

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA

PROGRAMA PROFESIONAL DE INGENIERÍA MECÁNICA, MECÁNICA ELÉCTRICA Y MECATRÓNICA



“OBTENCIÓN Y CARACTERIZACIÓN MECÁNICA DE COMPÓSITOS CON MATRIZ DE BIOPOLÍMERO TERMOPLÁSTICO DE PLA”

TESIS PRESENTADA POR LOS BACHILLERES:

- ESPEZÚA LEIVA, EDSON JHONATAN
- PONCE ORELLANA, ERICK MATEO

PARA OPTAR EL TÍTULO DE:

INGENIERO MECANICO ELÉCTRICISTA E
INGENIERO MECATRÓNICO.

AREQUIPA PERÚ

-2014 -

INDICE

INDICE	2
I. RESUMEN.....	11
I.I ABSTRACT.....	11
II. INTRODUCCIÓN.....	12
III. OBJETIVOS	13
OBJETIVO PRINCIPAL.....	13
OBJETIVOS ESPECÍFICOS	13
IV. JUSTIFICACIÓN.....	14
CAPÍTULO I.....	16
1. ESTRUCTURA Y PROPIEDADES DE LOS POLÍMEROS	16
1.1. Definición de Polímeros.....	16
1.1.1 Termoplásticos	16
1.1.2 Termorígidos	16
1.1.3 Elastómeros.....	17
1.1.4 Elastómeros termoplásticos	17
1.1.5 Polímeros de adición y de condensación	18
1.1.6 Estructura de los polímeros	18
1.2. Copolímeros	19
1.2.1. Ramificaciones y entrecruzamiento.....	19
1.2.1.1 Ramificaciones.....	19
1.2.1.2 Entrecruzados.....	20
1.2.2. Configuración	20
1.2.3. Estado amorfo y estado semicristalinos.	21

1.2.3.1 Polímeros Amorfos.....	21
1.2.3.2 Polímeros Semicristalinos.....	21
1.3. Propiedades comunes de los polímeros.....	22
1.3.1 Propiedades Mecánicas	22
1.3.2 Propiedades Térmicas.....	23
1.3.3 Propiedades Eléctricas	25
1.3.4 Propiedades Químicas	25
1.3.5 Propiedad de Absorción de humedad.....	25
1.3.6 Propiedades de Permeabilidad	26
1.3.7 Propiedades de Fricción y Desgaste.....	26
1.3.8 Comportamiento viscoelástico	27
1.4 Comportamiento reológico de polímeros fundidos y en disolución	28
1.4.1. Viscosidad en cizalla.....	28
1.4.2. Viscosidad extensional	28
1.4.3. Fluidos Newtonianos y no Newtonianos.....	29
1.4.3.1. Variación de la viscosidad con la velocidad de deformación	30
1.4.3.2. Variación de la viscosidad con el tiempo de aplicación de la cizalla. ..	31
1.4.3.3. Variación de la viscosidad con la temperatura.....	32
1.4.3.4. Variación de la viscosidad con la presión	32
1.4.4. Curvas de flujo en polímeros.....	33
1.5. Propiedades mecánicas	36
1.5.1. Ensayos de tracción.....	36
1.5.2. Ensayos de flexión	37
1.5.3. Ensayos de compresión	37
1.5.4. Ensayos de impacto.....	38
1.5.4.1. Ensayos tipo péndulo	38

1.5.4.2. Ensayos tipo dardo	39
1.5.4.3. Ensayos de impacto con equipos instrumentados.....	40
1.5.5. Ensayos de fluencia.....	40
1.5.6. Ensayos de relajación de esfuerzos.....	41
1.6 Clasificación de los polímeros	41
1.6.1 Polímeros Termoplásticos.....	41
1.6.2 Polímeros Termorígidos	43
CAPÍTULO II	44
POLÍMEROS Y COMPUESTOS BIODEGRADABLES	44
2.1. Materiales biodegradables poliméricos.....	44
2.1.2. Tipos de polímeros biodegradables.....	46
2.1.2.1. Polímeros biodegradables naturales.....	46
2.1.2.2. Polímeros biodegradables modificados.....	48
2.1.2.3. Polímeros sintéticos.....	51
2.2. Síntesis, propiedades y aplicaciones del Ácido Poliláctico (PLA)	52
2.2.1. Síntesis y composición del PLA.....	52
2.2.2 Obtención de ácido poliláctico	55
2.2.3. Propiedades mecánicas del PLA.....	57
2.2.3.1. Propiedades a tracción y flexión	58
2.2.3.2. Resistencia al impacto	59
2.2.4. Biodegradación del PLA.....	60
2.2.5. Métodos de procesamiento del PLA	63
2.2.5.1. Secado y extruido	63
2.2.5.2. Moldeo por inyección.....	64
2.2.5.3. Moldeo por soplado y estiramiento	65
2.2.5.4. Moldeo de película y laminado.....	65

2.2.5.5. Soplado de película	66
2.2.5.6. Termoformado	66
2.2.6. Aplicaciones industriales del PLA.....	67
2.3. Compuestos biodegradables	71
2.3.1 Polímeros biodegradables modificados reforzados con fibras naturales. ..	71
2.3.1.1 Fibras naturales.....	73
2.3.1.2 Fibras minerales.....	74
2.3.1.3. Fibra vegetal	75
2.3.3 Biocompuestos (green composites)	78
2.3.3.1. Biocompuestos elaborados a base de PLA	78
2.3.3.2. Propiedades mecánicas de biocompuestos PLA/fibras naturales	80
CAPITULO III	81
MATERIALES Y MÉTODOS	81
3.1. Materiales y equipos de ensayo	81
3.1.1. Materiales	81
3.2. Estrategia metodológica	87
3.2.1. Elaboración de láminas de material compuesto.....	87
3.2.2. Obtención de probetas normalizadas.....	88
CAPÍTULO IV	91
RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	91
4.1. Resultados de Prueba de Tracción.....	91
4.2. Resultados de Prueba de flexión	98
4.3. Resultados de Prueba de Dureza.....	100
4.4. Resultados de Prueba de Densidad	102
CONCLUSIONES.....	104
RECOMENDACIONES.....	105

BIBLIOGRAFÍA.....	106
ANEXOS NORMAS	108



Índice de Figuras

Figura N°1: Estructuras ramificadas.....	20
Figura N°2: Estructuras entrecruzadas.....	20
Figura N°3: Polímero de estructura amorfa.....	21
Figura N°4: Polímero de estructura cristalina.....	22
Figura N°5: Cadena de polímero estado aleatorio.....	34
Figura N°6: Cadena de polímeros reordenada.....	35
Figura N°7: Cadenas de polímeros alineadas.....	35
Figura N°8: Ensayo de péndulo.....	38
Figura N°9: Apertura de anillo del dímero cíclico del ácido láctico.....	50
Figura N°10: Representación de la molécula básica del ácido poliláctico.....	53
Figura N°11: Ácido láctico con sus isómeros D y L.....	53
Figura N°12: Vías para la polimerización del ácido poliláctico.....	56
Figura N°13: Diagrama extrusadora.....	64
Figura N°14: Diagrama maquina inyección.....	65
Figura N°15: Fibras naturales.....	73
Figura N°16: Clasificaciones de fibras.....	77
Figura N°17: PLA.....	81

Figura N° 18: Soga.....	81
Figura N°19: Alcohol polivinílico.....	82
Figura N°20: Equipo pruebas tracción.....	83
Figura N°21: Equipo Brabender.....	83
Figura N°22: Prensa.....	84
Figura N°23: Planchas inoxidables.....	84
Figura N°24: espátulas y utensilios.....	85
Figura N°25: balanza.....	85
Figura N° 26: Prensa probetas.....	85
Figura N°27: troquel.....	86
Figura N°28: Equipo dureza.....	86
Figura N°29: EPPs.....	87
Figura N°30: Pesaje material.....	88
Figura N°31: Materiales ingresos a brabender para termofundirlos.....	88
Figura N°32. Lamina de PLA.....	88
Figura N° 33: Probetas obtenidas de láminas.....	89
Figura N°34: Probetas de PLA.....	89
Figura N°35: Probetas de PLA con 0.5 gr soga.....	89
Figura N°36: Probetas de PLA con 2 gr de soga.....	90

Figura N°37: Pruebas tracción.....	94
Figura N°38: Pruebas tracción 2.....	96
Figura N°39: Probetas prueba flexión.....	98
Figura N°40: Pruebas tracción 1.....	98
Figura N°41: Pruebas tracción 2.....	99
Figura N°42: Probeta densidad.....	102

Índice de Tablas

Tabla N°1: Propiedades térmicas.....	24
Tabla N°2: Aplicación polímeros.....	41
Tabla N°3: Propiedades PLA.....	59
Tabla N°4: Empresas productoras a nivel global.....	68
Tabla N°5: Usos PLA	69
Tabla N°6: Usos PLA 2.....	70
Tabla N°7: Características sogas.....	76
Tabla N°8: Características fibras.....	77
Tabla N°9: Composición fibras vegetales.....	78
Tabla N°10: Pruebas tracción PLA.....	91
Tabla N°11: Ensayo tracción PLA puro.....	91
Tabla N°12: Resultados PLA puro.....	92

Tabla N°13: Ensayo tracción PLA con 0.5 gr sogá.....	93
Tabla N°14: Resultados PLA con 0.5 sogá.....	93
Tabla N°15: Ensayo tracción PLA con 2 gr sogá.....	95
Tabla N°16: Ensayo tracción con 2 gr sogá.....	95
Tabla N°17: Características polímeros más usados.....	97
Tabla N°18: Resultados flexión.....	99
Tabla N°19: Resultados pruebas dureza.....	100
Tabla N°20: Norma dureza.....	101
Tabla N°21: Resultados prueba densidad.....	102

Índice de Gráficas y cuadros

Grafica N°1: Curva de flujo.....	33
Grafica N°2: Ensayo tracción PLA puro.....	92
Gráfica n°3: Ensayo tracción con PLA 0.5 de sogá.....	94
Grafica N°4: Ensayo tracción PLA con 2 gr sogá.....	96
Grafica N°5: resultados graficas flexión.....	100
Grafica N°6: Resultados dureza graficas.....	101
Grafica N°7: resultados densidad.....	103
Cuadro N°1: Resistencia a la tracción polímeros.....	97

I. RESUMEN

El desarrollo de la presente tesis implicó la preparación de films y probetas de ácido poliláctico (PLA) y PLA reforzado con sogá y/o maguey, los cuales son materiales biodegradables. Los films se obtuvieron utilizando los equipos Brabender, troquel, Prensa Hidráulica y otros. Se elaboraron mecánicamente para obtener probetas normalizadas de materiales compuestos con matriz de biopolímero termoplástico de PLA, reforzándolos con fibras vegetales para su aplicación en diseños de piezas y estructuras de ingeniería.

A las probetas se les realizaron pruebas de tracción, flexión y dureza, empleando equipos del laboratorio de Materiales. Los parámetros mecánicos determinados a tracción se vieron afectados progresivamente al incrementar el contenido del material aportante hasta llegar a un 10 % del peso total del film. Finalmente la simple presencia de la sogá provocó cambios en los resultados de resistencia del material evaluados en las diferentes pruebas realizadas.

I.I ABSTRACT

The development of this thesis involved the preparation of films and / or samples of polylactic acid (PLA) and PLA reinforced with rope and / or maguey, which are biodegradable materials. The films were obtained using the Brabender equipment, die, Hydraulic Press and others. They are mechanically drawn to obtain normalized Probes matrix composites with thermoplastic biopolymer PLA, backing plant fibers for application in part designs and engineering structures.

The test tubes were tested for tensile, bending and hardness using laboratory equipment Material. The tensile mechanical parameters determined were affected gradually by increasing the content of the contributor material to reach 10% of the total weight of the film. Finally, the mere presence of jute led to changes in material strength results evaluated in the different tests.

II. INTRODUCCIÓN

Los materiales compuestos, elaborados con polímeros sintéticos y biopolímeros son ampliamente consumidos por la industria, como la automotriz, deportiva, electrónica y aeronáutica, entre otras.

Biopolímeros hoy en día son incorporados en adhesivos, pinturas, lubricantes para motores, y materiales para construcción. Algunos accesorios para el deporte ya han incorporado biopolímeros en su estructura. Compuestos de matriz polimérica totalmente biodegradables han sido Investigados desde el año 2006 , desarrollaron compositos de Ácido Poliláctico (PLA) reforzado con productos naturales, usando un agente acoplador para mejorar la unión de las fases del compuesto. La investigación concluyó que este tipo de compuestos puede traer un beneficio directo en el medio ambiente, pero sobre todo que se puede implementar en la industria manufacturera de plásticos para algunas aplicaciones, ya que reduce considerablemente el gasto energético en su elaboración .

Este polímero tiene las mismas características que algunos de origen sintético, ya que se puede inyectar, extruir o termoldear, razón por la cual ha sido objeto de numerosos estudios. Los avances científicos han dotado de capacidad a los biomateriales para presentar propiedades mecánicas, comparables, a los reforzados con fibras de vidrio de carbono ,así como biodegradabilidad, retomando el concepto de compositos naturales como una alternativa sustentable de bajo impacto ambiental. La asimilación de las propiedades de los materiales convencionales en condiciones de esfuerzo, como son las cargas estructurales y condiciones dinámicas, vendría a desplazar eventualmente a la mayoría de los compositos sintéticos.

Los Procesos termoquímicos que son empleados en biopolímeros son para lograr propiedades mecánicas y estructurales adecuadas para aplicaciones donde el desgaste y los esfuerzos de torsión son las principales afecciones a las que se exponen los materiales. Un ejemplo de ello puede ser en dispositivos de frenado y, en menor grado, las manijas en la industria automotriz, ó bien en componentes para calzado deportivo de alto rendimiento. El objetivo es que estos materiales logren prestaciones dentro del rango de especificaciones de resistencia y calidad de los estándares internacionales para desgaste y torsión.

III. OBJETIVOS

OBJETIVO PRINCIPAL

Elaborar y caracterizar mecánicamente mediante ensayos normalizados probetas de materiales compuestos con matriz de biopolímero termoplástico de PLA reforzados con fibras vegetales para su aplicación en diseños de piezas y estructuras de ingeniería.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

1. Obtener las características y propiedades mecánicas básicas en los materiales compuestos con matrices de polímeros biodegradables y reforzados con fibras vegetales, a través de la teoría de comportamiento esfuerzo-deformación elástico y plástico
2. Contribuir con herramientas teóricas y experimentales que nos lleven a conocer adecuadamente el proceso de caracterización mecánica de un material compuesto biodegradable, que nos conduzca a optimizar procesos donde este fenómeno se presente.
3. Optimizar los parámetros más adecuados para el moldeo por compresión de los materiales involucrados en el compuesto
4. Comparar los resultados obtenidos de la mejor formulación con otros materiales compuestos similares

5. Visualizar las posibles aplicaciones potenciales de éstos materiales compuestos biodegradables en la industria y usos domésticos

IV. JUSTIFICACIÓN

En los últimos años, la demanda en la producción de polímeros biodegradables ha crecido muy significativamente, debido a la creciente preocupación por la preservación del medio ambiente. Como consecuencia en la mayoría de países y en nuestro país las leyes son cada vez más severas para con la disposición de residuos y deshechos que deben ir a parar a rellenos sanitarios.

Los polímeros biodegradables, tiene una ventaja frente a los plásticos manufacturados a base de petróleo ya que con las condiciones de compostaje adecuadas los polímeros biodegradables pueden degradarse en un corto período de tiempo disminuyendo así el volumen de deshechos a acumularse en los rellenos sanitarios; sin embargo éstos polímeros presentan limitaciones en sus propiedades mecánicas y en su alto costo para el desarrollo de mayores aplicaciones.

Una alternativa con proyección industrial para superar lo señalado anteriormente consiste en desarrollar biocompuestos o compuestos verdes donde la matriz biodegradable es reforzada con fibras naturales, obteniendo así un material completamente biodegradable. La presente investigación está orientada a contribuir precisamente en este último campo.

La tesis está centrada en dar los primeros pasos en nuestra Universidad en la elaboración y caracterización mecánica de probetas de polímeros biodegradables termoplásticos como matriz reforzados con fibras naturales. Así, la tesis desarrolla el tema de fabricar un material biocompuesto mostrando la sinergia de influencia

de la matriz y el refuerzo sobre sus propiedades mecánicas, en la búsqueda de obtener nuevos materiales estructurales al alcance del ingeniero en general y el ingeniero mecánico en particular, siempre con el horizonte de mejorar el cuidado del medio ambiente.



CAPÍTULO I

1. ESTRUCTURA Y PROPIEDADES DE LOS POLÍMEROS

1.1. Definición de Polímeros

Los polímeros son materiales compuestos de moléculas hechas de muchas repeticiones de una unidad más simple denominada mero.

Se consideran varios posibles esquemas de clasificación de polímeros. La categoría de clasificación típica incluyen los procesos de polimerización, elementos químicos que constituyen al monómero, estructura cristalina y no cristalina y otras más. Sin embargo, en ingeniería, la clasificación de mayor interés se establece en base tanto a sus propiedades o al uso final; encontraremos que los polímeros se clasifican en tres grupos:

1.1.1. Termoplásticos

Los polímeros termoplásticos tienen como característica que pueden calentarse desde el estado sólido hasta el estado líquido viscoso, y al enfriarse vuelven a adoptar el estado sólido; además, este ciclo de enfriamiento puede aplicarse muchas veces sin degradar al polímero. la razón de dicho comportamiento es que los polímeros Termoplásticos consisten en macromoléculas lineales (ramificadas) que no se encadenan transversalmente cuando se les calienta.

1.1.2 Termorígidos

Los polímeros termorígidos son requeridos en general por sus buenas propiedades mecánicas y térmicas, así como por su excelente resistencia a solventes y a diversos agentes químicos. No obstante, la imposibilidad de

procesarlos una vez que el polímero está formado es una limitación importante. Por este motivo, la reacción de entrecruzamiento se debe realizar en un molde con la forma final de la pieza deseada.

1.1.3 Elastómeros

Los elastómeros son aquellos materiales elásticos que recuperan casi totalmente su forma original después de liberar una fuerza sobre ellos. Son insolubles y no pueden fundir mediante calor, es decir, pueden descomponerse químicamente cuando se calientan más allá de su temperatura máxima.

Estos materiales demuestran un comportamiento que se debe a que las macromoléculas de elastómeros, en contraste con las de los termoplásticos, están entrecruzadas por enlaces químicos.

Para obtener los elastómeros se producen a partir de formulaciones que incluyen gran variedad de ingredientes que se mezclan para formar un compuesto. Estos compuestos generalmente son más viscosos y pegajosos porque utilizan al elastómero sin curar. Durante la vulcanización o reticulación, las cadenas moleculares del polímero se unen mediante enlaces químicos amplios. El desperdicio de los productos reticulados, en términos prácticos, no pueden ser reciclados.

1.1.4 Elastómeros termoplásticos

Los elastómeros termoplásticos conjugan propiedades especiales de los elastómeros con las posibilidades de transformación de los termoplásticos. Son copolímeros en bloque y aleaciones entre polímeros que cuentan con propiedades elásticas dentro de cierto rango de temperatura.

Cuando se calienta arriba de ciertos rangos de temperatura los enlaces intermoleculares desaparecen y se restituyen inmediatamente después que se enfrían, para desarrollar sus propiedades elastoméricas.

Estos polímeros llenan un hueco entre los Polímeros Termoplásticos y los Elastómeros Reticulares. Ya que pueden ser procesados e incluso reciclados de manera similar a los materiales termoplásticos, sin necesidad de vulcanización.

1.1.5 Polímeros de adición y de condensación

Polímeros de adición: En lo que es la formación de polímeros por adición se fabrica primero el monómero y a partir de ahí inicia a formarse la cadena. La molécula de monómero pasa a formar parte del polímero sin pérdida de átomos, es decir que la composición química de la cadena resultante es igual a la suma de las composiciones químicas de los monómeros que la conforman.

Polímeros de condensación: En lo que es formación de polímeros por condensación la molécula de monómero pierde átomos cuando pasa a formar parte del polímero. Por lo general se pierde una molécula pequeña, como agua o HCL gaseoso. La polimerización por condensación genera subproductos, mientras que la polimerización por adición no.

1.1.6 Estructura de los polímeros

En los polímeros se suelen considerar dos estructuras, estructura química y estructura física.

La estructura química se refiere a la construcción de la molécula individual y la estructura física al ordenamiento de unas moléculas respecto a otras; también se trata básicamente de la orientación y cristalinidad, que dependen en gran medida

de la estructura química y a su vez condicionan el comportamiento del material durante el procesado y durante su vida de servicio.

1.2. Copolímeros

Se determina el concepto de copolímeros a cuando se polimerizan dos o más monómeros diferentes se obtiene un copolímero, es decir un polímero con dos o más tipos de unidades constitucionales repetitivas en la misma cadena. Al proceso de polimerización simultánea de estas mezclas de monómeros se le conoce como copolimerización. Al realizar la copolimerización se pueden obtener materiales con propiedades que difieren de las que tendrían ambos homopolímeros por separado.

Se pueden obtener una variedad de estructuras, ya que las unidades de los monómeros pueden distribuirse en diferentes formas, dependiendo de la técnica y los monómeros empleados.

1.2.1. Ramificaciones y entrecruzamiento

1.2.1.1 Ramificaciones

Las ramificaciones se consideran cuando se sintetizan polímeros cuya cadena principal está conectada de forma lateral con otras cadenas secundarias, como se muestra en la imagen, polímeros ramificados. Las ramas, que forman parte de la cadena molecular principal, la eficacia del empaquetamiento de la cadena se aminorar con las ramificaciones y por tanto, también disminuye la densidad del polímero.

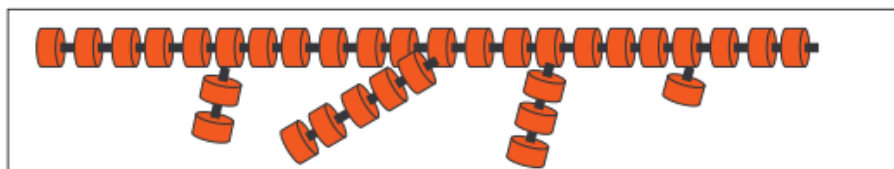


Figura N°1 Estructuras ramificadas

1.2.1.2 Entrecruzados

Se denomina polímeros entrecruzados cuando las cadenas lineales adyacentes se unen transversalmente en varias posiciones mediante enlaces covalentes. Como se aprecia en la siguiente imagen. El entrecruzamiento se puede realizar durante la síntesis o por reacciones químicas irreversibles que normalmente ocurren a elevada temperatura, a menudo el entrecruzamiento va acompañado por la adición mediante enlace covalente de átomos o moléculas a las cadenas, un ejemplo de polímeros entrecruzados son los materiales elásticos como el caucho.

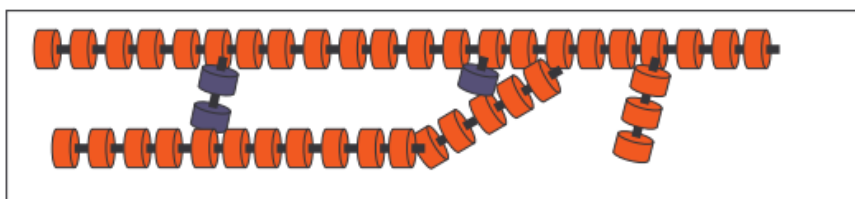


Figura N°2 Estructuras entrecruzadas

1.2.2. Configuración

Es la alineación fijada por los enlaces químicos de la molécula del polímero que no puede ser modificada solo si es que se rompen y reordenen dichos enlaces. La configuración está definida por el mecanismo y condiciones del proceso de polimerización.

Las formas en que los átomos se colocan en la cadena polimérica pueden dar lugar a una división de los polímeros según el aspecto global de las macromoléculas resultantes en lineales, ramificadas y entrecruzadas.

1.2.3. Estado amorfo y estado semicristalinos.

1.2.3.1 Polímeros Amorfos

Los termoplásticos amorfos se caracterizan porque sus moléculas filamentosas y ramificadas están en completo desorden; como puede observarse en la siguiente figura, este ordenamiento molecular permite el paso de la luz, motivo por el cual los plásticos amorfos son transparentes o traslucidos generalmente.

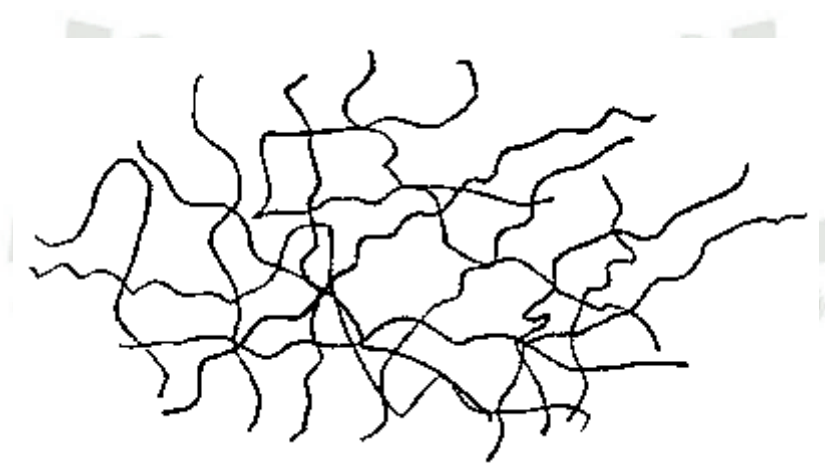


Figura N°3 Polímero de estructura amorfa

1.2.3.2 Polímeros Semicristalinos

Los Polímeros semicristalinos tienen una formación molecular relativamente buena. En el que demuestra cierto paralelismo dentro de los filamentos moleculares y sus ramificaciones más reducidas.

El ordenamiento en los tramos de macromoléculas paralelas equivale al ordenamiento de átomos o moléculas en forma de cristales, los cuales no permiten el paso de la luz ocasionando un aspecto lechoso o translúcido, como puede observarse en la siguiente figura.

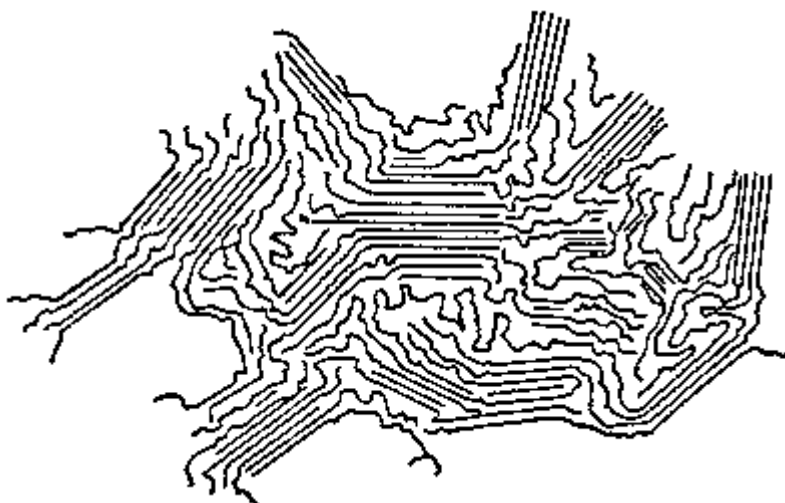


Figura N°4 Polímero de estructura cristalina

1.3. Propiedades comunes de los polímeros

1.3.1 Propiedades Mecánicas

Las características mecánicas de los plásticos muestran una resistencia mecánica relativamente menor en comparación a los metales.

- Tienen un módulo de elasticidad menor, dependencia de las propiedades mecánicas con respecto al tiempo, dependencia de la temperatura principalmente los termoplásticos.
- Cuentan con gran sensibilidad al impacto aunque en este punto existen grandes diferencias desde los quebradizos como un Poliestireno hasta un resistente Policarbonato.

Los polímeros termorígidos, debido a sus reticulaciones, no cuentan con deslizamiento interior y a eso deben ser básicamente más quebradizos que los termoplásticos.

El comportamiento de deformación y recuperación interna de los plásticos le confiere una gran propiedad llamada memoria.

También el comportamiento mecánico de los plásticos reforzados, varía en función de la cantidad, tipo de carga y materiales que contienen.

1.3.2 Propiedades Térmicas

Esta propiedad de los polímeros va en función de su estructura; En el caso de los Polímeros termorígidos son quebradizos a lo largo de todo el intervalo de temperaturas, no reblandecen y no funden; un poco debajo de su temperatura de descomposición T_f se observa una pérdida de rigidez.

Los Termoplásticos se vuelven quebradizos a bajas temperaturas que son determinados para cada uno de ellos. Si las temperaturas aumentan, el módulo de elasticidad va en descenso, es decir su rigidez disminuye.

Al adicionar calor continuo a los termoplásticos amorfos, sufren un reblandecimiento, es decir, la transición a un estado termoelástico.

En esta zona, con pequeñas fuerzas se provocan grandes deformaciones; y si el calor sigue incrementando la movilidad térmica de las moléculas provocando que las cadenas puedan deslizarse unas frente a otras. Esta zona limita con la temperatura de descomposición. Los termoplásticos semicristalinos poseen fragmentos amorfos (flexibles) en el intervalo de temperaturas de uso así como cristalinos (rígidos).

Al aumentar la temperatura es posible moldearlos cuando los fragmentos cristalinos alcanzan el intervalo de la temperatura de fusión.

Inmediatamente sigue el estado termoplástico y al seguir incrementándose la temperatura, este estado se caracteriza por la transparencia que adopta el plástico antes opaco. Esta zona limita la temperatura de descomposición del plástico.

Por su misma estructura, sufren una dilatación volumétrica relativamente grande con el aumento de temperatura. Se considera que los electrones de los plásticos carecen de movilidad, por ello, son materiales con conductividad térmica baja, siendo aislantes térmicos. A continuación mostraremos una tabla de propiedades térmicas:

Propiedades Térmicas de Polímeros.

TABLA N°1 PROPIEDADES TÉRMICAS (TEMPERATURA DE TRANSICION VITREA Y DE FUSION POLIMERICO)

Polímero	T _g (°C)	T _m (°C)
Polietileno	-125	140
Poliestireno (isotáctico)	100	240
Polipropileno (isotáctico)	25	150
Polipropileno (sindiotáctico)	---	138
Poli(acrilonitrilo) (atáctico)	85	317
Poli(cloruro de vinilo)	81	---
Poli(óxido de etileno)	-56	66
Poli(etilen tereftalato)	29	270
Poli(metacrilato de metilo)	102	---
Policarbonato	150	267
Nailon 6,6	50	265
Politetrafluoroetileno	-113	327
Polibutadieno cis	-108	148
Poliisopreno (trans)	-67	74
Poliisopreno (cis)	-75	28

Fuente: Tecnología de polímeros, M.Beltran y A.Marcilla Universidad de Alicante

1.3.3 Propiedades Eléctricas

Como ya se mencionó que los plásticos no disponen de electrones móviles libres, tienen un buen comportamiento como aislantes, se le da uso en la industria eléctrica y electrónica, por ejemplo, para carcasas, aislantes; enchufes, recubrimientos de cable y alambre, entre otros. Por todo esto, son importantes las siguientes propiedades eléctricas:

- Resistencia Superficial
- Resistencia Transversal
- Propiedades Dieléctricas
- Resistencia Volumétrica
- Resistencia al Arco

1.3.4 Propiedades Químicas

Los polímeros muestran mejores propiedades químicas en términos generales por ser los plásticos materiales inertes (no reactivos) frente a la mayoría de las sustancias líquidas, sólidas y gaseosas comunes.

Comparado con los materiales como papel, madera, carbón y metales, siendo superados únicamente por el vidrio.

Pero si los plásticos continúan mostrando crecimiento en aplicaciones que requieren contacto con diversos tipos de solventes y materiales corrosivos, aún en los que anteriormente se utilizaba vidrio, para poder cumplir esta función de recipiente se tiene que seleccionar el plástico adecuado tomando en cuenta las condiciones de presión, temperatura, humedad, intemperismo y otras que pueden acelerar algún proceso de disolución o degradación.

1.3.5 Propiedad de Absorción de humedad

Para los diferentes tipos de plásticos es distinta la propiedad de absorción, y consiste en la absorción de humedad presente en el aire o por la inmersión en

agua, siendo dependiente del grado de polaridad de cada plástico. Por ejemplo, los plásticos no polares como el PE, PP, PS, PTFE, absorben muy poca agua; en comparación, los plásticos polares como las Poliamidas o los Poliésteres termoplásticos, absorben gran cantidad de ella; en el caso de los dos últimos se requiere de secado antes de procesarlos y de un acondicionamiento en las piezas recién inyectadas para que alcancen un grado de humedad determinado.

En estos materiales el porcentaje de humedad afecta las propiedades finales de las piezas fabricadas.

1.3.6 Propiedades de Permeabilidad

La permeabilidad es una propiedad que tiene gran importancia en la utilización de los plásticos del sector envase, por ejemplo, en láminas, películas y botellas.

La permeabilidad frente a gases y vapor de agua es un criterio esencial para la selección del tipo de material, según el producto a envasar: alimentos, frutas frescas, bebidas carbonatadas, embutidos y otros. Además del tipo de plástico, la permeabilidad también depende del grosor y de la temperatura.

En la mayoría de los casos, se requiere que los materiales plásticos eviten el paso de determinados gases como el CO₂, el NO₂, el vapor de agua y otros, pero también se encuentran casos en que es importante que se permita el paso de sustancias como el O₂ en el caso de legumbres y carnes frías, que requieren “respirar” para conservar una buena apariencia.

1.3.7 Propiedades de Fricción y Desgaste

El desenvolvimiento de los plásticos ante la fricción es muy complejo, se caracteriza por la interacción de los materiales involucrados en el fenómeno, la estructura superficial el lubricante, la carga específica y la velocidad de desplazamiento. Un aplicación específica son los rodamientos, los más importante están formados por el par plástico-acero.

Un fenómeno a considerar en este caso es el desprendimiento de calor a través del elemento metálico. Por esta razón solo tiene sentido los datos de coeficientes de fricción referidos a pares de materiales específicos.

1.3.8 Comportamiento viscoelástico

Otra característica de los polímeros, tanto en estado sólido como en disolución o fundido, es su marcado comportamiento viscoelástico.

Clásicamente se ha clasificado a los materiales en dos tipos, los elásticos y los viscosos. Ambos términos se acuñaron en el siglo XVII; por una parte Robert

Hooke estableció la proporcionalidad entre la deformación y el esfuerzo aplicado a un muelle.

Los fluidos que se comportan de acuerdo con esta ley de proporcionalidad se denominan fluidos Newtonianos, siendo el agua y la glicerina los más comunes que siguen este comportamiento. Durante casi 200 años se clasificaron los materiales como fluidos de Newton o sólido de Hooke. En el siglo XVIII comenzaron las primeras dudas respecto a dicha clasificación, cuando Wilhelm Weber llevó a cabo experimentos con hilos de lana sobre los cuales aplicaba esfuerzos longitudinales, observando que para determinados esfuerzos sí se cumplía la ley de Hooke cuando la deformación causada volvía a su origen al retirar la fuerza aplicada, pero a partir de un cierto valor el hilo de lana se extendía para no volver a recuperar su longitud original, lo que en cierto modo correspondía al comportamiento esperado para los líquidos. Maxwell estableció un modelo matemático para justificar el comportamiento de sólidos como los hilos de lana empleados por Weber. En dicho modelo Maxwell propuso que las propiedades de una sustancia son una combinación de una componente elástica y otra viscosa. Este modelo es la base de los utilizados en la actualidad, y fue de gran importancia, ya que dio lugar a que en la comunidad científica de la época naciera el concepto de viscoelasticidad, que describe el comportamiento comprendido entre los extremos clásicos de una respuesta elástica de Hooke y un

comportamiento viscoso de Newton. Los polímeros presentan un comportamiento mecánico enteramente dominado por su carácter viscoelástico.

Los sólidos viscoelásticos presentan características de líquido y de sólido, con fuertes desviaciones del comportamiento Hookeano o Newtoniano, como se mostrará al comentar diferentes aspectos del comportamiento de los polímeros durante el procesado y durante su vida de servicio.

Cuando en un material viscoelástico se aplica un esfuerzo lentamente, las cadenas deslizan fácilmente una al lado de la otra, haciendo que el material se comporte como si fuera un líquido viscoso. Sin embargo al aplicar un esfuerzo rápidamente, las cadenas no tienen suficiente tiempo para deslizar con respecto a las otras, y el material se comporta como si fuera un sólido elástico.

