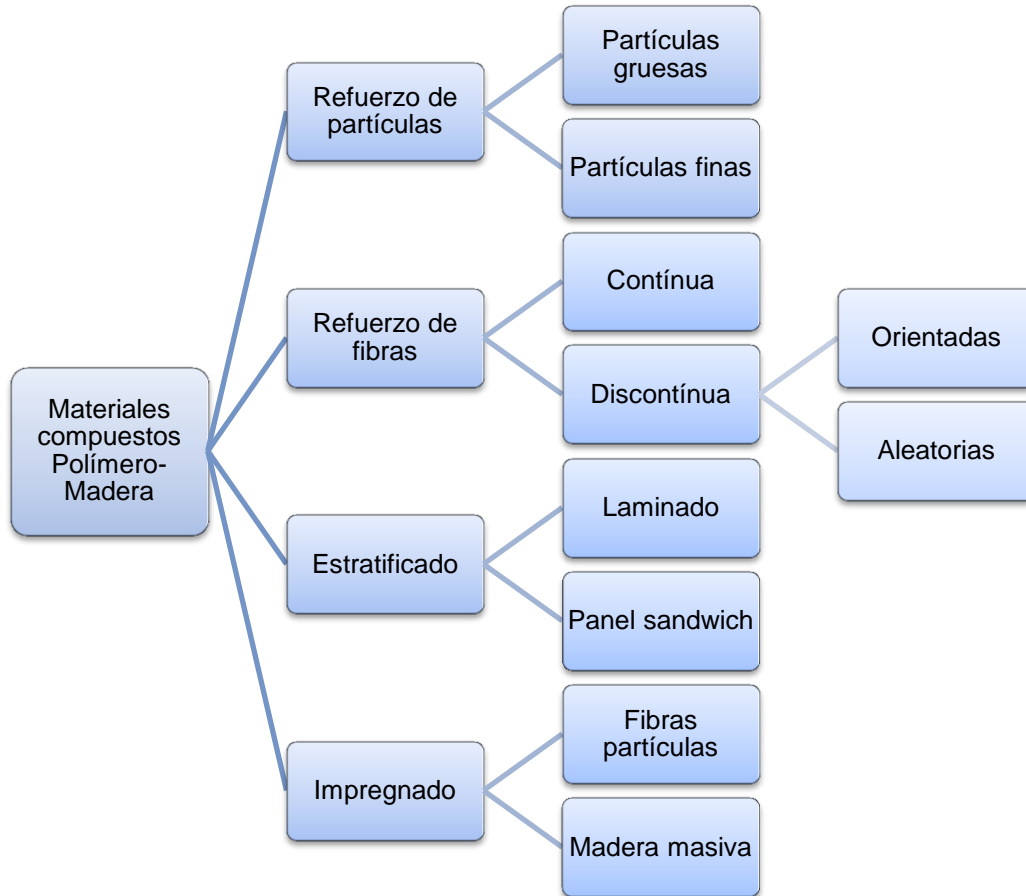


Figura 14. Clasificación de los materiales compuestos “Wood Plastic Composites” [21].

En la figura 14 se presenta un esquema de cómo se conforma un material compuesto de características polímero-madera, donde se enfatizan los diferentes tipos de disposición que puede tener el refuerzo maderable.

El uso de la madera tiene como ventaja frente a rellenos inorgánicos (fibra de vidrio, talco, carbonato de calcio) que es menos abrasiva, significando un menor desgaste en el sistema de procesado, pero también muestra determinadas restricciones, como una baja temperatura de procesamiento, así como el contenido de humedad.

Tabla 3. Ventajas y desventajas ofrecidas por la madera como material de refuerzo [21].

Ventajas	Desventajas
Recursos renovables	Baja estabilidad dimensional
Resistentes	Baja resistencia a microorganismos
Bajo peso específico	Termoplásticos de baja temperatura de fusión
Biodegradables	Baja temperatura de procesado
Económicos	Naturaleza polar

La tabla 3 resume las principales ventajas y desventajas del empleo de la madera como elemento reforzante en un material compuesto. Cabe resaltar que el uso de la madera en compuestos permite mermar los costos de producción y confiere al material compuesto un carácter de biodegradable logrando una reincorporación parcial de éste al medio ambiente.

Siendo el aserrín parte de la materia prima que forma este material compuesto, éste se caracteriza por su baja densidad y costo (debido a su facilidad de obtención), además es de características biodegradables, no obstante también presenta restricciones derivadas a su incompatibilidad con matrices de polímeros hidrófobos, la tendencia a formar grumos durante el procesado y su alta absorción de humedad.

Los residuos generados por las industrias son una fuente de alto impacto para el ambiente. Dentro de estos residuos se encuentra los desechos de madera que se consideran como inocuos al medio ambiente debido a sus características naturales. Procesamientos como incineraciones no controladas o su depósito en vertederos, son métodos que aún se emplean contemplar su proceso de eliminación.

Una alternativa ante esta clase de medidas es que esta clase de residuos se someta a un tratamiento para su posterior empleo como producción de muebles de conglomerado y tableros de partículas, fabricación de composta, producción de energía a través de plantas de biomasa, etc. Sin embargo, también se fomenta el empleo de residuos de la madera para que éstos también sean empleados como refuerzos de materiales poliméricos, siendo esta actividad una alternativa ecológica en pro del cuidado ambiental. [21]

## **Madera.**

El empleo de la madera se remonta a la aparición del hombre. Ha sido uno de los primeros materiales utilizados para la construcción de viviendas, herramientas para la caza, utensilios, entre otros instrumentales. Posteriormente, fue uno de los materiales preferidos para la construcción de palacios, templos y casas desde el Siglo XX a. C. hasta y hasta el Siglo XIV d. C., donde, a partir del descubrimiento de materiales para la construcción, tales como el hormigón armado, el hierro, el cristal, el cartón, fibra textil y demás sustitutos de la madera, provocaron la disminución en gran medida del uso de ésta.

Después del carbón y el petróleo, la madera representa la materia prima natural más importante. La madera es un material natural, biológico, renovable, orgánico, poroso, higroscópico, anisotrópico y heterogéneo. Siendo así, este tipo de características son de vital importancia ya que a dicho material le confieren

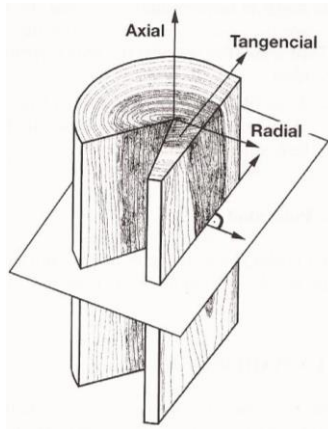
determinadas propiedades de uso, resistencia y susceptibilidad a ser dañada por agentes bióticos y abióticos. [19], [20]

### **Propiedades de la madera.**

Las propiedades que exhibe la madera han de variar según la especie que se esté analizando, asimismo éstas muestran dependencia de la constitución anatómica, edad y sección del árbol de la cual se extrajo la muestra bajo análisis. No obstante hay propiedades de la madera que permiten caracterizarle y donde éstas serán descritas a continuación:

### **Anisotropía.**

La madera no es un material homogéneo, sino un material diferente según el plano o la dirección que se considere. Debido a dicha desigualdad en su configuración, se tiene un desigual comportamiento en su estructura ante una sollicitación. Como ejemplo de este comportamiento se tiene que la madera muestra una resistencia que oscila entre 20 y 200 veces más en el sentido del eje del árbol, que en el sentido transversal del mismo.



**Figura 15. Sistema de referencia elegido en una muestra de madera para su estudio [19].**

En la figura 15 se muestra un sistema típico de referencia empleado en el análisis de resistencia del tronco de un árbol. Típicamente, se emplea un sistema de referencia polar para este tipo de análisis.

### **Densidad.**

Se trata de la relación entre el peso  $P$  y el volumen  $V$  de la madera.

$$\rho = \frac{P}{V}$$

**Ecuación 1. Cálculo de la densidad en la madera [19].**



Debido a que el peso y el volumen de una madera se ven afectados por la presencia de humedad, al hablar de densidad se debe hacer referencia a la humedad a la que está hecha la medida.

Se denomina como densidad específica de una madera, a la relación entre el peso seco ( $P_0$ ) de la madera y el volumen ( $V_v$ ) de la madera cuando ésta tiene una humedad superior al punto de saturación de la fibra.

$$\rho_e = \frac{P_0}{V_v}$$

**Ecuación 2. Cálculo de la densidad específica en una muestra de madera [19].**

La relación entre la densidad relativa y cualquier otra es diferente y depende de la contracción volumétrica ( $C_v$ ) de la madera.

$$\rho_e = \frac{P_0}{V_v} = \frac{P_0}{V_0(1 + C_v)} = \frac{\rho_0}{1 + C_v}$$

**Ecuación 3. Relación entre el peso seco de la madera ( $P_0$ ) y la contracción volumétrica de la madera ( $C_v$ ) [19].**

La densidad es una propiedad física importante, ya que es un índice bueno de todas las propiedades que demuestra la madera.

Maderas ligeras, son maderas de tonos claros, blandas, poco resistentes pero elásticas, poco durables, muy fáciles de trabajar y con tacto basto.

Maderas pesadas, son maderas oscuras, duras, muy resistentes pero frágiles, muy durables, difíciles de trabajar y con tacto muy fino.

## **Humedad.**

La madera siempre contiene algo de humedad, a menos de que sea sometida a un proceso de secado constante obteniendo un peso constante. El agua presente en la madera es absorbida por las paredes fibrosas de las células. De forma convencional el cálculo del porcentaje de agua contenido en la madera es definido mediante la ecuación.

$$Humedad_{Madera} = \frac{\text{peso del agua en la muestra}}{\text{peso de la muestra de madera seca}} \times 100\%$$

**Ecuación 4. Porcentaje de humedad presente en la madera en función del peso del agua y el peso de la madera seca [19].**

## **Contracción.**

La contracción de la madera se debe a la disminución de la humedad, dicha contracción se hace presente en las direcciones radial y tangencial de la sección transversal de un árbol. La contracción de una madera es mayor en dirección transversal que en la longitudinal, ya que la contracción transversal oscila entre 10 y 15 %, en tanto que en la dirección longitudinal es tan sólo del 0.1 por ciento.

## **Dureza.**

Es la propiedad que indica la facilidad de penetración de un material en otro. La madera, en relación con otros materiales (acero u hormigón), se puede definir como un material blando. En algunos casos, se considera como defecto esta propiedad (facilidad de rayado y apariencia), pero en algunos otros se le ve como ventaja debido a la facilidad de procesado (corte, unión, etc.). [33]

La dureza en la madera muestra dependencia de propiedades como la densidad, edad y estructura. Se considera pues, la clasificación que ofrece la tabla 4:

**Tabla 4. Clasificación de algunas especies de madera según su dureza [33].**

<b>Muy duras</b>	Ébano
<b>Bastante duras</b>	Roble, arce, fresno y álamo
<b>Algo duras</b>	Castaño, haya, nogal, pinos pinaster y carrasco
<b>Blandas</b>	Abeto y pino
<b>Muy blandas</b>	Chopo

## **Dilatación térmica.**

La dilatación térmica que muestra la madera es prácticamente nula, sobre todo si se le es comparada con materiales metálicos. Las dilataciones y contracciones por diferencia de temperatura, son mucho menores y menos importantes que las producidas por los cambios de humedad, llegando a despreocupar su estudio.

## **Conductividad térmica.**

La madera es uno de los mejores aislantes que se encuentran en la naturaleza, sólo superado por el corcho. La presencia de porosidades hace que la madera sea un mal conductor del calor aunque si existe un aumento en el contenido de la humedad, la conductividad aumenta. La conductividad térmica es mayor en la dirección paralela a las fibras, ya que la presencia de poros es mayor en la dirección perpendicular de las mismas.

Tabla 5. Conductividad térmica de algunos materiales comunes [38].

Material	Conductividad térmica [W/mK]
Cobre	399
Vidrio	0.81
Plástico	0.2-0.3
Aire	0.026
Madera de pino	0.15

### Conductividad eléctrica.

La madera seca es mala conduciendo la electricidad, pero conforme hay un aumento en el porcentaje de la humedad, la conductividad eléctrica aumenta de forma directa, hasta el punto, en que esta propiedad es empleada para determinar el porcentaje de humedad presente en la madera de forma rápida.

### Resistencia mecánica.

Cuando la madera es sometida a cargas, ésta tiene un comportamiento visco-elástico. La figura 16 muestra algunos gráficos comparativos del comportamiento de la madera frente a un metal como el acero o frente a plásticos.

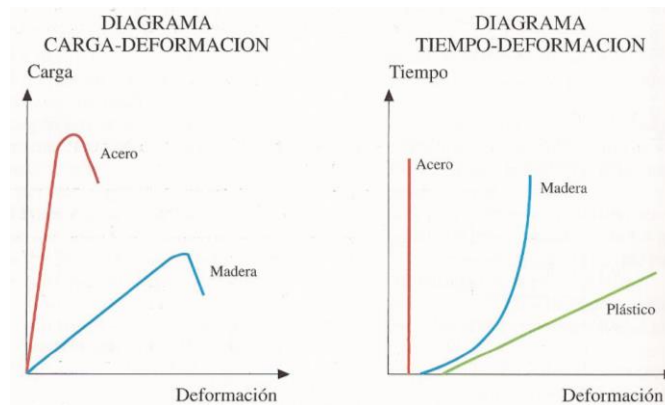


Figura 16. La madera tiene un desempeño visco-elástico. Se muestra un comparativo del comportamiento mecánico de la madera ante el acero y el plástico [19].

En lo que se refiere a la resistencia, como ya se ha citado, en la dirección longitudinal hay una resistencia mayor, en tanto que transversalmente, su resistencia es pequeña, tanto así que muchas veces ésta no es tomada en cuenta. También es importante tomar en cuenta la influencia de la humedad en la resistencia de la madera. Aunque varía con el tipo de esfuerzo, cuando la madera aumenta en 1% su porcentaje de humedad, la resistencia se merma entre 1.5% y 2%. Hay que tomar en cuenta, que la resistencia de la madera es variable, según la especie. [19], [20]

**Tabla 6. Algunas propiedades importantes que ostentan las maderas duras y blandas [37].**

Especie	Condición	Gravedad específica	Flexión estática		Compresión paralela al grano; máxima resistencia al aplastamiento (psi)*	Compresión perpendicular al grano; resistencia de la fibra en el límite prop. (psi)*	Corte paralelo al grano; máxima resistencia al corte (psi)*
			Módulo de ruptura (psi)*	Módulo de elasticidad (10 <sup>6</sup> psi)*			
<b>Maderas duras:</b>							
Olmo americano	Verde	0.46	7 200	1.11	2 910	360	1 000
	Secado al horno†	0.50	11 800	1.34	5 520	690	1 510
Nogal americano, pacana	Verde	0.60	9 800	1.37	3 990	780	1 480
	Secado al horno†	0.66	13 700	1.73	7 850	1 720	2 080
Arce rojo	Verde	0.49	7 700	1.39	3 280	400	1 150
	Secado al horno†	0.54	13 400	1.64	6 540	1 000	1 850
Roble blanco	Green	0.60	8 300	1.25	3 560	670	1 250
	Secado al horno†	0.68	15 200	1.78	7 440	1 070	2 000
<b>Maderas blandas:</b>							
Abeto Douglas de la costa	Verde	0.45	7 700	1.56	3 780	380	900
	Secado al horno†	0.48	12 400	1.95	7 240	800	1 130
Cedro rojo del oeste	Green	0.31	5 200	0.94	2 770	240	770
	Secado al horno†	0.32	7 500	1.11	4 560	460	990
Pino blanco del este	Verde	0.34	4 900	0.99	2 440	220	680
	Secado al horno†	0.35	8 600	1.24	4 800	440	900
Secoya, crecimiento joven	Verde	0.34	5 900	0.96	3 110	270	890
	Secado al horno†	0.35	7 900	1.10	5 220	520	1 110

\*Para obtener MPa, psi se multiplica por  $6.89 \times 10^{-3}$ .

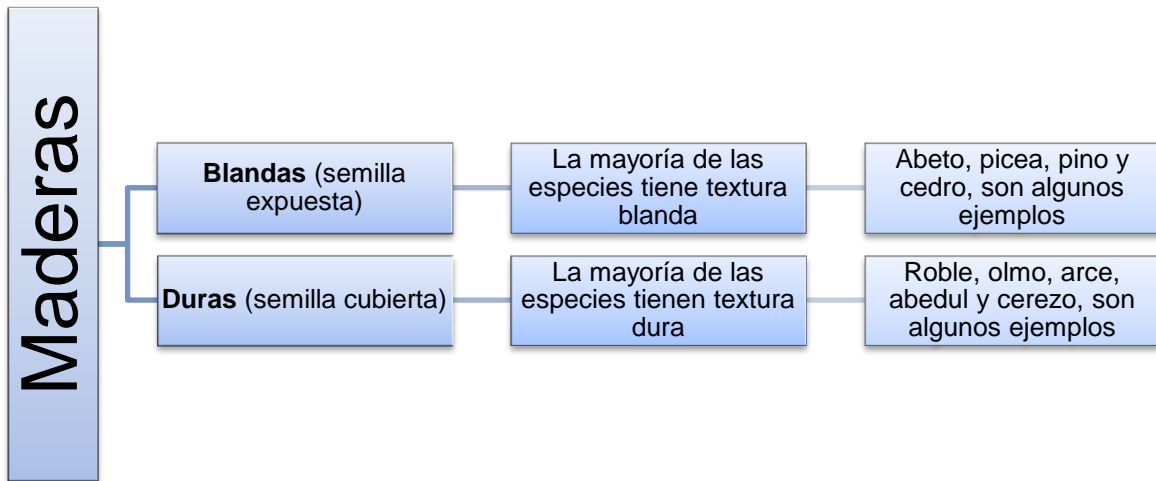
†Secado al horno hasta 12 por ciento de humedad.

Fuente: *The Encyclopedia of Wood*, Sterling Publishing Co., 1980, pp. 68-75.

En la tabla 6 se muestra un resumen de diferentes propiedades mecánicas que ostentan diferentes especies de madera. Resalta que maderas blandas poseen una menor gravedad específica en comparación con maderas duras. Por otro lado, la rigidez es mayor en maderas duras en comparación con sus homólogas blandas.

### **Clasificación de la madera.**

La madera es clasificada con base en dos grupos, maderas blandas (gimnospermas) y maderas duras (angiospermas). Desde el punto de vista de la botánica la clasificación radica en que si la semilla del árbol se encuentra expuesta, éste corresponde a un tipo de madera blanda, en tanto que si la semilla se encuentra cubierta, el árbol posee madera dura. La mayoría de los árboles de madera blanda son físicamente blandos y por ende la mayoría de los de madera dura son físicamente duros, aunque suele haber excepciones. La madera blanda puede encontrarse en árboles de abeto, picea, pino y cedro; en tanto que el roble, olmo, arce, abedul y el cerezo son ejemplos de árboles de madera dura.



**Figura 17. Clasificación de la madera según su dureza [37].**

La figura 17 resume de forma sencilla la clasificación de las maderas según su dureza, a partir de dicha condición física éstas son destinadas a un mercado industrial específico, pudiendo ser el sector de la construcción o del mueble, principalmente. [33], [37]

### **Aserrín de pino.**

La elección de este tipo de aserrín radica en que México es el país con mayor diversidad de pinos en el mundo. Con cerca de 82 especies es notable la utilidad que tienen estas especies como materias primas maderables y no maderables. De las primeras se puede obtener un sinnúmero de productos como: juguetes, instrumentos musicales, palillos, vigas, tablones, durmientes, etc. De las segundas se elaboran productos como: colofonia, aguarrás, pintura, barniz, lacas adhesivos, cosméticos, etc. [32]

El tamaño de la partícula de aserrín empleado es de vital importancia en la conjunción con el polímero ya que la dimensión de partícula facilita el flujo al momento de la inyección del material compuesto. Es por tanto que para la generación de este material compuesto sometido a investigación en este trabajo, se ha optado por seleccionar una granulometría de malla 30, este criterio de selección es sustentado por estudios realizados por González y colaboradores [28], considerando que este tamaño de partícula fomenta una buena asimilación con el polímero y un flujo constante durante el proceso de inyección del material compuesto, con lo cual la condición de manufactura es estable ya que el número de imperfecciones no compromete las prestaciones mecánicas del material compuesto.

**Tabla 7. Propiedades mecánicas del aserrín [28].**

<b>Propiedad</b>	<b>Unidades</b>	<b>Valor</b>
Módulo de Young	MPa	8.24
Dureza Brinell	HB	5.00
Módulo de rotura	MPa	51.00
Esfuerzo límite	MPa	26.48
Contenido de humedad	%	0.38

En la tabla 7 se presentan algunas propiedades relevantes de la madera de pino en función de que éste sea empleado como refuerzo en un material compuesto. Destacando la resistencia y rigidez como factores de vital importancia en las nuevas propiedades mecánicas que ostente el material compuesto.

### **Polipropileno.**

A partir de los trabajos realizados por Natta y Ziegler [17] con el polietileno, se intentó obtener otro tipo de polímeros a partir de las olefinas, así pues, la obtención del polipropileno (PP) se obtuvo a partir del propileno, cuya fabricación se comenzó en 1957. El PP mostraba propiedades como rigidez y elasticidad, mismo las propiedades mecánicas que ostentaba eran superiores a las del polietileno de alta densidad (HDPE), al tacto el PP era agradable (no ceroso como el polietileno), brillante, transparente, mostraba una resistencia hasta 130 °C, teniendo una densidad de 905 kg/m<sup>3</sup>, siendo más baja que la de algunos polímeros conocidos.

Desafortunadamente para esa época el PP presentaba características que no favorecían para nada su trascendencia, una era su sensibilidad al frío (por debajo de los 4 °C) y otra era su alta sensibilidad a la radiación ultravioleta, la cual provocaba una acelerada degradación. Debido a estas características el PP quedó relegado a servicio de algunas cuantas aplicaciones, no fue hasta la década de los setenta que este polímero reapareció en el mercado.

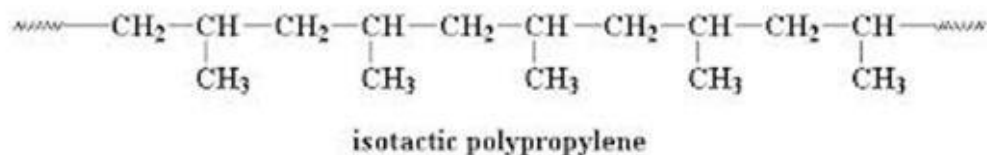
La reaparición se debió al descubrimiento de nuevos estabilizadores para la protección ante la luz y por otro lado la copolimerización del propileno-etileno había arrojado productos que ostentaban buena resistencia a climas de bajas temperaturas.

Por otro lado, se había ratificado que el PP, a diferencia de los polietilenos, admitía con cierta facilidad elementos reforzantes, tales como fibras de vidrio, talco, amianto, etc., dando así lugar a materiales con propiedades mecánicas por más interesantes.

Al haber sido capitalizadas propiedades como ligereza, rigidez y resistencia química, así como la capacidad única para la formación de bisagras integradas, alta resistencia térmica y tenacidad cuando se mezcla con elastómeros, el PP abrió nuevos mercados para el equipo de moldeo, como lo son las carcasas para electrodomésticos, utensilios para el hogar, artículos para hospitales y partes automotrices.

El polipropileno es un termoplástico lineal y cristalino, el cual es muy versátil presentando un buen equilibrio ante la resistencia térmica y química, también ostenta excelentes propiedades mecánicas y eléctricas, así como una facilidad en su procesamiento.

Este termoplástico es obtenido a partir de la polimerización del propileno, extraído del gas natural o del gas de “cracking” del petróleo. Tiene por fórmula  $\text{CH}_2=\text{CH}-\text{CH}_3$  la cual siempre se encuentra en disposición “cabeza de cola”, estrictamente lineal e isotáctica.



**Figura 18. Disposición de la cadena del polipropileno isotáctico. Actualmente es el polipropileno de mayor uso debido a que proporciona una alta densidad [42].**

Las características tecnológicas dependen de la longitud que presenten las cadenas. Pero dichas características suelen ser superiores a la de los polietilenos, en particular se tiene una temperatura máxima de trabajo, 150 °C, en lugar de los 120 °C para el polietileno a una baja presión, por otra parte el PP suele alcanzar una resistencia cercana a los 60 kg/mm<sup>2</sup>. La versatilidad de este polímero le confiere una gran capacidad en el desarrollo, ya sea en forma de fibras o de objetos moldeados. [13], [17], [18]

**Tabla 8. Ventajas y desventajas que posee el polipropileno [17].**

<b>Ventajas</b>	<b>Desventajas</b>
Bajo peso específico (densidad).	Inflamabilidad.
Excelente resistencia química.	Fragilidad a bajas temperaturas.
Alta temperatura de fusión (en comparación con otros plásticos de alto consumo).	Moderada rigidez.
Buen balance rigidez/tenacidad.	Dificultad para imprimir, pintar y pegar.
Adaptabilidad a muchos métodos de transformación.	Nebulosidad (falta de transparencia).
Gran variedad de clases especiales.	Baja resistencia a los rayos UV.
Excelentes propiedades dieléctricas.	Reducida productividad en extrusión (en comparación con resinas suaves y amorfas).
Costo bajo (especialmente por unidad de volumen).	Baja resistencia cuando se encuentra fundido.

La tabla 8 refleja algunas ventajas y desventajas que ostenta el polipropileno. Algunas ventajas como una baja densidad, alta resistencia química y costo de producción bajo le han conferido ser uno de los polímeros mayormente empleados en el sector industrial del país.



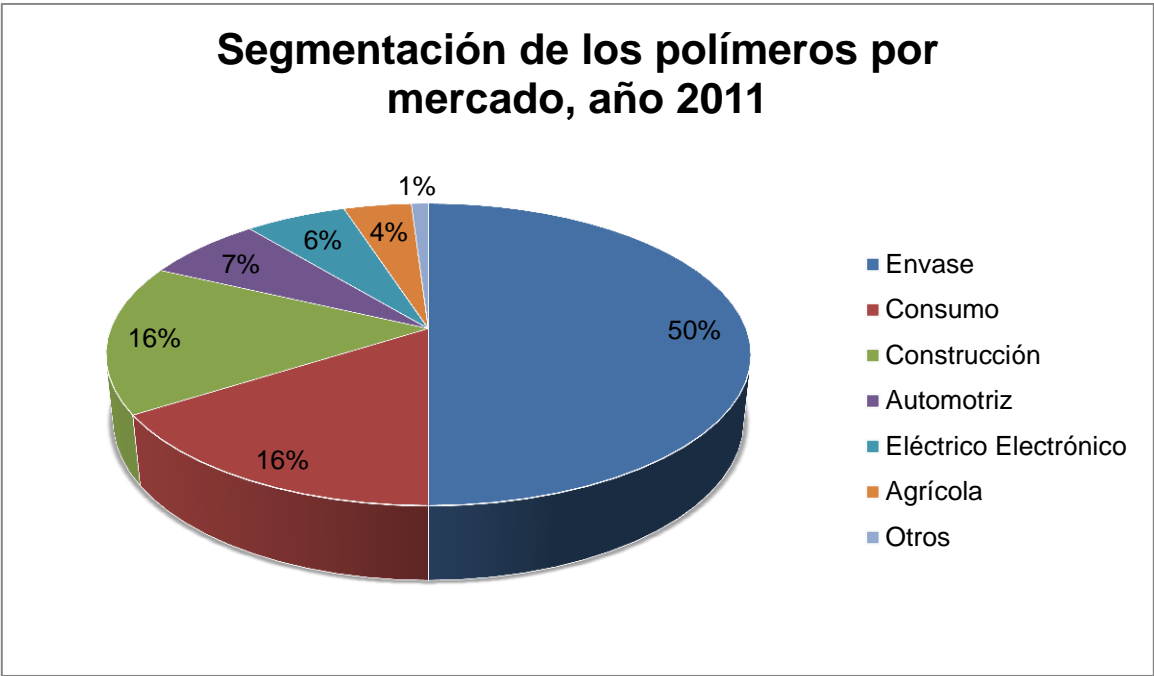
**Tabla 9. Resumen principal de las propiedades mecánicas del polipropileno de características vírgenes [27].**

Propiedades Mecánicas	Métricas	Inglesas
Dureza, Rockwell R	20.0 - 118	20.0 - 118
Dureza, Shore D	40.0 - 83.0	40.0 - 83.0
Dureza por indentador de bola	62.0 - 106 MPa	8990 - 15400 psi
Resistencia última a la tracción	9.00 - 80.0 MPa	1310 - 11600 psi
Resistencia de cedencia a tracción	2.07 - 369 MPa	300 - 53500 psi
Alargamiento de película a ruptura	93.0 - 530 %	93.0 - 530 %
Alargamiento a ruptura	3.00 - 900 %	3.00 - 900 %
Alargamiento a cedencia	3.50 - 100 %	3.50 - 100 %
Módulo de elasticidad	0.00800 - 8.25 GPa	1.16 - 1200 ksi
Tenacidad	0.203 - 0.441 N/tex	2.30 - 5.00 g/denier
Resistencia de cedencia a flexión	20.0 - 180 MPa	2900 - 26100 psi
Módulo de flexión	0.0260 - 12.4 GPa	3.77 - 1800 ksi
Resistencia de cedencia a compresión	34.5 - 55.2 MPa	5000 - 8000 psi
Módulo de compresión	1.38 GPa	200 ksi
Módulo de corte	0.680 - 0.920 GPa	98.6 - 133 ksi
Módulo secante	0.0000689 - 2.20 GPa	0.0100 - 319 ksi
Prueba Izod con muesca	0.160 J/cm - NB	0.300 ft-lb/in - NB
Prueba Izod sin muesca	0.196 J/cm - NB	0.367 ft-lb/in - NB
Prueba Izod con muesca (ISO)	2.00 - 56.0 kJ/m <sup>2</sup>	0.952 - 26.6 ft-lb/in <sup>2</sup>
Prueba Izod sin muesca (ISO)	NB	NB
Prueba Charpy sin muesca	0.300 J/cm <sup>2</sup> - NB	1.43 ft-lb/in <sup>2</sup> - NB
Prueba Charpy con muesca	0.200 - 9.50 J/cm <sup>2</sup>	0.952 - 45.2 ft-lb/in <sup>2</sup>
Prueba de impacto Gardner	0.904 - 40.7 J	0.667 - 30.0 ft-lb
Ensayo de impacto por caída	4.98 - 28.0 J	3.67 - 20.7 ft-lb
Coefficiente de fricción	0.250	0.250
Módulo de fluencia a tracción, 1 hora	550 - 700 MPa	79800 - 102000 psi
Módulo de fluencia a tracción, 1000 horas	220 - 440 MPa	31900 - 63800 psi
Resistencia al desgarre	20.2 - 226 kN/m	115 - 1290 pli
Serie de compresión	16.0 - 65.0 %	16.0 - 65.0 %
Resistencia de la película a ruptura, MD	3.10 - 152 MPa	450 - 22000 psi
Módulo tangente	1290 - 3260 MPa	187000 - 472000 psi

En la tabla 9 se muestran las mecánicas del polipropileno virgen. Este extracto fue tomado del sitio en internet *MATWEB.com*, sitio especializado en descripción de materiales. [27]

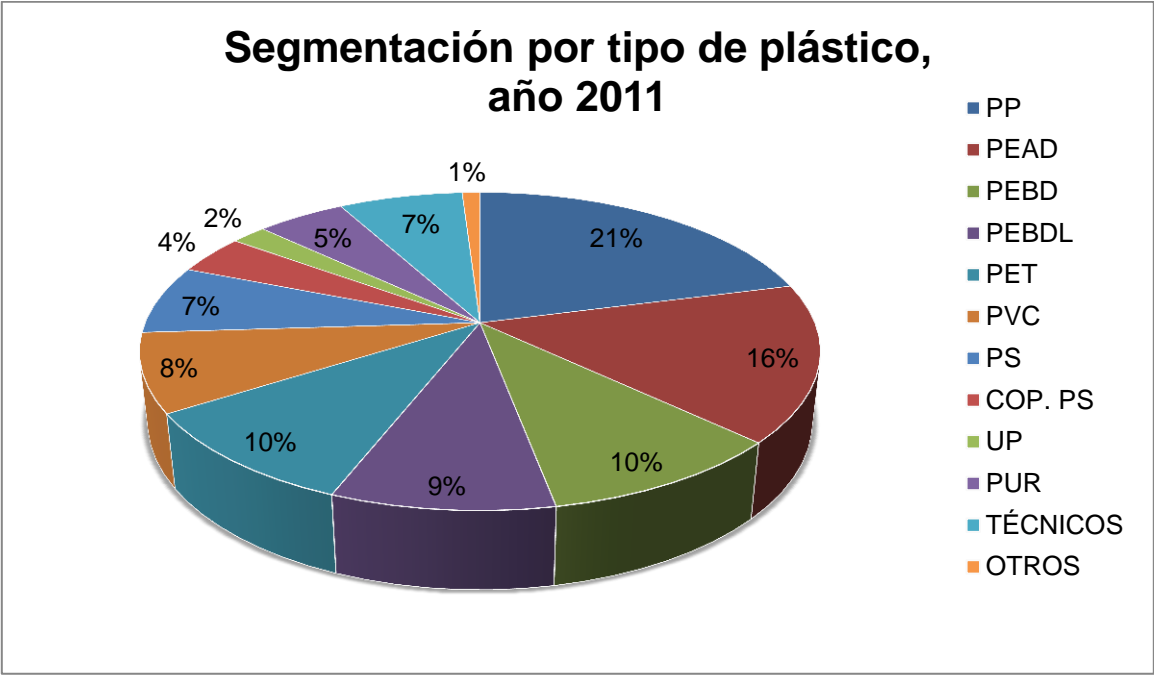
### **Polipropileno reciclado.**

Según estudios realizados por *PEMEX, Petroquímica*, indican que el mercado mexicano destina el 50% del consumo de plástico a la industria del envase, en tanto que el polímero mayormente empleado en el país es el polipropileno en un 21%, de donde éste se emplea principalmente en la producción de envases (películas, tapas); consumo (artículos para el hogar); construcción (tubería) y automotriz (interiores y exteriores).



**Figura 19. Uso aparente de los polímeros en el mercado Mexicano, año 2011 [30].**

En la figura 19 se visualiza cómo es destinado el polímero dentro de la industria. Este análisis fue elaborado por *PEMEX, Petroquímica* en relación al año 2011.



**Figura 20. Consumo aparente de los diferentes tipos de plásticos en la industria Mexicana, año 2011 [30].**

La figura 20 enmarca los diferentes polímeros empleados en la industria mexicana, donde resalta el liderazgo del polipropileno con un 21% en consumo, el estudio fue realizado para el año 2011 por *PEMEX, Petroquímica*. [30]

Según datos proporcionados por *PLASTIMAGEN* el 38% de sus clientes pertenece al mercado del reciclado, siendo éste un porcentaje importante a resaltar, con base en esta aseveración es que la obtención de esta materia prima es por medio de los desechos que generan empresas dedicadas al rubro del polímero. [31]

El polipropileno reciclado empleado en esta investigación es sometido a un primer reciclaje, el cual proviene principalmente de la industria del envasado y empaçado, donde su obtención es consecuencia del control de calidad que sufre el producto y el cual no es aprobado, obteniendo así un primer reciclaje del polipropileno.

