



Universidad de San Carlos de Guatemala
Facultad de Ingeniería
Escuela de Ingeniería Mecánica

**ESTUDIO DE MATERIALES PARA ÁLABES DE AEROGENERADORES CON
POTENCIA DE 10 KILOVATIOS, CON NANOBIOCOMPUESTOS DE
NANOCELULOSA Y RESINA EPÓXICA**

Nelly Gabriela Alvarez Véliz

Asesorado por el Msc. Ing. Jorge Iván Cifuentes Castillo

Guatemala, mayo de 2018

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**ESTUDIO DE MATERIALES PARA ÁLABES DE AEROGENERADORES CON
POTENCIA DE 10 KILOVATIOS, CON NANOBIOCOMPUESTOS DE
NANOCELULOSA Y RESINA EPÓXICA**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA
POR

NELLY GABRIELA ALVAREZ VÉLIZ

ASESORADO POR EL MSC. ING. JORGE IVÁN CIFUENTES CASTILLO

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

INGENIERA MECÁNICA

GUATEMALA, MAYO DE 2018

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANO	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
VOCAL I	Ing. Angel Roberto Sic García
VOCAL II	Ing. Pablo Christian de León Rodríguez
VOCAL III	Ing. José Milton de León Bran
VOCAL IV	Br. Oscar Humberto Galicia Nuñez
VOCAL V	Br. Carlos Enrique Gómez Donis
SECRETARIA	Inga. Lesbia Magalí Herrera López

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

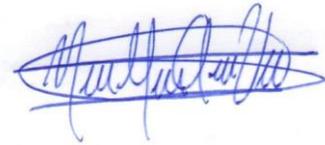
DECANO	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
EXAMINADOR	Ing. José Ismael Véliz Padilla
EXAMINADOR	Ing. Carlos Enrique Chicol Cabrera
EXAMINADOR	Ing. Roberto Guzmán Ortíz
SECRETARIA	Inga. Lesbia Magalí Herrera López

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

En cumplimiento con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de graduación titulado:

ESTUDIO DE MATERIALES PARA ÁLABES DE AEROGENERADORES CON POTENCIA DE 10 KILOVATIOS, CON NANOBIOCOMPUESTOS DE NANOCELULOSA Y RESINA EPÓXICA

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Mecánica, con fecha abril de 2017.

A handwritten signature in blue ink, appearing to read 'Nelly Gabriela Alvarez Véliz', written over a faint horizontal line.

Nelly Gabriela Alvarez Véliz

Guatemala, 04 de abril de 2017

Ingeniero

Carlos Humberto Pérez Rodríguez
Director Escuela de Ingeniería Mecánica
Facultad de Ingeniería
Universidad de San Carlos de Guatemala

Ingeniero Pérez:

Por este medio hago constar que he revisado y aprobado el trabajo de graduación de la estudiante **Nelly Gabriela Alvarez Véliz**, con Registro académico **201213548** y número de carné **2588 04203 0609**, el cual lleva como título: **“ESTUDIO DE MATERIALES PARA ÁLABES DE AEROGENERADORES CON POTENCIA DE 10 KILOVATIOS, CON NANOBIOCOMPUESTOS DE NANOCELULOSA Y RESINA EPÓXICA”**.

En base a lo anterior, hago de su conocimiento esta información a efecto de continuar con el trámite respectivo para su aprobación, sin otro particular,

atentamente



Jorge Iván Cifuentes Castillo

Ingeniero Mecánico

Colegiado 3413

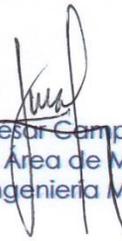
ASESOR

Jorge Iván Cifuentes Castillo
Máster en Ciencias Ingeniero Mecánico
Colegiado No. 3413

Ref.E.I.M.099.2018

El Coordinador del Área de Materiales de la Escuela de Ingeniería Mecánica, luego de conocer el dictamen del Asesor y habiendo revisado en su totalidad el trabajo de graduación titulado: **ESTUDIO DE MATERIALES PARA ÁLABES DE AEROGENERADORES CON POTENCIA DE 10 KILOVATIOS, CON NANOBIOCOMPUESTOS DE NANOCELULOSA Y RESINA EPÓXICA** desarrollado por la estudiante **Nelly Gabriela Alvarez Véliz**, CUI **2588-04203-0609** con Reg. Académico No. **201213548** recomienda su aprobación.

"Id y Enseñad a Todos"



Ing. Julio César Campos Paiz
Coordinador Área de Materiales
Escuela de Ingeniería Mecánica



Guatemala, abril 2017

/aej

Ref.E.I.M.153.2018

El Director de la Escuela de Ingeniería Mecánica, de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer el dictamen del Asesor y con la aprobación del Coordinador del Área de Materiales del trabajo de graduación titulado: **ESTUDIO DE MATERIALES PARA ÁLABES DE AEROGENERADORES CON POTENCIA DE 10 KILOVATIOS, CON NANOBIOCOMPUESTOS DE NANOCELULOSA Y RESINA EPÓXICA** desarrollado por la estudiante **Nelly Gabriela Alvarez Véliz**, CUI **2588-04203-0609** con Reg. Académico No. **201213548** y luego de haberlo revisado en su totalidad, procede a la autorización del mismo.

"Id y Enseñad a Todos"



Ing. Carlos Humberto Pérez Rodríguez
Director
Escuela de Ingeniería Mecánica



Guatemala, mayo de 2018
/aej

Universidad de San Carlos
De Guatemala



Facultad de Ingeniería
Decanato

Ref. DTG.170.2018

El Decano de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Ingeniería Mecánica, al trabajo de graduación titulado: **ESTUDIO DE MATERIALES PARA ÁLABES DE AEROGENERADORES CON POTENCIA DE 10 KILOVATIOS, CON NANOBIOCOMPUESTOS DE NANOGELULOSA Y RESINA EPÓXICA**, presentado por la estudiante universitaria: **Nelly Gabriela Alvarez Véliz**, y después de haber culminado las revisiones previas bajo la responsabilidad de las instancias correspondientes, se autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE.

5/07/18
Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
Decano



Guatemala, mayo de 2018

/cc

ACTO QUE DEDICO A:

Dios	Por ser mi fortaleza día a día.
Mis padres	Luddin Alvarez y Mirna Véliz de Alvarez, quienes sin escatimar esfuerzo alguno, han sacrificado gran parte de su vida en formar y educar a mis hermanos y a mí. No nos alcanzará la vida para pagar todo lo que han hecho por nosotros. Por su amor, comprensión, apoyo incondicional, inagotable paciencia y por enseñarnos, con su ejemplo, el valor de la perseverancia.
Mi hermano	Federico Alvarez, por ser una luz y apoyo en mi vida.
Mis hermanas	Mirna y Victoria Alvarez, por su comprensión, paciencia y amor.
Mi familia en general	Aura Véliz y Geovanni Véliz, por su apoyo.

AGRADECIMIENTOS A:

Universidad de San Carlos de Guatemala Por brindarme la oportunidad de ser parte de tan prestigiosa casa de estudios.

Facultad de Ingeniería Por ser una segunda casa para mí.

Escuela de Ingeniería Mecánica Por guiarme e instarme a seguir tan prestigiosa carrera.

Laboratorio Nacional de Nanotecnología, Costa Rica Por apoyarme en su país y por ser un pilar importante en esta investigación.

Dirección General de Investigación Por ser parte de esta investigación, por apoyo y consejo.

Centro de Investigaciones de Ingeniería, USAC Por su apoyo y consejo.

Jorge Iván Cifuentes Castillo Por su apoyo, consejo, asesoría y amistad.

Dr. Bernal Sibaja

Por su ayuda y asesoría.

**Mis amigos de la
Facultad**

Jarol Herrera, Michael González, Cindy Rivas,
Alexander Márquez, Juan Rodríguez y Tomas
Irving por su incondicional amistad, apoyo y
cariño.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES	V
LISTA DE SÍMBOLOS	XI
GLOSARIO.....	XIII
RESUMEN	XIX
OBJETIVOS	XXI
INTRODUCCIÓN	XXIII
1. ANTECEDENTES.....	1
1.1. Nanotecnología	1
1.2. Energía eólica.....	4
1.2.1. Aerogeneradores	6
1.2.1.1. Álabes de aerogeneradores.....	8
1.3. Nanomateriales	9
1.4. Nanobiocompuestos	10
2. MARCO TEÓRICO	11
2.1. Conceptos básicos	11
2.1.1. Nanobiocompuestos.....	11
2.1.2. Microcelulosa	12
2.1.3. Nanocelulosa	13
2.1.4. Resina epóxica	14
2.2. Aerogenerador.....	15
2.2.1. Tipos de aerogeneradores de acuerdo con su potencia.....	17
2.2.2. Álabes de aerogenerador.....	18

	2.2.2.1.	Funcionamiento de álabes actuales	19
	2.2.2.2.	Materiales de álabes actuales.....	19
2.3.		Nanomateriales.....	20
	2.3.1.	Definición.....	20
	2.3.2.	Tipos de nanomateriales	21
	2.3.3.	Proceso de obtención	23
	2.3.4.	Análisis de materiales	24
2.4.		Nanobiocompuestos.....	25
	2.4.1.	Definición.....	25
	2.4.1.	Nanocelulosa de desechos orgánicos	27
	2.4.2.	Resina epóxica.....	30
2.5.		Propiedades mecánicas	32
	2.5.1.	Dureza	33
	2.5.1.1.	Ensayo de dureza de Vickers.....	33
	2.5.1.2.	Ensayo de dureza de Brinell.....	34
	2.5.1.3.	Ensayo de dureza de Rockwell.....	35
	2.5.2.	Resistencia.....	36
	2.5.2.1.	Esfuerzo por tracción.....	37
		2.5.2.1.1. Ensayo de tracción	37
	2.5.2.2.	Esfuerzo por compresión	39
		2.5.2.2.1. Ensayo de compresión	39
	2.5.2.3.	Esfuerzo flexor.....	40
	2.5.2.4.	Esfuerzo torsor.....	40
	2.5.3.	Fractura mecánica	41
3.		PROPUESTA	47
	3.1.	Propiedades mecánicas de álabes con materiales actuales	47

3.2.	Experimentación: propiedades mecánicas de álabes de resina epóxica	49
3.2.1.	Materiales y equipo	49
3.2.2.	Metodología	51
3.2.2.1.	Probeta.....	54
3.2.2.1.1.	Norma ASTM para ensayos de polímeros en reómetro	54
3.2.3.	Proceso de experimentación	56
3.2.3.1.	Ensayo de dureza.....	56
3.2.3.2.	Ensayo de tracción	56
3.2.3.3.	Ensayo de compresión	56
3.2.3.4.	Ensayo de flexión	56
3.2.3.5.	Ensayo de torsión.....	57
3.3.	Extracción de microcelulosa y nanocelulosa	57
3.3.1.	Materiales.....	57
3.3.2.	Instrumentación y equipo de laboratorio	58
3.3.3.	Metodología	59
3.4.	Experimentación: propiedades mecánicas de álabes con resina epóxica y nanocelulosa	72
3.4.1.	Materiales.....	72
3.4.2.	Tratamientos previos de nanocelulosa.....	75
3.4.3.	Metodología	78
3.4.3.1.	Proceso de creación de probetas	80
3.4.4.	Proceso de experimentación	82
3.4.4.1.	Ensayo de dureza	83
3.4.4.2.	Ensayo de tensión	83
3.4.4.3.	Ensayo de compresión	86
3.4.4.4.	Ensayo de flexión	88

3.4.4.5.	Ensayo de torsión	89
3.5.	Datos recolectados	90
3.5.1.	Muestra de cálculo.....	90
4.	RESULTADOS.....	99
4.1.	Resultados	99
4.1.1.	Ensayo de dureza	99
4.1.2.	Ensayo de tensión/ tracción	102
4.1.3.	Ensayo de compresión	105
4.1.4.	Ensayo de flexión.....	108
4.1.5.	Ensayo de torsión	111
4.1.6.	Pruebas adicionales	114
4.1.6.1.	Resultados obtenidos.....	115
4.2.	Porcentaje de mejora de propiedades mecánicas	116
CONCLUSIONES		121
RECOMENDACIONES.....		123
BIBLIOGRAFÍA		125
ANEXOS.....		129

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1.	Discurso de Richard Feynman.....	2
2.	Diagrama de energía limpia en América Latina.....	5
3.	Medición de potencial eólico.....	7
4.	Aerogenerador de uso residencial.....	16
5.	Estructura de un nanotubo de carbono a partir de grafeno	22
6.	Método <i>top – down</i> y <i>bottom up</i>	24
7.	Nanofibras de celulosa de diferentes fuentes.....	29
8.	Representación de ensayo de Vickers	34
9.	Esquema de ensayo de Brinell	35
10.	Ensayo de tracción	38
11.	Reómetro	39
12.	Ensayo por compresión.....	40
13.	Ensayo de torsión.....	41
14.	Gráfica esfuerzo – deformación I.....	42
15.	Gráfica esfuerzo – deformación II	43
16.	Fractura frágil de un material	44
17.	Materiales por usar	50
18.	Equipo de laboratorio I	51
19.	Equipo de laboratorio II	51
20.	Pre calentamiento de moldes en horno.....	52
21.	Preparación de molde	52
22.	Proceso de mezcla de resina epóxica.....	53
23.	Probetas terminadas	57

24.	Equipo de laboratorio.....	59
25.	Diagrama de metodología general	60
26.	Biomasa (cáscara de piña).....	60
27.	Mezcla de H ₂ O tipo 3 y NaOH	62
28.	Biomasa y solución de NaOH	62
29.	Biomasa en proceso de filtración.....	63
30.	Solución de NaOH	64
31.	Biomasa y solución de NaClO	66
32.	Biomasa y solución de HCl	68
33.	Microcelulosa resultante.....	68
34.	Centrifuga usada.....	70
35.	Diálisis.....	71
36.	Nanocelulosa	72
37.	Materiales	74
38.	Equipo de laboratorio.....	75
39.	Nanocelulosa en kitasato	76
40.	Equipo de filtración al vacío	76
41.	Nanocelulosa	77
42.	Nanocelulosa almacenada	77
43.	Preparación de molde I	78
44.	Preparación de molde II	78
45.	Proceso de mezcla de resina epóxica.....	79
46.	Preparación de moldes.....	79
47.	Proceso de curado.....	80
48.	Probetas terminadas.....	81
49.	Ejecución de programa en computadora	83
50.	Encendiendo compresor.....	84
51.	Reómetro.....	84
52.	Instalación de accesorios para ensayo de tensión	85

53.	Datos de probetas y condiciones de ensayo de tensión	85
54.	Ejecución de ensayo de tensión	86
55.	Accesorios de ensayo de compresión.....	87
56.	Datos de probetas y condiciones de ensayo de compresión.....	87
57.	Accesorios de ensayo de flexión	88
58.	Accesorios de ensayo de torsión.....	89
59.	Ejecución de ensayo de torsión	90
60.	Ensayo de dureza.....	117
61.	Gráfico de ensayo de tensión	117
62.	Gráfico de ensayo de compresión.....	118
63.	Ensayo de flexión	118
64.	Ensayo de torsión.....	119

TABLAS

I.	Representaciones de nanomateriales	21
II.	Escalas de dureza de Rockwell	36
III.	Fractura dúctil de un material	45
IV.	Condiciones de probetas de materiales de álabes actuales.....	48
V.	Resultados álabes de fibra de vidrio	48
VI.	Medidas de probetas	81
VII.	Probetas experimentales	82
VIII.	Probetas de resina epóxica	91
IX.	Probetas de resina epóxica y 0,25 % de nanocelulosa.....	92
X.	Probetas de resina epóxica y 0,50 % de nanocelulosa.....	93
XI.	Probetas de resina epóxica y 0,70 % de nanocelulosa.....	94
XII.	Probetas de resina epóxica y 1,0 % de nanocelulosa.....	95
XIII.	Probetas de resina epóxica y 2,50 % de nanocelulosa.....	96

XIV.	Probetas de resina epóxica y 5,0 % de nanocelulosa	97
XV.	Probetas de resina epóxica y 10,0 % de nanocelulosa	98
XVI.	Dureza de resina epóxica y 0 % de nanocelulosa	99
XVII.	Dureza de resina epóxica y 0,25 % de nanocelulosa.....	99
XVIII.	Dureza de resina epóxica y 0,50 % de nanocelulosa.....	100
XIX.	Dureza de resina epóxica y 0,70 % de nanocelulosa.....	100
XX.	Dureza de resina epóxica y 1,0 % de nanocelulosa.....	100
XXI.	Dureza de resina epóxica y 2,5 % de nanocelulosa.....	101
XXII.	Dureza de resina epóxica y 5,0 % de nanocelulosa.....	101
XXIII.	Dureza de resina epóxica y 10,0 % de nanocelulosa.....	101
XXIV.	Ensayo de tensión/ tracción resina epóxica y 0 % de nanocelulosa ...	102
XXV.	Ensayo de tensión/ tracción resina epóxica y 0,25 % de nanocelulosa.	102
XXVI.	Ensayo de tensión/ tracción resina epóxica y 0,50 % de nanocelulosa.	103
XXVII.	Ensayo de tensión/ tracción resina epóxica y 0,70 % de nanocelulosa.....	103
XXVIII.	Ensayo de tensión/ tracción resina epóxica y 1,0 % de nanocelulosa.....	103
XXIX.	Ensayo de tensión/ tracción resina epóxica y 2,5 % de nanocelulosa.....	104
XXX.	Ensayo de tensión/ tracción resina epóxica y 5,0 % de nanocelulosa.....	104
XXXI.	Ensayo de tensión/ tracción resina epóxica y 10,0 % de nanocelulosa....	104
XXXII.	Ensayo de compresión resina epóxica y 0 % de nanocelulosa	105
XXXIII.	Ensayo de compresión resina epóxica y 0,25 % de nanocelulosa.....	105
XXXIV.	Ensayo de compresión resina epóxica y 0,50 % de nanocelulosa.....	105
XXXV.	Ensayo de compresión resina epóxica y 0,70 % de nanocelulosa.....	106

XXXVI.	Ensayo de compresión resina epóxica y 1,0 % de nanocelulosa.....	106
XXXVII.	Ensayo de compresión resina epóxica y 2,5 % de nanocelulosa.....	106
XXXVIII.	Ensayo de compresión resina epóxica y 5,0 % de nanocelulosa.....	107
XXXIX.	Ensayo de compresión resina epóxica y 10,0 % de nanocelulosa.....	107
XL.	Ensayo de flexión resina epóxica y 0,0 % de nanocelulosa	108
XLI.	Ensayo de flexión resina epóxica y 0,25 % de nanocelulosa	108
XLII.	Ensayo de flexión resina epóxica y 0,50 % de nanocelulosa	109
XLIII.	Ensayo de flexión resina epóxica y 0,70 % de nanocelulosa	109
XLIV.	Ensayo de flexión resina epóxica y 1,0 % de nanocelulosa	109
XLV.	Ensayo de flexión resina epóxica y 2,5 % de nanocelulosa	110
XLVI.	Ensayo de flexión resina epóxica y 5.0 % de nanocelulosa	110
XLVII.	Ensayo de flexión resina epóxica y 10,0 % de nanocelulosa	110
XLVIII.	Ensayo de torsión resina epóxica y 0 % de nanocelulosa	111
XLIX.	Ensayo de torsión resina epóxica y 0,25% de nanocelulosa.....	111
L.	Ensayo de torsión resina epóxica y 0,50% de nanocelulosa.....	112
LI.	Ensayo de torsión resina epóxica y 0,70 % de nanocelulosa.....	112
LII.	Ensayo de torsión resina epóxica y 1,0 % de nanocelulosa	112
LIII.	Ensayo de torsión resina epóxica y 2,5 % de nanocelulosa	113
LIV.	Ensayo de torsión resina epóxica y 5,0 % de nanocelulosa	113
LV.	Ensayo de torsión resina epóxica y 10 % de nanocelulosa	113
LVI.	Dimensiones de probetas experimentales	114
LVII.	Ensayo de compresión.....	115
LVIII.	Ensayo de tensión	115
LIX.	Ensayo de flexión	116

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado
°C	Grados Celsius
cm	Centímetros
g	Gramos
K	Grados Kelvin
kg	Kilogramo
kg _f	Kilogramo fuerza
kW	Kilovatios
kWh/año	Kilovatios hora por año
l	Litro
mW	Megavatios
ml	Mililitro
mm	Milímetros
MPa	Mega Pascales
m/s	Metros por segundo
MW	Megavatios
nm	Nanómetros
pH	Potencial de hidrógeno
%	Porcentaje

GLOSARIO

Agua tipo 3	Agua desmineralizada, sometida a una serie de procesos de filtración para generar mayor pureza.
Álcalis	Sustancias cáusticas que se disuelven en agua formando soluciones con un pH superior a 7 (básico).
Amorfa	Sin forma definida.
ASTM	American Society for Testing and Materials. Sociedad americana para pruebas y materiales.
Biosíntesis	Síntesis de sustancias orgánicas complejas realizadas por los seres vivos a partir de otras más simples.
Buje	Pieza cilíndrica que reviste el interior los elementos mecánicos que giran alrededor de un eje.
Cargas	Fuerza ejercida sobre la superficie de un cuerpo.
Cíclico	Proceso que se repite en un periodo de tiempo.
Clúster	Grupo de átomos o moléculas enlazados, de tamaño regular o intermedio entre una molécula y un sólido.