1.4 Comportamiento reológico de polímeros fundidos y en disolución

1.4.1. Viscosidad en cizalla

Normalmente los valores de viscosidad encontrados para unos determinados valores de velocidades de cizalla no se mantienen constantes conforme aumenta el tiempo de aplicación de la deformación. Si el valor de esta viscosidad disminuye es el caso de un fluido tixotrópico, mientras que si aumenta es un fluido reopéctico. Por consiguiente, el comportamiento de un fluidos de estos tipos depende en gran medida de la historia y distintas curvas podrían obtenerse para una misma muestra, dependiendo del

1.4.2. Viscosidad extensional

Como veremos, en la mayoría de las técnicas de transformación, el movimiento del plástico en el interior de la máquina o del molde es debido a una diferencia de presión que se establece entre 2 puntos, o en ocasiones es debido al movimiento de una parte de la máquina que arrastra al material consigo. En cualquier caso, se produce el deslizamiento de unas capas de material sobre otras, de forma similar a como ocurre en el experimento descrito por Newton. La viscosidad de cizalla es,

por tanto, representativa del comportamiento del material en la mayoría de los procesos de transformación.

Sin embargo, existe un número menor de situaciones, como es por ejemplo el caso del proceso de soplado de plásticos, en las que el flujo de material es debido a esfuerzos de tensión o tracción a los que se somete al material, que tienden a estirarlo o comprimirlo (como en el hinchado de un globo). La viscosidad resultante en estos casos se conoce como viscosidad extensional y el valor de la misma es muy superior al de la viscosidad de cizalla, generalmente por un factor de 3. Este hecho resulta muy ventajoso en el soplado de películas, como veremos más adelante.

1.4.3. Fluidos Newtonianos y no Newtonianos

La diferencia entre fluidos newtonianos y fluidos no-newtonianos se encuentra en la distinta relación que existe en unos y otros entre la aplicación de un esfuerzo tangencial y la velocidad con que se deforman.

Un fluido newtoniano, también llamado fluido verdadero es aquel que, sometido a un esfuerzo tangencial o cortante, se deforma con una velocidad que es proporcional directamente al esfuerzo aplicado.

Dicho más claramente: si se aplica un esfuerzo tangencial a un fluido newtoniano, este se pondrá en movimiento sin importar cuán pequeño sea el esfuerzo tangencial y se generará una cierta distribución de velocidad en el fluido. Ese esfuerzo tangencial y el gradiente de velocidad que se produce serán directamente proporcionales, a la constante de proporcionalidad se la define como viscosidad.

Los fluidos más comunes tales como el agua, el aire y la gasolina son newtonianos en condiciones normales.

Los fluidos en los cuales el esfuerzo de corte no es directamente proporcional a la relación de deformación son no newtonianos. Estrictamente hablando la definición

de un fluido es válida solo para materiales que tienen un esfuerzo de deformación cero. Por lo común, los fluidos no newtonianos se clasifican con respecto a su comportamiento en el tiempo, es decir, pueden ser dependientes del tiempo o independientes del mismo.

Se entiende por fluido newtoniano aquel fluido cuyo valor de viscosidad, a una presión y temperatura dadas, es único independientemente de la velocidad de cizalla y del tiempo de aplicación de la cizalla. Los polímeros presentan un comportamiento newtoniano sólo en un intervalo relativamente estrecho de velocidades de cizalla, y en general, si el tiempo de aplicación de la cizalla es elevado, también sufren desviaciones del comportamiento Newtoniano. Estos son factores que se deben considerar durante el procesamiento de polímeros. En el caso de fluidos no Newtonianos la viscosidad no es constante y suele denominarse coeficiente de viscosidad.

1.4.3.1. Variación de la viscosidad con la velocidad de deformación

Es de interés industrial que una gran cantidad de fluidos presentan desviaciones de la ley de Newton al ser su viscosidad una función de la velocidad de cizalla aplicada; la diferencia básica entre el comportamiento Newtoniano y el no Newtoniano es la longitud de la molécula del fluido, de forma que aquellos fluidos con moléculas de pequeño tamaño (agua, metanol, etanol, etc.) presentan un comportamiento Newtoniano en contraposición de aquellos (disoluciones de polímeros, polímeros fundidos,...) que posean moléculas de mayor tamaño.

El comportamiento dilatante es relativamente raro y lo presentan aquellos fluidos que ven aumentada su viscosidad al incrementar la velocidad de cizalla aplicada. Este aumento fue ocasionado por la reorganización de la microestructura del material.

Los materiales pseudoplásticos son aquellos que ven reducida su viscosidad al aumentar la velocidad de deformación. Es el comportamiento más común y ha sido ampliamente estudiado. Muchas disoluciones de polímeros y polímeros fundidos muestran este tipo de comportamiento durante un amplio rango de velocidades de cizalla, siendo la pseudoplasticidad más o menos marcada dependiendo de la distribución de pesos moleculares y de la estructura del polímero en cuestión, como veremos.

En los polímeros fundidos o disueltos la pseudoplasticidad se puede explicar en base a la formación y ruptura de interacciones entre las moléculas del polímero y al desenmarañamiento de las mismas.

1.4.3.2. Variación de la viscosidad con el tiempo de aplicación de la cizalla.

A menudo los valores de viscosidad encontrados para unos determinados valores de velocidades de cizalla no se mantienen constantes conforme aumenta el tiempo de aplicación de la deformación. Si el valor de esta viscosidad disminuye es el caso de un fluido tixotrópico, mientras que si aumenta es un fluido reopéctico. Por lo tanto, el comportamiento de un fluido de este tipo depende en gran medida de la historia y distintas curvas podrían obtenerse para una misma muestra, dependiendo del procedimiento experimental. Ejemplos de fluidos tixotrópicos son pastas de almidón, gelatinas, mahonesas, pinturas, adhesivos, etc. Sin embargo la reopexia es un fenómeno más difícil de encontrar. Las causas más comunes que provocan la variación de la viscosidad con el tiempo suelen estar asociadas a ruptura o formación de agregados coloidales e interacciones que formen una estructura reticular en la muestra.

1.4.3.3. Variación de la viscosidad con la temperatura

A parte de depender de la velocidad de cizalla y del tiempo de aplicación de la misma, la viscosidad es fuertemente dependiente de la temperatura. La mayoría de los materiales disminuyen su viscosidad con la temperatura; la dependencia es exponencial y puede haber variaciones de hasta un 10% por cada °C modificado.

Por ejemplo, la sensibilidad a la temperatura del agua es de 3% por grado centígrado a temperatura ambiente, así que para tener una precisión del 1% requiere que la temperatura sea regulada en 0.3°C. Para líquidos más viscosos esta dependencia es mayor, y ha de tomarse mayores precauciones en el control de la temperatura. Respecto a los polímeros, la dependencia con la temperatura que estos presentan es lógicamente una función de la estructura y del tipo del polímero estudiado.

1.4.3.4. Variación de la viscosidad con la presión

La viscosidad de los líquidos aumenta exponencialmente con el aumento de la presión. El agua por debajo de 30°C es la única excepción, en la que disminuye en un primer momento, a continuación del cual el comportamiento es normal. Para presiones que varían poco de la atmosférica, del orden de un bar, los cambios son bastante pequeños. Por esta razón este factor apenas se toma en consideración; pero hay casos, como en la industria de lubricantes, donde las medidas de viscosidad han de tomarse a elevadas presiones.

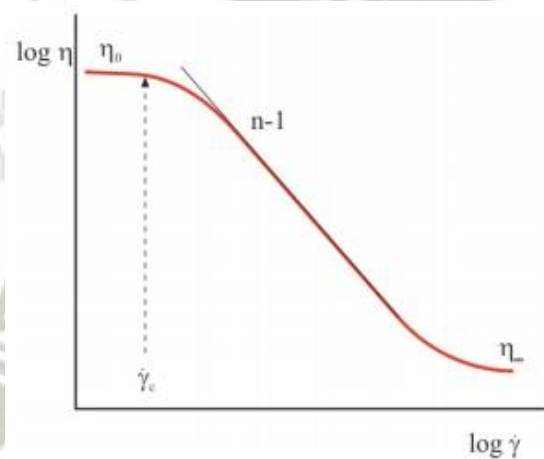
Las presiones soportadas por lubricantes en engranajes son del orden de 1GPa, mientras que en las perforadoras que operan a profundidad han de soportar presiones de aproximadamente 20 MPa.

Para el caso de los polímeros, la viscosidad del fundido se ve también afectada por la presión. La compresión de un fundido reduce el volumen libre lo que

conlleva un aumento de la viscosidad.

1.4.4. Curvas de flujo en polímeros

En la figura siguiente se muestra una curva de flujo típica (viscosidad frente a la velocidad de cizalla) para un polímero. En general, se suele observar una zona Newtoniana a bajas velocidades de cizallas (con una viscosidad η_0), hasta una velocidad de cizalla crítica, a partir de la cual se observa un descenso paulatino.



Grafica N°1 Curva de flujo

En ausencia de cizalla, un polímero fundido se encuentra en un estado aleatorio de “equilibrio”, como el de la figura

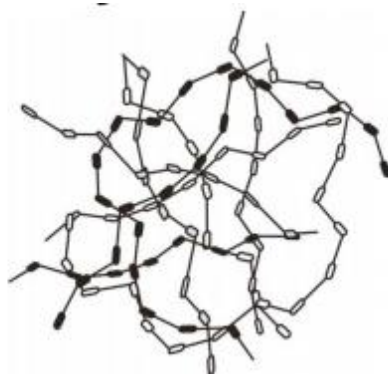


Figura N°5 Cadena de polímero estado aleatorio

En el cual la movilidad de las cadenas del polímero, propiciada por la temperatura, produce simultáneamente la desaparición y formación de interacciones entre las distintas cadenas, siendo el resultado neto nulo. La presencia de dichas interacciones y los posibles enmarañamientos entre las cadenas poliméricas son los responsables de la viscosidad del fluido en ausencia de cizalla o a valores de ésta suficientemente bajos.

Cuando comienza a actuar un esfuerzo de cizalla sobre el fluido se produce una mayor destrucción de las interacciones entre las cadenas poliméricas, pero la movilidad térmica es capaz de compensarlas creándolas por otra parte, dando lugar a cambios apenas observables en la viscosidad del fluido. Sin embargo, si se continúa aumentando el esfuerzo de cizalla, se puede alcanzar un momento a partir del cual se destruyen más interacciones de las que se crean, dando lugar a una pérdida de la estructura presente; por otra parte, se puede producir también un desenmarañamiento y un alineamiento de las cadenas poliméricas, que produce una mayor separación entre ellas, siendo el resultado neto de ambos efectos un descenso en la viscosidad del fluido (pseudoplasticidad).



Figura N°6 Cadena de polímeros reordenada

La figura representa la situación descrita en la que las cadenas de polímero tienden desenmarañarse y a alinearse en la dirección del esfuerzo aplicado y en consecuencia la resistencia que el polímero opone al flujo disminuye, lo que se corresponde con la zona pseudoplástica.

En algunas ocasiones puede ocurrir que, si la cizalla es muy elevada, todas las cadenas queden alineadas en la dirección del esfuerzo aplicado (en la siguiente figura)

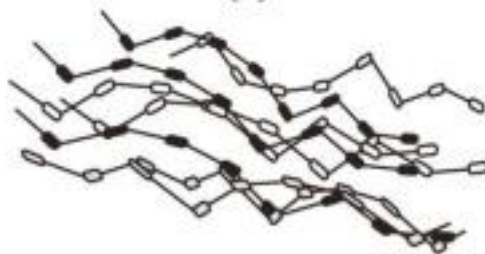


Figura N°7 cadenas de polímeros alineadas

En cuyo caso se vuelve a apreciar una nueva zona Newtoniana. La estructura del polímero peso molecular, distribución de peso molecular, contenido en ramificaciones, etc., afecta en gran medida a la forma de las curvas de flujo.

1.5. Propiedades mecánicas

1.5.1. Ensayos de tracción

La tenacidad o resistencia a la tracción es el máximo esfuerzo que un material puede resistir antes de su rotura por estiramiento desde ambos extremos con temperatura, humedad y velocidad especificadas.

El ensayo de tracción de un material consiste en someter a una probeta normalizada a un esfuerzo axial de tracción creciente hasta que se produce la rotura de la probeta. Este ensayo mide la resistencia de un material a una fuerza estática o aplicada lentamente; elongación o extensión es el máximo esfuerzo de tracción a que un material puede estar sujeto antes de su rotura.

Unidades: Para la resistencia a la tracción, el esfuerzo es la relación de la carga sobre el área de la sección transversal inicial y se expresa comúnmente en Pa (pascales). La extensión o aumento en longitud se expresa en porcentaje del largo inicial. La resistencia a la tracción y la deformación a la rotura, respectivamente indican el máximo esfuerzo que el material puede soportar.

Los equipos para realizar los ensayos de tracción constan de un brazo fijo y uno móvil, ambos dotados con unas mordazas donde se sujetan las probetas. Los brazos se separan a una velocidad constante mientras se determina la carga y la extensión.

Las propiedades mecánicas de muchos plásticos normalmente cambian rápidamente con pequeñas variaciones de temperatura. Cuando la temperatura asciende se logra una expansión gradual del material, lo que resulta en un incremento del volumen libre y en un debilitamiento de las fuerzas de cohesión del material.

Como conclusión en cuanto a esta propiedad al aumentar la temperatura la resistencia a la tracción y el módulo disminuyen, mientras que la elongación aumenta.

1.5.2. Ensayos de flexión

Este tipo de ensayo se utiliza principalmente como medida de la rigidez. El ensayo de flexión es casi tan habitual en materiales poliméricos duros como el ensayo de tracción, y tiene las ventajas de simplificar el mecanizado de las probetas y evitar los problemas asociados al empleo de mordazas. Entre los principales obstáculos se encuentra la dificultad de obtener información relevante en materiales poliméricos blandos como son las espumas flexibles y los cauchos.

El parámetro más importante que se obtiene de un ensayo de flexión es el módulo de elasticidad (también llamado módulo de flexión). Dependiendo del número de puntos de apoyo pueden realizarse varios tipos de ensayos de flexión: flexión entre puntos, en cuatro puntos o incluso flexión de una viga en voladizo. Las propiedades de flexión se calculan referidas al esfuerzo y deformación que se producen en la superficie externa de la probeta empleada.

1.5.3. Ensayos de compresión

Este ensayo se emplea para estudiar el comportamiento del material cuando está sujeto a una carga compresiva a una velocidad de carga relativamente alta y uniforme. A pesar de que en muchas aplicaciones los plásticos están sujetos a cargas de compresión, estos ensayos tienen aplicaciones limitadas. En la práctica las cargas compresivas se suelen aplicar durante periodos prolongados de tiempo.

El ensayo de flexión presenta dos panoramas aquellos polímeros que se rompen en un ensayo de compresión, la resistencia a la compresión tiene un valor definido, sin embargo en algunos casos los polímeros se siguen deformando hasta que forman una lámina muy delgada sin que se produzca una fractura bien definida. En este último caso la resistencia a la compresión obtenida del ensayo no nos logra dar un valor claro.

La máquina que se usa para poder hacer las pruebas de flexión es prácticamente la misma que se usa en los ensayos de tracción.

1.5.4. Ensayos de impacto

El ensayo de resistencia al impacto representa la resistencia o tenacidad de un material rígido a la repentina aplicación de una carga mecánica. Es convencionalmente determinado por medición de la energía requerida para fracturar una probeta bajo condiciones normalizadas. La energía absorbida en la fractura de la probeta estándar se expresa en Joule/m.

1.5.4.1. Ensayos tipo péndulo

El péndulo consta de un martillo de masa M unido a un eje de giro mediante un brazo de masa m . En su posición inicial (elevado) el péndulo posee una energía potencial E_p . En el ensayo se deja caer el péndulo y cuándo éste alcanza el punto más bajo de su recorrido toda la energía potencial se habrá transformado en cinética y el péndulo se moverá a una velocidad. En ese punto se produce el impacto sobre la probeta y ésta absorberá parte de la energía del péndulo.

El péndulo seguirá su recorrido elevándose hasta una altura h_f que depende de la cantidad de energía que le quedó disponible tras el impacto. Las probetas usadas en este ensayo tienen una hendidura para mejorar la reproducibilidad de los mismos.

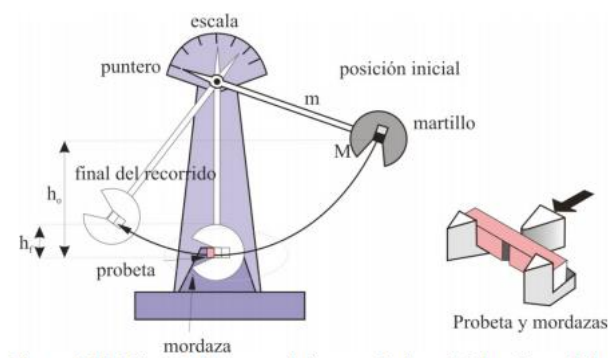


Figura N°8 Ensayo de péndulo

1.5.4.2. Ensayos tipo dardo

El principio básico de este ensayo es someter a la muestra al impacto de una masa conocida (dardo) que cae desde una altura determinada. Para realizar este tipo de ensayo las probetas tienen forma cuadrada o rectangular y pueden obtenerse por compresión, inyección o troquelándolas de una parte lisa de una pieza procesada.

Este ensayo tiene la ventaja sobre otros de que las probetas pueden proceder de piezas reales.

La versión no instrumentada de máquinas tipo dardo consta de un soporte donde se coloca la probeta, el dardo y un sistema de ejes guía graduados por donde se eleva el dardo hasta la altura deseada y por los que caerá por gravedad.

En estos equipos, la energía del impacto puede variarse de dos formas:

- Variando la masa del dardo y variando la altura desde la que se deja caer. Esta versión tradicional del equipo sólo permite determinar la energía de impacto de forma estadística por un método tipo “pasa-fallo”.
- Cuando la rotura (fallo) ocurre se disminuye la altura o la masa del dardo por un incremento estándar, hasta que la energía es insuficiente para fallo y entonces se vuelve a ir aumentando la altura o el peso hasta volver a producir fallo, y así sucesivamente.

Los resultados obtenidos son más representativos del comportamiento del plástico que los resultados de los ensayos pendulares, ya que en este caso hay menor dependencia de la geometría del ensayo, de la muestra, etc.

1.5.4.3. Ensayos de impacto con equipos instrumentados

En el caso de los equipos para ensayos de péndulo como en los de tipo dardo existe una versión instrumentada. En estos equipos el cabezal del instrumento de impacto (martillo o dardo) tiene un transductor que mide la fuerza creada por la resistencia de la muestra durante el impacto. Estos sistemas son capaces de registrar un gran número de puntos fuerza- deformación durante el tiempo en el que tiene lugar el proceso global de impacto (unos pocos milisegundos).

En los ensayos instrumentados se trabaja con un exceso de energía de impacto respecto a la que será absorbida por el material. Los equipos permiten determinar a su vez las curvas fuerza- deformación y a partir del área encerrada bajo estas curvas hasta el punto de máxima fuerza, y conocido el espesor de la probeta, calcular la energía de impacto.

1.5.5. Ensayos de fluencia

El ensayo de fluencia, al igual que los de recuperación de esfuerzos, son ensayos a largo plazo, lo que quiere decir es que se realizan durante periodos de tiempo considerables, lo cual se puede considerar que es una desventaja, si bien pueden ser más representativos del comportamiento real de materiales sometidos a este tipo de esfuerzos. En los ensayos de fluencia también es frecuente encontrar las versiones instrumentadas y no instrumentadas.

El ensayo consiste en aplicar una carga fija a una probeta en forma de paralelepípedo y determinar la deformación en función del tiempo hasta que la muestra rompe o hasta que el incremento de la deformación es muy pequeño (generalmente durante horas o días).

El comportamiento en los ensayos de fluencia varía dependiendo del tipo de plástico, sin embargo bajo el esfuerzo y temperatura adecuados, todos los plásticos exhiben un comportamiento característico de fluencia

1.5.6. Ensayos de relajación de esfuerzos

Una consecuencia importante de la naturaleza viscoelástica de los plásticos es que cuando están sujetos a una deformación determinada y esta deformación se mantiene constante, se observa que el esfuerzo necesario para conservar la deformación disminuye con el tiempo. A esto se le conoce como relajación de esfuerzos y es de vital importancia para el diseño de juntas, precintos, y muelles. Los ensayos de fluencia son mucho más frecuentes que los de relajación de esfuerzos, puesto que la forma de realizarlos es más sencilla y en el caso de los de relajación de esfuerzos no existe versión no instrumentada del equipo, sin embargo, en algunas aplicaciones se hace necesario el empleo de este tipo de ensayos. Por ejemplo, cuando se emplean hilos de plástico en los cierres de botellas que estarán expuestos a una deformación constante, se requiere que el esfuerzo de relajación sea lo menor posible. Si el esfuerzo es grande, el cierre fallará. Problemas similares pueden tener lugar en los plásticos que se utilizan como precintos y en los que contienen inserciones metálicas.

1.6 Clasificación de los polímeros

1.6.1 Polímeros Termoplásticos

Los Polímeros termoplásticos son aquellos que pueden ser ablandados y fundidos repetidas veces cuando son calentados o también cuando son tratados con un solvente apropiado, por consiguiente pueden ser conformados por varios pasos, a menos que ocurra alguna degradación o contaminación. Como ejemplo de esta clase de polímeros se tiene:

- Polietileno (PE)

- Polivinil Cloruro (PVC)
- Poliestireno (PS)
- Poliamida (PA)
- Policarbonatos

Los termoplásticos se subdividen en amorfos y semicristalinos.

Importancia de Polímeros Termoplásticos

TABLA N°2 APLICACIÓN POLÍMEROS

Área	Ventajas de los polímeros	Productos Típicos	Polímeros Aplicados
Agricultura	Resistencia a la intemperie, a prueba de corrosión y fácil moldeo.	Laminas, pasto sintético, mangueras, tubos, equipamiento y material aplicado a calor.	PE, PP, PVC , PMMA
Industria Automovilística	Baja densidad, resistencia a la corrosión, fácil moldeo, amortiguación de vibraciones silenciosas.	Batería, luces, manillas, tanques de gasolina, adhesivos, asientos, parachoques, forros, tuberías.	PA, POM, PMMA, PVC, PE, PET, ABS
Aviación	Baja densidad, amortiguación de vibraciones silenciosas.	Manillas, adhesivos, revestimientos, forros, luces, ventanas y materiales para sellado, empaques.	PA, PE, ABS, PMMA
Industrias para la construcción	Resistencia a la corrosión, flexibilidad, fácil moldeo.	Laminas, material para el techo, ventanas, instalaciones sanitarias, tuberías, adhesivos, pinturas, pisos, luz de techo.	PE, ABS, PVC, PS
Industria Eléctrica	Alta resistencia eléctrica, bajo factor de pérdida.	Cables tuberías, partes para equipar, carcasas, tableros, filamentos para capacitares, revestimientos.	PE, ABS, PVC, PS
Artículos de casa	Superficies lisas, resistencia a la corrosión.	Bolsas, utensilios de cocina y baño, juguetes.	PE, PP, PA, PVC, ABS,

Artículos de Deporte	Alta resistencia tensil, resistencia a la intemperie, duración y fácil de colorear.	Botas, zapatillas, chimpunes, coderas, pelotas, velas y otros.	PET, PE, PP, ABS, PA, PVC
Instrumentos de construcción	Resistencia a la corrosión, flexibilidad, fácil moldeo.	Guantes, carcasas, empaquetaduras, cubridores, protectores de construcción, artículos para bombeo, ventiladores, láminas para forrar.	PA, POM, PC, PVC, PTFE
Medicina	Superficies lisas pueden ser esterilizadas y son inertes.	Jeringas, tuberías, bolsas y equipamiento.	PE, PP, PVC, PS, PC
Industria Textil	Alta resistencia tensil, resistencia a la intemperie, duración y fácil de colorear.	Fibras, fabricación de hilos, zapatos, ropa y otros.	PET, PA, PAN, PE, PP, PVC, CA

Fuente: Revista tecnológica del plástico "En la era de los biodegradables, Angela Barriga

1.6.2 Polímeros Termorígidos

Se llama Polímeros Termorígidos a aquellos plásticos que se conservan rígidos y sólidos a temperaturas elevadas. Se obtienen por reticulación de productos líquidos de bajo peso molecular. Están reticulados en todas direcciones y debido a su estructura no son moldeables plásticamente, son infusibles y resisten altas temperaturas, no pueden ser disueltos y raramente se hinchan.

Y cuando están a temperatura ambiente, los materiales termorígidos generalmente son duros y frágiles. Debido a que no se funden, no son reciclables. Ejemplos de estos polímeros son:

- Resinas Epoxy
- Resinas Fenólicas
- Resinas Poliéster Insaturadas

CAPÍTULO II

POLÍMEROS Y COMPUESTOS BIODEGRADABLES

2.1. Materiales biodegradables poliméricos

Empleando la norma ASTM que indica que los plásticos biodegradables son plásticos degradables, Esta degradación consiste en una cadena de reacciones en que las moléculas pierden átomos de carbono y donde las moléculas más complejas se convierten en moléculas más simples, a su vez, actúa simultáneamente con la degradación no biológica que puede ser causada por fotodegradación, degradación o por acción de las moléculas de agua (hidrólisis). Donde la degradación resulta por la acción natural de microorganismos como bacterias, hongos y algas.

La biodegradación de los polímeros conlleva a un mejor manejo de los residuos ya que en promedio la degradación de estos polímeros (compostaje) puede demorar tiempos muy cortos (desde una semana hasta seis meses). Ayudando así a reducir la cantidad de desechos en los rellenos sanitarios. Sin embargo, la preparación de tierras para el proceso de compostaje requiere de una inversión inicial elevada para los gobiernos que quieran emplearlo, ya que para acelerar el proceso de biodegradación se debe controlar temperaturas y humedades relativas a los rellenos. Por tanto, algunos países desarrollados han invertido en el acondicionamiento de tierras que permiten una rápida biodegradación de los materiales. Esto ha creado una contradicción debido a que muchos países han iniciado la utilización de los polímeros biodegradables, a pesar que aun estos son difíciles de obtener en el mercado, sin haber invertido en zonas donde este tipo de polímeros van a ir a parar después de su vida útil. Ello implica que para el mejor empleo de los polímeros biodegradables no solo basta con la utilización sino también se debe tomar en cuenta que estos necesitan zonas adecuadas para cumplir con su proceso de biodegradación de manera eficiente.

A partir de la definición de biodegradación aparece el concepto de compostaje, que se refleja al proceso de control de la descomposición biológica (biooxidación-biodegradación), de los materiales biodegradables para convertirse en humus, en una sustancia conocida como “compost”, en este proceso se generan los siguientes productos: dióxido de carbono, agua, minerales y materia orgánica.

En cuanto al uso de los polímeros biodegradables estos han sido utilizados por más de una década, solamente en los últimos 5 años han sido producidos en una escala comercial para suplir necesidades en productos rígidos y flexibles para el empaquetamiento, bolsas, rellenos de artefactos para transporte y productos para el servicio de alimentos. De esta manera se han alcanzado diferentes grados de aceptación dependiendo de las aplicaciones antes mencionadas.

Los polímeros biodegradables están siendo fabricados por un gran número de importantes empresas. Esto se debe a que en los países desarrollados principalmente aquellos que se encuentran en el hemisferio oeste del planeta, los gobiernos han o han implementado leyes para la reducción de la cantidad de basura que se recoge por ser enviada a los rellenos sanitarios. Por lo tanto, la utilización de estos polímeros es una alternativa frente a las acciones convencionales del manejo de basura, como son: el reciclaje mecánico de los desechos, la incineración con recuperación de energía y el compostaje. Esta corriente ha creado un ambiente favorable para el desarrollo de los polímeros biodegradables.

De igual forma, hay muchas empresas y corporaciones que reconocen el potencial comercial y beneficios del empaquetamiento conocido como “verde y sustentable” como también los consumidores se encuentran más preocupados acerca del desarrollo de tecnologías sustentables con reducción de emisores de CO₂ y la conservación de los recursos fósiles de la tierra, entre ellos:

Caso Wal-mart: Quienes han incursionado en el uso de polímeros biodegradables para reducir el uso de plásticos a base de petróleo. En el 2006 esta cadena

sustituyo más de 114 millones de recipientes usados para el empaquetamiento de frutas y verduras.

2.1.2. Tipos de polímeros biodegradables

Ordenados de acuerdo con su composición química, el método de síntesis, procesamiento método, importancia económica, aplicación, etc.

Cada una de estas clasificaciones proporciona información diferente y útil. Los polímeros biodegradables pueden clasificarse básicamente en tres categorías principales;

- a) **Polímeros naturales.**- como la celulosa, el algodón y las proteínas.
- b) **Polímeros naturales modificados.**- como el acetato de celulosa o los polialcanoatos.
- c) **Polímeros sintéticos.**- como los poliésteres alifáticos formados por cadenas lineales, a diferencia de los poliésteres insaturados (aromáticos), donde sus cadenas están compuestas de grupo benceno que son los de uso común, las poliesteramidas y los poliuretanos entre otros.

2.1.2.1. Polímeros biodegradables naturales

Estos polímeros se generan en todos los organismos vivos, las reacciones de biodegradación son catalizadas con enzimas y ocurren en un medio acuoso.

Las macromoléculas contienen uniones hidrolizables, es decir que al entrar el material en contacto con el agua, el agua ingresa en la matriz polimérica y provoca hinchamiento, hidratación de las moléculas y la ruptura de la cadena principal en diferentes partes.

Un ejemplo de macromoléculas son las proteínas, celulosa y almidón, que generalmente son susceptibles a la biodegradación bajo la acción de enzimas, las mismas que son proteínas que actúan como aceleradores de las reacciones químicas de síntesis y degradación de compuestas, y que son producidas por los microorganismos (bacterias, hongos, plantas).

Las enzimas pueden ser de tres tipos:

- (i) hidrolíticas
- (ii) oxidantes
- (iii) reductoras

Dependiendo del tipo de reacción que controlen estas varían. En este caso, actúan las enzimas hidrolíticas, ya que aceleran las reacciones para producir componentes más simples por reacción con moléculas de agua, el carácter hidrofílico/hidrofóbico altera la velocidad de biodegradación y mejora el rendimiento de su durabilidad en condiciones húmedas.

Dichos polímeros son los de mayor aplicación y los representa el almidón, el cual es un termoplástico de carácter fuertemente hidrofílico, de bajo coste y alta disponibilidad.

El almidón puede usarse como aditivo biodegradable o material de sustitución en plásticos tradicionales, en la teoría acelera la degradación o la fragmentación de las cadenas de los polímeros sintéticos. La acción microbiana consume el almidón, creando poros en el material, que pueden llevar a su rotura, entre los plásticos biodegradables basados en el almidón y comercializados actualmente se puede citar sus mezclas con:

- ° Polietileno de baja densidad (EcoStar)
- ° Polietileno y poliésteres (Ecolan)
- ° Derivados de bajo peso molecular del petróleo (Novon)

° Polímeros solubles en agua y plastificante (Biofil)

° Policaprolactosa (Greenpol)

La celulosa es el polímero natural más abundante por lo que se la investiga continuamente como potencial material biodegradable. A pesar de que la celulosa natural no puede ser procesada con facilidad, puede convertirse en un material biodegradable mediante modificaciones químicas que alteren su estructura altamente ordenada, por ejemplo, el acetato de celulosa (AC) que tiene una elevada resistencia a la tracción, y la celulosa oxidada que contiene una porción sustancial de funciones carboxílicas y se usa como gasas estériles y fajas para cortar hemorragias.

2.1.2.2. Polímeros biodegradables modificados

Tenemos los poliésteres cuyos grupos funcionales son degradables hidrolíticamente. Esto les otorga un gran interés en el campo de los biomateriales, ya que pueden ser utilizados para realizar implantes y reemplazar la función de tejidos dentro de un sistema vivo, los polímeros preparados a partir de ácido glicólico (PGA) y ácido poliláctico (PLA) se aplican en la medicina, específicamente en suturas biodegradables que se comercializan desde los años de 1960.

Desde entonces diversos productos basados en el ácido láctico y glicólico, incluyendo otros materiales como homopolímeros y copolímeros de policaprolactona (PCL), y copolímeros de polidioxanona (PDO), han sido aceptados para su uso en dispositivos médicos, otra aplicación usual de los poliésteres son las bolsas de compostaje y envasado, actualmente empresas multinacionales como Danone y MacDonal's están interesadas en el desarrollo de este tipo de productos.

Este tipo de polímeros biodegradables son los más utilizados mundialmente, se presenta un breve resumen de los más conocidos de este grupo:

Ácido poliglicólico (PGA).- es el poliéster alifático lineal más simple, fue utilizado para realizar la primera sutura sintética totalmente absorbible y se comercializó como DEXON en los años 60 por la empresa Davis & Geck, inc. El monómero puede ser sintetizado mediante un proceso de dimerización del ácido glicólico, el cual por polimerización de apertura de anillo, produce un material de alto peso molecular y con un porcentaje de 1 – 3% de monómero residual. El polímero resultante se caracteriza por una elevada cristalinidad (45 – 55%), un alto punto de fusión (220 – 225°C) y una temperatura de transición vítrea de 35 – 40°C. no es soluble en muchos solventes orgánicos, a excepción de organofluorados como el hexafluoroisopropanol. Las fibras obtenidas a partir de PGA tienen un elevado módulo de Young y resistencia mecánica. Su rigidez dificulta su uso para suturas, excepto cuando se emplea como material trenzado, las suturas de PGA pierden alrededor del 50% de su resistencia después de 2 semanas, el 100% en 1 mes, y son completamente absorbidas en un rango de 4 a 6 meses. El poliglicólico ha sido copolimerizado con otros monómeros para reducir su rigidez de sus fibras.

Ácido poliláctico (PLA).- Obtenido mediante polimerización por apertura de anillo del dímero cíclico del ácido láctico, los monómeros tienen un carbono asimétrico por lo que es factible preparar polímeros con diferentes tacticidades. El homopolímero derivado de los monómeros naturales L-láctico (L-PLA), presenta un elevado número de cristalinidad (37%) debido a su estereo-regularidad. El material tiene alta resistencia a la tracción y baja elongación, por lo que consecuentemente tiene un módulo de Young elevado.

Es muy adecuado para aplicaciones que tienen que soportar una carga como son las suturas y fijaciones ortopédicas. Sus características térmicas están definidas por un elevado punto de fusión (175-178°C) y una temperatura de transición vítrea de 60-65°C.

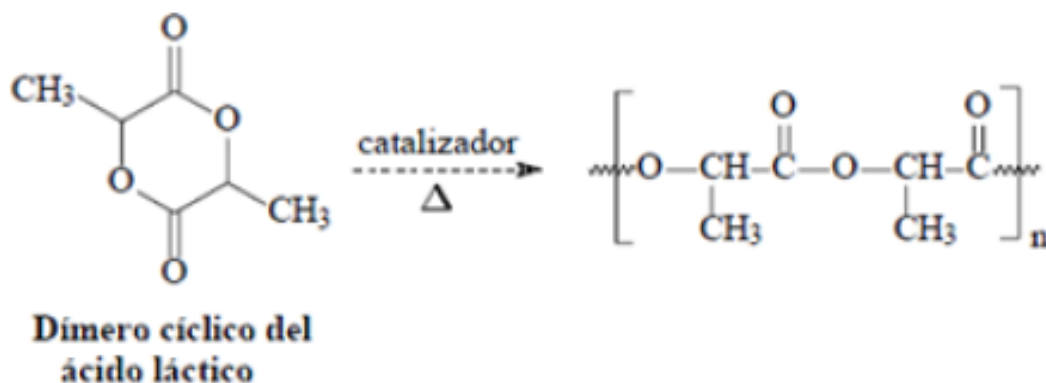


Figura N°9 Apertura de anillo del dímero cíclico del ácido láctico.

Poli (láctico-co-glicólico).- Copolímeros de ácido glicólico con ácido L-láctico y D,L-Láctico han sido desarrollados para aplicaciones en sistemas liberadores de fármacos, por ejemplo un copolímero con 50% de ácido glicólico y 50% de ácido D,L-Láctico se degrada más rápidamente que sus homopolímeros puros, el copolímero más importante presenta un 90% de ácido glicólico y un 10% de ácido L-Láctico y es desarrollado por la casa comercial Ethicon como sutura absorbible bajo el nombre de VICRYL.