Las características mecánicas que ofrece el polipropileno reciclado se ven mermadas en un rango que va del 5 al 15% por debajo de las prestaciones que ofrece un polipropileno de características vírgenes. Cabe hacer notar que esta variación radica fuertemente en el procesado del polímero

**Tabla 10. Comparación de algunas propiedades mecánicas del polipropileno virgen y reciclado [28].**

<b>Propiedad</b>	<b>Unidades</b>	<b>Valor<sup>1</sup></b>	<b>Valor<sup>2</sup></b>
Módulo de Young	MPa	1200	8-8250
Resistencia a la tracción	MPa	30	2.07-369
Resistencia al impacto	kJ/m <sup>2</sup>	16	2-56
Contracción	%	2	1.5-2.5
Dureza	Shore D	74	40-83
Índice de fluidez	g/10 min	18	0.2-2000

<sup>1</sup> Polipropileno reciclado (ver referencia [28]); <sup>2</sup> Polipropileno virgen (valores obtenidos de MATWEB)

Se puede apreciar que en la tabla 10 el rango en la disminución que tiene un polipropileno de características reciclado en comparación con aquel que es virgen. Ciclos de procesamiento durante etapas de reciclado y uso de aditivos pueden mermar aún más estas propiedades.

Hasta el momento en párrafos previos se ha citado las características que ofrece el polipropileno tanto en su versión virgen como reciclada, resaltando las propiedades mecánicas que éste puede ofrecer. Sin embargo, es también importante resaltar las propiedades mecánicas de los polímeros que se emplearán en la comparación con el material compuesto. Así pues, se dan paso a éstas.

## Patrones comparativos (polímeros).

Como parte de la caracterización propia del material compuesto que se analizará en próximos apartados, es importante poseer patrones comparativos para saber dónde situar a este nuevo material compuesto en cuanto a las prestaciones mecánicas que puede ofrecer. Así pues, tres polímeros ampliamente empleados en el ambiente de los invernaderos son los medios comparativos a emplear, siendo éstos: polietileno de alta densidad (HDPE), acrílico (PMMA) y poli cloruro de vinilo (PVC). En el rubro de los invernaderos este tipo de polímeros son empleados comúnmente en películas o placas planas fungiendo éstas como sistemas de cobertura, aunque no se descarta el uso de estos polímeros en la estructura ya sea en combinación con madera o metal.

Tabla 11. Propiedades mecánicas de polímeros comúnmente empleaos en invernaderos [44], [45].

<b>Polietileno alta densidad (HDPE)</b>	
Prueba Izod con muesca	27.9 [kJ/m <sup>2</sup> ]
Módulo de flexión	1100 [MPa]
Límite elástico a flexión	28.1 [MPa]
<b>Acrílico (PMMA)</b>	
Prueba Izod con muesca	18 [kJ/m <sup>2</sup> ]
Módulo de flexión	3100 [MPa]
Resistencia a la flexión	103 [MPa]
<b>Policloruro de vinilo (PVC)</b>	
Prueba Izod con muesca	20 [kJ/m <sup>2</sup> ]
Módulo de flexión	2260 [MPa]
Límite elástico a flexión	78.9 [MPa]

En la tabla 11 se plasman algunas propiedades mecánicas las cuales son relevantes en la labor de caracterización de esta investigación. Los valores de dichas propiedades fueron recabados del sitio electrónico *MATWEB.com*, así como de las referencias [44] y [45].

Existe un caso particular el cual hacer referencia a la tenacidad. Esto debido a que existen variantes en la modalidad del ensayo a emplear, siendo así que la mayoría de los plásticos son analizados bajo el ensayo Izod, donde éste emplea unidades J/cm. En consecuencia y debido a que el tipo de ensayo empleado en el análisis que se presenta es el método Charpy, el cual exhibe unidades kJ/m<sup>2</sup>, se vuelve menester emplear un medio el cual permita relacionar ambas escalas. Es por tanto que se emplea un factor con valor de 2.738223 (constante que la literatura denomina “*Constante Charpy*”) que multiplica el valor en unidad Izod, arrojando como resultado el correspondiente en unidades Charpy.

Durante el desarrollo de esta investigación es necesario conocer los dos tipos de ensayos mecánicos empleados en el proceso de caracterización de este material compuesto, pero previo a la ejecución de dicho ejercicio, será idóneo definir qué es un ensayo mecánico y qué tipo de organismos rigen este tipo de ensayos, así como el propósito que éstos cumplen al estandarizar los ensayos. Así pues, se da inicio a definir qué es un ensayo mecánico.

### **Ensayos mecánicos.**

Los materiales exhiben una gran variedad de comportamientos no lineales ligados a la deformación o al tiempo, en relación con el entorno. En consecuencia se vuelve menester caracterizarles de forma experimental para comprender su comportamiento en interacción con un sistema. Los ensayos mecánicos auxilian en este aspecto mediante el empleo de especímenes muchas veces denominados probetas, son pues éstos la base de muchos estudios ingenieriles.

Existen numerosos ensayos los cuales permiten caracterizar las propiedades mecánicas de los materiales, la mayoría de estos ensayos son normalizados por organismos reconocidos internacionalmente, tales como: *AFNOR (Association Française de Normalisation)*, *ASTM (American Society for Testing and Materials)*, *DIN (Deutsches Institut für Normung)*, *ISO (International Organization for Standardisation)*, entre otros organismos. Éstos proponen ensayos de fácil reproducción, definiendo y controlando variables así como estandarizando metrologías, todo esto con el fin de que la información arrojada por los ensayos contengan la mayor veracidad posible entre sus diferentes practicantes. Son pues, los ensayos mecánicos una herramienta invaluable para los ingenieros que se valen de éstos para el control y caracterización de los materiales. [25]

### **Ensayo de flexión.**

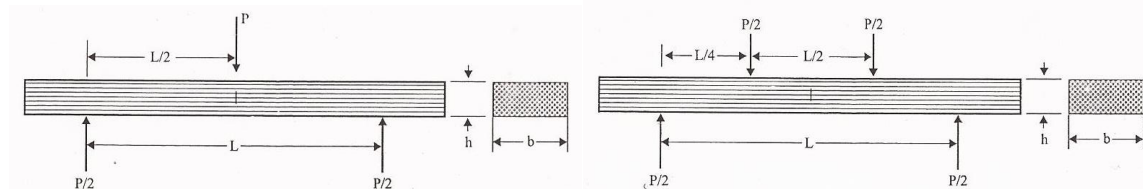
En ingeniería se denomina flexión a la deformación que sufre un elemento estructural de características alargadas. La denominación “alargado” se emplea cuando una dimensión es fuertemente dominante con respecto las demás. De forma típica se identifican las vigas, elementos que son diseñados principalmente para desempeñar trabajo a flexión. De igual manera, el concepto de flexión es ampliado a elementos superficiales como láminas o placas.

Este tipo de ensayos son empleados para la evaluación del módulo de elasticidad, resistencia, módulo a cortante, resistencia a corte y otras propiedades de los materiales. Esta clase de pruebas difieren a las de tensión y compresión en que la tensión y la deformación no son uniformes en el material que se está probando.

Se trata de un método empleado para la medición del comportamiento de materiales sometidos a la modalidad de carga en una viga simplemente apoyada.

Es realizado sobre probetas comúnmente de dimensiones rectangulares, reposadas sobre tres o cuatro puntos de apoyo, este último caso beneficia que el análisis sea en una zona central donde el momento de flexión sea uniforme. En la figura 21 se puede apreciar las modalidades que se emplean para la ejecución de este tipo de ensayo. El esfuerzo máximo en las fibras y la deformación máxima se calculan en incrementos de carga, obteniendo así un diagrama carga-deformación, donde el esfuerzo máximo es traducido como la resistencia a la flexión. Las pruebas de flexión son también útiles para determinar la ductilidad en láminas y en barras, asimismo se verifica la solidez de soldaduras.

Los ensayos a flexión, son especialmente empleados para la evaluación de la resistencia a tracción de materiales frágiles, ya que tales materiales muestran dificultad al ser evaluados mediante la modalidad de tensión uniaxial, esto debido al acabado que muestran las mordazas empleadas en este tipo de máquinas o los problemas de alineación.



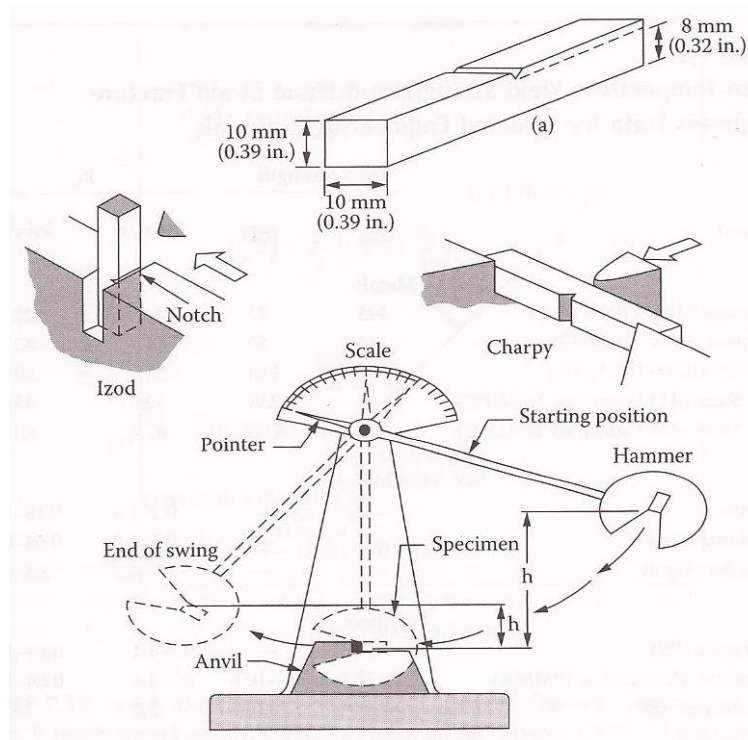
**Figura 21. Esquema del ensayo a flexión. A la izquierda: flexión 3 puntos. A la derecha: flexión 4 puntos [13].**

Los procedimientos estándar se especifican mediante la norma *ASTM* como sigue: *ASTM D790* (plásticos), *ASTM C674* (cerámica blanca recocida), *ASTM D797* (elastómeros), *ASTM A438* (hierro fundido) y *ASTM D86* (vidrio). [12], [14], [23], [25], [26]

### **Ensayo de impacto.**

Este tipo de ensayos son llevados a cabo para la determinación del comportamiento de un material ante velocidades de deformación elevadas. Así pues, este es un método que proporciona información sobre la resistencia de un material a la rotura repentina, donde está presente un concentrador de esfuerzos (muesca). La variable que se suele medir es la energía absorbida al romper la probeta en un único golpe. Las pruebas más comunes de este tipo son la *Izod* y la *Charpy* con muesca en V. Se suele emplear una disposición de péndulo oscilante el cual se utiliza para la aplicación de la carga de impacto en cualquiera de los dos tipos de ensayo, este tipo de máquina se suele llamar "Máquina de Ensayos de Impacto", tal y como lo muestra la figura 22. La energía necesaria para la ruptura de la probeta es determinada a partir del indicador en la carátula, el cual mide qué

tan alto oscila el péndulo después de romper la probeta. La resistencia ante el impacto para polímeros se evalúa mediante la prueba Izod.



**Figura 22. Detalles de la prueba de impacto en una máquina de péndulo [16].**

El ensayo de tracción dinámica es también empleado para la determinación de la energía absorbida por un espécimen durante un impacto. Las probetas para este tipo de ensayo tienen una muesca central como las probetas de ensayo Charpy. Este tipo de probetas se colocan en la modalidad de viga simplemente apoyada dejando caer sobre ella un peso. Este tipo de probetas son grandes, con tamaños que pueden alcanzar 430 mm de largo, 120 mm de ancho y 25 mm de espesor.

En este tipo de ensayos, la energía absorbida por el impacto depende del tamaño de la muestra y propiamente de la geometría la cual incluye el radio de la muesca. De igual manera, la configuración de soporte y la carga utilizada cobran importancia, como en la masa y la velocidad que posee el péndulo.

Procedimientos estándar son especificados mediante las normas *ASTM E-23* (metales) y *ASTM D256*, *ASTM D4812*, *ASTM D4508* y *ASTM D6110* (para plásticos) [12], [14], [16], [24]

## **Normatividad, elaboración de probetas y ensayos mecánicos.**

El presente proyecto pretende evaluar las propiedades mecánicas de un material compuesto mediante ensayos de flexión e impacto, permitiendo su caracterización física y mecánica inicial.

El uso de las normas:

- *ASTM D790 Standard Test Methods for Flexural Properties of Unreinforced and Reinforced Plastics and Electrical Insulating Materials*
- *ASTM D256 Standard Test Methods for Determining the Izod Pendulum Impact Resistance of Plastics*

Son indispensables para el desarrollo de especímenes (probetas), ya que éstas son las que dictan las características geométricas que deben poseer dichos especímenes que serán analizados, así como los lineamientos de ensayo y uso de ecuaciones con fines comparativos. Sin embargo, normas como:

- *ASTM D2240 Standard Test Method for Rubber Property-Durometer Hardness*
- *ASTM D695 Standard Test Method for Compressive Properties of Rigid Plastics*
- *ASTM D671 Standard Test Method for Flexural Fatigue of Plastics by Constant-Amplitude-of-Force*
- *ASTM D638 Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics*

Fueron consultadas de manera paralela junto con el primer binomio de ellas ya que también forman parte de la caracterización del material compuesto.

La elaboración de probetas, así como de los ensayos de impacto fueron realizados en las instalaciones que dispone la *Facultad de Ingeniería* de la *UNAM* para dichos fines. *Facultad de Ingeniería* cuenta con máquinas que permiten realizar ensayos mecánicos de diferente índole, para el caso concreto del presente trabajo, se empleó la máquina de péndulo para pruebas del tipo Charpy, así como una máquina de ensayos universales para efecto de la realización de los ensayos a flexión por el *Instituto de Investigaciones en Materiales, UNAM*.



## **Reflexión final.**

Hasta ahora se han descrito los materiales y métodos a emplear así como las normas que regulan a estos últimos. No obstante, es menester indicar el porqué de la decisión de analizar una sola composición y cómo es que se determinan las cantidades de polímero y aserrín para su manufactura. Tal y como se ha descrito antes, esta investigación toma parte de estudios previos realizados por González y colaboradores [28], [39], donde resultados indican que al aumentar la cantidad de aserrín en la composición las propiedades mecánicas se ven mermadas debiéndose principalmente a la falta del uso de agentes adhesivos o aditivos los cuales fomenten una mejor interacción entre los componentes. Asimismo estos resultados indican que ante una mayor tamaño en el aserrín se ven incrementadas las prestaciones mecánicas. Razón por la cual se optó por fabricar un material compuesto formado por una matriz de polipropileno reciclado en una proporción de 75% y un refuerzo de partícula fina comprendida por aserrín de pino en un 25% restante y donde este último tiene una granulometría de malla 30. Así pues, una vez que los ensayos mecánicos han sido efectuados bajo las condiciones pertinentes, la recopilación de información, que para efectos del presente, son los resultados obtenidos directamente de las pruebas, son comparados con ecuaciones estipuladas por las normas en curso. Análisis y discusión de resultados son mostrados en el siguiente capítulo dando pauta a la generación de las conclusiones pertinentes.

# Capítulo V. Evaluación mecánica y análisis de resultados.

---

---

Este apartado está destinado a la discusión de los resultados obtenidos mediante ensayos mecánicos al material compuesto ante sollicitaciones específicas que pueden estar presentes en un entorno funcional. Recordando que este material pretende ser empleado en estructuras para invernaderos de uso urbano, se procede a analizar el material bajo condiciones de impactos repentinos y rachas sostenidas de viento. Estas condiciones son aproximadamente reproducidas en el laboratorio por los ensayos mecánicos de impacto y flexión, respectivamente.

El proceso de evaluación exige comparar propiedades mecánicas con un patrón conocido. Es por eso que los resultados tratados en este apartado son comparados con resultados de la composición 100%PPr, obtenidos bajo igualdad de condiciones de ensayo. El anterior ejercicio proporciona un rango fiable comparativo sobre los valores obtenidos.

La variabilidad propia de las diferentes composiciones ensayadas es cuantificada mediante el error relativo porcentual. Este proceso permite tomar en cuenta la magnitud del valor que se está estimando y no sólo un comparativo entre un valor real y una aproximación. En consecuencia, no sólo se obtiene un valor numérico (error), sino que además éste puede advertir el desempeño del material bajo estudio debido a que se emplean valores porcentuales.

Cabe hacer mención que la elaboración de probetas solamente contempla el uso de materiales meramente reciclados (polipropileno y aserrín de pino) y no se emplea algún tipo de aditivo o adhesivo en la elaboración de las probetas. Con lo anterior se busca que al no incluir en la manufactura del material compuesto agentes acopladores, no se incremente el costo de fabricación del mismo, teniendo como límites las prestaciones mecánicas que el material compuesto ofrece.

## **Análisis del ensayo de impacto.**

Se realizaron probetas y éstas se ensayaron mediante los lineamientos que indica la norma *ASTM D256*. Cabe hacer mención que para la ejecución de las pruebas pertinentes se utilizó la modalidad de ensayo Charpy. Para el desarrollo experimental fue empleada una máquina afín, proporcionada por el *Laboratorio de Pruebas Mecánicas de la Facultad de Ingeniería, UNAM*. Se prepararon dos composiciones las cuales contemplaron una de 100%PPr en su totalidad y otra de

material compuesto en una composición de 75%PPr y 25%Ap. El péndulo utilizado se encontraba en el rango mínimo de energía potencial disponible, 150 J. Así mismo, se seleccionaron 7 probetas representativas ante una muestra de 10 especímenes disponibles por cada familia de estudio.



**Figura 23. Máquina de pruebas de impacto. Instalaciones del laboratorio de pruebas mecánicas de la Facultad de Ingeniería de la UNAM.**

Durante el proceso de moldeo por inyección se presentaron problemas en cuanto al llenado total del molde por tanto, las probetas que cumplían con la calidad adecuada para ser ensayadas fueron seleccionadas por familias de estudio.



**Figura 24. Probetas fabricadas según la norma *ASTM D256* para ensayos de impacto.**

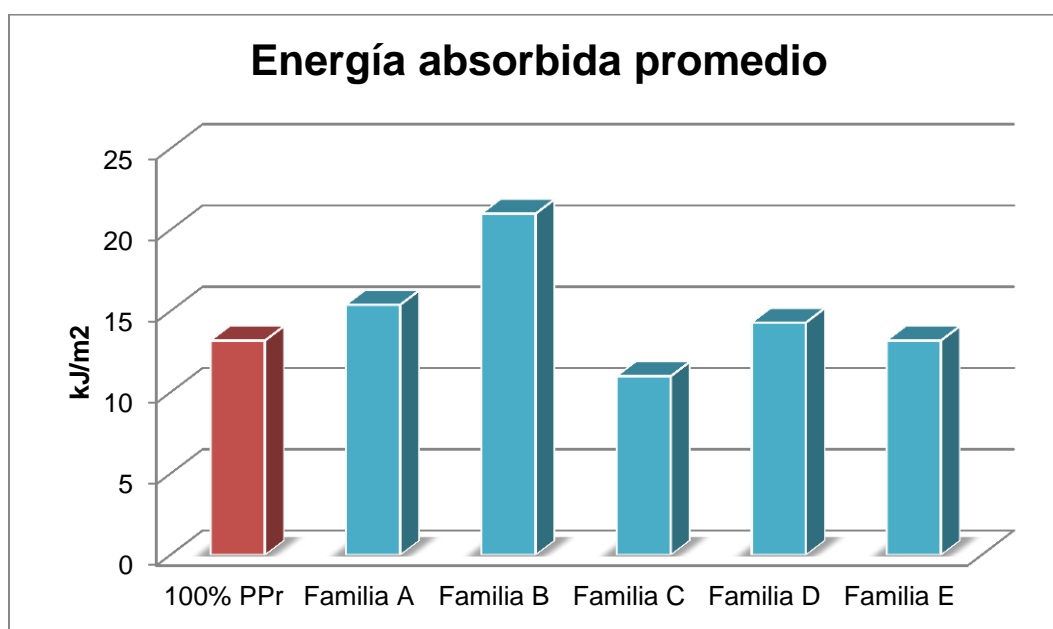
La figura 24 muestra un conjunto de 6 probetas previas a la realización del ensayo de impacto. El primer tercio situado a la izquierda son probetas elaboradas de

material compuesto, en tanto que las tres restantes ubicadas a la derecha, son fabricadas de 100%PPr. En la figura citada es notorio percibir un cambio en la apariencia visual, ya que en las probetas fabricadas de material compuesto se observan las partículas de aserrín de pino aparentando otorgar una textura áspera al material, sin embargo, al tacto se percibe una sensación lisa, como la que presenta la composición 100%PPr.

La tabla 12 muestra la comparación entre el material compuesto y la matriz polimérica reciclada no reforzada, donde es contabilizada la energía absorbida por las probetas en función de un único impacto. La energía registrada directamente en la carátula de la máquina fue dividida por el área de impacto efectiva de la probeta, la cual es de 129.54 mm<sup>2</sup>, obteniendo los siguientes registros.

**Tabla 12. Energía absorbida por probetas durante los ensayos de impacto.**

	100% PPr [kJ/m <sup>2</sup> ]	Familias de material compuesto [kJ/m <sup>2</sup> ]				
		A	B	C	D	E
	15.4	15.4	15.4	7.72	23.2	15.4
	7.72	15.4	15.4	7.72	15.4	7.72
	15.4	15.4	46.3	7.72	7.72	7.72
	7.72	15.4	15.4	15.4	15.4	15.4
	15.4	15.4	30.9	15.4	15.4	15.4
	15.4	15.4	15.4	15.4	7.72	15.4
	15.4	15.4	7.72	7.72	15.4	15.4
<b>Promedio</b>	<b>13.2</b>	<b>15.4</b>	<b>21.0</b>	<b>11.0</b>	<b>14.3</b>	<b>13.2</b>



**Figura 25. Comparación de las energías promedio en los ensayos de impacto.**

En el gráfico de barras que se aprecia en la figura 25, destacan los valores promedios de cinco familias ensayadas de material compuesto en comparación con la composición 100%PPr. Se aprecia que cuatro de las cinco familias de material compuesto reforzado con aserrín de pino poseen una mayor cantidad de energía absorbida durante el impacto, en comparación con su homólogo polimérico reciclado. Un incremento promedio del 13.485% confirma una mayor tenacidad proporcionada por las partículas de madera como refuerzo en la matriz de polipropileno reciclado ante un impacto repentino.



**Figura 26. Probetas de impacto ensayadas, en composición 100%PPr**



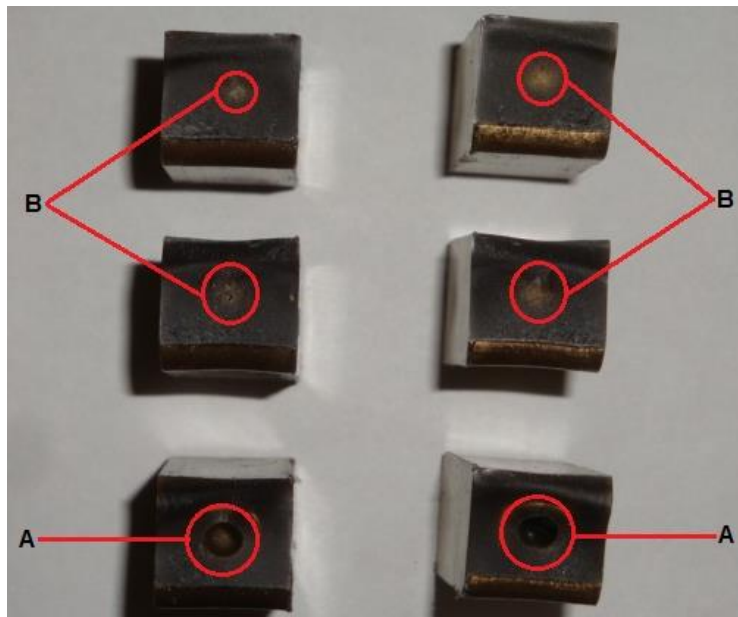
**Figura 27. Probetas de impacto ensayadas, en composición 75%PPr/25%Ap**

Observar la superficie de las diferentes probetas ensayadas es un proceso que permite visualizar a detalle el aspecto que tiene el área de impacto. Es así que pueden ser identificadas zonas críticas que comprometen el desempeño mecánico del material, este tipo de zonas pueden alojar desde imperfecciones propias de

conformado hasta aquellas que se asocian directamente con una distribución no homogénea del material.

Analizando un grupo de probetas ensayadas en composición de 100%PPr se aprecia que la probeta localizada en la parte inferior de la figura 28 presenta una imperfección propia del conformado, región **A**. Esta imperfección, interpretada como un alojamiento de aire situado en la parte media de ambas porciones de la probeta puede tener un impacto negativo en el desempeño mecánico del material, ya que esta clase de imperfecciones muestran una clara tendencia a la proliferación de grietas. En las probetas adyacentes, es también posible percibir pequeñas localizaciones de alojamientos de aire, advirtiéndose un cambio en la tonalidad del color de la probeta, región **B**. Estas imperfecciones se observan sobre todo en la zona media de las probetas, si bien, estas imperfecciones (regiones en **B**) no son tan evidentes como en **A**, su sola presencia es el resultado evidente de un problema en el proceso de inyección durante el moldeo del material.

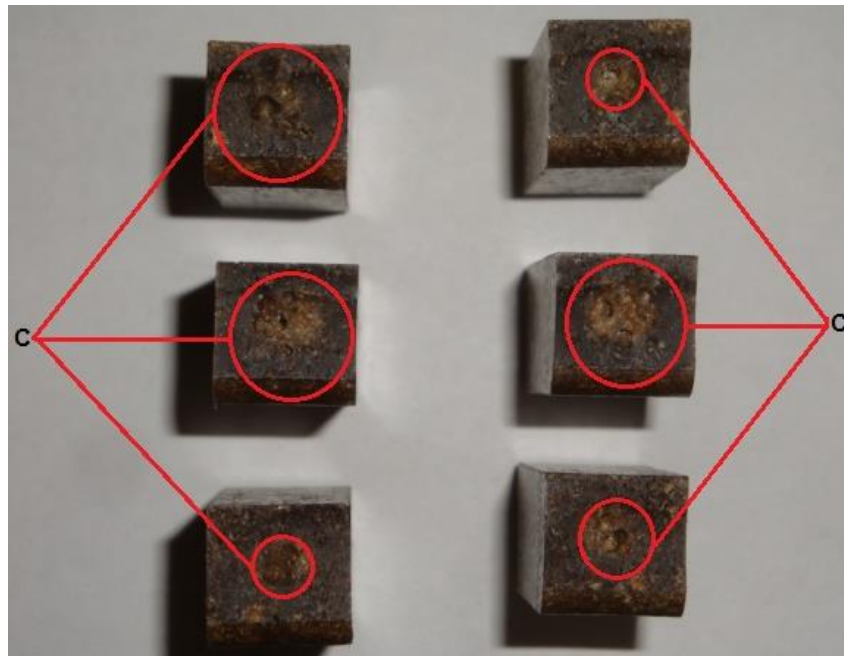
Los alojamientos de aire que fueron localizados acusan que es necesario tener un mejor control del proceso de moldeo por inyección, ya que así el material obtenido tendrá una mejor uniformidad en su conformado asegurando una mejor calidad y por ende mejores prestaciones mecánicas del espécimen.



**Figura 28. Superficies próximas a la muesca de probetas de impacto donde se resaltan detalles de alojamientos de aire. Composición 100%PPr**

Por otra parte en la figura 29 un conjunto de probetas de material compuesto sometidas al mismo escrutinio que sus homologas, arrojan interesantes resultados. Cada una de las probetas muestra una cantidad mayor de concentración central de imperfecciones en su proceso de conformado, regiones resaltadas con letra **C**, así como una textura porosa es apreciable en su estructura. En comparación con sus homólogas de un sólo componente la cantidad de porosidad e imperfecciones centrales aumenta, sin embargo no afecta considerablemente el comportamiento mecánico ya que como es de esperarse el refuerzo orgánico otorgó un incremento en la absorción de energía por la probeta.

Tal y como se citó en anteriores líneas este fenómeno no controlado de imperfecciones es un potencial inminente ante una falla del material. En resumen, por la ubicación de los alojamientos de aire, éstos pueden depender principalmente del proceso de moldeado por inyección. Por otra parte la porosidad exhibida por el material compuesto puede deberse en gran parte a que no se emplearon elementos que funjan como adhesivos entre el polímero y la partícula de madera generando una falta de adherencia entre el polímero y la madera, tal y como lo arrojan los resultados de González y colaboradores. [28]



**Figura 29. Superficies próximas a la muesca de probetas de impacto donde se resaltan detalles de porosidad y alojamientos de aire. Composición 75%PPr/25%Ap**

Mediante el empleo de técnicas de microscopía se puede efectuar un análisis más detallado de la estructura de un material, pudiendo así localizar granos, imperfecciones, fracturas, entre otras interesantes características. En lo que respecta a esta investigación se hace uso de un microscopio óptico marca *NIKON*

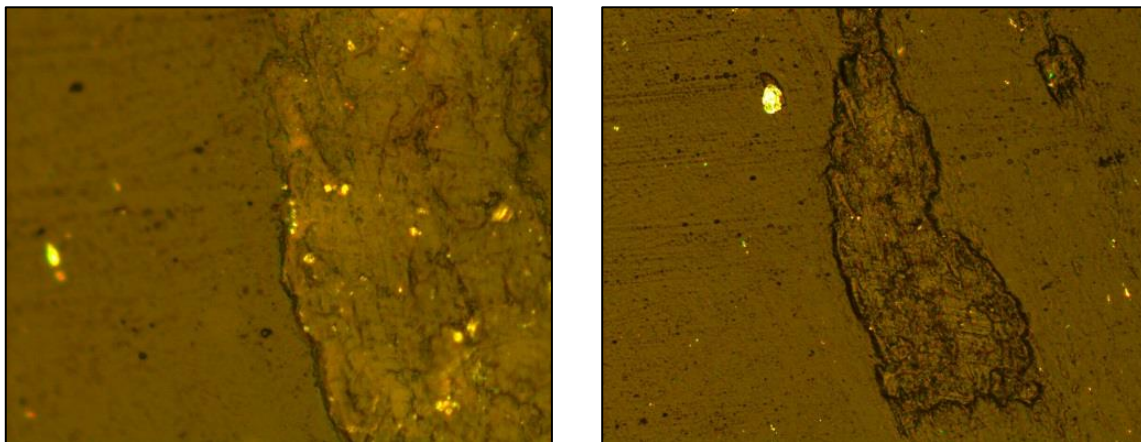


modelo *EPIPHOT*, facilitado por la *Facultad de Ingeniería* en el desarrollo de esta investigación, con el cual se lograron obtener imágenes mucho más detalladas de la composición 75%PPr/25%Ap, donde lo que se busca con éstas es puntualizar qué tipo de interacción tienen las partículas del aserrín en la matriz polimérica.



**Figura 30. Microscopio óptico NIKON. Este equipo forma parte de los laboratorios de metalografía en la Facultad de Ingeniería, UNAM [39].**

La figura 31 ofrece dos imágenes en las cuales es posible apreciar con detalle la interacción entre una partícula aislada de madera en la matriz polimérica. En la imagen de la izquierda, la cual ofrece un acercamiento de 50X, se observa la incrustación de una partícula de aserrín de pino en la matriz polimérica donde en la región mostrada no se hacen evidentes zonas localizadas de fisuras entre ambos materiales. La imagen de la derecha, acercamiento a 20X, resalta en el área central una partícula de madera de aspecto irregular, en tanto que en la esquina superior derecha de la misma figura se observa otra, pero con un tamaño notoriamente menor.

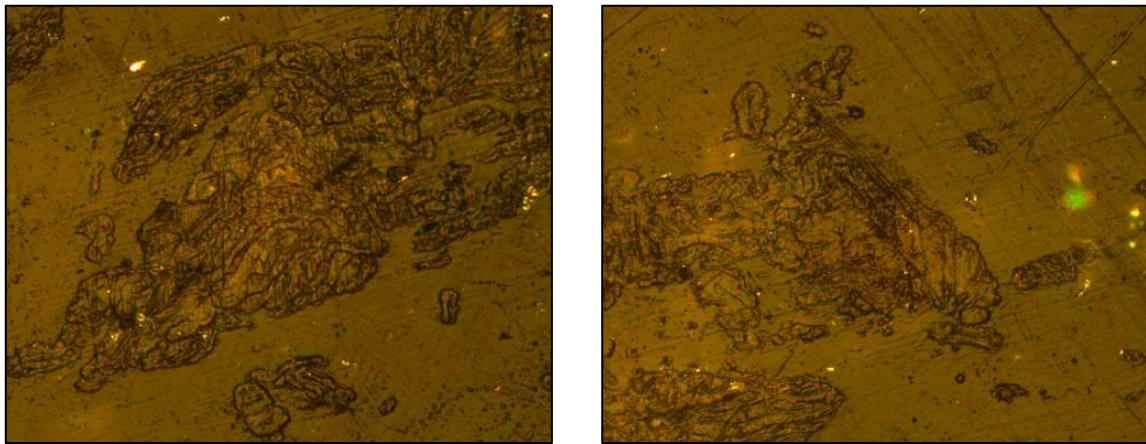


**Figura 31. Matriz de polipropileno reciclado reforzada mediante partículas de aserrín de pino, en composición 75 y 25%, respectivamente. Imagen izquierda muestra 50X, imagen derecha 20X [39].**



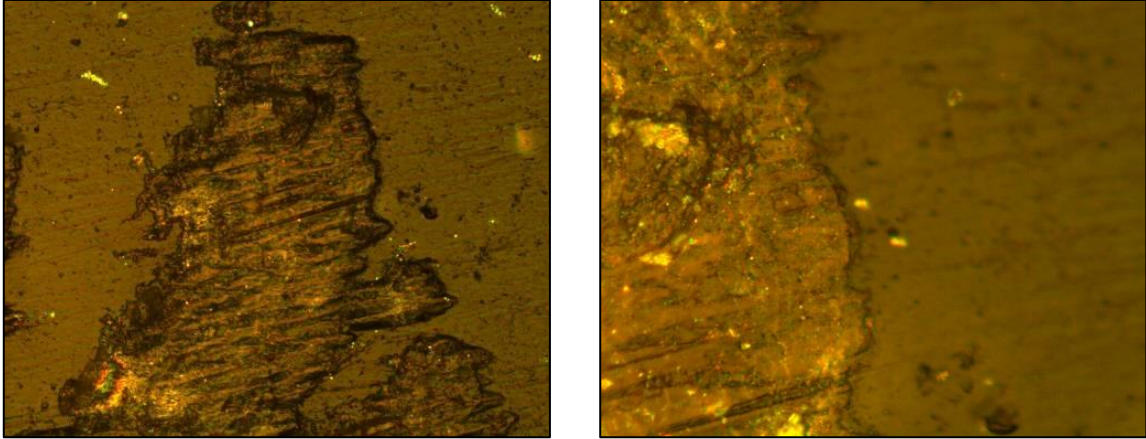
Los siguientes grupos de imágenes que a continuación se describen, muestran material compuesto en composiciones de 30, 35 y 40% en aserrín de pino, analizadas bajo microscopio óptico. Este ejercicio permite establecer una discusión entre el comportamiento que tiene la interacción de la matriz polimérica y el refuerzo maderable, donde este último es incrementado en la composición.