Criogénicas	Temperaturas criogénicas. Son las temperaturas inferiores a 120 K o su equivalente a -153 °C.
Criomolineda	Proceso de mezclado de sólidos a temperaturas criogénicas
Deformación	Cambio de forma o tamaño de un cuerpo debido a esfuerzos internos generados por la aplicación de una o más fuerzas.
Desalinización	Disminución de salinidad de una sustancia.
Desoxidación	Eliminación total o parcial del oxígeno de un compuesto químico.
Despolimerización	Reacción contraria a la polimerización como un mecanismo alterno a una reversión.
Exotérmica	Proceso o reacción que produce desprendimiento de calor.
Fisión	Separación del núcleo de un átomo.
Fotosíntesis	Combinación química producida por acción de la luz; por la formación de hidratos de carbono a partir de anhídrido carbónico, por la clorofila influida por la luz.
Hidrolisis ácida	Proceso químico en el cual se rompen los enlaces de un compuesto por medio de un ácido.

Hidrosoluble	Sustancia que puede disolverse en el agua.
Ignifugas	Sustancia que protege contra fuego.
INDE	Instituto Nacional de Electrificación.
Lignina	Sustancia natural que forma parte de la pared celular de muchas células vegetales, a las cuales aporta dureza y resistencia.
Liposoluble	Sustancia soluble en grasas o en aceite.
Locomoción	Facultad de trasladarse de un lugar a otro.
Nano	Prefijo que denota una milmillonésima parte de la unidad.
Nanociencia	Ciencia encargada del estudio de fenómenos observados en estructuras y sistemas que poseen escalas nanométricas.
Nanofiltros	Filtros de sustancias nanométricas.
Nanómetros	Unidad de longitud perteneciente a la millonésima parte de un milímetro.

Polimerización	Proceso en el cual moléculas simples, iguales o diferentes, reaccionan entre sí por adición o condensación y forman otras moléculas de peso doble.
Potencia	Capacidad de ejecutar un trabajo en un tiempo determinado.
Polución	Contaminación del medio ambiente.
PSI	<i>Pounds-force per square inch</i> , libras fuerza por pulgada cuadrada.
Reticular	Con forma de red.
Rotura	Fractura generada en un material.
RPM	Revoluciones por minuto.
Semiconductor	Material que se comporta como conductor o como aislante.
Síntesis	Formación de una sustancia compuesta mediante la combinación de elementos químicos o de sustancias más sencillas.
Soluto	Sustancia que está disuelta en otra.

Tarar

Pesar el recipiente idóneo que ha de contener la muestra y colocar en balanza cero absoluto a partir de su peso.

Urea

Compuesto químico cristalino e incoloro.

RESUMEN

El siguiente trabajo de investigación se divide en cuatro capítulos, en los que se desarrolla el estudio de materiales para álabes de aerogeneradores con potencia de 10 kilovatios, con nanobiocompuestos de nanocelulosa y resina epóxica; con el objetivo principal de mejorar las propiedades mecánicas de los álabes por medio de la adición de nanocelulosa a un polímero comercial como la resina epóxica. En el primer capítulo se describen los primeros indicios de la nanotecnología aplicada a materiales, álabes de aerogeneradores, nanomateriales y nanobiocompuestos.

En el segundo capítulo se describen conceptos básicos, funcionamiento y materiales de álabes actuales de aerogeneradores como componente principal de estudio, definición de nanobiocompuestos y nanomateriales como parte de la nanotecnología desarrollada; además de la descripción de propiedades mecánicas empleadas en el estudio de álabes de aerogeneradores.

En el tercer capítulo se desarrolla el estudio de los materiales de los álabes actuales de aerogeneradores de 10 kilovatios, metodología y experimentación de materiales de álabes de aerogeneradores con adición de nanotecnología, por medio de nanocelulosa obtenida por medio de desechos orgánicos y adicionada a la resina epóxica.

En el cuarto capítulo se describen los resultados de ensayos destructivos aplicados a probetas con diferentes porcentajes de nanocelulosa y resina epóxica, obtenidos en el Laboratorio Nacional de Nanotecnología, Costa Rica y Centro de Investigaciones de Ingeniería, Universidad de San Carlos de Guatemala. Además, se realiza una simulación de condiciones ambientales de álabes de aerogeneradores.

OBJETIVOS

General

Realizar un estudio de materiales para aspas de aerogeneradores de hasta 10 kilovatios con nanobiocompuestos de nanocelulosa y resina epóxica.

Específicos

1. Determinar las propiedades mecánicas de aspas de aerogeneradores con materiales convencionales por medio de ensayos destructivos.
2. Describir las propiedades mecánicas que aportan los nanobiocompuestos y la resina epóxica para la fabricación de aspas de aerogeneradores.
3. Determinar la incidencia positiva del uso de aspas de aerogeneradores fabricadas con nanobiocompuestos y resina epóxica.
4. Determinar las propiedades mecánicas mejoradas en aspas de aerogeneradores fabricadas por medio de nanobiocompuestos.

INTRODUCCIÓN

La nanotecnología es una ciencia que se ha desarrollado a través de los años, es una de las áreas más activas de investigación que abarca diferentes disciplinas, incluyendo los materiales. El prefijo nano hace referencia a la milmillonésima parte de un metro de la materia o de un material. La nanotecnología estudia diferentes estructuras de materiales con dimensión de milmillonésimas partes, o más conocida como nanoescala. Esta interacción hace referencia a los nanomateriales.

Los nanomateriales son un producto nanotecnológico de gran importancia, estos materiales pueden ser modificados en una escala nanométrica, mejorando las características atómicas y diferentes propiedades (ópticas, eléctricas y magnéticas). Conforme la nanotecnología se desarrolla, avances industriales, aumento de la contaminación, agotamiento de recursos naturales y reservas de combustibles fósiles, surge la necesidad de buscar soluciones renovables de energía y amigables con el ambiente. Los aerogeneradores son parte de las soluciones que se han desarrollado como medio de abastecimiento energético del ser humano, aprovechando primordialmente la energía cinética del viento.

La energía eólica en Guatemala es ideal, debido a que el territorio guatemalteco se encuentra afectado por el patrón de vientos alisios; vientos representados por sistemas de alta presión en los meses de octubre a febrero, y en los demás meses del año por sistemas de baja presión. Esto es muy conveniente debido a que la velocidad de viento aceptable para generadores de 10 kilovatios es de 5 m/s a 12 m/s.

Con ello la aplicación de aerogeneradores es más extensa, esto requiere la creación de componentes capaces de soportar factores ambientales, poseer fuerza, soportar la velocidad del viento y poseer bajo peso (en caso de elementos de aerogeneradores como los álabes) para garantizar el buen funcionamiento de un aerogenerador.

La nanotecnología y los biocompuestos poseen algunas propiedades que ayudan al mejoramiento de elementos combinando materiales, además, contribuyen al aprovechamiento de los recursos naturales y mejoramiento de índices de producción de energía verde en el país.

1. ANTECEDENTES

1.1. Nanotecnología

La nanotecnología es una palabra compleja, su prefijo nano se refiere a milmillonésima (1×10^{-9}) parte del metro o parte de la materia. La nanotecnología es considerada una ciencia que involucra el estudio, diseño, creación, manipulación y producción de materia con estructuras a nanoescala.

En 1857, Michael Faraday hizo referencia a los nanomateriales por medio de la publicación de un artículo en la revista *Philosophical Transactions of the Royal Society*. Ahí se mencionaba cómo las nanopartículas de los metales hacían interacción de cambio de colores en los vidrios de las ventanas de las iglesias. Pero más adelante en 1908, Gustav Mie describió explícitamente cómo el color de los vidrios dependía del tamaño y del tipo del metal por usar; el artículo fue publicado en la revista alemana *Annalen der Physik* (Leipzig).

La nanotecnología y la nanociencia fueron mencionadas por primera vez por el físico Richard Feynman el 29 de diciembre de 1959, en el Instituto Tecnológico de California en la reunión anual de Sociedad Americana de Física, con su discurso “Hay espacio de sobra aquí adentro”, en el cual hacía referencia a la manipulación de diferentes materiales a escala microscópica por medio de sus átomos y moléculas; y que las leyes de la física no eran impedimento para llevar a cabo dicha tarea. Proponía manipular los átomos de forma individual para maniobrar, diseñar y crear pequeñas estructuras con diferentes propiedades específicas y mejoradas; además de crear diferentes circuitos a escala nanométrica usadas en ordenadores con más potencia.

Un fragmento del discurso de Richard Feynman:

Figura 1. **Discurso de Richard Feynman**

“ Este hecho—que enormes cantidades de información puedan ser contenidas en un espacio tan increíblemente reducido—es, por supuesto bien conocido por los biólogos, y resuelve el misterio que existía antes que entendiéramos todo esto claramente, de cómo podía ser que, en la célula más pequeña, toda la información para la existencia de una criatura compleja tales como nosotros mismos pudiera ser almacenada..... Toda esta información está contenida en una fracción muy diminuta de la célula en la forma de una larga cadena de moléculas de ADN en la cual aproximadamente 50 átomos son usados para representar un bit de información acerca de la célula. “

Fuente: MOLINA, Mario I. *Nanotecnología, ciencia de lo diminuto*. Boletín Sociedad. p. 12

Años más tarde, en 1979 Heinrich Rohrer y su colaborador Gerd Binnig iniciaron el diseño de un instrumento que estaba basado en el efecto túnel en el vacío, llamado también microscopio túnel de barrido o *STM*, abriendo puertas a la experimentación nanotecnológica.

En 1986, K. Erik Drexler, crea un mundo imaginario y cambiado por la nanotecnología por medio de su libro *Máquinas de la creación*. En el cual menciona la creación de robots diminutos, de una diezmilésima parte de milímetro aproximadamente, con “ensambladores”, que tendrían la capacidad de tomar moléculas individuales y ponerlas en lugares específicos formando estructuras deseadas.

La nanotecnología es definida como la serie de actividades científicas y tecnológicas a escala atómica y molecular; con estas actividades se pueden realizar materiales con propiedades controladas, entre otras. Estas propiedades pueden ser observadas y exploradas en diferentes escalas, tanto escala microscópica como escala macroscópica.

La nanotecnología es una ciencia que puede ser aplicada a diferentes disciplinas y áreas de la vida del ser humano, la nanotecnología va desde aplicaciones biológicas por medio de la medicina, hasta aplicaciones tecnológicas enfocadas a elementos de máquinas con materiales nanomodificados.

Los aportes de la nanotecnología abarcan la exploración espacial (nanotubos de carbono para cables y estudios cartográficos, robots, naves y ascensores espaciales, tejidos autorreparables), comunicación e informática (sistemas de almacenamiento de datos de muy alta densidad de registro, nuevas tecnologías de visualización a base de plásticos flexibles, semiconductores, nanochips, computación cuántica), sector energético (mejora del almacenamiento y producción de energía, desarrollo de energías alternativas y limpias, energía del hidrógeno, pilas de combustible, dispositivos de ahorro energético), medioambiente (desarrollo de energías, materiales y procesos no contaminantes, depuración y desalinización del agua, detoxificación y prevención de la erosión del suelo, reducción de la extracción de minerales), industria textil (tejidos <<inteligentes>>, autolimpiables, antiolores, antimanchas, reguladores de la temperatura, ignífugos y que cambian de color, eliminación de contaminantes y alérgenos), construcción y arquitectura (nanomateriales más ligeros y resistentes, pinturas especiales, vidrios que repelen la humedad, el polvo y la suciedad, hormigones <<inteligentes>>, materiales autorreparables, superficies antihumedad y antipintadas), electrónica (semiconductores, cables cuánticos, circuitos con nanotubos de carbono), fabricaciones militares, espionaje, industria automovilística, seguridad personal y vial, e incluso deportes.¹

¹ COPPO, J. A. *Nanotecnología, medicina veterinaria y producción agropecuaria*. Rev. Vet, 2009, vol. 20, p. 62

1.2. Energía eólica

El día 5 de marzo de cada año se conmemora el día de la “eficiencia energética”, dadas las condiciones en las que se encuentra el planeta tierra, el ser humano se ha visto en la necesidad de satisfacer las necesidades energéticas utilizando diferentes medios. Los primeros métodos de generación de energía en Guatemala fueron a partir de biomasa, energía eólica, energía hidráulica, energía solar, entre otras.

La energía eólica es la energía producida por la velocidad del viento, aprovechando la energía cinética producida; en la que también está involucrada la actividad solar; debido al calentamiento de aire en la atmosfera, crea corrientes de masas de aire.

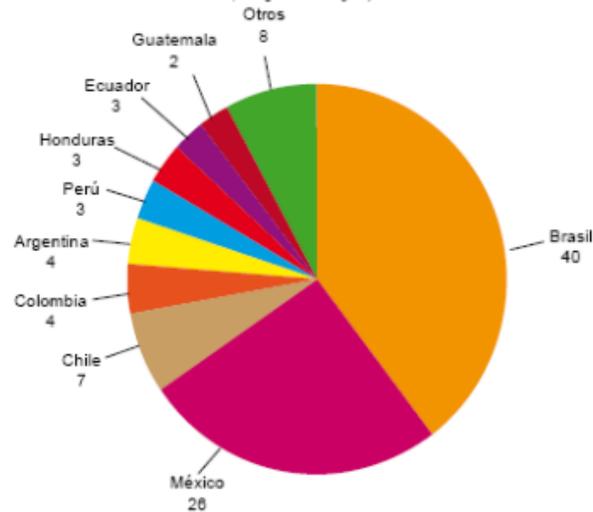
La energía eólica tiene inicios en tiempos remotos, era usada como medio de locomoción, para mover barcos impulsados por velas o hacer funcionar molinos de grano. En el siglo VI d.C. se registran datos en los que se utilizaban molinos para moler granos y bombear agua en la región de Sijistán, entre Irán y Afganistán. En el siglo XI d.C. los molinos de viento eran más utilizados en el Medio Oriente; para luego ser introducidos en Europa siglos después.

En la actualidad se emplea la energía eólica para generar energía limpia, por medio de aerogeneradores con un sistema mecánico de rotación, provista de aspas produciendo movimiento y así generar energía eléctrica.

En Guatemala la energía eólica es muy aprovechable, debido a que es un territorio afectado por vientos alisios, los cuales se desplazan con una trayectoria y velocidad favorable según los meses del año, combinados con sistemas de presión.

Figura 2. **Diagrama de energía limpia en América Latina**

AMÉRICA LATINA Y EL CARIBE: CANTIDAD DE PROYECTOS DEL MECANISMO PARA UN DESARROLLO LIMPIO
(En porcentajes)



Fuente: GONZÁLEZ, Carlos Alberto, et al. *Estado del arte de la bioeconomía y el cambio climático*. p. 56

Beneficios de la energía eólica

- No existe minería, no hay desplazamiento de terreno, alteración de cauces de agua, contaminación por partículas y acumulación de residuos radioactivos.
- No hay metalurgia, transformación de combustible, contaminación en el aire, contaminación en las refinerías de petróleo, explosiones de gas, agentes químicos agresivos.
- No se genera fisión de combustible, accidentes nucleares, emisiones de dióxido de carbono a la atmósfera, emisión de gases invernadero generador de cambio climático, contaminantes ácidos, gases tóxicos y polución térmica.
- Generación de trabajo para personal capacitado para mantenimiento.

Ventajas de energía eólica

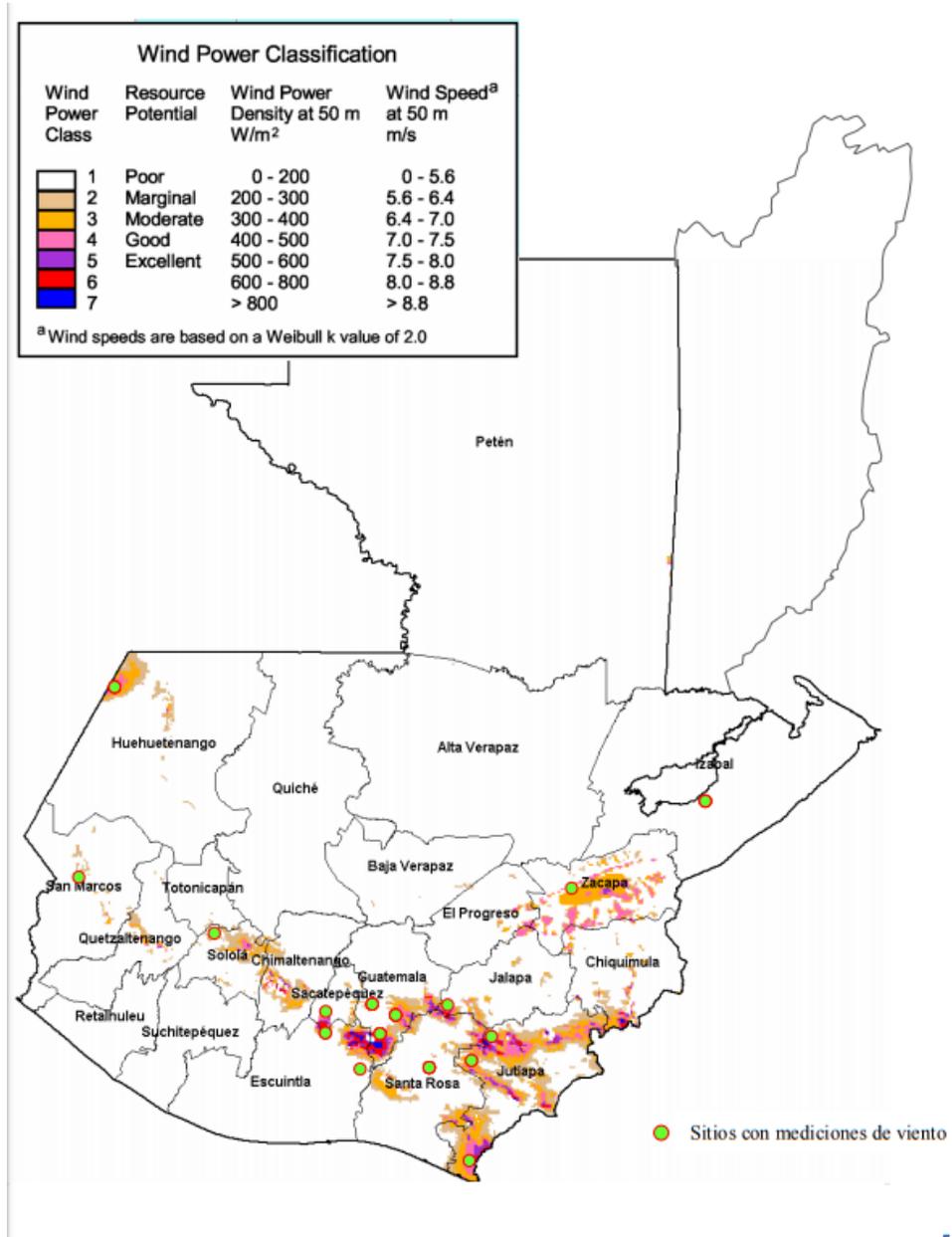
- Recurso abundante.
- Recurso renovable.
- Generación de energía limpia.
- Fuente de generación con menor costo y rentable.
- Disminuye la emisión de gases de efecto invernadero al reemplazar termoeléctricas a base de combustibles fósiles.
- Libre de condiciones políticas y relaciones entre países.