Policaprolactona (PCL).- Obtenido mediante la polimerización por apertura de anillo de la caprolactona, el polímero es semicristalino, presenta un punto de fusión de 59-64°C y una temperatura de transición vítrea de 60°C. Se comporta como material biocompatible y es utilizado como sutura biodegradable. Debido a que la PCL tiene un intervalo de degradación elevado, del orden de 2 años, se han preparado copolímeros con D,L-Láctico para aumentar la velocidad de bioabsorción. También se utilizan copolímeros en bloque de PCL- co - PGA (MONOCRYL), ya que ofrecen una mayor rigidez comparada con el homopolímero PGA puro.

Poliésteres alifáticos basados en dioles y diácidos.- El interés hacia los poliésteres alifáticos derivados de dioles y ácidos carboxílicos se ha incrementado desde la presentación del polímero BIONOLLE comercializado por showa Highpolymer Co. Desde 1990, este polímero es sintetizado mediante una reacción de policondensación de etilenglicol, 1.4-butanodiol y ácidos dicarboxílicos tales como el succínico y el adipico. Por las facilidades de procesado y a las buenas propiedades que presenta, el polímero puede ser manufacturado como fibra textil y como plástico mediante inyección y extrusión. Estas aplicaciones abarcan bolsas de basura y compostaje, envases para cosméticos, alimentos, espumas, etc.

Poliester basados en microorganismos: Gran cantidad de compañías buscan alternativas para disminuir los costes de fabricación de polímeros biodegradables. Un método conocido es el de la síntesis de polímeros usando microorganismos (bioingeniería). Los principales polímeros obtenidos por este método son los llamados polihidroxicanoatos. Actualmente la compañía Monsanto Co. Comercializa un copolímero compuesto por polihidroxibutirato (PHB) y polihidroxivalerato (PHV). El homopolímero puro de PHB es cristalino y muy frágil, mientras que el copolímero de PHB con PHV es menos cristalino, más flexible, y fácil de procesar.

Estos polímeros normalmente requieren la presencia de enzimas para su degradación pero podrían degradar en una variedad de medios que están siendo estudiados para diversas aplicaciones biomédicas.

2.1.2.3. Polímeros sintéticos

Finalmente menciono otro tipo de polímeros que, a pesar de su reducido consumo, tienen aplicaciones como materiales degradables conocidas como las poliesteramidas. Estas poliesteramidas, tal y como indica su nombre son polímeros que contienen enlaces tipo éster (-COO-) Y ENLACES TIPO AMIDA (-CONH-) en la cadena principal. Actualmente, se comercializan dos

poliesteramidas: BAK1095 y BAK2195 producidas por la casa comercial bayer AG-Alemania. La primera es un copolímero constituido por ácido adipico, 1,4-butanodiol y caprolactama, totalmente biodegradable, con buenas propiedades y fácil procesado por su parte el BAK2195 se basa en el ácido adípico y la hexametilendiamina como componentes amida, y el ácido adípico con butanodiol y etilenglicol como componentes éster. Las potenciales aplicaciones del BAK está su uso en horticultura, agricultura, sectores alimenticios, bolsas de basura.

Es un termoplástico semicristalino, transparente, que se degrada en condiciones aeróbicas formando agua, monóxido de carbono y biomasa. Su velocidad de degradación es comparable a los materiales orgánicos que se descomponen bajo condiciones de compostaje.

Las poliesteramidas de mayor interés científico son las derivadas de α -aminoácidos, que constituyen un grupo interesante debido a su susceptibilidad hacia la degradación con enzimas proteolíticas. Los poli- α -aminoácidos sintéticos podrían ser interesantes como materiales biomédicos, dado la presencia de componentes naturales, en la práctica tienen poca utilidad debido a su alta cristalinidad y difícil procesabilidad. Además los α -polímeros constituidos por más de tres aminoácidos producen anticuerpos, no son apropiados para su uso en seres vivos. Para evitar estos problemas, se han estudiado distintos copolímeros constituidos por α -aminoácidos, por ejemplo derivados de tirosina y policarbonatos, son utilizados como implantes ortopédicos, dado su elevada resistencia.

2.2. Síntesis, propiedades y aplicaciones del Ácido Poliláctico (PLA)

2.2.1. Síntesis y composición del PLA

El ácido poliláctico (PLA), es un biopolímero termoplástico cuya molécula precursora es el ácido láctico. Debido a su biodegradabilidad, propiedades de barrera y biocompatibilidad, éste biopolímero ha encontrado numerosas aplicaciones ya que presenta un amplio rango inusual de propiedades, desde el

estado amorfo hasta el estado cristalino; propiedades que pueden lograrse manipulando las mezclas entre los isómeros D(-) y L(+), los pesos moleculares y la copolimerización.

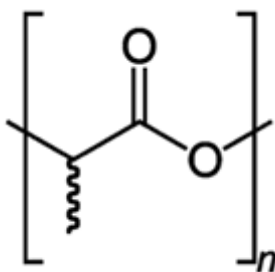


Figura N°10 Representación de la molécula básica del ácido poliláctico

El ácido láctico es utilizado ampliamente en la industria alimenticia, química, farmacéutica, del plástico, textil, la agricultura, la alimentación animal, entre otros; sin embargo, la aplicación más interesante del ácido láctico radica en la posibilidad que ofrece de producir ácido poliláctico (PLA). El ácido láctico, ácido 2-hidroxipropanoico, es el ácido carboxílico más simple con un átomo de carbono asimétrico. Puede producirse por fermentación anaeróbica de substratos orgánicos, con microorganismos como hongos y bacterias. El ácido láctico obtenido de la fermentación es ópticamente activo, por lo que la producción específica de los isótopos L (+) o D (-) puede determinarse utilizando un lactobacilo apropiado

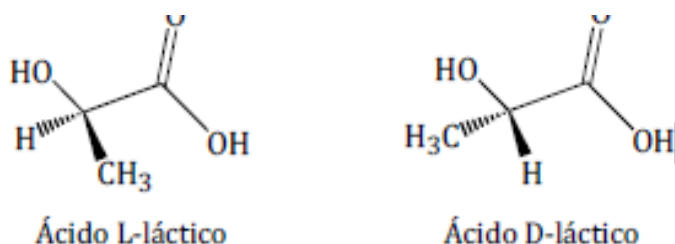


Figura N°11 Ácido láctico con sus isómeros D y L

El PLA: pertenece a la familia de los poliésteres cuya cadena principal está formada por la asociación de funciones éster, A su vez, pertenece al grupo de los alifáticos ya que los átomos en su cadena están unidos entre sí por enlaces sencillos o dobles de forma lineal o ramificada. El bloque de construcción de PLA, ácido láctico (ácido propionico 2-hidroxi) puede existir activo ópticamente en dos enantiómeros.

Estos enantiómeros básicamente son los isómeros de ácido láctico que tienen las mismas propiedades físicas excepto la interacción con el plano de la luz polarizada. Dependiendo de la proporción de los enantiómeros se puede obtener material de PLA con propiedades diferentes. Esto permite la producción de una amplia gama de polímeros PLA para que cumplan con los requisitos de desempeño. El PLA tiene buenas propiedades ópticas, físicas, mecánicas y de barrera frente a los polímeros derivados del petróleo que se utilizan actualmente. Ejemplo, los coeficientes de permeabilidad del CO₂, O₂, N₂ y H₂O para el PLA son inferiores a los que presenta el poliestireno (PS), pero son superiores al PET. Además, las propiedades de barrera del PLA frente a los permeantes orgánicos, tales como acetato de etilo y d-limoneno, son comparables al PET. De manera mecánica, un PLA no orientado es muy frágil, pero posee una buena resistencia y rigidez. De una manera orientada el PLA ofrece mejor rendimiento que el poliestireno orientado, pero con características comparables al PET. Los módulos de tracción y flexión de PLA son superiores a los polímeros de alta densidad (HDPE), polipropileno (PP) y poliestireno, pero la resistencia al impacto y alargamientos antes de la rotura son menores a los anteriores polímeros citados. En general, el PLA posee las propiedades mecánicas necesarias y propiedades de barrera deseadas para un número de solicitudes que puedan competir con los termoplásticos a base de petróleo.

Actualmente, los métodos de procesamiento principales para PLA se basan en el proceso de derretimiento. Este método consiste en calentar el polímero por encima del punto de fusión, dando la forma deseada y mediante enfriamiento estabilizar sus dimensiones. Por lo tanto, el manejo de calor, la cristalización y el

comportamiento en el fundido del material es crítico para optimizar el proceso de obtención de productos de calidad. Algunos de los ejemplos de procesos de fusión de PLA son el moldeo por inyección, termoformado, soplado, extrusión, entre otros. Con dichos procesos se pueden fabricar envases, copas, botellas, fibras para telas, alfombras, tejidos, etc.

2.2.2 Obtención de ácido poliláctico

Ocurre generalmente en dos etapas consecutivas: la primera la síntesis del ácido láctico y la segunda la polimerización.

La obtención del ácido láctico ha sido ampliamente estudiada y desarrollada. El primer paso en el proceso es la extracción del almidón de la biomasa. Industrialmente se utilizan como sustratos, sacarosa proveniente de azúcar de caña y remolacha azucarera, lactosa proveniente de lactosuero, y dextrosa procedente de almidón hidrolizado. La sacarosa refinada y glucosa son los más utilizados.

Extrayendo para obtener el almidón de productos no refinados se realiza un molido húmedo. El almidón obtenido se convierte en azúcar por hidrólisis enzimática o ácida. Bacterias fermentan entonces el licor azucarado. *Lactobacillus delbrueckii* es el microorganismo utilizado en la producción industrial, ya que tiene la ventaja de consumir eficientemente glucosa y ser termófilo con temperatura óptima de crecimiento en el rango de 45 a 62°C, lo que reduce costos de enfriamiento y esterilización, así como riesgos de contaminación microbiológica en el fermentador.

En el método de obtención comercial, al sustrato se le adiciona una fuente de vitaminas y de cofactores, se utiliza una mezcla de 10 a 15 % de glucosa, 10% CaCO₃, cantidades menores de fosfato de amonio y extracto de levadura. El medio se inocula y se agita sin aireación para optimizar la neutralización del ácido

formado. La fermentación dura entre 2 a 4 días y se termina cuando todo el azúcar es consumido, con el fin de facilitar la purificación. Al final de la fermentación el medio es ajustado a pH 10 y calentado para solubilizar el lactato de calcio y coagular proteínas presentes. Posteriormente el medio se filtra para remover sustancias insolubles, así como biomasa. Después de concentrar por evaporación, el ácido libre se obtiene por adición de ácido sulfúrico seguido de filtración para remover el sulfato de calcio formado. Al convertir se alcanza en general valores por encima del 95% en sustrato de carbohidratos. La fermentación puede realizarse tanto en procesos batch como continuos. El ácido láctico debe separarse del cultivo fermentable y purificarse antes de la polimerización en la mayoría de los casos. Los procesos de purificación más comunes involucran neutralización con bases seguido por filtración, concentración y acidificación.

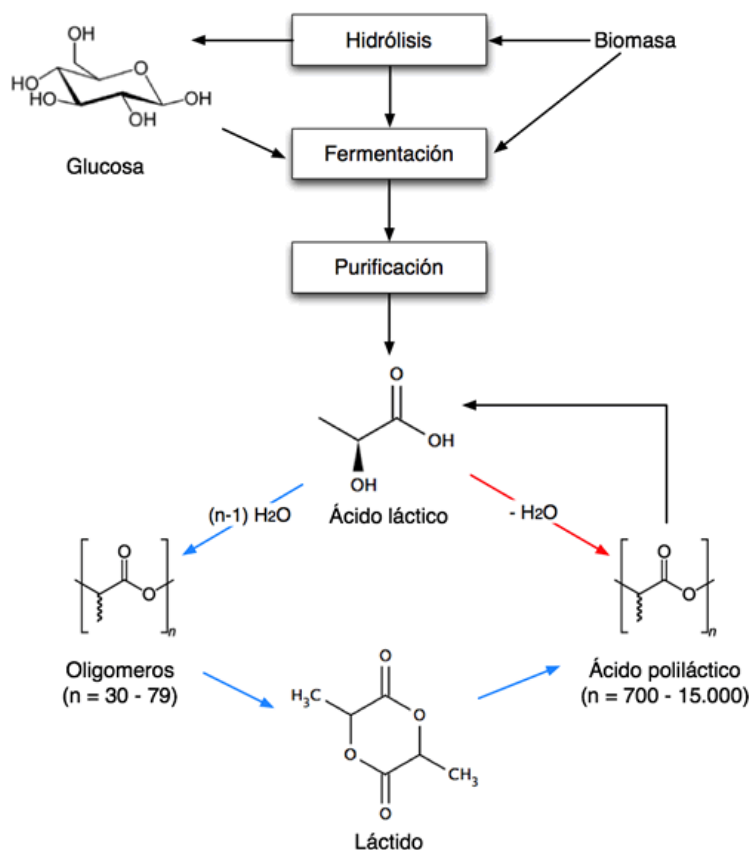


Figura N°12 Vías para la polimerización del ácido poliláctico

Existen dos vías fundamentales para convertir el ácido láctico en polímeros de alto peso molecular: el proceso indirecto vía láctido, cuyo producto se denomina poliláctido, y el proceso directo de polimerización por policondensación, produciendo ácido poliláctico. Ambos productos son agrupados bajo la denominación PLA.

Empleado por Cargill, es un proceso continuo utilizando polimerización por apertura de anillo (ROP por sus siglas en inglés) del láctido. La condensación del ácido láctico acuoso produce un prepolímero (oligomero) de bajo peso molecular. El prepolímero se depolimeriza incrementando la temperatura de policondensación, reduciendo la presión y utilizando un catalizador organometálico, resultando en una mezcla de estereo isómeros de láctido. La mezcla de láctidos es purificada por destilación al vacío, puesto que su composición determina las propiedades del producto final. En el paso final, el polímero de alto peso molecular se produce por polimerización catalítica por apertura del anillo del diláctido. Los monómeros remanentes se remueven por vacío y se reciclan. En segundo lugar, utilizada por Mitsui Chem, el ácido láctico es policondensado directamente en polímeros de alto peso molecular, manipulando el equilibrio entre: ácido láctico, agua y ácido poliláctico en un solvente orgánico.

2.2.3. Propiedades mecánicas del PLA

Existen propiedades físicas y mecánicas, farmacéuticas y de reabsorción dependen de la composición del polímero, de su peso molecular y de su cristalinidad. La cristalinidad puede ajustarse desde un valor de 0% a 40% en forma de homopolímeros lineales o ramificados, y como copolímeros al azar o de bloque.

Física y mecánicamente el PLA dependen en gran medida de la relación L / D, peso molecular, cristalinidad, orientación y métodos de preparación.

Enfocando mejora las propiedades mecánicas del PLA mediante el control de la Relación L / D o polimerización de PLA mediante el uso de catalizadores especificados. Bajo enredados y reticulado PLA puede ser polimerizado en masa a temperaturas por debajo de sus temperaturas de fusión, y estos PLAs muestran muy fuerte resistencia a la tracción de hasta 805 MPa en la dirección longitudinal sobre dibujo. Peso molecular entre enredos (Nos) es uno de los principales parámetros en la determinación de las propiedades mecánicas en PLA. En la masa fundida, el valor de esta longitud de cadena característica está determinado por la rigidez intrínseca de la cadena de PLA. Para tener una resistencia apreciable, la PLA debe tener un peso molecular que es al menos un múltiplo de Nosotros. Mayor resistencia a la tracción se consigue mediante el uso de más alto peso molecular PLA. Cuando la temperatura de procesamiento (Tg.) está entre 60 y 125°C y depende de la proporción de D o L ácido láctico en el polímero. Sin embargo el PLA puede ser plastificado con su monómero o alternativamente con ácido láctico oligomérico y esto permite disminuir Tg.

Vemos que el PLA tiene propiedades mecánicas en el mismo rango de los polímeros petroquímicos, a excepción de una baja elongación. Sin embargo esta propiedad puede ser afinada durante la polimerización (por copolimerización) o por modificaciones post polimerización (por ejemplo plastificantes). De igual manera el PLA puede ser tan duro como el acrílico o tan blando como el polietileno, rígido como el poliestireno o flexible como un elastómero. Puede además ser formulado para dar una variedad de resistencias. Las resinas de PLA pueden ser sometidas a esterilización con rayos gama y es estable cuando se expone a los rayos ultravioleta. Al PLA se le atribuyen también propiedades de interés como la suavidad, resistencia al rayado y al desgaste.

2.2.3.1. Propiedades a tracción y flexión

Tenemos el PLA semicristalino tiene una resistencia a la tracción del orden de 50 a 70 Mpa, un módulo a la tracción en un rango de 3000 a 4000 Mpa, elongación a

la ruptura del 2 al 10%, resistencia a la flexión de 100 Mpa y un módulo a la flexión de 4000 a 5000 Mpa.

TABLA N°3 PROPIEDADES PLA

Formulación	Módulo de elasticidad (Mpa)	Elongación a la rotura (%)	Resistencia a la tracción (Mpa)
PLA	2444 +-55	5,4+-0,4	62.8+-4.4

Fuente: Desarrollo de formulaciones del PLA, Paul Talens Universidad Alicante

La desventaja obvia para PLA utilizado como un plástico es su baja flexibilidad sobre soporte de carga. PLA es rígido y quebradizo, y probablemente a deformarse a temperaturas por encima de su temperatura de transición vítrea

2.2.3.2. Resistencia al impacto

Principalmente de la prueba de impacto es observar el comportamiento de un material al ser impactado por un objeto en un punto específico. Esta prueba, es probablemente una de las más difíciles de interpretar. Para este tipo de materiales los valores de resistencia al impacto se obtienen mediante la ejecución de un ensayo de impacto izod o charpy, de otros polímeros donde estas propiedades se logran gracias a un ensayo se da por dos razones fundamentales: (i) las aplicaciones del PLA generan elementos donde existen cambios de geometría considerables y (ii) normalmente se trabajan con elementos de PLA de bajos espesores sometidos a carga de impacto puntuales.

A veces dependiendo de la aplicación las probetas para la medición de la resistencia al impacto pueden o no tener una muesca, esto depende de la geometría del elemento donde el material va a ser utilizado, ya que la resistencia la impacto del PLA es afectada por la muesca fabricada en las probetas de ensayo, los valores de resistencia al impacto izod, del PLA se encuentran en el

rango de 2 a 3 k.l/m² para materiales de baja cristalinidad. Sin embargo la resistencia al impacto izid con muesca los valores se reducen de 1,50 a 1,23 k.l/m² el efecto de la muesca hace decrecer los valores de resistencia al impacto y en una investigación pública en la revista “polymer international” los aurores Griipma – Alteper deportaron que el decrecimiento de los valores está relacionado con el radio de la muesca

2.2.4. Biodegradación del PLA

Cuando la degradación biológica de PLA es menos que otros poliésteres alifáticos tales como PBS y PCL. PLA se degrada en la humedad y a temperaturas elevadas. Reforma monómero, hidrólisis y termólisis son posibles, dependiendo de las condiciones encontradas. La degradación ambiental de PLA se produce por un proceso de dos pasos. Durante las fases iniciales, las cadenas de alto peso molecular se hidrolizan para bajar de peso-molecular oligómeros y este ritmo es lento. El proceso se puede acelerar mediante ácidos o bases y se ve afectada por los niveles de temperatura y humedad. Esto conduce a un cambio significativo en la estructura química del material. El cambio en la distribución de pérdida de peso y el peso molecular de las películas de PLA durante la hidrólisis en medio ácido procede de forma homogénea a lo largo de la sección transversal de la película por sobre todo un mecanismo de erosión en volumen, y la durabilidad de las películas de PLA en medio ácido es muy similar a la que en un medio neutro, pero es mayor que en un medio alcalino. La Fragilización de PLA se produce durante este paso en un punto en el que el Wn disminuye a menos de aproximadamente 40000. Alrededor de esta misma los microorganismos en el medio ambiente siguen la proceso de degradación mediante la conversión de estos componentes de peso molecular inferior a dióxido de carbono, agua (en presencia de oxígeno), o metano (ausente de oxígeno).

Al sumergirse en un medio acuoso, los productos basados en PLA absorben el agua, y la escisión autocatalítica de enlaces éster comienza. Más tarde, la

degradación en la superficie se vuelve más lenta que en el interior debido a la liberación de oligómeros de ácidos solubles en agua y ácido láctico, mientras que los situados en el interior así permanecen atrapados. Al final, toda la parte interior se compone de oligómeros solubles en agua, y una estructura hueca se forma, a causa de su liberación al medio, mientras que la degradación superficie continúa lentamente. La degradación del PLA es la enzima sensible, una PLA puro puede degradar en un 20% de su peso total después de 48 h de exposición enzimática, y la pérdida de peso bajo el control de la degradación con exposición (es decir, la degradación sin enzima) es 1,6%.

Además de los factores ambientales, la estructura de PLA también afecta a la degradación. El factor dominante que conduce a la degradación de PLA sobre el estudio del intervalo de estereoquímica en el grado de orden cristalino. Estructura cristalina previene la degradación porque la porción amorfa recibe preferentemente la hidrólisis. La velocidad de degradación hidrolítica disminuye al aumentar la cristalinidad.

El PLA con una alta cristalinidad se degrada más lentamente y es capaz de mantener la forma y las propiedades mecánicas durante más de un año. Pero el radio de esferulitas no tenía prácticamente ningún efecto significativo sobre la hidrólisis de las películas de PLA, independientemente del medio de hidrólisis. La tasa de degradación enzimática disminuye en función de la física. PLA con unidades relativamente más L-lactato degrada lentamente en comparación con el PLA tiene menos unidades de L-lactato, porque las hélices locales se forman en los materiales de L-lactato superiores a fin de que los vínculos de la cadena principal de éster están envueltos en el arreglo de los alrededores grupos metilo hidrofóbicas. En esta conformación, el ataque de moléculas de agua se inhibe para retardar la principal cadena de hidrólisis.

Si vemos la presencia de bajo peso molecular derivados de ácido láctico y oligómeros de PDLLA acelera claramente degradabilidad de PLA en un medio biótico, y el mecanismo de degradación depende en gran medida del contenido de

los oligómeros. Tanto degradabilidad hidrolítica y enzimática de PLA plastificada por plastificantes basados en citrato está influenciada por la solubilidad plastificante, Zg, y la cristalinidad de una manera combinada. La tasa de pérdida de peso de PLA aumenta en respuesta a la adición de una pequeña cantidad de PEO solubles en agua. Se espera que la mezcla de PLA y P (VAC-co-VA) que han mejorado las propiedades mecánicas, así como una buena velocidad de degradación si la mezcla forma una fase miscible en el contenido de alcohol de vinilo específico. La biodegradabilidad de pura PLA aumenta significativamente después de la preparación de nanocompuestos por silicatos estratificados. En la mayoría de los casos la biodegradación depende también del medio utilizado. PLA barras moldeadas podían degradar muy poco después de un año enterrado en el suelo en el medio oeste de Estados Unidos. La adición de almidón de maíz para las barras de PLA facilita la degradación de PLA, pero el almidón se degrada mucho más rápido por cepas de bacterias o los hongos. En general, el aumento de la cantidad de almidón en la mezcla aumenta la tasa de crecimiento de hongos, y la tasa depende de la facilidad con la que el almidón se puede acceder por el microorganismo. Mayor contenido de almidón, mayor grado de gelatinización / degradación de almidón, y una mayor permeabilidad al agua son factores que favorecen el rápido crecimiento del hongo. Porcentajes de mineralización de contenido de carbono de los materiales de PLA con almidón coextruida evaluado en un líquido, en un sólido inerte, y en el compostaje de medios son 65%, 59% y 63%, respectivamente. Estos valores son más altos que el requisito mínimo estándar de al menos 60% para la degradación. Una mezcla de PDLLA con PLA somete al aumento de la hidrólisis en solución tamponada con fosfato (pH 7,4 y 37 ° C) reveló que la degradación tiene lugar preferentemente en la región amorfa, en lugar de en la región cristalina. De acuerdo con el aumento del grado de degradación por los medios de comunicación.

2.2.5. Métodos de procesamiento del PLA

2.2.5.1. Secado y extruido

Podemos decir que la extrusión consiste en hacer pasar bajo la acción de la presión un material termoplástico a través de un orificio con forma más o menos compleja (hileras), de manera tal, y continua, que el material adquiera una sección transversal igual a la del orificio. En la extrusión de termoplásticos el proceso no es tan simple, ya que durante el mismo, el polímero se funde dentro de un cilindro y posteriormente, enfriado en una calandria, Este proceso de extrusión tiene por objetivos, proceso que es normalmente continuo, usarse para la producción de perfiles, tubos, películas plásticas, hojas plásticas, etc.

Vemos que presenta alta productividad y es el proceso más importante de obtención de formas plásticas en volumen de producción. Su operación es de las más sencillas, ya que una vez establecidas las condiciones de operación es de las más sencillas, ya que una vez establecidas las condiciones de operación, la producción continúa sin problemas siempre y cuando no exista un disturbio mayor. El costo de la maquinaria de extrusión es moderado, en comparación con otros procesos como inyección, soplado o Calandrado, y con una buena flexibilidad para cambios de productos sin necesidad de hacer inversiones mayores.

La restricción principal es que los productos obtenidos por extracción deben tener una sección transversal constante en cualquier punto de su longitud (tubo, lámina) o periódica (tubería corrugada); quedan excluidos todos aquellos con formas irregulares o no uniformes. La mayor parte de los productos obtenidos de una línea de extrusión requieren de procesos posteriores con el fin de habilitar adecuadamente el artículo, como en el caso del sellado y cortado, para la obtención de bolsas a partir de película tubular o la formación de la unión o socket en el caso de tubería.

Se aprecia que dentro del proceso de extrusión, varias partes debe identificarse con el fin de aprender sus funciones principales, saber sus características en el

caso de elegir un equipo y detectar en donde se puede generar un problema en el momento de la operación. La extrusión, por su versatilidad y amplia aplicación, suele dividirse en varios tipos, dependiendo de la forma del dado y del producto eximido.

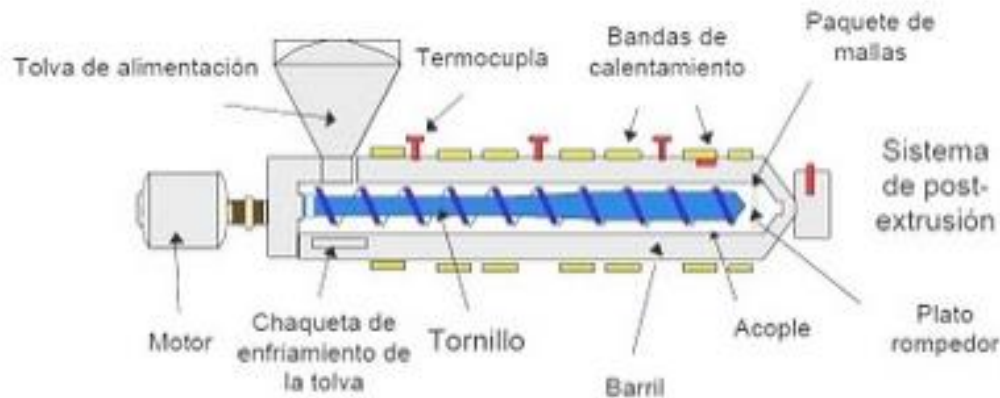


Figura N°13 Diagrama extrusadora

2.2.5.2. Moldeo por inyección

Por definición la inyección de termoplásticos es un proceso físico y reversible, en el que se funde una materia prima llamada termoplástico, por el efecto del calor, en una máquina llamada inyectora. Esta máquina con el termoplástico en estado fundido, lo inyecta, dentro de las cavidades huecas de un molde, con una determinada presión, velocidad y temperatura. Transcurrido un cierto tiempo, el plástico fundido en el molde, va perdiendo su calor y volviéndose sólido, copiando las formas de las partes huecas del molde donde ha estado alojado. El resultado es un trozo de plástico sólido, pero con las formas y dimensiones similares a las partes huecas del molde. A este termoplástico solidificado le llamamos inyectada.

El diseño actual de la máquina de moldeo por inyección ha sido influido por la demanda de productos con diferentes características geométricas, con diferentes polímeros involucrados y colores. Además, su diseño se ha modificado de manera

que las piezas moldeadas tengan un menor costo de producción, lo cual exige rapidez de inyección, bajas temperaturas, y un ciclo de moldeo corto y preciso

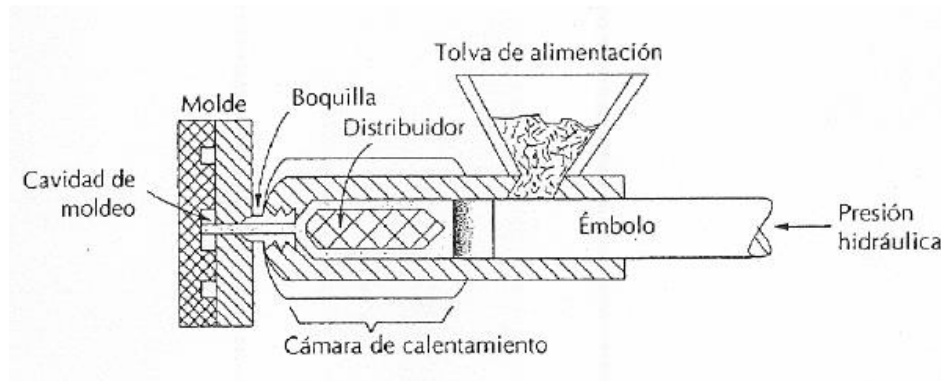


Figura N°14 Diagrama maquina inyección

2.2.5.3. Moldeo por soplado y estiramiento

En este proceso permite obtener recipientes de tamaños pequeños y de grandes

- El molde produce el corte y soldadura del parison en el extremo cerrado, y moldea la forma de la abertura del recipiente.

El proceso de inyección – soplado (estiramiento) también puede ser empleado para la fabricación de envases, normalmente de menor formato, para productos alimenticios, detergentes domésticos, productos farmacéuticos...

- La primera etapa consiste en el moldeo por inyección de una preforma, un molde.
- La segunda etapa envuelve básicamente el moldeo por soplado en un segundo molde y el enfriamiento.

2.2.5.4. Moldeo de película y laminado

Definimos que la extrusión de películas personalizadas es el proceso de convertir gránulos de polímero en láminas cortadas a medida o rollos de plástico a través de la combinación de calor, presión y equipos especializados. Esta lámina luego se

puede volver a procesar en partes a través del termoformado, puede ser estampada o troquelada, por nombrar algunos.

2.2.5.5. Soplado de película

La tensión-soplado o estirado-soplado se emplea básicamente para producir botellas para bebidas carbonatadas que deben ser impermeables al CO₂ y que deben por tanto soportar las presiones que pudieran desarrollarse en su interior (hasta 5 atm) y además poseer muy buena transparencia. La idea de fabricar este tipo de botellas surgió de Coca-Cola, quien había observado que el consumo del producto aumentaba si se vendía en botellas grandes, y en principio comenzó a envasarse en botellas de vidrio de 2 litros. Estas botellas resultaban demasiado pesadas, y por otra parte la crisis del petróleo de los años 70 llevó al desarrollo del proceso de tensión-soplado. Es curioso resaltar que aunque los plásticos se obtienen directamente del petróleo, otros materiales como el aluminio o el vidrio consumen cantidades muchos mayores de petróleo, debido a que son necesarias grandes cantidades de energía durante su procesado.

En el proceso de tensión-soplado se obtiene la preforma mediante inyección, aunque ocasionalmente se puede obtener mediante extrusión. La preforma se templea en un molde muy frío, de modo que se evita que cristalice el polímero. A continuación el polímero debe recalentarse a una temperatura superior a su T_g (temperatura de transición vítrea). Una vez que se alcanza esta temperatura se produce el tensionado de la pieza en las direcciones axial y radial. Para ello, por una parte la barra central de la máquina sobre la que se obtiene la preforma se alarga y simultáneamente se introduce el aire de soplado en la pieza.

2.2.5.6. Termoformado

El proceso de termoformado permite la obtención de piezas a partir de films o láminas de materiales termoplásticos (con espesores nominales comprendidos entre 0.1-12 mm) de forma rápida y económica [119-121]. En términos generales, el termoconformado consiste en calentar el material para reblandecerlo y así

permitir su deformación. La temperatura de calentamiento es función del tipo de polímero y del diseño del molde que se utilice. Para los polímeros amorfos, la temperatura mínima de trabajo la marca su temperatura de transición vítrea (T_g), permitiendo un amplio rango de temperaturas de procesado. Se ve la forma deseada se consigue mediante la utilización de un molde y, en determinados casos, con la ayuda de otros mecanismos entre los que se encuentran aire a presión, vacío, asistencia mecánica o mediante la combinación de dos o más de estas técnicas. El conformado es una etapa compleja en la que, en función de la posición y de la forma de la pieza, el polímero adquiere diferentes grados de orientación. Entre los tipos de deformación que tienen lugar durante el conformado se encuentra el estiramiento bi- y uniaxial y el cizallamiento puro [121]. Por ejemplo, en el moldeo asistido por aire a presión la lámina normalmente es estirada biaxialmente y experimenta una deformación no restringida. En cambio, durante el moldeo asistido mecánicamente o en algunas operaciones asistidas por vacío, en las que el polímero entra en contacto con la superficie del molde casi inmediatamente al inicio del estiramiento, la lámina está sujeta predominantemente a una deformación uniaxial. En estos últimos casos, como resultado del contacto con algunas partes del molde, la deformación del material se encuentra restringida. Las velocidades de deformación experimentadas por los materiales durante el termoconformado, normalmente, se encuentran entre 0.1 y 10 s⁻¹. A estas velocidades de deformación, los polímeros exhiben marcadas características elásticas por lo que el comportamiento del material puede modelarse a través de una ecuación constitutiva hiperelástica.

2.2.6. Aplicaciones industriales del PLA

La aplicación más prometedora del PLA es en envases y empaques para alimentos y producción de películas para la protección de cultivos en estadios primarios. Sin embargo, el alto crecimiento fúngico en los materiales obtenidos de bases biodegradables es un factor negativo para el uso en alimentos. Por lo tanto los bioempaques son más convenientes para alimentos con alta respiración y de vida de almacenamiento corto como vegetales, y para el empaque de algunos

productos de panadería. En los tejidos vivos, el PLA se despolimeriza totalmente por hidrólisis química. Esta característica hace que el PLA sea ampliamente utilizado para la producción de hilo para sutura, implantes, cápsulas para la liberación lenta de fármacos, prótesis, etc.

TABLA N°4 EMPRESAS PRODUCTORAS A NIVEL GLOBAL

Empresa	Ubicación	Producto comercial
Cargill LCC	EE.UU.	NatureWorks
Mitsubishi	Japón	Ecoloju
Chronopol	EE.UU.	Heplon
Hycail	Holanda	Hycail HM, LM
Toyota	Japón	Toyota Eco-Plastic
Purac Biomaterials	Holanda	Purasorb*
Durect	EE.UU.	Lactel*
Shimadzu	Japón	Lacty*
Total & Galactic	Bélgica	Futero**
Treofan	Holanda	Treofan
Mitsui Chem	Japón	Lacea

Fuente: Revista tecnológica del plástico "En la era de los biodegradables, Angela Barriga

*Especialidades medicinales

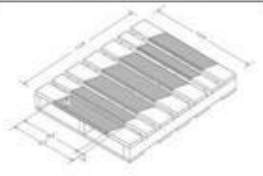
** En etapa de proyecto

El consumo de PLA en 2007 fue de alrededor de 60 mil toneladas y, hasta el momento, sólo el 30% del ácido láctico producido se utiliza para fabricar PLA. El

productor más importante es sin dudas el de NatureWorks (Nebraska, EEUU) con una capacidad de 140 mil ton/año y precios de venta (por kilogramo) entre los € 2,5 y los € 5,5.[1]

En algunos países, tanto asiáticos como europeos, actualmente se encuentran utilizando el PLA en aplicaciones de naturaleza diferente a las expuestas anteriormente. Se presentan algunos de los productos, a base de PLA, que ciertas empresas se encuentran distribuyendo alrededor del mundo con el sello de amigables para el ambiente.