La figura 32 muestra imágenes de una composición 70%PPr/30%Ap, donde ambas imágenes son obtenidas bajo un aumento de 20X. La imagen de la izquierda enfoca un sector de aglomeración de partículas de aserrín donde resalta a la vista la inconsistencia en tamaño de las mismas. En la imagen de la derecha destaca de igual manera la aglomeración de partículas maderables donde éstas parecen mostrar una orientación, aunque ésta no es del todo definida.



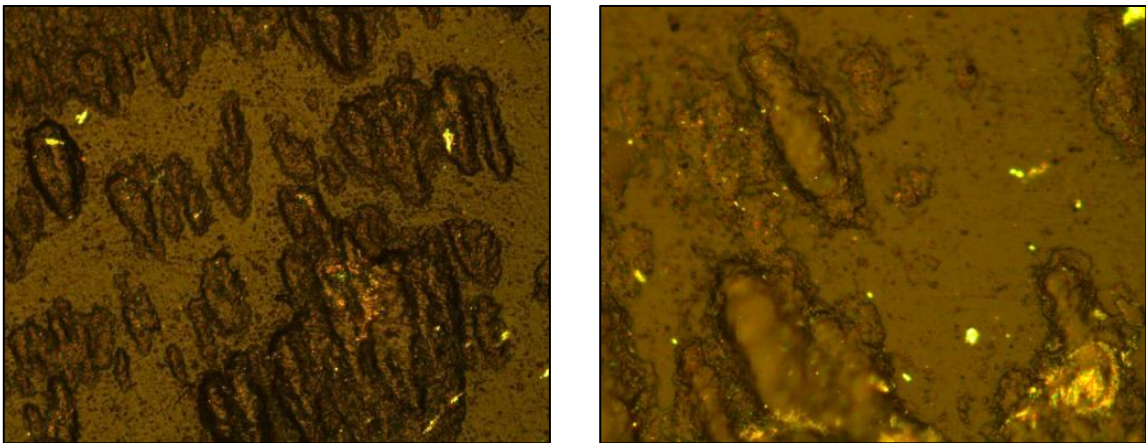
**Figura 32. Aglomeración de partículas maderables en la composición 65%PPr/25%Ap. Imágenes obtenidas a 20X [39].**

A detalle la figura 33 muestra la composición 65%PPr/35%Ap, donde se muestra la fusión entre las partículas de aserrín debido al proceso de fundición entre el polímero y la madera, dando consecuencia a concentraciones de partículas en la matriz polimérica, imagen de la izquierda a 20X. La interacción de estos cúmulos de partículas con el polímero se muestra en la imagen obtenida a 50X de la derecha. La adhesión entre el refuerzo y el polímero es favorable ya que no se presentan regiones evidentes de falla en el material, lo cual puede ser apreciado en la imagen de la derecha.



**Figura 33. Detalle de fusión de partículas de aserrín de pino formando hojuelas, imagen de la izquierda a 20X. Detalle a 50X de una hojuela y la matriz polimérica, imagen de la derecha [39].**

Al incrementar la cantidad de aserrín en la composición se hace evidente el alza de regiones con aglomeraciones de aserrín aunque también se resalta que las partículas irregulares muestran una orientación particular, situación debida principalmente al proceso de inyección por moldeo, imagen de la izquierda obtenida a 20X, figura 34. A la derecha de la misma figura, se puede apreciar un acercamiento a 50X de partículas de aserrín donde destaca el hecho de que algunas se encuentran encimadas ya que las regiones desenfocadas hacen referencia a diferentes planos por encima de la imagen base.



**Figura 34. Composición 60% polipropileno reciclado y 40% aserrín de pino. Aumentos a 20X y 50X [39].**

De lo anterior se puede rescatar lo siguiente: durante el proceso de inspección en la microscopia se observaron partículas de geometría irregular, así como diferentes tamaños de la misma, lo cual permite pensar que deber tener un mejor control en el proceso de obtención de las partículas de aserrín, ya que lo anterior puede evitar en gran medida cúmulos o aglomeraciones de madera acarreados

por el flujo del material durante el proceso de inyección y éstos a su vez sean localizados en la matriz permitiendo que las prestaciones mecánicas se puedan ver mermadas en vez de ser mejoradas. Por otra parte, debe resaltarse que a pesar de que no se emplearon agentes adhesivos o aditivos los cuales fomentaran una mejor interacción entre los materiales empleados, las partículas de madera y la matriz polimérica evidencian un comportamiento favorable debido a que no hay regiones críticas que promuevan la formación de fisuras y posteriores rupturas.

Finalmente en lo que corresponde a este apartado no resta más que comparar los valores obtenidos durante el desarrollo de esta prueba con los valores recopilados para el polietileno de alta densidad (HDPE), acrílico (PMMA) y poli cloruro de vinilo (PVC). Este ejercicio comparativo es apreciado tanto en los valores que exhibe la tabla 13 como en la figura 35, donde en esta última se puede apreciar que la tenacidad que ostenta el material compuesto es mayor que la mostrada por el acrílico, pero menor cuando se compara con valores máximos del polietileno de alta densidad y el PVC.

Lo anterior demuestra la capacidad que posee el compuesto para la absorción de energía ante un impacto tanto así que es equiparable a los valores mínimos que muestran los polímeros citados previamente, cabe recordar que estos polímeros son empleados en invernaderos donde su función a desempeñar en él es diversa incluyendo también su uso en estructuras si es pertinente. Con base en esto se tiene un primer indicio satisfactorio que motiva la continuación en el desarrollo de este material compuesto de características biodegradables como un posible sustituto en elementos estructurales.

**Tabla 13. Comparativo entre el valor alcanzado en la tenacidad por el material compuesto y los polímeros comúnmente empleados en invernaderos.**

<b>Tenacidad [kJ/m<sup>2</sup>]</b>			
<b>Material compuesto</b>	<b>HDPE</b>	<b>PMMA</b>	<b>PVC</b>
14.98	27.9	18	20

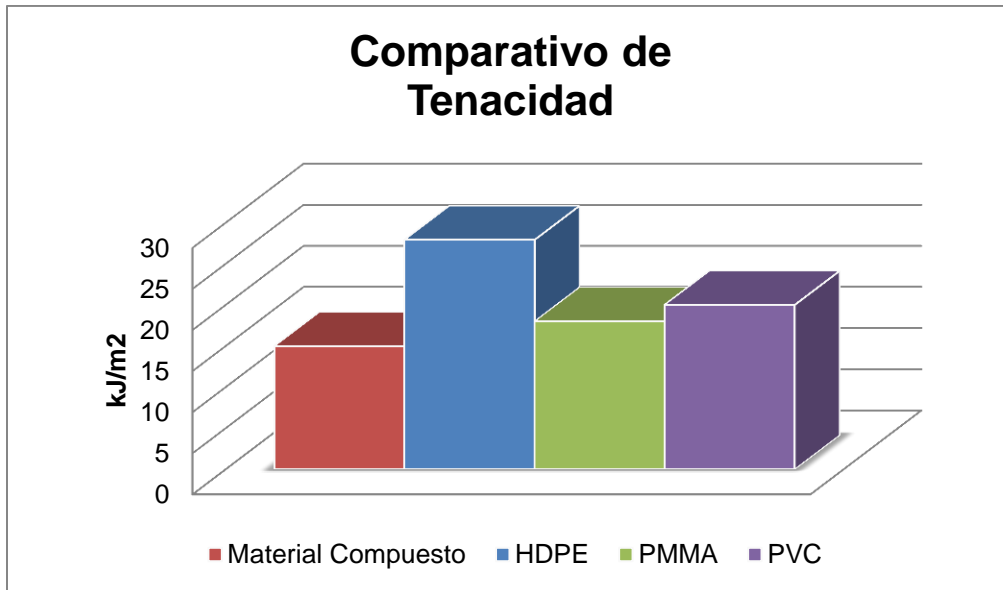


Figura 35. Comparativo entre los valores máximos y mínimos alcanzados por el valor de la tenacidad para el material compuesto y los polímeros empleados comúnmente en invernaderos.

### Análisis del ensayo de flexión.

Siguiendo los lineamientos marcados por la norma *ASTM D790* se realizaron las correspondientes probetas y se ensayaron tal y como lo indica la norma en curso, la figura 36 muestra algunas probetas de flexión previas a ser ensayadas. Se prepararon dos composiciones para su correspondiente análisis, una inicial comprendida de 100%PPr, por otro lado se formuló una composición de 75%PPr/25%Ap. Los parámetros de los que se tiene control son una velocidad de descenso igual a 10 mm/min por parte de la cruceta y una distancia entre soportes igual a 96.43 milímetros. Al igual que en el ensayo de impacto, fueron seleccionadas 7 probetas como muestra representativa de 10 especímenes disponibles tanto para la composición de 100%PPr, como para su contraparte en material compuesto. Estas pruebas mecánicas fueron efectuadas por el *Instituto de Investigaciones en Materiales, UNAM*, mediante el uso de una máquina de ensayos universales.



Figura 36. Probetas de flexión manufacturadas según norma ASTM D790.



Figura 37. Herramental involucrado en el ensayo a flexión en tres puntos. Parte inferior cruce graduada, parte superior nariz que aplica la carga.

De este ensayo mecánico se enfatiza un análisis en tres propiedades: esfuerzo máximo, deformación y módulo a flexión, siendo éstas de gran interés para el objetivo que se quiere cumplir en la aplicación de este material compuesto.

Tabla 14. Comparación de propiedades mecánicas de probetas sometidas a ensayos a flexión.

	Esfuerzo Máximo [MPa]*		Deformación [mm/mm]*		Módulo a Flexión [MPa]*	
	100 % PPr	MC <sup>+</sup>	100 % PPr	MC <sup>+</sup>	100 % PPr	MC <sup>+</sup>
	31.438	32.168	0.041	0.044	766.780	731.091
	29.934	32.168	0.048	0.045	623.625	714.844
	30.380	31.524	0.044	0.042	690.455	750.571
	30.147	30.717	0.043	0.039	701.093	787.615
	29.420	30.766	0.045	0.043	653.778	715.488
	30.418	31.855	0.043	0.040	707.395	796.375
	30.014	32.239	0.043	0.039	698.000	826.641
<b>Promedio</b>	<b>30.250</b>	<b>31.634</b>	<b>0.044</b>	<b>0.042</b>	<b>691.589</b>	<b>760.375</b>

\*Resultados obtenidos mediante ensayos mecánicos. +MC= material compuesto



## Esfuerzo máximo.

La ecuación empleada en este apartado para la obtención de los resultados teóricos tiene fines comparativos y es la misma que recomienda la norma en uso, así pues en lo que se refiere al cálculo del esfuerzo máximo se emplea la siguiente ecuación:

$$\sigma = \frac{3PL}{2bd^2}$$

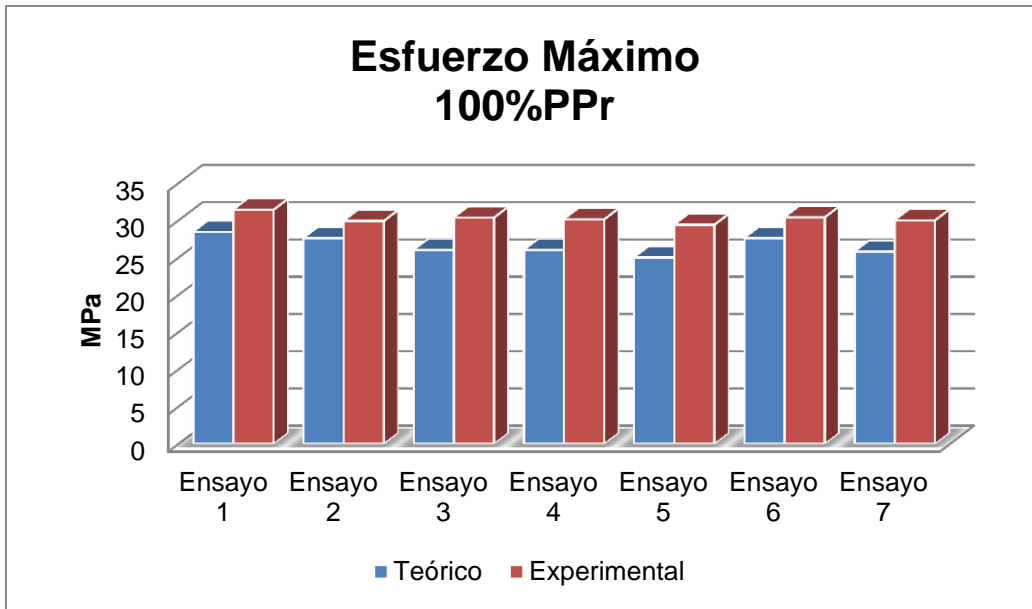
**Ecuación 5. Ecuación empleada para la determinación del esfuerzo máximo en la probeta, según la norma ASTM D790.**

Donde la norma designa a:

- $\sigma$ ; como el esfuerzo en las fibras externas en la zona media de la probeta, en MPa
- $P$ ; como la carga aplicada en la zona media de la probeta registrada en la curva carga-deformación, en N
- $L$ ; como la distancia existente entre los soportes que sostienen la probeta, en mm
- $b$ ; como el ancho de la probeta, en mm
- $d$ ; como el espesor de la probeta, en mm

**Tabla 15. Esfuerzo máximo teórico y experimental de la composición 100%PPr, para ensayo a flexión.**

<b>Esfuerzo Máximo teórico [MPa]</b>	<b>Esfuerzo Máximo experimental [MPa]</b>	<b>Error relativo [%]</b>
28.462	31.438	10.456
27.627	29.934	8.350
26.026	30.380	16.729
26.026	30.147	15.384
25.025	29.420	17.562
27.627	30.418	10.102
25.820	30.014	16.243



**Figura 38. Comparativo entre resultados obtenidos del esfuerzo máximo teórico y experimental. Composición 100%PPr**

Haciendo referencia a la figura 38, ésta señala una variación promedio del 13% entre el valor teórico y el experimental en la composición 100%PPr, donde en todos los casos expuestos los valores en los resultados experimentales son mayores que los arrojados por los teóricos.

Lo anterior puede explicarse debido a la variabilidad natural que tienen los materiales, así como al proceso de moldeo por inyección del material, el cual puede fomentar que no exista una buena distribución en el llenado del molde lo cual tenga como consecuencia que la homogeneidad en ciertas zonas de la probeta sea mala otorgando así al material compuesto regiones donde la resistencia sea distinta. Dichos factores no son contemplados en las ecuaciones, por lo cual no se hace uso de factores de corrección o aproximación tanto en este como en las subsecuentes ecuaciones propuestas.

Tabla 16. Esfuerzo máximo teórico y experimental de la composición 75%PPr/25%Ap para el ensayo a flexión.

Esfuerzo Máximo teórico [MPa]	Esfuerzo Máximo experimental [MPa]	Error relativo [%]
30.785	32.168	4.492
31.778	32.168	1.227
27.806	31.524	13.371
27.806	30.717	10.469
29.792	30.766	3.269
28.799	31.855	10.611
28.799	32.239	11.945

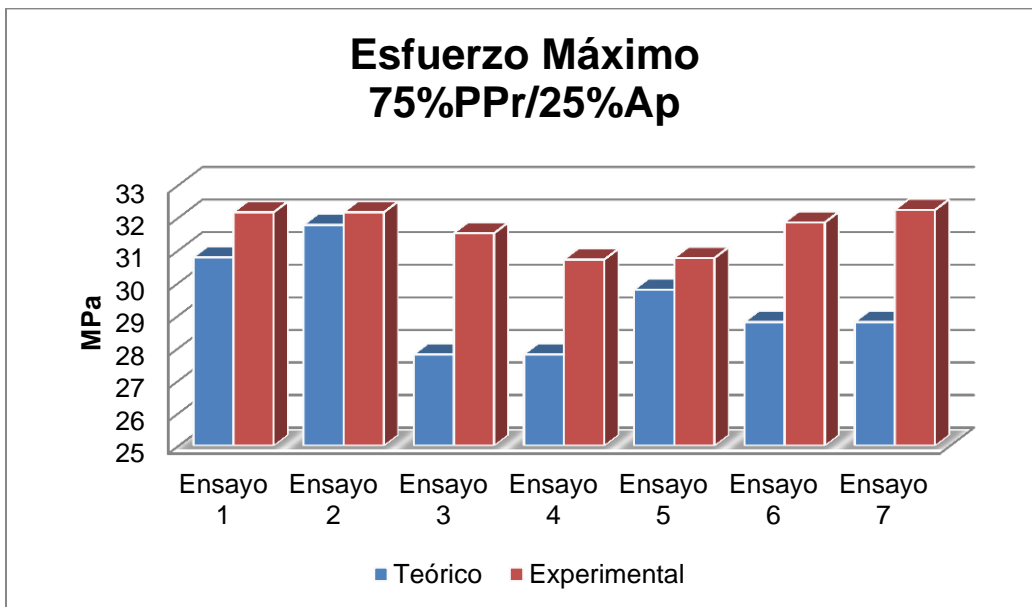


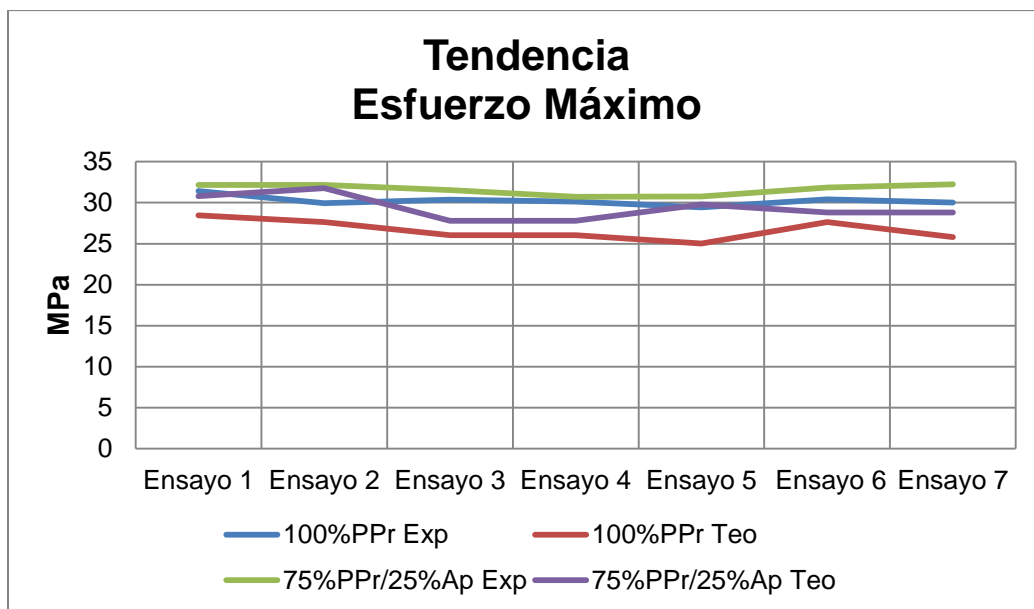
Figura 39. Comparativo entre resultados obtenidos del esfuerzo máximo teórico y experimental. Composición 75%PPr/25%Ap

La figura 39 y la tabla 14 confirman lo que predice la teoría, un cambio en las propiedades mecánicas del material compuesto y como es de esperarse el compuesto ostenta una mayor resistencia que el polipropileno reciclado sin refuerzo. Por otra, parte es importante enfatizar una variación promedio del 8% entre los resultados teóricos y los experimentales en la composición 75%PPr/25%Ap, donde una vez más los resultados experimentales superan las expectativas estipuladas por el modelo matemático.

Con base en el comportamiento que muestra la resistencia a flexión del material compuesto y comparando ésta con la muestra patrón es posible deducir lo siguiente: Primero; la composición 75%PPr/25%Ap posee una resistencia mayor a flexión que la composición 100%PPr, lo cual queda respaldado por un incremento



del 4.575%, no obstante en la figura 40 se observa la cercanía de los resultados de ambas composiciones, situación que presume deberse principalmente al no usar agentes acopladores en la mezcla. Segundo; para todos los casos de la composición 75%PPr/25%Ap, el comportamiento experimental es mayor que el que predice la teoría, tal y como se aprecia en la figura 40, esta superioridad numérica en los resultados experimentales advierten una buena interacción entre las materias primas, respaldado por un 8% de error promedio entre los resultados teóricos y experimentales en el material compuesto.

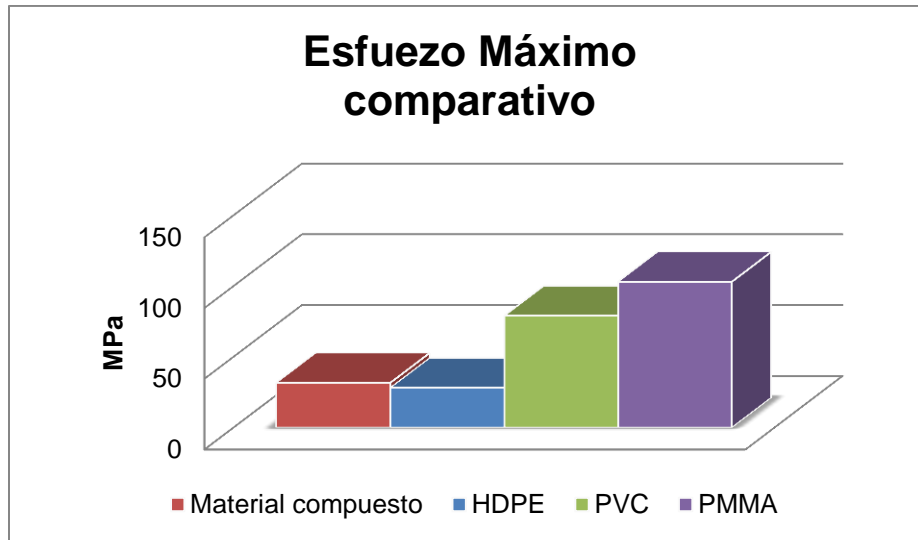


**Figura 40. Tendencia del comportamiento teórico y experimental en el esfuerzo máximo para el material compuesto y la matriz polimérica reciclada sin reforzar.**

No obstante que se tiene un parámetro de comparación con una muestra patrón, siendo ésta la matriz de polipropileno reciclada, es menester comparar los resultados obtenidos del material compuesto con valores proporcionados por materiales poliméricos empleados de común en invernaderos. Esta comparación se muestra en la tabla 17, esto con el fin de saber en qué punto de utilidad se puede encontrar el material compuesto generado.

**Tabla 17. Valores típicos del esfuerzo máximo de algunos polímeros empleados en invernaderos. Comparados con el material compuesto.**

Esfuerzo Máximo [MPa]			
Material compuesto	HDPE	PVC	PMMA
31.634	28.1	78.9	103



**Figura 41. Comparativo de la resistencia del material compuesto y polímeros comunes empleados en invernaderos.**

Al realizar este ejercicio de comparación es notorio que aun siendo un material compuesto la resistencia que éste ostenta, no supera los valores máximos del resto de los polímeros, tabla 17, sin embargo, si la comparación se efectúa con el valor mínimo del polietileno de alta densidad hay entonces un incremento del más del doble. Para fines de aplicación viable la comparación se realiza con valores máximos evidenciando la posición de la matriz polimérica reforzada, no obstante, el bajo valor del compuesto no debe tomarse como un indicio equívoco en la investigación debido a la procedencia de los materiales empleados para la fabricación del material compuesto. Si bien, se emplearon materiales meramente reciclados y no se hizo uso de aditivos o adhesivos para considerar un precio de manufactura accesible, los resultados arrojados para el rubro de la resistencia son satisfactorios, donde resalta la cercanía de esta propiedad mecánica con la del polietileno de alta densidad, situación que se ejemplifica en la figura 41. En consecuencia la condición de esta matriz polimérica reciclada reforzada con aserrín de pino exhibe un comportamiento mecánico promisorio, no obstante, esta serie de resultados fomenta la continuación hacia el estudio de una mejor interacción entre el polímero y el refuerzo maderable bajo condiciones similares de manufactura.

## Deformación.

De forma similar se presenta una comparación entre los registros de la deformación en la probeta. Para el cálculo de la deformación, se emplea la ecuación recomendada por la norma en curso, la cual es:

$$\epsilon = \frac{6Dd}{L^2}$$

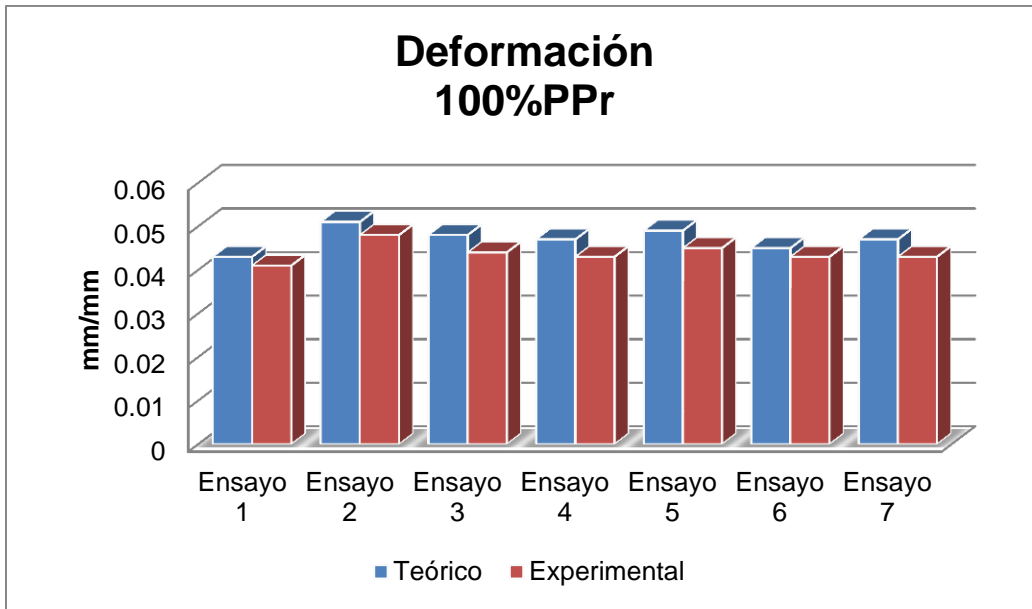
**Ecuación 6. Ecuación empleada para la determinación de la deformación en la probeta, según la norma ASTM D790.**

Donde la norma designa a:

- $\epsilon$ ; como la deformación que sufre la probeta, en mm/mm
- $D$ ; como la máxima deflexión en el centro de la probeta, en mm
- $L$ ; como la distancia existente entre los soportes que sostienen la probeta, en mm
- $d$ ; como el espesor de la probeta, en mm

**Tabla 18. Deformación teórica y experimental de la composición 100%PPr, para ensayo a flexión.**

Deformación teórica [mm/mm]	Deformación experimental [mm/mm]	Error relativo [%]
0.043	0.041	4.651
0.051	0.048	5.882
0.048	0.044	8.333
0.049	0.043	8.511
0.049	0.045	8.163
0.045	0.043	4.444
0.047	0.043	8.511



**Figura 42. Comparativo entre resultados obtenidos de la deformación teórica y experimental. Composición 100%PPr**

En la figura 42 se aprecia una variación promedio del 7% entre los resultados teóricos y experimentales en la composición 100%PPr, resaltando que en todos los casos analizados la deformación experimental alcanzada por la probeta fue menor que la que se predijo mediante la ecuación.

**Tabla 19. Deformación teórica y experimental del material compuesto, para ensayo a flexión.**

Deformación teórica [mm/mm]	Deformación experimental [mm/mm]	Error relativo [%]
0.045	0.044	2.222
0.046	0.045	2.174
0.045	0.042	6.667
0.041	0.039	4.878
0.044	0.043	2.273
0.042	0.040	4.762
0.041	0.039	4.878

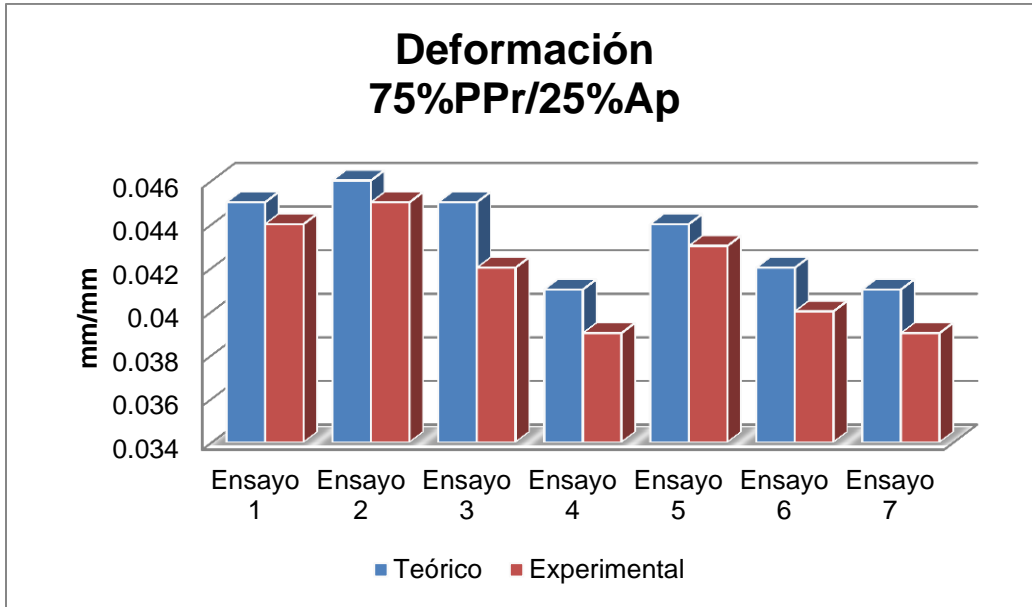


Figura 43. Comparativo entre los resultados obtenidos de la deformación teórica y experimental. Composición 100%PPr/25%Ap

Tendencias similares en lo que se refiere a la deformación de la probeta evidenciadas en la composición 100%PPr son observadas en la composición 75%PPr/25%Ap con una variación promedio del 4% entre resultados teóricos y experimentales. Tomando como referencia la figura 43 y refiriendo la tabla 14 se aprecia que las fibras de aserrín cumplen su cometido con la conjunción del polímero reciclado, esto es, revisando los rubros de deformación y módulo a flexión, este último próximo a analizar, se aprecia un incremento en la rigidez del material compuesto, lo cual refleja como resultado una menor deformación del material ante una sollicitación, situación que es apreciada en los gráficos expuestos.

### Módulo a flexión.

La ecuación empleada en la obtención de los resultados teóricos es también tomada de la norma en uso, siendo la siguiente:

$$E = \frac{mL^3}{4bd^3}$$

Ecuación 7. Ecuación empleada para la determinación del módulo a flexión en la probeta, según la norma ASTM D790.

Donde la norma designa a:

- $E$ ; como el módulo a flexión de la probeta, en MPa
- $L$ ; como la distancia existente entre los soportes que sostienen la probeta, en mm

- ***b***; como el ancho de la probeta, en mm
- ***d***; como el espesor de la probeta, en mm
- ***m***; como la pendiente de la curva carga-desplazamiento, en N/mm

Por otro, resultados experimentales del módulo a flexión se obtienen mediante el cociente entre el esfuerzo y la deformación, donde ambas propiedades también son obtenidas experimentalmente, en consecuencia:

$$E = \frac{\sigma}{\epsilon}$$

**Ecuación 8. Ecuación empleada para la obtención de los resultados experimentales del módulo a flexión.**

Donde las variables involucradas son:

- ***E***; es el módulo a flexión experimental de la probeta, en MPa
- **$\sigma$** ; es el esfuerzo experimental que sufre la probeta, MPa
- **$\epsilon$** ; es la deformación experimental que sufre la probeta, en mm/mm

**Tabla 20. Módulo a flexión teórico y experimental de la composición 100%PPr**

Módulo a Flexión Teórico [MPa]	Módulo a Flexión Experimental [MPa]	Error relativo [%]
657.298	766.780	16.656
544.333	623.625	14.567
543.236	690.455	27.094
556.020	701.093	26.091
510.675	653.778	28.022
608.114	707.395	16.326
551.607	698.000	26.539

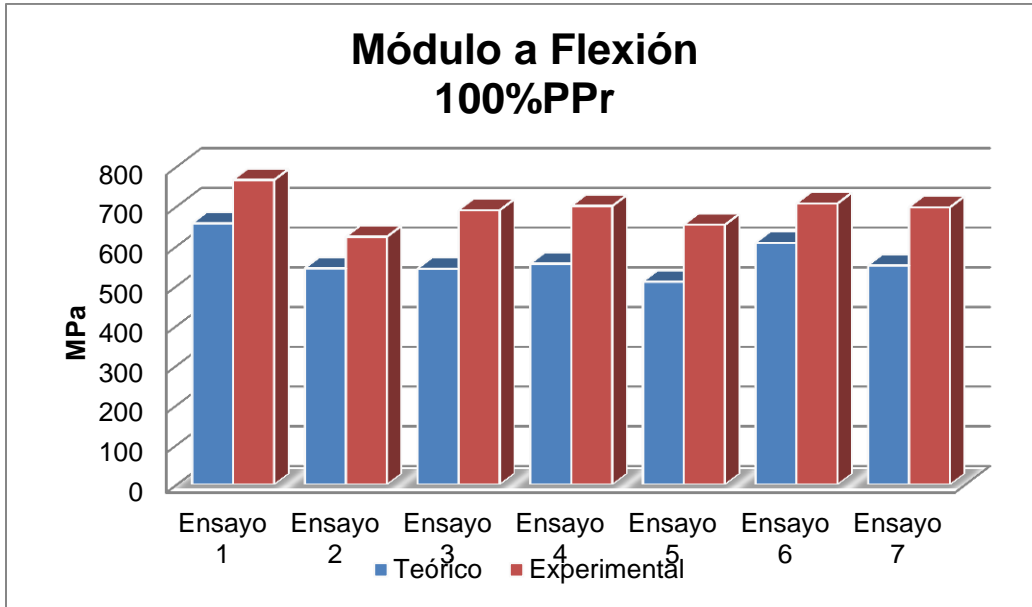
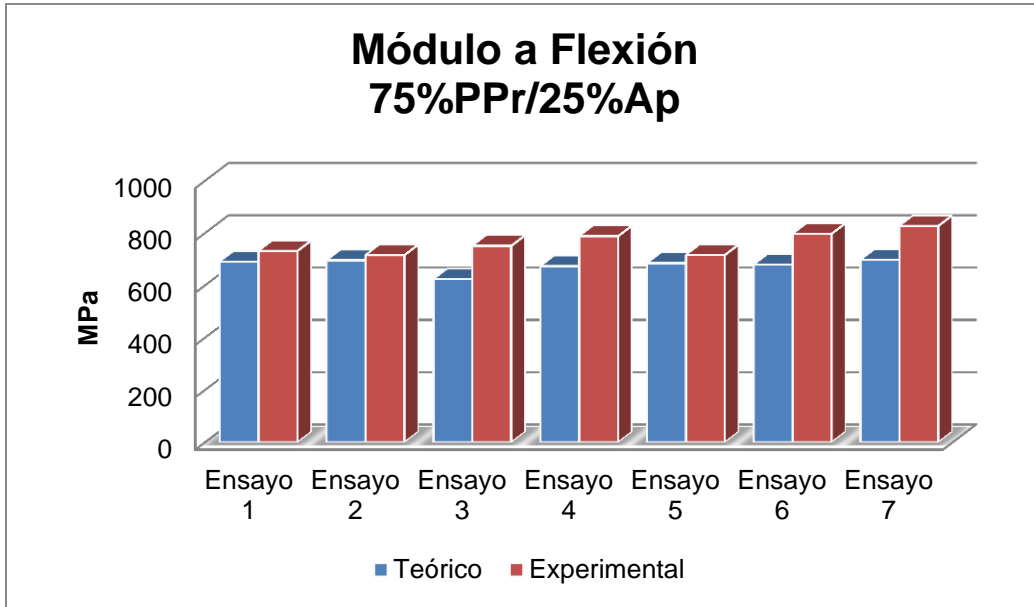


Figura 44. Comparativo de los resultados obtenidos en el módulo a flexión teórico y experimental. Composición 100%PPr

Tabla 21. Módulo a flexión teórico y experimental de la composición 75%PPr/25%Ap

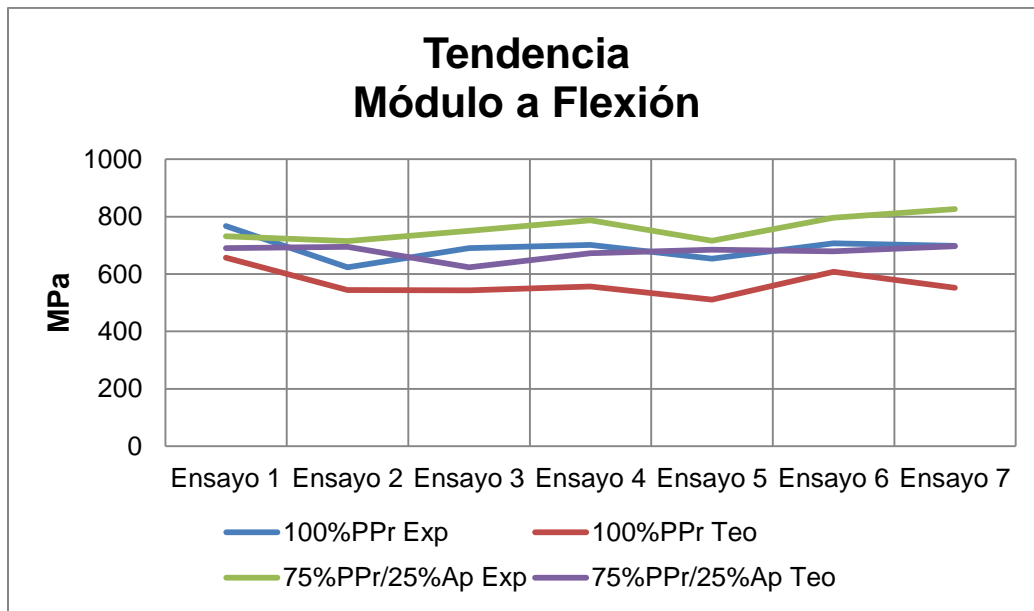
Módulo a Flexión Teórico [MPa]	Módulo a Flexión Experimental [MPa]	Error relativo [%]
690.026	731.091	5.951
695.159	714.844	2.832
623.249	750.571	20.429
672.846	787.615	17.057
684.599	715.488	4.512
678.892	796.375	17.305
696.876	826.641	18.621



**Figura 45. Comparativo de los resultados obtenidos en el módulo a flexión teórico y experimental. Composición 75%PPr/25%Ap**

Realizando una comparación entre las figuras 42 y 43, referentes a la deformación y las figuras 44 y 45, correspondientes al módulo a flexión, es notorio el incremento en la rigidez que proporciona el refuerzo maderable en la matriz polimérica. Este comportamiento queda más claramente ejemplificado mediante la observación de las figuras 43 y 45 ya que son estas últimas las que hacen referencia a la deformación y módulo a flexión, correspondientemente y que suelen ir de la mano debido a la relación que tiene una con otra.