1.2.1. Aerogeneradores

En 1916 en Estados Unidos fue observado el primer aerogenerador, usado en naves que proporcionaban electricidad. No se sabe con exactitud la fecha en que Guatemala inicia la utilización de aerogeneradores, se registra en la historia el primer proyecto de medición de viento en 2006 en los siguientes lugares: Estanzuela, Zacapa; San Marcos, San Marcos; Santa Catarina Ixtahuacán, Sololá; Alotenango, Sacatepéquez; Chiquimulilla, Santa Rosa; Mataquescuintla, Jalapa; Morales, Izabal; Villa Canales, Guatemala; Nentón, Huehuetenango; Guanagazapa, Escuintla; Moyuta, Quesada y Jutiapa, del departamento de Jutiapa.

Estas mediciones realizadas solo generan la duda de que Guatemala iniciara con implementar energía limpia en el territorio, evitando así el consumo de combustibles fósiles y la degradación del medio

Figura 3. Medición de potencial eólico



Fuente: <http://www.mem.gob.gt/wp-content/uploads/2015/06/Energ%C3%ADa-E%C3%B3lica-en-Guatemala.pdf> Consulta: 24 de mayo de 2017.

Los aerogeneradores son también conocidos como turbinas eólicas. Son dispositivos que aprovechan la energía cinética generada por el viento y la convierten en energía mecánica por medio del movimiento del rotor localizado en el eje, produciendo así energía eléctrica.

Existen tres leyes físicas que rigen la cantidad de energía aprovechable por el viento. Las cuales son las siguientes:

- Ley No. 1: la energía generada por la turbina es proporcional a la velocidad del viento al cuadrado.
- Ley No. 2: la energía disponible está directamente relacionada con el área barrida de los álabes.
- Ley No. 3: existe una eficacia teórica máxima de los generadores eólicos del 59%.

1.2.1.1. Álabes de aerogeneradores

El rotor es uno de los componentes principales de una turbina eólica, componente que se encuentra en contacto con el viento y realiza el proceso de conversión de los tipos de energías involucradas; desde la energía cinética generada por la velocidad del viento hasta la energía eléctrica final.

Los álabes de los aerogeneradores son componentes indispensables en el funcionamiento de los aerogeneradores; su selección es de suma importancia. En tiempos antiguos eran utilizados diferentes materiales como madera; cedro, pino, roble, nogal, cerezo, encino, olivo, castaño, entre otros. Posteriormente, se utilizaron materiales como acero, láminas de acero, diferentes tipos de polímeros y aleaciones de diferentes materiales.

1.3. Nanomateriales

Los nanomateriales son parte de las aplicaciones que se han desarrollado desde inicios de la nanotecnología. Son materiales con propiedades morfológicas pequeñas, de tamaño nanométrico; estos materiales poseen beneficios considerables debido a que son manipulados microscópicamente.

Los nanomateriales, también conocidos como materiales nanoestructurados, son sustancias cuya dimensión es de orden nanométrico (10^{-9} m) y sus propiedades dependen de su longitud, superficie o volumen. Las propiedades nanomodificadas son superiores a las propiedades de los materiales convencionales debido a sus diferentes procesos de obtención. Las propiedades que usualmente son modificadas y mejoradas son la resistencia mecánica, dureza, ductilidad, resistencia al desgaste, entre otros.

Los nanomateriales hacen referencia a un material fabricado mediante técnicas desarrolladas y desde los inicios de la vida humana se han visto en la naturaleza. Se han encontrado nanopartículas en los pulmones de un cuerpo humano de más de 5 000 años de antigüedad en los Alpes y nanotubos de carbono que datan de hace 10,000 años en muestras de hielo extraídas de un glaciar en Groenlandia. La finalidad de los nanomateriales es la de mejorar las propiedades del material con el que son mezclados. Este último se denomina matriz, y cada uno de los elementos que forman un compuesto reciben el nombre de fase.²

² LÓPEZ DE URALDE HUARTE, Juan José. *Nanomaterial characterization through image treatment, 3D reconstruction and AI techniques*. p. 1.

1.4. Nanobiocompuestos

Para definir un nanobiocompuesto es necesario conocer su desarrollo; desde la creación de compuestos, nanocompuestos, biocompuestos hasta los nanobiocompuestos.

El primer indicio de compuesto fue en 1800 estuvo a cargo de Joseph Louis Proust, químico francés que observó la composición elemental, mencionada en sus leyes, Ley de composición constante y Ley de proporciones definidas. En estas leyes se definía a los compuestos como sustancias formadas por dos o más elementos unidos químicamente en proporciones de masa definidas.

Los nanocompuestos fueron mencionados por primera vez por el físico Richard Feynman en 1959, en su discurso “Hay espacio de sobra aquí adentro”. Los nanocompuestos han adquirido interés científico con el avance de la tecnología y con la diversidad de propiedades que exhiben.

Un biocompuesto fue desarrollado por el científico Friedrich Wöhler en 1928. Wöhler observó al evaporar una disolución de cianato de amonio, la formación de cristales incoloros de gran tamaño, que no pertenecían al cianato de amonio. El análisis determinó que se trataba de urea, un compuesto químico cristalino. La transformación observada por Wöhler convierte un compuesto inorgánico (cianato de amonio) en un compuesto orgánico, por medio de la adición de urea. Y así se desarrollaron los compuestos orgánicos más conocidos como biocompuestos.

Conforme el desarrollo de la nanociencia se acuña el término de nanobiocompuesto, mezcla de biocompuestos generados a partir de diferentes sustancias y elementos orgánicos a escala nanométrica.

2. MARCO TEÓRICO

2.1. Conceptos básicos

A continuación se detallan conceptos básicos importantes para la comprensión del estudio realizado.

2.1.1. Nanobiocompuestos

Para definir de forma correcta un nanobiocompuesto es necesario desglosar los términos previos a desarrollarlo.

Un compuesto es la mezcla o la unión entre diferentes elementos químicamente enlazados en proporciones definidas, estos elementos se encuentran representados por la tabla periódica. Los compuestos se clasifican en compuestos orgánicos e inorgánicos.

Los nanocompuestos son compuestos desarrollados con nanotecnología para mejorar las propiedades mecánicas y térmicas. Los nanocompuestos suelen caracterizarse porque, una de las dimensiones de las partículas se encuentra en rango de nanómetros.

Los biocompuestos se definen como compuestos químicos que están presentes en los seres vivos, pueden crearse por la unión de sustancias orgánicas formadas por el elemento carbono.

Un nanobiocompuesto es una estructura a partir de compuestos orgánicos enlazados, que posee una dimensión nanométrica.

Algunos científicos definen los nanobiocompuestos de la siguiente forma:

Es un material híbrido que consiste en una matriz biopolimérica reforzado con una fibra, una plaqueta o partícula que tiene una dimensión en la escala nanométrica. Debido a las partículas de tamaño nanométrico y dispersas en la matriz biopolimérica, estos nanobiocompuestos exhiben una notable mejora en las propiedades mecánicas, térmicas, ópticas y fisicoquímicas en comparación con el polímero puro o los convencionales (microscópico).³

2.1.2. Microcelulosa

Con el avance de la contaminación, el uso de materiales no biodegradables y no renovables, el aumento de desechos y desechos de residuos agrícolas, el ser humano se ha visto en la necesidad de crear materiales de origen biológico reusando diferentes tipos de desechos constituidos principalmente por raíces, hojas, tallos u otras partes de plantas.

La celulosa está constituida por fibras y células vegetales. La celulosa representa alrededor de un tercio de la composición de la célula y es biosintetizada en el proceso de fotosíntesis. Con la ayuda de fibras vegetales y la nanotecnología, la nanocelulosa es uno de los componentes esenciales en aplicaciones científicas e industriales.

³ CAMACHO ELIZONDO, Melissa; VEGA BAUDRIT, José; et al. *Uso de nanomateriales en polímeros para la obtención de bioempaques en aplicaciones alimentarias. Revista de la Sociedad Química del Perú*, 2011, vol. 77, no 4, p. 292-306.

Conforme se aprovechen los materiales lignocelulósicos (desechos agrícolas) se obtienen el beneficio ecológico al eliminar una fuente de contaminación y económico al dotar generar un material con valor agregado.

La microcelulosa o celulosa microcristalina (MCC) es un derivado de la celulosa despolimerizada, es una fase en que la pared celular de la fibra ha sido transformada en fragmentos de tamaños pequeños, que varían de decenas a centenas de micras.

La microcelulosa se obtiene por medio de un proceso de hidrólisis ácida controlada, se caracteriza por ser un polvo blanco y fino, inodoro, inerte, insoluble en agua, en solventes orgánicos y ácidos diluidos, y parcialmente soluble en álcalis diluidos.

Tiene amplio uso en la elaboración de aglutinantes, lubricantes, dispersantes en preparaciones líquidas, transporte de colorantes y pigmentos, enriquecer la fluidez en polvos y granulados. Además, puede ser suplemento alimenticio al sustituir al almidón, lactosa y otros azúcares en su preparación; mejorando la compresibilidad de los ingredientes y haciendo posible su aplicación tanto en los métodos de fabricación por vía húmeda (granulación húmeda) o seca (compresión directa o granulación), entre otros usos.

2.1.3. Nanocelulosa

La nanocelulosa tiene diversas aplicaciones, entre ellas se encuentra el uso como refuerzo y/o barrera de distintos polímeros, nanopapel, nanofiltros, implantes médicos; aplicaciones con especificaciones como: alta transparencia, baja expansión térmica y alta resistencia, entre otras.

La nanocelulosa presenta muchas ventajas debido a que, los materiales que están fabricados a base de nanocelulosa pueden ser más fuertes que el acero, ligeros, conductores, no tóxicos, altamente absorbentes, versátiles con aplicaciones en cosméticos y productos farmacéuticos, películas y recubrimientos de barrera, tratamiento de aguas, electrónicos y más.

2.1.4. Resina epóxica

Las resinas epóxicas son el producto de reacciones químicas del petróleo, presentadas en forma de sólidos o líquidos con un grado de viscosidad elevado. Generalmente, las resinas epóxicas son usadas como matrices para materiales compuestos. Por sí solas las resinas epóxicas son solubles y fusibles; son capaces de reaccionar con endurecedores o agentes de curado para originar estructuras muy reticuladas, insolubles, infusibles, con excelente resistencia a ácidos, bases y disolventes y con altísimas propiedades mecánicas.

La mayoría de las resinas epóxicas comerciales está compuesta por Bisfenol A y epiclohidrina. Las propiedades de una resina epóxica fundamentalmente dependen de su reactividad, peso molecular, y de las características del endurecedor utilizado en la polimerización.

Las aplicaciones de las resinas van enfocadas a diferentes sectores: transporte, industria química, campo eléctrico, aeronáutica, aeroespacial, materiales, tecnología.

2.2. Aerogenerador

Un sistema eólico o un aerogenerador es un conjunto de componentes que aprovecha la energía cinética del viento convirtiéndola en energía mecánica y por medio de un componente específico realiza la conversión a energía eléctrica. Actualmente, se utiliza la energía eólica en muchos países para la producción de electricidad.

Los aerogeneradores son también conocidos como turbinas eólicas. Son dispositivos que aprovechan la energía cinética generada por el viento y la convierte en energía mecánica por medio del movimiento de un eje, produciendo así energía eléctrica.

El viento es un factor crítico dentro de la generación de energía debido a que la potencia varía conforme el cubo de la velocidad. La velocidad es otro factor importante debido a que tiene variación directa con la altitud sobre el suelo, fricción causada por montañas, árboles y edificios.

En el caso de la generación energética de hasta 10 kilovoltios, se utilizan imanes permanentes diseñados para ser acoplados a turbinas eólicas, y conexión directa entre el rotor y el generador. Los aerogeneradores tienen diferentes tamaños y pueden satisfacer demandas de pequeña potencia, o agruparse y formar granjas eólicas conectadas al sistema eléctrico nacional.

Actualmente, en Guatemala están en operación dos parques eólicos, parque eólico San Antonio El Sitio ubicado en el municipio de Villa Canales, departamento de Guatemala; y planta de energía eólica Viento Blanco ubicada en la finca La Colina, del municipio de San Vicente Pacaya, departamento de Escuintla.

El Ministerio de Energía y Minas de Guatemala tiene planificada la apertura de dos parques más, ubicados en el departamento de Jutiapa serán nombrados: proyecto eólico Comapa y parque eólico Las Cumbres.⁴

Figura 4. **Aerogenerador de uso residencial**



Fuente: San Cristóbal, zona 8, Mixco.

Las turbinas eólicas funcionan de forma sencilla, se obtiene energía cinética del viento por medio de álabes, palas o hélices de su rotor; el rotor realiza la conversión de energía cinética del viento en mecánica utilizable. Para después convertirse en energía eléctrica por medio de un sistema eléctrico de generación.

⁴ <http://www.mem.gob.gt/wp-content/uploads/2015/06/Energía-Eólica-en-Guatemala.pdf>
Consulta: 2 de junio de 2017.

2.2.1. Tipos de aerogeneradores de acuerdo con su potencia

Los aerogeneradores se clasifican de acuerdo con diferentes puntos de vista; la potencia nominal generada es uno de estos puntos de vista.

Se pueden mencionar los siguientes modelos de aerogeneradores: microturbinas, pequeños aerogeneradores, grandes aerogeneradores y aerogeneradores multimegavat.

- Microturbinas (< 3 kW): son usados en lugares en los que no se necesita mucho consumo energético; viviendas aisladas y telecomunicaciones son algunos ejemplos. El funcionamiento básico consiste en generar la energía y se cargan en baterías de almacenamiento. Generalmente, son turbinas eólicas de eje horizontal, son poseedoras de imanes permanentes que se accionan directamente con el movimiento cinético de los álabes.
- Pequeños aerogeneradores (<50 kW): sistemas eólicos que se combinan con otros sistemas de generación de apoyo, como generadores fotovoltaicos. Estos aerogeneradores generan mayor potencia por medio de una caja de engranajes entre el eje rotor y el generador eléctrico; satisfacen necesidades de viviendas, telecomunicaciones, parques eólicos, centros comerciales, hospitales, hoteles, universidades y demás. Los pequeños generadores suelen usarse como sistemas eólicos aislados, utilizando adicional un regulador, banco de batería para aplicaciones de corriente directa, y/o un inversor para aplicación de corriente alterna.

- Grandes aerogeneradores (<850 kW): son aerogeneradores horizontales trípala o triálabe, generan energía eléctrica para ser conducida por medio de la red eléctrica y distribuida en diferentes plantas. Su potencia nominal está en un rango entre 200 y 850 kW. La generación principal inicia desde que el eje gira a una velocidad constante entre 15 y 50 revoluciones por minuto, mientras que la velocidad en la punta del álabe es no mayor a 70 m/s.
- Aerogeneradores multimegavat (1 y 3 MW): miden del centro de giro del rotor entre 60 y 100 m de altura. Son aerogeneradores industriales que satisfacen demandas de producción de potencia mayor.

2.2.2. Álaves de aerogenerador

Un aerogenerador tiene como función principal transformar la energía cinética de la velocidad del viento en energía eléctrica, sin utilizar otro recurso más que el viento; esta producción de energía se realiza por medio de la energía mecánica de la rotación de los álaves. El viento circula en ambas caras de los álaves con diferentes perfiles geométricos, genera un área de depresión en la cara superior con respecto a la presión en la cara superior. Seguido de esta presión se genera fuerza de resistencia que se opone al movimiento, generando fuerza en el rotor por medio de la energía cinética.

Los alaves de las turbinas son elementales para la generación de energía eléctrica, debido a que los álaves son los encargados en recibir la energía del viento por medio de la velocidad.

2.2.2.1. Funcionamiento de álabes actuales

Conocidos también como aspas o palas. Los álabes de un aerogenerador son imprescindibles y fundamentales. Su función es resistir cargas elevadas; reciben la energía del viento, la capturan y realizan la conversión de rotación en el buje de la turbina.

Emplean el principio de fuerza de empuje actuando debajo del álabe, el aire produce una sobrepresión en la parte inferior y un vacío en la parte superior. Este provoca una fuerza de empuje que hace que el rotor rote convirtiendo así la energía cinética del viento en energía mecánica para después ser convertida en energía eléctrica.

2.2.2.2. Materiales de álabes actuales

La fabricación de los álabes es muy importante debido a que, dependiendo de los materiales utilizados, así será la vida útil y la eficiencia. En la antigüedad se utilizaban materiales como madera, acero y aluminio. Los álabes de aluminio y las aleaciones de acero eran pesados y vulnerables a la fatiga. Estos materiales son por lo general usados en turbinas muy pequeñas.

Actualmente, se fabrican con los materiales compuestos: aleaciones de acero, poliéster o resina epóxica reforzado con fibra de vidrio o fibra de carbón, y de resina de vidrio sin aditivos. Los álabes deben ser de bajo peso y tener un comportamiento mecánico adecuado durante su vida útil.

2.3. Nanomateriales

Los nanomateriales son importantes en el desarrollo de este estudio por lo que se desglosa lo referente a ellos.

2.3.1. Definición

Los nanomateriales o también conocidos como materiales nanoestructurados, son sustancias cuya dimensión es en orden de nanómetro (10^{-9} m), sus propiedades dependen de su longitud, superficie o volumen, y se realizan a partir de un proceso de síntesis.

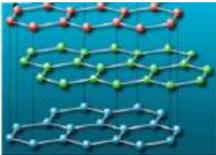
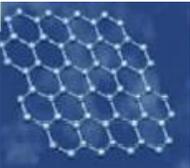
Los nanomateriales son materiales con propiedades morfológicas pequeñas, además de poseer beneficios considerables, pueden ser manipulados de forma microscópica mejorando las propiedades mecánicas, físicas y químicas de los materiales.