TABLA N°5 USOS PLA

Producto	Fabricante/País de origen	Imagen
DVD cases	Yao Qing Biotechnology Co., Ltd./TAIWAN	
Cartucheras para lápices	Yao Qing Biotechnology Co., Ltd./TAIWAN	
Cases para computadoras portátiles	Yao Qing Biotechnology Co., Ltd./TAIWAN	
Pallets para transporte y almacenado de productos	Patente USA	
Recipientes contenedores de productos comestibles	Ecotainer	

Fuente: Revista tecnológica del plástico "En la era de los biodegradables, Angela Barriga

TABLA N°6 USOS PLA 2

Producto	Industria	Descripción	Aplicación comercial
Recipientes	Productos agrícolas	Conservación de productos vegetales y frutas.	
Cases para equipos electrónicos	Eléctrica- Electrónica	Protección de circuitos electrónicos en reproductores, PCs, teléfonos celulares, controles, etc	
Protectores de llanta	Automotriz	Protección de llantas de emergencia en automóviles	
Moquetas	Automotriz	Protección y reposo de los pies del ocupante en la base del automóvil	
Telas para asientos, cojines, telas para techo, paneles de puerta, partes del tablero principal.	Automotriz	Componentes trabajados anteriormente a base de polímeros sintéticos	

Fuente: Revista tecnológica del plástico "En la era de los biodegradables, Angela Barriga

Por su comportamiento a condiciones ambientales las fibras de PLA presentan un mayor resistencia a la exposición de rayos UV lo que lo hace atractivo para aplicaciones en agricultura, horticultura y áreas industriales.

Las ventajas de utilizar fibras a base de PLA incluyen:

- Bajo peso específico comparado con otras fibras naturales, lo que implica productos más ligeros, una tenacidad más alta o lo que es lo mismo una fuerza extensible mayor que las fibras naturales. Recuperación de la humedad perceptiblemente más baja con lo que se obtiene un secado más rápido.
- Resistencia UV excepcional comparado con otras fibras, índice de refracción bajo, lo cual genera intensos colores una vez teñidas las fibras de PLA.
- Comparado con el PET y otros sintéticos, tiene un bajo poder calorífico, pero generan menor cantidad de humo al quemarse.

Tenemos como desventajas de utilizar fibras elaboradas a base de fibras de PLA en la industria textil tenemos; baja resistencia a compuestos alcalinos causando pérdida de fuerza en los procesos convencionales de dispersión teñido. Resistente temperaturas de planchado bajas puesto que presenta una temperatura cristalinidad baja.

2.3. Compuestos biodegradables

2.3.1 Polímeros biodegradables modificados reforzados con fibras naturales.

Definimos los materiales compuestos que consisten en una matriz de polímero reforzado con fibras se están convirtiendo cada vez más importante para las aplicaciones estructurales donde una combinación de alta resistencia y rigidez, durabilidad y peso relativamente bajo son requisitos clave. Composites son

ampliamente utilizados en materiales para la construcción, la industria aeroespacial y de defensa, el sector naval, transporte y productos de especialidad tales como palas de aerogeneradores. Las matrices de polímeros varían de acuerdo con el producto en particular, sino que incluyen poliésteres insaturados, resinas epoxi, poliuretanos y los termoplásticos como el polipropileno. Refuerzos compuestos son típicamente fibras de alta resistencia tales como el vidrio, aramida y carbono. En la práctica, la mayoría de los polímeros y fibras usadas en materiales compuestos comerciales actuales se derivan de los recursos de petróleo no renovables; Sin embargo, los materiales compuestos reforzados con fibra de leña o de plantas naturales se han desarrollado rápidamente y ahora se utilizan con éxito como materiales de construcción y componentes interiores de automoción.

Respondiendo al uso acelerado de los recursos no renovables y los productos derivados de estos recursos, muchos países han tratado de estimular la 'química verde' y la producción y el uso de "productos verdes" derivados de la naturaleza. Esto ha llevado a la búsqueda de nuevos productos que sean ambientalmente sostenibles y compatibles con el medio ambiente. Los materiales compuestos no son una excepción a este nuevo paradigma y, por tanto, existe un gran interés por los fabricantes en el desarrollo de nuevos materiales compuestos "verdes".

Este tipo de material compuesto es todavía en su infancia, con la mayor parte del proceso o producto de la investigación relacionada iniciada desde finales de 1980 y hasta la fecha sólo hay unas pocas aplicaciones totalmente comerciales de la tecnología. Algunos de los primeros de la investigación reciente sobre biocomposites fibra de plantas "verdes" han venido del Instituto de Mecánica Estructural en el DLR. En general, la investigación sobre materiales compuestos biodegradables se ha impulsado en gran medida por la disponibilidad de las materias primas procedentes de recursos naturales sostenibles.

Aunque varía de país a país, el incremento en el uso de materiales compuestos en general, plantea interrogantes acerca de su eventual disposición en situaciones en

que la incineración no es posible. Existen opciones para el reciclaje y reutilización de los materiales compuestos, aunque estos no siempre son fáciles de implementar dato que Composites normalmente constan de dos materiales muy diferentes. Como solución alternativa, el uso de polímeros biodegradables en combinación con biofibras (madera o fibra vegetal) potencialmente proporciona una ruta a compuestos completamente biodegradables a base de recursos renovables y algunos artículos de revisión recientes han puesto de manifiesto este potencial.

2.3.1.1 Fibras naturales

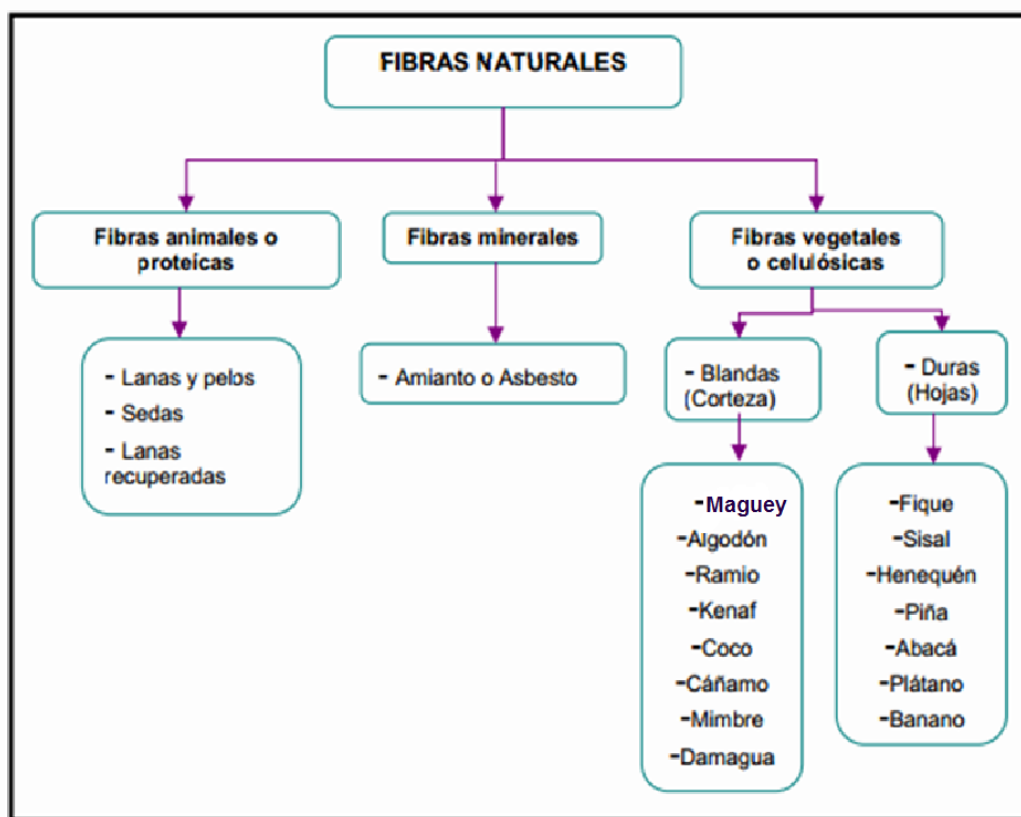


Figura N°15 Fibras naturales

Dentro de estas fibras la de mayor relevancia es la lana, con características diferentes según sea el tipo de oveja de la que proceda. Generalmente es blanca, pero también puede tener alguna pigmentación natural. “Menos empleados, pero a la vez importantes, son los pelos de cabra, camello, lana de vicuña, alpaca, guanaco y llama. En este último caso criado principalmente en Perú, Bolivia y Chile, los colores de estas fibras pueden ser pardos, amarillentos, negros o blancos. El pelo de liebre o conejo, se utiliza para la fabricación de fieltros, o para obtener otra fibra mezclada con lana. La crin de caballo, que tejida con una urdimbre de lino o algodón, da como resultado el tejido de ese mismo nombre”

Se incluye también en este grupo la seda común, producida por el gusano de seda (*Bombix mori*), y la seda silvestre o salvaje producida por ciertos insectos de la China, Japón y otros países asiáticos. “Por último, se debe considerar las fibras animales recuperadas, entre las que se encuentran retazos de lana usados e hilados, principalmente”

2.3.1.2 Fibras minerales.

El asbesto o amianto son más importantes, los cuales está compuesto principalmente de silicato de magnesio. Su nombre se usa para designar a un grupo de seis diferentes fibras minerales que proceden de depósitos volcánicos del suelo y rocas de algunas áreas como: amosita, crisotila, crocidolita, varios tipos de tremolita, actinolita, y antofilita. Varían en longitud y pueden estar alargadas como bastones o curvadas como uñas.

“La fibra de asbesto es mala conductora de calor, insoluble en la mayoría de los ácidos, y su estructura fibrosa permite usarla en empaquetaduras a prueba de fuego, siendo muy difícil de hilar debido a la gran fragilidad de las fibras”

En el año 1970, se prohibió el uso de todos los tipos de asbesto pues causaban la asbestosis, que producen cáncer de pulmón. Sin embargo, debido a la ausencia de evidencia definitiva que soporte alguna relación entre pacientes con cáncer y la fibra de asbesto, en la actualidad su uso se ha reabierto de manera controlada.

2.3.1.3. Fibra vegetal

Vemos que las fibras de origen vegetal poseen un interés extraordinario, no solo por su elevado número, puesto que existen más de 700 plantas que son capaces de suministrar fibras, sino también por sus relevantes propiedades físicas y químicas.

Pueden clasificarse tomando en consideración su origen anatómico, su tipificación botánica, sus usos, etc. Sin embargo comercialmente se pueden clasificar en duras y blandas.

- “Las blandas, como el lino y el ramio, son obtenidas básicamente del floema (del griego phlos = corteza), que son los tejidos del sistema vascular de la planta que transportan azúcares y otros productos de la fotosíntesis, son de tallos de dicotiledóneas (plantas con flor) que pueden estar más o menos lignificadas, son suaves, elásticas y flexibles”.
- Las duras, “son aquellas que tienen su origen en las hojas, como el fique, abacá, piña, palmas, entre otras. Son fibras de hojas de monocotiledóneas, cada una es un cordón fibroso o un haz vascular que poseen un alto contenido de lignina y tiene textura rígida”

Dichas fibras que nacen de la semilla o en el interior de las paredes de la fruta, consisten en una sola, larga y estrecha célula, la cual es la fibra fundamentalmente. También son importantes las fibras provenientes de la madera de los árboles, las cuales consisten en varios elementos de la parte del tejido vascular de la madera y son usadas para la fabricación del papel. Por último, R.H12 incluye a las fibras misceláneas, que son obtenidas de otras partes de las plantas, esta clase incluye variedades que son usadas para diferentes propósitos,

dos de las más importantes son la piassava, y similares para hacer cepillos (que son obtenidas del tallo de las hojas de las palmas), y las de coco (las cuales son obtenidas de su cáscara).

- **Fibra de agave o sogá.**

Características de la fibra natural

TABLA N°7 CARACTERÍSTICAS SOGA

Material soluble en benceno-alcohol	3.15
Material soluble en agua	3.94
Lignina	16.85
Holocelulosa(celulosa+hemicelulosa)	70.50
Celulosa	64.96
Cenizas	1.99
Densidad(g/cm3)	1.45
Resistencia a la traccion(Mpa)	575.43
Deformacion a rotura(% adimensional)	3.98
Modulo a la traccion(Mpa)	149.90

Fuente: Revista mexicana de química Vol. 8,Bledzki col.2004

- **Yute:**

Es una fibra larga, suave y brillante, obtenida de la planta del género de Corchorus, en cantidad producida y variedad de aplicaciones se encuentra en segundo lugar después del algodón. “El yute se cultiva durante las estaciones lluviosas de climas calientes húmedos, el 85% de su cultivo en el mundo se concentra en la región del Delta de Ganges (Bangladesh e India) y China. El color de las fibras puede ser blanco o café, y su longitud puede variar entre 1,0 y 4,0 m.”³⁷“Tienen una alta resistencia a tracción con una baja elongación, lo cual ayuda durante la fabricación de telas e hilados. De todas las fibras naturales obtenidas del vástago de la planta es la más económica

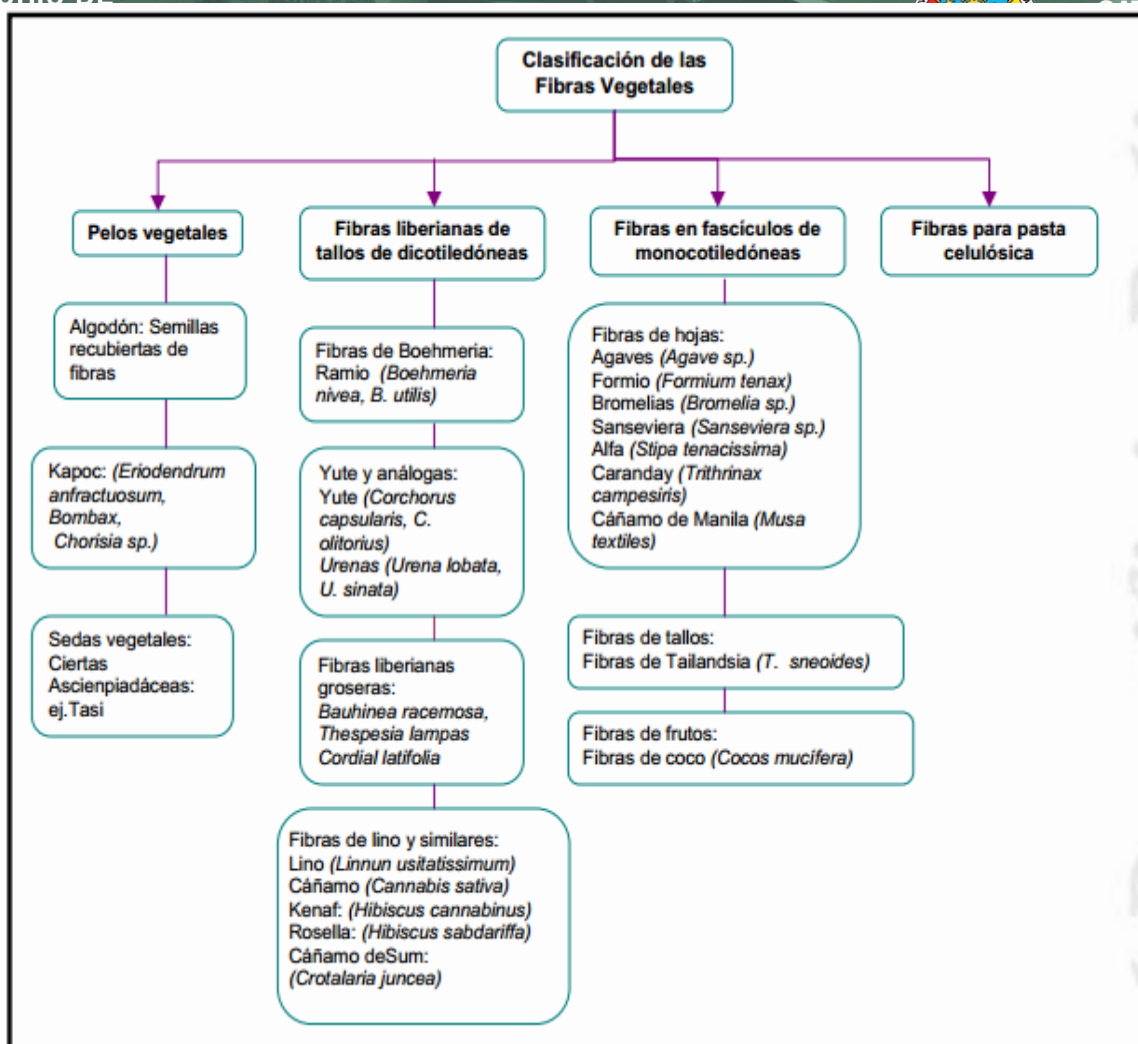


Figura N°16: Clasificaciones de fibras

TABLA N°8 CARACTERÍSTICAS FIBRAS

Fibra	Densidad(g/cm3)	Modulo elasticidad(Gpa)	Resistencia traccion (Mpa)	Alargamiento a rotura(%)
Algodón		4.98-10.92	264-654	3.0-7.0
Lino		24	300-900	2.7-3.2
Cañamo	1.48		285	1.3
Sisal	1.45	10.4	444-552	2.0-2.5
Platano	1.35	20	550	5.0-6.0
Piña	1.53	4.2	413	3.0-4.0
Yute		43.8	342-672	1.7-1.8
Vidrio	2.54	56-72	2500	3

Fuente: Caracterización de fibras, MD Salvador Universidad politécnica de Valencia España

TABLA N°9 COMPOSICIÓN Y PROPIEDADES FIBRAS VEGETALES

Fibra	Densidad (g/cm ³)	Celulosa(%)	Hemicelulosa (%)	Lignina(%)	Humedad(%)
Cañamo	1.48	88-90	07-oct	1.5-2.0	3.5-8.0
Sisal	1.45	65	12	9.9	10
Platano	1.35	63-64	19	5	10.0-11.0
Piña	1.53	81	.	12.7	13.5

Fuente: Caracterización de fibras, MD Salvador Universidad politécnica de Valencia España

2.3.3 Biocompuestos (green composites)

Estos son conocidos porque permiten la formación de enlaces covalentes entre ellos, compartiendo electrones, debido a su pequeña diferencia de electronegatividad. Estos enlaces son muy estables, la fuerza de enlace es directamente proporcional a las masas de los átomos unidos.

De igual manera permiten a los átomos de carbono la posibilidad de formar esqueletos tridimensionales –C-C-C- para formar compuestos con número variable de carbonos.

Permiten la formación de enlaces múltiples (dobles y triples) entre C y C, C y O, C y N, así como estructuras lineales ramificadas cíclicas, heterocíclicas, etc. Permiten la posibilidad de que con pocos elementos se den una enorme variedad de grupos funcionales (alcoholes, aldehídos, cetonas), ácidos, aminas, etc.) con propiedades químicas y físicas diferentes.

2.3.3.1. Biocompuestos elaborados a base de PLA

Actualmente uno de los mayores desarrollos en aplicaciones del ácido poliláctico se ha dado en la industria médica gracias a su naturaleza no tóxica, su durabilidad, su capacidad de esterilización y la más importante su compatibilidad. Esta compatibilidad se entiende como la capacidad del material para cumplir con su función de acuerdo a sus propiedades mecánicas sin afectar el medio en el que se encuentra. Por lo tanto, el PLA ha sido utilizado para generar un sinnúmero de

aplicaciones que tienen un contacto directo con el cuerpo humano. Esto se debe a que el PLA no genera reacciones adversas y permite la regeneración de la zona afectada. Además no se necesita de una cirugía para retirar el elemento, ya que al biodegradarse es absorbido por el cuerpo humano en su totalidad.

Algunas aplicaciones de PLA en la industria del empaquetamiento han sido desarrolladas y utilizadas en gran cantidad de productos alrededor del mundo, principalmente en la fabricación de películas protectoras de productos alimenticios como frutas y vegetales. Estas películas de PLA son utilizadas gracias a que el material presenta buenas características de resistencia a la tracción, resistencia al impacto y elongación manteniendo una transparencia aceptable. Además los microorganismos no crecen fácilmente sobre la superficie del material y colorantes y aromas, no se difunden fácilmente desde los alimentos hacia el polímero. En general el PLA presenta mejores características de barrera que el polietileno para protección de los productos.

Algunos polímeros fabricados por la casa comercial Nature/Words LLC, todos ellos son diferentes tipos de PLA y su denominación depende del tipo de procesamiento con el cual deben ser trabajados, el polímero 4041D es una resina para procesarlo mediante el soplado de película y producir filmes para fines generales, está orientado biaxialmente lo cual le confiere unas características de estabilidad frente a altas temperaturas (hasta 130°C). el polímero 4031D es también una película orientada biaxialmente para usos a elevadas temperaturas (hasta 150°C). Estos dos tipos de PLA el 40401D y el 4031D ofrecen características ópticas excelentes, fácil procesado y características excelentes frente a la torsión. El polímero 1100D es una resina termoplástica obtenida por extrusión convencional a temperaturas inferiores a las del PE. Los usos potenciales del PLA 1100D incluyen: bolsos, tazas, placas de comida campestre, empaquetado de verduras congeladas, recipientes de alimentos líquidos, etc., el polímero 2000D es una resina termoplástica diseñada para ser sometida a procesos de extrusión y termoconformado, así mismo el ácido poli L- láctico con bajo grado de polimerización puede ser usado en películas biodegradables para usos agrícolas.

2.3.3.2. Propiedades mecánicas de biocompuestos PLA/fibras naturales

Mencionaremos las propiedades físicas y mecánicas, farmacéuticas y de reabsorción dependen de la composición del polímero, de su peso molecular y de su cristalinidad. La cristalinidad puede Las propiedades físicas y mecánicas, farmacéuticas y de reabsorción dependen de la composición del polímero, de su peso molecular y de su cristalinidad.

Podemos encontrar que el PLA tiene propiedades mecánicas en el mismo rango de los polímeros petroquímicos, a excepción de una baja elongación. Sin embargo esta propiedad puede ser afinada durante la polimerización (por copolimerización) o por modificaciones post polimerización (por ejemplo plastificantes).

Otras limitaciones del PLA, comparado con otros empaques plásticos, es la baja temperatura de distorsión (HDT); esto puede ser un problema en aplicaciones donde el material de empaque es expuesto a picos de calentamiento durante el llenado, transporte o almacenamiento y puede finalmente deformarse

CAPITULO III

MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. Materiales y equipos de ensayo

3.1.1. Materiales

Ácido Polilactico(PLA)



Figura N°17 PLA

Soga (maguey)



Figura N° 18 Soga

Alcohol polivinílico



Figura N°19 Alcohol polivinílico

EQUIPOS

Los equipos utilizados para poder realizar las láminas de PLA y con sus agregados y realizar las pruebas son:

- Equipo para pruebas de tracción

Marca Liyi-tech

Capacidad max 2000 kg



Figura N°20 Equipo pruebas tracción

- Equipo brabender



Figura N°21 Equipo Brabender

- Prensa hidráulica para termoformar



Figura N°22 Prensa

- Planchas planas de acero inoxidable empleadas como molde para fabricación de laminas



Figura N°23 Planchas inox

- Accesorios escobillas y espátulas



Figura N°24 espátulas y utensilios

- Balanza



Figura N°25 balanza

- Prensa para fabricar probetas



Figura N° 26 Prensa probetas

- Troquel



Figura N°27 troquel

- Equipos para pruebas de dureza shore D.



Figura N°28 Equipo dureza

- **Equipos de protección personal**



Figura N°29 EPPs

3.2. Estrategia metodológica

3.2.1. Elaboración de láminas de material compuesto

Para poder obtener las láminas de PLA se utilizara el equipo denominado brabender donde se insertara los pellets previamente pesado de PLA para poder ser fundido a temperatura de 140°C el tiempo de procesamiento será por 6 minutos, formando una masa, La pasta obtenida será colocado en dos planchas de inoxidable para luego ser insertado en una prensa hidráulica , en este proceso se termoformara las láminas, luego de ejercer presión por un lapso máximo de 8 minutos como máximo y la temperatura de trabajo será de 160°C . Se espera que se baje la temperatura para poder abrir las planchas y se obtiene la lámina de PLA.



Figura N°30 Pesaje material



Figura N°31 Materiales ingresos a brabender para termofundirlos



Figura N°32 Lámina de PLA

3.2.2. Obtención de probetas normalizadas

Las probetas son obtenidas luego de tener ya las láminas de PLA con o sin carga, se llevó la lámina a la prensa y se colocó junto con el troquel realizando una presión determinada a un molde según la norma de la probeta y una prensa

manual donde se hace girar la manivela sobre el molde que presiona la lámina de PLA hasta obtener la probeta según la norma.



Figura N° 33 Probetas obtenidas de láminas

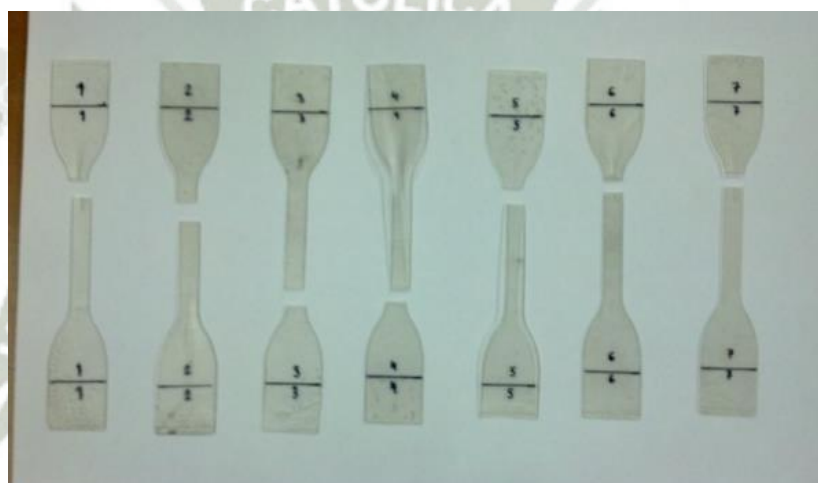


Figura N°34 Probetas de PLA

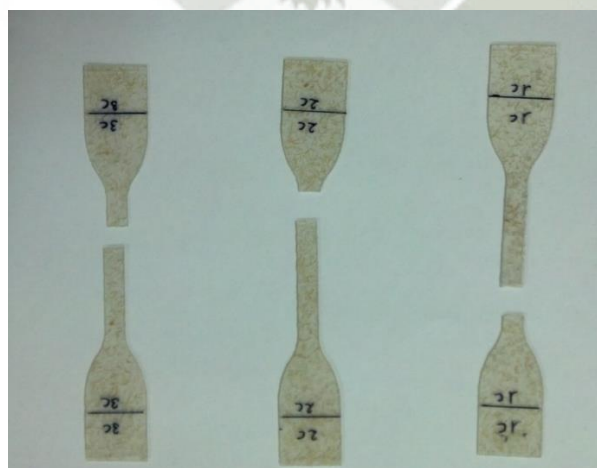


Figura N°35 Probetas de PLA con 0.5 gr sogá

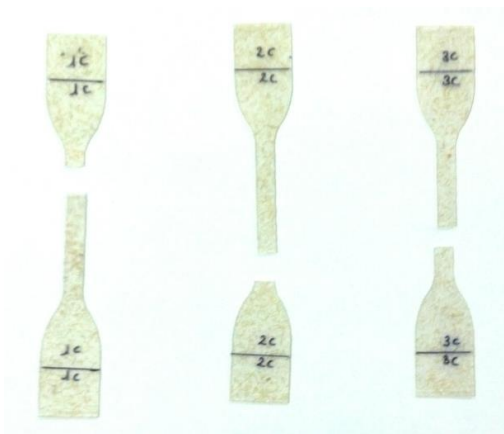


Figura N°36 Probetas de PLA con 2 gr de sogá



CAPÍTULO IV

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. Resultados de Prueba de Tracción

Luego de la fabricación las probetas con PLA (plancha de PLA 20 gramos), el cuadro siguiente nos da una noción de cuáles son los parámetros de las propiedades del polímero de PLA la cual nos indica que cual es el esfuerzo máximo a tracción, el módulo de elasticidad y deformación

TABLA N°10 PRUEBAS TRACCIÓN PLA

Formulación	Módulo de elasticidad (Mpa)	Elongación a la rotura (%)	Resistencia a la tracción (Mpa)
PLA	2444 +-55	5,4+-0,4	62.8+-4.4

Fuente: Desarrollo de formulaciones del PLA, Paul Talens Universidad Alicante

Se realizaron las siguientes pruebas de tracción con carga y sin carga obteniendo los siguientes resultados de 5 ensayos:

TABLA N°11 ENSAYO TRACCIÓN PLA PURO

PROBETAS DE PLA L. =85 MM				
Probeta	Espesor			
	E1	E2	E3	Promedio
1	0.689	0.696	0.613	0.666
2	0.616	0.667	0.701	0.661
3	0.635	0.617	0.575	0.609
4	0.764	0.662	0.593	0.673
5	0.674	0.69	0.64	0.668

Fuente: Elaboración propia

TABLA N°12 RESULTADOS PLA PURO

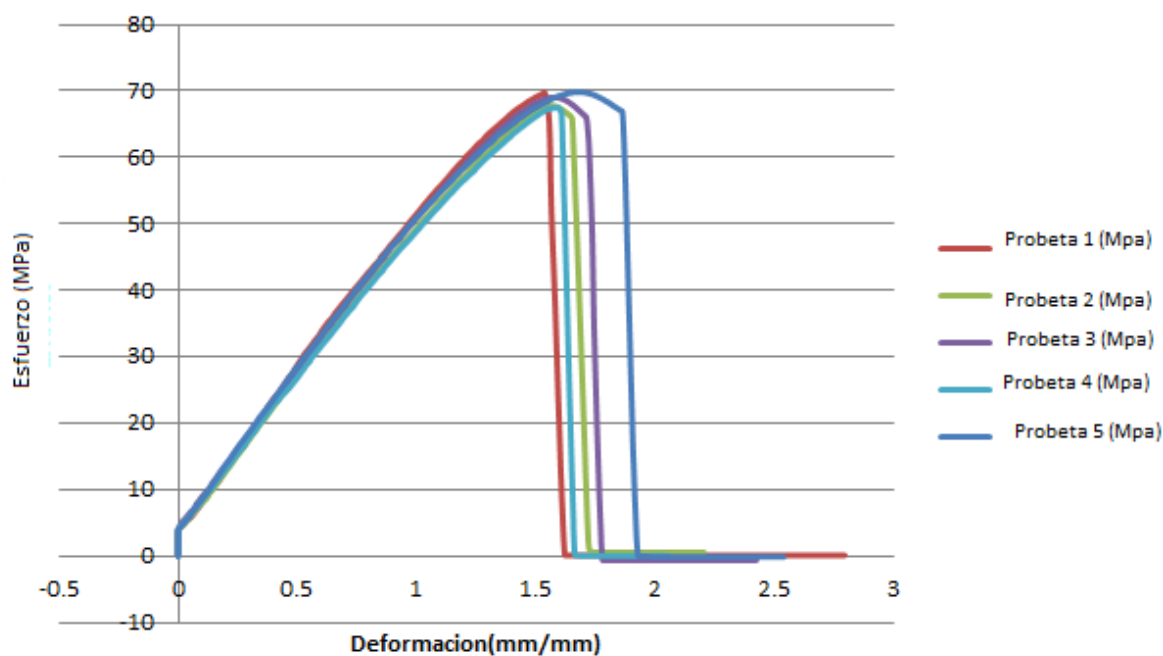
	Carga Máxima	Resistencia a la tracción	Longitud Final	% de Deformación
	(N)	(MPa)		
1	278.411	69.672	85.5	0.588
2	268.752	67.764	85.5	0.588
3	252.325	69.055	85.3	0.353
4	272.478	67.478	85.5	0.588
5	282.039	69.846	85.3	0.353
Promedio:	270.801	68.763	85.42	0.494

Fuente: Elaboración propia

Graficando los resultados obtenidos se logran la siguientes grafica

Grafica N°2 Ensayo tracción PLA puro

Ensayo de Tracción



Siguiendo con la investigación de las propiedades del PLA es que se le adiciona una carga de un material también biodegradable la sogá o maguey que es un producto natural, esto para poder conseguir reducir costos y poder mantener las propiedades según el uso que se le dé al polímero. En esta prueba para poder hacer la plancha se trabaja con 20 gr de PLA y 0.5 gr de hilos de sogá cortada obteniendo los siguientes cuadros y graficas

TABLA N°13 ENSAYO TRACCIÓN PLA CON 0.5 GR SOGA

PROBETAS DE PLA				L. =85 MM
Probeta	Espesor			
	E1	E2	E3	Promedio
1C	0.724	0.733	0.732	0.730
2C	0.794	0.824	0.781	0.800
3C	0.638	0.646	0.630	0.638
4C	1.126	1.020	0.713	0.953
5C	1.156	1.060	0.851	1.022

Fuente: Elaboración propia

TABLA N°14 RESULTADOS PLA CON 0.5 SOGA

	Carga Máxima (N)	Resistencia a la tracción (MPa)	Longitud Final	% de Deformación
1	186.817	42.672	85.2	0.235
2	211.775	44.120	85.5	0.588
3	204.665	53.465	85.5	0.588
4	247.373	49.258	85.5	0.588
5	302.359	49.308	85.5	0.588
Promedio	230.59	47.7646	85.44	0.517

Fuente: Elaboración propia

Grafica N°3

Ensayo tracción con PLA 0.5 de sogá

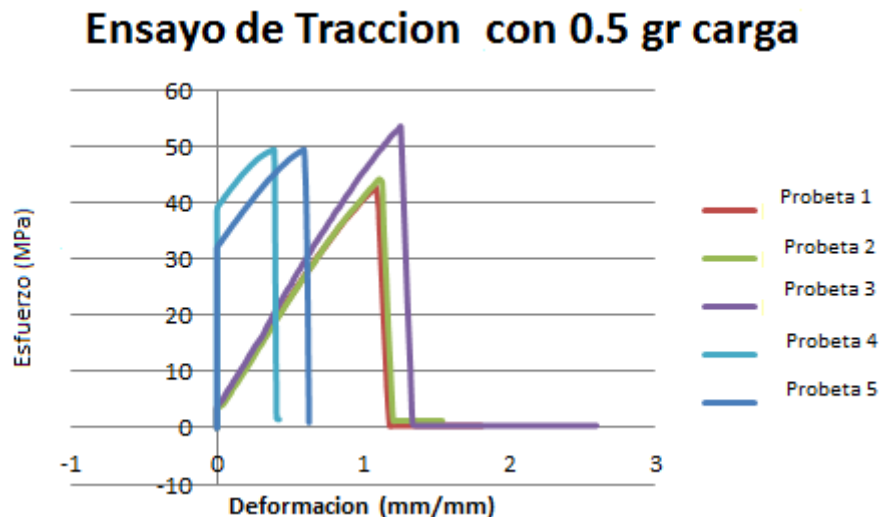


Figura N°37 Pruebas tracción

Se realiza una siguiente pruebas para poder analizar la tendencia al aumentar la cantidad del material de aporte .En esta prueba para poder hacer la plancha se

trabaja con 20 gr de PLA y 2 gr de hilos de sogá cortada obteniendo los siguientes cuadros y graficas

TABLA N°15 ENSAYO TRACCIÓN PLA CON 2 GR SOGA

PROBETAS DE PLA				L. =85 MM
Probeta	Espesor			
	E1	E2	E3	Promedio
1C	1.136	0.972	0.702	0.937
2C	1.158	1.014	0.796	0.989
3C	1.156	0.834	0.63	0.873
4C	0.694	0.911	1.129	0.911
5C	1.141	0.914	0.761	0.939

Fuente: Elaboración propia

TABLA N°16 ENSAYO TRACCIÓN CON 2 GR SOGA

	Carga Máxima (N)	Resistencia a la tracción (MPa)	Longitud Final	% de Deformación
1	229.348	40.795	86.0	1.176
2	228.162	38.450	86.0	1.176
3	213.482	40.756	86.0	1.176
4	196.094	35.875	86.0	1.176
5	216.786	38.478	86.0	1.176
Promedios	216.77	38.8708	86	1.1765

Fuente: Elaboración propia

Grafica N°4 Ensayo tracción PLA con 2 gr sogá

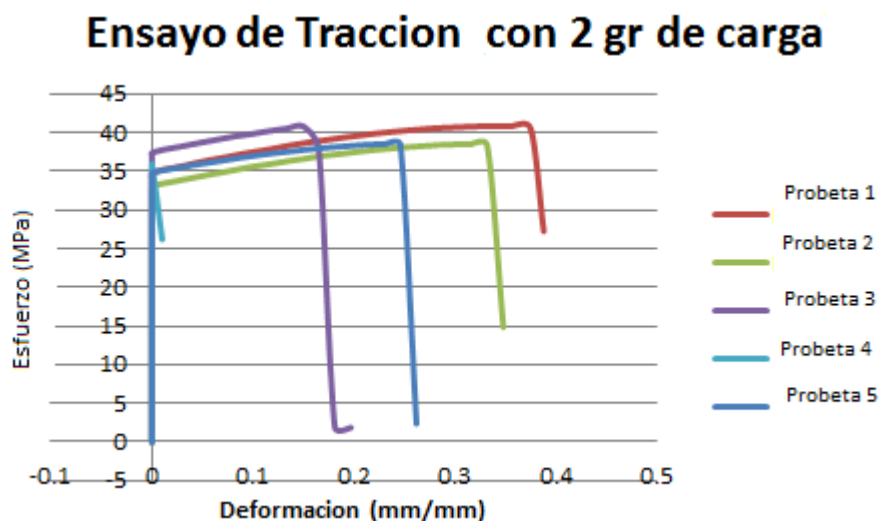


Figura N°38 Pruebas tracción 2

Realizando una comparación entre los promedios de resistencia a la tracción de PLA puro, con PLA con 0.5 gr de sogá y PLA con 2 gr de sogá podemos indicar que al aumentar la carga de sogá hay una disminución de la resistencia a la tracción, pero no es inferior al promedio de los polímeros convencionales más utilizados (Como en la tabla N°17 siguientes ya que la resistencia a la tracción a considerar depende del uso que se le dé al polímero).