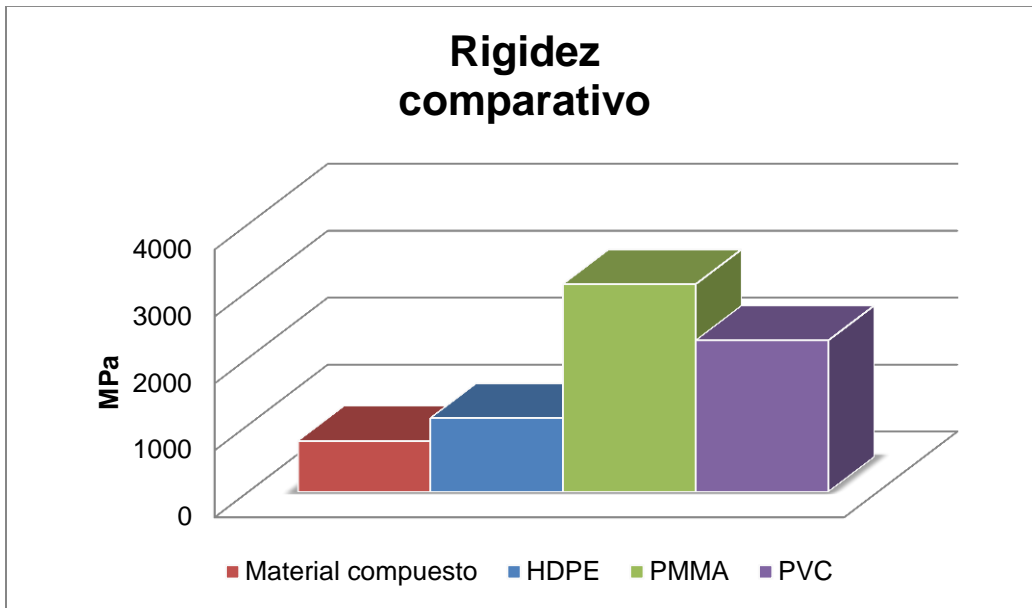
**Figura 46. Tendencia del comportamiento teórico y experimental en el módulo a flexión para el material compuesto y la matriz polimérica sin reforzar.**

Un escrutinio realizado al incremento de la rigidez en ambas composiciones ensayadas tanto teóricamente como experimentalmente, permite exhibir cualidades interesantes de este material compuesto de características biodegradables. Este comportamiento por parte del compuesto con respecto a la matriz polimérica reciclada en composición al 100% se aprecia en la figura 46, donde cabe destacar la relación existente entre los resultados teóricos y experimentales para la composición 75%PPr/25%Ap, donde el error relativo promedio es del 12.387% para los resultados teóricos y experimentales, donde con base en este porcentaje se presume tal y como se realizó con el esfuerzo máximo una buena interacción entre las materias primas a pesar de las condiciones de manufactura del material compuesto, con lo cual se tiene un primer acercamiento del comportamiento mecánico de este compuesto biodegradable. El incremento en la rigidez por parte de la composición 75%PPr/25%Ap es consistente con un 9.946% respecto a la composición 100%PPr. Este incremento es un indicador favorable de que este material compuesto puede tener aplicaciones funcionales.

Ahora bien, comparando el módulo a flexión obtenido en el material compuesto con los correspondientes que poseen los polímeros empleados para dicho propósito, se plasma la siguiente información.

**Tabla 22. Valores típicos en el módulo a flexión en materiales poliméricos empleados comúnmente en invernaderos comparado con el valor obtenido de la misma propiedad mecánica en el material compuesto.**

<b>Módulo a Flexión [MPa]</b>			
<b>Material compuesto</b>	<b>HDPE</b>	<b>PMMA</b>	<b>PVC</b>
760.375	1100	3100	2260



**Figura 47. Comparativo entre el módulo a flexión de polímeros empleados en invernaderos y el material compuesto analizado.**

El conjunto de la tabla 22 y la figura 47 permiten posicionar a la rigidez de la composición 75%PPr/25%Ap en el último puesto muy por debajo del polietileno de alta densidad siendo este último el polímero que le antecede en cuanto a rigidez se refiere. Una rigidez aproximada de 760 MPa en el material compuesto llama a prestar especial atención en esta propiedad mecánica ya que a pesar del incremento que la fibra orgánica proporciona en la matriz polimérica, la rigidez aún está muy por debajo de los patrones comparativos, situación que no es del todo favorable si se pretende emplear este material como elemento estructural, razón por la cual se motiva a continuar esta investigación empleando diferentes tipos de refuerzos ya que éstos son los que dictan el incremento que tendrán las propiedades mecánicas del material compuesto.

### **Costos.**

Este apartado muestra un comparativo entre los costos involucrados en la fabricación de una probeta de impacto, debido a que el volumen de ésta es igual a  $10.322 \times 10^{-6} \text{ m}^3$ , siendo mayor que el volumen representativo de  $5.161 \times 10^{-6} \text{ m}^3$  de

la probeta de flexión, consecuentemente generando un mayor consumo de materia prima. Durante este análisis no se toman en cuenta procesos de manufactura y/o mano de obra, en consecuencia, sólo se analiza el costo de las materias primas involucradas en la elaboración de una probeta, debido a la naturaleza inicial en que se encuentra esta investigación.

Para cumplir tales efectos, a continuación se presenta un desarrollo de ecuaciones que permiten la obtención de la masa representativa de la matriz polimérica y de la fibra.

Sean definidas las siguientes ecuaciones:

$$V_m + V_f = V_T \dots (a)$$

$$m_m + m_f = m_T \dots (b)$$

$$\rho = \frac{m}{V} \dots (c)$$

Donde la ecuación (a) representa el volumen total de la probeta, la ecuación (b) es a su vez la masa total de la probeta y la ecuación (c) define a la densidad. Los subíndices  $m$ ,  $f$  y  $T$  empleados en (a) y (b) son definidos como matriz, fibra y total, respectivamente.

Haciendo uso de (c) en (a) y despejando  $m_f$  de (b) se obtiene lo siguiente:

$$\frac{m_m}{\rho_m} + \frac{m_f}{\rho_f} = V_T \dots (d)$$

$$m_m = m_T - m_f \dots (e)$$

Sustituyendo (e) en (d), se tiene:

$$\frac{m_T - m_f}{\rho_m} + \frac{m_f}{\rho_f} = V_T \dots (f)$$

Despejando  $m_f$  se obtiene la ecuación 9.

$$m_f = \frac{1}{\rho_m - \rho_f} \left[ \rho_m \rho_f \left( V_T - \frac{m_T}{\rho_m} \right) \right]$$

**Ecuación 9. Ecuación que permite obtener el valor de la porción del aserrín en la probeta.**

Las ecuaciones (e) y 9 permiten obtener las porciones de masa de polímero y aserrín, respectivamente, presentes en la probeta. Para determinar los

correspondientes valores, la tabla 23 contiene los valores de las variables a utilizar.

**Tabla 23. Conjunto de variables involucradas en el comparativo de costos en la fabricación de una probeta de impacto de material compuesto y otra elaborada con polímeros vírgenes.**

$V_T$	$10.323 \times 10^{-6} \text{ m}^3$
$m_T$	$8.165 \times 10^{-3} \text{ Kg}$
$^3\rho_f$	$550 \text{ Kg/m}^3$
$^4\rho_m$	$880 \text{ Kg/m}^3$
$\rho_{HDPE}$	$990 \text{ Kg/m}^3$
$\rho_{PVC}$	$1352 \text{ Kg/m}^3$
$^550 \text{ Kg de aserrín}$	20.00 pesos
$^6PPr$	4.56 pesos/Kg
HDPE	11.15 pesos/Kg
PVC	5.91 pesos/Kg

Sustituyendo los valores pertinentes de la tabla 23 en las ecuaciones (e) y 9 se obtienen los siguientes resultados:

$$m_f = 1.531 \times 10^{-3} \text{ Kg}$$

$$m_m = 6.634 \times 10^{-3} \text{ Kg}$$

De donde obteniendo los precios para cada materia prima se tiene lo siguiente:

$$\text{Porción de madera } 612.4 \times 10^{-6} \text{ pesos}$$

$$\text{Porción de polímero } 30.251 \times 10^{-3} \text{ pesos}$$

Finalmente obteniendo el precio final de fabricación de la probeta de material compuesto en centavos:

$$\text{Fabricación de 1 probeta de material compuesto igual a 3.086 centavos}$$

De igual manera se procede a obtener el precio de fabricación de una probeta de impacto con material polimérico virgen, para tales efectos se emplea el volumen

<sup>3</sup> La densidad de la fibra de madera fue tomada de la especie Pino real (*Pinus pseudostrobus Lindl*). Esta información es recopilada del tomo número 2 de las Fichas Técnicas sobre Características Tecnológicas y Usos de Maderas Comercializadas en México, SEMARNAT, Marzo del 2011

<sup>4</sup> Las densidades de los polímeros (polipropileno, polietileno de alta densidad y poli cloruro de vinilo) son tomadas del sitio electrónico MATWEB.com y del Polimer Data Handbook by Oxford University Press Inc, 1999 Editado por James E. Mark

<sup>5</sup> Cotización realizada en el sitio electrónico [www.madererialosencinos.com.mx](http://www.madererialosencinos.com.mx)

<sup>6</sup> Precios de venta de polímeros obtenidos del sitio electrónico [www.recimex.com.mx/blog/?p=153](http://www.recimex.com.mx/blog/?p=153)

total de la probeta, las respectivas densidades de los polímeros así como los precios de venta de los mismos, reportando lo siguiente:

$$V_T \rho_{HDPE} = 10.219 \times 10^{-3} \text{Kg} \dots (I)$$

$$V_T \rho_{PVC} = 13.956 \times 10^{-3} \text{Kg} \dots (II)$$

De (I) y (II), multiplicándolas ambas por sus respectivos precios de venta y obteniendo valores en centavos se presentan los siguientes resultados:

*Fabricación de 1 probeta de HDPE virgen igual a 11.395 centavos*

*Fabricación de 1 probeta de PVC virgen igual a 8.248 centavos*

Resumiendo, la tabla 24 presenta un comparativo de los costos de fabricación de una probeta de impacto con diferentes materias primas.

**Tabla 24. Comparativo entre costos de fabricación de una probeta de impacto a razón de diferentes materias primas.**

Material compuesto	3.086 centavos
Polietileno de alta densidad	11.395 centavos
Poli cloruro de vinilo	8.248 centavos

Notoriamente resalta el bajo costo de la fabricación de una probeta de impacto a partir de materias primas recicladas. Aunque cabe recordar que para esta fase inicial de la investigación solamente se están contemplando los costos de la materia prima, así como objeto de análisis de costos a una probeta de impacto. En consecuencia, se han obtenido resultados útiles ya que éstos también son un serio indicador ante la continuidad de esta investigación.

### **Estudio de caso.**

El siguiente estudio de caso pretende dotar de un apartado introductorio a la comparación del comportamiento mecánico, en específico la resistencia a tensión que sufre una matriz termoplástica reforzada por *partículas* de madera y *fibras* de madera.

Si bien el desarrollo de esta investigación contempla una matriz termoplástica reforzada mediante partículas maderables, se puede pensar afirmativamente que un refuerzo maderable que involucre fibras ofrezca una material compuesto de mejores prestaciones mecánicas, razón por la cual se presenta un comparativo entre los valores de resistencia a tensión.

La literatura reporta y es coincidente en la dificultad que se tiene al tratar de construir algún modelo matemático que defina la resistencia del material compuesto cuando éste es conformado por una matriz termoplástica reforzada mediante fibras de madera. Algunas circunstancias que dificultan la consolidación de un modelo son citadas a continuación: [36]

- La constante de orientación de las fibras tiene especial dificultad en ser definida para el proceso de moldeo por inyección.
- La frontera que forma el refuerzo y la matriz es difícil de definir debido a la topografía irregular de la fibra.
- El ancho en los extremos de la fibra suele tener una distribución irregular dificultando la obtención de la longitud crítica de la fibra.
- La resistencia que aporta el refuerzo (fibra) depende de factores como la especie del árbol y la edad del mismo.

Sin embargo, la resistencia de una material compuesto de matriz termoplástica puede ser estimada mediante la siguiente ecuación [36]:

$$\sigma_c = V_m \sigma_m + V_f \sigma_f K_1 K_2$$

**Ecuación 10. Ecuación que permite estimar la resistencia a tensión de un material compuesto de matriz termoplástica y refuerzo maderable.**

Donde las variables se definen como:

- $\sigma_c$ ; es la resistencia a tensión del compuesto
- $\sigma_f$ ; es la resistencia a tensión de la fibra
- $\sigma_m$ ; es la resistencia a tensión de la matriz
- $V_f$ ; es la fracción volumétrica de la fibra
- $V_m$ ; es la fracción volumétrica de la matriz
- $K_1$ ; es la constante de orientación de la fibra
- $K_2$ ; es la constante que es dependiente entre la adhesión de la fibra y la matriz

Los valores que toma la constante  $K_1$  dependen de la orientación que tengan las fibras. En fibras unidireccionales la constante es igual con 1, en tanto que si las fibras se encuentran en tres direcciones la constante toma el valor de 1/5. Por otro lado, la constante  $K_2$  muestra dependencia entre la adhesión de la matriz y la fibra, así como la longitud de ésta.

En lo que concierne a este caso de estudio la constante  $K_2$  queda definida como:

$$K_2 = \frac{l}{2l_c}$$

Donde  $l$  es la longitud de la fibra y  $l_c$  es la longitud crítica de la fibra.

Teniendo conocimiento de la ecuación 10 y con base en los datos de la tabla 25 se procede a calcular los valores de tensión que tiene una matriz termoplástica reforzada mediante fibras de madera. Las consideraciones son las mismas que las que se emplearon en esta investigación en cuanto a proporciones volumétricas de materia prima.

**Tabla 25. Valores de resistencia a tensión para polímeros vírgenes seleccionados, madera y longitud de la fibra de madera.**

<sup>7</sup> Resistencia a tensión PP	32.2 MPa
Resistencia a tensión HDPE	43.0 MPa
Resistencia a tensión PMMA	70.3 MPa
Resistencia a tensión PVC	44.9 MPa
<sup>8</sup> Resistencia a tensión madera	51 MPa
<sup>9</sup> Longitud de fibra	1.72 mm

Para efectuar dicho cálculo se considera que la orientación de las fibras es aleatoria, en consecuencia la constante  $K_1$  es igual a 0.2 y que la longitud de la fibra es igual a la longitud crítica de la misma, con lo cual  $K_2$  es igual a 0.5, teniendo estos datos se procede a realizar las sustituciones pertinentes en la ecuación 10 para obtener los siguientes resultados:

**Tabla 26. Resultados de resistencias a tensión para diferentes matrices termoplásticas vírgenes.**

PP $\sigma_c$	25.425 MPa
HDPE $\sigma_c$	33.525 MPa
PVC $\sigma_c$	41.325 MPa
PMMA $\sigma_c$	54 MPa

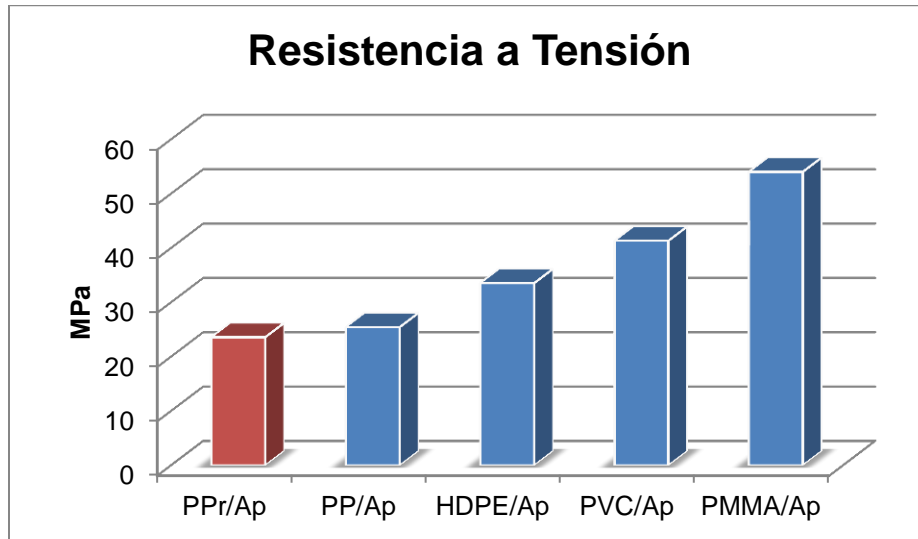
La tabla 26 resume las resistencias a tensión de diferentes matrices termoplásticas reforzadas mediante fibras de madera. Cabe hacer notar que los valores de los polímeros empleados en la ecuación 10 no presentan proceso de reciclado alguno. Estos resultados son comparados con un registro obtenido en

<sup>7</sup> Información obtenida a partir de sitio electrónico MATWEB.com

<sup>8</sup> La resistencia reportada de la madera es a compresión pero se considera similar su valor a tensión. Se trata de la especie Pino real (*Pinus pseudostrobus Lindl*). Esta información es recopilada del tomo número 2 de las Fichas Técnicas sobre Características Tecnológicas y Usos de Maderas Comercializadas en México, SEMARNAT, Marzo del 2011

<sup>9</sup> Ver referencia [39]

estudios previamente realizados y en los cuales se obtuvo un valor de 23.56 MPa en el esfuerzo último a tensión para condiciones similares de fabricación. [39]



**Figura 48. Comparativo de la resistencia a tracción de un material compuesto. Se emplean diferentes matrices termoplásticas sin reciclar, las cuales son comparadas con una matriz de polipropileno reciclada. En cualquiera de los casos se reforzó con fibras de madera.**

Hasta el momento en lo que corresponde a este apartado se han obtenido algunas estimaciones respecto al valor de la resistencia a tensión para un material compuesto usando diferentes matrices poliméricas sin reciclar, donde éstas son comparadas con resultados obtenidos por experimentación en una composición reciclada de carácter similar [39]. Es así que la figura 48 ofrece este primer acercamiento en cuanto a prestaciones mecánicas se refiere, como se puede apreciar la matriz polimérica reciclada ofrece prestaciones relativamente cercanas al polipropileno no reciclado y al polietileno de alta densidad. Hay que tomar en cuenta que los valores obtenidos por la ecuación 10 deberán ser corroborados por ensayos mecánicos para tener una mayor veracidad en los resultados obtenidos.



## **Reflexión final.**

Este capítulo presentó la comparación de los resultados obtenidos para los ensayos mecánicos de impacto y flexión para un material compuesto de una única composición, 75%PPr y 25%Ap y una muestra patrón al 100%PPr, así como la comparación del material compuesto con polímeros comúnmente empleados en invernaderos. Por otra parte se dio a conocer el costo de fabricación de una probeta de impacto para cuando ésta contempla el uso de materiales reciclados y también cuando se le fabrica completamente con polímeros vírgenes, donde es notoria la reducción de costos cuando se emplean materias primas recicladas. La finalización de este capítulo queda dada por un apartado introductorio que permite comparar las estimaciones teóricas de la resistencia a tensión de un material compuesto que emplea diferentes matrices termoplásticas sin proceso de reciclaje, con resultados obtenidos de ensayos de una matriz de polipropileno reciclado, mostrando el posicionamiento que tienen estas diferentes variedades en cuanto a prestaciones mecánicas se refiere.

## Capítulo VI. Conclusiones.

---

---

Se ha presentado una investigación referida a la caracterización de un material compuesto, desarrollado a partir de la mezcla de materiales de reuso como lo son el aserrín de pino y el polipropileno reciclado, materiales ampliamente empleados en la industria mexicana. Este material compuesto contempla el uso de una matriz polimérica y un refuerzo orgánico sin el empleo de ningún tipo de agente adhesivo o aditivo, debido a que se pretende conocer los límites mecánicos que puede ofrecer este compuesto bajo dicho procesamiento. Con base en lo anterior, esta investigación pretende explotar, en la mayor medida posible, las propiedades mecánicas que puede ofrecer este material compuesto y así proporcionar una alternativa ecológica en la fabricación de esta clase de materiales compuestos.

Haciendo uso de los ensayos mecánicos de flexión e impacto, fueron simuladas condiciones de carga en las que se puede ver sometido un componente de invernadero en un ambiente urbano. Los resultados arrojados por estas pruebas mecánicas permiten formular las siguientes conclusiones:

- Se ha reportado un incremento en la tenacidad del material compuesto (composición 75%PPr/25%Ap) en un 13% respecto a la composición 100%PPr. Sin embargo, al comparar la tenacidad promedio de la composición 75%PPr/25%Ap, la cual posee un valor de  $15 \text{ kJ/m}^2$  y donde es confrontada con la que ofrecen polímeros empleados en invernaderos urbanos como HDPE, PMMA y PVC, con valores de 27.9, 18 y  $20 \text{ kJ/m}^2$ , respectivamente. Se obtiene que el valor de la tenacidad del material compuesto es sensiblemente menor respecto a la de los polímeros con los que se le compara. Sin embargo, si se valora el material estudiado, en término de costo-beneficio, sus opciones de aplicación pueden resultar atractivas.
- El análisis realizado por microscopía óptica permitió observar la interacción entre las partículas de aserrín y la matriz polimérica, donde no se destacan regiones de fisuras o separaciones entre los componentes, con lo cual se valora el hecho de que, a pesar de que no se están empleando agentes adhesivos o aditivos que promuevan una mejor interacción entre el refuerzo y la matriz polimérica, el resultado parece ser adecuado en términos de adherencia. Sin embargo, las partículas de aserrín presentan inconsistencias geométricas, lo cual puede deberse principalmente a aglomeraciones de partículas durante el proceso de inyección del material compuesto, con lo que se considera que se pueden originar regiones de

inconsistencia en cuanto a distribución de cargas comprometiendo quizá las prestaciones mecánicas del compuesto de no ser controlada esta situación.

- Se considera la discusión y revisión en la selección del punto de inyección en el molde de probetas para impacto a razón de que éstas mejoren su condición de manufactura obteniendo especímenes libres de alojamientos de aire que puedan afectar los resultados finales.
- Asimismo, se obtuvieron incrementos del 5% en el esfuerzo máximo y del 10% en el módulo a flexión en el material compuesto respecto al patrón comparativo de 100%PPr. Se comparó el esfuerzo máximo promedio de 32 MPa del material compuesto, con el que ofrecen los polímeros HDPE, PMMA y PVC y se constató que el esfuerzo máximo exhibido por el material compuesto supera ligeramente el valor promedio de 28 MPa del HDPE, pero donde éste queda por debajo de los registros promedios de 103 y 79 MPa para el PMMA y PVC, respectivamente, que, sin embargo ostentan costos mayores. Por otro lado y cuando se es realizado un análisis semejante con respecto al módulo a flexión, el valor promedio obtenido en el compuesto de 760 MPa es notoriamente menor al que exhiben los polímeros patrón, donde éstos poseen valores referenciados en el rango de los miles de MPa, aunque debe analizarse estos resultados desde un punto de vista de costo-beneficio para tener una valoración más apropiada.
- Se analizó el costo de fabricación de una probeta de impacto donde no se contemplaron costos adicionales como mano de obra o procesos de manufactura. El resultado obtenido es de relevancia ya que éste refleja la amortización de la fabricación de la probeta cuando se emplean materias primas recicladas, obteniendo un precio de 3 centavos por probeta. En contraparte cuando se emplean polímeros vírgenes, los costos se incrementan en casi tres veces al precio equivalente obtenido en el material compuesto.
- Por otro lado, se ha realizado una discusión en cuanto a la resistencia a tensión que puede ofrecer el uso de diferentes matrices termoplásticas vírgenes reforzadas mediante fibras de madera de pino y donde los resultados obtenidos fueron comparados con valores afines conseguidos a partir de una matriz de polipropileno reciclada reforzada con partículas de madera de pino [39].
- Resultados referentes al punto previamente descrito muestran que la resistencia a tensión es notoriamente superior cuando se emplean matrices poliméricas vírgenes y fibras de madera como refuerzo respecto a una matriz reciclada y un refuerzo de partículas. Si bien, este incremento es

lógico, debido a la naturaleza de las materias primas que se emplean en el compuesto, estos resultados permitieron tener una idea más clara del nivel de resistencia a tensión de una matriz de polipropileno reciclada y reforzada con partículas de pino. Asimismo, conviene resaltar como otro hecho, la dificultad de trabajar con fibras orgánicas de geometría regular y consistente, así como el problema de la obtención de las mismas y su interacción con matrices termoplásticas, tal y como se cita en [36], razón por la cual aún existe una gran tendencia a emplear partículas en vez de fibras en materiales compuestos de características similares. Así pues, esto abre como discusión el campo de aplicación que puede tener esta clase de materiales compuestos fabricados de materiales reciclados debido a las prestaciones mecánicas que pueden éstos ofrecer.

Las características del material compuesto, obtenido a partir de materias primas de origen reciclado, han mostrado hasta esta primera etapa de investigación y caracterización condiciones favorables para considerar la continuación de esta investigación. Sin embargo, ante los resultados obtenidos no se puede asegurar que este material tenga una aplicación estructural en el ramo de los invernaderos urbanos. No obstante, las aplicaciones que pueden encontrarse para esta clase de materiales compuestos puede ser diversa, aquellas donde las prestaciones mecánicas se puedan contemplar en un segundo plano en situaciones donde las sollicitaciones mecánicas a cumplir sean de menor nivel. Finalmente, este estudio pretende que este tipo de materiales compuestos denominados como materiales ecológicos proporcionen una alternativa ante los compuestos reforzados a partir de fibras sintéticas y que emplean polímeros vírgenes, de mayor costo. Así pues, la importancia de manufacturar productos reciclados como lo son los formados por polímeros reciclados y residuos del procesamiento de la madera permiten ofrecer un sistema eficiente en el reuso de materias primas, impactando así en la preservación ecológica del planeta.

## Referencias.

- [1] Jean-Claude Charment (2008). **Mécanique du Solide et des Matériaux: Élasticité-Plasticité-Rupture**. ESPCI-Laboratoire d'Hydrodynamique et Mécanique Physique.
- [2] Université de Limoges (2012). **Les Matériaux**. École Nationale Supérieure de Céramique Industrielle.
- [3] Marc Blétry (2006-2007). **Méthodes de Caractérisation Mécanique des Matériaux**.
- [4] Grupo FIAT. Carrocería. Reparación de la carrocería y preparación-embellecimiento de superficies. **Propiedades de los materiales**.
- [5] Raymond Chang, Williams College. Novena edición (2007). **Química**, Editorial McGraw-Hill.
- [6] J. C. Anderson, K. D. Leaver, R. D. Rawlings, J. M. Alexander. Segunda edición (1998). **Ciencia de los Materiales**. Editorial Limusa.
- [7] Nicolás Castilla Prados (2005). **Invernaderos de Plástico. Tecnología y Manejo**. Ediciones Mundi-Prensa.
- [8] Daniel Barraeta Sotelo, José Luis Ledesma Flores (2011). **Diseño de un Troquel para Hendido, Punzonado y un Sistema Doblador para Perfiles Cuadrados**. Tesis de Licenciatura. Universidad Autónoma Chapingo. Departamento de Ingeniería Mecánica Agrícola. Chapingo Estado de México.
- [9] MDR. Raúl Dennis Rivera. **La Tecnología de Invernadero en el Valle del Yaqui. Una Alternativa para el Desarrollo Regional**. Octavo Congreso Nacional y Cuarto Congreso Internacional de la Red de Investigación y Docencia sobre Innovación Tecnológica. Culiacán Rosales, Sinaloa México, del 17 al 20 de Abril, 2007.
- [10] Asociación Mexicana de Constructores de Invernaderos, S. C. **Norma Mexicana para el Diseño y Construcción de Invernaderos (NMX-E-255-CNCP-2008)**.
- [11] Fundación Produce, Sinaloa A. C. Enlace, Innovación y Progreso (2006). **Producción de Hortalizas Bajo Invernadero**.
- [12] Lawrence E. Doyle. Tercera edición (1988). **Materiales y Procesos de Manufactura para Ingenieros**. Editorial Prentice-Hall Hispanoamericana, S. A.
- [13] Antonio Miravete. Primera edición (2000). **Materiales Compuestos, tomos I y II**. Editado por Antonio Miravete.
- [14] Norman E. Dowling. Second edition (1999) **Mechanical Behavior of Materials. Engineering Methods for Deformation, Fracture and Fatigue**. Prentice Hall.
- [15] Pat L. Mangonon. Primera edición (2001). **Ciencia de Materiales. Selección y Diseño**. Editorial Pearson Educación.
- [16] David C. Jiles (2008). **Introduction to The Principles of Materials Evaluation**. CRC Press, Taylor and Francis Group.
- [17] Irving Rubin (2008). **Materiales Plásticos. Propiedades y Aplicaciones**. Editorial Limusa.
- [18] C. Chaussin (1967). **Manual de Plásticos**. Editorial Hispano Europea, Barcelona España.
- [19] Santiago Vignote Peña, Franciso Javier Jiménez Peris. Segunda edición (1996). **Tecnología de la Madera**. Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación.
- [20] SEMARNAT (Septiembre 2013). **Consideraciones Tecnológicas en la Protección de la Madera**.