Considerando el papel que en la actualidad juegan los nanomateriales se han aplicado a fabricación de catalizadores de alta reactividad, aislantes, herramientas con propiedades mejoradas, sensores de alta sensibilidad, revestimientos con mayor resistencia a la corrosión, entre otras.

2.3.2. Tipos de nanomateriales

- Fullerenos: son sólidos moleculares compuestos de carbono, su estructura se presenta por medio de enlaces a base de poliedros de pentágonos y hexágonos de átomos de carbono. Los fullerenos como nanomateriales presentan diferentes aplicaciones, entre las principales la antioxidación y excelentes conductores de temperaturas. Actualmente, la mayoría de los lubricantes presenta fullerenos en su composición. El descubrimiento de los fullerenos se atribuye al químico británico H.W. Kroto, en 1985.
- Grafeno: es un material que presenta estructuras ideales de átomos de carbono; es un material que posee propiedades electrónicas en cuanto a la movilidad de cargas y presenta propiedades cristalinas. Fue descubierto en 2004 por Geim y Novoselov en la Universidad de Manchester. El grafeno es un material con espesor monoatómico y estructura hexagonal.

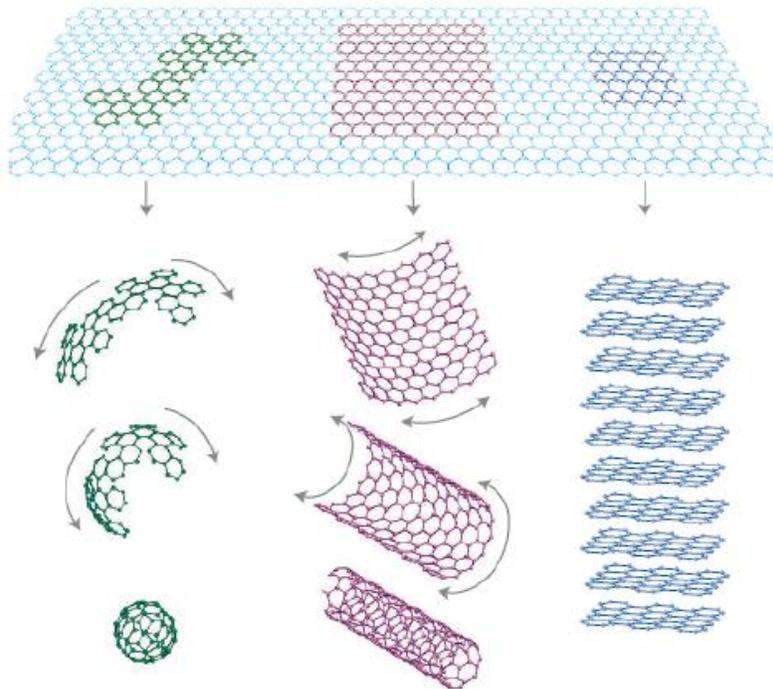
Tabla I. **Representaciones de nanomateriales**

<p>Láminas de grafeno apiladas formando la estructura de grafito.</p> 	<p>Grafito en su forma natural.</p> 
<p>Imagen de lápiz común usando grafito.</p> 	<p>Representación de lámina individual de grafeno.</p> 

Fuente: FERNÁNDEZ LÓPEZ, Vicente. *Nanomateriales basados en carbono*. p. 26.

- Nanotubos de carbono: son macromoléculas formadas de átomos de carbono que poseen semiestructuras de fullerenos en sus extremos. Son de un tamaño aproximado de un micrómetro de largo, y de entre 1 y 100 nanómetros de diámetro. Descubierta por el físico japonés Sumio Iijima en 1991, en Tsukuba, Japón. Los nanotubos de carbono son apropiados debido a que poseen propiedades químicas que forman una estructura de panal.

Figura 5. **Estructura de un nanotubo de carbono a partir de grafeno**



Fuente: FERNÁNDEZ LÓPEZ, Vicente. *Nanomateriales basados en carbono*. p.24

- Nanocapsulas: son nanopartículas huecas con propiedad de adhesión de diferentes sustancias. Entre sus aplicaciones principales se encuentra la industria farmacéutica.

- Dendrimeros: moléculas sintéticas formadas a nanoescala con estructura tridimensional. Actualmente, se presentan diferentes investigaciones con respecto a este material para ser aplicado al cuidado del ambiente, debido a que atrae iones de metal contaminantes.

2.3.3. Proceso de obtención

Existen dos procesos generales de obtención de nanomateriales, estos son: de arriba hacia abajo (*top-down*) o de abajo hacia arriba (*bottom-up*).

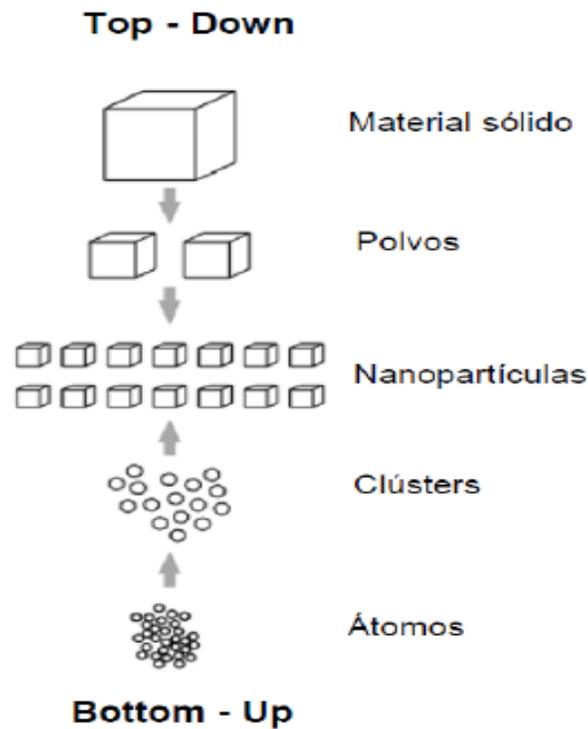
El método de arriba hacia abajo (*top-down*), es un descendente, inicia con materiales sólidos de tamaños elevados, seguido de obtención de nanopartículas por medio de procesos termo-mecánicos incluyendo molienda, pulido, corte y procesos químicos. El proceso se desarrolla desde la obtención de un material sólido, obtención de polvos, generación de nanopartículas, *clústers* hasta llegar a los átomos.

Este método es más económico, los costos son relativamente bajos debido a que las partículas que se obtienen presentan imperfecciones en la estructura, poca geometría y baja pureza. Estas propiedades desarrolladas en el proceso de obtención reinciden en la estructura física y química de los materiales.

El método de abajo hacia arriba (*bottom up*), consiste en todo lo contrario, se inicia con la obtención de los nanomateriales yendo desde partículas pequeñas como átomos, seguido de un tamaño más grande denominadas *clúster*, hasta obtener las nanopartículas correspondientes.

Este método es el más usado en la fabricación de nanomateriales, debido a que se pueden obtener nanoestructuras con mayor grado de pureza y mejores propiedades físicas y químicas.

Figura 6. **Método *top-down* y *bottom up***



Fuente: GUERRERO, Víctor, et al. *Nuevos materiales: aplicaciones estructurales e industriales*. p.165

2.3.4. Análisis de materiales

Existen diversos métodos de análisis de los nanomateriales, el uso de cada uno de ellos depende de las necesidades de análisis requeridos. Entre los más importantes se mencionan los siguientes:

- Microscopia electrónica: examina la estructura de los nanomateriales usando electrones luminosos excitados.
- Difracción de rayos X: técnica para analizar materiales basada principalmente en la interacción de rayos x con cristales de los materiales analizados.
- Termogravimetría: análisis con condiciones atmosféricas programadas en las que una muestra de masa balanceada contra una temperatura.
- Espectroscopia: es el efecto de la luz brillante generada por un aparato denominado espectroscopio, en la que se somete una muestra del nanomaterial, observando la dispersión, absorción y otras propiedades del material.
- Instrumentos de detección de barrido: instrumentos que posee un sensor a nanoescala, que detecta las propiedades físicas, química, corrientes y demás propiedades específicas de los materiales por analizar. Los instrumentos más usados para el análisis de nanomateriales son los siguientes: microscopios de barrido (STM), calorimetría diferencial de barrido y otros.

2.4. Nanobiocompuestos

Los nanobiocompuestos son elementos importantes en el desarrollo del estudio, por ello se detallan a continuación.

2.4.1. Definición

Para definir de forma correcta un nanobiocompuesto es necesario desglosar términos previos. Un compuesto es la mezcla o la unión entre diferentes elementos químicamente enlazados dadas ciertas proporciones definidas, estos elementos se encuentran representados por la tabla periódica.

Entre los compuestos se encuentran los compuestos orgánicos los cuales son los compuestos que poseen carbono e incluyen hidrocarburos como sus derivados. Y los compuestos inorgánicos que no incluye en su estructura carbono.

Los nanocompuestos son compuestos desarrollados con nanotecnología para mejorar las propiedades mecánicas y propiedades térmicas. Los nanocompuestos suelen caracterizarse porque una de las dimensiones de las partículas se encuentra en rango de nanómetros.

Los biocompuestos se definen como compuestos químicos que están presentes en los seres vivos, pueden crearse por la unión de sustancias orgánicas formadas por el elemento carbono. Un nanobiocompuesto es una estructura a partir de compuestos orgánicos enlazados por bioelementos, esta estructura poseerá una dimensión nanométrica.

Algunos científicos definen los nanobiocompuestos así:

Es un material híbrido que consiste en una matriz biopolimérica reforzado con una fibra, una plaqueta o partícula que tiene una dimensión en la escala nanométrica. Debido a las partículas de tamaño nanométrico y dispersas en la matriz biopolimérica, estos nanobiocompuestos exhiben una notable mejora en las propiedades mecánicas, térmicas, ópticas y fisicoquímicas en comparación con el polímero puro o los convencionales (microscópico).⁵

⁵ CAMACHO ELIZONDO, Melissa; VEGA BAUDRIT, José; et al. "Uso de nanomateriales en polímeros para la obtención de bioempaques en aplicaciones alimentarias". Revista de la Sociedad Química del Perú, 2011, vol. 77, no 4, p. 292-306.

2.4.1. Nanocelulosa de desechos orgánicos

La celulosa es un material que se obtiene de forma abundante en la naturaleza, se obtiene a partir de cualquier organismo vegetal y es un constituyente de los residuos agrícolas de diferentes cultivos.

La celulosa en escala nanométrica muestra propiedades que pueden utilizarse para crear materiales de características apropiadas. La celulosa está presente en fibras de la semilla de algodón, polisacáridos y lignina, madera, desechos de caña de azúcar, desechos de cascara de piña y otros desechos orgánicos. Y la función que posee es mecánica.

Fue el botánico francés Anselm Payen quien descubrió inicialmente la celulosa de desechos orgánicos por medio de residuos de intensas extracciones con álcali y acuñó su nombre. Además, encontró que contenía entre 43,6 y 45 % de carbono, entre 6 y 6,5 % de hidrógeno y que el resto era oxígeno. Teóricamente tiene 44,4 % de carbono y 6,2 % de hidrógeno.

La extracción de nanocelulosa es muy costosa debido a los materiales usados en el proceso químico de extracción, además se obtiene un rendimiento de 15 % respecto del material neto usado (desecho orgánico), en caso de obtener un procedimiento óptimo sin pérdidas.

Propiedades

La nanocelulosa posee diversas propiedades entre las que se mencionan las más importantes a continuación:

- Alto grado de polimerización, interacciones fuertes y regulares entre cadenas y organización de las fibras.
- Es un material que interactúa con los tejidos vivos de forma segura.
- Biodegradable.
- Reciclable.

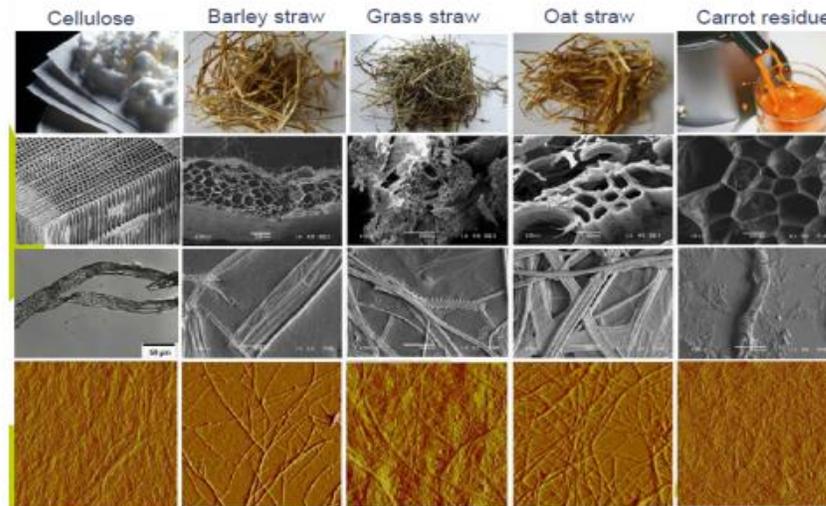
Tipos de nanocelulosa

La celulosa muestra un comportamiento de estructura jerárquica conformada por cadenas cristalinas. La nanocelulosa parte de la obtención principal de microcelulosa, dependiendo de los métodos de extracción y la fuente se desarrollan hasta dos tipos de nanocelulosa.

Entre estos tipos de celulosa se encuentran las siguientes:

Celulosa nanofibrilar (NCF): consiste en partes cristalinas y amorfas alternadas. Esta celulosa posee un diámetro entre 10 y 40 nm y con longitudes por sobre los 1 000 nm. Los métodos de extracción de este tipo de nanocelulosa son: criomolienda y homogenización a alta presión.

Figura 7. **Nanofibras de celulosa de diferentes fuentes**



Fuente: CARCHI MAURAT, David Esteban. *Aprovechamiento de los residuos agrícolas provenientes del cultivo de banano para obtener nanocelulosa*. P. 40.

Celulosa nanocristalina (NCC): celulosa a escala nanométrica, es la representación de una nanopartícula cristalina con forma rectangular. “Se puede extraer mediante hidrólisis ácida controlada de plantas o animales. Se ha reportado diámetros entre 2 y 20 nm y longitudes entre 100 y 600 nm, inclusive un poco superior a los 1 000 nm. El tamaño depende del origen, así como de la temperatura, tiempo, concentración y naturaleza del ácido empleado para la hidrólisis.”⁶

⁶CARCHI MAURAT, David Esteban. *Aprovechamiento de los residuos agrícolas provenientes del cultivo de banano para obtener nanocelulosa*. p. 44.

Dada la versatilidad y la facilidad de encontrar celulosa en diferentes residuos orgánicos, se ha desarrollado la obtención de celulosa en residuos de madera, residuos de caña de azúcar, además de obtención en diferentes vegetales y árboles frutales tales como cítricos y frutas tropicales como la piña.

2.4.2. Resina epóxica

Las resinas epóxicas son el producto de reacciones químicas del petróleo, presentadas en forma de sólidos o líquidos con un grado de viscosidad elevado. Generalmente, las resinas epóxicas son usadas como matrices para materiales compuestos. Por sí solas las resinas epóxicas son solubles y fusibles; son capaces de reaccionar con endurecedores o agentes de curado para originar estructuras muy reticuladas, insolubles, infusibles, con excelente resistencia a ácidos, bases y disolventes, con altas propiedades mecánicas.

Características de la resina epóxica

La mayoría de las resinas epóxicas comerciales están compuestas por Bisfenol A y epiclohidrina. Sus características son:

- Ser termoestables.
- Curada a base de aminas y anhídridos.
- Buena adhesión a fibras.
- Resistentes a disolventes, ácidos y álcalis.
- Resinas termoestables sin polinizar.
- Baja concentración y buena adhesión a fibras.
- Resistencia a ácidos, álcalis y disolventes.
- Proceso de curado mediante poli-adición de resina base con agente de curado.

Propiedades de la resina epóxica

Las propiedades de una resina epóxica dependen fundamentalmente de su reactividad, peso molecular, y de las características del endurecedor utilizado en la polimerización, además del agente curador por usar. Las resinas presentan propiedades como:

- Alto índice resistencia mecánica
- Resistencia química y térmica
- Aislamiento eléctrico
- Óptima humectación y adherencia
- Resistencia a la humedad
- Resistencia al ataque de fluidos corrosivos
- Excelente resistencia química
- Resistencia a elevadas temperaturas
- Poca dilatación y contracción
- Resistente a la abrasión

Existen diversas áreas de la industria en las que se involucra la resina epóxica, entre ellas se puede mencionar: fabricación de pinturas, materiales compuestos, materiales náuticos, adhesivos, materiales para sistemas eléctricos y electrónicos, entre otras.

Las aplicaciones de las resinas van enfocadas a diferentes sectores: transporte, industria química, campos eléctricos, aeronáutico, aeroespacial, materiales, tecnología, entre otras. Además, en aplicaciones como:

- Pinturas y acabados
- Sistemas eléctricos y electrónicos
- Materiales compuestos
- Consumo y aplicaciones náuticas
- Industria y arte
- Adhesivos

2.5. Propiedades mecánicas

Las propiedades mecánicas son atributos correspondientes a los materiales; las propiedades mecánicas suelen presentarse en los materiales cuando son sometidos a fuerzas exteriores aplicadas.

Las propiedades mecánicas hacen énfasis a la capacidad de estos, a resistir cargas momentáneas, cargas cíclicas, choques, dureza, fluencia, entre otras.

Los álabes de los aerogeneradores son sometidos a diferentes cargas, cargas variables, cargas cíclicas y cargas momentáneas; por ello deben presentar propiedades específicas para realizar la generación de energía eléctrica de forma eficiente y cuidando la vida de las personas cercanas.

Entre estas propiedades se presentan las siguientes:

- Resistencia a la tracción y tensión
- Resistencia de la compresión

- Dureza
- Elasticidad
- Tenacidad

2.5.1. Dureza

La dureza es una propiedad mecánica en la que un cuerpo tiene resistencia superficial a la deformación. Esta propiedad no se encuentra entre la clasificación de propiedades fundamentales de los materiales, pero a partir de ella se puede obtener información útil, como resistencia al desgaste, composición, dificultad de mecanizado, influencia de tratamientos térmicos y/o mecánicos.

Los procedimientos de ensayo de dureza son diversos, sencillos y rápidos. Estos procedimientos miden la dureza siendo el signo de dureza la letra H. Aunque dependiendo del tipo de estudio se agregará la letra inicial del ensayo de dureza realizado, por ejemplo: dureza de Vickers (HV), dureza de Brinell (HB) y dureza de Rockwell (HR).

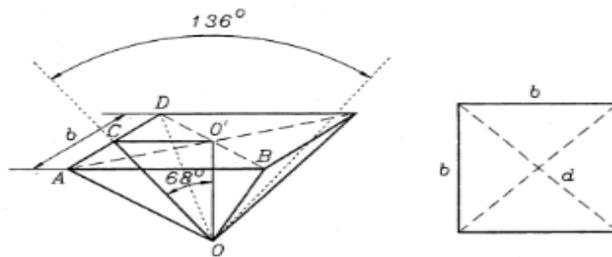
2.5.1.1. Ensayo de dureza de Vickers

La dureza de Vickers es la relación entre la carga aplicada y la superficie de huella producida. Ensayo de dureza con alto grado de precisión, posee una escala entre 5 y 1 500 HV, con cargas entre 1 kg_f y 120 kg_f.