TABLA N°17 CARACTERÍSTICAS POLÍMEROS MÁS USADOS

	Polivinilcloruro	Polietileno	Textolita
Densidad: Mg/m3	1.38 a 1.4	0.92 a 0.96	1.3 a 1.45
Resistencia a la rotura:Mpa			
La Flexión	80 a 120	17 a 60	160
La Tracción	40 a 60	13 a 40	1000
Modulo Elasticidad: Mpa	300 a 400	200 a 800	8000
Estabilidad Termica: °c	65	60 a 70	120 a 130
Conductividad Termica:W/m	0.16	0.2 a 0.4	0.28
Resiliencia:J/m2	12.1		(25 a 35)*10

Fuente: Propiedades básicas de los polímeros, Eleno Alfonso Brindis

Cuadro n°1 Resistencia a la tracción polímeros

Material	Mpa	Material	Mpa
PE-UHMW	17	PC	65
PE-HD	22	PSU	70
PS-HI	26	PMMA	70
E-CTFE	30	PPSU	76
PP	33	PA 6.6	80
ABS	41	PET	81
PA 6	45	PEEK	97
PVDF	50	PEI	105
PVC-U	55	PPE-30 GF	105
PPE	55	PEEK-mod	141
PVC-C	57	PEEK GL 30	156
PP-30 GF	57	PEI-30 GF	169
POM	63		

4.2. Resultados de Prueba de flexión

Se somete a prueba de flexión a las probetas teniendo tres tipos de ellas trabajando de la siguiente manera.

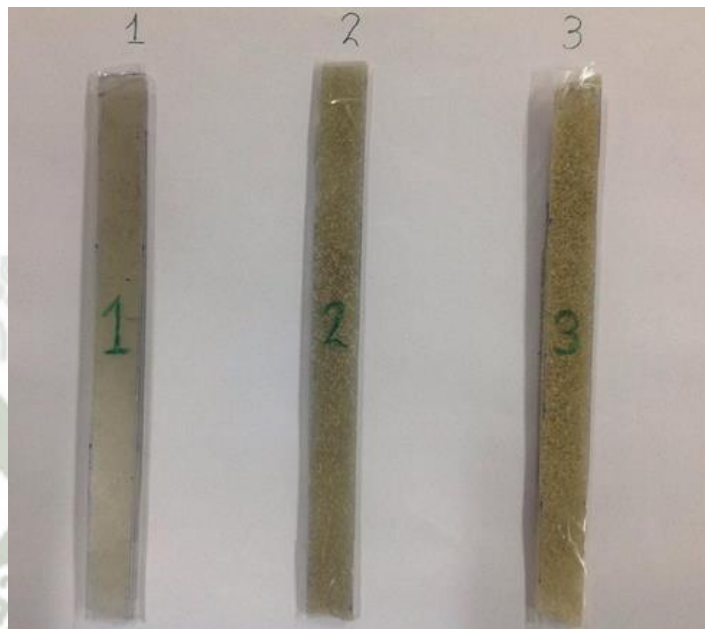


Figura N°39 Probetas prueba flexión



Figura N°40 Pruebas Flexión 1



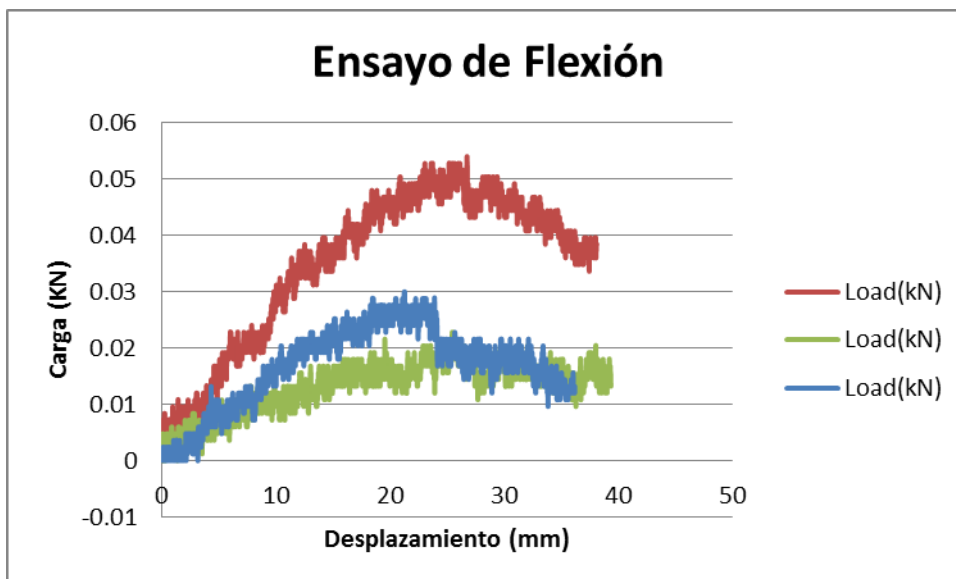
Figura N°41 Colocación de probeta para pruebas

TABLA N°18 RESULTADOS FLEXIÓN

PROBETA		Espesor (mm)	Carga Máxima (N)	Tensión en la superficie exterior en la mitad del tramo (MPa)
1	PLA Puro	4.995	54.000	12.49
2	PLA con 0.5 g de yute	2.443	22.800	22.04
3	PLA con 2 g de yute	3.226	30.000	16.63

Fuente: Elaboración propia

Grafica N°5 resultados graficas flexión



En la gráfica se puede evidenciar que hay una variación de la tensión en la superficie exterior de la probeta cuando se trabaja con PLA puro y que es menor que cuando se trabaja con PLA mezclado con carga de sogá.

4.3. Resultados de Prueba de Dureza

El Ensayo de dureza fue realizado con el equipo Shore d y los resultado se muestran en la siguiente tabla

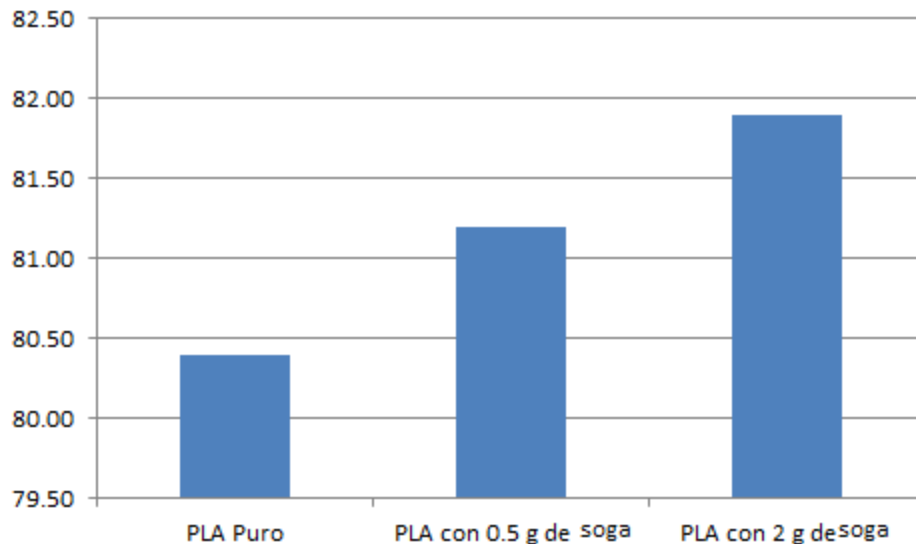
Tabla N°19 Resultados pruebas dureza

PROBETA		SHORE D					Promedio
		1	2	3	4	5	
1	PLA Puro	81	79	80	81	81	80.40
2	PLA con 0.5 g de sogá	82	82	82	81	79	81.20
3	PLA con 2 g de sogá	82	82	82	81.5	82	81.90

Fuente: Elaboración propia

Grafica N°6

Resultados dureza graficas



La dureza SHORE D del PLA se ve aumentada según se incrementa la carga

TABLA N°20 NORMA DUREZA

Durómetro Shore	Aplicación	Penetrador	Fuerza
Tipo A	Gomas blandas, plásticos y elastómeros, rodillos de impresión.	Cono truncado. Angulo 35°	822 g
Tipo D	Gomas duras y plásticos tipo termoplásticos, plataformas y boliches.	Cono en punta. Angulo 30°	4536 g
Tipo B	Elastómeros y plásticos duros. Papel y materiales fibrosos. Dureza > 93 Shore A	Cono en punta. Angulo 30°	822 g
Tipo C	Elastómeros y plásticos de dureza media. Evita marcas en la superficie de la pieza.	Cono truncado. Angulo 35°	4536 g
Tipo DO	Materiales granulares densos. Bobinas textiles.	Bola 3/32"	4536 g
Tipo O	Elastómeros muy blandos, bobinas textiles, materiales granulares blandos. Dureza <20 Shore A.	Bola 3/32"	822 g
Tipo OO	Espumas ligeras, esponjas, tejidos animales.	Bola 3/32"	113 g
Tipo OOO	Geles y esponjas de goma.	Bola 1/2 "	113 g

Fuente: Norma dureza shore D

4.4. Resultados de Prueba de Densidad

Se evaluó la prueba de densidad de cada una de las probetas como se aprecia en la tabla N°19

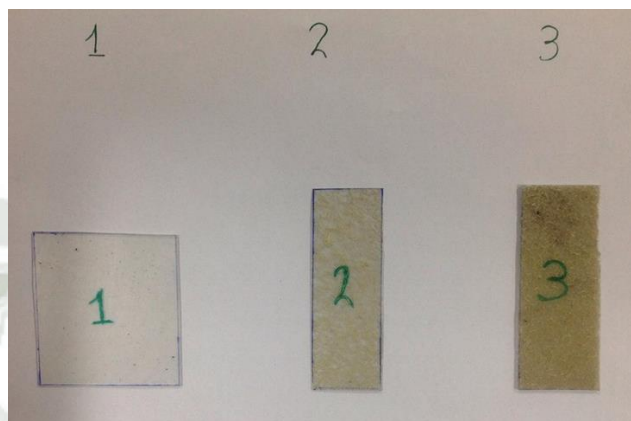


Figura N°42 Probeta densidad

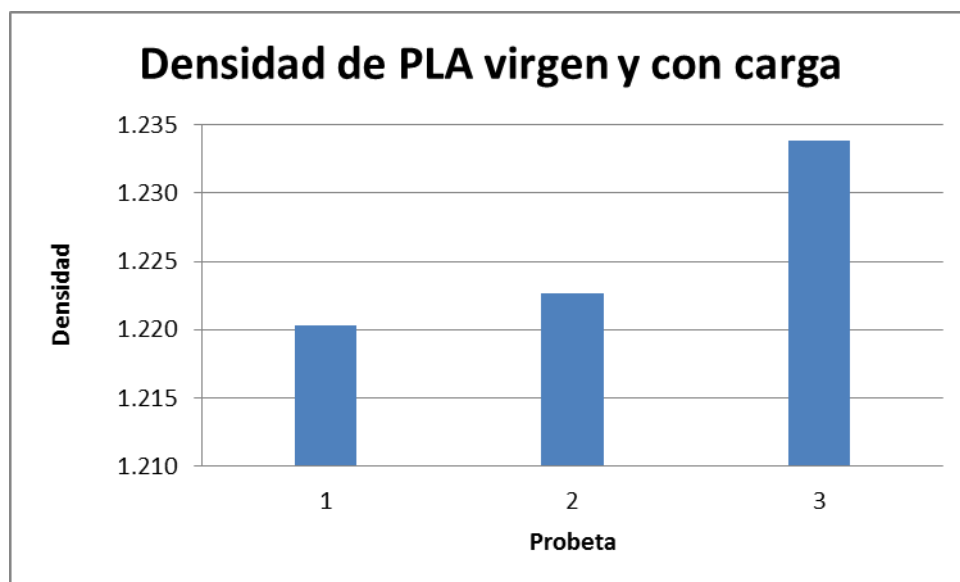
TABLA N°21 RESULTADOS PRUEBA DENSIDAD

PROBETA		Masa (g)	Espesor (mm)	Largo (mm)	Ancho (mm)	DENSIDAD (g/cm ³)
1	PLA Puro	1.55	0.646	45.81	42.92	1.220
2	PLA con 0.5 g de sogá	0.73	0.458	60.69	21.48	1.223
3	PLA con 2 g de sogá	1.76	1.005	60.58	23.43	1.234

Fuente: Elaboración propia

En la tabla se detalla los parámetros de cada probeta y se puede observar que la densidad es mayor cuando la proporción de sogá es mayor.

Grafica N°7 resultados densidad



En la figura se puede ver las probetas utilizadas para determinar la densidad de cada una que es mayor la que contiene soja que la probeta pura.

CONCLUSIONES

1. Luego de obtener los resultados de los ensayos a los que se sometió probetas PLA podemos concluir que el polímero cuenta con una resistencia a la tracción aceptable en comparación a otros polímeros considerando el uso, adicionando las fibras vegetales se aprecia una reducción de la resistencia estando aun dentro del rango de los polímeros comerciales.
2. Como resultado de la fabricación de varias muestras concluimos que dicho material es procesado en un rango de 135°C a 145°C .
3. Se determinó con el resultado de las pruebas que el polímero empleado comparado con otros compuestos posee propiedades considerables de acuerdo al uso y aplicación que se requiera, pudiendo reducir la cantidad del material adicionando un material biodegradable de aporte para reducir el valor monetario sin salir de los parámetros consignados.
4. Definimos el empleo del PLA en lo siguiente; lava ojos, ducha de seguridad, cases para laptops, pallets para transporte y almacenado de productos, recipiente contenedores de productos comestibles y otros, protectores de llantas ello evaluado mediante la comparación de plásticos y necesidad de los mismos ya que el PLA no es un material tóxico su principal empleo sería para transporte y empaquetado de materiales comestibles.

RECOMENDACIONES

- Para poder considerar el uso del PLA en la fabricación de algún objeto convencional es necesario primero evaluar el costo , la disponibilidad del material y las cantidades necesarias ya que actualmente su comercialización es reducida.
- Continuar el estudio del uso de fibras vegetales de sogá incorporando algun aditivo que genere una mejor interfase entre la matriz de PLA con refuerzo de sogá
- Continuar con el empleo de materiales biodegradables ya que ellos poseen considerables características que pueden remplazar varios compuestos, y así podemos ayudar al tema ecologico mundial.



BIBLIOGRAFÍA

- REVISTA TECNOLÓGICA DEL PLÁSTICO: "EN LA ERA DE LOS BIODEGRADABLES.
- MANUAL TÉCNICO DE TERMOFORMADO; PLASTIGALS DE MÉXICO
- WWW.TEXTOSCOENTIFICOS.COM/POLIMEROS/BIOGENERADOS
- <http://iq.ua.es/TPO/Tema1.pdf>
- http://joseluismesarueda.com/documents/TEMA_9_001.pdf
- <http://www.escet.urjc.es/~ihierro/estructuradela materia/Tema%209.pdf>
- http://ruc.udc.es/dspace/bitstream/2183/9638/1/CC_32_art_1.pdf
- <http://fluidos.eia.edu.co/hidraulica/articulos/es/conceptosbasicosmfluidos/nonewtonianos/nonewtonianos.html>
- <http://www.bibliociencias.cu/gsdll/collect/libros/index/assoc/HASHdfff3.dir/doc.pdf>
- <http://rua.ua.es/dspace/bitstream/10045/3623/1/tema2RUA.pdf>
- <http://tecnologiadelosplasticos.blogspot.com/2011/06/propiedades-mecanicas.html>
- <http://tecnologiadelosplasticos.blogspot.com/2011/03/extrusion-de-materiales-plasticos.html>
- <http://tecnologiadelosplasticos.blogspot.com.ar/2012/03/inyeccion-soplado.html>
- <http://ingenieria.univalle.edu.co:8000/revistaingenieria/index.php/inycopmpe/article/viewFile/61/60>
- http://www.plasticos-mecanizables.com/plasticos_resistencia_traccion.html
- <http://www.scielo.org.mx/pdf/rmiq/v8n3/v8n3a11.pdf>
- www.ttnet.net/ttnet/gotoprdr/SO200/030/0/25151303137323630343.HTM
- WWW.EIS.UVA.ES/MACROMOL/CURSO0506/MEDICINA/POLIMEROS_BIODEGRABALES.HTM

- ECUABUSINESS.BLOGSPOT.COM/2008/09/SUPERMAXI-SE-PASA-FUNDAS-BIODEGRADABLES.HTML
- WWW.BIOPACKCOLOMBIA.COM/MEDIA/REVISPLASTICO.HTM.
- WWW.MAIZAR.ORG.AR/VERTEXT.PHP



ANEXOS NORMAS



Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics¹

This standard is issued under the fixed designation D 638; 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 (ε) 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 This test method covers the determination of the tensile properties of unreinforced and reinforced plastics in the form of standard dumbbell-shaped test specimens when tested under defined conditions of pretreatment, temperature, humidity, and testing machine speed.

1.2 This test method can be used for testing materials of any thickness up to 14 mm [0.55 in.]. However, for testing specimens in the form of thin sheeting, including film less than 1.0 mm [0.04 in.] in thickness, Test Methods D 882 is the preferred test method. Materials with a thickness greater than 14 mm [0.55 in.] must be reduced by machining.

1.3 This test method includes the option of determining Poisson's ratio at room temperature.

NOTE 1—This test method and ISO 527-1 are technically equivalent.

NOTE 2—This test method is not intended to cover precise physical procedures. It is recognized that the constant rate of crosshead movement type of test leaves much to be desired from a theoretical standpoint, that wide differences may exist between rate of crosshead movement and rate of strain between gage marks on the specimen, and that the testing speeds specified disguise important effects characteristic of materials in the plastic state. Further, it is realized that variations in the thicknesses of test specimens, which are permitted by these procedures, produce variations in the surface-volume ratios of such specimens, and that these variations may influence the test results. Hence, where directly comparable results are desired, all samples should be of equal thickness. Special additional tests should be used where more precise physical data are needed.

NOTE 3—This test method may be used for testing phenolic molded resin or laminated materials. However, where these materials are used as electrical insulation, such materials should be tested in accordance with Test Methods D 229 and Test Method D 651.

NOTE 4—For tensile properties of resin-matrix composites reinforced with oriented continuous or discontinuous high modulus >20-GPa [$>3.0 \times 10^6$ -psi] fibers, tests shall be made in accordance with Test Method D 3039/D 3039M.

1.4 Test data obtained by this test method are relevant and appropriate for use in engineering design.

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

1.6 *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.*

2. Referenced Documents

2.1 ASTM Standards:²

- D 229 Test Methods for Rigid Sheet and Plate Materials Used for Electrical Insulation
- D 412 Test Methods for Vulcanized Rubber and Thermoplastic Elastomers—Tension
- D 618 Practice for Conditioning Plastics for Testing
- D 651 Test Method for Tensile Strength of Molded Electrical Insulating Materials
- D 882 Test Methods for Tensile Properties of Thin Plastic Sheet
- D 883 Terminology Relating to Plastics
- D 1822 Test Method for Tensile-Impact Energy to Break Plastics and Electrical Insulating Materials
- D 3039/D 3039M Test Method for Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Materials
- D 4000 Classification System for Specifying Plastic Materials
- D 4066 Classification System for Nylon Injection and Extrusion Materials
- D 5947 Test Methods for Physical Dimensions of Solid Plastic Specimens
- E 4 Practices for Force Verification of Testing Machines
- E 83 Practice for Verification and Classification of Extensometer
- E 132 Test Method for Poisson's Ratio at Room Temperature
- E 691 Practice for Conducting an Interlaboratory Study to Determine the Precision of a Test Method

2.2 ISO Standard:³

¹ This test method is under the jurisdiction of ASTM Committee D20 on Plastics and is the direct responsibility of Subcommittee D20.10 on Mechanical Properties.

Current edition approved December 1, 2003. Published January 2004. Originally approved in 1941. Last previous edition approved in 2002 as D 638 – 02a.

² For referenced ASTM standards, visit the ASTM website, www.astm.org, or contact ASTM Customer Service at service@astm.org. For *Annual Book of ASTM Standards* volume information, refer to the standard's Document Summary page on the ASTM website.

³ Available from American National Standards Institute (ANSI), 25 W. 43rd St., 4th Floor, New York, NY 10036.

*A Summary of Changes section appears at the end of this standard.

ISO 527-1 Determination of Tensile Properties

3. Terminology

3.1 *Definitions*—Definitions of terms applying to this test method appear in Terminology D 883 and Annex A2.

4. Significance and Use

4.1 This test method is designed to produce tensile property data for the control and specification of plastic materials. These data are also useful for qualitative characterization and for research and development. For many materials, there may be a specification that requires the use of this test method, but with some procedural modifications that take precedence when adhering to the specification. Therefore, it is advisable to refer to that material specification before using this test method. Table 1 in Classification D 4000 lists the ASTM materials standards that currently exist.

4.2 Tensile properties may vary with specimen preparation and with speed and environment of testing. Consequently, where precise comparative results are desired, these factors must be carefully controlled.

4.2.1 It is realized that a material cannot be tested without also testing the method of preparation of that material. Hence, when comparative tests of materials per se are desired, the greatest care must be exercised to ensure that all samples are prepared in exactly the same way, unless the test is to include the effects of sample preparation. Similarly, for referee purposes or comparisons within any given series of specimens, care must be taken to secure the maximum degree of uniformity in details of preparation, treatment, and handling.

4.3 Tensile properties may provide useful data for plastics engineering design purposes. However, because of the high degree of sensitivity exhibited by many plastics to rate of straining and environmental conditions, data obtained by this test method cannot be considered valid for applications involving load-time scales or environments widely different from those of this test method. In cases of such dissimilarity, no reliable estimation of the limit of usefulness can be made for most plastics. This sensitivity to rate of straining and environment necessitates testing over a broad load-time scale (including impact and creep) and range of environmental conditions if tensile properties are to suffice for engineering design purposes.

NOTE 5—Since the existence of a true elastic limit in plastics (as in many other organic materials and in many metals) is debatable, the propriety of applying the term “elastic modulus” in its quoted, generally accepted definition to describe the “stiffness” or “rigidity” of a plastic has been seriously questioned. The exact stress-strain characteristics of plastic materials are highly dependent on such factors as rate of application of stress, temperature, previous history of specimen, etc. However, stress-strain curves for plastics, determined as described in this test method, almost always show a linear region at low stresses, and a straight line drawn tangent to this portion of the curve permits calculation of an elastic modulus of the usually defined type. Such a constant is useful if its arbitrary nature and dependence on time, temperature, and similar factors are realized.

4.4 *Poisson’s Ratio*—When uniaxial tensile force is applied to a solid, the solid stretches in the direction of the applied force (axially), but it also contracts in both dimensions lateral to the applied force. If the solid is homogeneous and isotropic,

and the material remains elastic under the action of the applied force, the lateral strain bears a constant relationship to the axial strain. This constant, called Poisson’s ratio, is defined as the negative ratio of the transverse (negative) to axial strain under uniaxial stress.

4.4.1 Poisson’s ratio is used for the design of structures in which all dimensional changes resulting from the application of force need to be taken into account and in the application of the generalized theory of elasticity to structural analysis.

NOTE 6—The accuracy of the determination of Poisson’s ratio is usually limited by the accuracy of the transverse strain measurements because the percentage errors in these measurements are usually greater than in the axial strain measurements. Since a ratio rather than an absolute quantity is measured, it is only necessary to know accurately the relative value of the calibration factors of the extensometers. Also, in general, the value of the applied loads need not be known accurately.

5. Apparatus

5.1 *Testing Machine*—A testing machine of the constant-rate-of-crosshead-movement type and comprising essentially the following:

5.1.1 *Fixed Member*—A fixed or essentially stationary member carrying one grip.

5.1.2 *Movable Member*—A movable member carrying a second grip.

5.1.3 *Grips*—Grips for holding the test specimen between the fixed member and the movable member of the testing machine can be either the fixed or self-aligning type.

5.1.3.1 Fixed grips are rigidly attached to the fixed and movable members of the testing machine. When this type of grip is used extreme care should be taken to ensure that the test specimen is inserted and clamped so that the long axis of the test specimen coincides with the direction of pull through the center line of the grip assembly.

5.1.3.2 Self-aligning grips are attached to the fixed and movable members of the testing machine in such a manner that they will move freely into alignment as soon as any load is applied so that the long axis of the test specimen will coincide with the direction of the applied pull through the center line of the grip assembly. The specimens should be aligned as perfectly as possible with the direction of pull so that no rotary motion that may induce slippage will occur in the grips; there is a limit to the amount of misalignment self-aligning grips will accommodate.

5.1.3.3 The test specimen shall be held in such a way that slippage relative to the grips is prevented insofar as possible. Grip surfaces that are deeply scored or serrated with a pattern similar to those of a coarse single-cut file, serrations about 2.4 mm [0.09 in.] apart and about 1.6 mm [0.06 in.] deep, have been found satisfactory for most thermoplastics. Finer serrations have been found to be more satisfactory for harder plastics, such as the thermosetting materials. The serrations should be kept clean and sharp. Breaking in the grips may occur at times, even when deep serrations or abraded specimen surfaces are used; other techniques must be used in these cases. Other techniques that have been found useful, particularly with smooth-faced grips, are abrading that portion of the surface of the specimen that will be in the grips, and interposing thin

pieces of abrasive cloth, abrasive paper, or plastic, or rubber-coated fabric, commonly called hospital sheeting, between the specimen and the grip surface. No. 80 double-sided abrasive paper has been found effective in many cases. An open-mesh fabric, in which the threads are coated with abrasive, has also been effective. Reducing the cross-sectional area of the specimen may also be effective. The use of special types of grips is sometimes necessary to eliminate slippage and breakage in the grips.

5.1.4 Drive Mechanism—A drive mechanism for imparting to the movable member a uniform, controlled velocity with respect to the stationary member, with this velocity to be regulated as specified in Section 8.

5.1.5 Load Indicator—A suitable load-indicating mechanism capable of showing the total tensile load carried by the test specimen when held by the grips. This mechanism shall be essentially free of inertia lag at the specified rate of testing and shall indicate the load with an accuracy of $\pm 1\%$ of the indicated value, or better. The accuracy of the testing machine shall be verified in accordance with Practices E 4.

NOTE 7—Experience has shown that many testing machines now in use are incapable of maintaining accuracy for as long as the periods between inspection recommended in Practices E 4. Hence, it is recommended that each machine be studied individually and verified as often as may be found necessary. It frequently will be necessary to perform this function daily.

5.1.6 The fixed member, movable member, drive mechanism, and grips shall be constructed of such materials and in such proportions that the total elastic longitudinal strain of the system constituted by these parts does not exceed 1 % of the total longitudinal strain between the two gage marks on the test specimen at any time during the test and at any load up to the rated capacity of the machine.

5.1.7 Crosshead Extension Indicator—A suitable extension indicating mechanism capable of showing the amount of change in the separation of the grips, that is, crosshead movement. This mechanism shall be essentially free of inertial lag at the specified rate of testing and shall indicate the crosshead movement with an accuracy of $\pm 10\%$ of the indicated value.

5.2 Extension Indicator (extensometer)—A suitable instrument shall be used for determining the distance between two designated points within the gage length of the test specimen as the specimen is stretched. For referee purposes, the extensometer must be set at the full gage length of the specimen, as shown in Fig. 1. It is desirable, but not essential, that this instrument automatically record this distance, or any change in it, as a function of the load on the test specimen or of the elapsed time from the start of the test, or both. If only the latter is obtained, load-time data must also be taken. This instrument shall be essentially free of inertia at the specified speed of testing. Extensometers shall be classified and their calibration periodically verified in accordance with Practice E 83.

5.2.1 Modulus-of-Elasticity Measurements—For modulus-of-elasticity measurements, an extensometer with a maximum strain error of 0.0002 mm/mm [in./in.] that automatically and continuously records shall be used. An extensometer classified by Practice E 83 as fulfilling the requirements of a B-2

classification within the range of use for modulus measurements meets this requirement.

5.2.2 Low-Extension Measurements—For elongation-at-yield and low-extension measurements (nominally 20 % or less), the same above extensometer, attenuated to 20 % extension, may be used. In any case, the extensometer system must meet at least Class C (Practice E 83) requirements, which include a fixed strain error of 0.001 strain or $\pm 1.0\%$ of the indicated strain, whichever is greater.

5.2.3 High-Extension Measurements—For making measurements at elongations greater than 20 %, measuring techniques with error no greater than $\pm 10\%$ of the measured value are acceptable.

5.2.4 Poisson's Ratio—Bi-axial extensometer or axial and transverse extensometers capable of recording axial strain and transverse strain simultaneously. The extensometers shall be capable of measuring the change in strains with an accuracy of 1 % of the relevant value or better.

NOTE 8—Strain gages can be used as an alternative method to measure axial and transverse strain; however, proper techniques for mounting strain gages are crucial to obtaining accurate data. Consult strain gage suppliers for instruction and training in these special techniques.

5.3 Micrometers—Apparatus for measuring the width and thickness of the test specimen shall comply with the requirements of Test Method D 5947.

6. Test Specimens

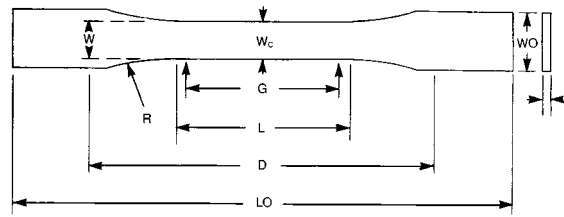
6.1 Sheet, Plate, and Molded Plastics:

6.1.1 Rigid and Semirigid Plastics—The test specimen shall conform to the dimensions shown in Fig. 1. The Type I specimen is the preferred specimen and shall be used where sufficient material having a thickness of 7 mm [0.28 in.] or less is available. The Type II specimen may be used when a material does not break in the narrow section with the preferred Type I specimen. The Type V specimen shall be used where only limited material having a thickness of 4 mm [0.16 in.] or less is available for evaluation, or where a large number of specimens are to be exposed in a limited space (thermal and environmental stability tests, etc.). The Type IV specimen should be used when direct comparisons are required between materials in different rigidity cases (that is, nonrigid and semirigid). The Type III specimen must be used for all materials with a thickness of greater than 7 mm [0.28 in.] but not more than 14 mm [0.55 in.].

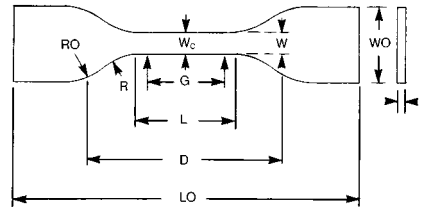
6.1.2 Nonrigid Plastics—The test specimen shall conform to the dimensions shown in Fig. 1. The Type IV specimen shall be used for testing nonrigid plastics with a thickness of 4 mm [0.16 in.] or less. The Type III specimen must be used for all materials with a thickness greater than 7 mm [0.28 in.] but not more than 14 mm [0.55 in.].

6.1.3 Reinforced Composites—The test specimen for reinforced composites, including highly orthotropic laminates, shall conform to the dimensions of the Type I specimen shown in Fig. 1.

6.1.4 Preparation—Test specimens shall be prepared by machining operations, or die cutting, from materials in sheet, plate, slab, or similar form. Materials thicker than 14 mm [0.55



TYPES I, II, III & V



TYPE IV

Specimen Dimensions for Thickness, T , mm [in.]^A

Dimensions (see drawings)	7 [0.28] or under		Over 7 to 14 [0.28 to 0.55], incl	4 [0.16] or under		Tolerances
	Type I	Type II	Type III	Type IV ^B	Type V ^{C,D}	
W—Width of narrow section ^{E,F}	13 [0.50]	6 [0.25]	19 [0.75]	6 [0.25]	3.18 [0.125]	±0.5 [±0.02] ^{B,C}
L—Length of narrow section	57 [2.25]	57 [2.25]	57 [2.25]	33 [1.30]	9.53 [0.375]	±0.5 [±0.02] ^C
WO—Width overall, min ^G	19 [0.75]	19 [0.75]	29 [1.13]	19 [0.75]	...	+ 6.4 [+ 0.25]
WO—Width overall, min ^G	...	...	...	...	9.53 [0.375]	+ 3.18 [+ 0.125]
LO—Length overall, min ^H	165 [6.5]	183 [7.2]	246 [9.7]	115 [4.5]	63.5 [2.5]	no max [no max]
G—Gage length ^I	50 [2.00]	50 [2.00]	50 [2.00]	...	7.62 [0.300]	±0.25 [±0.010] ^C
G—Gage length ^I	...	...	...	25 [1.00]	...	±0.13 [±0.005]
D—Distance between grips	115 [4.5]	135 [5.3]	115 [4.5]	65 [2.5] ^J	25.4 [1.0]	±5 [±0.2]
R—Radius of fillet	76 [3.00]	76 [3.00]	76 [3.00]	14 [0.56]	12.7 [0.5]	±1 [±0.04] ^C
RO—Outer radius (Type IV)	...	...	...	25 [1.00]	...	±1 [±0.04]

^A Thickness, T , shall be 3.2 ± 0.4 mm [0.13 ± 0.02 in.] for all types of molded specimens, and for other Types I and II specimens where possible. If specimens are machined from sheets or plates, thickness, T , may be the thickness of the sheet or plate provided this does not exceed the range stated for the intended specimen type. For sheets of nominal thickness greater than 14 mm [0.55 in.] the specimens shall be machined to 14 ± 0.4 mm [0.55 ± 0.02 in.] in thickness, for use with the Type III specimen. For sheets of nominal thickness between 14 and 51 mm [0.55 and 2 in.] approximately equal amounts shall be machined from each surface. For thicker sheets both surfaces of the specimen shall be machined, and the location of the specimen with reference to the original thickness of the sheet shall be noted. Tolerances on thickness less than 14 mm [0.55 in.] shall be those standard for the grade of material tested.

^B For the Type IV specimen, the internal width of the narrow section of the die shall be 6.00 ± 0.05 mm [0.250 ± 0.002 in.]. The dimensions are essentially those of Die C in Test Methods D 412.

^C The Type V specimen shall be machined or die cut to the dimensions shown, or molded in a mold whose cavity has these dimensions. The dimensions shall be:

$W = 3.18 \pm 0.03$ mm [0.125 ± 0.001 in.],

$L = 9.53 \pm 0.08$ mm [0.375 ± 0.003 in.],

$G = 7.62 \pm 0.02$ mm [0.300 ± 0.001 in.], and

$R = 12.7 \pm 0.08$ mm [0.500 ± 0.003 in.].