- [21] Rebeca Bouza Padín (Junio 2008). **Diseño y Caracterización de Nuevos Materiales Compuestos Polipropileno y Madera: Estudio de Viniltrimetoxisilano como Agente de Acoplamiento**. Tesis doctoral. Universidad de A Coruña.
- [22] Dr. Alejandro Manzano Martínez (Octubre 2013). **Materiales compuestos, los materiales del Siglo XXI**.
- [23] [www.instron.com.es/wa/glossary/Flexure-Test.aspx](http://www.instron.com.es/wa/glossary/Flexure-Test.aspx)
- [24] [www.instron.com.es/wa/glossary/Impact-Test.aspx](http://www.instron.com.es/wa/glossary/Impact-Test.aspx)
- [25] G. Cailletaud (Mars 2012). **Mécanique des Matériaux Solides**, Mines Paris Tech.
- [26] Imen Kallel-Karmoun (Juin 1999). **Analyse Mécanique de l'Essai de Flexion par Flambement Post-Critique**. Thèse de doctorat. L'École de Lyon.
- [27] <http://www.matweb.com/search/DataSheet.aspx?MatGUID=08fb0f47ef7e454fbf7092517b2264b2&ckck=1>
- [28] González Sosa, J. V., Barba Pingarrón, A. y Flores Aguilar, E (2012). **Análisis Microscópico para un Material Compuesto de Productos Reciclados**. Científica, vol. 16 (núm. 2), pp. 83-90
- [29] González Sosa, J. V. y Barba Pingarrón, A (2008). **Desarrollo de un material compuesto plástico (PP)-madera (aserrín) usando materias primas de reuso**. Memorias del 14 Congreso Internacional Anual de la SOMIM, pp. 891-899
- [30] PEMEX, Petroquímica (2012). **Presente Futuro de la Industria del Plástico en México**.
- [31] PLASTIMAGEN (2013). **18 Exposición Internacional de la Industria del Plástico**. México.
- [32] Ing. Agr. Jaime Rojas Razo (Enero 2014). **Los Pinos Mexicanos**.
- [33] Rafael Capuz Lladro (Marzo 1997). **Materiales Orgánicos. Madera**. Departamento de Construcciones Arquitectónicas, Universidad Politécnica de Valencia.
- [34] Document Produit Pour Le Syndicat Des Producteurs En Serre Du Québec (Le 31 Mai 2013). **La Serriculture Sur Les Toits En Milieu Urbain. Perspectives De Développement Dans Le Contexte Québécois**.
- [35] Solís Jara, M. y Lisperguer Muñoz, J. (2002). **Compuestos Mixtos a Base de Plásticos y Madera. Wood-Polymer Composites**, Theoria, Vol. 11, pp. 35-40
- [36] Caroline Baillie. First edition (2004). **Green Composites. Polymer Composites and the Environment**. Woodhead Publishing Limited, Cambridge England.
- [37] Williams F. Smith y Javad Hashemi. Cuarta edición (2006). **Fundamentos de la Ciencia e Ingeniería de Materiales**. McGraw Hill.
- [38] Frank Kreith y Mark S. Bohn. Sexta edición (2001). **Principios de Transferencia de Calor**. Editorial Thomson Learning.
- [39] González Sosa Jesús Vicente (2013). **Desarrollo de un Material Compuesto a través del Análisis Funcional para Aplicaciones en Ingeniería**. Tesis de doctorado, Universidad Nacional Autónoma de México.
- [40] [www.jardineriaon.com/control-de-clima-en-los-invernaderos.html](http://www.jardineriaon.com/control-de-clima-en-los-invernaderos.html)
- [41] [www.foroarchivos.infojardin.com/foro-hortalizas/infojardin/foroarchivos/foro-hortalizas/167397-cultivos-invernaderos.html](http://www.foroarchivos.infojardin.com/foro-hortalizas/infojardin/foroarchivos/foro-hortalizas/167397-cultivos-invernaderos.html)
- [42] [www.pslc.ws/macrog/pp.htm](http://www.pslc.ws/macrog/pp.htm)

[43] [www.hydroenv.com.mx/catalogo/index.php?main\\_page=page&id=44](http://www.hydroenv.com.mx/catalogo/index.php?main_page=page&id=44)

[44] [www.vinidex.com.au/technical/material-properties/pvc-properties/](http://www.vinidex.com.au/technical/material-properties/pvc-properties/)

[45] [www.lumetalplastic.com/pmma\\_prop.html](http://www.lumetalplastic.com/pmma_prop.html)

Moya Villablanca, C., Poblete Wilson, H. y Valenzuela Hurtado, H (2012). **Propiedades Físicas y Mecánicas de Compuestos de Polietileno Reciclado y Harinas de Corteza y Madera de Pinus Radiata Fabricados Mediante Moldeo por Inyección.** Maderas Ciencia y Tecnología, vol. 14 (núm. 1), pp. 13-29

Córdoba, C., Mera, J., Martínez, D. y Rodríguez, J (2010). **Aprovechamiento de Polipropileno y Polietileno de Alta Densidad Reciclados, Reforzados con Fibra Vegetal Tetera.** Revista Iberoamericana de Polímeros, vol. 11 (núm. 7), pp. 417-427

París Londoño, L. S. y González Villa, S. M (2009). **Caracterización de los Materiales Plásticos Reciclados Provenientes de la Industria Bananera Empleados para la Elaboración de Madera Plástica.** Suplemento de la Revista Latinoamericana de Materiales y Metalurgia (núm. 4), pp. 1453-1460

Echavarría, C., Jiménez, L. y Ochoa J (2012). **Bamboo-Reinforced Glulam Beams: An Alternative to Fiberglass- Reinforced Glulam Beams.** Dyna (núm. 174), pp. 24-30

Valea, A., Juanes, F. J., Miguez, J. C. y González, M. L. (2008). **Aleaciones de Polipropileno (PP) y Polietilentereftalato (PET) Reciclados y Estudio de sus Propiedades.** Anales de Mecánica de la Fractura, vol. 2 (núm. 25), pp. 478-452

Sanjuan Raygoza, R. J. y Jasso Gastinel C. F (2009). **Efecto de la Fibra de Agave de Desecho en el Reforzamiento de Polipropileno Virgen o Reciclado.** Revista Mexicana de Ingeniería Química, vol. 8 (núm. 3), pp. 319-327

Guajardo, A. B., Najjar, L. E., Prósperi, S. B. y Molina, M. G (2002). **Propiedades de los Plásticos Reciclados.** Facultad de Ciencias Aplicadas a la Industria, UNC. San Martín 358, 5600San Rafael, Mendoza.

Seong Chun, K., Husseinsyah, S and Nasihah Azizi F (2013). **Characterization and Properties of Recycled polypropylene/Coconut Shell Powder Composites: Effect of Sodium Dodecyl Sulfate Modification.** Polymer-Plastics Technology and Engineering (num. 52), pp. 287-294



## Standard Test Methods for Determining the Izod Pendulum Impact Resistance of Plastics<sup>1</sup>

This standard is issued under the fixed designation D 256; the number immediately following the designation indicates the year of original adoption or, in the case of revision, the year of last revision. A number in parentheses indicates the year of last reapproval. A superscript epsilon ( $\epsilon$ ) indicates an editorial change since the last revision or reapproval.

### 1. Scope

1.1 These test methods cover the determination of the resistance of plastics to "standardized" (see Note 1) pendulum-type hammers, mounted in "standardized" machines, in breaking standard specimens with one pendulum swing. The standard tests for these test methods require specimens made with a milled notch (see Note 2). In Test Methods A, C, and D, the notch produces a stress concentration that increases the probability of a brittle, rather than a ductile, fracture. In Test Method E, the impact resistance is obtained breakage by flexural shock as indicated by the energy extracted from by reversing the notched specimen 180° in the clamping vise. The results of all test methods are reported in terms of energy absorbed per unit of specimen width or per unit of cross-sectional area under the notch. (See Note 3.)

NOTE 1—The machines with their pendulum-type hammers have been "standardized" in that they must comply with certain requirements, including a fixed height of hammer fall that results in a substantially fixed velocity of the hammer at the moment of impact. However, hammers of different initial energies (produced by varying their effective weights) are recommended for use with specimens of different impact resistance. Moreover, manufacturers of the equipment are permitted to use different lengths and constructions of pendulums with possible differences in pendulum rigidities resulting. (See Section 5.) Be aware that other differences in machine design may exist. The specimens are "standardized" in that they are required to have one fixed length, one fixed depth, and one particular design of milled notch. The width of the specimens is permitted to vary between limits.

NOTE 2—The notch in the Izod specimen serves to concentrate the stress, minimize plastic deformation, and direct the fracture to the part of the specimen behind the notch. Scatter in energy-to-break is thus reduced. However, because of differences in the elastic and viscoelastic properties of plastics, response to a given notch varies among materials. A measure of a plastic's "notch sensitivity" may be obtained with Test Method D by comparing the energies to break specimens having different radii at the base of the notch.

NOTE 3—Caution must be exercised in interpreting the results of these standard test methods. The following testing parameters may affect test results significantly:

- Method of fabrication, including but not limited to processing technology, molding conditions, mold design, and thermal treatments;
- Method of notching;
- Speed of notching tool;
- Design of notching apparatus;
- Quality of the notch;
- Time between notching and test;
- Test specimen thickness,

- Test specimen width under notch, and
- Environmental conditioning.

1.2 The values stated in SI units are to be regarded as the standard. The values given in parentheses are for information only.

1.3 *This standard does not purport to address all of the safety concerns, if any, associated with its use. It is the responsibility of the user of this standard to establish appropriate safety and health practices and determine the applicability of regulatory limitations prior to use.*

NOTE 4—These test methods resemble ISO 180:1993 in regard to title only. The contents are significantly different.

### 2. Referenced Documents

#### 2.1 ASTM Standards:

- D 618 Practice for Conditioning Plastics and Electrical Insulating Materials for Testing<sup>2</sup>
  - D 883 Terminology Relating to Plastics<sup>2</sup>
  - D 3641 Practice for Injection Molding Test Specimens of Thermoplastics Molding Extrusion Materials<sup>3</sup>
  - D 4000 Classification System for Specifying Plastic Materials<sup>3</sup>
  - D 4066 Specification for Nylon Injection and Extrusion Materials<sup>3</sup>
  - D 4812 Test Methods for Unnotched Cantilever Beam Impact Strength of Plastics<sup>4</sup>
  - E 691 Practice for Conducting an Interlaboratory Test Program to Determine the Precision of Test Methods<sup>5</sup>
- #### 2.2 ISO Standard:
- ISO 180:1993 Plastics—Determination of Izod Impact Strength of Rigid Materials<sup>6</sup>

### 3. Terminology

3.1 *Definitions*— For definitions related to plastics see Terminology D 883.

#### 3.2 Descriptions of Terms Specific to This Standard:

3.2.1 *cantilever*—a projecting beam clamped at only one end.

3.2.2 *notch sensitivity*—a measure of the variation of impact energy as a function of notch radius.

<sup>1</sup> These test methods are under the jurisdiction of ASTM Committee D-20 on Plastics and are the direct responsibility of Subcommittee D20.10 on Mechanical Properties.

Current edition approved April 10, 1997. Published May 1998. Originally published as D 256 - 26T. Last previous edition D 256 - 93a.

<sup>2</sup> Annual Book of ASTM Standards, Vol 08.01.

<sup>3</sup> Annual Book of ASTM Standards, Vol 08.02.

<sup>4</sup> Annual Book of ASTM Standards, Vol 08.03.

<sup>5</sup> Annual Book of ASTM Standards, Vol 14.02.

<sup>6</sup> Available from American National Standards Institute, 11 W. 42nd St., 13th Floor, New York, NY 10036.



4. Types of Tests

4.1 Four similar methods are presented in these test methods. (See Note 5.) All test methods use the same testing machine and specimen dimensions. There is no known means for correlating the results from the different test methods.

NOTE 5—Test Method B for Charpy has been removed and is being revised under a new standard.

4.1.1 In Test Method A, the specimen is held as a vertical cantilever beam and is broken by a single swing of the pendulum. The line of initial contact is at a fixed distance from the specimen clamp and from the centerline of the notch and on the same face as the notch.

4.1.2 Test Method C is similar to Test Method A, except for the addition of a procedure for determining the energy expended in tossing a portion of the specimen. The value reported is called the "estimated net Izod impact resistance." Test Method C is preferred over Test Method A for materials that have an Izod impact resistance of less than 27 J/m (0.5 ft·lbf/in.) under notch. (See Appendix X5 for optional units.) The differences between Test Methods A and C become unimportant for materials that have an Izod impact resistance higher than this value.

4.1.3 Test Method D provides a measure of the notch sensitivity of a material. The stress-concentration at the notch increases with decreasing notch radius.

4.1.3.1 For a given system, greater stress concentration results in higher localized rates-of-strain. Since the effect of strain-rate on energy-to-break varies among materials, a measure of this effect may be obtained by testing specimens with different notch radii. In the Izod-type test it has been demonstrated that the function, energy-to-break versus notch radius, is reasonably linear from a radius of 0.03 to 2.5 mm (0.001 to 0.100 in.), provided that all specimens have the same type of break. (See 5.8 and 22.1.)

4.1.3.2 For the purpose of this test, the slope, *b* (see 22.1), of the line between radii of 0.25 and 1.0 mm (0.010 and 0.040 in.) is used, unless tests with the 1.0-mm radius give "non-break" results. In that case, 0.25 and 0.50-mm (0.010 and 0.020-in.) radii may be used. The effect of notch radius on the impact energy to break a specimen under the conditions of this test is measured by the value *b*. Materials with low values of *b*, whether high or low energy-to-break with the standard notch, are relatively insensitive to differences in notch radius; while the energy-to-break materials with high values of *b* is highly dependent on notch radius. The parameter *b* cannot be used in design calculations but may serve as a guide to the designer and in selection of materials.

4.4 Test Method E is similar to Test Method A, except that the specimen is reversed in the vise of the machine 180° to the usual striking position, such that the striker of the apparatus impacts the specimen on the face opposite the notch. (See Fig. 1.) Test Method E is used to give an indication of the unnotched impact resistance of plastics; however, results obtained by the reversed notch method may not always agree with those obtained on a completely

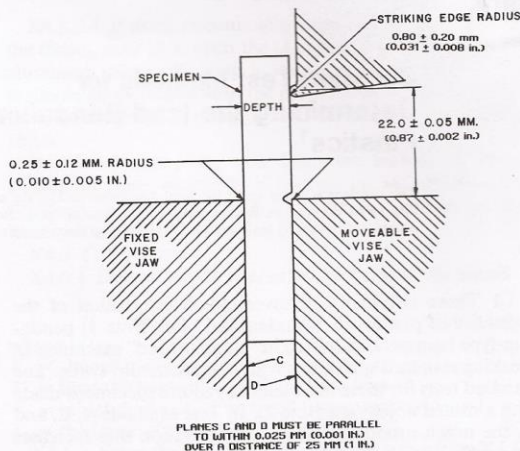


FIG. 1A Relationship of Vise, Specimen, and Striking Edge to Each Other for Izod Test Methods A and C

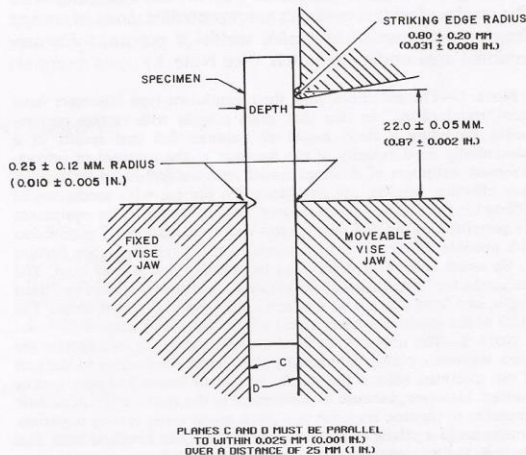


FIG. 1B Relationship of Vise, Specimen, and Striking Edge to Each Other for Test Method E

unnotched specimen. (See 28.1.)<sup>8</sup>

5. Significance and Use

5.1 Before proceeding with these test methods, reference should be made to the specification of the material being tested. Any test specimen preparation, conditioning, dimensions, and testing parameters covered in the materials specification shall take precedence over those mentioned in these test methods. If there is no material specification, then the default conditions apply.

<sup>7</sup> Supporting data giving results of the interlaboratory tests are available from ASTM Headquarters. Request RR: D20-1021.

<sup>8</sup> Supporting data giving results of the interlaboratory tests are available from ASTM Headquarters. Request RR: D20-1026.



5.2 The excess energy pendulum impact test indicates the energy to break standard test specimens of specified size under stipulated parameters of specimen mounting, notching, and pendulum velocity-at-impact.

5.3 The energy lost by the pendulum during the breakage of the specimen is the sum of the following:

- 5.3.1 Energy to initiate fracture of the specimen;
- 5.3.2 Energy to propagate the fracture across the specimen;
- 5.3.3 Energy to throw the free end (or ends) of the broken specimen ("toss correction");
- 5.3.4 Energy to bend the specimen;
- 5.3.5 Energy to produce vibration in the pendulum arm;
- 5.3.6 Energy to produce vibration or horizontal movement of the machine frame or base;
- 5.3.7 Energy to overcome friction in the pendulum bearing and in the excess energy indicating mechanism, and to overcome windage (pendulum air drag);
- 5.3.8 Energy to indent or deform plastically the specimen at the line of impact; and
- 5.3.9 Energy to overcome the friction caused by the rubbing of the striker (or other part of the pendulum) over the face of the bent specimen.

5.4 For relatively brittle materials, for which fracture propagation energy is small in comparison with the fracture initiation energy, the indicated impact energy absorbed is, for all practical purposes, the sum of factors 5.3.1 and 5.3.3. The toss correction (see 5.3.3) may represent a very large fraction of the total energy absorbed when testing relatively dense and brittle materials. Test Method C shall be used for materials that have an Izod impact resistance of less than 27 J/m (0.5 ft·lbf/in.). (See Appendix X5 for optional units.) The toss correction obtained in Test Method C is only an approximation of the toss error, since the rotational and rectilinear velocities may not be the same during the re-toss of the specimen as for the original toss, and because stored stresses in the specimen may have been released as kinetic energy during the specimen fracture.

5.5 For tough, ductile, fiber filled, or cloth-laminated materials, the fracture propagation energy (see 5.3.2) may be large compared to the fracture initiation energy (see 5.3.1). When testing these materials, factors (see 5.3.2, 5.3.5, and 5.3.9) can become quite significant, even when the specimen is accurately machined and positioned and the machine is in good condition with adequate capacity. (See Note 6.) Bending (see 5.3.4) and indentation losses (see 5.3.8) may be appreciable when testing soft materials.

NOTE 6—Although the frame and base of the machine should be sufficiently rigid and massive to handle the energies of tough specimens without motion or excessive vibration, the design must ensure that the center of percussion be at the center of strike. Locating the striker precisely at the center of percussion reduces vibration of the pendulum arm when used with brittle specimens. However, some losses due to pendulum arm vibration, the amount varying with the design of the pendulum, will occur with tough specimens, even when the striker is properly positioned.

5.6 In a well-designed machine of sufficient rigidity and mass, the losses due to factors 5.3.6 and 5.3.7 should be very small. Vibrational losses (see 5.3.6) can be quite large when wide specimens of tough materials are tested in machines of insufficient mass, not securely fastened to a heavy base.

5.7 With some materials, a critical width of specimen may

be found below which specimens will appear ductile, as evidenced by considerable drawing or necking down in the region behind the notch and by a relatively high-energy absorption, and above which they will appear brittle as evidenced by little or no drawing down or necking and by a relatively low-energy absorption. Since these methods permit a variation in the width of the specimens, and since the width dictates, for many materials, whether a brittle, low-energy break or a ductile, high energy break will occur, it is necessary that the width be stated in the specification covering that material and that the width be reported along with the impact resistance. In view of the preceding, one should not make comparisons between data from specimens having widths that differ by more than a few mils.

5.8 The type of failure for each specimen shall be recorded as one of the four categories listed as follows:

C	<i>Complete Break</i> —A break where the specimen separates into two or more pieces.
H	<i>Hinge Break</i> —An incomplete break, such that one part of the specimen cannot support itself above the horizontal when the other part is held vertically (less than 90° included angle).
P	<i>Partial Break</i> —An incomplete break that does not meet the definition for a hinge break but has fractured at least 90 % of the distance between the vertex of the notch and the opposite side.
NB	<i>Non-Break</i> —An incomplete break where the fracture extends less than 90 % of the distance between the vertex of the notch and the opposite side.

For tough materials, the pendulum may not have the energy necessary to complete the breaking of the extreme fibers and toss the broken piece or pieces. Results obtained from "non-break" specimens shall be considered a departure from standard and shall not be reported as a standard result. Impact resistance cannot be directly compared for any two materials that experience different types of failure as defined in the test method by this code. Averages reported must likewise be derived from specimens contained within a single failure category. This letter code shall suffix the reported impact identifying the types of failure associated with the reported value. If more than one type of failure is observed for a sample material, then the report will indicate the average impact resistance for each type of failure, followed by the percent of the specimens failing in that manner and suffixed by the letter code.

5.9 The value of the impact methods lies mainly in the areas of quality control and materials specification. If two groups of specimens of supposedly the same material show significantly different energy absorptions, types of breaks, critical widths, or critical temperatures, it may be assumed that they were made of different materials or were exposed to different processing or conditioning environments. The fact that a material shows twice the energy absorption of another under these conditions of test does not indicate that this same relationship will exist under another set of test conditions. The order of toughness may even be reversed under different testing conditions.

#### TEST METHOD A—CANTILEVER BEAM TEST

##### 6. Apparatus

6.1 The machine shall consist of a massive base on which is mounted a vise for holding the specimen and to which is connected, through a rigid frame and bearings, a pendulum-



type hammer. (See 6.2.) The machine must also have a pendulum holding and releasing mechanism and a pointer and dial mechanism for indicating the excess energy remaining in the pendulum after breaking the specimen. Optionally, an electronic digital display or computer can be used in place of the dial and pointer to measure the energy loss and indicate the breaking energy of the specimen.

6.2 A jig for positioning the specimen in the vise and graphs or tables to aid in the calculation of the correction for friction and windage also should be included. One type of machine is shown in Fig. 2. One design of specimen-positioning jig is illustrated in Fig. 3. Detailed requirements are given in subsequent paragraphs. General test methods for checking and calibrating the machine are given in Appendix X1. Additional instructions for adjusting a particular machine should be supplied by the manufacturer.

6.3 The pendulum shall consist of a single or multi-membered arm with a bearing on one end and a head, containing the striker, on the other. The arm must be sufficiently rigid to maintain the proper clearances and geometric relationships between the machine parts and the specimen and to minimize vibrational energy losses that are always included in the measured impact resistance. Both simple and compound pendulum designs may comply with this test method.

6.4 The striker of the pendulum shall be hardened steel and shall be a cylindrical surface having a radius of curvature of  $0.80 \pm 0.20$  mm ( $0.031 \pm 0.008$  in.) with its axis horizontal and perpendicular to the plane of swing of the pendulum. The line of contact of the striker shall be located at the center of percussion of the pendulum within  $\pm 2.54$  mm ( $\pm 0.100$  in.) (See Note 7.) Those portions of the pendulum adjacent to the cylindrical striking edge shall be recessed or inclined at a suitable angle so that there will be no chance for other than this cylindrical surface coming in

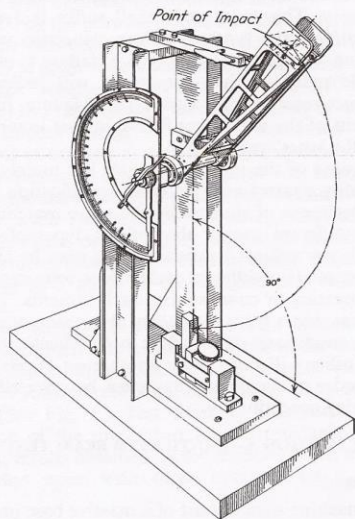


FIG. 2 Cantilever Beam (Izod-Type) Impact Machine



FIG. 3 Jig for Positioning Specimen for Clamping

contact with the specimen during the break.

NOTE 7—The distance from the axis of support to the center of percussion may be determined experimentally from the period of small amplitude oscillations of the pendulum by means of the following equation:

$$L = (g/4\pi^2)p^2$$

where:

$L$  = distance from the axis of support to the center of percussion, m (or ft),

$g$  = local gravitational acceleration (known to an accuracy of one part in one thousand),  $m/s^2$  (or  $ft/s^2$ ),

$\pi$  = 3.1416 ( $4\pi^2 = 39.48$ ), and

$p$  = period, s, of a single complete swing (to and fro) determined by averaging at least 20 consecutive and uninterrupted swings. The angle of swing shall be less than  $5^\circ$  each side of center.

6.5 The position of the pendulum holding and releasing mechanism shall be such that the vertical height of fall of the striker shall be  $610 \pm 2$  mm ( $24.0 \pm 0.1$  in.). This will produce a velocity of the striker at the moment of impact of approximately 3.5 m (11.4 ft)/s. (See Note 8.) The mechanism shall be so constructed and operated that it will release the pendulum without imparting acceleration or vibration to it.

NOTE 8—

$$V = (2gh)^{0.5}$$

where:

$V$  = velocity of the striker at the moment of impact (m/s),

$g$  = local gravitational acceleration ( $m/s^2$ ), and

$h$  = vertical height of fall of the striker (m).

This assumes no windage or friction.

6.6 The effective length of the pendulum shall be between 0.33 and 0.40 m (12.8 and 16.0 in.) so that the required elevation of the striker may be obtained by raising the pendulum to an angle between  $60^\circ$  and  $30^\circ$  above the horizontal.

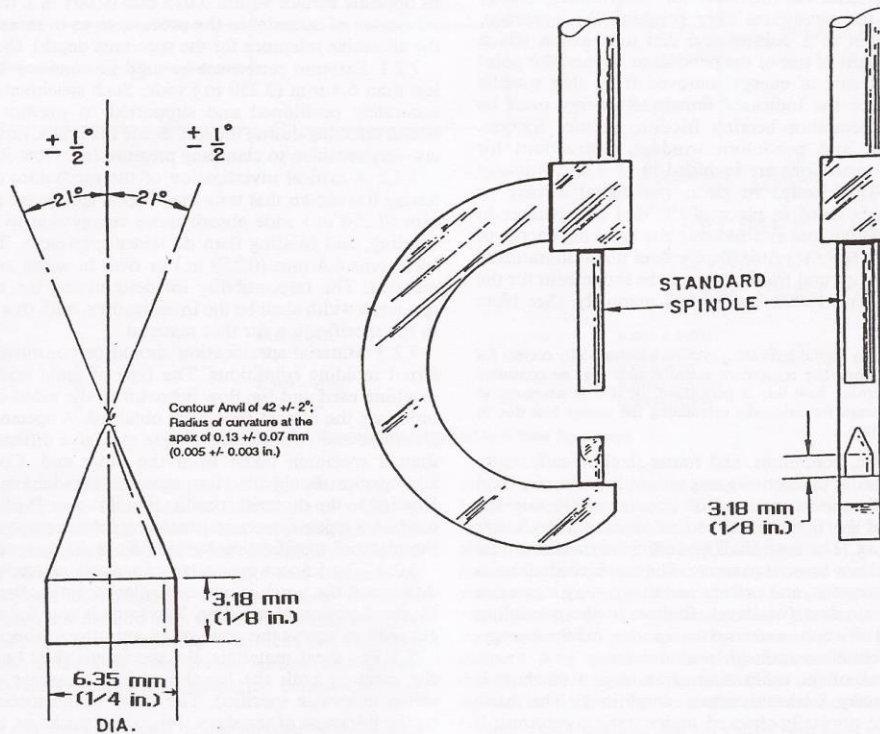
6.7 The machine shall be provided with a basic pendulum

capable of delivering an energy of  $2.7 \pm 0.14$  J ( $2.00 \pm 0.10$  ft·lbf). This pendulum shall be used with all specimens that extract less than 85 % of this energy. Heavier pendulums shall be provided for specimens that require more energy to break. These may be separate interchangeable pendulums or one basic pendulum to which extra pairs of equal calibrated weights may be rigidly attached to opposite sides of the pendulum. It is imperative that the extra weights shall not significantly change the position of the center of percussion or the free-hanging rest point of the pendulum (that would consequently take the machine outside of the allowable calibration tolerances). A range of pendulums having energies from 2.7 to 21.7 J (2 to 16 ft·lbf) has been found to be

sufficient for use with most plastic specimens and may be used with most machines. A series of pendulums such that each has twice the energy of the next will be found convenient. Each pendulum shall have an energy within  $\pm 0.5$  % of its nominal capacity.

6.8 A vise shall be provided for clamping the specimen rigidly in position so that the long axis of the specimen is vertical and at right angles to the top plane of the vise. (See Fig. 1.) This top plane shall bisect the angle of the notch with a tolerance of 0.12 mm (0.005 in.). Correct positioning of the specimen is generally done with a jig furnished with the machine. The top edges of the fixed and moveable jaws shall have a radius of  $0.25 \pm 0.12$  mm ( $0.010 \pm 0.005$  in.). For

### IZOD



ANVIL

SCALE: 4:1

- NOTE 1—These views not to scale.
- NOTE 2—Micrometer to be satin-chrome finished with friction thimble.
- NOTE 3—Special anvil for micrometer caliper 0 to 25.4 mm range (60.8 mm frame) (0 to 1 in. range (2-in. frame)).
- NOTE 4—Anvil to be oriented with respect to frame as shown.
- NOTE 5—Anvil and spindle to have hardened surfaces.
- NOTE 6—Range: 0 to 25.4 mm (0 to 1 in. in thousandths of an inch).
- NOTE 7—Adjustment must be at zero when spindle and anvil are in contact.

FIG. 4 Early (ca. 1970) Version of a Notch-Depth Micrometer



specimens whose thickness approaches the lower limiting value of 3.00 mm (0.118 in.), means shall be provided to prevent the lower half of the specimen from moving during the clamping or testing operations (see Fig. 3 and Note 9.)

NOTE 9—Some plastics are sensitive to clamping pressure; therefore, cooperating laboratories should agree upon some means of standardizing the clamping force. One method is using a torque wrench on the screw of the specimen vise. If the faces of the vise or specimen are not flat and parallel, a greater sensitivity to clamping pressure may be evident. See the calibration procedure in Appendix X2 for adjustment and correction instructions for faulty instruments.

6.9 When the pendulum is free hanging, the striking surface shall come within 0.2 % of scale of touching the front face of a standard specimen. During an actual swing this element shall make initial contact with the specimen on a line  $22.00 \pm 0.05$  mm ( $0.87 \pm 0.002$  in.) above the top surface of the vise.

6.10 Means shall be provided for determining energy remaining in the pendulum after breaking the specimen. This may consist of a pointer and dial mechanism which indicate the height of rise of the pendulum beyond the point of impact in terms of energy removed from that specific pendulum. Since the indicated remaining energy must be corrected for pendulum-bearing friction, pointer friction, pointer inertia, and pendulum windage, instructions for making these corrections are included in 10.3 and Annexes A1 and A2. Optionally, an electronic digital display or computer can be used in place of the dial and pointer to measure the energy loss and indicate the breaking energy of the specimen. If the electronic display does not automatically correct for windage and friction, it shall be incumbent for the operator to determine the energy loss manually. (See Note 10.)

NOTE 10—Many digital indicating systems automatically correct for windage and friction. The equipment manufacturer may be consulted for details concerning how this is performed, or if it is necessary to determine the means for manually calculating the energy loss due to windage and friction.

6.11 The vise, pendulum, and frame shall be sufficiently rigid to maintain correct alignment of the hammer and specimen, both at the moment of impact and during the propagation of the fracture, and to minimize energy losses due to vibration. The base shall be sufficiently massive that the impact will not cause it to move. The machine shall be so designed, constructed, and maintained that energy losses due to pendulum air drag (windage), friction in the pendulum bearings, and friction and inertia in the excess energy-indicating mechanism are held to a minimum.

6.12 A check of the calibration of an impact machine is difficult to make under dynamic conditions. The basic parameters are normally checked under static conditions; if the machine passes the static tests, then it is assumed to be accurate. The calibration procedure in Appendix X2 should be used to establish the accuracy of the equipment. However, for some machine designs it might be necessary to change the recommended method of obtaining the required calibration measurements. Other methods of performing the required checks may be substituted, provided that they can be shown to result in an equivalent accuracy. Appendix X1 also describes a dynamic test for checking certain features of the machine and specimen.

## 7. Test Specimens

7.1 The test specimens shall conform to the dimensions and geometry of Fig. 5, except as modified in accordance with 7.2, 7.3, 7.4, and 7.5. To ensure the correct contour and conditions of the specified notch, all specimens shall be notched as directed in Section 8.

7.2 Molded specimens shall have a width between 3.0 and 12.7 mm (0.118 and 0.500 in.). Use the specimen width as specified in the material specification or as agreed upon between the supplier and the customer. All specimens having one dimension less than 12.7 mm (0.500 in.) shall have the notch cut on the shorter side. Otherwise, all compression-molded specimens shall be notched on the side parallel to the direction of application of molding pressure. (Due to the draft of the mold, the notched surface and the opposite surface may not be parallel in molded specimens. Therefore, it is essential that the notched surface be machined parallel to its opposite surface within 0.025 mm (0.001 in.), removing a minimum of material in the process, so as to remain within the allowable tolerance for the specimen depth). (See Fig. 5.)

7.2.1 Extreme care must be used in handling specimens less than 6.4 mm (0.250 in.) wide. Such specimens must be accurately positioned and supported to prevent twist or lateral buckling during the test. Some materials, furthermore, are very sensitive to clamping pressure (see Note 9).

7.2.2 A critical investigation of the mechanics of impact testing has shown that tests made upon specimens under 6.4 mm (0.250 in.) wide absorb more energy due to crushing, bending, and twisting than do wider specimens. Therefore, specimens 6.4 mm (0.250 in.) or over in width are recommended. The responsibility for determining the minimum specimen width shall be the investigator's, with due reference to the specification for that material.

7.2.3 Material specification should be consulted for preferred molding conditions. The type of mold and molding machine used and the flow behavior in the mold cavity will influence the impact resistance obtained. A specimen taken from one end of a molded plaque may give different results than a specimen taken from the other end. Cooperating laboratories should therefore agree on standard molds conforming to the material specification. Practice D 3641 can be used as a guide for general molding tolerances, but refer to the material specification for specific molding conditions.

7.2.4 The impact resistance of a plastic material may be different if the notch is perpendicular to, rather than parallel to, the direction of molding. The same is true for specimens cut with or across the grain of an anisotropic sheet or plate.

7.3 For sheet materials, the specimens shall be cut from the sheet in both the lengthwise and crosswise directions unless otherwise specified. The width of the specimen shall be the thickness of the sheet if the sheet thickness is between 3.0 and 12.7 mm (0.118 and 0.500 in.). Sheet material thicker than 12.7 mm shall be machined down to 12.7 mm. Specimens with a 12.7-mm square cross section may be tested either edgewise or flatwise as cut from the sheet. When specimens are tested flatwise, the notch shall be made on the machined surface if the specimen is machined on one face only. When the specimen is cut from a thick sheet, notation shall be made of the portion of the thickness of the sheet from which the specimen was cut, for example, center, top, or bottom surface.



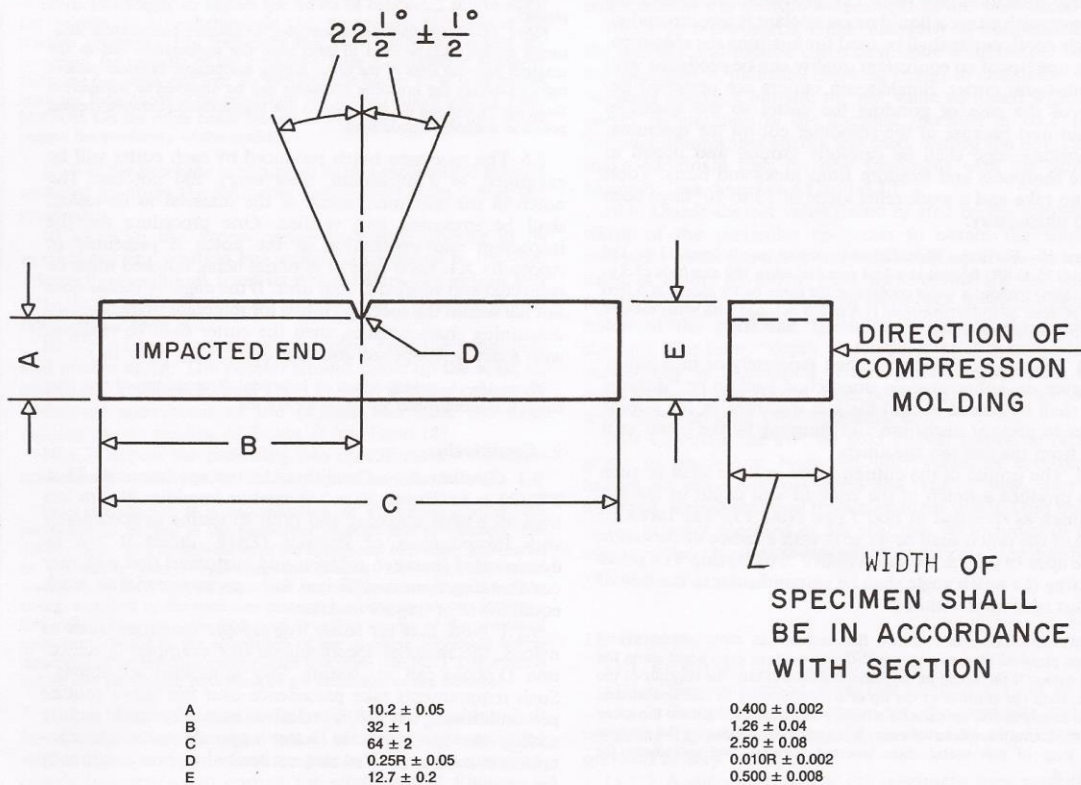


FIG. 5 Dimensions of Izod-Type Test Specimen

7.4 The practice of cementing, bolting, clamping, or otherwise combining specimens of substandard width to form a composite test specimen is not recommended and should be avoided since test results may be seriously affected by interface effects or effects of solvents and cements on energy absorption of composite test specimens, or both. However, if Izod test data on such thin materials are required when no other means of preparing specimens are available, and if possible sources of error are recognized and acceptable, the following technique of preparing composites may be utilized.