El ensayo de Vickers utiliza una pirámide cuadrangular de diamante, con ángulo de vértice de 136°, con lo cual realiza la penetración en diferentes materiales incluidos los materiales muy duros sin sufrir deformación.

La lectura de los resultados se genera en función de la diagonal d , de la huella o ; y para un resultado exacto la medida de las dos diagonales medidas con un microscopio en milésimas de milímetro.

Figura 8. **Representación de ensayo de Vickers**



Fuente: DIAZ PARRALEJA, A. *Ciencias de los materiales. Manual de laboratorio.* p. 39

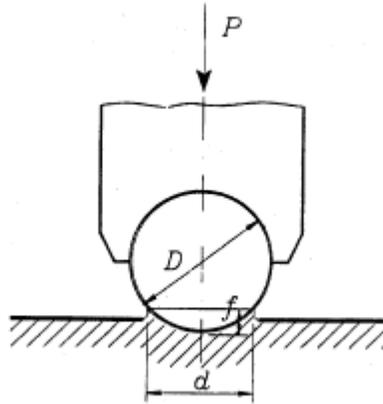
Los resultados obtenidos en el ensayo son representados por las letras HV seguidos de dos cifras, indicando la carga utilizada y el tiempo de realización de ensayo.

2.5.1.2. **Ensayo de dureza de Brinell**

Ensayo más tradicional, consiste en someter una esfera de acero endurecido a una carga por un tiempo determinado, con el objetivo de dejar una huella sobre la probeta del material por experimentar.

Se retira la carga y la probeta quedará con una huella perceptible; se mide el diámetro de la huella con un microscopio metalográfico y se calcula el área.

Figura 9. **Esquema de ensayo de Brinell**



Fuente: DIAZ PARRALEJA, A. *Ciencias de los materiales. Manual de laboratorio.* p. 35

Los resultados de la relación entre la carga “P” y el área de la huella generada, se denominan dureza de Brinell, conocidos por sus siglas HB. La forma correcta de mostrar los resultados de un ensayo de Brinell es la siguiente:

HB (D, diámetro de esfera/P, carga /T, tiempo de duración de ensayo)

2.5.1.3. **Ensayo de dureza de Rockwell**

Es un ensayo con obtención de resultados con mayor rapidez, debido a que no se realizan cálculos ni mediciones.

Para la ejecución del ensayo se utiliza un aparato con diferentes penetradores y escalas, que proporciona los resultados directos de la experimentación; además de observar la deformación directa y una recuperación elástica en el momento de retirar la carga.

Existen diferentes escalas para la realización del ensayo de Rockwell, debido a la variación de cargas con las que se puede exponer la probeta; estos poseerán diferentes penetradores en tamaño y geometría.

Tabla II. **Escalas de dureza de Rockwell**

Escala	Carga (Kg)	Tipo de penetrador	Materiales
A	60	Cono de diamante (120° ±1°)	Materiales duros, carburo de tungsteno.
B	100	Bola de 1/16"	Materiales de dureza media, aceros, latones, bronce.
C	150	Cono de diamante (120° ±1°)	Aceros y aleaciones endurecidas y revenidas.
D	100	Cono de diamante (120° ±1°)	Aceros cementados.
E	100	Bola de 1/8"	Hierro fundido, aleaciones de aluminio y magnesio.
F	60	Bola de 1/16"	Bronce o cobre recocido.
G	150	Bola de 1/16"	Cobre de berilio, bronce fosfórico.
H	60	Bola de 1/8"	Placas de aluminio.
K	150	Bola de 1/8"	Hierro fundido, aleaciones de aluminio.
L	60	Bola de 1/8"	Plásticos y metales suaves, plomo.

Fuente: DIAZ PARRALEJA, A. *Ciencias de los materiales. Manual de laboratorio.* p. 41.

2.5.2. Resistencia

La resistencia es la propiedad que poseen los cuerpos de realizar un esfuerzo de oponerse a la acción de fuerzas externas. Los tres esfuerzos básicos en los que se involucra la resistencia son: compresión, tensión y cortante. Diferentes autores de libros conceptuales de propiedades mecánicas de los materiales sugieren que la resistencia, es toda capacidad que posee un cuerpo sometido a una o varias fuerzas externas, al oponerse a la rotura.

2.5.2.1. Esfuerzo por tracción

Cuando un cuerpo está sometido a una o varias fuerzas externas, se dice que el cuerpo está bajo un esfuerzo. Un esfuerzo en una probeta o en un cuerpo genera tensiones internas propias de su estructura, estas tensiones internas tienen como resultado la generación de deformaciones y en casos extremos la concepción de rotura.

El esfuerzo de tracción es el producto de someter un cuerpo, una estructura o una probeta; a dos fuerzas o cargas en sentidos opuestos partiendo desde un eje en común, generando así una deformación por alargamiento en dicho cuerpo.

2.5.2.1.1. Ensayo de tracción

Consiste en someter una probeta a un esfuerzo de tracción en dirección de su eje, con aplicación de carga progresiva hasta llegar al punto de fractura.

Este ensayo de tracción se realiza en una máquina de ensayos denominada máquina universal de ensayos. Para la realización de un ensayo de tracción la máquina universal debe tener ciertas características específicas, tales como: aplicación de esfuerzo en dirección axial de la probeta, permitir progreso de carga y descarga gradual y permitir la regulación de velocidad del ensayo.

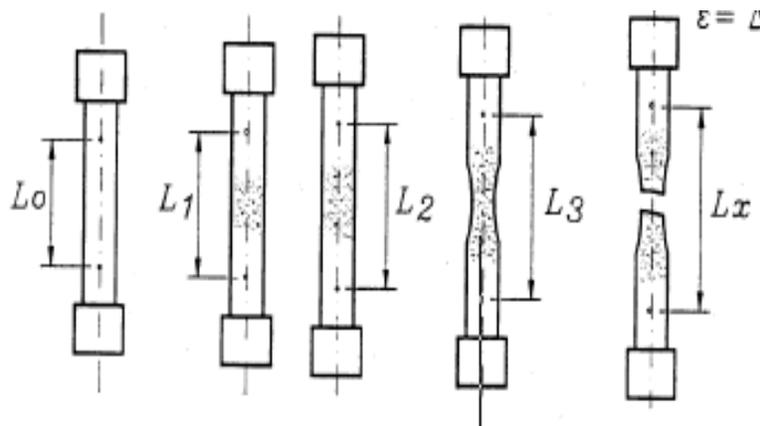
El ensayo se realiza en la máquina, colocando la probeta en las mordazas de fijación, e iniciando la aplicación de cargas.

La máquina trabaja por medio de émbolos que se mueven hidráulicamente aplicando fuerzas de tracción en la probeta experimental. Conforme va aumentando la aplicación de cargas la probeta experimenta alargamiento, cambios de sección e incluso rotura.

Con el avance de la tecnología, se pueden realizar diversos ensayos en aparatos específicos y prácticos. Entre ellos se encuentra el reómetro, aparato que tiene diversas funciones entre las cuales se encuentra la medición de fluidez de líquidos, viscosidad, además de otras propiedades de los fluidos y deformación de materiales. Por medio de un análisis mecánico dinámico incorporado entre las funciones específicas, realiza ensayos de compresión, tensión, flexión y torsión.

Además, con el reómetro se puede realizar el análisis mecánico dinámico variando rangos de temperatura, velocidad de aplicación de cargas, frecuencia y amplitud de deformación.

Figura 10. **Ensayo de tracción**



Fuente: DIAZ PARRALEJA, A. *Ciencias de los materiales. Manual de laboratorio.* p. 47

Figura 11. Reómetro



Fuente: Laboratorio Nacional de Nanotecnología, LANOTEC, Costa Rica.

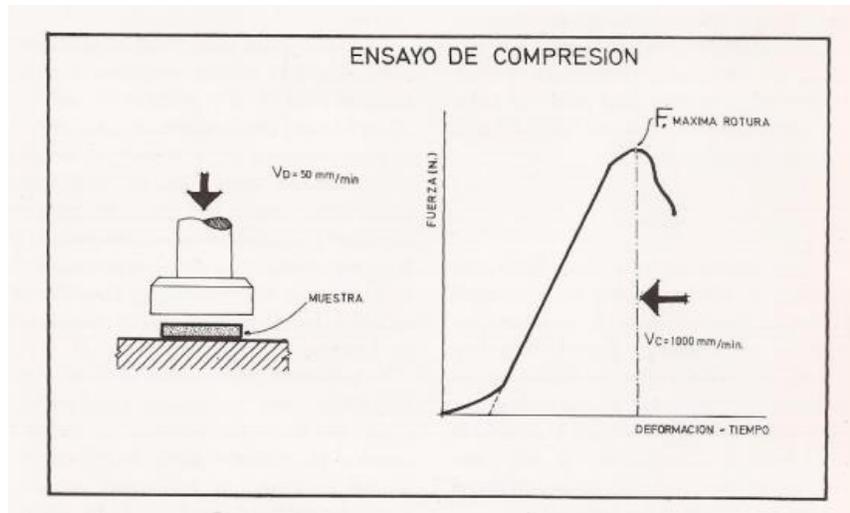
2.5.2.2. Esfuerzo por compresión

El esfuerzo por compresión se genera cuando un cuerpo está sometido a dos fuerzas o cargas en sentido opuesto expuestas a un cuerpo analizado, pero tiende a deformar su estructura en forma de compresión o aplastamiento.

2.5.2.2.1. Ensayo de compresión

El ensayo de compresión aplicado a probetas experimentales posee las mismas directrices que el ensayo a tracción; la única diferencia es que, el ensayo por compresión aplicará cargas o fuerzas en direcciones opuestas, en sentido hacia adentro del cuerpo experimentado, generando así tensiones internas de aplastamiento y compresión.

Figura 12. **Ensayo por compresión**



Fuente: CANET, W.; ESPINOSA, J. *Influencia del proceso de congelación sobre la textura de vegetales. Efecto del escaldado y la velocidad de congelación sobre la textura de zanahoria (Daucus carota L.)*. p. 534.

2.5.2.3. **Esfuerzo flexor**

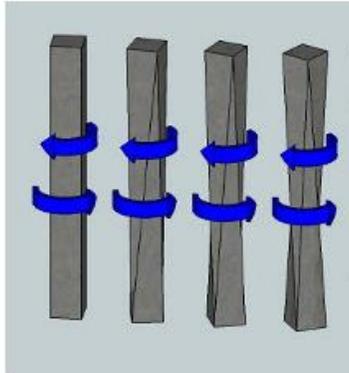
El esfuerzo flexor es producto de aplicar a un cuerpo cargas que lo deformarán en forma curva y definitivamente. Este esfuerzo tiende a presentar deformaciones permanentes en los cuerpos experimentales.

2.5.2.4. **Esfuerzo torsor**

El esfuerzo torsor es producto de aplicar a un cuerpo un momento sobre su eje longitudinal, produciendo una rotación sobre el mismo que lo deformará en forma de torcedura.

Este esfuerzo al igual que se hace por flexor tiende a presentar deformaciones permanentes en los cuerpos experimentales.

Figura 13. **Ensayo de torsión**

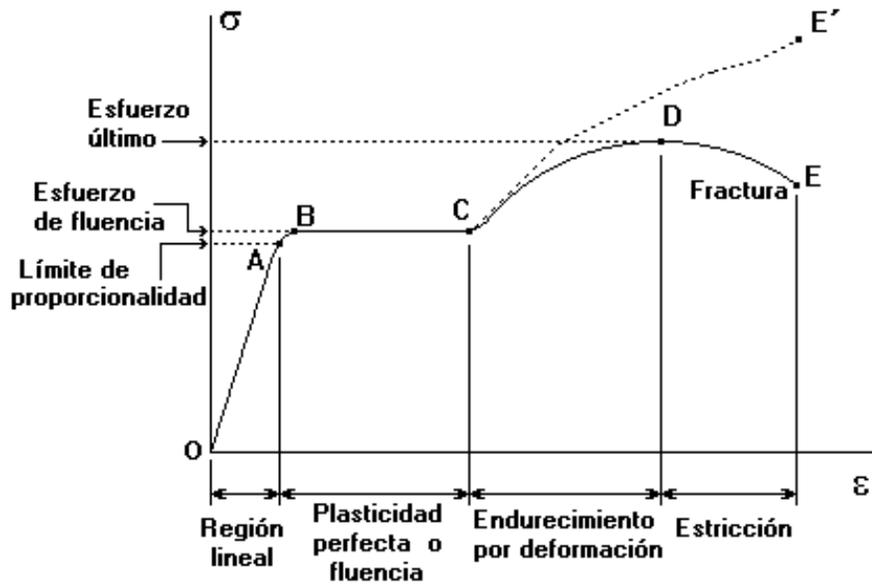


Fuente: Esfuerzos mecánicos.
<http://www.ingenieriayfinanzas.ga/2016/03/esfuerzos.html>. Consultado: 15 de julio de 2017.

2.5.3. **Fractura mecánica**

Para comprender una fractura mecánica en los diferentes materiales, es necesario comprender previamente el comportamiento que tiene dicho material al ser sometido a una carga; el resultado de este comportamiento se ve reflejado en el diagrama esfuerzo – deformación que a continuación se detalla.

Figura 14. Gráfica esfuerzo – deformación I



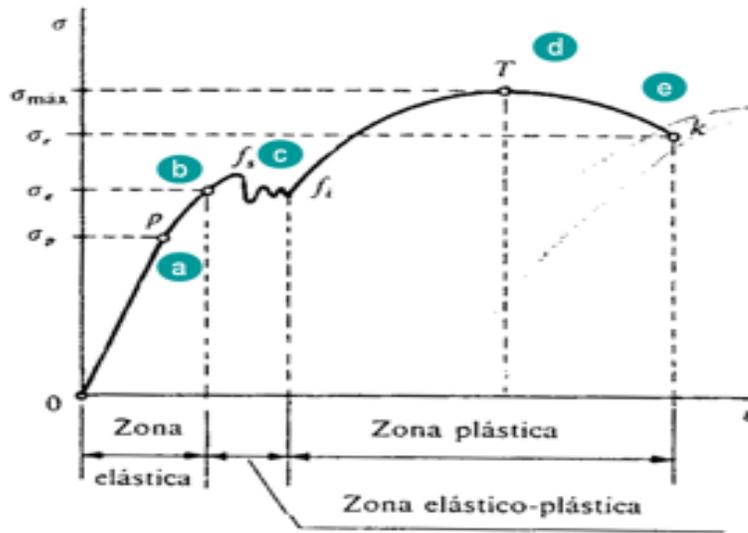
Fuente: RODAS, D. *Curvas de tensión – deformación en metales y polímeros*. Consultado: 19 de marzo de 2018.

La gráfica muestra el comportamiento, el esfuerzo que sufre un material versus la deformación al ser sometido a una carga en un tiempo determinado.

En la etapa inicial el material tiene un comportamiento elástico que aumenta proporcionalmente conforme el esfuerzo y la deformación, llegando límite proporcional. Seguido de un comportamiento plástico y una deformación permanente irreversible hasta el punto de llegar a la rotura o fractura de la probeta del material experimental.

A continuación, otro ejemplo de las partes del comportamiento de del material en la gráfica esfuerzo – deformación.

Figura 15. Gráfica esfuerzo – deformación II



- Límite de proporcionalidad: parte desde el origen O, entra en la zona elástica de la curva y es un segmento rectilíneo con aumento proporcional que respeta la ley de Robert Hooke de la relación entre la tensión y la deformación de los cuerpos.
- Límite de elasticidad o límite elástico: es punto final de la elasticidad en el material, el cual no recupera su forma original y adquiere una deformación residual o deformación permanente.
- Punto de fluencia: punto de la zona elástico – plástica, el cual el material tendrá un alargamiento sin un aumento de carga.
- Esfuerzo máximo: es el punto máximo de esfuerzo del material experimental.
- Punto de rotura o esfuerzo de rotura: esfuerzo generado en el material al sufrir la fractura.

Fuente: RANBANI VERGARA, M. R., *Materiales de ingeniería*.
 Materialesdeingenieria2013.blogspot.com. Consultado: 18 de julio de 2017.

La fractura mecánica es el resultado del crecimiento excesivo de una grieta, es la separación de un material en dos o más partes debido a esfuerzos bajo tensión. La fractura o rotura mecánica de un material tiene como objetivo caracterizar el comportamiento de un material al momento de presentar una grieta.

Por medio del estudio de la fractura mecánica se intenta relacionar propiedades de resistencia de los materiales vistos desde su microestructura.

Existen dos tipos de fractura: fractura frágil y fractura dúctil.

- Fractura frágil: también conocida como fractura elástica, se caracteriza por estar presente en los materiales que poseen un comportamiento elástico hasta llegar al punto de fractura. Este tipo de fractura suele presentarse antes o durante la propagación de una deformación plástica. Se presenta en materiales no cristalinos, con temperaturas bajas y la presencia de esfuerzos muy elevados.

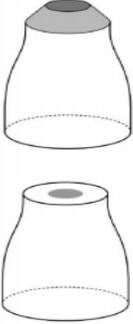
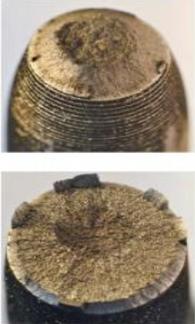
Figura 16. **Fractura frágil de un material**



Fuente: BALLESTEROS SALÁN, María Nuria. *Tecnología de proceso y transformación de materiales*. p. 43

- Fractura dúctil: se presenta en materiales que han sido expuestos a esfuerzos en los que se presenta una deformación plástica excesiva. Se caracteriza por presentar cuello de botella en el área de la fractura, deformación plástica permanente, alargamiento del material y reducción de área transversal.

Tabla III. **Fractura dúctil de un material**

<p>Superficie de rotura en copa y cono.</p> 	<p>Superficie de rotura plana perpendicular a la dirección de aplicación de carga.</p> 
---	--

Fuente: FERNÁNDEZ GUERRERO, Ignacio. *Estudio del comportamiento en rotura de un material metálico dúctil: aspectos experimentales y numéricos*. p. 32

3. PROPUESTA

Para la ejecución de la experimentación, se utiliza el sistema técnico de unidades, más conocido como sistema gravitacional. Aunque con frecuencia se emplean diferentes unidades por los instrumentos y probetas.

3.1. Propiedades mecánicas de álabes con materiales actuales

Los álabes de aerogeneradores de uso residencial con potencia de 10 kilovatios son elaborados de diferentes materiales entre ellos: aluminio, aleaciones de acero, poliéster o resina epóxica reforzado con fibra de vidrio o fibra de carbono y fibra de vidrio sin aditivos.

El estudio realizado se llevó a cabo con álabes elaborados con fibra de vidrio sin aditivos.

Las fibras de vidrio están constituidas por diversos filamentos poliméricos, en su mayoría por óxidos de silicio y diferentes tipos de óxidos como los de aluminio o magnesio con los cuales se modifican sus propiedades globales.

La fibra de vidrio se elabora por medio de dos diferentes métodos los cuales son:

- A partir de un proceso de fundición directo
- A partir de un proceso de refundición de esferas

Tabla IV. **Condiciones de probetas de materiales de álabes actuales**

Ensayo	Largo (cm)	Ancho (cm)	Espesor (cm)	Observaciones
Dureza	3,034	3,043	3,023	En el ensayo de dureza el diámetro de huella fue de 0,270 cm.
Tracción	7,104	0,503	0,198	
Compresión	2,943	2,935	2,913	
Flexión	6,953	9,997	0,510	Con luz de 5,750 cm.
Torsión	5,986	1,001	0,487	En este caso el espesor es el diámetro de la probeta circular.