The other tolerances are those in the table.

^D Supporting data on the introduction of the L specimen of Test Method D 1822 as the Type V specimen are available from ASTM Headquarters. Request RR:D20-1038.

^E The width at the center W_c shall be $+0.00$ mm, -0.10 mm [$+0.000$ in., -0.004 in.] compared with width W at other parts of the reduced section. Any reduction in W at the center shall be gradual, equally on each side so that no abrupt changes in dimension result.

^F For molded specimens, a draft of not over 0.13 mm [0.005 in.] may be allowed for either Type I or II specimens 3.2 mm [0.13 in.] in thickness, and this should be taken into account when calculating width of the specimen. Thus a typical section of a molded Type I specimen, having the maximum allowable draft, could be as follows:

^G Overall widths greater than the minimum indicated may be desirable for some materials in order to avoid breaking in the grips.

^H Overall lengths greater than the minimum indicated may be desirable either to avoid breaking in the grips or to satisfy special test requirements.

^I Test marks or initial extensometer span.

^J When self-tightening grips are used, for highly extensible polymers, the distance between grips will depend upon the types of grips used and may not be critical if maintained uniform once chosen.

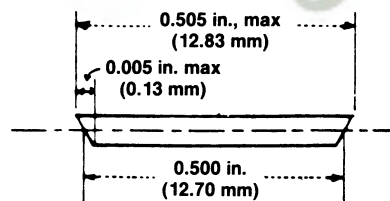
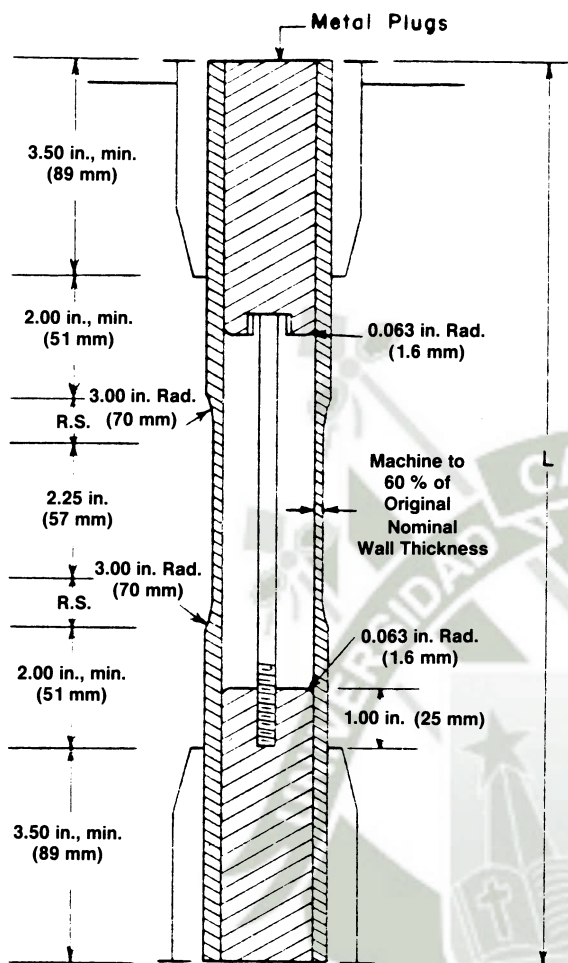


FIG. 1 Tension Test Specimens for Sheet, Plate, and Molded Plastics

in.] must be machined to 14 mm [0.55 in.] for use as Type III specimens. Specimens can also be prepared by molding the material to be tested.



DIMENSIONS OF TUBE SPECIMENS

Nominal Wall Thickness	Length of Radial Sections, 2R.S.	Total Calculated Minimum Length of Specimen	Standard Length, L, of Specimen to Be Used for 89-mm [3.5-in.] Jaws ^A
mm [in.]			
0.79 [$\frac{1}{32}$]	13.9 [0.547]	350 [13.80]	381 [15]
1.2 [$\frac{3}{64}$]	17.0 [0.670]	354 [13.92]	381 [15]
1.6 [$\frac{1}{16}$]	19.6 [0.773]	356 [14.02]	381 [15]
2.4 [$\frac{3}{32}$]	24.0 [0.946]	361 [14.20]	381 [15]
3.2 [$\frac{1}{8}$]	27.7 [1.091]	364 [14.34]	381 [15]
4.8 [$\frac{3}{16}$]	33.9 [1.333]	370 [14.58]	381 [15]
6.4 [$\frac{1}{4}$]	39.0 [1.536]	376 [14.79]	400 [15.75]
7.9 [$\frac{5}{16}$]	43.5 [1.714]	380 [14.96]	400 [15.75]
9.5 [$\frac{3}{8}$]	47.6 [1.873]	384 [15.12]	400 [15.75]
11.1 [$\frac{7}{16}$]	51.3 [2.019]	388 [15.27]	400 [15.75]
12.7 [$\frac{1}{2}$]	54.7 [2.154]	391 [15.40]	419 [16.5]

^A For other jaws greater than 89 mm [3.5 in.], the standard length shall be increased by twice the length of the jaws minus 178 mm [7 in.]. The standard length permits a slippage of approximately 6.4 to 12.7 mm [0.25 to 0.50 in.] in each jaw while maintaining the maximum length of the jaw grip.

FIG. 2 Diagram Showing Location of Tube Tension Test Specimens in Testing Machine

NOTE 9—Test results have shown that for some materials such as glass

cloth, SMC, and BMC laminates, other specimen types should be considered to ensure breakage within the gage length of the specimen, as mandated by 7.3.

NOTE 10—When preparing specimens from certain composite laminates such as woven roving, or glass cloth, care must be exercised in cutting the specimens parallel to the reinforcement. The reinforcement will be significantly weakened by cutting on a bias, resulting in lower laminate properties, unless testing of specimens in a direction other than parallel with the reinforcement constitutes a variable being studied.

NOTE 11—Specimens prepared by injection molding may have different tensile properties than specimens prepared by machining or die-cutting because of the orientation induced. This effect may be more pronounced in specimens with narrow sections.

6.2 *Rigid Tubes*—The test specimen for rigid tubes shall be as shown in Fig. 2. The length, L , shall be as shown in the table in Fig. 2. A groove shall be machined around the outside of the specimen at the center of its length so that the wall section after machining shall be 60 % of the original nominal wall thickness. This groove shall consist of a straight section 57.2 mm [2.25 in.] in length with a radius of 76 mm [3 in.] at each end joining it to the outside diameter. Steel or brass plugs having diameters such that they will fit snugly inside the tube and having a length equal to the full jaw length plus 25 mm [1 in.] shall be placed in the ends of the specimens to prevent crushing. They can be located conveniently in the tube by separating and supporting them on a threaded metal rod. Details of plugs and test assembly are shown in Fig. 2.

6.3 *Rigid Rods*—The test specimen for rigid rods shall be as shown in Fig. 3. The length, L , shall be as shown in the table in Fig. 3. A groove shall be machined around the specimen at the center of its length so that the diameter of the machined portion shall be 60 % of the original nominal diameter. This groove shall consist of a straight section 57.2 mm [2.25 in.] in length with a radius of 76 mm [3 in.] at each end joining it to the outside diameter.

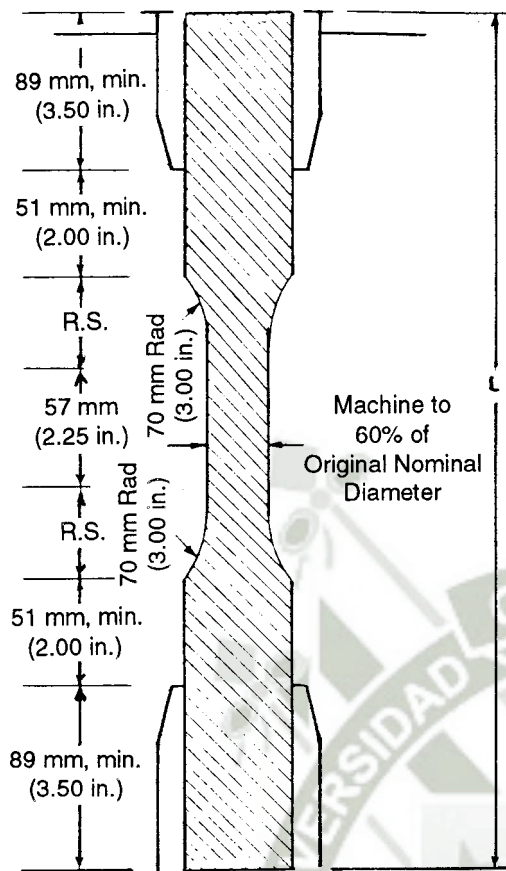
6.4 All surfaces of the specimen shall be free of visible flaws, scratches, or imperfections. Marks left by coarse machining operations shall be carefully removed with a fine file or abrasive, and the filed surfaces shall then be smoothed with abrasive paper (No. 00 or finer). The finishing sanding strokes shall be made in a direction parallel to the long axis of the test specimen. All flash shall be removed from a molded specimen, taking great care not to disturb the molded surfaces. In machining a specimen, undercuts that would exceed the dimensional tolerances shown in Fig. 1 shall be scrupulously avoided. Care shall also be taken to avoid other common machining errors.

6.5 If it is necessary to place gage marks on the specimen, this shall be done with a wax crayon or India ink that will not affect the material being tested. Gage marks shall not be scratched, punched, or impressed on the specimen.

6.6 When testing materials that are suspected of anisotropy, duplicate sets of test specimens shall be prepared, having their long axes respectively parallel with, and normal to, the suspected direction of anisotropy.

7. Number of Test Specimens

7.1 Test at least five specimens for each sample in the case of isotropic materials.



DIMENSIONS OF ROD SPECIMENS

Nominal Diameter	Length of Radial Sections, 2R.S.	Total Calculated Minimum Length of Specimen	Standard Length, L, of Specimen to Be Used for 89-mm [3½-in.] Jaws ^A
mm [in.]			
3.2 [⅜]	19.6 [0.773]	356 [14.02]	381 [15]
4.7 [⅜]	24.0 [0.946]	361 [14.20]	381 [15]
6.4 [¼]	27.7 [1.091]	364 [14.34]	381 [15]
9.5 [⅜]	33.9 [1.333]	370 [14.58]	381 [15]
12.7 [½]	39.0 [1.536]	376 [14.79]	400 [15.75]
15.9 [⅝]	43.5 [1.714]	380 [14.96]	400 [15.75]
19.0 [¾]	47.6 [1.873]	384 [15.12]	400 [15.75]
22.2 [⅞]	51.5 [2.019]	388 [15.27]	400 [15.75]
25.4 [1]	54.7 [2.154]	391 [15.40]	419 [16.5]
31.8 [1¼]	60.9 [2.398]	398 [15.65]	419 [16.5]
38.1 [1½]	66.4 [2.615]	403 [15.87]	419 [16.5]
42.5 [1¾]	71.4 [2.812]	408 [16.06]	419 [16.5]
50.8 [2]	76.0 [2.993]	412 [16.24]	432 [17]

^A For other jaws greater than 89 mm [3.5 in.], the standard length shall be increased by twice the length of the jaws minus 178 mm [7 in.]. The standard length permits a slippage of approximately 6.4 to 12.7 mm [0.25 to 0.50 in.] in each jaw while maintaining the maximum length of the jaw grip.

FIG. 3 Diagram Showing Location of Rod Tension Test Specimen in Testing Machine

7.2 Test ten specimens, five normal to, and five parallel with, the principle axis of anisotropy, for each sample in the case of anisotropic materials.

7.3 Discard specimens that break at some flaw, or that break outside of the narrow cross-sectional test section (Fig. 1, dimension “L”), and make retests, unless such flaws constitute a variable to be studied.

NOTE 12—Before testing, all transparent specimens should be inspected in a polariscope. Those which show atypical or concentrated strain patterns should be rejected, unless the effects of these residual strains constitute a variable to be studied.

8. Speed of Testing

8.1 Speed of testing shall be the relative rate of motion of the grips or test fixtures during the test. The rate of motion of the driven grip or fixture when the testing machine is running idle may be used, if it can be shown that the resulting speed of testing is within the limits of variation allowed.

8.2 Choose the speed of testing from Table 1. Determine this chosen speed of testing by the specification for the material being tested, or by agreement between those concerned. When the speed is not specified, use the lowest speed shown in Table 1 for the specimen geometry being used, which gives rupture within ½ to 5-min testing time.

8.3 Modulus determinations may be made at the speed selected for the other tensile properties when the recorder response and resolution are adequate.

8.4 The speed of testing for Poisson’s ratio determination shall be 5 mm/min.

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 test in accordance with Procedure A of Practice D 618, unless otherwise specified by contract or the relevant ASTM material specification. Reference pre-test conditioning, to settle disagreements, shall apply tolerances of $\pm 1^\circ\text{C}$ [1.8°F] and $\pm 2\%$ relative humidity.

9.2 *Test Conditions*—Conduct the tests at $23 \pm 2^\circ\text{C}$ [$73.4 \pm 3.6^\circ\text{F}$] and $50 \pm 5\%$ relative humidity, unless otherwise specified by contract or the relevant ASTM material specification. Reference testing conditions, to settle disagreements, shall apply tolerances of $\pm 1^\circ\text{C}$ [1.8°F] and $\pm 2\%$ relative humidity.

TABLE 1 Designations for Speed of Testing^A

Classification ^B	Specimen Type	Speed of Testing, mm/min [in./min]	Nominal Strain ^C Rate at Start of Test, mm/mm·min [in./in.·min]
Rigid and Semirigid	I, II, III rods and tubes	5 [0.2] $\pm$ 25 %	0.1
		50 [2] $\pm$ 10 %	1
	IV	500 [20] $\pm$ 10 %	10
		5 [0.2] $\pm$ 25 %	0.15
		50 [2] $\pm$ 10 %	1.5
Nonrigid	V	500 [20] $\pm$ 10 %	15
		1 [0.05] $\pm$ 25 %	0.1
		10 [0.5] $\pm$ 25 %	1
	III	100 [5] $\pm$ 25 %	10
		50 [2] $\pm$ 10 %	1
		500 [20] $\pm$ 10 %	10
	IV	50 [2] $\pm$ 10 %	1.5
		500 [20] $\pm$ 10 %	15

^A Select the lowest speed that produces rupture in ½ to 5 min for the specimen geometry being used (see 8.2).

^B See Terminology D 883 for definitions.

^C The initial rate of straining cannot be calculated exactly for dumbbell-shaped specimens because of extension, both in the reduced section outside the gage length and in the fillets. This initial strain rate can be measured from the initial slope of the tensile strain-versus-time diagram.

10. Procedure

10.1 Measure the width and thickness of each specimen to the nearest 0.025 mm [0.001 in.] using the applicable test methods in D 5947.

TABLE 2 Modulus, 10^6 psi, for Eight Laboratories, Five Materials

	Mean	S_r	S_R	I_r	I_R
Polypropylene	0.210	0.0089	0.071	0.025	0.201
Cellulose acetate butyrate	0.246	0.0179	0.035	0.051	0.144
Acrylic	0.481	0.0179	0.063	0.051	0.144
Glass-reinforced nylon	1.17	0.0537	0.217	0.152	0.614
Glass-reinforced polyester	1.39	0.0894	0.266	0.253	0.753

10.1.1 Measure the width and thickness of flat specimens at the center of each specimen and within 5 mm of each end of the gage length.

10.1.2 Injection molded specimen dimensions may be determined by actual measurement of only one specimen from each sample when it has previously been demonstrated that the specimen-to-specimen variation in width and thickness is less than 1%.

10.1.3 Take the width of specimens produced by a Type IV die as the distance between the cutting edges of the die in the narrow section.

10.1.4 Measure the diameter of rod specimens, and the inside and outside diameters of tube specimens, to the nearest 0.025 mm [0.001 in.] at a minimum of two points 90° apart; make these measurements along the groove for specimens so constructed. Use plugs in testing tube specimens, as shown in Fig. 2.

10.2 Place the specimen in the grips of the testing machine, taking care to align the long axis of the specimen and the grips with an imaginary line joining the points of attachment of the grips to the machine. The distance between the ends of the gripping surfaces, when using flat specimens, shall be as indicated in Fig. 1. On tube and rod specimens, the location for the grips shall be as shown in Fig. 2 and Fig. 3. Tighten the grips evenly and firmly to the degree necessary to prevent slippage of the specimen during the test, but not to the point where the specimen would be crushed.

10.3 Attach the extension indicator. When modulus is being determined, a Class B-2 or better extensometer is required (see 5.2.1).

NOTE 13—Modulus of materials is determined from the slope of the linear portion of the stress-strain curve. For most plastics, this linear portion is very small, occurs very rapidly, and must be recorded automatically. The change in jaw separation is never to be used for calculating modulus or elongation.

10.3.1 Poisson's Ratio Determination:

10.3.1.1 The measurement of Poisson's Ratio is optional and need be determined only when requested. If the tensile modulus is determined at a test speed of 5 mm/min, it is acceptable to determine the Poisson's ratio at the same time as the tensile modulus.

10.3.1.2 Poisson's Ratio shall be determined at a speed of 5 mm/min. For materials having a distinct linear elastic region on the stress-strain curve the ratio shall be determined in the same load range as that used for the measurement of the modulus of

elasticity. If the material does not exhibit a linear stress to strain relationship the ratio shall be determined within the axial strain range of 0.0005 to 0.0025 mm/mm (0.05 to 0.25%). If the ratio is determined in this manner it shall be noted in the report that a region of proportionality of stress to strain was not evident.

NOTE 14—A suitable method to judge the determination of linearity of the stress to strain curve is by making a series of tangent modulus measurements at different axial strain levels. Values equivalent at each strain level indicate linearity. Values showing a downward trend with increasing strain level indicate non linearity.

10.3.1.3 Attach the transverse strain measuring device. The transverse strain measuring device must continuously measure the strain simultaneously with the axial strain measuring device.

TABLE 3 Tensile Stress at Yield, 10^3 psi, for Eight Laboratories, Three Materials

	Mean	S_r	S_R	I_r	I_R
Polypropylene	3.63	0.022	0.161	0.062	0.456
Cellulose acetate butyrate	5.01	0.058	0.227	0.164	0.642
Acrylic	10.4	0.067	0.317	0.190	0.897

TABLE 4 Elongation at Yield, %, for Eight Laboratories, Three Materials

	Mean	S_r	S_R	I_r	I_R
Cellulose acetate butyrate	3.65	0.27	0.62	0.76	1.75
Acrylic	4.89	0.21	0.55	0.59	1.56
Polypropylene	8.79	0.45	5.86	1.27	16.5

10.3.1.4 Make simultaneous measurements of load and strain and record the data. The precision of the value of Poisson's Ratio will depend on the number of data points of axial and transverse strain taken. It is recommended that the data collection rate for the test be a minimum of 20 points per second. This is particularly important for materials having a non linear stress to strain curve.

10.4 Set the speed of testing at the proper rate as required in Section 8, and start the machine.

10.5 Record the load-extension curve of the specimen.

10.6 Record the load and extension at the yield point (if one exists) and the load and extension at the moment of rupture.

NOTE 15—If it is desired to measure both modulus and failure properties (yield or break, or both), it may be necessary, in the case of highly extensible materials, to run two independent tests. The high magnification extensometer normally used to determine properties up to the yield point may not be suitable for tests involving high extensibility. If allowed to remain attached to the specimen, the extensometer could be permanently damaged. A broad-range incremental extensometer or hand-rule technique may be needed when such materials are taken to rupture.

11. Calculation

11.1 Toe compensation shall be made in accordance with Annex A1, unless it can be shown that the toe region of the curve is not due to the take-up of slack, seating of the specimen, or other artifact, but rather is an authentic material response.

11.2 Tensile Strength—Calculate the tensile strength by dividing the maximum load in newtons [pounds-force] by the average original cross-sectional area in the gage length segment of the specimen in square metres [square inches]. Express the result in pascals [pounds-force per square inch] and report it to three significant figures as tensile strength at yield or tensile strength at break, whichever term is applicable. When a nominal yield or break load less than the maximum is present and applicable, it may be desirable also to calculate, in a similar manner, the corresponding tensile stress at yield or tensile stress at break and report it to three significant figures (see Note A2.8).

11.3 Elongation values are valid and are reported in cases where uniformity of deformation within the specimen gage length is present. Elongation values are quantitatively relevant and appropriate for engineering design. When non-uniform deformation (such as necking) occurs within the specimen gage length nominal strain values are reported. Nominal strain values are of qualitative utility only.

11.4 Modulus of Elasticity—Calculate the modulus of elasticity by extending the initial linear portion of the load-extension curve and dividing the difference in stress corresponding to any segment of section on this straight line by the corresponding difference in strain. All elastic modulus values shall be computed using the average original cross-sectional area in the gage length segment of the specimen in the calculations. The result shall be expressed in pascals [pounds-force per square inch] and reported to three significant figures.

11.5 Secant Modulus—At a designated strain, this shall be calculated by dividing the corresponding stress (nominal) by the designated strain. Elastic modulus values are preferable and shall be calculated whenever possible. However, for materials where no proportionality is evident, the secant value shall be calculated. Draw the tangent as directed in A1.3 and Fig. A1.2, and mark off the designated strain from the yield point where the tangent line goes through zero stress. The stress to be used in the calculation is then determined by dividing the load-extension curve by the original average cross-sectional area of

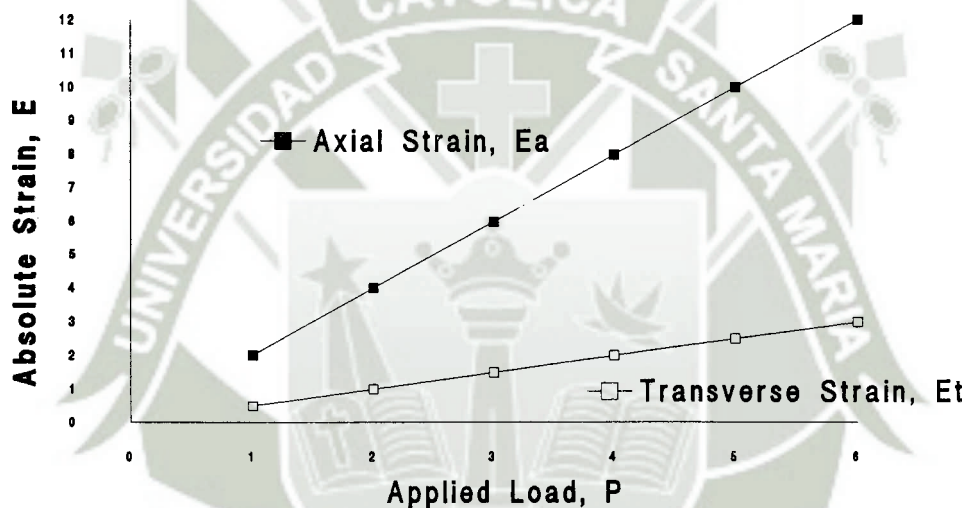


FIG. 4 Plot of Strains Versus Load for Determination of Poisson's Ratio

11.3.1 Percent Elongation—Percent elongation is the change in gage length relative to the original specimen gage length, expressed as a percent. Percent elongation is calculated using the apparatus described in 5.2.

11.3.1.1 Percent Elongation at Yield—Calculate the percent elongation at yield by reading the extension (change in gage length) at the yield point. Divide that extension by the original gage length and multiply by 100.

11.3.1.2 Percent Elongation at Break—Calculate the percent elongation at break by reading the extension (change in gage length) at the point of specimen rupture. Divide that extension by the original gage length and multiply by 100.

11.3.2 Nominal Strain—Nominal strain is the change in grip separation relative to the original grip separation expressed as a percent. Nominal strain is calculated using the apparatus described in 5.1.7.

11.3.2.1 Nominal strain at break—Calculate the nominal strain at break by reading the extension (change in grip separation) at the point of rupture. Divide that extension by the original grip separation and multiply by 100.

the specimen.

11.6 Poisson's Ratio—The axial strain, ϵ_a , indicated by the axial extensometer, and the transverse strain, ϵ_t , indicated by the transverse extensometers, are plotted against the applied load, P , as shown in Fig. 4.

11.6.1 For those materials where there is proportionality of stress to strain and it is possible to determine a modulus of elasticity, a straight line is drawn through each set of points within the load range used for determination of modulus, and the slopes $d\epsilon_a / dP$ and $d\epsilon_t / dP$, of those lines are determined. The use of a least squares method of calculation will reduce errors resulting from drawing lines. Poisson's ratio, μ , is then calculated as follows:

$$\mu = -(d\epsilon_t / dP) / (d\epsilon_a / dP) \quad (1)$$

where:

$d\epsilon_t$ = change in transverse strain,
 $d\epsilon_a$ = change in axial strain, and
 dP = change in applied load;

or

$$\mu = -(d\epsilon_t) / (d\epsilon_a) \quad (2)$$

The errors that may be introduced by drawing a straight line through the points can be reduced by applying the least squares method.

11.6.2 For those materials where there is no proportionality of stress to strain evident determine the ratio of $d\epsilon_t / d\epsilon_a$ when $d\epsilon_a = 0.002$ (based on axial strain range of 0.0005 to 0.0025 mm/mm) and after toe compensation has been made.

$$\mu = d\epsilon_t / 0.002 \quad (3)$$

11.7 For each series of tests, calculate the arithmetic mean of all values obtained and report it as the “average value” for the particular property in question.

11.8 Calculate the standard deviation (estimated) as follows and report it to two significant figures:

$$s = \sqrt{(\sum X^2 - n\bar{X}^2) / (n - 1)} \quad (4)$$

where:

s = estimated standard deviation,

X = value of single observation,

n = number of observations, and

$\bar{X}$ = arithmetic mean of the set of observations.

11.9 See Annex A1 for information on toe compensation.

TABLE 5 Tensile Strength at Break, 10^3 psi, for Eight Laboratories, Five Materials^A

	Mean	S_r	S_R	I_r	I_R
Polypropylene	2.97	1.54	1.65	4.37	4.66
Cellulose acetate butyrate	4.82	0.058	0.180	0.164	0.509
Acrylic	9.09	0.452	0.751	1.27	2.13
Glass-reinforced polyester	20.8	0.233	0.437	0.659	1.24
Glass-reinforced nylon	23.6	0.277	0.698	0.784	1.98

^A Tensile strength and elongation at break values obtained for unreinforced propylene plastics generally are highly variable due to inconsistencies in necking or “drawing” of the center section of the test bar. Since tensile strength and elongation at yield are more reproducible and relate in most cases to the practical usefulness of a molded part, they are generally recommended for specification purposes.

TABLE 6 Elongation at Break, %, for Eight Laboratories, Five Materials^A

	Mean	S_r	S_R	I_r	I_R
Glass-reinforced polyester	3.68	0.20	2.33	0.570	6.59
Glass-reinforced nylon	3.87	0.10	2.13	0.283	6.03
Acrylic	13.2	2.05	3.65	5.80	10.3
Cellulose acetate butyrate	14.1	1.87	6.62	5.29	18.7
Polypropylene	293.0	50.9	119.0	144.0	337.0

^A Tensile strength and elongation at break values obtained for unreinforced propylene plastics generally are highly variable due to inconsistencies in necking or “drawing” of the center section of the test bar. Since tensile strength and elongation at yield are more reproducible and relate in most cases to the practical usefulness of a molded part, they are generally recommended for specification purposes.

12. Report

12.1 Report the following information:

12.1.1 Complete identification of the material tested, including type, source, manufacturer’s code numbers, form, principal dimensions, previous history, etc.,

12.1.2 Method of preparing test specimens,

TABLE 7 Tensile Yield Strength, for Ten Laboratories, Eight Materials

Material	Test Speed, in./min	Values Expressed in psi Units				
		Average	S_r	S_R	I_r	I_R
LDPE	20	1544	52.4	64.0	146.6	179.3
LDPE	20	1894	53.1	61.2	148.7	171.3
LLDPE	20	1879	74.2	99.9	207.8	279.7
LLDPE	20	1791	49.2	75.8	137.9	212.3
LLDPE	20	2900	55.5	87.9	155.4	246.1
LLDPE	20	1730	63.9	96.0	178.9	268.7
HDPE	2	4101	196.1	371.9	549.1	1041.3
HDPE	2	3523	175.9	478.0	492.4	1338.5

12.1.3 Type of test specimen and dimensions,

12.1.4 Conditioning procedure used,

12.1.5 Atmospheric conditions in test room,

12.1.6 Number of specimens tested,

12.1.7 Speed of testing,

12.1.8 Classification of extensometers used. A description of measuring technique and calculations employed instead of a minimum Class-C extensometer system,

12.1.9 Tensile strength at yield or break, average value, and standard deviation,

12.1.10 Tensile stress at yield or break, if applicable, average value, and standard deviation,

12.1.11 Percent elongation at yield, or break, or nominal strain at break, or all three, as applicable, average value, and standard deviation,

12.1.12 Modulus of elasticity or secant modulus, average value, and standard deviation,

12.1.13 If measured, Poisson’s ratio, average value, standard deviation, and statement of whether there was proportionality within the strain range,

12.1.14 Date of test, and

12.1.15 Revision date of Test Method D 638.

13. Precision and Bias⁴

13.1 *Precision*—Tables 2-6 are based on a round-robin test conducted in 1984, involving five materials tested by eight laboratories using the Type I specimen, all of nominal 0.125-in. thickness. Each test result was based on five individual determinations. Each laboratory obtained two test results for each material.

13.1.1 Tables 7-10 are based on a round-robin test conducted by the polyolefin subcommittee in 1988, involving eight polyethylene materials tested in ten laboratories. For each material, all samples were molded at one source, but the individual specimens were prepared at the laboratories that tested them. Each test result was the average of five individual determinations. Each laboratory obtained three test results for each material. Data from some laboratories could not be used for various reasons, and this is noted in each table.

13.1.2 Table 11 is based on a repeatability study involving a single laboratory. The two materials used were unfilled polypropylene types. Measurements were performed by a

⁴ Supporting data are available from ASTM Headquarters. Request RR:D20-1125 for the 1984 round robin and RR:D20-1170 for the 1988 round robin.

TABLE 8 Tensile Yield Elongation, for Eight Laboratories, Eight Materials

Material	Test Speed, in./min	Values Expressed in Percent Units				
		Average	S_r	S_R	r	R
LDPE	20	17.0	1.26	3.16	3.52	8.84
LDPE	20	14.6	1.02	2.38	2.86	6.67
LLDPE	20	15.7	1.37	2.85	3.85	7.97
LLDPE	20	16.6	1.59	3.30	4.46	9.24
LLDPE	20	11.7	1.27	2.88	3.56	8.08
LLDPE	20	15.2	1.27	2.59	3.55	7.25
HDPE	2	9.27	1.40	2.84	3.91	7.94
HDPE	2	9.63	1.23	2.75	3.45	7.71

TABLE 9 Tensile Break Strength, for Nine Laboratories, Six Materials

Material	Test Speed, in./min	Values Expressed in psi Units				
		Average	S_r	S_R	r	R
LDPE	20	1592	52.3	74.9	146.4	209.7
LDPE	20	1750	66.6	102.9	186.4	288.1
LLDPE	20	4379	127.1	219.0	355.8	613.3
LLDPE	20	2840	78.6	143.5	220.2	401.8
LLDPE	20	1679	34.3	47.0	95.96	131.6
LLDPE	20	2660	119.1	166.3	333.6	465.6

TABLE 10 Tensile Break Elongation, for Nine Laboratories, Six Materials

Material	Test Speed, in./min	Values Expressed in Percent Units				
		Average	S_r	S_R	r	R
LDPE	20	567	31.5	59.5	88.2	166.6
LDPE	20	569	61.5	89.2	172.3	249.7
LLDPE	20	890	25.7	113.8	71.9	318.7
LLDPE	20	64.4	6.68	11.7	18.7	32.6
LLDPE	20	803	25.7	104.4	71.9	292.5
LLDPE	20	782	41.6	96.7	116.6	270.8

single technician on a single day. Each test result is an individual determination. Testing was run using two Type B-1 extensometers for transverse and axial measurements at a test speed of 5 mm/min.

13.1.3 In Tables 2-11, for the materials indicated, and for test results that derived from testing five specimens:

TABLE 11 Poisson's Ratio Repeatability Data for One Laboratory and Two Polypropylene Materials

Materials	Values Expressed as a Dimensionless Ratio		
	Average	S_r	r
PP #1 Chord	0.412	0.009	0.026
PP #1 Least Squares	0.413	0.011	0.032
PP #2 Chord	0.391	0.009	0.026
PP #2 Least Squares	0.392	0.010	0.028

13.1.3.1 S_r is the within-laboratory standard deviation of the average; $I_r = 2.83 S_r$. (See 13.1.3.3 for application of I_r .)

13.1.3.2 S_R is the between-laboratory standard deviation of the average; $I_R = 2.83 S_R$. (See 13.1.3.4 for application of I_R .)

13.1.3.3 *Repeatability*—In comparing two test results for the same material, obtained by the same operator using the same equipment on the same day, those test results should be judged not equivalent if they differ by more than the I_r value for that material and condition.

13.1.3.4 *Reproducibility*—In comparing two test results for the same material, obtained by different operators using different equipment on different days, those test results should be judged not equivalent if they differ by more than the I_R value for that material and condition. (This applies between different laboratories or between different equipment within the same laboratory.)

13.1.3.5 Any judgment in accordance with 13.1.3.3 and 13.1.3.4 will have an approximate 95 % (0.95) probability of being correct.

13.1.3.6 Other formulations may give somewhat different results.

13.1.3.7 For further information on the methodology used in this section, see Practice E 691.

13.1.3.8 The precision of this test method is very dependent upon the uniformity of specimen preparation, standard practices for which are covered in other documents.

13.2 *Bias*—There are no recognized standards on which to base an estimate of bias for this test method.

14. Keywords

14.1 modulus of elasticity; percent elongation; plastics; Poisson's ratio; tensile properties; tensile strength

ANNEXES

(Mandatory Information)

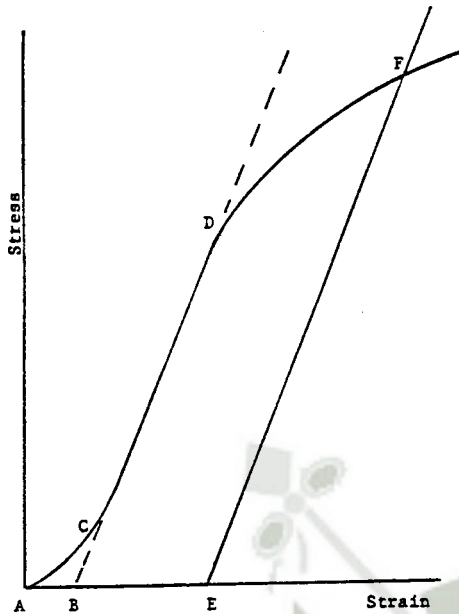
A1. TOE COMPENSATION

A1.1 In a typical stress-strain curve (Fig. A1.1) there is a toe region, AC, that does not represent a property of the 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 (Fig. A1.1), a continuation of the

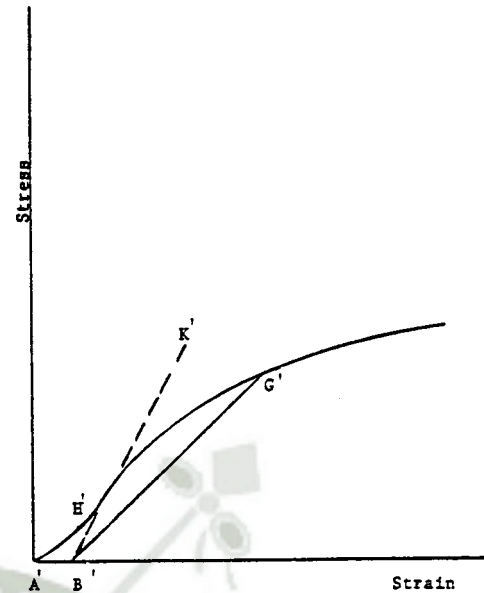
linear (CD) region of the curve is constructed through the zero-stress axis. This intersection (B) is the corrected zero-strain point from which all extensions or strains must be measured, including the yield offset (BE), if applicable. The elastic modulus can be determined by dividing the stress at 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 (Fig. A1.2), the same kind of toe correction of the



NOTE 1—Some chart recorders plot the mirror image of this graph.