7.4.1 The test specimen shall be a composite of individual thin specimens totaling 6.4 to 12.7 mm (0.250 to 0.500 in.) in width. Individual members of the composite shall be accurately aligned with each other and clamped, bolted, or cemented together. The composite shall be machined to proper dimensions and then notched. In all such cases the use of composite specimens shall be noted in the report of test results.

7.4.2 Care must be taken to select a solvent or adhesive that will not affect the impact resistance of the material under test. If solvents or solvent-containing adhesives are

employed, a conditioning procedure shall be established to ensure complete removal of the solvent prior to test.

7.5 Each specimen shall be free of twist (see Note 11) and shall have mutually perpendicular pairs of plane parallel surfaces and free from scratches, pits, and sink marks. The specimens shall be checked for compliance with these requirements by visual observation against straightedges, squares, and flat plates, and by measuring with micrometer calipers. Any specimen showing observable or measurable departure from one or more of these requirements shall be rejected or machined to the proper size and shape before testing.

NOTE 11—A specimen that has a slight twist to its notched face of 0.05 mm (0.002 in.) at the point of contact with the pendulum striking edge will be likely to have a characteristic fracture surface with considerable greater fracture area than for a normal break. In this case the energy to break and toss the broken section may be considerably larger (20 to 30 %) than for a normal break. A tapered specimen may require more energy to bend it in the vise before fracture.

### 8. Notching Test Specimens

8.1 Notching shall be done on a milling machine, engine lathe, or other suitable machine tool. Both the feed speed and the cutter speed shall be constant throughout the

notching operation (see Note 12). Provision for cooling the specimen with either a liquid or gas coolant is recommended. A single-tooth cutter shall be used for notching the specimen, unless notches of an equivalent quality can be produced with a multi-tooth cutter. Single-tooth cutters are preferred because of the ease of grinding the cutter to the specimen contour and because of the smoother cut on the specimen. The cutting edge shall be carefully ground and honed to ensure sharpness and freedom from nicks and burrs. Tools with no rake and a work relief angle of 15 to 20° have been found satisfactory.

NOTE 12—For some thermoplastics, cutter speeds from 53 to 150 m/min (175 to 490 ft/min) at a feed speed of 89 to 160 mm/min (3.5 to 6.3 in./min) without a water coolant or the same cutter speeds at a feed speed of from 36 to 160 mm/min (1.4 to 6.3 in./min) with water coolant produced suitable notches.

8.2 Specimens may be notched separately or in a group. However, in either case an unnotched backup or “dummy bar” shall be placed behind the last specimen in the sample holder to prevent distortion and chipping by the cutter as it exits from the last test specimen.

8.3 The profile of the cutting tooth or teeth shall be such as to produce a notch of the contour and depth in the test specimen as specified in Fig. 5 (see Note 13). The included angle of the notch shall be  $45 \pm 1^\circ$  with a radius of curvature at the apex of  $0.25 \pm 0.05$  mm ( $0.010 \pm 0.002$  in.). The plane bisecting the notch angle shall be perpendicular to the face of the test specimen within 2°.

NOTE 13—There is evidence that notches in materials of widely varying physical dimensions may differ in contour even when using the same cutter. If the notch in the specimen should take the contour of the cutter, then the contour of the tip of the cutter may be checked instead of the notch in the specimen for single-tooth cutters. Under the same condition, multi-tooth cutters may be checked by measuring the contour of a strip of soft metal shim inserted between two specimens for notching.

8.4 The depth of the plastic material remaining in the specimen under the notch shall be  $10.20 \pm 0.05$  mm ( $0.400 \pm 0.002$  in.). This dimension shall be measured, with a micrometer or other suitable measuring device. (See Fig. 4.)

8.5 Cutter speed and feed speed should be chosen appropriate for the material being tested since the quality of the notch may be adversely affected by thermal deformations and stresses induced during the cutting operation if proper conditions are not selected.<sup>9</sup> The notching parameters used shall not alter the physical state of the material such as by raising the temperature of a thermoplastic above its glass transition temperature. In general, high cutter speeds, slow feed rates, and lack of coolant induce more thermal damage than a slow cutter speed, fast feed speed, and the use of a coolant. Too high a feed speed/cutter speed ratio, however, may cause impacting and cracking of the specimen. The range of cutter speed/feed ratios possible to produce acceptable notches can be extended by the use of a suitable coolant. (See Note 14.) In the case of new types of plastics, it is necessary to study the effect of variations in the notching conditions. (See Note 15.)

<sup>9</sup> Supporting data are available from ASTM Headquarters. Request RR-D20-1066.

NOTE 14—Water or compressed gas is a suitable coolant for many plastics.

NOTE 15—Embedded thermocouples, or another temperature measuring device, can be used to determine the temperature rise in the material near the apex of the notch during machining. Thermal stresses induced during the notching operation can be observed in transparent materials by viewing the specimen at low magnification between crossed polars in monochromatic light.

8.6 The specimen notch produced by each cutter will be examined, at a minimum, after every 500 notches. The notch in the specimen, made of the material to be tested, shall be inspected and verified. One procedure for the inspection and verification of the notch is presented in Appendix X1. Each type of material being notched must be inspected and verified at that time. If the angle or radius does not fall within the specified limits for materials of satisfactory machining characteristics, then the cutter shall be replaced with a newly sharpened and honed one. (See Note 16.)

NOTE 16—A carbide-tipped or industrial diamond-tipped notching cutter is recommended for longer service life.

## 9. Conditioning

9.1 *Conditioning*—Condition the test specimens at  $23 \pm 2^\circ\text{C}$  ( $73 \pm 3.6^\circ\text{F}$ ) and  $50 \pm 5\%$  relative humidity for not less than 40 h after notching and prior to testing in accordance with Procedure A of Practice D 618, unless it can be documented (between supplier and customer) that a shorter conditioning time is sufficient for a given material to reach equilibrium of impact resistance.

9.1.1 Note that for some hygroscopic materials, such as nylons, the material specifications (for example, Specification D 4066) call for testing “dry as-molded specimens.” Such requirements take precedence over the above routine preconditioning to 50% relative humidity and require sealing the specimens in water vapor-impermeable containers as soon as molded and not removing them until ready for testing.

9.2 *Test Conditions*—Conduct tests in the standard laboratory atmosphere of  $23 \pm 2^\circ\text{C}$  ( $73 \pm 3.6^\circ\text{F}$ ) and  $50 \pm 5\%$  relative humidity, unless otherwise specified in the material specification or by customer requirements. In cases of disagreement, the tolerances shall be  $\pm 1^\circ\text{C}$  ( $\pm 1.8^\circ\text{F}$ ) and  $\pm 2\%$  relative humidity.

## 10. Procedure

10.1 At least five and preferably ten or more individual determinations of impact resistance must be made on each sample to be tested under the conditions prescribed in Section 9. Each group shall consist of specimens with the same nominal width ( $\pm 0.13$  mm ( $\pm 0.005$  in.)). In the case of specimens cut from sheets that are suspected of being anisotropic, prepare and test specimens from each principal direction (lengthwise and crosswise to the direction of anisotropy).

10.2 Estimate the breaking energy for the specimen and select a pendulum of suitable energy. Use the lightest standard pendulum that is expected to break each specimen in the group with a loss of not more than 85% of its energy (see Note 17). Check the machine with the proper pendulum in place for conformity with the requirements of Section 6 before starting the tests. (See Appendix X1.)



NOTE 17—Ideally an impact test would be conducted at a constant test velocity. In a pendulum-type test, the velocity decreases as the fracture progresses. For specimens that have an impact energy approaching the capacity of the pendulum there is insufficient energy to complete the break and toss. By avoiding the higher 15 % scale energy readings, the velocity of the pendulum will not be reduced below 1.3 m/s (4.4 ft/s). On the other hand, the use of too heavy a pendulum would reduce the sensitivity of the reading.

10.3 If the machine is equipped with a mechanical pointer and dial, perform the following operations before testing the specimens:

10.3.1 With the excess energy indicating pointer in its normal starting position but without a specimen in the vise, release the pendulum from its normal starting position and note the position the pointer attains after the swing as one reading of Factor *A*.

10.3.2 Without resetting the pointer, raise the pendulum and release again. The pointer should move up the scale an additional amount. Repeat (10.3.2) until a swing causes no additional movement of the pointer and note the final reading as one reading of Factor *B* (see Note 18).

10.3.3 Repeat the preceding two operations several times and calculate and record the average *A* and *B* readings.

NOTE 18—Factor *B* is an indication of the energy lost by the pendulum to friction in the pendulum bearings and to windage. The difference *A* - *B* is an indication of the energy lost to friction and inertia in the excess energy indicating mechanism. However, the actual corrections will be smaller than these factors, since in an actual test the energy absorbed by the specimen prevents the pendulum from making a full swing. Therefore, the indicated breaking energy of the specimen must be included in the calculation of the machine correction before determining the breaking energy of the specimen (see 10.7). The *A* and *B* values also provide an indication of the condition of the machine.

10.3.4 If excessive friction is indicated, the machine shall be adjusted before starting a test. If the machine is equipped with a digital energy indicating system, follow the manufacturer's instructions to correct for windage and friction. If excessive friction is indicated, the machine shall be adjusted before starting a test.

10.4 Check the specimens for conformity with the requirements of Sections 7, 8, and 10.1.

10.5 Measure the width and depth to the nearest 0.025 mm (0.001 in.) after notching of each specimen. Measure the width in the region of the notch. A micrometer or other measuring device is necessary for measuring the depth. (See Fig. 4.)

10.6 Position the specimen precisely (see 6.7) so that it is rigidly, but not too tightly (see Note 9), clamped in the vise. Pay special attention to ensure that the "impacted end" of the specimen as shown and dimensioned in Fig. 5 is the end projecting above the vise. Release the pendulum and record the excess energy remaining in the pendulum after breaking the specimen, together with a description of the appearance of the broken specimen (see failure categories in 5.8).

10.7 Subtract the windage and friction correction from the indicated breaking energy of the specimen, unless determined automatically by the indicating system (that is, digital display or computer). If a mechanical dial and pointer is employed, use the *A* and *B* factors and the appropriate tables or the graph described in Annexes A1 and A2 to determine the correction. For those digital systems that do not automatically compensate for windage and friction, follow the

manufacturer's procedure for performing this correction.

10.7.1 In other words, either manually or automatically, the windage and friction correction value is subtracted from the uncorrected, indicated breaking energy to obtain the new breaking energy. Compare the net value so found with the energy requirement of the hammer specified in 10.2. If a hammer of improper energy was used, discard the result and make additional tests on new specimens with the proper hammer. (See Annexes A1 and A2.)

10.8 Divide the net value found in 10.7 by the measured width of the particular specimen to obtain the impact resistance under the notch in J/m (ft·lbf/in.). If the optional units of kJ/m<sup>2</sup> (ft·lbf/in.<sup>2</sup>) are used, divide the net value found in 10.7 by the measured width and depth under the notch of the particular specimen to obtain the impact strength. The term, "depth under the notch," is graphically represented by Dimension A in Fig. 5. Consequently, the cross-sectional area (width times depth under the notch) will need to be reported. (See Appendix X5.)

10.9 Calculate the average Izod impact resistance of the group of specimens. However, only values of specimens having the same nominal width and type of break may be averaged. Values obtained from specimens that did not break in the manner specified in 5.8 shall not be included in the average. Also calculate the standard deviation of the group of values.

## 11. Report

11.1 Report the following information:

- 11.1.1 The test method used (Test Method A, C, D, or E),
- 11.1.2 Complete identification of the material tested, including type source, manufacturer's code number, and previous history,
- 11.1.3 A statement of how the specimens were prepared, the testing conditions used, the number of hours the specimens were conditioned after notching, and, for sheet materials, the direction of testing with respect to anisotropy, if any,
- 11.1.4 The capacity of the pendulum in joules, or foot pound-force, or inch pound-force,
- 11.1.5 The width and depth under the notch of each specimen tested (see 5.6),
- 11.1.6 The total number of specimens tested per sample of material,
- 11.1.7 The type of failure (see 5.8),
- 11.1.8 The impact resistance must be reported in J/m (ft·lbf/in.); the optional units of kJ/m<sup>2</sup> (ft·lbf/in.<sup>2</sup>) may also be required (see 10.8),
- 11.1.9 The number of those specimens that resulted in failures which conforms to each of the requirement categories in 5.8,
- 11.1.10 The average impact resistance and standard deviation (in J/m (ft·lbf/in.)) for those specimens in each failure category, except non-break as presented in 5.8. Optional units (kJ/m<sup>2</sup> (ft·lbf/in.<sup>2</sup>)) may also need to be reported (see Appendix X5), and
- 11.1.11 The percent of specimens failing in each category suffixed by the corresponding letter code from 5.8.



**TEST METHOD C—CANTILEVER BEAM TEST FOR MATERIALS OF LESS THAN 27 J/m (0.5 ft·lbf/in.)**

**12. Apparatus**

12.1 The apparatus shall be the same as specified in Section 6.

**13. Test Specimens**

13.1 The test specimens shall be the same as specified in Section 7.

**14. Notching Test Specimens**

14.1 Notching test specimens shall be the same as specified in Section 8.

**15. Conditioning**

15.1 Specimen conditioning and test environment shall be in accordance with Section 9.

**16. Procedure**

16.1 The procedure shall be the same as in Section 10 with the addition of a procedure for estimating the energy to toss the broken specimen part.

16.1.1 Make an estimate of the magnitude of the energy to toss each different type of material and each different specimen size (width). This is done by repositioning the free end of the broken specimen on the clamped portion and striking it a second time with the pendulum released in such a way as to impart to the specimen approximately the same velocity it had attained during the test. This is done by releasing the pendulum from a height corresponding to that to which it rose following the breakage of the test specimen. The energy to toss is then considered to be the difference between the reading previously described and the free swing reading obtained from this height. A reproducible method of starting the pendulum from the proper height must be devised.

**17. Report**

- 17.1 Report the following information:
- 17.1.1 Same as 11.1.1,
  - 17.1.2 Same as 11.1.2,
  - 17.1.3 Same as 11.1.3,
  - 17.1.4 Same as 11.1.4,
  - 17.1.5 Same as 11.1.5,
  - 17.1.6 Same as 11.1.6,
  - 17.1.7 The average reversed notch impact resistance, J/m (ft·lbf/in.) (see 5.8 for failure categories),
  - 17.1.8 Same as 11.1.8,
  - 17.1.9 Same as 11.1.9,
  - 17.1.10 Same as 11.1.10, and
  - 17.1.11 Same as 11.1.11.
  - 17.1.12 The estimated toss correction, expressed in terms of joule (J) or foot pound-force (ft·lbf).
  - 17.1.13 The difference between the Izod impact energy and the toss correction energy is the net Izod energy. This

value is divided by the specimen width (at the base of notch) to obtain the net Izod impact resistance for the report.

**TEST METHOD D—NOTCH RADIUS SENSITIVITY TEST**

**18. Apparatus**

18.1 The apparatus shall be the same as specified in Section 6.

**19. Test Specimens**

19.1 The test specimens shall be the same as specified in Section 7. All specimens must be of the same nominal width, preferably 6.4-mm (0.25-in.).

**20. Notching Test Specimens**

20.1 Notching shall be done as specified in Section 8 and Fig. 5, except those ten specimens shall be notched with a radius of 0.25 mm (0.010 in.) and ten specimens with a radius of 1.0 mm (0.040 in.).

**21. Conditioning**

21.1 Specimen conditioning and test environment shall be in accordance with Section 9.

**22. Procedure**

22.1 Proceed in accordance with Section 10, testing ten specimens of each notch radius.

22.2 The average impact resistance of each group shall be calculated, except that within each group the type of break must be homogeneously C, H, C and H, or P.

22.3 If the specimens with the 0.25-mm (0.010-in.) radius notch do not break, the test is not applicable.

22.4 If any of ten specimens tested with the 1.0-mm (0.040-in.) radius notch fail as in category NB, non-break, the notch sensitivity procedure cannot be used without obtaining additional data. A new set of specimens should be prepared from the same sample, using a 0.50-mm (0.020-in.) notch radius and the procedure of 22.1 and 22.2 repeated.

**23. Calculation**

23.1 Calculate the slope of the line connecting the values for impact resistance for 0.25 and 1.0-mm notch radii (or 0.010 and 0.040-in. notch radii) by the equation presented as follows. (If a 0.500-mm (0.020-in.) notch radius is substituted, adjust the calculation accordingly.)

$$b = (E_2 - E_1)/(R_2 - R_1)$$

where:

$E_2$  = average impact resistance for the larger notch, J/m of notch,

$E_1$  = average impact resistance for the smaller notch, J/m of notch,

$R_2$  = radius of the larger notch, mm, and

$R_1$  = radius of the smaller notch, mm.

Example:

$$E_{1.0} = 330.95 \text{ J/m}; E_{0.25} = 138.78 \text{ J/m}$$

$$b = (330.95 - 138.78 \text{ J/m}) / (1.00 - 0.25 \text{ mm})$$

$$b = 192.17 \text{ J/m } 0.75 \text{ mm} = 256.23 \text{ J/m}$$

of notch per mm of radius

**TABLE 1 Precision Data, Test Method A—Izod**

NOTE 1—Values in ft·lbf/in. of width (J/m of width).  
NOTE 2—See Footnote 10.

Material	Average	$S_r^A$	$S_R^B$	$I_r^C$	$I_R^D$	Number of Laboratories
Phenolic	0.57 (30.4)	0.024 (1.3)	0.076 (4.1)	0.06 (3.2)	0.21 (11.2)	19
Acetal	1.45 (77.4)	0.075 (4.0)	0.604 (32.3)	0.21 (11.2)	1.70 (90.8)	9
Reinforced nylon	1.98 (105.7)	0.083 (4.4)	0.245 (13.1)	0.23 (12.3)	0.69 (36.8)	15
Polypropylene	2.66 (142.0)	0.154 (8.2)	0.573 (30.6)	0.43 (23.0)	1.62 (86.5)	24
ABS	10.80 (576.7)	0.136 (7.3)	0.585 (31.2)	0.38 (20.3)	1.65 (88.1)	25
Polycarbonate	16.40 (875.8)	0.295 (15.8)	1.056 (56.4)	0.83 (44.3)	2.98 (159.1)	25

<sup>A</sup>  $S_r$  = within-laboratory standard deviation of the average.  
<sup>B</sup>  $S_R$  = between-laboratories standard deviation of the average.  
<sup>C</sup>  $I_r$  = 2.83  $S_r$ .  
<sup>D</sup>  $I_R$  = 2.83  $S_R$ .

**TABLE 2 Precision Data, Test Method C—Izod with Toss Correction**

NOTE 1—Values in ft·lbf/in. of width (J/m of width).  
NOTE 2—See Footnote 10.

Material	Average	$S_r^A$	$S_R^B$	$I_r^C$	$I_R^D$	Number of Laboratories
Phenolic	0.45 (24.0)	0.038 (2.0)	0.129 (6.9)	0.10 (5.3)	0.36 (19.2)	15

<sup>A</sup>  $S_r$  = within-laboratory standard deviation of the average.  
<sup>B</sup>  $S_R$  = between-laboratories standard deviation of the average.  
<sup>C</sup>  $I_r$  = 2.83  $S_r$ .  
<sup>D</sup>  $I_R$  = 2.83  $S_R$ .

**TABLE 3 Precision Data, Test Method E—Reversed Notch Izod**

NOTE 1—Values in ft·lbf/in. of width (J/m of width).  
NOTE 2—See Footnote 8.

Material	Average	$S_r^A$	$S_R^B$	$I_r^C$	$I_R^D$
Acrylic sheet, unmodified	3.02 (161.3)	0.243 (13.0)	0.525 (28.0)	0.68 (36.3)	0.71 (37.9)
Premix molding compounds laminate	6.11 (326.3)	0.767 (41.0)	0.786 (42.0)	2.17 (115.9)	2.22 (118.5)
acrylic, injection molded	10.33 (551.6)	0.878 (46.9)	1.276 (68.1)	2.49 (133.0)	3.61 (192.8)
compound (SMC) laminate	11.00 (587.4)	0.719 (38.4)	0.785 (41.9)	2.03 (108.4)	2.22 (118.5)
Preformed mat laminate	19.43 (1037.6)	0.960 (51.3)	1.618 (86.4)	2.72 (145.2)	4.58 (244.6)

<sup>A</sup>  $S_r$  = within-laboratory standard deviation of the average.  
<sup>B</sup>  $S_R$  = between-laboratories standard deviation of the average.  
<sup>C</sup>  $I_r$  = 2.83  $S_r$ .  
<sup>D</sup>  $I_R$  = 2.83  $S_R$ .

**24. Report**

- 24.1 Report the following information:
  - 24.1.1 Same as 11.1.1,
  - 24.1.2 Same as 11.1.2,
  - 24.1.3 Same as 11.1.3,
  - 24.1.4 Same as 11.1.4,
  - 24.1.5 Same as 11.1.5,
  - 24.1.6 Same as 11.1.6,
  - 24.1.7 The average reversed notch impact resistance, in J/m (ft·lbf/in.) (see 5.8 for failure categories),
  - 24.1.8 Same as 11.1.8,
  - 24.1.9 Same as 11.1.9,
  - 24.1.10 Same as 11.1.10, and
  - 24.1.11 Same as 11.1.11.
  - 24.1.12 Report the average value of  $b$  with its units, and the average Izod impact resistance for a 0.25-mm (0.010-in.) notch.

**TEST METHOD E—CANTILEVER BEAM REVERSED NOTCH TEST**

**25. Apparatus**

- 25.1 The apparatus shall be the same as specified in Section 6.

**26. Test Specimens**

- 26.1 The test specimen shall be the same as specified in Section 7.

**27. Notching Test Specimens**

- 27.1 Notch the test specimens in accordance with Section 8.

**28. Conditioning**

- 28.1 Specimen conditioning and test environment shall be in accordance with Section 9.

**29. Procedure**

- 29.1 Proceed in accordance with Section 10, except clamp the specimen so that the striker impacts it on the face opposite the notch, hence subjecting the notch to compressive rather than tensile stresses during impact (see Fig. 1(b) and Notes 19, 20, and 21).

NOTE 19—The reversed notch test employs a standard 0.25-mm (0.010-in.) notch specimen to provide an indication of unnotched impact resistance. Use of the reversed notch test obviates the need for machining unnotched specimens to the required 10.2 ± 0.05-mm (0.400 ± 0.002-in.) depth before testing and provides the same convenience of specimen mounting as the standard notch tests (Test Methods A and C).



NOTE 20—Results obtained by the reversed notch test may not always agree with those obtained on unnotched bars that have been machined to the 10.2-mm (0.400-in.) depth requirement. For some materials, the effects arising from the difference in the clamped masses of the two specimen types during test, and those attributable to a possible difference in toss energies ascribed to the broken ends of the respective specimens, may contribute significantly to a disparity in test results.

NOTE 21—Where materials are suspected of anisotropy, due to molding or other fabricating influences, notch reversed notch specimens on the face opposite to that used for the standard Izod test; that is, present the same face to the impact blow.

### 30. Report

30.1 Report the following information:

- 30.1.1 Same as 11.1.1,
- 30.1.2 Same as 11.1.2,
- 30.1.3 Same as 11.1.3,
- 30.1.4 Same as 11.1.4,
- 30.1.5 Same as 11.1.5,
- 30.1.6 Same as 11.1.6,
- 30.1.7 The average reversed notch impact resistance, J/m (ft·lbf/in.) (see 5.8 for failure categories),
- 30.1.8 Same as 11.1.8,
- 30.1.9 Same as 11.1.9,
- 30.1.10 Same as 11.1.10, and
- 30.1.11 Same as 11.1.11.

### 31. Precision and Bias

31.1 Tables 1 and 2 are based on a round robin<sup>10</sup> in accordance with Practice E 691. For each material, all the test bars were prepared at one source, except for notching. Each participating laboratory notched the bars that they tested. Tables 1 and 2 are presented on the basis of a test result being the average for five specimens. In the round robin each laboratory tested, on average, nine specimens of each material.

31.2 Table 3 is based on a round robin<sup>8</sup> involving five

materials tested by seven laboratories. For each material, all the samples were prepared at one source, and the individual specimens were all notched at the same laboratory. Table 3 is presented on the basis of a test result being the average for five specimens. In the round robin, each laboratory tested ten specimens of each material. (See Note 22.)

NOTE 22: Caution—The following explanations of  $I_r$  and  $I_R$  (see 31.3 through 31.3.3) are only intended to present a meaningful way of considering the precision of this test method. The data in Tables 1 through 3 should not be rigorously applied to acceptance or rejection of material, as those data are specific to the round robin and may not be representative of other lots, conditions, materials, or laboratories. Users of this test method should apply the principles outlined in Practice E 691 to generate data specific to their laboratory and materials, or between specific laboratories. The principles of 31.3 through 31.3.3 would then be valid for such data.

31.3 *Concept of  $I_r$  and  $I_R$* —If  $S_r$  and  $S_R$  have been calculated from a large enough body of data, and for test results that were averages from testing five specimens.

31.3.1 *Repeatability,  $I_r$  (Comparing Two Test Results for the Same Material, Obtained by the Same Operator Using the Same Equipment on the Same Day)*—The two test results should be judged not equivalent if they differ by more than the  $I_r$  value for that material.

31.3.2 *Reproducibility,  $I_R$  (Comparing Two Test Results for the Same Material, Obtained by Different Operators Using Different Equipment on Different Days)*—The two test results should be judged not equivalent if they differ by more than the  $I_R$  value for that material.

31.3.3 Any judgment in accordance with 30.3.1 and 30.3.2 would have an approximate 95 % (0.95) probability of being correct.

31.4 *Bias*—There is no recognized standards by which to estimate bias of these test methods.

NOTE 23—Numerous changes have occurred since the collection of the original round-robin data in 1973.<sup>10</sup> Consequently, a new task group has been formed to evaluate a precision and bias statement for the latest revision of these test methods.

### 32. Keywords

32.1 impact resistance; Izod impact; notch sensitivity; notched specimen; reverse notch impact

<sup>10</sup> Supporting data are available from ASTM Headquarters. Request RR: D20-1034.

ANNEXES

(Mandatory Information)

A1. INSTRUCTIONS FOR THE CONSTRUCTION OF A WINDAGE AND FRICTION CORRECTION CHART

A1.1 The construction and use of the chart herein described is based upon the assumption that the friction and windage losses are proportional to the angle through which these loss torques are applied to the pendulum. Figure A1.1 shows the assumed energy loss versus the angle of the pendulum position during the pendulum swing. The correction chart to be described is principally the left half of Fig. A1.1. The windage and friction correction charts should be available from commercial testing machine manufacturers. The energy losses designated as *A* and *B* are described in 10.3.

A1.2 Start the construction of the correction chart (see Fig. A1.2) by laying off to some convenient linear scale on the abscissa of a graph the angle of pendulum position for the portion of the swing beyond the free hanging position. For convenience, place the free hanging reference point on the right end of the abscissa with the angular displacement increasing linearly to the left. The abscissa is referred to as Scale C. Although angular displacement is the quantity to be represented linearly on the abscissa, this displacement is more conveniently expressed in terms of indicated energy read from the machine dial. This yields a nonlinear Scale C with indicated pendulum energy increasing to the right.

A1.3 On the right-hand ordinate lay off a linear Scale B starting with zero at the bottom and stopping at the maximum expected pendulum friction and windage value at the top.

A1.4 On the left ordinate construct a linear Scale D ranging from zero at the bottom to 1.2 times the maximum

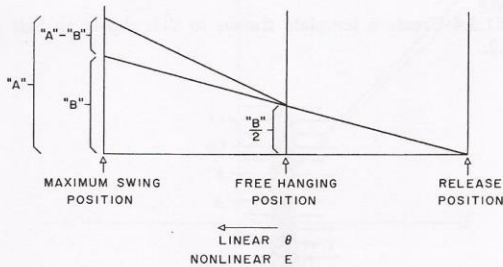


FIG. A1.1 Method of Construction of a Windage and Friction Correction Chart

A2. PROCEDURE FOR THE CALCULATION OF WINDAGE AND FRICTION CORRECTION

A2.1 The procedure for the calculation of the windage and friction correction in this annex is based on the equations developed by derivation in Appendix X3. This

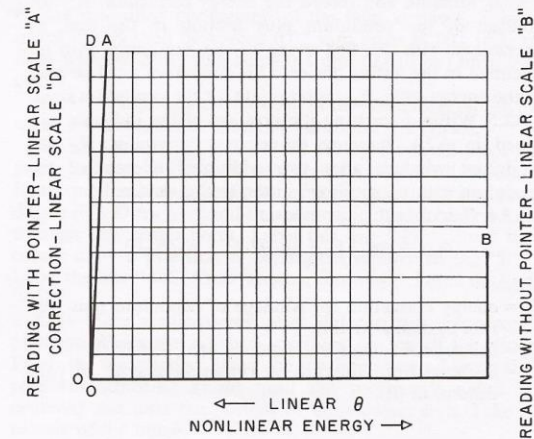


FIG. A1.2 Sample Windage and Friction Correction Chart

ordinate value appearing on Scale B, but make the scale twice the scale used in the construction of Scale B.

A1.5 Adjoining Scale D draw a curve OA that is the focus of points whose coordinates have equal values of energy correction on Scale D and indicated energy on Scale C. This curve is referred to as Scale A and utilizes the same divisions and numbering system as the adjoining Scale D.

A1.6 Instructions for Using Chart:

A1.6.1 Locate and mark on Scale A the reading *A* obtained from the free swing of the pendulum with the pointer prepositioned in the free hanging or maximum indicated energy position on the dial.

A1.6.2 Locate and mark on Scale B the reading *B* obtained after several free swings with the pointer pushed up close to the zero indicated energy position of the dial by the pendulum in accordance with instructions in 10.3.

A1.6.3 Connect the two points thus obtained by a straight line.

A1.6.4 From the indicated impact energy on Scale C project up to the constructed line and across to the left to obtain the correction for windage and friction from Scale D.

A1.6.5 Subtract this correction from the indicated impact reading to obtain the energy delivered to the specimen.

procedure can be used as a substitute for the graphical procedure described in Annex A1 and is applicable to small electronic calculator and computer analysis.



A2.2 Calculate  $L$ , the distance from the axis of support to the center of percussion as indicated in 6.3. (It is assumed here that the center of percussion is approximately the same as the center of gravity.)

A2.3 Measure the maximum height,  $h_M$ , of the center of percussion (center of gravity) of the pendulum at the start of the test as indicated in X2.16.

A2.4 Measure and record the energy correction,  $E_A$ , for windage of the pendulum plus friction in the dial, as determined with the first swing of the pendulum with no specimen in the testing device. This correction must be read on the energy scale,  $E_M$ , appropriate for the pendulum used.

A2.5 Without resetting the position of the indicator obtained in A2.4, measure the energy correction,  $E_B$ , for pendulum windage after two additional releases of the pendulum with no specimen in the testing device.

A2.6 Calculate  $\beta_{max}$  as follows:

$$\beta_{max} = \cos^{-1} \{ 1 - [(h_M/L)(1 - E_A/E_M)] \}$$

where:

$E_A$  = energy correction for windage of pendulum plus friction in dial, J (ft·lbf),

$E_M$  = full-scale reading for pendulum used, J (ft·lbf),

$L$  = distance from fulcrum to center of gravity of pendulum, m (ft),

$h_M$  = maximum height of center of gravity of pendulum at start of test, m (ft), and

$\beta_{max}$  = maximum angle pendulum will travel with one swing of the pendulum.

A2.7 Measure specimen breaking energy,  $E_s$ , J (ft·lbf).

A2.8 Calculate  $\beta$  for specimen measurement  $E_s$  as:

$$\beta = \cos^{-1} \{ 1 - [(h_M/L)(1 - E_s/E_M)] \}$$

where:

$\beta$  = angle pendulum travels for a given specimen, and

$E_s$  = dial reading breaking energy for a specimen, J (ft·lbf).

A2.9 Calculate total correction energy,  $E_{TC}$ , as:

$$E_{TC} = (E_A - (E_B/2))(\beta/\beta_{max}) + (E_B/2)$$

where:

$E_{TC}$  = total correction energy for the breaking energy,  $E_s$ , of a specimen, J (ft·lbf), and

$E_B$  = energy correction for windage of the pendulum, J (ft·lbf).

A2.10 Calculate the impact resistance using the following formula:

$$I_s = (E_s - E_{TC})/t$$

where:

$I_s$  = impact resistance of specimen, J/m (ft·lbf/in.) of width, and

$t$  = width of specimen or width of notch, m (in.).

## APPENDICES

### (Nonmandatory Information)

#### X1. PROCEDURE FOR THE INSPECTION AND VERIFICATION OF NOTCH

X1.1 The purpose of this procedure is to describe the microscopic method to be used for determining the radius and angle of the notch. These measurements could also be made using a comparator if available.

NOTE X1.1—The notch shall have a radius of  $0.25 \pm 0.05$  mm ( $0.010 \pm 0.002$  in.) and an angle of  $45 \pm 1^\circ$ .

X1.2 Apparatus:

X1.2.1 Optical Device with minimum magnification of 60X, Filar glass scale and camera attachment.

X1.2.2 Transparent Template, (will be developed in this procedure).

X1.2.3 Ruler.

X1.2.4 Compass.

X1.2.5 Plastic  $45^\circ$ - $45^\circ$ - $90^\circ$  Drafting Set Squares (Triangles).

X1.3 A transparent template must be developed for each magnification and for each microscope used. It is preferable that each laboratory standardize on one microscope and one magnification. It is not necessary for each laboratory to use the same magnification because each microscope and camera combination has somewhat different blowup ratios.

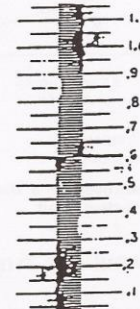
X1.3.1 Set the magnification of the optical device at a suitable magnification with a minimum magnification of 60X.

X1.3.2 Place the Filar glass slide on the microscope

platform. Focus the microscope so the most distinct image of the Filar scale is visible.