Fuente: elaboración propia, Laboratorio Nacional de Nanotecnología, Lanotec.

Tabla V. **Resultados álabes de fibra de vidrio**

Tipo de ensayo	Resultado	
	Carga	Esfuerzo
Dureza con huella de 0,270 cm	No aplica	567 HV
	No aplica	77 Ha
	No aplica	514 HB
Tracción	2 100 kg _f	316,331 kg _f /cm ²
Compresión	2 400 kg _f	139,851 kg _f /cm ²
Flexión	425 kg _f	129,945 kg _f /cm ²
Torsión	14 600 kg _f	7 435,974 kg _f /cm ²

Fuente: elaboración propia, Laboratorio Nacional de Nanotecnología, Lanotec.

3.2. Experimentación: propiedades mecánicas de álabes de resina epóxica

La experimentación fue realizada por medio de ensayos destructivos a probetas de materiales para álabes de aerogeneradores con refuerzo de nanocelulosa con sus respectivos porcentajes adicionados.

3.2.1. Materiales y equipo

- Resina epóxica marca Hawk epoxy R1 (ficha técnica en sección de anexos).
- Catalizador de resina epóxica marca Hawk epoxy C2 (ficha técnica en sección de anexos).
- Alcohol de 95 % (volumen/ volumen).
- Algodón.
- Papel mayordomo.
- Pintura en aerosol color blanco.
- Grasa multiusos.
- Embudo de cristal.
- Moldes para probetas.
 - *Beacker* de 100 ml
 - Espátula
 - Moldes de vidrio
 - Filamento plástico de separación
 - Ganchos de presión
- Agente desmoldante de base acuosa.
- Grasa desmoldante.
- Parafina.
- *Maskin tape*
- Elementos de limpieza de equipo.

- Equipo de seguridad.
 - Guantes
 - Lentes de seguridad
 - Bata de laboratorio
 - Botas industriales
- Equipo de laboratorio.
 - Beacker
 - Probeta
 - Tubos de ensayo
 - Microscopio de barrido
 - Tijeras
 - Balanza digital
 - Horno industrial
 - *Stirring* tipo barreno
 - Cronometro
 - Centrifuga
 - Agitador eléctrico

Figura 17. **Materiales por usar**



Fuente: materiales, Laboratorio Nacional de Nanotecnología, Lanotec.

Figura 18. **Equipo de laboratorio I**



Fuente: equipo de laboratorio, Laboratorio Nacional de Nanotecnología, Lanotec.

Figura 19. **Equipo de laboratorio II**



Fuente: equipo de laboratorio, Laboratorio Nacional de Nanotecnología, Lanotec.

3.2.2. Metodología

Para la elaboración de probetas de resina epóxica se procedió de la siguiente forma:

- Conocer normas y reglas de seguridad de laboratorio.
- Entrar al laboratorio con equipo de seguridad.
- Leer instrucciones y ficha técnica de resina epóxica.

- Colocar agente desmoldante y grasa en los moldes por usar.
- Precalear los moldes en horno industrial a 333,15 K (60 °C), durante 10 minutos.

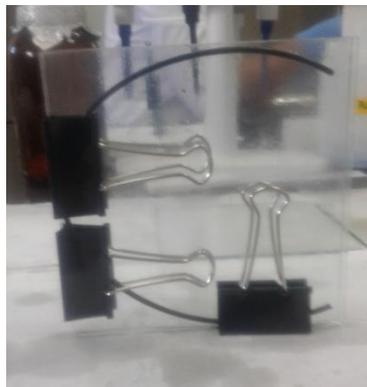
Figura 20. **Precalear moldes en horno**



Fuente: Laboratorio Nacional de Nanotecnología, Lanotec.

- Colocar los moldes de vidrio uno sobre otro con un filamento de separación y hacer presión con ganchos. Como se muestra en la figura 23.

Figura 21. **Preparación de molde**



Fuente: Laboratorio Nacional de Nanotecnología, Lanotec.

- Sellar los extremos con *maskin tape* para evitar posibles derrames.
- Proceder a realizar la mezcla con la proporción indicada por el proveedor de resina epóxica (3:1), en un recipiente descartable.

- Mezclar resina y catalizador, en proporciones indicadas por el proveedor, con *stirring* a 150 RPM.

Figura 22. **Proceso de mezcla de resina epóxica**



Fuente: Laboratorio Nacional de Nanotecnología, Lanotec.

- Colocar mezcla en molde, con cuidado para no derramarla.
- Colocar en horno industrial para proceso de curado a una temperatura de 303,15 K (30 °C), por una hora.
- Aumentar la temperatura a 333,15 K (60 °C), por 30 minutos.
- Posteriormente aumentar la temperatura a 373,15 K (100°C) por 2 horas.
- Para evitar la producción de un choque térmico, disminuir la temperatura a 333,15 K (60 °C) por 30 minutos.
- Disminuir la temperatura a 303,15 K (60 °C) por 15 minutos.
- Posteriormente sacar moldes de horno.
- Separar los moldes de vidrio de producto resultante.
- Proceder a preparación de probetas con medidas según las normas mencionadas a continuación.

3.2.2.1. Probeta

En el desarrollo de la experimentación se utilizó un reómetro marca Discovery DHR III. Por tanto, las probetas de resina epóxica y nanocelulosa fueron diseñadas según normas ASTM correspondientes a los ensayos por realizar en dicho instrumento.

3.2.2.1.1. Norma ASTM para ensayos de polímeros en reómetro

- Ensayo de tensión

El ensayo de tracción o tensión se realizó bajo la norma ASTM D638 y D3039. Estas normas especifican las condiciones que deben presentar las probetas al ser sometidas a ensayos de tracción, determinando las propiedades mecánicas en plásticos reforzados con matrices de compuestos y sin reforzar. Por lo que se consideró como norma apropiada para la realización del estudio de probetas con resina epóxica sin refuerzo y con refuerzo de nanocelulosa.

Se especifican las medidas y forma que deben llevar las probetas, aplicada a diferentes tipos de probetas, desde tubulares hasta placas y varillas; además de proponer condiciones como: método de preparación, temperatura, humedad relativa, calibración y precisión.

- Ensayo de compresión

Para la ejecución de ensayo de compresión se tomaron los parámetros establecidos por la norma ASTM D695, norma enfocada a compuestos de matriz polimérica reforzados y sin reforzar, brindando especificaciones de materiales, investigación y desarrollo, garantía de calidad y diseño. La norma establece que la carga aplicada se transmite en el eje axial, dimensiones de probetas, procedimientos, cálculos e interpretación de resultados.

- Ensayo de flexión

El ensayo a flexión se realizó conforme a la norma ASTM D790, debido a que esta norma describe con detalle el procedimiento específico por seguir, midiendo la resistencia de flexión y el módulo de flexión, tanto de los materiales plásticos reforzados como de los no reforzados, especificación de medidas de probeta e interpretación de resultados.

- Ensayo de torsión

Se utiliza la norma ASTM D648 para realizar el ensayo de torsión, en la cual especifica las condiciones de experimentación, las medidas específicas de las probetas por usar, cálculos e interpretación de resultados.

Cada norma ASTM consultada para la ejecución de la experimentación de materiales para álabes de aerogeneradores mencionada con anterioridad, registra la versión completa distribuida por *American Society of Testing Materials* (ASTM) en la sección de anexos del presente trabajo de graduación.

3.2.3. Proceso de experimentación

El proceso de experimentación fue realizado según normas y aparatos específicos por medio de ensayos destructivos.

3.2.3.1. Ensayo de dureza

El ensayo de dureza consistió en realizar el análisis de dureza de las probetas con la ayuda de un durómetro portátil universal marca TH 1100 LEEB., realizando el análisis en cubos de 30 mm x 30 mm.

3.2.3.2. Ensayo de tracción

También conocido como ensayo de tensión, realizado en un reómetro marca Discovery DHR III, con probetas con las siguientes dimensiones: 70 mm de largo, 5 mm de ancho y 2 mm de espesor.

3.2.3.3. Ensayo de compresión

Ensayo realizado en un reómetro marca Discovery DHR III, con probetas de las siguientes dimensiones: 30 mm de largo, 30 mm de ancho y 30 mm de espesor.

3.2.3.4. Ensayo de flexión

Este ensayo fue realizado con probetas con las siguientes dimensiones: 70 mm de largo, 10 mm de ancho y 5 mm de espesor. Se realizó en un reómetro como en los anteriores.

3.2.3.5. Ensayo de torsión

Este ensayo fue realizado con probetas con las siguientes dimensiones: 60 mm de largo, 10 mm de ancho y 5 mm de espesor. El ensayo fue realizado en un reómetro, así como en los ensayos anteriores.

Figura 23. **Probetas terminadas**



Fuente: Laboratorio Nacional de Nanotecnología, Lanotec.

3.3. Extracción de microcelulosa y nanocelulosa

El proceso de obtención de microcelulosa y nanocelulosa se detalla a continuación.

3.3.1. Materiales

- Biomasa (cascara de piña) 1 kg = 1 000g
- Reactivos
 - Hidróxido de sodio (NaOH)
 - Hipoclorito de sodio (NaClO)
 - Ácido clorhídrico (HCl)
 - Ácido sulfúrico (H₂SO₄)

- Cloro (Cl)
- Agua tipo 3 (H₂O tipo 3)
- Tela de extracción

3.3.2. Instrumentación y equipo de laboratorio

- *Beakers* de 50 ml
- Balanza digital
- *Beakers* de 5 000 ml
- *Beakers* de 3 000 ml
- Plantilla agitadora
- Centrifuga
- Recipiente de filtración
- Pizeta
- Pipeta
- Campana de extracción
- Congelador industrial
- Agitador eléctrico
- Probeta de 5 000 ml
- Probeta de 250 ml
- Probeta de 50 ml
- Escalera portátil
- Espátula de metal
- Agitador de cristal

Figura 24. **Equipo de laboratorio**



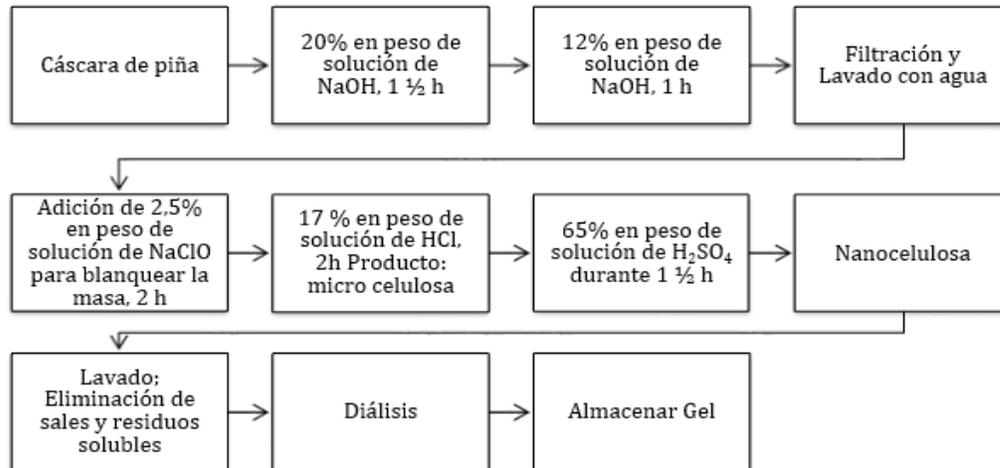
Fuente: Laboratorio Nacional de Nanotecnología, Lanotec.

3.3.3. **Metodología**

La metodología utilizada para la extracción de nanocelulosa, a partir de un desecho orgánico, se basa en el procedimiento descrito por Camacho *et al*⁷ en el artículo *Síntesis y caracterización de celulosa nanocristalina derivada de residuos de cascara de piña*, ilustrado en el siguiente diagrama.

⁷ CAMACHO, M.; Regina; CORRALES UREÑA, Y. et al. *Synthesis and Characterization of Nanocrystalline Cellulose Derived from Pineapple Peel Residues*, p. 1–14.

Figura 25. Diagrama de metodología general



Fuente: CAMACHO, M.; Regina; CORRALES UREÑA, Y. et al. *Synthesis and Characterization of Nanocrystalline Cellulose Derived from Pineapple Peel Residues*, p. 6.

Proceso de extracción de microcelulosa

- Tarar un *beacker* de 5 000 ml, posteriormente pesar en balanza electrónica 1 kg (1 000 g) de biomasa (cáscara de piña).

Figura 26. Biomasa (cáscara de piña)



Fuente: Laboratorio Nacional de Nanotecnología, Lanotec.

- Cálculo de agua (H₂O) tipo 3 por utilizar:
Tomando en consideración la siguiente relación química:

(Ecuación 1)

$$1\ 000\text{g} : 3\ 000\ \text{ml}$$

$$1\ 000\text{g} : X$$

(Ecuación 2)

$$X = \frac{1\ 000\text{g} * 3\ 000\text{ml}}{1\ 000\text{g}}$$

$$X = 3\ 000\text{ml de H}_2\text{O Tipo 3}$$

- Con una probeta de 5 000 ml medir el H₂O tipo 3 por usar.
- Cálculo de hidróxido de sodio (NaOH) al 20 % (masa/volumen) para 1 kg (1 000 g) de biomasa.

(Ecuación 3)

$$20\ \% = \frac{x\text{NaOH} * 100\%}{3\ 000\text{ml de H}_2\text{O tipo 3}}$$

$$x\text{NaOH} = 600\ \text{g de NaOH de soluto por usar}$$

- Tarar un *beacker* de 500 ml y pesar en balanza electrónica el NaOH a usar.
- Mezclar el agua (H₂O) tipo 3 e hidróxido de sodio (NaOH) calculado, colocar en plantilla de agitación y colocar en campana de extracción a una velocidad promedio de 360 RPM. Agregar el soluto (NaOH) poco a poco, debido a que se produce una reacción exotérmica.

Figura 27. **Mezcla de H₂O tipo 3 y NaOH**



Fuente: Laboratorio Nacional de Nanotecnología, Lanotec.

- Sacar de plantilla de agitación cuando esté completamente mezclado.
- Mezclar la solución anterior con biomasa en un *beacker* de 5 000 ml.
- Colocar en campana de extracción, plantilla de agitación a velocidad constante de 200 RPM, con temperatura de 353,15 K (80°C) durante 90 minutos.
- Reducir a temperatura ambiente y dejar enfriar con una velocidad constante de 220 RPM.

Figura 28. **Biomasa y solución de NaOH**



Fuente: Laboratorio Nacional de Nanotecnología, Lanotec.

- Colocar en un *beacker* de 5 000 ml plástico, recipiente de filtración y tela para extracción.
- Eliminar exceso de humedad de mezcla de biomasa con solución de hidróxido de sodio (NaOH).
- Filtrar con ayuda de tela de extracción hasta eliminar exceso de humedad.
- Tarar un *beacker* y pesar la biomasa restante obtenida en el paso anterior.

Figura 29. **Biomasa en proceso de filtración**



Fuente: Laboratorio Nacional de Nanotecnología, Lanotec.

- Realizar cálculo de H₂O tipo 3 para NaOH al 12% (masa/volumen) con peso de biomasa obtenido.

(Ecuación 4)

$$\begin{aligned} 1000 \text{ g} &: 3\,000 \text{ ml} \\ 366 \text{ g} &: X \end{aligned}$$

(Ecuación 5)

$$X = \frac{366 \text{ g} * 3\,000 \text{ ml}}{1\,000 \text{ g}}$$

$$X = 1\,098 \text{ ml de H}_2\text{O Tipo 3}$$

- Cálculo de NaOH al 12 % (masa/volumen) de concentración.

(Ecuación 6)

$$12 \% = \frac{xNaOH * 100 \%}{1\ 098\ ml\ de\ H_2O\ tipo\ 3}$$

(Ecuación 7)

$$xNaOH = 131,76\ g\ de\ NaOH\ de\ soluto\ por\ usar$$

$$xNaOH = 132\ G\ de\ NaOH\ por\ usar$$

- Mezclar el H₂O tipo 3 y NaOH calculado, colocar en plantilla de agitación y colocar en campana de extracción a una velocidad promedio de 280 RPM.

Figura 30. **Solución de NaOH**



Fuente: Laboratorio Nacional de Nanotecnología, Lanotec.

Nota: agregar el soluto (NaOH) poco a poco, debido a que se genera una reacción exotérmica.

- Colocar *beacker* de 5 000 ml para realizar mezcla de biomasa obtenida y solución, a 240 RPM de velocidad constante, temperatura de 353,15 K (80°C) durante 60 minutos.
- Después de transcurrido el tiempo de agitación, esperar a que la mezcla se enfríe durante 15 minutos.
- Realizar el proceso de lavado con 5 litros (50 000 ml) de H₂O tipo 3.
- Filtrar con ayuda de tela de extracción hasta eliminar exceso de humedad.
- Tarar un *beacker* y pesar la biomasa restante.
- Cálculo de H₂O tipo 3 requerida.

(Ecuación 8)

$$1000 \text{ g} : 3000 \text{ ml}$$

$$478 \text{ g} : X$$

(Ecuación 9)

$$X = \frac{478 \text{ g} * 3000 \text{ ml}}{1000 \text{ g}}$$

$$X = 1434 \text{ ml de H}_2\text{O Tipo 3}$$

- Cálculo de hipoclorito de sodio (NaClO) al 3,5 % (volumen/volumen) para 1 000 ml.

(Ecuación 10)

$$x\text{NaClO} * 12 \% = 1000 \text{ ml} * 3,5 \%$$

$$x\text{NaClO} = 291,66 \text{ ml de NaClO de soluto por usar}$$

$$x\text{NaClO} = 292 \text{ ml de NaClO de soluto por usar}$$

Debido a que el soluto es un liquido se realiza la siguiente operacion

$$H_2O \text{ tipo 3 por usar} = 1\ 000 \text{ ml} - 292 \text{ ml}$$

$$H_2O \text{ tipo 3} = 708 \text{ ml}$$

- Mezclar el H₂O tipo 3 y NaClO calculado, colocar en plantilla de agitación y colocar en campana de extracción a una velocidad promedio de 360 RPM.
- Colocar en campana de extracción, plantilla de agitación con solución anterior adicionando la biomasa restante. Durante 120 minutos, a 334,15 K (61° C), velocidad constante de 370 RPM.

Figura 31. **Biomasa y solución de NaClO**



Fuente: Laboratorio Nacional de Nanotecnología, Lanotec.

- Realizar el proceso de lavado con 5 litros (50 000 ml) de H₂O tipo 3 con la ayuda de un *beacker* plástico.
- Filtrar con ayuda de tela de extracción hasta eliminar exceso de humedad.
- Tarar un *beacker* 1 000 ml y pesar la biomasa restante.

- Cálculo de H₂O tipo 3 requerida.

(Ecuación 11)

$$\begin{array}{l} 1000 \text{ g} : 3000 \text{ ml} \\ 275,2 \text{ g} : X \end{array}$$

(Ecuación 12)

$$X = \frac{275,2 \text{ g} * 3000 \text{ ml}}{1000 \text{ g}}$$

$$X = 825,6 \text{ ml de H}_2\text{O Tipo 3}$$

- Cálculo de ácido clorhídrico (HCl) al 3,5 % (volumen/ volumen).