FIG. A1.1 Material with Hookean Region



NOTE 1—Some chart recorders plot the mirror image of this graph.

FIG. A1.2 Material with No Hookean Region

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.

A2. DEFINITIONS OF TERMS AND SYMBOLS RELATING TO TENSION TESTING OF PLASTICS

A2.1 *elastic limit*—the greatest stress which a material is capable of sustaining without any permanent strain remaining upon complete release of the stress. It is expressed in force per unit area, usually megapascals [pounds-force per square inch].

NOTE A2.1—Measured values of proportional limit and elastic limit vary greatly with the sensitivity and accuracy of the testing equipment, eccentricity of loading, the scale to which the stress-strain diagram is plotted, and other factors. Consequently, these values are usually replaced by yield strength.

A2.2 *elongation*—the increase in length produced in the gage length of the test specimen by a tensile load. It is expressed in units of length, usually millimetres [inches]. (Also known as *extension*.)

NOTE A2.2—Elongation and strain values are valid only in cases where uniformity of specimen behavior within the gage length is present. In the case of materials exhibiting necking phenomena, such values are only of qualitative utility after attainment of yield point. This is due to inability to ensure that necking will encompass the entire length between the gage marks prior to specimen failure.

A2.3 *gage length*—the original length of that portion of the specimen over which strain or change in length is determined.

A2.4 *modulus of elasticity*—the ratio of stress (nominal) to corresponding strain below the proportional limit of a material. It is expressed in force per unit area, usually megapascals [pounds-force per square inch]. (Also known as *elastic modulus* or *Young's modulus*).

lus or *Young's modulus*).

NOTE A2.3—The stress-strain relations of many plastics do not conform to Hooke's law throughout the elastic range but deviate therefrom even at stresses well below the elastic limit. For such materials the slope of the tangent to the stress-strain curve at a low stress is usually taken as the modulus of elasticity. Since the existence of a true proportional limit in plastics is debatable, the propriety of applying the term "modulus of elasticity" to describe the stiffness or rigidity of a plastic has been seriously questioned. The exact stress-strain characteristics of plastic materials are very dependent on such factors as rate of stressing, temperature, previous specimen history, etc. However, such a value is useful if its arbitrary nature and dependence on time, temperature, and other factors are realized.

A2.5 *necking*—the localized reduction in cross section which may occur in a material under tensile stress.

A2.6 *offset yield strength*—the stress at which the strain exceeds by a specified amount (the offset) an extension of the initial proportional portion of the stress-strain curve. It is expressed in force per unit area, usually megapascals [pounds-force per square inch].

NOTE A2.4—This measurement is useful for materials whose stress-strain curve in the yield range is of gradual curvature. The offset yield strength can be derived from a stress-strain curve as follows (Fig. A2.1):

On the strain axis lay off OM equal to the specified offset.

Draw OA tangent to the initial straight-line portion of the stress-strain

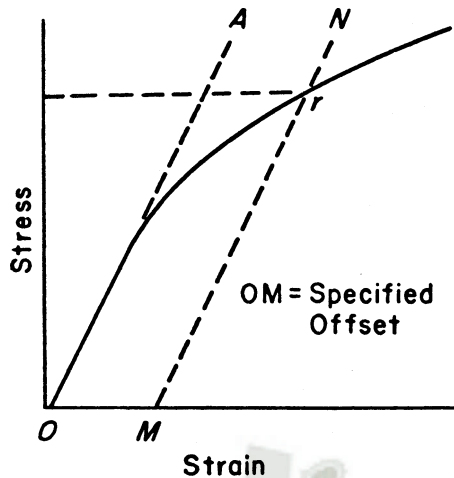


FIG. A2.1 Offset Yield Strength

curve.

Through M draw a line MN parallel to OA and locate the intersection of MN with the stress-strain curve.

The stress at the point of intersection r is the “offset yield strength.” The specified value of the offset must be stated as a percent of the original gage length in conjunction with the strength value. *Example:* 0.1 % offset yield strength = ... MPa [psi], or yield strength at 0.1 % offset ... MPa [psi].

A2.7 percent elongation—the elongation of a test specimen expressed as a percent of the gage length.

A2.8 percent elongation at break and yield:

A2.8.1 percent elongation at break—the percent elongation at the moment of rupture of the test specimen.

A2.8.2 percent elongation at yield—the percent elongation at the moment the yield point (A2.22) is attained in the test specimen.

A2.9 percent reduction of area (nominal)—the difference between the original cross-sectional area measured at the point of rupture after breaking and after all retraction has ceased, expressed as a percent of the original area.

A2.10 percent reduction of area (true)—the difference between the original cross-sectional area of the test specimen and the minimum cross-sectional area within the gage boundaries prevailing at the moment of rupture, expressed as a percentage of the original area.

A2.11 Poisson’s Ratio—The absolute value of the ratio of transverse strain to the corresponding axial strain resulting from uniformly distributed axial stress below the proportional limit of the material.

A2.12 proportional limit—the greatest stress which a material is capable of sustaining without any deviation from proportionality of stress to strain (Hooke’s law). It is expressed in force per unit area, usually megapascals [pounds-force per square inch].

A2.13 rate of loading—the change in tensile load carried by the specimen per unit time. It is expressed in force per unit time, usually newtons [pounds-force] per minute. The initial

rate of loading can be calculated from the initial slope of the load versus time diagram.

A2.14 rate of straining—the change in tensile strain per unit time. It is expressed either as strain per unit time, usually metres per metre [inches per inch] per minute, or percent elongation per unit time, usually percent elongation per minute. The initial rate of straining can be calculated from the initial slope of the tensile strain versus time diagram.

NOTE A2.5—The initial rate of straining is synonymous with the rate of crosshead movement divided by the initial distance between crossheads only in a machine with constant rate of crosshead movement and when the specimen has a uniform original cross section, does not “neck down,” and does not slip in the jaws.

A2.15 rate of stressing (nominal)—the change in tensile stress (nominal) per unit time. It is expressed in force per unit area per unit time, usually megapascals [pounds-force per square inch] per minute. The initial rate of stressing can be calculated from the initial slope of the tensile stress (nominal) versus time diagram.

NOTE A2.6—The initial rate of stressing as determined in this manner has only limited physical significance. It does, however, roughly describe the average rate at which the initial stress (nominal) carried by the test specimen is applied. It is affected by the elasticity and flow characteristics of the materials being tested. At the yield point, the rate of stressing (true) may continue to have a positive value if the cross-sectional area is decreasing.

A2.16 secant modulus—the ratio of stress (nominal) to corresponding strain at any specified point on the stress-strain curve. It is expressed in force per unit area, usually megapascals [pounds-force per square inch], and reported together with the specified stress or strain.

NOTE A2.7—This measurement is usually employed in place of modulus of elasticity in the case of materials whose stress-strain diagram does not demonstrate proportionality of stress to strain.

A2.17 strain—the ratio of the elongation to the gage length of the test specimen, that is, the change in length per unit of original length. It is expressed as a dimensionless ratio.

A2.17.1 nominal strain at break—the strain at the moment of rupture relative to the original grip separation.

A2.18 tensile strength (nominal)—the maximum tensile stress (nominal) sustained by the specimen during a tension test. When the maximum stress occurs at the yield point (A2.22), it shall be designated tensile strength at yield. When the maximum stress occurs at break, it shall be designated tensile strength at break.

A2.19 tensile stress (nominal)—the tensile load per unit area of minimum original cross section, within the gage boundaries, carried by the test specimen at any given moment. It is expressed in force per unit area, usually megapascals [pounds-force per square inch].

NOTE A2.8—The expression of tensile properties in terms of the minimum original cross section is almost universally used in practice. In the case of materials exhibiting high extensibility or necking, or both (A2.16), nominal stress calculations may not be meaningful beyond the

yield point (A2.22) due to the extensive reduction in cross-sectional area that ensues. Under some circumstances it may be desirable to express the tensile properties per unit of minimum prevailing cross section. These properties are called true tensile properties (that is, true tensile stress, etc.).

A2.20 tensile stress-strain curve—a diagram in which values of tensile stress are plotted as ordinates against corresponding values of tensile strain as abscissas.

A2.21 true strain (see Fig. A2.2) is defined by the following equation for ϵ_T :

$$\epsilon_T = \int_{L_0}^L dL/L = \ln L/L_0 \quad (\text{A2.1})$$

where:

dL = increment of elongation when the distance between the gage marks is L ,
 L_0 = original distance between gage marks, and
 L = distance between gage marks at any time.

A2.22 yield point—the first point on the stress-strain curve at which an increase in strain occurs without an increase in stress (Fig. A2.2).

NOTE A2.9—Only materials whose stress-strain curves exhibit a point of zero slope may be considered as having a yield point.

NOTE A2.10—Some materials exhibit a distinct “break” or discontinuity in the stress-strain curve in the elastic region. This break is not a yield point by definition. However, this point may prove useful for material characterization in some cases.

A2.23 yield strength—the stress at which a material exhibits a specified limiting deviation from the proportionality of stress to strain. Unless otherwise specified, this stress will be the stress at the yield point and when expressed in relation to the tensile strength shall be designated either tensile strength at yield or tensile stress at yield as required in A2.18 (Fig. A2.3). (See *offset yield strength*.)

A2.24 Symbols—The following symbols may be used for the above terms:

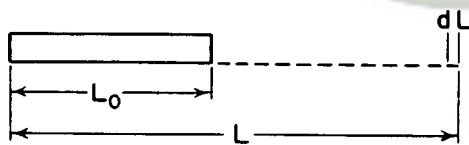


FIG. A2.2 Illustration of True Strain Equation

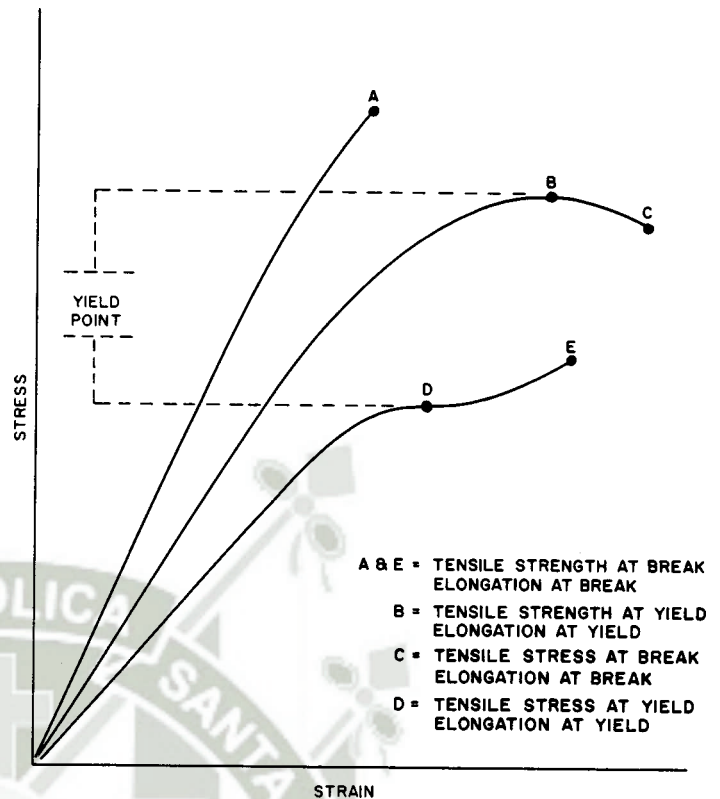


FIG. A2.3 Tensile Designations

Symbol	Term
W	Load
ΔW	Increment of load
L	Distance between gage marks at any time
L_o	Original distance between gage marks
L_u	Distance between gage marks at moment of rupture
ΔL	Increment of distance between gage marks = elongation
A	Minimum cross-sectional area at any time
A_o	Original cross-sectional area
ΔA	Increment of cross-sectional area
A_u	Cross-sectional area at point of rupture measured after breaking specimen
A_T	Cross-sectional area at point of rupture, measured at the moment of rupture
t	Time
Δt	Increment of time
σ	Tensile stress
$\Delta \sigma$	Increment of stress
σ_T	True tensile stress
σ_U	Tensile strength at break (nominal)
σ_{UT}	Tensile strength at break (true)
ϵ	Strain
$\Delta \epsilon$	Increment of strain
ϵ_U	Total strain, at break
ϵ_T	True strain
$\%E/L$	Percentage elongation
Y.P.	Yield point
E	Modulus of elasticity

A2.25 Relations between these various terms may be defined as follows:

$$\begin{aligned}\sigma &= W/A_o \\ \sigma_T &= W/A \\ \sigma_U &= W/A_o \text{ (where } W \text{ is breaking load)} \\ \sigma_{UT} &= W/A_T \text{ (where } W \text{ is breaking load)} \\ \epsilon &= \Delta L/L_o = (L - L_o)/L_o \\ \epsilon_U &= (L_u - L_o)/L_o \\ \epsilon_T &= \int_{L_o}^L dL/L = \ln L/L_o \\ \%E/L &= [(L - L_o)/L_o] \times 100 = \epsilon \times 100\end{aligned}$$

Percent reduction of area (nominal) = $[(A_o - A_u)/A_o] \times 100$

Percent reduction of area (true) = $[(A_o - A_T)/A_o] \times 100$

Rate of loading = $\Delta W/\Delta t$

Rate of stressing (nominal) = $\Delta \sigma/\Delta t = (\Delta W)/A_o/\Delta t$

Rate of straining = $\Delta \epsilon/\Delta t = (\Delta L/L_o)/\Delta t$

For the case where the volume of the test specimen does not change during the test, the following three relations hold:

$$\sigma_T = \sigma(1 + \epsilon) = \sigma L/L_o \quad (A2.2)$$

$$\sigma_{UT} = \sigma_U(1 + \epsilon_U) = \sigma_U L_u/L_o$$

$$A = A_o/(1 + \epsilon)$$

SUMMARY OF CHANGES

This section identifies the location of selected changes to this test method. For the convenience of the user, Committee D20 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 638 - 03:

- (1) Revised paragraphs 5.3, 10.1, 11.2, and 11.4 to reflect use of D 5947 and harmonization with ISO 527.
- (2) Revised 8.4.
- (3) Added new 10.3.1.1.
- (4) Renumbered old 10.3.1.1 to 10.3.1.2.
- (5) Added new Note 14.
- (6) Renumbered old 10.3.1.2 to 10.3.1.3.
- (7) Renumbered old 10.3.1.3 to 10.3.1.4.
- (8) Revised wording of new 10.3.1.4.
- (9) Renumbered old Note 14 to 15.
- (10) Revised 11.6.
- (11) Revised 11.6.1.
- (12) Added new 11.6.2.
- (13) Added new equation (3).
- (14) Renumbered old equation (3) to (4).
- (15) Revised 12.1.12.
- (16) Added new 12.1.13.
- (17) Add new Table 11.
- (18) Add new 13.1.2.
- (19) Renumbered old 13.1.2 through 13.1.2.8 to 13.1.3 through 13.1.3.8.
- (20) Added Poisson's ratio to 14.1 Keywords.

(21) Added new A2.11.

(22) Renumbered A2.11 through A2.24 to A2.12 through A2.25.

D 638 - 02a:

- (1) Added 5.1.7.
- (2) Added new text from 11.3 to 11.3.2.1.
- (3) Revised 12.1.11.
- (4) Added A2.16.1.

D 638 - 02:

- (1) Revised 9.1 and 9.2.

D 638 - 01:

- (1) Modified 7.3 regarding conditions for specimen discard.

D 638 - 00:

- (1) Added 11.1 and renumbered subsequent sections.

D 638 - 99:

- (1) Added and clarified extensometer classification requirements.

D 638 - 98:

- (1) Revised 10.3 and added 12.1.8 to clarify extensometer usage.
- (2) Added 12.1.15.
- (3) Replaced reference to Test Methods D 374 with Test Method D 5947 in 2.1 and 5.3.

ASTM International 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 International 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 International, 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).



Designation: D 2240 – 97^{ε1}

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS
100 Barr Harbor Dr., West Conshohocken, PA 19428
Reprinted from the Annual Book of ASTM Standards. Copyright ASTM

Standard Test Method for Rubber Property—Durometer Hardness¹

This standard is issued under the fixed designation D 2240; 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 (ε) indicates an editorial change since the last revision or reapproval.

ε¹ NOTE—A footnote was removed from Note 5 in February 1999.

1. Scope

1.1 This test method covers seven types of durometers A, B, C, D, DO, O and OO, and the procedure for determining indentation hardness of substances classified as rubber, cellular materials, elastomeric materials, thermoplastic elastomers and some hard plastics.

1.2 This test method is not applicable to the testing of fabrics.

1.3 The values stated in SI units are to be regarded as standard. The values given 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.*

2. Referenced Documents

2.1 ASTM Standards:

D 618 Practice for Conditioning Plastics for Testing²

D 785 Test Method for Rockwell Hardness of Plastics and Electrical Insulating Materials²

D 1349 Practice for Rubber—Standard Temperatures For Testing³

D 4483 Practice for Determining Precision for Test Method Standards in the Rubber and Carbon Black Industries³

3. Summary of Test Method

3.1 This test method permits hardness measurements based on either initial indentation or indentation after a specified period of time, or both.

NOTE 1—Durometers with maximum reading pointers used to determine initial hardness values may yield lower hardness when the maximum pointer is used.

4. Significance and Use

4.1 This test method is based on the penetration of a specific

type of indenter when forced into the material under specified conditions. The indentation hardness is inversely related to the penetration and is dependent on the elastic modulus and viscoelastic behavior of the material. The shape of the indenter and the applied force influence the results obtained so there may be no simple relationship between the results obtained with one type of durometer and those obtained with another type of durometer or other instruments for measuring hardness. This test method is an empirical test intended primarily for control purposes. No simple relationship is known to exist between indentation hardness determined by this test method and any fundamental property of the material tested. For specification purposes it is recommended that Test Method D 785 be used for hard material.

NOTE 2—Durometer scale comparison chart only. This is not and cannot be used as a conversion reference.

Type A				10	20	30	40	50	60	70	80	90	100				
Type B					10	20	30	40	50	60	70	80	90	100			
Type C						10	20	30	40	50	60	70	80	90	100		
Type D							10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	
Type DO								10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
Type O									10	20	30	40	50	60	70	80	90
Type OO	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100							

5. Apparatus

5.1 Hardness measuring apparatus or durometer consisting of the following components:

5.1.1 *Presser Foot*, with a hole having a diameter as specified in Fig. 1(a), (b), or (c) with its center at least 6 mm (0.25 in.) from any edge of the foot.

5.1.2 *Indenter*, formed from hardened steel rod and shaped in accordance with Fig. 1(a), (b), or (c) with full extension adjustable between 2.46 to 2.54 mm (0.97 to 0.100 in.).

5.1.3 *Indenter Extension Indicating Device* (analog or electronic), having a scale reading from 0 to 100 with equal divisions throughout the range. The scale reading is an inverse function of the indenter extension. The device shall have a pointer that moves on the scale at a rate of one hardness point for each 0.025 mm (0.001 in.) of indenter movement.

NOTE 3—Type A Shore Durometers serial numbers 1 through 16 300 and 16 351 through 16 900 and Type A-2 Shore Durometers numbers 1 through 8077 do not meet the requirement of 2.46 to 2.54 mm (0.097 to 0.100 in.) extension of the indenter at zero reading. These durometers will give readings which are low by amounts ranging from 3 units at 30

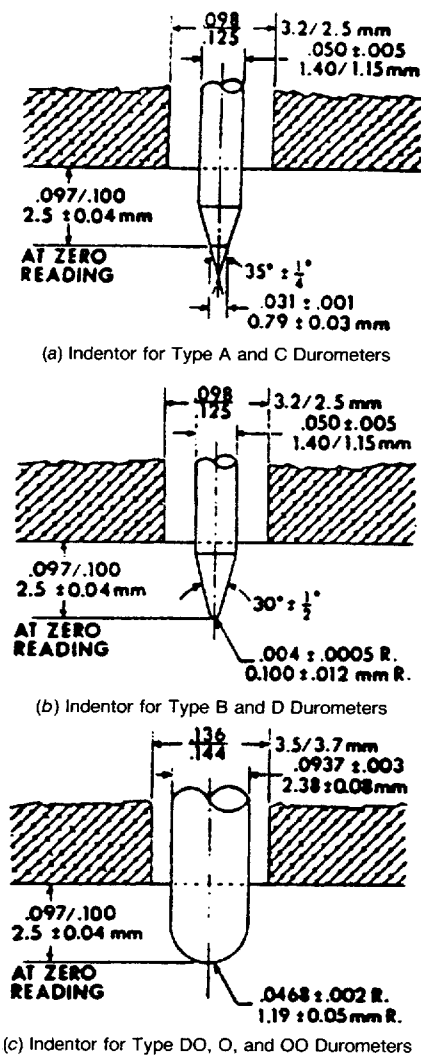
¹ This test method is under the jurisdiction of ASTM Committee D-11 on Rubber and is the direct responsibility of Subcommittee D11.10 on Physical Testing.

Current edition approved Feb. 10, 1997. Published March 1997. Originally published as D 2240 – 64 T. Last previous edition D 2240 – 95.

² Annual Book of ASTM Standards, Vol 08.01.

³ Annual Book of ASTM Standards, Vol 09.01.

D 2240



NOTE 1—Spring Force Combinations:

$$\text{Force, N} = 0.550 + 0.075 H_x$$

where H_x = hardness reading on Type A, B and O durometers.

$$\text{Force, N} = 0.4445 H_y$$

where H_y = hardness reading on Type C, D and DO durometers.

$$\text{Force, N} = 0.203 + 0.00908 H_{oo}$$

where H_{oo} = hardness reading on Type OO durometers.

FIG. 1 Durometer, Indenter and Spring Force Combinations

hardness to 1 unit at 90 hardness.

5.1.4 *Timing Device* (optional), capable of being set to a desired elapsed time, signalling the operator or holding the hardness reading when the desired elapsed time has been reached. The timer should be automatically activated when the presser foot is in firm contact with the specimen being tested.

5.1.5 *Calibrated Spring*, for applying force to the indenter in accordance with Fig. 1.

6. Test Specimen

6.1 The test specimen shall be at least 6 mm (0.25 in.) in thickness unless it is known that results equivalent to the 6 mm values are obtained with a thinner specimen (see Note 4). A

specimen may be composed of plied pieces to obtain the necessary thickness, but determinations made on such specimens may not agree with those made on solid specimens because the surface faces between plies may not be in complete contact. The lateral dimensions of the specimen shall be sufficient to permit measurements at least 12 mm (0.5 in.) from any edge unless it is known that identical results are obtained when measurements are made at lesser distance from an edge. The surfaces of the specimen shall be flat and parallel over a sufficient area to permit the presser foot to contact the specimen over an area having a radius of at least 6 mm (0.25 in.) from the indenter point. A suitable hardness determination cannot be made on a rounded, uneven, or rough surface.

NOTE 4—The minimum requirement for the thickness of the specimen is dependent on the extent of penetration of the indenter into the specimen; that is, thinner specimens may be used for materials having hardness values at the upper end of the scale. The minimum distance from the edge at which measurements may be made likewise decreases as the hardness increases. For materials having hardness values above 50 Type D durometer, the thickness of the specimen should be at least 3 mm (0.12 in.) and measurements should not be made closer than 6 mm (0.25 in.) to any edge.

7. Calibration

7.1 The durometer spring shall be calibrated by supporting the durometer in a vertical position and applying a measurable force to the indenter tip (see Fig. 2). The device used to apply the force may be a dead weight or electronic load cell device capable of measuring applied force at 50 % of the calibration tolerance. Care should be taken to ensure that the force is applied vertically to the indenter tip, as side loads will cause errors in calibration. Spring calibration shall be verified on all durometer at scale readings of 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80 and 90. The measured force ($9.8 \times$ mass in kilograms) shall be equivalent to the force calculated by the equation in Fig. 1. The measured force for Type A, B and O durometers shall be within ± 0.08 N. For Type C, D and DO durometers it shall be within ± 0.44 N, and for Type OO durometers it shall be within ± 0.025 N.

NOTE 5—Instruments specifically designed for the calibration of durometers may be used.

7.2 Indenter extension and shape must be in accordance with 5.1.2. With the durometer placed firmly on a flat surface the indicator should read a number equal to the indenter extension measured in inches $\times 1000$, within ± 0.5 durometer points.

NOTE 6—When performing the procedure in 7.2 on Type B and D durometers care should be used not to damage the indenter tip.

7.3 Test blocks (rubber or spring type) provided for checking durometer operation are not to be relied upon as calibration standards. The calibration procedures outlined in 7.1 and 7.2 are the only valid calibration methods.

8. Conditioning

8.1 Tests shall be made at $23 \pm 2^\circ\text{C}$ ($73.4 \pm 3.6^\circ\text{F}$). For materials whose hardness depends on relative humidity, the specimen shall be conditioned in accordance with Procedure A of Practice D 618 and tested under the same conditions.

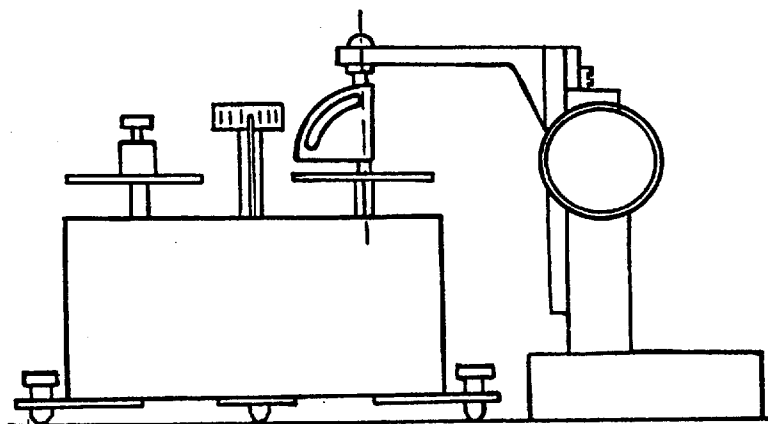
 D 2240


FIG. 2 Apparatus for Calibration of Durometer Spring

NOTE 7—No conclusive evaluation has been made on durometers at temperatures other than $23 \pm 2^\circ\text{C}$ ($73.4 \pm 3.6^\circ\text{F}$). Conditioning at temperatures other than the above may show changes in calibration. Durometer use at temperatures other than the above should be decided locally (see Practice D 1349).

9. Procedure

9.1 Place the specimen on a hard, horizontal surface. Hold the durometer in a vertical position with the point of the indenter at least 12 mm (0.5 in.) from any edge of the specimen, unless it is known that identical results are obtained when measurements are made with the indenter at a lesser distance. Apply the presser foot to the specimen as rapidly as possible, without shock, keeping the foot parallel to the surface of the specimen. Apply just sufficient pressure to obtain firm contact between presser foot and specimen.

NOTE 8—Better repeatability may be obtained by using a mass centered on the axis of the indenter. Recommended masses are 1 kg for Type A, B and O durometers, 5 kg for Type C, D and DO durometers, and 400 g for Type OO durometers. Durometer stands using the masses above as a constant load and a controlled descent speed, without shock, produce maximum repeatability.

9.2 For any material covered in 1.1, after the presser foot is in firm contact with the specimen, the scale reading is to be taken within 1 s or after any period of time agreed upon between supplier and user unless the durometer has a maximum indicator, in which case the maximum reading is taken. The hardness reading may progressively decrease with time delay.

9.3 Make one measurement at each of three or five different points distributed over the specimen at least 6 mm (0.25 in.) apart using the median of these measurements for the hardness value.

NOTE 9—The type of durometer should be selected with the knowledge that readings below 10 or above 90 are not considered reliable by the manufacturer. It is suggested that readings in these ranges not be recorded.

10. Report

10.1 Report the following information:

- 10.1.1 Hardness value obtained,
- 10.1.2 Complete identification of the material tested,
- 10.1.3 Vulcanization date,

10.1.4 Description of specimen, including thickness and number of pieces plied, if less than 6 mm (0.25 in.),

10.1.5 Temperature of test if other than 23°C ,

10.1.6 Relative humidity when hardness of material is dependent on humidity,

10.1.7 Type and serial number of durometer,

10.1.8 Indentation hardness time interval at which reading was taken, and

10.1.9 Date of test.

NOTE 10—Readings may be reported in the form: A/45/15 where A is the type of durometer, 45 the reading, and 15 the time in seconds that the pressure foot is in firm contact with the specimen. Similarly, D/60/1 indicates a reading of 60 on the Type D durometer obtained either within 1 s or from a maximum indicator.

11. Precision and Bias ⁴

11.1 These precision and bias statements have been prepared in accordance with Practice D 4483. Refer to this Practice for terminology and other testing and statistical concepts.

11.2 The Type 1 precision for both Type A and D methods was determined from an interlaboratory program with three materials of varying hardness, with six participating laboratories. Tests were conducted on two separate days in each laboratory for both A and D testing programs. All materials were supplied from a single source.

11.3 A test result for hardness (both A and D) was the median of five individual hardness readings on each day in each laboratory.

11.4 Table 1 shows the precision results for Type A method. Table 2 gives the precision results for Type D method.

11.5 The precision results in this precision and bias section give an estimate of the precision of this test method with the materials (rubbers) used in the particular interlaboratory program as described above. The precision parameters should not be used for acceptance or rejection testing, or both, of any group of materials without documentation that they are applicable to those particular materials and the specific testing protocols that include this test method.

⁴ Supporting data are available from ASTM Headquarters. Request RR:D11-1029.

 D 2240

TABLE 1 Type 1 Precision—Type A Durometer Method

Material	Average Level	Within Laboratories			Between Laboratories		
		Sr^A	r^B	$(r)^C$	SR^D	R^E	$(R)^F$
1	51.4	0.646	1.83	3.56	1.56	4.41	8.59
2	65.3	0.878	2.48	3.81	2.14	6.06	9.27
3	68.0	0.433	1.23	1.80	2.28	6.45	9.49
Pooled	61.6	0.677	1.92	3.11	2.018	5.72	9.28

^A Sr = repeatability standard deviation, measurement units.^B r = repeatability = $2.83 \times Sr$, measurement units.^C (r) = repeatability, relative, (that is, in percent).^D SR = reproducibility standard deviation, measurement units.^E R = reproducibility = $2.83 \times SR$, measurement units.^F (R) = reproducibility, relative, (that is, in percent).

TABLE 2 Type 1 Precision—Type D Durometer Method

Material	Average Level	Within Laboratories			Between Laboratories		
		Sr^A	r^B	$(r)^C$	SR^D	R^E	$(R)^F$
1	42.6	0.316	0.894	2.10	2.82	7.98	18.7
2	54.5	0.791	2.24	4.11	3.54	10.0	18.4
3	82.3	1.01	2.86	3.47	3.54	10.0	12.2
Pooled	59.8	0.762	2.16	3.61	3.32	9.40	15.7

^A Sr = repeatability standard deviation, measurement units.^B r = repeatability = $2.83 \times Sr$, measurement units.^C (r) = repeatability, relative, (that is, in percent).^D SR = reproducibility standard deviation, measurement units.^E R = reproducibility = $2.83 \times SR$, measurement units.^F (R) = reproducibility, relative, (that is, in percent).

11.6 *Precision*—The precision of this test method may be expressed in the format of the following statements which use as appropriate value r , R , (r) or (R) , that is, that value to be used in decisions about test results (obtained with the test method). The appropriate value is that value of r or R associated with a mean level in Table 1 and Table 2 closest to the mean level under consideration (at any given time, for any given material)

in routine testing operations.

11.6.1 *Repeatability*—The repeatability, r , of this test method has been established as the appropriate value tabulated in Table 1 and Table 2. Two single test results, obtained under normal test method procedures, that differ by more than this tabulated r (for any given level) must be considered as derived from different or nonidentical sample populations.

11.6.2 *Reproducibility*—The reproducibility, R , of this test method has been established as the appropriate value tabulated in Table 1 and Table 2. Two single test results obtained in two different laboratories, under normal test method procedures, that differ by more than the tabulated R (for any given level) must be considered to have come from different or nonidentical sample populations.

11.6.3 Repeatability and reproducibility expressed as a percentage of the mean level, (r) and (R) , have equivalent application statements as above for r and R . For the (r) and (R) statements, the difference in the two single test results is expressed as a percentage of the arithmetic mean of the two test results.

11.7 *Bias*—In test method terminology, bias is the difference between an average test value and the reference (or true) test property value. Reference values do not exist for this test method since the value (of the test property) is exclusively defined by this test method. Bias, therefore, cannot be determined.

12. Keywords

12.1 durometer hardness

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 Method for Flexural Properties of Polymer Matrix Composite Materials¹

This standard is issued under the fixed designation D7264/D7264M; 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 (ε) indicates an editorial change since the last revision or reapproval.

1. Scope

1.1 This test method determines the flexural stiffness and strength properties of polymer matrix composites.

1.1.1 *Procedure A*—A three-point loading system utilizing center loading on a simply supported beam.

1.1.2 *Procedure B*—A four-point loading system utilizing two load points equally spaced from their adjacent support points, with a distance between load points of one-half of the support span.

NOTE 1—Unlike Test Method [D6272](#), which allows loading at both one-third and one-half of the support span, in order to standardize geometry and simplify calculations this standard permits loading at only one-half the support span.

1.2 For comparison purposes, tests may be conducted according to either test procedure, provided that the same procedure is used for all tests, since the two procedures generally give slightly different property values.

1.3 The values stated in either SI units or inch-pound units are to be regarded separately as standard. Within the text, the inch-pound units are shown in brackets. The values stated in each system are not exact equivalents; therefore, each system must be used independently of the other. Combining values from the two systems may result in nonconformance with the standard.

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.*

2. Referenced Documents

2.1 ASTM Standards:²

[D790](#) Test Methods for Flexural Properties of Unreinforced and Reinforced Plastics and Electrical Insulating Materials

¹ This test method is under the jurisdiction of ASTM Committee [D30](#) on Composite Materials and is the direct responsibility of Subcommittee [D30.04](#) on Lamina and Laminate Test Methods.

Current edition approved April 1, 2007. Published April 2007. Originally approved in 2006. Last previous edition approved in 2006 as D7264/D7264M – 06. DOI: 10.1520/D7264_D7264M-07.

² For referenced ASTM standards, visit the ASTM website, www.astm.org, or contact ASTM Customer Service at service@astm.org. For *Annual Book of ASTM Standards* volume information, refer to the standard's Document Summary page on the ASTM website.

[D2344/D2344M](#) Test Method for Short-Beam Strength of Polymer Matrix Composite Materials and Their Laminates

[D3878](#) Terminology for Composite Materials

[D5229/D5229M](#) Test Method for Moisture Absorption Properties and Equilibrium Conditioning of Polymer Matrix Composite Materials

[D5687/D5687M](#) Guide for Preparation of Flat Composite Panels with Processing Guidelines for Specimen Preparation

[D6272](#) Test Method for Flexural Properties of Unreinforced and Reinforced Plastics and Electrical Insulating Materials by Four-Point Bending

[D6856](#) Guide for Testing Fabric-Reinforced “Textile” Composite Materials

[E4](#) Practices for Force Verification of Testing Machines

[E6](#) Terminology Relating to Methods of Mechanical Testing

[E18](#) Test Methods for Rockwell Hardness of Metallic Materials

[E122](#) Practice for Calculating Sample Size to Estimate, With Specified Precision, the Average for a Characteristic of a Lot or Process

[E177](#) Practice for Use of the Terms Precision and Bias in ASTM Test Methods

[E456](#) Terminology Relating to Quality and Statistics

[E1309](#) Guide for Identification of Fiber-Reinforced Polymer-Matrix Composite Materials in Databases

[E1434](#) Guide for Recording Mechanical Test Data of Fiber-Reinforced Composite Materials in Databases

2.2 Other Documents:

[ANSI Y14.5-1999](#) Dimensioning and Tolerancing—Includes Inch and Metric³

[ANSI B46.1-1995](#) Surface Texture (Surface Roughness, Waviness and Lay)³

3. Terminology

3.1 *Definitions*—Terminology [D3878](#) defines the terms relating to high-modulus fibers and their composites. Terminology [E6](#) defines terms relating to mechanical testing. Terminology [E456](#) and Practice [E177](#) define terms relating to statistics. In the event of a conflict between terms, Terminology [D3878](#) shall have precedence over the other documents.

³ Available from American National Standards Institute (ANSI), 25 W. 43rd St., 4th Floor, New York, NY 10036, <http://www.ansi.org>.