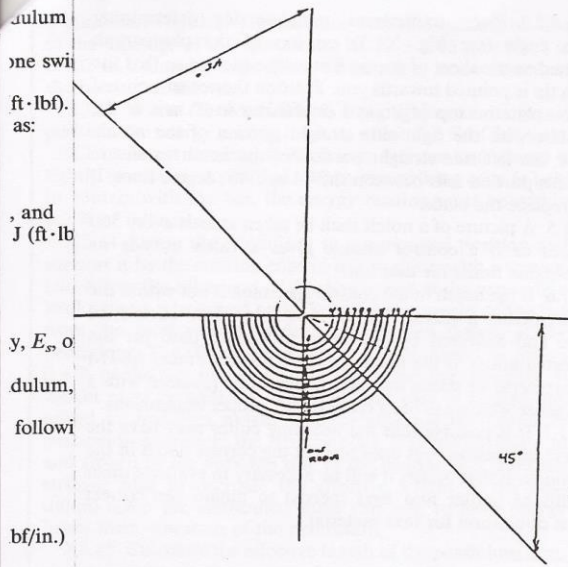
X1.3.3 Take a photograph of the Filar scale (see Fig. X1.1).

X1.3.4 Create a template similar to that shown in Fig. X1.2.

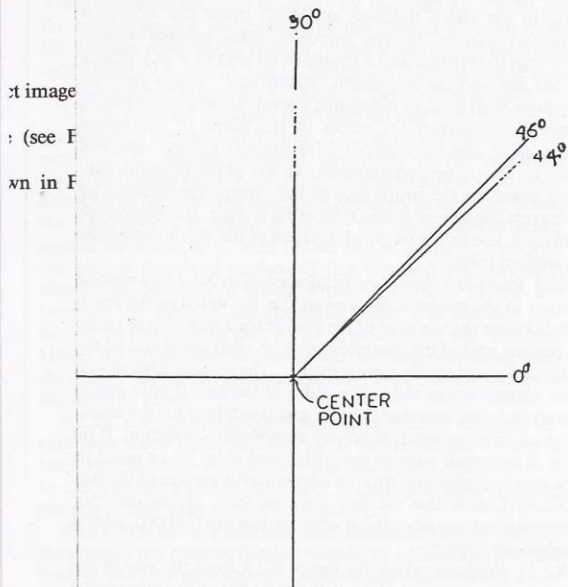


NOTE 1—100X reference.  
NOTE 2—0.1 mm major scale; 0.01 mm minor scale.

FIG. X1.1 Filar Scale



OTE—Magnification = 100X.  
**FIG. X1.2 Example of Transparent Template for Determining Radius of Notch**



**FIG. X1.3 Example of Transparent Template for Determining Angle of Notch**

X1.3.4.1 Find the approximate center of the piece of paper.

X1.3.4.2 Draw a set of perpendicular coordinates through the center point.

X1.3.4.3 Draw a family of concentric circles that are spaced according to the dimensions of the Filar scale.

X1.3.4.4 This is accomplished by first setting a mechanical compass at a distance of 0.1 mm (0.004 in.) as referenced by the magnified photograph of the Filar eyepiece. Subsequent circles shall be spaced 0.02 mm apart (0.001 in.), as rings with the outer ring being 0.4 mm (0.016 in.) from the center.

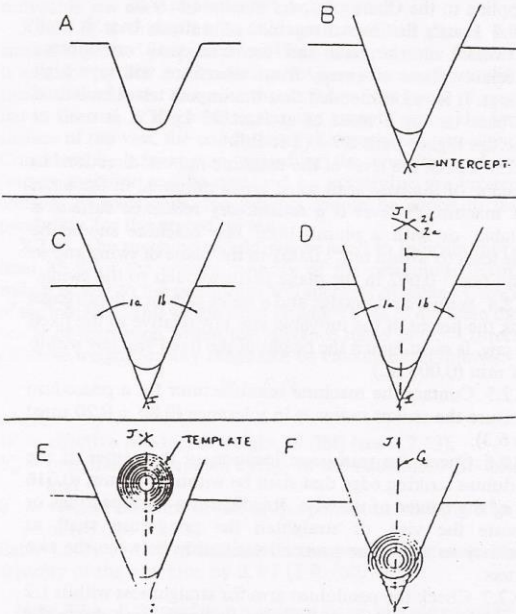
X1.3.5 Photocopy the paper with the concentric circles to make a transparent template of the concentric circles.

X1.3.6 Construct Fig. X1.3 by taking a second piece of paper and find its approximate center and mark this point. Draw one line through this center point. Label this line zero degree (0°). Draw a second line perpendicular to the first line through this center point. Label this line "90°." From the center draw a line that is 44 degrees relative to the "0°." Label the line "44°." Draw another line at 46°. Label the line "46°."

X1.4 Place a microscope glass slide on the microscope platform. Place the notched specimen on top of the slide. Focus the microscope. Move the specimen around using the platform adjusting knobs until the specimen's notch is centered and near the bottom of the viewing area. Take a picture of the notch.

X1.4.1 *Determination of Notching Radius* (see Fig. X1.4):

X1.4.1.1 Place the picture on a sheet of paper. Position the picture so that bottom of the notch in the picture faces



**FIG. X1.4 Determination of Notching Radius**



lowwards and is about 64 mm (2.5 in.) from the bottom of the paper. Tape the picture down to the paper.

X1.4.1.2 Draw two lines along the sides of the notch projecting down to a point where they intersect below Notch Point I (see Fig. X1.4).

X1.4.1.3 Open the compass to about 51 mm (2 in.). Using Point I as a reference, draw two arcs intersecting both sides of the notch (see Fig. X1.4). These intersections are called 1a and 1b.

X1.4.1.4 Close the compass to about 38 mm (1.5 in.). Using Point 1a as the reference point draw an arc (2a) above the notch, draw a second arc (2b) that intersects with arc 2a at Point J. Draw a line between I and J. This establishes the centerline of the notch (see Fig. X1.4).

X1.4.1.5 Place the transparent template on top of the picture and align the center of the concentric circles with the drawn centerline of the notch (see Fig. X1.4).

X1.4.1.6 Slide the template down the centerline of the notch until one concentric circle touches both sides of the notch. Record the radius of the notch and compare it against the ASTM limits of 0.2 to 0.3 mm (0.008 to 0.012 in.).

X1.4.1.7 Examine the notch to ensure that there are no flat spots along the measured radius.

X1.4.2 *Determination of Notch Angle:*

X1.4.2.1 Place transparent template for determining notch angle (see Fig. X1.3) on top of the photograph attached to the sheet of paper. Rotate the picture so that the notch tip is pointed towards you. Position the center point of the template on top of Point I established in 0° axis of the template with the right side straight portion of the notch. Check the left side straight portion of the notch to ensure that this portion falls between the 44 and 46° degree lines. If not, replace the blade.

X1.5 A picture of a notch shall be taken at least every 500 notches or if a control sample gives a value outside its three-sigma limits for that test.

X1.6 If the notch in the control specimen is not within the requirements, a picture of the notching blade should be taken and analyzed by the same procedure used for the specimen notch. If the notching blade does not meet ASTM requirements or shows damage, it should be replaced with a new blade which has been checked for proper dimensions.

X1.7 It is possible that the notching cutter may have the correct dimensions but does not cut the correct notch in the specimen. If that occurs it will be necessary to evaluate other conditions (cutter and feed speeds) to obtain the correct notch dimension for that material.

## X2. CALIBRATION OF PENDULUM-TYPE HAMMER IMPACT MACHINES FOR USE WITH PLASTIC SPECIMENS

X2.1 This calibration procedure applies specifically to the Izod impact machine. However, much of this procedure can be applied to the Charpy impact machine as well.

X2.2 Locate the impact machine on a sturdy base. It shall not "walk" on the base and the base shall not vibrate appreciably. Loss of energy from vibrations will give high readings. It is recommended that the impact tester be bolted to a base having a mass of at least 23 kg if it is used at capacities higher than 2.7 J (2 ft·lbf).

X2.3 Check the level of the machine in both directions in the plane of the base with spirit levels mounted in the base, by a machinist's level if a satisfactory reference surface is available, or with a plumb bob. The machine should be made level to within  $\tan^{-1} 0.001$  in the plane of swing and to within  $\tan^{-1} 0.002$  in the plane perpendicular to the swing.

X2.4 With a straightedge and a feeler gage or a depth gage, check the height of the movable vise jaw relative to the fixed vise jaw. It must match the height of the fixed vise jaw within 0.08 mm (0.003 in.).

X2.5 Contact the machine manufacturer for a procedure to ensure the striker radius is in tolerance ( $0.80 \pm 0.20$  mm) (see 6.3).

X2.6 Check the transverse location of the center of the pendulum striking edge that shall be within 0.40 mm (0.016 in.) of the center of the vise. Readjust the shaft bearings or relocate the vise, or straighten the pendulum shaft as necessary to attain the proper relationship between the two centers.

X2.7 Check the pendulum arm for straightness within 1.2 mm (0.05 in.) with a straightedge or by sighting down the shaft. Allowing the pendulum to slam against the catch

sometimes bends the arm especially when high-capacity weights are on the pendulum.

X2.8 Insert vertically and center with a locating jig and clamp in the vise a notched machined metal bar 12.7-mm (0.500-in.) square, having opposite sides parallel within 0.025 mm (0.001 in.) and a length of 60 mm (2.4 in.). Check the bar for vertical alignment within  $\tan^{-1} 0.005$  in both directions with a small machinist's level. Shim up the vise, if necessary, to correct for errors in the plane of pendulum swing, using care to preserve solid support for the vise. For errors in the plane perpendicular to the plane of pendulum swing, machine the inside face of the clamp-type locating jig for correct alignment if this type of jig is used. If a blade-type jig is used, use shims or grind the base of the vise to bring the top surface level.

X2.9 Insert and clamp the bar described in X2.8 in a vertical position in the center of the vise so that the notch in the bar is slightly below the top edge of the vise. Place a thin film of oil on the striking edge of the pendulum with an oiled tissue and let the striking edge rest gently against the bar. The striking edge should make contact across the entire width of the bar. If only partial contact is made, examine the vise and pendulum for the cause. If the cause is apparent, make the appropriate correction. If no cause is apparent, remove the striker and shim up or grind its back face to realign the striking edge with the surface of the bar.

X2.10 Check the oil line on the face of the bar for horizontal setting of striking edge within  $\tan^{-1} 0.002$  with a machinist's square.

X2.11 Without taking the bar of X2.8 from the vise of the machine, scratch a thin line at the top edge of the vise on the face opposite the striking face of the bar. Remove the bar from the vise and transfer this line to the striking face, using



a machinist's square. The distance from the striking oil line to the top edge of the vise should be  $22 \pm 0.05$  mm ( $0.87 \pm 0.002$  in.). Correct with shims or grinding, as necessary, at the bottom of the vise.

X2.12 When the pendulum is hanging free in its lowest position, the energy reading must be within 0.2 % of full scale.

X2.13 Insert the bar of X2.8 into the vise and clamp it tightly in a vertical position. When the striking edge is held in contact with the bar, the energy reading must be within 0.2 % of full scale.

X2.14 Swing the pendulum to a horizontal position and support it by the striking edge in this position with a vertical bar. Allow the other end of this bar to rest at the center of a load pan on a balanced scale. Subtract the weight of the bar from the total weight to find the effective weight of the pendulum. The effective pendulum weight should be within 0.4 % of the required weight for that pendulum capacity. If weight must be added or removed, take care to balance the added or removed weight without affecting the center of percussion relative to the striking edge. It is not advisable to add weight to the opposite side of the bearing axis from the striking edge to decrease the effective weight of the pendulum since the distributed mass can lead to large energy losses from vibration of the pendulum.

X2.15 Calculate the effective length of the pendulum arm, or the distance to the center of percussion from the axis of rotation, by the procedure in Note 7. The effective length must be within the tolerance stated in 6.3.

X2.16 Measure the vertical distance of fall of the pendulum striking edge from its latched height to its lowest point. This distance should be  $610 \pm 2.0$  mm ( $24 \pm 0.1$  in.). This measurement may be made by blocking up a level on the top of the vise and measuring the vertical distance from the striking edge to the bottom of the level (top of vise) and subtracting 22.0 mm (0.9 in.). The vertical falling distance may be adjusted by varying the position of the pendulum latch.

X2.17 Notch a standard specimen on one side, parallel to the molding pressure, at 32 mm (1.25 in.) from one end. The depth of the plastic material remaining in the specimen under the notch shall be  $10.2 \pm 0.05$  mm ( $0.400 \pm 0.002$  in.). Use a jig to position the specimen correctly in the vise. When the specimen is clamped in place, the center of the notch should be within 0.12 mm (0.005 in.) of being in line with the top of the fixed surface of the vise and the specimen should be centered midway within 0.40 mm (0.016 in.) between the sides of the clamping faces. The notched face should be the striking face of the specimen for the Izod test. Under no circumstances during the breaking of the specimen should the top of the specimen touch the pendulum except at the striking edge.

X2.18 If a clamping-type locating jig is used, examine the clamping screw in the locating jig. If the thread has a loose fit the specimen may not be correctly positioned and may tend to creep as the screw is tightened. A burred or bent point on the screw may also have the same effect.

X2.19 If a pointer and dial mechanism is used to indicate the energy, the pointer friction should be adjusted so that the pointer will just maintain its position anywhere on the scale. The striking pin of the pointer should be securely fastened to the pointer. Friction washers with glazed surfaces should be replaced with new washers. Friction washers should be on

either side of the pointer collar. A heavy metal washer should back the last friction washer installed. Pressure on this metal washer is produced by a thin-bent, spring washer and locknuts. If the spring washer is placed next to the fiber friction washer the pointer will tend to vibrate during impact.

X2.20 The free-swing reading of the pendulum (without specimen) from the latched height should be less than 2.5 % of pendulum capacity on the first swing. If the reading is higher than this, then the friction in the indicating mechanism is excessive or the bearings are dirty. To clean the bearings, dip them in grease solvent and spin-dry in an air jet. Clean the bearings until they spin freely, or replace them. Oil very lightly with instrument oil before replacing. A reproducible method of starting the pendulum from the proper height must be devised.

X2.21 The shaft about which the pendulum rotates shall have no detectable radial play (less than 0.05 mm (0.002 in.)). An endplay of 0.25 mm (0.010 in.) is permissible when a 9.8-N (2.2-lbf) axial force is applied in alternate directions.

X2.22 The clamping faces of the vise should be parallel in the horizontal and vertical directions within 0.025 mm (0.001 in.). Inserting the machined square metal bar of X2.7 into the vise in a vertical position and clamping until the jaws begin to bind may check parallelism. Any freedom between the metal bar and the clamping surfaces of the jaws of the vise must not exceed the specified tolerance.

X2.23 The top edges of the fixed and moveable jaws of the vise shall have a radius of  $0.25 \pm 0.12$  mm ( $0.010 \pm 0.005$  in.). Depending upon whether Test Method A, C, D, or E is used, a stress concentration may be produced as the specimen breaks. Consequently, the top edge of the fixed and moveable jaw needs to be carefully examined.

X2.24 If a brittle unfilled or granular-filled plastic bar such as a general-purpose wood-flour-filled phenolic material is available, notch and break a set of bars in accordance with these test methods. Examine the surface of the break of each bar in the vise. If the break is flat and smooth across the top surface of the vise, the condition of the machine is excellent. Considerable information regarding the condition of an impact machine can be obtained by examining the broken sections of specimens. No weights should be added to the pendulum for the preceding tests.

X2.25 The machine should not be used to indicate more than 85 % of the energy capacity of the pendulum. Extra weight added to the pendulum will increase available energy of the machine. This weight must be added so as to maintain the center of percussion within the tolerance stated in 6.3. Correct effective weight for any range can be calculated as follows:

$$W = E_p/h$$

where:

$W$  = effective pendulum weight, N (lbf) (see X2.13),  
 $E_p$  = potential or available energy of the machine, J (ft·lbf),  
 and  
 $h$  = vertical distance of fall of the pendulum striking edge, m (ft) (see X2.16).

Each 4.5 N (1 lbf) of added effective weight increases the capacity of the machine by 2.7 J (2 ft·lbf).

NOTE X2.1—If the pendulum is designed for use with add-on weight, it is recommended that it be obtained through the equipment manufacturer.



X3. DERIVATION OF PENDULUM IMPACT CORRECTION EQUATIONS

X3.1 From right triangle distances in Fig. X3.1:

$$L - h = L \cos \beta \tag{X3.1}$$

X3.2 But the potential energy gain of pendulum  $E_p$  is:

$$E_p = hW_p g \tag{X3.2}$$

X3.3 Combining Eqs X3.1 and X3.2 gives the following:

$$L - E_p/W_p g = L \cos \beta \tag{X3.3}$$

X3.4 The maximum energy of the pendulum is the potential energy at the start of the test,  $E_M$ , or

$$E_M = h_M W_p g \tag{X3.4}$$

X3.5 The potential energy gained by the pendulum,  $E_p$ , is related to the absorption of energy of a specimen,  $E_s$ , by the following equation:

$$E_M - E_s = E_p \tag{X3.5}$$

X3.6 Combining Eqs X3.3 through X3.5 gives the following:

$$(E_M - E_s)/E_M = L/h_M (1 - \cos \beta) \tag{X3.6}$$

X3.7 Solving Eq X3.6 for  $\beta$  gives the following:

$$\beta = \cos^{-1} \{1 - [(h_M/L)(1 - E_s/E_M)]\} \tag{X3.7}$$

X3.8 From Fig. X3.2, the total energy correction  $E_{TC}$  is given as:

$$E_{TC} = m\beta + b \tag{X3.8}$$

X3.9 But at the zero point of the pendulum potential energy:

$$E_B/2 = m(0) + b \tag{X3.9}$$

or:

$$b = E_B/2 \tag{X3.10}$$

X3.10 The energy correction,  $E_A$ , on the first swing of the pendulum occurs at the maximum pendulum angle,  $\beta_{max}$ . Substituting in Eq X3.8 gives the following:

$$E_A = m\beta_{max} + (E_B/2) \tag{X3.11}$$

X3.11 Combining Eqs X3.8 and X3.11 gives the following:

$$E_{TC} = (E_A - (E_B/2))(\beta/\beta_{max}) + (E_B/2) \tag{X3.12}$$

X3.12 Nomenclature:

- $b$  = intercept of total correction energy straight line,
- $E_A$  = energy correction, including both pendulum windage plus dial friction, J,
- $E_B$  = energy correction for pendulum windage only, J,
- $E_M$  = maximum energy of the pendulum (at the start of test), J,
- $E_p$  = potential energy gain of pendulum from the pendulum rest position, J,
- $E_s$  = uncorrected breaking energy of specimen, J,
- $E_{TC}$  = total energy correction for a given breaking energy,  $E_s$ , J,
- $g$  = acceleration of gravity, m/s<sup>2</sup>,
- $h$  = distance center of gravity of pendulum rises vertically from the rest position of the pendulum, m,
- $h_M$  = maximum height of the center of gravity of the pendulum, m,
- $m$  = slope of total correction energy straight line,
- $L$  = distance from fulcrum to center of gravity of pendulum, m,
- $W_p$  = weight of pendulum, as determined in X2.13, kg, and
- $\beta$  = angle of pendulum position from the pendulum rest position.

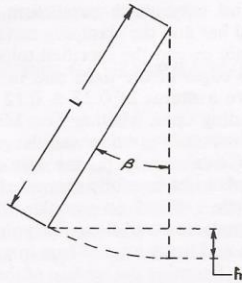


FIG. X3.1 Swing of Pendulum from Its Rest Position

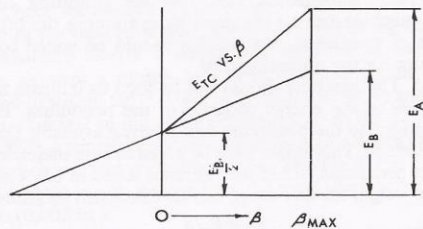


FIG. X3.2 Total Energy Correction for Pendulum Windage and Dial Friction as a Function of Pendulum Position

X4. DETERMINATION OF CLAMPING LOAD ON IZOD SPECIMENS

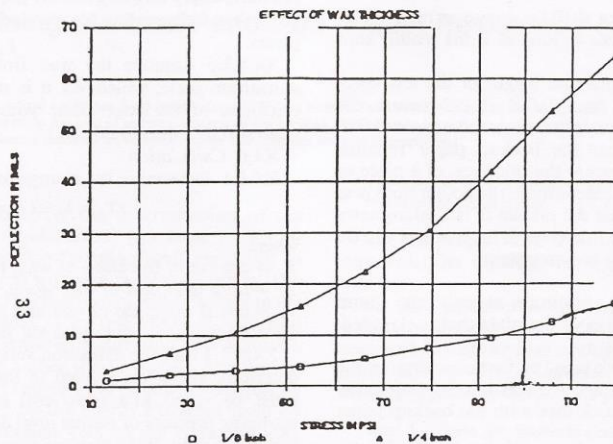


FIG. X4.1 Deflection of Wax With Loading

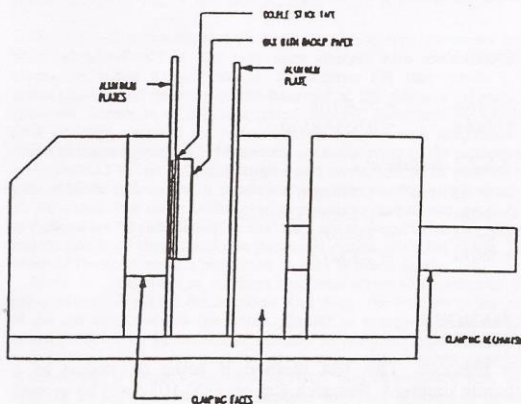


FIG. X4.2 Clamping of Wax in Izod Unit

X4.1 The purpose of this test is to determine the amount of force or pressure applied to the Izod specimen during clamping.

X4.2 The test consists of compressing a section of "high temperature wax sheets" between the two clamp surfaces of the Izod impact machine for 15 s and then measuring the change in thickness of the wax. Calculations are then made to determine the amount of pressure that was used to compress the wax. From the calculation you can then determine the amount of pressure exerted on the specimen and the actual load applied to the test specimen.

X4.3 Interferences:

X4.3.1 Each lot of wax material and thickness appears to have different levels of compressibility, so each laboratory

must establish their own standard lot of wax or one laboratory must supply the standard wax to each of the other laboratories.

X4.3.2 A wax deflection in mils versus stress (load/surface area) must be developed for each lot and thickness of wax (see Fig. X4.1) using a universal instrument for measuring tensile strength in a compressive mode at a cross-head speed of 1.3 mm/min (0.05 in./min).

X4.3.3 Clamping pressure on an Izod specimen is important when the test temperature is near the brittleness temperature of the material.

X4.4 Apparatus:

X4.4.1 *Izod Impact Machine*, with manual clamping with torque wrench attachment or pneumatic or hydraulic clamping.

X4.4.2 *Aluminum Plates*, two, cut to a size that fits within the clamping mechanism of the Izod tester and are long enough to extend about 25.4 mm (1 in.) above the clamping mechanism. The aluminum plates shall be approximately 1.3 mm (0.05 in.) thick.

X4.4.3 *High-Temperature Wax Sheets*, with a thickness of 3.2 to 6.5 mm (0.125 to 0.25 in.) with 6.5 mm (0.25 in.) preferred.<sup>11</sup>

X4.4.4 *Double-Stick Tape*, with no foam backing.

X4.4.5 *Die Cutter*, with square or rectangular dimensions that can be readily placed between the Izod clamping mechanism.

<sup>11</sup> The sole source of supply of the apparatus known to the committee at this time is McMaster-Carr Supply Co., P.O. Box 440, New Brunswick, NJ 08903, high-temperature wax sheets 3.2 mm (0.125 in.) thick: 8691K68, and high-temperature wax sheets 6.5 mm (0.25 in.) thick: 8691K75. If you are aware of alternative suppliers, please provide this information to ASTM Headquarters. Your comments will receive careful consideration at a meeting of the responsible technical committee.



X4.4.6 *Flat Tip Micrometer*, with ratchet to measure the dimensions of the die cut wax specimen.

X4.5 *Test Method:*

X4.5.1 *Test Specimen:*

X4.5.1.1 The test specimen shall be square or rectangular and may have any dimensions as long as it fits readily into the clamping mechanism.

X4.5.1.2 Measure the width and length of the test specimen to the nearest 0.025 mm (0.001 in.). Measure the thickness of the wax and backup paper to the nearest 0.025 mm (0.001 in.). Ensure that the backup paper remains attached to the test wax. Measure the thickness of a piece of backup paper combination to determine the actual thickness of the wax. Make sure you use the ratchet of the micrometer to control the pressure of the micrometer foot so that you do not compress the wax during measurement.

X4.5.2 *Test Procedure:*

X4.5.2.1 Place one of the aluminum plates in the clamp and mark on the plate the area of the plate that is clamped. Remove the aluminum plate.

X4.5.2.2 Place double-stick tape (no foam backing) in the marked area of the plate. Attach the wax and backup paper combination to the double-stick tape with the backup paper against the tape.

X4.5.2.3 See Fig. X4.2. Insert the aluminum plate with the wax on the back of the clamping surface, with the wax facing toward the front clamping surface.

X4.5.2.4 If using pneumatic or hydraulic clamping, close the clamp, wait 15 s, open the clamp, and then separate the aluminum plates. If using a torque wrench to set clamp pressure, apply torque until the proper level is obtained, wait 15 s then release the torque and separate the aluminum plates.

X4.5.2.5 Remove the wax from the backup paper or aluminum plate, whichever it is stuck to, and measure the thickness of the wax alone with the micrometer to the nearest 0.025 mm (0.001 in.).

X4.6 *Calculation:*

X4.6.1 Determine the change of thickness of the wax:

$$|T_c = T_f - (T_i - T_p)|$$

where:

$T_c$  = change in thickness of wax, mm (in.),

$T_f$  = final thickness of wax alone, mm (in.),

$T_i$  = initial thickness of wax and paper, mm (in.), and

$T_p$  = thickness of backup paper, mm (in.).

X4.6.2 From the deflection versus stress curve (Fig. X4.1) determine the stress applied to the specimen. This number must be <660 kPa (<96 psi) or you must reduce the clamping pressure or torque level depending on the clamping technique used. If the clamping pressure or torque is changed you must repeat X4.4 to X4.4.6 to obtain the proper clamping level.

X5. UNIT CONVERSIONS

X5.1 Joules per metre (J/m) cannot be converted directly into kJ/m<sup>2</sup>. Note that the optional units of kJ/m<sup>2</sup> (ft·lbf/in.<sup>2</sup>) may also be required; therefore, the cross-sectional area under the notch must be reported.

X5.2 The following examples are approximations:

X5.2.1 *Example 1:*

$$1 \text{ ft} \cdot \text{lbf} / 39.37 \text{ in.} = 1.356 \text{ J/m}$$

$$1 \text{ ft} \cdot \text{lbf} / \text{in.} = (39.37)(1.356) \text{ J/m}$$

$$1 \text{ ft} \cdot \text{lbf} / \text{in.} = 53.4 \text{ J/m}$$

$$1 \text{ ft} \cdot \text{lbf} / \text{in.} = 0.0534 \text{ kJ/m}$$

X5.2.2 *Example 2:*

$$1 \text{ ft} \cdot \text{lbf} / 1550 \text{ in.}^2 = 1.356 \text{ J/m}^2$$

$$1 \text{ ft} \cdot \text{lbf} / \text{in.}^2 = (1550)(1.356) \text{ J/m}^2$$

$$1 \text{ ft} \cdot \text{lbf} / \text{in.}^2 = 2101 \text{ J/m}^2$$

$$1 \text{ ft} \cdot \text{lbf} / \text{in.}^2 = 2.1 \text{ kJ/m}^2$$

SUMMARY OF CHANGES

This section identifies the location of selected changes to these test methods. For the convenience of the user, Committee D-20 has highlighted those changes that may impact the use of this test method. This section may also include descriptions of the changes or reasons for the changes, or both.

D 256 - 97:

(1) Test Method B (Charpy) has been removed from these

test methods. This test method is being developed as a separate standard. Research Report D20-1034 will be moved to the new Charpy standard.

(2) The designations for Test Methods A, C, D, or E remain unchanged due to potential problems with historical data.

(3) These test methods have been extensively revised, editorially and technically, with major emphasis on tolerances and units.

*The American Society for Testing and Materials takes no position respecting the validity of any patent rights asserted in connection with any item mentioned in this standard. Users of this standard are expressly advised that determination of the validity of any such patent rights, and the risk of infringement of such rights, are entirely their own responsibility.*

*This standard is subject to revision at any time by the responsible technical committee and must be reviewed every five years and if not revised, either reapproved or withdrawn. Your comments are invited either for revision of this standard or for additional standards and should be addressed to ASTM Headquarters. Your comments will receive careful consideration at a meeting of the responsible technical committee, which you may attend. If you feel that your comments have not received a fair hearing you should make your views known to the ASTM Committee on Standards, 100 Barr Harbor Drive, West Conshohocken, PA 19428.*



## Standard Test Methods for Flexural Properties of Unreinforced and Reinforced Plastics and Electrical Insulating Materials<sup>1</sup>

This standard is issued under the fixed designation D 790; the number immediately following the designation indicates the year of original adoption or, in the case of revision, the year of last revision. A number in parentheses indicates the year of last reapproval. A superscript epsilon ( $\epsilon$ ) indicates an editorial change since the last revision or reapproval.

*This standard has been approved for use by agencies of the Department of Defense.*

### 1. Scope \*

1.1 These test methods cover the determination of flexural properties of unreinforced and reinforced plastics, including high-modulus composites and electrical insulating materials in the form of rectangular bars molded directly or cut from sheets, plates, or molded shapes. These test methods are generally applicable to both rigid and semirigid materials. However, flexural strength cannot be determined for those materials that do not break or that do not fail in the outer surface of the test specimen within the 5.0 % strain limit of these test methods. These test methods utilize a three-point loading system applied to a simply supported beam.

1.1.1 *Procedure A*, designed principally for materials that break at comparatively small deflections.

1.1.2 *Procedure B*, designed particularly for those materials that undergo large deflections during testing.

1.1.3 Procedure A shall be used for measurement of flexural properties, particularly flexural modulus, unless the material specification states otherwise. Procedure B may be used for measurement of flexural strength only. Tangent modulus data obtained by Procedure A tends to exhibit lower standard deviations than comparable data obtained by means of Procedure B.

1.2 Comparative tests may be run in accordance with either procedure, provided that the procedure is found satisfactory for the material being tested.

1.3 The values stated in SI units are to be regarded as the standard. The values provided in parentheses are for information only.

1.4 *This standard does not purport to address all of the safety concerns, if any, associated with its use. It is the responsibility of the user of this standard to establish appropriate safety and health practices and determine the applicability of regulatory limitations prior to use.*

NOTE 1—These test methods are not technically equivalent to ISO 178.

<sup>1</sup> These test methods are under the jurisdiction of ASTM Committee D-20 on Plastics and are the direct responsibility of Subcommittee D20.10 on Mechanical Properties.

Current edition approved Nov. 10, 1999. Published February 2000. Originally published as D 790 – 70. Last previous edition D 790 – 98.

### 2. Referenced Documents

#### 2.1 ASTM Standards:

D 618 Practice for Conditioning Plastics and Electrical Insulating Materials for Testing<sup>2</sup>

D 638 Test Method for Tensile Properties of Plastics<sup>2</sup>

D 883 Terminology Relating to Plastics<sup>2</sup>

D 4000 Classification System for Specifying Plastic Materials<sup>3</sup>

D 5947 Test Methods for Physical Dimensions of Solid Plastic Specimens<sup>4</sup>

E 4 Practices for Load Verification of Testing Machines<sup>5</sup>

E 691 Practice for Conducting an Interlaboratory Test Program to Determine the Precision of Test Methods<sup>6</sup>

### 3. Terminology

3.1 *Definitions*—Definitions of terms applying to these test methods appear in Terminology D 883 and Annex A1 of Test Method D 638.

### 4. Summary of Test Method

4.1 A bar of rectangular cross section rests on two supports and is loaded by means of a loading nose midway between the supports (see Fig. 1). A support span-to-depth ratio of 16:1 shall be used unless there is reason to suspect that a larger span-to-depth ratio may be required, as may be the case for certain laminated materials (see Section 7 and Note 8 for guidance).

4.2 The specimen is deflected until rupture occurs in the outer surface of the test specimen or until a maximum strain (see 12.7) of 5.0 % is reached, whichever occurs first.

4.3 Procedure A employs a strain rate of 0.01 mm/mm/min (0.01 in./in./min) and is the preferred procedure for this test method, while Procedure B employs a strain rate of 0.10 mm/mm/min (0.10 in./in./min).

### 5. Significance and Use

5.1 Flexural properties as determined by these test methods

<sup>2</sup> *Annual Book of ASTM Standards*, Vol 08.01.

<sup>3</sup> *Annual Book of ASTM Standards*, Vol 08.02.

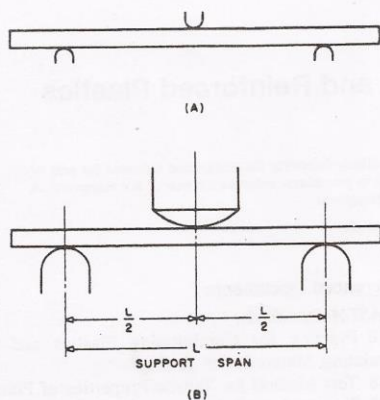
<sup>4</sup> *Annual Book of ASTM Standards*, Vol 08.03.

<sup>5</sup> *Annual Book of ASTM Standards*, Vol 03.01.

<sup>6</sup> *Annual Book of ASTM Standards*, Vol 14.02.

\*A Summary of Changes section appears at the end of this standard.





NOTE—(a) Minimum radius = 3.2 mm (1/8 in.). (b) Maximum radius supports 1.6 times specimen depth; maximum radius loading nose = 4 times specimen depth.

FIG. 1 Allowable Range of Loading Nose and Support Radii

are especially useful for quality control and specification purposes.

5.2 Materials that do not fail by the maximum strain allowed under these test methods (3-point bend) may be more suited to a 4-point bend test. The basic difference between the two test methods is in the location of the maximum bending moment and maximum axial fiber stresses. The maximum axial fiber stresses occur on a line under the loading nose in 3-point bending and over the area between the loading noses in 4-point bending.

5.3 Flexural properties may vary with specimen depth, temperature, atmospheric conditions, and the difference in rate of straining as specified in Procedures A and B (see also Note 8).

5.4 Before proceeding with these test methods, reference should be made to the specification of the material being tested. Any test specimen preparation, conditioning, dimensions, or testing parameters, or combination thereof, covered in the materials specification shall take precedence over those mentioned in these test methods. If there are no material specifications, then the default conditions apply. Table 1 in Classification System D 4000 lists the ASTM materials standards that currently exist for plastics.