(Ecuación 13)

$$37 \% * V1 = 17 \% (826 \text{ ml})$$

$$V1 = 379 \text{ ml HCL}$$

$$V2 = 447 \text{ ml H}_2\text{O tipo 3}$$

- Mezclar el H₂O tipo 3 y HCl calculado, colocar en plantilla de agitación y colocar en campana de extracción a una velocidad promedio de 360 RPM.
- Colocar en campana de extracción, plantilla de agitación con solución anterior adicionando la biomasa restante. Durante 120 minutos, a 325,15 K (52° C), velocidad constante de 380 RPM.

Figura 32. **Biomasa y solución de HCl**



Fuente: Laboratorio Nacional de Nanotecnología, Lanotec.

- Realizar el proceso de lavado con 5 litros (50 000 ml) de H₂O tipo 3.
- Filtrar con ayuda de tela de extracción hasta eliminar exceso de humedad.
- Tarar un *beacker* 1 000 ml y pesar la biomasa restante.

Figura 33. **Microcelulosa resultante**



Fuente: Laboratorio Nacional de Nanotecnología, Lanotec.

Con este paso se finaliza el proceso de obtención de microcelulosa. Posteriormente se realizan más procesos químicos para obtener la nanocelulosa a continuación descritos.

Proceso de obtención de nanocelulosa

La obtención de nanocelulosa se lleva a cabo por medio de hidrólisis ácida usando ácido sulfúrico (H_2SO_4); es un proceso en el cual se obtiene una fracción líquida, rica en azúcares fermentables y una fracción sólida compuesta principalmente de celulosa y lignina.

- Cálculo de H_2O tipo 3 requerida.

(Ecuación 14)

$$1\ 000\ g : 3\ 000\ ml$$

$$170,5\ g : x$$

$$x = \frac{170,5\ g * 3\ 000\ ml}{1\ 000\ g}$$

$$x = 511,5\ ml\ de\ H_2O\ tipo\ 3$$

- Cálculo de H_2SO_4 por usar.

(Ecuación 15)

$$98\ \% * V1 = 65\ \% (511,5\ ml\ H_2O\ tipo\ 3)$$

$$V1 = 340\ ml\ H_4SO_4$$

- Mezclar el H_2O tipo 3 y H_2SO_4 calculado, colocar en plantilla de agitación y colocar en campana de extracción a una velocidad promedio de 360 RPM.

NOTA: Adicionar el H_2SO_4 poco a poco debido a que produce una reacción exotérmica.

- Dejar enfriar la solución.
- Colocar en campana de extracción, plantilla de agitación con solución anterior adicionando la biomasa restante. Durante 90 minutos, a 328,15 K (55° C), velocidad constante de 350 RPM.
- Reducir la temperatura a temperatura ambiente. Agregar el doble del volumen empleado en la solución anterior y mezclar a 260 RPM por quince minutos.
- Dejar enfriar durante 12 horas.
- Colocar solución en recipientes para centrifugar a 297,15 K (24 °C), 4 500 RPM durante 30 minutos.

Figura 34. **Centrifuga usada**



Fuente: Laboratorio Nacional de Nanotecnología, Lanotec.

- Eliminar el líquido residual y colocar los sólidos en un recipiente.
- Con la ayuda de una jeringa de 5 ml agregar los líquidos a membranas previamente hidratadas con H₂O tipo 3.
- Colocar prensas en cada extremo de las membranas para evitar que la microcelulosa tratada se derrame.

- Las membranas llenas se lavan y se hidratan en un *beacker* de 5 000 ml con H₂O tipo 3.
- Se realiza el proceso de diálisis de la siguiente forma: Se coloca en una plantilla de agitación en un *beacker* con membranas hidratadas con velocidad constante de 280 RPM durante 24 horas. Cambiar el H₂O tipo 3 cada 120 minutos hasta obtener un ph neutro (ph = 7).

Figura 35. **Diálisis**



Fuente: Laboratorio Nacional de Nanotecnología, Lanotec.

- Colocar gel obtenido de las membranas en recipientes para centrifugar a 297,15 K (24 °C), 4 500 RPM durante 45 minutos para eliminar la humedad.
- Almacenar en recipientes identificados a 278,15 K (5 °C).

Figura 36. **Nanocelulosa**



Fuente: Laboratorio Nacional de Nanotecnología, Lanotec.

3.4. Experimentación: propiedades mecánicas de álabes con resina epóxica y nanocelulosa

A continuación se detalla el proceso de mezcla de la resina epóxica y la nanocelulosa.

3.4.1. Materiales

- Resina epóxica Hawk epoxy R1 (ficha técnica en sección de anexos).
- Catalizador de resina epóxica Hawk epoxy C2 (ficha técnica en sección de anexos).
- Alcohol de 95 % (volumen/volumen).
- Algodón.
- Papel mayordomo.
- Moldes para probetas.
 - *Beacker* de 100 ml.

- Espátula
 - Moldes de vidrio
 - Filamento de separación
 - Ganchos de presión
- Agente desmoldante a base acuosa
- Grasa desmoldante
- Parafina
- *Maskin tape*
- Papel filtro
- Espátula
- Agitador de cristal
- Elementos de limpieza de equipo
- Equipo de seguridad
 - Guantes
 - Lentes de seguridad
 - Bata de laboratorio
 - Botas industriales
- Nanocelulosa
- Equipo
 - *Beacker*
 - Probeta
 - Kitasato
 - Tapón de quitasato
 - Embudo Bucher
 - Tubos de ensayo
 - Microscopio de barrido
 - Balanza digital
 - Horno industrial
 - *Stirring* tipo barreno

Figura 38. **Equipo de laboratorio**



Fuente: Laboratorio Nacional de Nanotecnología, Lanotec.

3.4.2. **Tratamientos previos de nanocelulosa**

Para realizar el proceso de mezcla entre la nanocelulosa y la resina epóxica, se debe realizar un tratamiento previo a la nanocelulosa, debido a que la nanocelulosa presenta una estructura hidrosoluble y la resina epóxica es un compuesto liposoluble.

Para ello se realizó el siguiente procedimiento:

- Preparación de nanocelulosa
 - Tarar *beacker* de 100 ml y pesar nanocelulosa.
 - Colocar nanocelulosa en papel filtro.
 - Colocar a kitasato su respectivo tapón (tapón kitasato).

- Con la ayuda de una espátula amoldar papel filtro con nanocelulosa a kitasato.

Figura 39. Nanocelulosa en kitasato



Fuente: Laboratorio Nacional de Nanotecnología, Lanotec.

- Realizar montaje de equipo de filtración al vacío.
- Iniciar filtración al vacío. Para realizar dicha filtración se utilizó una bomba de vacío la cual generaba un vacío de hasta 90 % de la presión atmosférica de 3 CFM.

Figura 40. Equipo de filtración al vacío



Fuente: Laboratorio Nacional de Nanotecnología, Lanotec.

- Posteriormente quitar papel filtro de kitasato y colocarlo en una caja de Petri.
- Colocar caja de Petri en horno industrial a una temperatura de 373,15 K (100 °C) durante 180 minutos.

Figura 41. **Nanocelulosa**



Fuente: Laboratorio Nacional de Nanotecnología, Lanotec.

- Pulverizar la nanocelulosa.
- Almacenar nanocelulosa en desecador.

Figura 42. **Nanocelulosa almacenada**



Fuente: Laboratorio Nacional de Nanotecnología, Lanotec.

3.4.3. Metodología

Para la elaboración de probetas de resina epóxica se procedió de la siguiente forma:

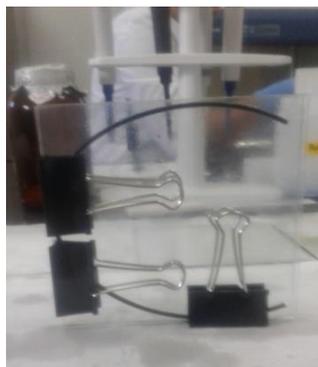
- Leer instrucciones y ficha técnica de resina epóxica.
- Colocar agente desmoldante y grasa en los moldes por usar.
- Precalentar los moldes en horno industrial a 333,15 K (60°C) durante 10 minutos.
- Colocar los moldes de vidrio uno sobre otro con un filamento de separación y hacer presión con ganchos.

Figura 43. **Preparación de molde I**



Fuente: Laboratorio Nacional de Nanotecnología, Lanotec.

Figura 44. **Preparación de molde II**



Fuente: Laboratorio Nacional de Nanotecnología, Lanotec.

- Sellar los extremos con *maskin tape* para evitar posibles derrames.
- Proceder a colocar la resina en un recipiente plástico y pesar.
- Posteriormente se realiza el cálculo de proporción de nanocelulosa por usar, según el análisis, con *stirring* eléctrico a 220 RPM durante 8 minutos.
- Mezclar resina con nanocelulosa y catalizador, en proporciones indicadas por el proveedor, con *stirring* a 150 RPM.
- Colocar mezcla en molde cuidando no derramarla.

Figura 45. **Proceso de mezcla de resina epóxica**



Fuente: Laboratorio Nacional de Nanotecnología, Lanotec.

Figura 46. **Preparación de moldes**



Fuente: Laboratorio Nacional de Nanotecnología, Lanotec.

- Colocar en horno industrial para proceso de curado a una temperatura de 303,15 K (30 °C) por 1 hora.
- Aumentar la temperatura a 333,15 (60 °C) por 30 minutos.
- Posteriormente aumentar la temperatura a 373,15 K (100 °C) por 2 horas.
- Para evitar la producción de un choque térmico, disminuir la temperatura a 333,15 K (60 °C) por 30 minutos.
- Disminuir la temperatura a 303,15 K (30 °C) por 15 minutos.

Figura 47. **Proceso de curado**



Fuente: Laboratorio Nacional de Nanotecnología, Lanotec.

- Posteriormente sacar moldes de horno.
- Separar los moldes de vidrio de producto resultante.
- Proceder a preparación de probetas.

3.4.3.1. **Proceso de creación de probetas**

El proceso de creación de probetas se basó en las normas antes especificadas en la sección 3.2.2.1.1. “Norma ASTM para ensayos de polímeros en reómetros”.

Las probetas fueron elaboradas con la ayuda de:

- Pulidora de mano
- Guantes protectores
- Lentes de protección
- Mascarilla de protección
- Lija No. 80
- Lija No. 120

Tabla VI. **Medidas de probetas**

Ensayo	Largo (mm)	Ancho (mm)	Espesor (mm)
Dureza	30	30	30
Tensión	70	05	02
Compresión	30	30	30
Flexión	70	10	05
Torsión	60	10	05

Fuente: elaboración propia.

Figura 48. **Probetas terminadas**



Fuente: Laboratorio Nacional de Nanotecnología, Lanotec.

3.4.4. Proceso de experimentación

Para el proceso de experimentación se ejecutaron diversas pruebas con diferentes porcentajes adicionados de nanocelulosa.

Tabla VII. **Probetas experimentales**

Porcentaje de nanocelulosa	Ensayo por ejecutar	No. de probetas por ensayo
0 %	Dureza, tensión, compresión, flexión, torsión.	3
0,25 %	Dureza, tensión, compresión, flexión, torsión.	3
0,5 %	Dureza, tensión, compresión, flexión, torsión.	3
0,7 %	Dureza, tensión, compresión, flexión, torsión.	3
1 %	Dureza, tensión, compresión, flexión, torsión.	3
2.5 %	Dureza, tensión, compresión, flexión, torsión.	3
5 %	Dureza, tensión, compresión, flexión, torsión.	3
10 %	Dureza, tensión, compresión, flexión, torsión.	3

Fuente: elaboración propia.

3.4.4.1. Ensayo de dureza

Para la ejecución del ensayo de dureza se utilizó un durómetro portátil universal marca TH 1100 LEEB.

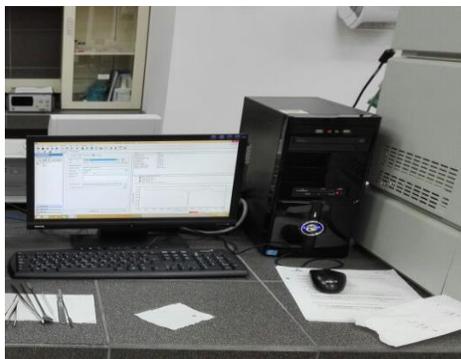
El procedimiento de medición consistió en colocar las probetas en una superficie plana y proceder a realizar la medición con el durómetro en las escalas de dureza de Brinell, Rockwell y Vickers.

3.4.4.2. Ensayo de tensión

El ensayo de tensión se ejecutó en un reómetro marca Discovery DHR III. El siguiente procedimiento fue utilizado para la experimentación de todas las probetas mencionadas en este trabajo de graduación, la metodología fue la siguiente:

- Ejecutar programa de reómetro en computadora y seguir instrucciones de instalación.

Figura 49. **Ejecución de programa en computadora**



Fuente: Laboratorio Nacional de Nanotecnología, Lanotec.

- Inicialmente se enciende el compresor a una presión de 150 PSI, abrir la llave de aire (colocar la palanca en posición horizontal para que la llave se encuentre abierta y en posición vertical para cerrarla).

Figura 50. **Encendiendo compresor**



Fuente: Laboratorio Nacional de Nanotecnología, Lanotec.

- Verificar que la presión en la segunda válvula esté en un rango de 30 PSI a 35 PSI.
- Abrir reómetro y remover tapa de seguridad. Posteriormente encender equipo.

Figura 51. **Reómetro**



Fuente: Laboratorio Nacional de Nanotecnología, Lanotec.

- Encender computadora para ejecución de programa. Ejecutar icono que tiene por nombre “5333-0221@NOT_SET”.
- En el programa colocar el tipo de ensayo por realizar y las condiciones.
- Instalar accesorios para ejecución de ensayo de tensión.

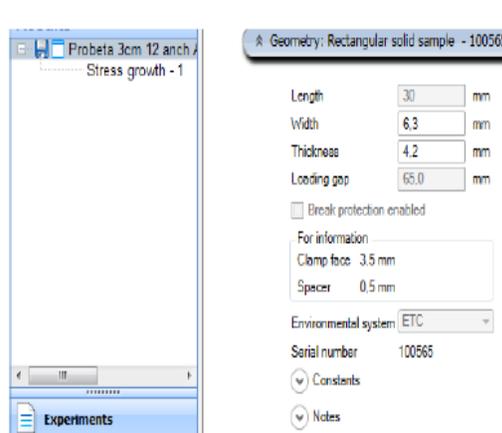
Figura 52. **Instalación de accesorios para ensayo de tensión**



Fuente: Laboratorio Nacional de Nanotecnología, Lanotec.

- Ingresar datos de probetas y condiciones de ensayo.

Figura 53. **Datos de probetas y condiciones de ensayo de tensión**



Fuente: Laboratorio Nacional de Nanotecnología, Lanotec.

- Calibrar el equipo de reómetro.
- Colocar probetas en mordazas de sujeción.

Figura 54. **Ejecución de ensayo de tensión**



Fuente: Laboratorio Nacional de Nanotecnología, Lanotec.

- Iniciar ensayo.
- Después de terminado el ensayo, proceder a cambiar de probeta.
- Ejecutar ensayo nuevamente, con demás probetas.

3.4.4.3. Ensayo de compresión

Después de realizados los ensayos de tensión, se realizan los ensayos de compresión de las probetas siguiendo estos pasos.

- Ejecutar icono que tiene por nombre “5333-0221@NOT_SET”.
- En el programa colocar el tipo de ensayo por realizar y las condiciones.
- Instalar accesorios para ejecución de ensayo de compresión, para este caso colocar platos paralelos.

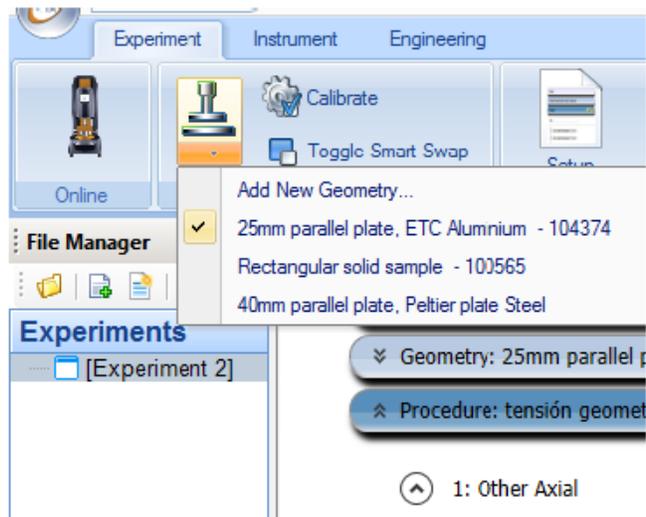
Figura 55. **Accesorios de ensayo de compresión**



Fuente: Laboratorio Nacional de Nanotecnología, Lanotec.

- Ingresar datos de probetas y condiciones de ensayo.

Figura 56. **Datos de probetas y condiciones de ensayo de compresión**



Fuente: Laboratorio Nacional de Nanotecnología, Lanotec.

- Colocar probetas en mordazas de sujeción.
- Ejecutar programa para iniciar con ensayo.
- Iniciar ensayo.
- Después de terminado el ensayo, proceder a cambiar de probeta.
- Ejecutar ensayo nuevamente con demás probetas.

3.4.4.4. Ensayo de flexión

- Realizar los primeros cinco pasos de ensayo de tensión mencionados con anterioridad.
- Ejecutar icono que tiene por nombre “5333-0221@NOT_SET”.
- En el programa colocar el tipo de ensayo por realizar y las condiciones.
- Instalar accesorios para ejecución de ensayo de flexión.

Figura 57. **Accesorios de ensayo de flexión**



Fuente: Laboratorio Nacional de Nanotecnología, Lanotec.

- Ingresar datos de probetas y condiciones de ensayo.
- Colocar probetas en mordazas de sujeción.
- Iniciar ensayo.

- Después de terminado el ensayo, proceder a cambiar de probeta.
- Ejecutar ensayo nuevamente con demás probetas.

3.4.4.5. Ensayo de torsión

- Ejecutar icono que tiene por nombre “5333-0221@NOT_SET”.
- En el programa colocar el tipo de ensayo por realizar y las condiciones.
- Instalar accesorios para ejecución de ensayo de torsión.
- Los accesorios para ejecución de ensayo de torsión son los accesorios rectangulares.
- Ingresar datos de probetas y condiciones de ensayo.
- Colocar probetas en mordazas de sujeción.

Figura 58. Accesorios de ensayo de torsión



Fuente: Laboratorio Nacional de Nanotecnología, Lanotec.

Figura 59. **Ejecución de ensayo de torsión**



Fuente: Laboratorio Nacional de Nanotecnología, Lanotec.

- Ejecutar programa para iniciar con ensayo.
- Iniciar ensayo.
- Después de terminado el ensayo, proceder a cambiar de probeta.
- Ejecutar ensayo nuevamente con demás probetas.

3.5. Datos recolectados

Los datos utilizados en el estudio están detallados a continuación.

3.5.1. Muestra de cálculo

Para la ejecución de ensayos del presente estudio se desarrollaron las siguientes probetas de resina epóxica y sus respectivos porcentajes de nanocelulosa.