3.2 Definitions of Terms Specific to This Standard:

3.2.1 *flexural strength, n* —the maximum stress at the outer surface of a flexure test specimen corresponding to the peak applied force prior to flexural failure.

3.2.2 *flexural modulus, n* —the ratio of stress range to corresponding strain range for a test specimen loaded in flexure.

3.3 Symbols:

b = specimen width

CV = sample coefficient of variation, in percent

E_f^{chord} = flexural chord modulus of elasticity

E_f^{secant} = flexural secant modulus of elasticity

h = specimen thickness

L = support span

m = slope of the secant of the load-deflection curve

n = number of specimens

P = applied force

s_{n-1} = sample standard deviation

x_i = measured or derived property

$\bar{x}$ = sample mean

δ = mid-span deflection of the specimen

ϵ = strain at the outer surface at mid-span of the specimen

σ = stress at the outer surface at mid-span of the specimen

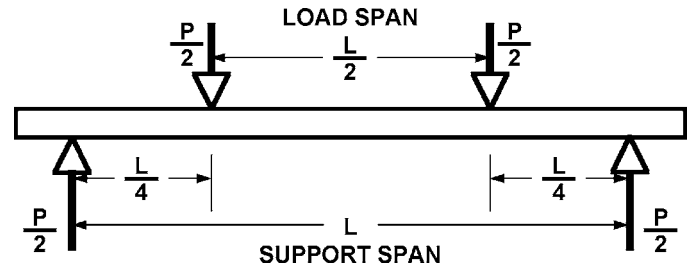


FIG. 2 Procedure B—Loading Diagram

force application member. Another difference between the three-point and four-point configurations is the presence of resultant vertical shear force in the three-point configuration everywhere in the beam except right under the mid-point force application member whereas in the four-point configuration, the area between the central force application members has no resultant vertical shear force. The distance between the outer support members is the same as in the equivalent three-point configuration.

4.4 The test geometry is chosen to limit out-of-plane shear deformations and avoid the type of short beam failure modes that are interrogated in Test Method [D2344/D2344M](#).

5. Significance and Use

5.1 This test method determines the flexural properties (including strength, stiffness, and load/deflection behavior) of polymer matrix composite materials under the conditions defined. Procedure A is used for three-point loading and Procedure B is used for four-point loading. This test method was developed for optimum use with continuous-fiber-reinforced polymer matrix composites and differs in several respects from other flexure methods, including the use of a standard span-to-thickness ratio of 32:1 versus the 16:1 ratio used by Test Methods [D790](#) (a plastics-focused method covering three-point flexure) and [D6272](#) (a plastics-focused method covering four-point flexure).

5.2 This test method is intended to interrogate long-beam strength in contrast to the short-beam strength evaluated by Test Method [D2344/D2344M](#).

5.3 Flexural properties determined by these procedures can be used for quality control and specification purposes, and may find design applications.

5.4 These procedures can be useful in the evaluation of multiple environmental conditions to determine which are design drivers and may require further testing.

5.5 These procedures may also be used to determine flexural properties of structures.

6. Interferences

6.1 Flexural properties may vary depending on which surface of the specimen is in compression, as no laminate is perfectly symmetric (even when full symmetry is intended); such differences will shift the neutral axis and will be further affected by even modest asymmetry in the laminate. Flexural properties may also vary with specimen thickness, conditioning and/or testing environments, and rate of straining. When evaluating several datasets these parameters should be equivalent for all data in the comparison.

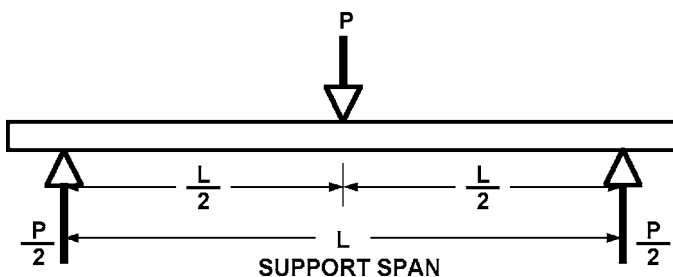


FIG. 1 Procedure A—Loading Diagram

6.2 For multidirectional laminates with a small or moderate number of laminae, flexural modulus and flexural strength may be affected by the ply-stacking sequence and will not necessarily correlate with extensional modulus, which is not stacking-sequence dependent.

6.3 The calculation of the flexural properties in Section 13 of this standard is based on beam theory, while the specimens in general may be described as plates. The differences may in some cases be significant, particularly for laminates containing a large number of plies in the $\pm 45^\circ$ direction. The deviations from beam theory decrease with decreasing width.

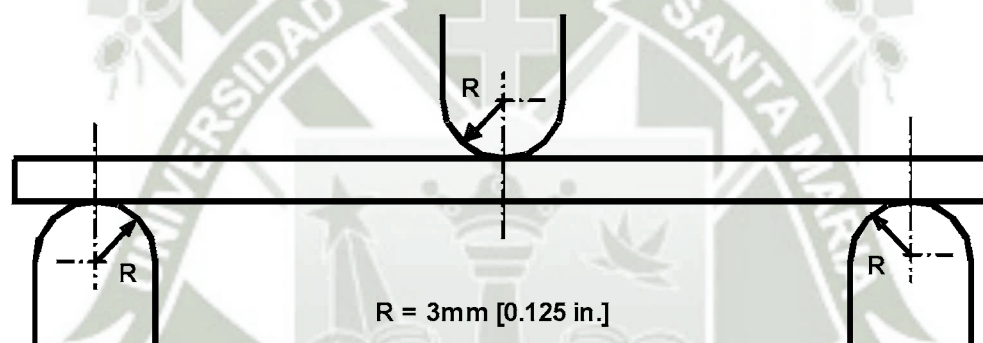
6.4 Loading noses may be fixed, rotatable or rolling. Typically, for testing composites, fixed or rotatable loading noses are used. The type of loading nose can affect results, since non-rolling paired supports on either the tension or compression side of the specimen introduce slight longitudinal forces and resisting moments on the beam, which superpose with the intended loading. The type of supports used is to be reported as described in Section 14. The loading noses should also uniformly contact the specimen across its width. Lack of

uniform contact can affect flexural properties by initiating damage by crushing and by non-uniformly loading the beam. Formulas used in this standard assume a uniform line loading at the specimen supports across the entire specimen width; deviations from this type of loading is beyond the scope of this standard.

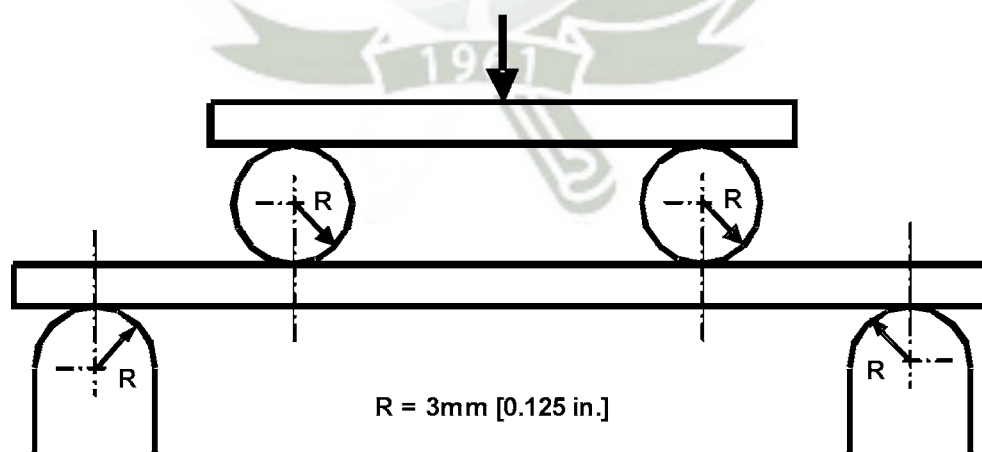
7. Apparatus

7.1 *Testing Machine*—Properly calibrated, which can be operated at a constant rate of crosshead motion, and in which the error in the force application system shall not exceed $\pm 1\%$ of the full scale. The force indicating mechanism shall be essentially free of inertia lag at the crosshead rate used. Inertia lag shall not exceed 1 % of the measured force. The accuracy of the testing machine shall be verified in accordance with Practices E4.

7.2 *Loading Noses and Supports*—The loading noses and supports shall have cylindrical contact surfaces of radius 3.00 mm [0.125 in.] as shown in Fig. 3, with a hardness of 60 to 62 HRC, as specified in Test Methods E18, and shall have finely



Three-Point Loading Configuration with Fixed Supports and Loading Nose



Four-Point Loading Configuration with Fixed Supports and Rolling Loading Noses

FIG. 3 Example Loading Nose and Supports for Procedures A (top) and B (bottom)

ground surfaces free of indentation and burrs with all sharp edges relieved. Loading noses and supports may be arranged in a fixed, rotatable or rolling arrangement. Typically, with composites, rotatable or fixed arrangements are used.

7.3 Micrometers—For width and thickness measurements the micrometers shall use a 4 to 7 mm [0.16 to 0.28 in.] nominal diameter ball-interface on an irregular surface such as the bag side of a laminate, and a flat anvil interface on machined edges or very smooth tooled surfaces. A micrometer or caliper with flat anvil faces shall be used to measure the length of the specimen. The accuracy of the instrument(s) shall be suitable for reading to within 1 % or better of the specimen dimensions. For typical section geometries, an instrument with an accuracy of ± 0.02 mm [± 0.001 in.] is desirable for thickness and width measurement, while an instrument with an accuracy of ± 0.1 mm [± 0.004 in.] is adequate for length measurement.

7.4 Deflection Measurement—Specimen deflection at the common center of the loading span shall be measured by a properly calibrated device having an accuracy of ± 1 % or better of the expected maximum displacement. The device shall automatically and continuously record the deflection during the test.

7.5 Conditioning Chamber—When conditioning materials at non-laboratory environments, a temperature/vapor-level controlled environmental conditioning chamber is required that shall be capable of maintaining the required temperature to within $\pm 1^\circ\text{C}$ [$\pm 2^\circ\text{F}$] and the required vapor level to within ± 3 % relative humidity, as outlined in Test Method **D5229/D5229M**. Chamber conditions shall be monitored either on an automated continuous basis or on a manual basis at regular intervals.

7.6 Environmental Test Chamber—An environmental test chamber is required for test environments other than ambient testing laboratory conditions. This chamber shall be capable of maintaining the test specimen at the required temperature

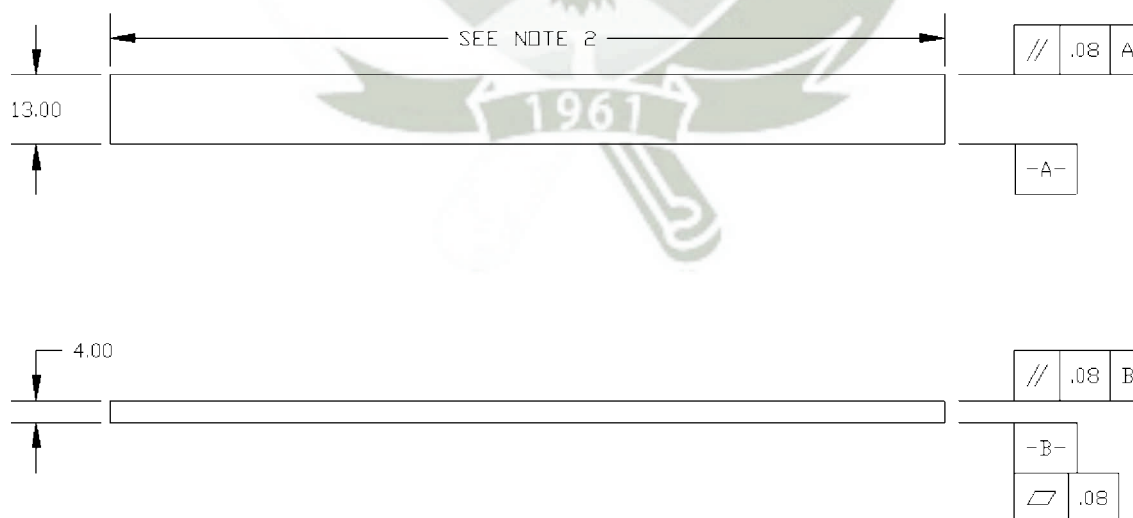
within $\pm 3^\circ\text{C}$ [$\pm 5^\circ\text{F}$] and the required vapor level to within ± 5 % relative humidity.

8. Test Specimens

8.1 Specimen Preparation—Guide **D5687/D5687M** provides recommended specimen preparation practices and should be followed when practical.

8.2 Specimen Size is chosen such that the flexural properties are determined accurately from the tests. For flexural strength, the standard support span-to-thickness ratio is chosen such that failure occurs at the outer surface of the specimens, due only to the bending moment (see Notes **2** and **3**). The standard span-to-thickness ratio is 32:1, the standard specimen thickness is 4 mm [0.16 in.], and the standard specimen width is 13 mm [0.5 in.] with the specimen length being about 20 % longer than the support span. See **Figs. 4 and 5** for a drawing of the standard test specimen in SI and inch-pound units, respectively. For fabric-reinforced textile composite materials, the width of the specimen shall be at least two unit cells, as defined in Guide **D6856**. If the standard specimen thickness cannot be obtained in a given material system, an alternate specimen thickness shall be used while maintaining the support span-to-thickness ratio [32:1] and specimen width. Optional support span-to-thickness ratios of 16:1, 20:1, 40:1, and 60:1 may also be used provided it is so noted in the report. Also, the data obtained from a test using one support span-to-thickness ratio may not be compared with the data from another test using a different support span-to-thickness ratio.

8.2.1 Shear deformations can significantly reduce the apparent modulus of highly orthotropic laminates when they are tested at low support span-to-thickness ratios. For this reason, a high support span-to-thickness ratio is recommended for flexural modulus determinations. In some cases, separate sets of specimens may have to be used for modulus and strength determination.



NOTE 1—Drawing interpretation per **ANSI Y14.5-1999** and **ANSI B46.1-1995**.

NOTE 2—See **8.2** and **11.3** of this test standard for the required values of span and overall length.

FIG. 4 Standard Flexural Test Specimen Drawing (SI)



NOTE 1—Drawing interpretation per [ANSI Y14.5-1999](#) and [ANSI B46.1-1995](#).

NOTE 2—See [8.2](#) and [11.3](#) of this test standard for the required values of span and overall length.

FIG. 5 Standard Flexural Test Specimen Drawing (Inch-Pound)

NOTE 2—A support span-to-thickness ratio of less than 32:1 may be acceptable for obtaining the desired flexural failure mode when the ratio of the lower of the compressive and tensile strength to out-of-plane shear strength is less than 8, but the support span-to-thickness ratio must be increased for composite laminates having relatively low out-of-plane shear strength and relatively high in-plane tensile or compressive strength parallel to the support span.

NOTE 3—While laminate stacking sequence is not limited by this test method, significant deviations from a lay-up of nominal balance and symmetry may induce unusual test behaviors and a shift in the neutral axis.

9. Number of Test Specimens

9.1 Test at least five specimens per test condition unless valid results can be gained through the use of fewer specimens, such as in the case of a designed experiment. For statistically significant data the procedures outlined in Practice [E122](#) should be consulted. Report the method of sampling.

10. Conditioning

10.1 The recommended pre-test specimen condition is effective moisture equilibrium at a specific relative humidity as established by Test Method [D5229/D5229M](#); however, if the test requester does not explicitly specify a pre-test conditioning environment, conditioning is not required and the test specimens may be tested as prepared.

NOTE 4—The term *moisture*, as used in Test Method [D5229/D5229M](#), includes not only the vapor of a liquid and its condensate, but the liquid itself in large quantities, as for immersion.

10.2 The pre-test specimen conditioning process, to include specified environmental exposure levels and resulting moisture content, shall be reported with the data.

10.3 If there is no explicit conditioning process, the conditioning process shall be reported as “unconditioned” and the moisture content as “unknown.”

11. Procedure

11.1 Condition the specimens as required. Store the specimens in the conditioned environment until test time.

11.2 Following final specimen machining and any conditioning but before testing, measure and record the specimen width and thickness at the specimen mid-section, and the specimen length, to the specified accuracy.

11.3 Measure the span accurately to the nearest 0.1 mm [0.004 in.] for spans less than 63 mm [2.5 in.] and the nearest 0.3 mm [0.012 in.] for spans greater than or equal to 63 mm [2.5 in.]. Use the measured span for all calculations. See [Annex A1](#) for information on the determination of and setting of the span.

11.4 *Speed of Testing*—Set the speed of testing at a rate of crosshead movement of 1.0 mm/min [0.05 in./min] for a specimen with standard dimensions. For specimens with dimensions that vary greatly from the standard dimensions, a crosshead rate that will give a similar rate of straining at the outer surface can be obtained via the method outlined in Test Methods [D790](#) for Procedure A and Test Method [D6272](#) for Procedure B.

11.5 Align the loading nose(s) and supports so that the axes of the cylindrical surfaces are parallel. For Procedure A, the loading nose shall be midway between the supports. For Procedure B, the load span shall be one-half of the support span and symmetrically placed between the supports. The parallelism may be checked by means of plates with parallel grooves into which the loading nose(s) and supports will fit when properly aligned. Center the specimen on the supports, with the long axis of the specimen perpendicular to the loading noses and supports. See [Annex A1](#) for setting and measuring span.

11.6 Apply the force to the specimen at the specified crosshead rate. Measure and record force-deflection data at a

rate such that a minimum of 50 data points comprise the force deflection curve. (A higher sampling rate may be required to properly capture any nonlinearities or progressive failure of the specimen.) Measure deflection by a transducer under the specimen in contact with it at the center of the support span, the transducer being mounted stationary relative to the specimen supports. Do not use the measurement of the motion of the loading nose relative to the supports as this will not take into account the rotation of the specimen about the load and support noses, nor account for the compliance in the loading nose or crosshead.

11.7 Failure Modes—To obtain valid flexural strength, it is necessary that the specimen failure occurs on either one of its outer surfaces, without a preceding interlaminar shear failure or a crushing failure under a support or loading nose. Failure on the tension surface may be a crack while that on the compression surface may be local buckling. Buckling may be manifested as fiber micro-buckling or ply-level buckling. Ply-level buckling may result in, or be preceded by delamination of the outer ply.

11.7.1 Failure Identification Codes—Record the mode, area, and location of failure for each specimen. Choose a standard failure identification code based on the three-part code shown in Fig. 6. A multimode failure can be described by including each of the appropriate failure-mode codes between the parentheses of the M failure mode.

12. Validation

12.1 Values for properties at failure shall not be calculated for any specimen that breaks at some obvious, fortuitous flaw, unless such flaws constitute a variable being studied. Specimens that fail in an unacceptable failure mode shall not be included in the flexural property calculations. Retests shall be made for any specimen for which values are not calculated. If a significant fraction (>50 %) of the specimens fail in an unacceptable failure mode then the span-to-thickness ratio (for excessive shear failures) or the loading nose diameter (crushing under the loading nose) should be reexamined.

13. Calculation

NOTE 5—In determination of the calculated value of some of the properties listed in this section it is necessary to determine if the toe compensation (see Annex A2) adjustment must be made. This toe compensation correction shall be made only when it has been shown that the toe region of the curve is due to take up of the slack, alignment, or seating of the specimen and is not an authentic material response.

13.1 Maximum Flexural Stress, Procedure A—When a beam of homogenous, elastic material is tested in flexure as a

beam simply supported at two points and loaded at the midpoint, the maximum stress at the outer surface occurs at mid-span. The stress may be calculated for any point on the load-deflection curve by the following equation (Note 6):

$$\sigma = \frac{3PL}{2bh^2} \quad (1)$$

where:

σ = stress at the outer surface at mid-span, MPa [psi],

P = applied force, N [lbf],

L = support span, mm [in.],

b = width of beam, mm [in.], and

h = thickness of beam, mm [in.].

NOTE 6—Eq 1 applies strictly to materials for which the 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 in the use of this equation. The equation will however, be valid for comparison data and specification values up to the maximum fiber strain of 2 % for specimens tested by the procedure herein described. It should be noted that the maximum ply stress may not occur at the outer surface of a multidirectional laminate.⁴ Laminated beam theory must be applied to determine the maximum tensile stress at failure. Thus, Eq 1 yields an apparent strength based on homogeneous beam theory. This apparent strength is highly dependent on the ply-stacking sequence for multidirectional laminates.

13.2 Maximum Flexural Stress, Procedure B—When a beam of homogeneous, elastic material is tested in flexure as a beam simply supported at two outer points and loaded at two central points separated by a distance equal to ½ the support span and at equal distance from the adjacent support point, the maximum stress at the outer surface occurs between the two central loading points that define the load span (Fig. 2). The stress may be calculated for any point on the load-deflection curve by the following equation (Note 7):

$$\sigma = \frac{3PL}{4bh^2} \quad (2)$$

where:

σ = stress at the outer surface in the load span region, MPa [psi],

P = applied force, N [lbf],

L = support span, mm [in.],

b = width of beam, mm [in.], and

⁴ For the theoretical details, see Whitney, J. M., Browning, C. E., and Mair, A., "Analysis of the Flexure Test for Laminated Composite Materials," *Composite Materials: Testing and Design (Third Conference)*, ASTM STP 546, 1974, pp. 30-45.

First Character		Second Character		Third Character	
Failure Mode	Code	Failure Area	Code	Failure Location	Code
Tension	T	At loading nose	A	Top	T
Compression	C	Between loading noses	B	Bottom	B
Buckling	B	at Support nose	S	Left	L
interlaminar Shear	S	between Load and support nose	L	Right	R
Multi-mode	M(xyz)	Unknown	U	Middle	M
Other	O			Various	V
				Unknown	U

FIG. 6 Flexure Test Specimen Three-Part Failure Identification Code

h = thickness of beam, mm [in.].

NOTE 7—The limitations defined for Eq 1 in Note 6 apply also to Eq 2.

13.3 Flexural Strength—The flexural strength is equal to the maximum stress at the outer surface corresponding to the peak applied force prior to failure. (for multidirectional laminates, see Note 6). It is calculated in accordance with Eq 1 and 2 by letting P equal the peak applied force.

13.4 Flexural Stress at a Given Strain—The maximum flexural stress at any given strain may be calculated in accordance with Eq 1 and 2 by letting P equal the applied force read from the force-deflection curve at the deflection corresponding to the desired strain (for multidirectional laminates, see Note 6). Equations for calculating strains from the measured deflection are given in 13.5 and 13.6.

13.5 Maximum Strain, Procedure A—The maximum strain at the outer surface also occurs at mid-span, and it may be calculated as follows:

$$\varepsilon = \frac{6\delta h}{L^2} \quad (3)$$

where:

ε = maximum strain at the outer surface, mm/mm [in./in.],
 δ = mid-span deflection, mm [in.],
 L = support span, mm [in.], and
 h = thickness of beam, mm [in.].

13.6 Maximum Strain, Procedure B—The maximum strain at the outer surface also occurs at mid-span, and it may be calculated as follows:

$$\varepsilon = \frac{4.36\delta h}{L^2} \quad (4)$$

where:

δ = mid-span deflection, mm [in.],
 ε = maximum strain at the outer surface, mm/mm [in./in.],
 L = support span, mm [in.], and
 h = thickness of beam, mm [in.].

13.7 Flexural Modulus of Elasticity:

13.7.1 Flexural Chord Modulus of Elasticity—The flexural chord modulus of elasticity is the ratio of stress range and corresponding strain range. For calculation of flexural chord modulus, the recommended strain range is 0.002 with a start point of 0.001 and an end point 0.003. If the data is not available at the exact strain range end points (as often occurs with digital data), use the closest available data point. Calculate the flexural chord modulus of elasticity from the stress-strain data using Eq 5 (for multidirectional or highly orthotropic composites, see Note 8).

$$E_f^{\text{chord}} = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\varepsilon} \quad (5)$$

where:

E_f^{chord} = flexural chord modulus of elasticity, MPa [psi],
 $\Delta\sigma$ = difference in flexural stress between the two selected strain points, MPa [psi], and
 $\Delta\varepsilon$ = difference between the two selected strain points (nominally 0.002).

13.7.1.1 Report the chord modulus of elasticity in MPa [psi] for the strain range 0.001 to 0.003. If a different strain range is used in the calculations, also report the strain range used.

NOTE 8—Shear deformation can seriously reduce the apparent flexural modulus of highly orthotropic laminates when they are tested at low span-to-thickness ratios.⁵ For this reason, a high span-to-thickness ratio is recommended for flexural modulus determinations. In some cases, separate sets of specimens may have to be used for modulus and strength determination.

13.7.2 Flexural Secant Modulus of Elasticity—The flexural secant modulus of elasticity is the ratio of stress to corresponding strain at any given point on the stress-strain curve. The flexural secant modulus is same as the flexural chord modulus in which the initial strain point is zero. It shall be expressed in MPa [psi]. It is calculated as follows (for multidirectional or highly orthotropic composites, see Note 8):

13.7.2.1 For Procedure A:

$$E_f^{\text{secant}} = \frac{L^3 m}{4bh^3} \quad (6)$$

where:

E_f^{secant} = flexural secant modulus of elasticity, MPa [psi],
 L = support span, mm [in.],
 b = width of beam, mm [in.],
 h = thickness of beam, mm [in.] and
 m = slope of the secant of the force-deflection curve.

13.7.2.2 For Procedure B:

$$E_f^{\text{secant}} = \frac{0.17L^3 m}{bh^3} \quad (7)$$

where E_f^{secant} , m , L , b , and h are the same as for Eq 6.

13.7.3 Chord modulus of elasticity shall be reported although other definitions of moduli may also be used. However, when other definitions of moduli are used, it should be clearly indicated in the report.

13.8 Statistics—For each series of tests calculate the average value, standard deviation, and coefficient of variation for each property determined:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \left(\sum_{i=1}^n x_i \right) \quad (8)$$

$$s_{n-1} = \sqrt{\frac{\left(\sum_{i=1}^n x_i^2 - n\bar{x}^2 \right)}{n-1}}$$

$$CV = 100 \cdot \frac{s_{n-1}}{\bar{x}}$$

where:

$\bar{x}$ = average value or sample mean,
 x_i = value of single measured or derived property,
 n = number of specimens,
 s_{n-1} = estimated standard deviation,
 CV = coefficient of variation in percentage.

⁵ For 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.

14. Report

14.1 The information reported for this test method includes material identification and mechanical testing data. These data shall be reported in accordance with Guides E1309 and E1434. At a minimum, the following should be reported:

14.1.1 The revision level or date of issue of the test method used.

14.1.2 The date(s) and location(s) of the testing.

14.1.3 The name(s) of the test operator(s).

14.1.4 The test Procedure used (A or B).

14.1.5 Any variations to this test method, anomalies noticed during testing, or equipment problems occurring during testing.

14.1.6 Identification of the material tested including: material specification, material type, material designation, manufacturer, manufacturer's lot or batch number, source (if not from the manufacturer), date of certification, expiration of certification, filament diameter, tow or yarn filament count and twist, sizing, form or weave, fiber areal weight, matrix type, prepreg matrix content, and prepreg volatiles content.

14.1.7 Description of the fabrication steps used to prepare the laminate including: fabrication start date, fabrication end date, process specification, cure cycle, consolidation method, and a description of the equipment used.

14.1.8 Ply orientation stacking sequence of the laminate.

14.1.9 If requested, report density, reinforcement volume fraction, and void content test methods, specimen sampling method and geometries, test parameters, and test data.

14.1.10 Average ply thickness of the material.

14.1.11 Results of any nondestructive evaluation tests.

14.1.12 Method of preparing the test specimens, including specimen labeling scheme and method, specimen geometry, sampling method, and specimen cutting method.

14.1.13 Calibration dates and methods for all measurement and test equipment.

14.1.14 Type of test machine, grips, jaws, alignment data, and data acquisition sampling rate and equipment type.

14.1.15 Dimensions of each specimen to at least three significant figures, including specimen width, thickness, and overall length.

14.1.16 Conditioning parameters and results, and the procedure used if other than that specified in this test method.

14.1.17 Relative humidity and temperature of the testing laboratory.

14.1.18 Environment of the test machine environmental chamber (if used) and soak time at environment.

14.1.19 Number of specimens tested.

14.1.20 Load-span length, support-span length, and support span-to-thickness ratio.

14.1.21 Loading and support nose type and dimensions.

14.1.22 Speed of testing.

14.1.23 Transducer placement on the specimen, transducer type, and calibration data for each transducer used.

14.1.24 Force-deflection curves for each specimen. Note method and offset value if toe compensation was applied to force-deflection curve.

14.1.25 Tabulated data of flexural stress versus strain for each specimen.

14.1.26 Individual flexural strengths and average value, standard deviation, and coefficient of variation (in percent) for the population. Note if the failure load was less than the maximum load prior to failure.

14.1.27 Individual strains at failure and the average value, standard deviation, and coefficient of variation (in percent) for the population.

14.1.28 Strain range used for the flexural chord modulus of elasticity determination.

14.1.29 Individual values of flexural chord modulus of elasticity, and the average value, standard deviation, and coefficient of variation (in percent) for the population.

14.1.30 If an alternate definition of flexural modulus of elasticity is used in addition to chord modulus, describe the method used, the resulting correlation coefficient (if applicable), and the strain range used for the evaluation.

14.1.31 Individual values of the alternate (see above) flexural modulus of elasticity, and the average value, standard deviation, and coefficient of variation (in percent) for the population.

14.1.32 Individual maximum flexural stresses, and the average, standard deviation, and coefficient of variation (in percent) values for the population. Note any test in which the failure load was less than the maximum load before failure.

14.1.33 For flexural modulus only tests: maximum load applied, strain at maximum applied load, and calculated flexural modulus of elasticity (E_f).

14.1.34 Individual maximum flexural strains and the average, standard deviation, and coefficient of variation (in percent) values for the population. Note any test that was truncated to 2 % strain.

14.1.35 Failure mode and location of failure for each specimen.

15. Precision and Bias

15.1 *Precision*—The data required for the development of precision is not currently available for this test method.

15.2 *Bias*—Bias cannot be determined for this test method as no acceptable reference standard exists.

16. Keywords

16.1 fiber-reinforced composites; flexural properties; stiffness; strength

ANNEXES

(Mandatory Information)

A1. MEASURING AND SETTING SPAN

A1.1 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 flexural stress, flexural modulus and strain, and the loading noses are positioned and aligned properly with respect to the supports. Some simple steps as follows can improve the repeatability of results when using adjustable span fixtures.

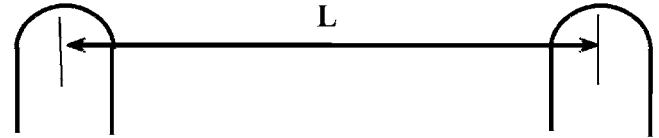


FIG. A1.1 Markings on Fixed Specimen Supports

A1.2 Measurement of Span:

A1.2.1 This technique is needed to ensure that the correct span, not an estimated span, is used in calculation of results.

A1.2.2 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. A1.1 and A1.2).

A1.2.3 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.

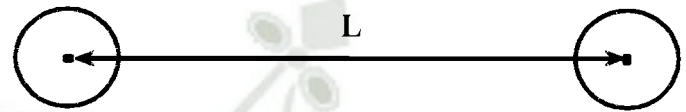


FIG. A1.2 Markings on Rotatable Specimen Supports

A1.3 Setting the Span and Alignment of Loading Nose(s)—To ensure a constant day-to-day setup of the span and ensure the alignment and proper positioning of the loading nose(s), 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. A1.3.

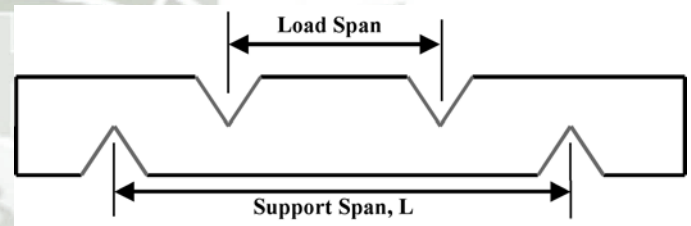


FIG. A1.3 Fixture Used to Align Loading Noses and Supports

A2. TOE COMPENSATION

A2.1 In a typical force-deflection curve (see Fig. A2.1) there is a toe region, AC, which does not represent a property of the material. It is an artifact caused by a take-up of slack and alignment, or seating of the specimen. In order to obtain correct values of such parameters as flexural modulus, and deflection at failure, this artifact must be compensated for to give the corrected zero point on the deflection, or extension axis.

A2.2 In the case of a material exhibiting a region of Hookean (linear) behavior (see Fig. A2.1), a continuation of the linear (CD) region is constructed through the zero axis. This intersection (B) is the corrected zero deflection point from which all deflections must be measured. The slope can be determined by dividing the change in force between any two points along the line CD (or its extension) by the change in deflection at the same two points (measured from Point B, defined as zero-deflection).

A2.3 In the case of a material that does not exhibit any linear region (see Fig. A2.2), the same kind of toe correction of zero-deflection point can be made by constructing a tangent to the maximum slope at the inflection Point H'. This is extended to intersect the deflection axis at Point B', the corrected zero-deflection point. Using Point B' as zero deflection, the force at any point (G') on the curve can be divided by the deflection at that point to obtain a flexural chord modulus (slope of Line B'G').

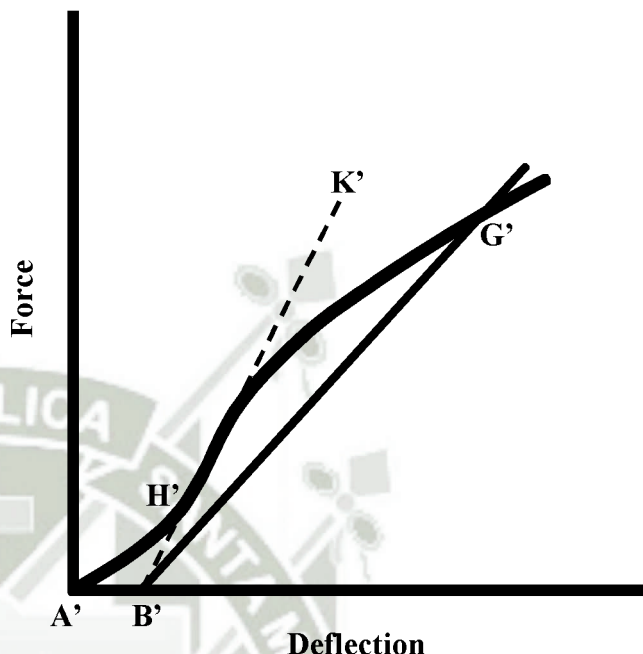


FIG. A2.2 Material without a Hookean Region

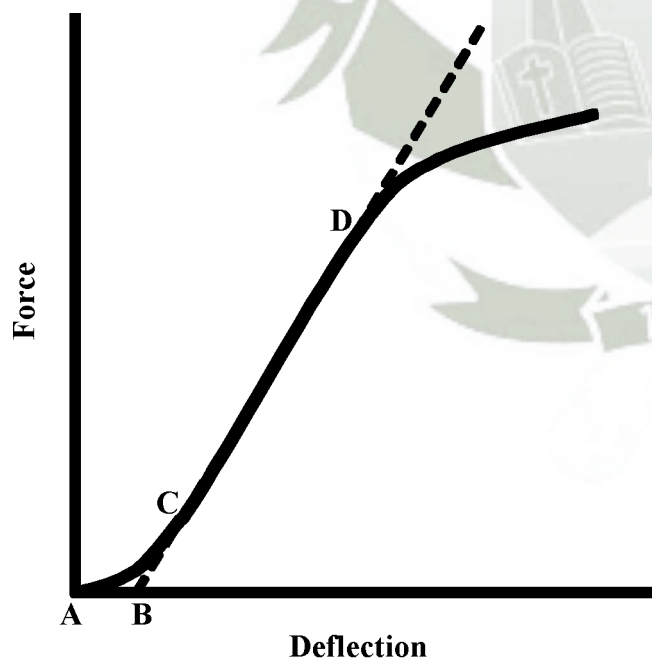


FIG. A2.1 Material with a Hookean Region

ASTM International 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 International 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 International, 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). Permission rights to photocopy the standard may also be secured from the ASTM website (www.astm.org/COPYRIGHT/).