## 6. Apparatus

6.1 *Testing Machine*— A properly calibrated testing machine that can be operated at constant rates of crosshead motion over the range indicated, and in which the error in the load measuring system shall not exceed  $\pm 1\%$  of the maximum load expected to be measured. It shall be equipped with a deflection measuring device. The stiffness of the testing machine shall be such that the total elastic deformation of the system does not exceed 1% of the total deflection of the test specimen during testing, or appropriate corrections shall be made. The load indicating mechanism shall be essentially free from inertial lag at the crosshead rate used. The accuracy of the testing machine

TABLE 1 Flexural Strength

Material	Mean, 10 <sup>3</sup> psi	Values Expressed in Units of % of 10 <sup>3</sup> psi			
		V <sub>r</sub> <sup>A</sup>	V <sub>r</sub> <sup>B</sup>	r <sup>C</sup>	R <sup>D</sup>
ABS	9.99	1.59	6.05	4.44	17.2
DAP thermoset	14.3	6.58	6.58	18.6	18.6
Cast acrylic	16.3	1.67	11.3	4.73	32.0
GR polyester	19.5	1.43	2.14	4.05	6.08
GR polycarbonate	21.0	5.16	6.05	14.6	17.1
SMC	26.0	4.76	7.19	13.5	20.4

<sup>A</sup> V<sub>r</sub> = within-laboratory coefficient of variation for the indicated material. It is obtained by first pooling the within-laboratory standard deviations of the test results from all of the participating laboratories:  $S_r = [((s_1)^2 + (s_2)^2 + \dots + (s_n)^2)/n]^{1/2}$  then V<sub>r</sub> = (S<sub>r</sub> divided by the overall average for the material)  $\times 100$ .

<sup>B</sup> V<sub>r</sub> = between-laboratory reproducibility, expressed as the coefficient of variation:  $S_R = (S^2 + S_e^2)^{1/2}$  where S<sub>e</sub> is the standard deviation of laboratory means. Then: V<sub>r</sub> = (S<sub>R</sub> divided by the overall average for the material)  $\times 100$ .

<sup>C</sup> r = within-laboratory critical interval between two test results =  $2.8 \times V_r$ .

<sup>D</sup> R = between-laboratory critical interval between two test results =  $2.8 \times V_R$ .

shall be verified in accordance with Practices E 4.

6.2 *Loading Noses and Supports*—The loading nose and supports shall have cylindrical surfaces. In order to avoid excessive indentation, or failure due to stress concentration directly under the loading nose, the radii of the loading nose and supports shall be  $5.0 \pm 0.1$  mm ( $0.197 \pm 0.004$  in.) unless otherwise specified or agreed upon between the interested clients. When other loading noses and supports are used they must comply with the following requirements: they shall have a minimum radius of 3.2 mm (1/8 in.) for all specimens, and for specimens 3.2 mm or greater in depth, the radius of the supports may be up to 1.6 times the specimen depth. They shall be this large if significant indentation or compressive failure occurs. The arc of the loading nose in contact with the specimen shall be sufficiently large to prevent contact of the specimen with the sides of the nose (see Fig. 1). The maximum radius of the loading nose shall be no more than 4 times the specimen depth.

NOTE 2—Test data have shown that the loading nose and support dimensions can influence the flexural modulus and flexural strength values. The loading nose dimension has the greater influence. Dimensions of the loading nose and supports must be specified in the material specification.

6.3 *Micrometers*— Suitable micrometers for measuring the width and thickness of the test specimen to an incremental discrimination of at least 0.025 mm (0.001 in.) should be used. All width and thickness measurements of rigid and semirigid plastics may be measured with a hand micrometer with ratchet. A suitable instrument for measuring the thickness of nonrigid test specimens shall have: a contact measuring pressure of  $25 \pm 2.5$  kPa ( $3.6 \pm 0.36$  psi), a movable circular contact foot  $6.35 \pm 0.025$  mm ( $0.250 \pm 0.001$  in.) in diameter and a lower fixed anvil large enough to extend beyond the contact foot in all directions and being parallel to the contact foot within 0.005 mm (0.002 in.) over the entire foot area. Flatness of foot and anvil shall conform to the portion of the Calibration section of Test Methods D 5947.

## 7. Test Specimens

7.1 The specimens may be cut from sheets, plates, or molded shapes, or may be molded to the desired finished



dimensions. The actual dimensions used in Section 4.2, Calculation, shall be measured in accordance with Test Methods D 5947.

NOTE 3—Any necessary polishing of specimens shall be done only in the lengthwise direction of the specimen.

7.2 *Sheet Materials (Except Laminated Thermosetting Materials and Certain Materials Used for Electrical Insulation, Including Vulcanized Fiber and Glass Bonded Mica):*

7.2.1 *Materials 1.6 mm (1/16 in.) or Greater in Thickness*—For flatwise tests, the depth of the specimen shall be the thickness of the material. For edgewise tests, the width of the specimen shall be the thickness of the sheet, and the depth shall not exceed the width (see Notes 4 and 5). For all tests, the support span shall be 16 (tolerance  $\pm 1$ ) times the depth of the beam. Specimen width shall not exceed one fourth of the support span for specimens greater than 3.2 mm (1/8 in.) in depth. Specimens 3.2 mm or less in depth shall be 12.7 mm (1/2 in.) in width. The specimen shall be long enough to allow for overhanging on each end of at least 10 % of the support span, but in no case less than 6.4 mm (1/4 in.) on each end. Overhang shall be sufficient to prevent the specimen from slipping through the supports.

NOTE 4—Whenever possible, the original surface of the sheet shall be unaltered. However, where testing machine limitations make it impossible to follow the above criterion on the unaltered sheet, one or both surfaces shall be machined to provide the desired dimensions, and the location of the specimens with reference to the total depth shall be noted. The value obtained on specimens with machined surfaces may differ from those obtained on specimens with original surfaces. Consequently, any specifications for flexural properties on thicker sheets must state whether the original surfaces are to be retained or not. When only one surface was machined, it must be stated whether the machined surface was on the tension or compression side of the beam.

NOTE 5—Edgewise tests are not applicable for sheets that are so thin that specimens meeting these requirements cannot be cut. If specimen depth exceeds the width, buckling may occur.

7.2.2 *Materials Less than 1.6 mm (1/16 in.) in Thickness*—The specimen shall be 50.8 mm (2 in.) long by 12.7 mm (1/2 in.) wide, tested flatwise on a 25.4-mm (1-in.) support span.

NOTE 6—Use of the formulas for simple beams cited in these test methods for calculating results presumes that beam width is small in comparison with the support span. Therefore, the formulas do not apply rigorously to these dimensions.

NOTE 7—Where machine sensitivity is such that specimens of these dimensions cannot be measured, wider specimens or shorter support spans, or both, may be used, provided the support span-to-depth ratio is at least 14 to 1. All dimensions must be stated in the report (see also Note 6).

7.3 *Laminated Thermosetting Materials and Sheet and Plate Materials Used for Electrical Insulation, Including Vulcanized Fiber and Glass-Bonded Mica*—For paper-base and fabric-base grades over 25.4 mm (1 in.) in nominal thickness, the specimens shall be machined on both surfaces to a depth of 25.4 mm. For glass-base and nylon-base grades, specimens over 12.7 mm (1/2 in.) in nominal depth shall be machined on both surfaces to a depth of 12.7 mm. The support span-to-depth ratio shall be chosen such that failures occur in the outer fibers of the specimens, due only to the bending moment (see Note 8). Therefore, a ratio larger than 16:1 may be necessary (32:1 or 40:1 are recommended). When laminated

materials exhibit low compressive strength perpendicular to the laminations, they shall be loaded with a large radius loading nose (up to four times the specimen depth to prevent premature damage to the outer fibers).

7.4 *Molding Materials (Thermoplastics and Thermosets)*—The recommended specimen for molding materials is 127 by 12.7 by 3.2 mm (5 by 1/2 by 1/8 in.) tested flatwise on a support span, resulting in a support span-to-depth ratio of 16 (tolerance  $\pm 1$ ). Thicker specimens should be avoided if they exhibit significant shrink marks or bubbles when molded.

7.5 *High-Strength Reinforced Composites, Including Highly Orthotropic Laminates*—The span-to-depth ratio shall be chosen such that failure occurs in the outer fibers of the specimens and is due only to the bending moment (see Note 8). A span-to-depth ratio larger than 16:1 may be necessary (32:1 or 40:1 are recommended). For some highly anisotropic composites, shear deformation can significantly influence modulus measurements, even at span-to-depth ratios as high as 40:1. Hence, for these materials, an increase in the span-to-depth ratio to 60:1 is recommended to eliminate shear effects when modulus data are required, it should also be noted that the flexural modulus of highly anisotropic laminates is a strong function of ply-stacking sequence and will not necessarily correlate with tensile modulus, which is not stacking-sequence dependent.

NOTE 8—As a general rule, support span-to-depth ratios of 16:1 are satisfactory when the ratio of the tensile strength to shear strength is less than 8 to 1, but the support span-to-depth ratio must be increased for composite laminates having relatively low shear strength in the plane of the laminate and relatively high tensile strength parallel to the support span.

## 8. Number of Test Specimens

8.1 Test at least five specimens for each sample in the case of isotropic materials or molded specimens.

8.2 For each sample of anisotropic material in sheet form, test at least five specimens for each of the following conditions. Recommended conditions are flatwise and edgewise tests on specimens cut in lengthwise and crosswise directions of the sheet. For the purposes of this test, "lengthwise" designates the principal axis of anisotropy and shall be interpreted to mean the direction of the sheet known to be stronger in flexure. "Crosswise" indicates the sheet direction known to be the weaker in flexure and shall be at 90° to the lengthwise direction.

## 9. Conditioning

9.1 *Conditioning*—Condition the test specimens at  $23 \pm 2^\circ\text{C}$  ( $73.4 \pm 3.6^\circ\text{F}$ ) and  $50 \pm 5\%$  relative humidity for not less than 40 h prior to testing, in accordance with Procedure A of Practice D 618, for those tests where conditioning is required unless otherwise stated in the materials specification. In cases of disagreement, the tolerances shall be  $\pm 1^\circ\text{C}$  ( $\pm 1.8^\circ\text{F}$ ) and  $\pm 2\%$  relative humidity.

9.2 *Test Conditions*—Conduct tests in the standard laboratory atmosphere of  $23 \pm 2^\circ\text{C}$  ( $73.4 \pm 3.6^\circ\text{F}$ ) and  $50 \pm 5\%$  relative humidity, unless otherwise specified in the material specification. In cases of disagreement, the tolerances shall be  $\pm 1^\circ\text{C}$  ( $\pm 1.8^\circ\text{F}$ ) and  $\pm 2\%$  relative humidity.



**10. Procedure**

**10.1 Procedure A:**

10.1.1 Use an untested specimen for each measurement. Measure the width and depth of the specimen to the nearest 0.03 mm (0.001 in.) at the center of the support span. For specimens less than 2.54 mm (0.100 in.) in depth, measure the depth to the nearest 0.003 mm (0.0005 in.). These measurements shall be made in accordance with Test Methods D 5947.

10.1.2 Determine the support span to be used as described in Section 7 and set the support span to within 1 % of the determined value.

10.1.3 For flexural fixtures that have continuously adjustable spans, measure the span accurately to the nearest 0.1 mm (0.004 in.) for spans less than 63 mm (2.5 in.) and to the nearest 0.3 mm (0.012 in.) for spans greater than or equal to 63 mm (2.5 in.). Use the actual measured span for all calculations. For flexural fixtures that have fixed machined span positions, verify the span distance the same as for adjustable spans at each machined position. This distance becomes the span for that position and is used for calculations applicable to all subsequent tests conducted at that position. See Annex A2 for information on the determination of and setting of the span.

10.1.4 Calculate the rate of crosshead motion as follows and set the machine for the rate of crosshead motion as calculated by Eq 1:

$$R = ZL^2/6d \quad (1)$$

where:

- $R$  = rate of crosshead motion, mm (in.)/min,
- $L$  = support span, mm (in.),
- $d$  = depth of beam, mm (in.), and
- $Z$  = rate of straining of the outer fiber, mm/mm/min (in./in./min).

In no case shall the actual crosshead rate differ from that calculated using Eq 1, by more than  $\pm 10$  %.

10.1.5 Align the loading nose and supports so that the axes of the cylindrical surfaces are parallel and the loading nose is midway between the supports. The parallelism of the apparatus may be checked by means of a plate with parallel grooves into which the loading nose and supports will fit when properly aligned (see A2.3). Center the specimen on the supports, with the long axis of the specimen perpendicular to the loading nose and supports.

10.1.6 Apply the load to the specimen at the specified crosshead rate, and take simultaneous load-deflection data. Measure deflection either by a gage under the specimen in contact with it at the center of the support span, the gage being mounted stationary relative to the specimen supports, or by measurement of the motion of the loading nose relative to the supports. Load-deflection curves may be plotted to determine the flexural strength, chord or secant modulus or the tangent modulus of elasticity, and the total work as measured by the area under the load-deflection curve. Perform the necessary toe compensation (see Annex A1) to correct for seating and indentation of the specimen and deflections in the machine.

10.1.7 Terminate the test when the maximum strain in the outer surface of the test specimen has reached 0.05 mm/mm (in./in.) or at break if break occurs prior to reaching the

maximum strain (Notes 9 and 10). The deflection at which this strain will occur may be calculated by letting  $r$  equal 0.05 mm/mm (in./in.) in Eq 2:

$$D = rL^2/6d \quad (2)$$

where:

- $D$  = midspan deflection, mm (in.),
- $r$  = strain, mm/mm (in./in.),
- $L$  = support span, mm (in.), and
- $d$  = depth of beam, mm (in.).

NOTE 9—For some materials that do not yield or break within the 5 % strain limit when tested by Procedure A, the increased strain rate allowed by Procedure B (see 10.2) may induce the specimen to yield or break, or both, within the required 5 % strain limit.

NOTE 10—Beyond 5 % strain, this test method is not applicable. Some other mechanical property might be more relevant to characterize materials that neither yield nor break by either Procedure A or Procedure B within the 5 % strain limit (for example, Test Method D 638 may be considered).

**10.2 Procedure B:**

10.2.1 Use an untested specimen for each measurement.

10.2.2 Test conditions shall be identical to those described in 10.1, except that the rate of straining of the outer surface of the test specimen shall be 0.10 mm/mm (in./in.)/min.

10.2.3 If no break has occurred in the specimen by the time the maximum strain in the outer surface of the test specimen has reached 0.05 mm/mm (in./in.), discontinue the test (see Note 10).

**11. Retests**

11.1 Values for properties at rupture shall not be calculated for any specimen that breaks at some obvious, fortuitous flaw, unless such flaws constitute a variable being studied. Retests shall be made for any specimen on which values are not calculated.

**12. Calculation**

12.1 To determine adequately the calculated values of some of the properties listed in this section, it is first necessary to determine if a toe compensation adjustment must be made (see Annex A1). This toe compensation correction shall be made only when it has first been shown that the toe region of the curve is due to the take-up of slack, alignment, or seating of the specimen and is not an authentic material response.

12.2 *Flexural Stress ( $\sigma_f$ )*—When a homogeneous elastic material is tested in flexure as a simple beam supported at two points and loaded at the midpoint, the maximum stress in the outer surface of the test specimen occurs at the midpoint. This stress may be calculated for any point on the load-deflection curve by means of the following equation (see Notes 11-13):

$$\sigma_f = 3PL/2bd^2 \quad (3)$$

where:

- $\sigma$  = stress in the outer fibers at midpoint, MPa (psi),
- $P$  = load at a given point on the load-deflection curve, N (lbf),
- $L$  = support span, mm (in.),
- $b$  = width of beam tested, mm (in.), and
- $d$  = depth of beam tested, mm (in.).



NOTE 11—Eq 3 applies strictly to materials for which stress is linearly proportional to strain up to the point of rupture and for which the strains are small. Since this is not always the case, a slight error will be introduced if Eq 3 is used to calculate stress for materials that are not true Hookean materials. The equation is valid for obtaining comparison data and for specification purposes, but only up to a maximum fiber strain of 5% in the outer surface of the test specimen for specimens tested by the procedures described herein.

NOTE 12—When testing highly orthotropic laminates, the maximum stress may not always occur in the outer surface of the test specimen.<sup>7</sup> Laminated beam theory must be applied to determine the maximum tensile stress at failure. If Eq 3 is used to calculate stress, it will yield an apparent strength based on homogeneous beam theory. This apparent strength is highly dependent on the ply-stacking sequence of highly orthotropic laminates.

NOTE 13—The preceding calculation is not valid if the specimen slips excessively between the supports.

12.3 *Flexural Stress for Beams Tested at Large Support Spans ( $\sigma_f$ )*—If support span-to-depth ratios greater than 16 to 1 are used such that deflections in excess of 10% of the support span occur, the stress in the outer surface of the specimen for a simple beam can be reasonably approximated with the following equation (see Note 14):

$$\sigma_f = (3PL/2bd^2)[1 + 6(D/L)^2 - 4(d/L)(D/L)] \quad (4)$$

where:

$\sigma_f$ ,  $P$ ,  $L$ ,  $b$ , and  $d$  are the same as for Eq 3, and  
 $D$  = deflection of the centerline of the specimen at the middle of the support span, mm (in.).

NOTE 14—When large support span-to-depth ratios are used, significant end forces are developed at the support noses which will affect the moment in a simple supported beam. Eq 4 includes additional terms that are an approximate correction factor for the influence of these end forces in large support span-to-depth ratio beams where relatively large deflections exist.

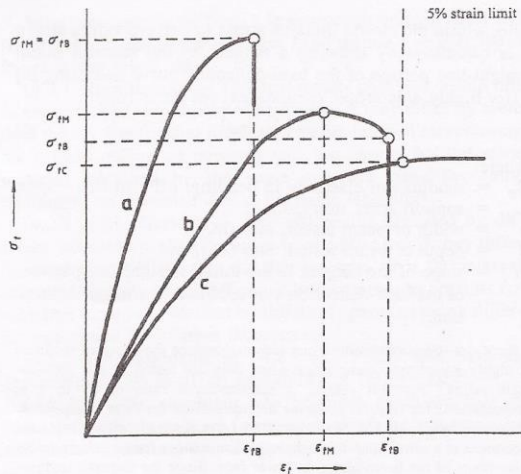
12.4 *Flexural Strength ( $\sigma_{FM}$ )*—Maximum flexural stress sustained by the test specimen (see Note 12) during a bending test. It is calculated according to Eq 3 or Eq 4. Some materials that do not break at strains of up to 5% may give a load deflection curve that shows a point at which the load does not increase with an increase in strain, that is, a yield point (Fig. 2, Curve B),  $Y$ . The flexural strength may be calculated for these materials by letting  $P$  (in Eq 3 or Eq 4) equal this point,  $Y$ .

12.5 *Flexural Offset Yield Strength*—Offset yield strength is the stress at which the stress-strain curve deviates by a given strain (offset) from the tangent to the initial straight line portion of the stress-strain curve. The value of the offset must be given whenever this property is calculated.

NOTE 15—This value may differ from flexural strength defined in 12.4. Both methods of calculation are described in the annex to Test Method D 638.

12.6 *Flexural Stress at Break ( $\sigma_{FB}$ )*—Flexural stress at break of the test specimen during a bending test. It is calculated according to Eq 3 or Eq 4. Some materials may give a load deflection curve that shows a break point,  $B$ , without a yield

<sup>7</sup> For a discussion of these effects, see Zweben, C., Smith, W. S., and Wardle, M. W., "Test Methods for Fiber Tensile Strength, Composite Flexural Modulus and Properties of Fabric-Reinforced Laminates," *Composite Materials: Testing and Design (Fifth Conference)*, ASTM STP 674, 1979, pp. 228-262.



NOTE—Curve a: Specimen that breaks before yielding.  
 Curve b: Specimen that yields and then breaks before the 5% strain limit.  
 Curve c: Specimen that neither yields nor breaks before the 5% strain limit.

FIG. 2 Typical Curves of Flexural Stress ( $\sigma_f$ ) Versus Flexural Strain ( $\epsilon_f$ )

point (Fig. 2, Curve a) in which case  $\sigma_{FB} = \sigma_{FM}$ . Other materials may give a yield deflection curve with both a yield and a break point,  $B$  (Fig. 2, Curve b). The flexural stress at break may be calculated for these materials by letting  $P$  (in Eq 3 or Eq 4) equal this point,  $B$ .

12.7 *Stress at a Given Strain*—The stress in the outer surface of a test specimen at a given strain may be calculated in accordance with Eq 3 or Eq 4 by letting  $P$  equal the load read from the load-deflection curve at the deflection corresponding to the desired strain (for highly orthotropic laminates, see Note 12).

12.8 *Flexural Strain,  $\epsilon_f$* —Nominal fractional change in the length of an element of the outer surface of the test specimen at midspan, where the maximum strain occurs. It may be calculated for any deflection using Eq 5:

$$\epsilon_f = 6Dd/L^2 \quad (5)$$

where:

- $\epsilon_f$  = strain in the outer surface, mm/mm (in./in.),
- $D$  = maximum deflection of the center of the beam, mm (in.),
- $L$  = support span, mm (in.), and
- $d$  = depth, mm (in.).
- $D$  = maximum deflection of the center of the beam, mm (in.),
- $L$  = support span, mm (in.), and
- $d$  = depth, mm (in.).

12.9 *Modulus of Elasticity:*

12.9.1 *Tangent Modulus of Elasticity*—The tangent modulus of elasticity, often called the "modulus of elasticity," is the



ratio, within the elastic limit, of stress to corresponding strain. It is calculated by drawing a tangent to the steepest initial straight-line portion of the load-deflection curve and using Eq 6 (for highly anisotropic composites, see Note 16).

$$E_B = L^3 m / 4bd^3 \quad (6)$$

where:

- $E_B$  = modulus of elasticity in bending, MPa (psi),
- $L$  = support span, mm (in.),
- $b$  = width of beam tested, mm (in.),
- $d$  = depth of beam tested, mm (in.), and
- $m$  = slope of the tangent to the initial straight-line portion of the load-deflection curve, N/mm (lbf/in.) of deflection.

NOTE 16—Shear deflections can seriously reduce the apparent modulus of highly anisotropic composites when they are tested at low span-to-depth ratios.<sup>7</sup> For this reason, a span-to-depth ratio of 60 to 1 is recommended for flexural modulus determinations on these composites. Flexural strength should be determined on a separate set of replicate specimens at a lower span-to-depth ratio that induces tensile failure in the outer fibers of the beam along its lower face. Since the flexural modulus of highly anisotropic laminates is a critical function of ply-stacking sequence, it will not necessarily correlate with tensile modulus, which is not stacking-sequence dependent.

12.9.2 *Secant Modulus*—The secant modulus is the ratio of stress to corresponding strain at any selected point on the stress-strain curve, that is, the slope of the straight line that joins the origin and a selected point on the actual stress-strain curve. It shall be expressed in megapascals (pounds per square inch). The selected point is chosen at a prespecified stress or strain in accordance with the appropriate material specification or by customer contract. It is calculated in accordance with Eq 6 by letting  $m$  equal the slope of the secant to the load-deflection curve. The chosen stress or strain point used for the determination of the secant shall be reported.

12.9.3 *Chord Modulus ( $E_f$ )*—The chord modulus may be calculated from two discrete points on the load deflection curve. The selected points are to be chosen at two prespecified stress or strain points in accordance with the appropriate material specification or by customer contract. The chosen stress or strain points used for the determination of the chord modulus shall be reported. Calculate the chord modulus,  $E_f$  using the following equation:

$$E_f = (\sigma_{f2} - \sigma_{f1}) / (\epsilon_{f2} - \epsilon_{f1}) \quad (7)$$

where:

- $\sigma_{f2}$  and  $\sigma_{f1}$  are the flexural stresses, calculated from Eq 3 or Eq 4 and measured at the predefined points on the load deflection curve, and  $\epsilon_{f2}$  and  $\epsilon_{f1}$  are the flexural strain values, calculated from Eq 5 and measured at the predetermined points on the load deflection curve.

12.10 *Arithmetic Mean*—For each series of tests, the arithmetic mean of all values obtained shall be calculated to three significant figures and reported as the “average value” for the particular property in question.

12.11 *Standard Deviation*—The standard deviation (estimated) shall be calculated as follows and be reported to two significant figures:

$$s = [\sum X^2 - n\bar{X}^2 / n - 1]^{1/2} \quad (8)$$

where:

- $s$  = estimated standard deviation,
- $X$  = value of single observation,
- $n$  = number of observations, and
- $\bar{X}$  = arithmetic mean of the set of observations.

### 13. Report

13.1 Report the following information:

- 13.1.1 Complete identification of the material tested, including type, source, manufacturer’s code number, form, principal dimensions, and previous history (for laminated materials, ply-stacking sequence shall be reported),
- 13.1.2 Direction of cutting and loading specimens, when appropriate,
- 13.1.3 Conditioning procedure,
- 13.1.4 Depth and width of specimen,
- 13.1.5 Procedure used (A or B),
- 13.1.6 Support span length,
- 13.1.7 Support span-to-depth ratio if different than 16:1,
- 13.1.8 Radius of supports and loading noses if different than 5 mm,
- 13.1.9 Rate of crosshead motion,
- 13.1.10 Flexural strain at any given stress, average value and standard deviation,
- 13.1.11 If a specimen is rejected, reason(s) for rejection,
- 13.1.12 Tangent, secant, or chord modulus in bending, average value, standard deviation, and the strain level(s) used if secant or chord modulus,
- 13.1.13 Flexural strength (if desired), average value, and standard deviation,
- 13.1.14 Stress at any given strain up to and including 5 % (if desired), with strain used, average value, and standard deviation,
- 13.1.15 Flexural stress at break (if desired), average value, and standard deviation,
- 13.1.16 Type of behavior, whether yielding or rupture, or both, or other observations, occurring within the 5 % strain limit, and
- 13.1.17 Date of specific version of test used.

TABLE 2 Flexural Modulus

Material	Mean, 10 <sup>9</sup> psi	Values Expressed in units of % of 10 <sup>9</sup> psi			
		$V_f^A$	$V_R^B$	$r^C$	$R^D$
ABS	338	4.79	7.69	13.6	21.8
DAP thermoset	485	2.89	7.18	8.15	20.4
Cast acrylic	810	13.7	16.1	38.8	45.4
GR polyester	816	3.49	4.20	9.91	11.9
GR polycarbonate	1790	5.52	5.52	15.6	15.6
SMC	1950	10.9	13.8	30.8	39.1

<sup>A</sup>  $V_f$  = within-laboratory coefficient of variation for the indicated material. It is obtained by first pooling the within-laboratory standard deviations of the test results from all of the participating laboratories:  $S_r = [(s_1)^2 + (s_2)^2 + \dots + (s_n)^2] / n$ , then  $V_f = (S_r \text{ divided by the overall average for the material}) \times 100$ .

<sup>B</sup>  $V_R$  = between-laboratory reproducibility, expressed as the coefficient of variation:  $S_R = (S_r^2 + S_L^2)^{1/2}$  where  $S_L$  is the standard deviation of laboratory means. Then:  $V_R = (S_R \text{ divided by the overall average for the material}) \times 100$ .

<sup>C</sup>  $r$  = within-laboratory critical interval between two test results =  $2.8 \times V_f$ .

<sup>D</sup>  $R$  = between-laboratory critical interval between two test results =  $2.8 \times V_R$ .

14. Precision and Bias <sup>8</sup>

14.1 Tables 1 and 2 are based on a round-robin test conducted in 1984, in accordance with Practice E 691, involving six materials tested by six laboratories using Procedure A. For each material, all the specimens were prepared at one source. Each "test result" was the average of five individual determinations. Each laboratory obtained two test results for each material.

NOTE 17—Caution: The following explanations of  $r$  and  $R$  (14.2-14.2.3) are intended only to present a meaningful way of considering the approximate precision of these test methods. The data given in Tables 2 and 3 should not be applied rigorously to the acceptance or rejection of materials, as those data are specific to the round robin and may not be representative of other lots, conditions, materials, or laboratories. Users of these test methods should apply the principles outlined in Practice E 691 to generate data specific to their laboratory and materials, or between specific laboratories. The principles of 14.2-14.2.3 would then be valid for such data.

14.2 Concept of "r" and "R" in Tables 1 and 2—If  $S_r$  and

<sup>8</sup> Supporting data are available from ASTM Headquarters. Request RR: D20-1128.

$S_R$  have been calculated from a large enough body of data, and for test results that were averages from testing five specimens for each test result, then:

14.2.1 *Repeatability*—Two test results obtained within one laboratory shall be judged not equivalent if they differ by more than the  $r$  value for that material.  $r$  is the interval representing the critical difference between two test results for the same material, obtained by the same operator using the same equipment on the same day in the same laboratory.

14.2.2 *Reproducibility*—Two test results obtained by different laboratories shall be judged not equivalent if they differ by more than the  $R$  value for that material.  $R$  is the interval representing the critical difference between two test results for the same material, obtained by different operators using different equipment in different laboratories.

14.2.3 The judgments in 14.2.1 and 14.2.2 will have an approximately 95 % (0.95) probability of being correct.

14.3 *Bias*—No statement may be made about the bias of these test methods, as there is no standard reference material or reference test method that is applicable.

15. Keywords

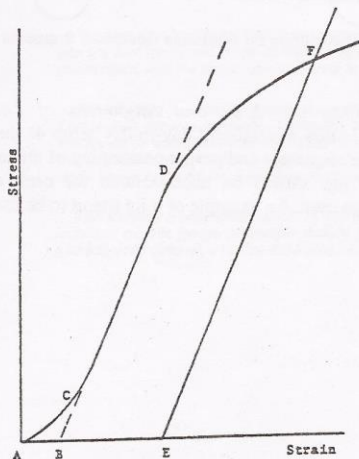
15.1 flexural properties; plastics; stiffness; strength

ANNEXES

(Mandatory Information)

A1. TOE COMPENSATION

A1.1 In a typical stress-strain curve (see Fig. A1.1) there is a toe region, AC, that does not represent a property of the



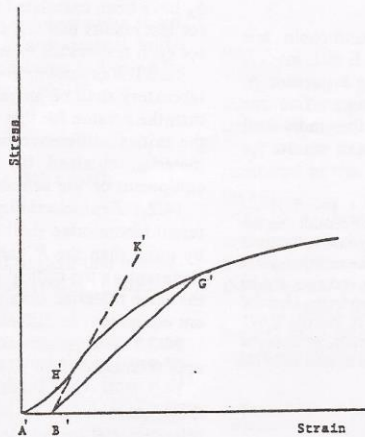
NOTE—Some chart recorders plot the mirror image of this graph.  
FIG. A1.1 Material with Hookean Region

material. It is an artifact caused by a takeup of slack and alignment or seating of the specimen. In order to obtain correct values of such parameters as modulus, strain, and offset yield point, this artifact must be compensated for to give the corrected zero point on the strain or extension axis.

A1.2 In the case of a material exhibiting a region of Hookean (linear) behavior (see Fig. A1.1), a continuation of the linear (CD) region of the curve is constructed through the zero-stress axis. This intersection (B) is the corrected zero-strain point from which all extensions or strains must be measured, including the yield offset (BE), if applicable. The elastic modulus can be determined by dividing the stress at any point along the Line CD (or its extension) by the strain at the same point (measured from Point B, defined as zero-strain).

A1.3 In the case of a material that does not exhibit any linear region (see Fig. A1.2), the same kind of toe correction of the zero-strain point can be made by constructing a tangent to the maximum slope at the inflection Point H'. This is extended to intersect the strain axis at Point B', the corrected zero-strain point. Using Point B' as zero strain, the stress at any point (G') on the curve can be divided by the strain at that point to obtain a secant modulus (slope of Line B' G'). For those materials with no linear region, any attempt to use the tangent through the inflection point as a basis for determination of an offset yield point may result in unacceptable error.





NOTE—Some chart recorders plot the mirror image of this graph.  
 FIG. A1.2 Material with No Hookean Region

## A2. MEASURING AND SETTING SPAN

A2.1 For flexural fixtures that have adjustable spans, it is important that the span between the supports is maintained constant or the actual measured span is used in the calculation of stress, modulus, and strain, and the loading nose or noses are positioned and aligned properly with respect to the supports. Some simple steps as follows can improve the repeatability of your results when using these adjustable span fixtures.

### A2.2 Measurement of Span:

A2.2.1 This technique is needed to ensure that the correct span, not an estimated span, is used in the calculation of results.

A2.2.2 Scribe a permanent line or mark at the exact center of the support where the specimen makes complete contact. The type of mark depends on whether the supports are fixed or rotatable (see Figs. A2.1 and A2.2).

A2.2.3 Using a vernier caliper with pointed tips that is readable to at least 0.1 mm (0.004 in.), measure the distance between the supports, and use this measurement of span in the calculations.

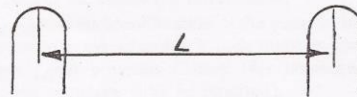


FIG. A2.1 Markings on Fixed Specimen Supports

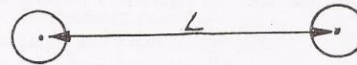


FIG. A2.2 Markings on Rotatable Specimen Supports

A2.3 *Setting the Span and Alignment of Loading Nose(s)*—To ensure a consistent day-to-day setup of the span and ensure the alignment and proper positioning of the loading nose, simple jigs should be manufactured for each of the standard setups used. An example of a jig found to be useful is shown in Fig. A2.3.

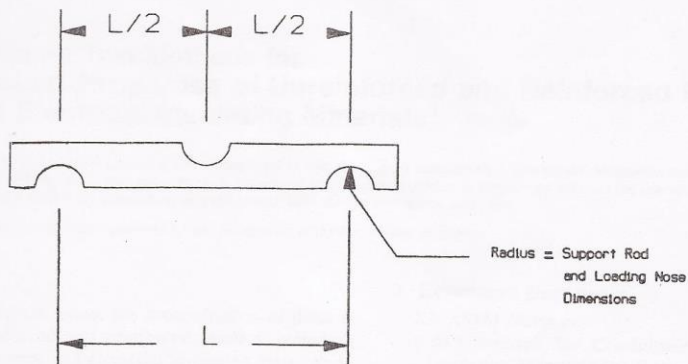


FIG. A2.3 Fixture Used to Set Loading Nose and Support Spacing and Alignment

### SUMMARY OF CHANGES

This section identifies the location of selected changes to these test methods. For the convenience of the user, Committee D-20 has highlighted those changes that may impact the use of these test methods. This section may also include descriptions of the changes or reasons for the changes, or both.

*D 790 – 98:*

(1) Section 4.2 was rewritten extensively to bring this standard closer to ISO 178.

(2) Fig. 2 was added to clarify flexural behaviors that may be observed and to define what yielding and breaking behaviors

look like, as well as the appropriate place to select these points on the stress strain curve.

*D 790 – 99:*

(1) Revised 10.1.3.

*The American Society for Testing and Materials takes no position respecting the validity of any patent rights asserted in connection with any item mentioned in this standard. Users of this standard are expressly advised that determination of the validity of any such patent rights, and the risk of infringement of such rights, are entirely their own responsibility.*

*This standard is subject to revision at any time by the responsible technical committee and must be reviewed every five years and if not revised, either reapproved or withdrawn. Your comments are invited either for revision of this standard or for additional standards and should be addressed to ASTM Headquarters. Your comments will receive careful consideration at a meeting of the responsible technical committee, which you may attend. If you feel that your comments have not received a fair hearing you should make your views known to the ASTM Committee on Standards, at the address shown below.*

*This standard is copyrighted by ASTM, 100 Barr Harbor Drive, PO Box C700, West Conshohocken, PA 19428-2959, United States. Individual reprints (single or multiple copies) of this standard may be obtained by contacting ASTM at the above address or at 610-832-9585 (phone), 610-832-9555 (fax), or service@astm.org (e-mail); or through the ASTM website (www.astm.org).*