- Resina epóxica y 0 % de nanocelulosa

Tabla VIII. **Probetas de resina epóxica**

Ensayo	Probeta	Largo (cm)	Ancho (cm)	Espesor (cm)
Dureza	1	3,010	3,012	3,012
	2	3,000	3,061	3,001
	3	3,007	3,006	3,007
Tensión / tracción	1	7,010	0,500	0,200
	2	7,000	0,500	0,200
	3	6,980	0,500	0,200
Compresión	1	3,000	3,002	3,001
	2	3,002	3,015	3,020
	3	3,000	3,001	3,000
Flexión	1	7,001	1,000	0,500
	2	7,020	1,002	0,502
	3	7,015	1,010	0,500
Torsión	1	6,000	1,001	0,501
	2	6,002	1,000	0,501
	3	6,010	1,002	0,500

Fuente: elaboración propia.

- Resina epóxica y 0,25 % de nanocelulosa

Tabla IX. **Probetas de resina epóxica y 0,25 % de nanocelulosa**

Ensayo	Probeta	Largo (cm)	Ancho (cm)	Espesor (cm)
Dureza	1	3,000	3,000	3,000
	2	3,000	3,001	3,000
	3	3,005	3,000	3,001
Tensión / tracción	1	7,000	0,500	0,200
	2	7,000	0,500	0,200
	3	7,001	0,500	0,200
Compresión	1	3,000	3,002	3,010
	2	3,001	3,010	3,015
	3	3,001	3,010	3,000
Flexión	1	7,000	1,000	0,500
	2	7,001	1,000	0,503
	3	7,010	1,000	0,501
Torsión	1	6,000	1,001	0,500
	2	6,001	1,000	0,500
	3	6,001	1,001	0,500

Fuente: elaboración propia.

- Resina epóxica y 0,50 % de nanocelulosa

Tabla X. **Probetas de resina epóxica y 0,50 % de nanocelulosa**

Ensayo	Probeta	Largo (cm)	Ancho (cm)	Espesor (cm)
Dureza	1	3,003	3,000	3,001
	2	3,002	3,001	3,002
	3	3,003	3,001	3,001
Tensión / tracción	1	7,020	0,502	0,200
	2	7,010	0,504	0,200
	3	7,001	0,501	0,200
Compresión	1	3,005	3,000	3,007
	2	3,010	3,005	3,000
	3	3,010	3,005	3,000
Flexión	1	7,000	1,000	0,500
	2	7,002	1,001	0,501
	3	7,002	1,003	0,500
Torsión	1	6,001	1,005	0,501
	2	6,000	0,990	0,500
	3	5,995	1,010	0,503

Fuente: elaboración propia.

- Resina epóxica y 0,70 % de nanocelulosa

Tabla XI. **Probetas de resina epóxica y 0,70 % de nanocelulosa**

Ensayo	Probeta	Largo (cm)	Ancho (cm)	Espesor (cm)
Dureza	1	3,002	3,001	3,001
	2	3,002	3,001	3,001
	3	3,002	3,001	3,001
Tensión / Tracción	1	7,010	0,501	0,198
	2	7,010	0,504	0,201
	3	7,001	0,504	0,201
Compresión	1	3,005	3,001	3,003
	2	3,005	3,003	3,002
	3	3,010	3,005	3,003
Flexión	1	7,002	1,002	0,501
	2	7,002	1,001	0,501
	3	7,002	1,003	0,500
Torsión	1	6,001	1,005	0,501
	2	6,001	1,001	0,502
	3	6,005	1,010	0,503

Fuente: elaboración propia.

- Resina epóxica y 1,0 % de nanocelulosa

Tabla XII. **Probetas de resina epóxica y 1,0 % de nanocelulosa**

Ensayo	Probeta	Largo (cm)	Ancho (cm)	Espesor (cm)
Dureza	1	3,001	3,000	3,000
	2	3,000	3,000	3,000
	3	3,000	3,001	3,001
Tensión / tracción	1	7,001	0,501	0,201
	2	7,001	0,500	0,198
	3	7,001	0,500	0,200
Compresión	1	3,000	3,000	3,000
	2	3,003	3,002	3,000
	3	3,102	3,001	3,000
Flexión	1	7,000	1,000	0,500
	2	7,001	1,000	0,503
	3	7,001	1,001	0,500
Torsión	1	6,000	1,002	0,500
	2	6,000	1,001	0,500
	3	6,001	1,002	0,501

Fuente: elaboración propia.

- Resina epóxica y 2,50 % de nanocelulosa

Tabla XIII. **Probetas de resina epóxica y 2,50 % de nanocelulosa**

Ensayo	Probeta	Largo (cm)	Ancho (cm)	Espesor (cm)
Dureza	1	3,001	3,000	3,001
	2	3,001	3,000	3,001
	3	3,001	3,000	3,001
Tensión / tracción	1	7,000	0,501	0,200
	2	7,000	0,501	0,201
	3	7,000	0,501	0,201
Compresión	1	3,002	3,100	3,000
	2	3,002	3,001	3,000
	3	3,001	3,001	3,001
Flexión	1	7,000	1,000	0,500
	2	7,001	1,002	0,500
	3	7,000	1,000	0,501
Torsión	1	6,000	1,002	0,500
	2	6,001	1,001	0,501
	3	6,000	1,000	0,500

Fuente: elaboración propia.

- Resina epóxica y 5,0 % de nanocelulosa

Tabla XIV. **Probetas de resina epóxica y 5,0 % de nanocelulosa**

Ensayo	Probeta	Largo (cm)	Ancho (cm)	Espesor (cm)
Dureza	1	3,000	3,001	3,001
	2	3,000	3,000	3,002
	3	3,001	3,000	3,001
Tensión / tracción	1	7,000	0,501	0,200
	2	7,001	0,500	0,200
	3	7,000	0,501	0,200
Compresión	1	3,003	3,001	3,007
	2	3,000	3,000	3,034
	3	3,001	3,003	3,002
Flexión	1	7,004	1,001	0,500
	2	7,005	1,000	0,501
	3	7,001	1,000	0,500
Torsión	1	6,000	1,001	0,501
	2	6,001	1,001	0,500
	3	6,000	1,001	0,503

Fuente: elaboración propia.

- Resina epóxica y 10,0 % de nanocelulosa

Tabla XV. **Probetas de resina epóxica y 10,0 % de nanocelulosa**

Ensayo	Probeta	Largo (cm)	Ancho (cm)	Espesor (cm)
Dureza	1	3,001	3,000	3,001
	2	3,001	3,000	3,000
	3	3,001	3,000	3,000
Tensión / Tracción	1	7,000	0,500	0,201
	2	7,000	0,500	0,201
	3	7,001	0,500	0,201
Compresión	1	3,000	3,000	3,000
	2	3,000	3,001	3,000
	3	3,001	3,000	3,000
Flexión	1	7,000	1,000	0,501
	2	7,000	1,000	0,500
	3	7,000	1,000	0,500
Torsión	1	6,000	1,002	0,501
	2	6,000	1,001	0,500
	3	6,000	1,000	0,501

Fuente: elaboración propia.

Las normas usadas para la elaboración de las probetas presentaban medidas en milímetros, pero para experimentación se convierten estas medidas a centímetros.

4. RESULTADOS

4.1. Resultados

Los resultados de la experimentación fueron los siguientes.

4.1.1. Ensayo de dureza

Tabla XVI. Dureza de resina epóxica y 0 % de nanocelulosa

Probeta	Carga (Kg _f)	Dureza de Brinell (HB)	Dureza de Rockwell (Ha)	Dureza de Vickers (HV)
1	45	495,00	76,51	540,00
2	45	493,94	76,26	538,98
3	45	495,12	76,54	540,01

Fuente: elaboración propia.

Tabla XVII. Dureza de resina epóxica y 0,25 % de nanocelulosa

Probeta	Carga (Kg _f)	Dureza de Brinell (HB)	Dureza de Rockwell (Ha)	Dureza de Vickers (HV)
1	45	610,12	80,25	765,00
2	45	609,54	80,17	764,25
3	45	604,65	79,50	757,63

Fuente: elaboración propia.

Tabla XVIII. **Dureza de resina epóxica y 0,50 % de nanocelulosa**

Probeta	Carga (Kg_f)	Dureza de Brinell (HB)	Dureza de Rockwell (Ha)	Dureza de Vickers (HV)
1	45	574,45	79,12	717,34
2	45	572,65	78,87	715,07
3	45	574,35	79,10	717,16

Fuente: elaboración propia.

Tabla XIX. **Dureza de resina epóxica y 0,70 % de nanocelulosa**

Probeta	Carga (Kg_f)	Dureza de Brinell (HB)	Dureza de Rockwell (Ha)	Dureza de Vickers (HV)
1	45	555,00	79,00	675,00
2	45	554,54	78,93	674,44
3	45	548,76	78,10	667,41

Fuente: elaboración propia.

Tabla XX. **Dureza de resina epóxica y 1,0 % de nanocelulosa**

Probeta	Carga (Kg_f)	Dureza de Brinell (HB)	Dureza de Rockwell (Ha)	Dureza de Vickers (HV)
1	45	524,65	76,68	590,13
2	45	532,56	77,84	599,06
3	45	534,44	78,11	601,14

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXI. **Dureza de resina epóxica y 2,5 % de nanocelulosa**

Probeta	Carga (Kgf)	Dureza de Brinell (HB)	Dureza de Rockwell (Ha)	Dureza de Vickers (HV)
1	45	514,01	77,01	565,09
2	45	514,54	77,08	565,60
3	45	514,76	77,11	565,82

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXII. **Dureza de resina epóxica y 5,0 % de nanocelulosa**

Probeta	Carga (Kgf)	Dureza de Brinell (HB)	Dureza de Rockwell (Ha)	Dureza de Vickers (HV)
1	45	325,98	69,87	363,78
2	45	329,65	70,66	367,89
3	45	327,09	70,11	365,03

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXIII. **Dureza de resina epóxica y 10,0 % de nanocelulosa**

Probeta	Carga (Kgf)	Dureza de Brinell (HB)	Dureza de Rockwell (Ha)	Dureza de Vickers (HV)
1	45	174,03	--	174,53
2	45	175,87	--	176,37
3	45	174,08	--	174,57

Fuente: elaboración propia.

4.1.2. Ensayo de tensión/ tracción

Los resultados de ensayo de tracción/ flexión fueron los siguientes.

Tabla XXIV. **Ensayo de tensión/ tracción resina epóxica y 0 % de nanocelulosa**

Ensayo	Probeta	Carga (Kg _f)	Esfuerzo		
			Kg _f /cm ²	MPa	PSI
Tensión/ tracción	1	2 300	23 000,00	2 255,53	327 133,60
	2	2 400	24 000,00	2 353,60	341 356,80
	3	2 250	22 500,00	2 206,50	320 022,00

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXV. **Ensayo de tensión/ tracción resina epóxica y 0,25 % de nanocelulosa**

Ensayo	Probeta	Carga (Kg _f)	Esfuerzo		
			Kg _f /cm ²	MPa	PSI
Tensión/ tracción	1	5 400	54 000,00	5 295,59	768 052,80
	2	5 500	55 000,00	5 393,66	782 276,00
	3	5 300	53 000,00	5 197,52	753 829,60

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXVI. **Ensayo de tensión/ tracción resina epóxica y 0,50 % de nanocelulosa**

Ensayo	Probeta	Carga (Kg _f)	Esfuerzo		
			Kg _f /cm ²	MPa	PSI
Tensión/ tracción	1	3 400	33 864,54	3 320,98	481 662,15
	2	3 500	34 722,22	3 405,09	493 861,11
	3	3 450	34 431,14	3 376,54	489 720,96

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXVII. **Ensayo de tensión/ tracción resina epóxica y 0,70 % de nanocelulosa**

Ensayo	Probeta	Carga (Kg _f)	Esfuerzo		
			Kg _f /cm ²	MPa	PSI
Tensión/ tracción	1	2 800	28 226,38	2 768,06	401 469,38
	2	2 850	28 133,14	2 758,92	400 143,33
	3	2 900	28 626,71	2 807,32	407 163,39

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXVIII. **Ensayo de tensión/ tracción resina epóxica y 1,0 % de nanocelulosa**

Ensayo	Probeta	Carga (Kg _f)	Esfuerzo		
			Kg _f /cm ²	MPa	PSI
Tensión/ tracción	1	2 500	24 825,97	2 434,60	353 104,74
	2	2 700	27 272,73	2 674,54	387 905,45
	3	2 650	26 500,00	2 598,76	376 914,80

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXIX. **Ensayo de tensión/ tracción resina epóxica y 2,5 % de nanocelulosa**

Ensayo	Probeta	Carga (Kgf)	Esfuerzo		
			Kg/cm ²	MPa	PSI
Tensión/ tracción	1	1 800	17 964,07	1 761,67	255 506,59
	2	1 950	19 364,26	1 898,98	275 421,69
	3	2 100	20 853,81	2 045,06	296 607,98

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXX. **Ensayo de tensión/ tracción resina epóxica y 5,0 % de nanocelulosa**

Ensayo	Probeta	Carga (Kgf)	Esfuerzo		
			Kg/cm ²	MPa	PSI
Tensión/ tracción	1	1 500	14 970,06	1 468,06	212 922,16
	2	1 650	16 500,00	1 618,10	234 682,80
	3	1 700	16 966,07	1 663,80	241 311,78

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXXI. **Ensayo de tensión/ tracción resina epóxica y 10,0 % de nanocelulosa**

Ensayo	Probeta	Carga (Kgf)	Esfuerzo		
			Kg/cm ²	MPa	PSI
Tensión/ tracción	1	800	7 960,20	780,63	113 219,50
	2	750	7 462,69	731,84	106 143,28
	3	950	9 452,74	927,00	134 448,16

Fuente: elaboración propia.

4.1.3. Ensayo de compresión

Los resultados del ensayo se detallan a continuación.

Tabla XXXII. Ensayo de compresión resina epóxica y 0 % de nanocelulosa

Ensayo	Probeta	Carga (Kgf)	Esfuerzo		
			Kgf/cm ²	MPa	PSI
Tensión/ tracción	1	10 600	1 176,60	115,39	16 735,03
	2	10 550	1 158,66	113,63	16 479,94
	3	10 300	1 144,06	112,19	16 272,24

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXXIII. Ensayo de compresión resina epóxica y 0,25 % de nanocelulosa

Ensayo	Probeta	Carga (Kgf)	Esfuerzo		
			Kgf/cm ²	MPa	PSI
Tensión/ tracción	1	3 400	376,27	36,90	5 351,79
	2	3 200	352,61	34,58	5 015,26
	3	3 130	346,62	33,99	4 930,08

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXXIV. Ensayo de compresión resina epóxica y 0,50 % de nanocelulosa

Ensayo	Probeta	Carga (Kgf)	Esfuerzo		
			Kgf/cm ²	MPa	PSI
Tensión/ tracción	1	2 400	266,05	26,09	3 784,02
	2	2 600	288,41	28,28	4 102,09
	3	2 800	310,59	30,46	4 417,63

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXXV. **Ensayo de compresión resina epóxica y 0,70 % de nanocelulosa**

Ensayo	Probeta	Carga (Kg _f)	Esfuerzo		
			Kg _f /cm ²	MPa	PSI
Tensión/ tracción	1	2 000	221,93	21,76	3 156,50
	2	1 800	199,67	19,58	2 839,90
	3	1 600	177,30	17,39	2 521,84

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXXVI. **Ensayo de compresión resina epóxica y 1,0 % de nanocelulosa**

Ensayo	Probeta	Carga (Kg _f)	Esfuerzo		
			Kg _f /cm ²	MPa	PSI
Tensión/ tracción	1	1 200	133,33	13,08	1 896,43
	2	1 250	138,80	13,61	1 974,13
	3	1 225	136,07	13,34	1 935,29

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXXVII. **Ensayo de compresión resina epóxica y 2,5 % de nanocelulosa**

Ensayo	Probeta	Carga (Kg _f)	Esfuerzo		
			Kg _f /cm ²	MPa	PSI
Tensión/ tracción	1	800	86,02	8,44	1 223,50
	2	860	95,52	9,37	1 358,65
	3	920	102,15	10,02	1 452,96

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXXVIII. **Ensayo de compresión resina epóxica y 5,0 % de nanocelulosa**

Ensayo	Probeta	Carga (Kg _f)	Esfuerzo		
			Kg _f /cm ²	MPa	PSI
Tensión/ tracción	1	500	55,41	5,43	788,08
	2	520	57,13	5,60	812,58
	3	550	61,01	5,98	867,75

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXXIX. **Ensayo de compresión resina epóxica y 10,0 % de nanocelulosa**

Ensayo	Probeta	Carga (Kg _f)	Esfuerzo		
			Kg _f /cm ²	MPa	PSI
Tensión/ tracción	1	50	5,56	0,54	79,02
	2	75	8,33	0,82	118,49
	3	125	13,89	1,36	197,54

Fuente: elaboración propia.

4.1.4. Ensayo de flexión

Los resultados del ensayo de flexión realizado a probetas, se detallan a continuación.

Tabla XL. **Ensayo de flexión resina epóxica y 0,0 % de nanocelulosa**

Ensayo	Probeta	Luz	Carga (Kg _f)	Esfuerzo		
				Kg _f /cm ²	MPa	PSI
Tensión/ tracción	1	6,511	435	16 993,71	1 666,51	241 704,94
	2	6,510	430	16 628,98	1 630,75	236 517,27
	3	6,510	455	17 596,34	1 725,61	250 276,22

Fuente: elaboración propia.

Tabla XLI. **Ensayo de flexión resina epóxica y 0,25 % de nanocelulosa**

Ensayo	Probeta	Luz	Carga (Kg _f)	Esfuerzo		
				Kg _f /cm ²	MPa	PSI
Tensión/ tracción	1	6,511	1 200	46 879,20	4 597,28	666 772,24
	2	6,511	1 225	47 286,71	4 637,24	672 568,29
	3	6,511	1 200	46 692,24	4 578,94	664 113,13

Fuente: elaboración propia.

Tabla XLII. **Ensayo de flexión resina epóxica y 0,50 % de nanocelulosa**

Ensayo	Probeta	Luz	Carga (Kg _f)	Esfuerzo		
				Kg _f /cm ²	MPa	PSI
Tensión/ tracción	1	6,5	500	19 500,00	1 912,30	277 352,40
	2	6,5	560	21 731,17	2 131,10	309 086,78
	3	6,5	625	24 302,09	2 383,22	345 653,54

Fuente: elaboración propia.

Tabla XLIII. **Ensayo de flexión resina epóxica y 0,70 % de nanocelulosa**

Ensayo	Probeta	Luz	Carga (Kg _f)	Esfuerzo		
				Kg _f /cm ²	MPa	PSI
Tensión/ Tracción	1	6,501	520	20 161,91	1 977,21	286 766,83
	2	6,501	510	19 793,93	1 941,12	281 533,05
	3	6,502	515	20 031,09	1 964,38	284 906,15

Fuente: elaboración propia.

Tabla XLIV. **Ensayo de flexión resina epóxica y 1,0 % de nanocelulosa**

Ensayo	Probeta	Luz	Carga (Kg _f)	Esfuerzo		
				Kg _f /cm ²	MPa	PSI
Tensión/ tracción	1	6,501	315	12 286,89	1 204,93	174 758,89
	2	6,513	325	12 549,31	1 230,67	178 491,30
	3	6,512	330	12 880,88	1 263,18	183 207,32

Fuente: elaboración propia.

Tabla XLV. **Ensayo de flexión resina epóxica y 2,5 % de nanocelulosa**

Ensayo	Probeta	Luz	Carga (Kgf)	Esfuerzo		
				Kgf/cm ²	MPa	PSI
Tensión/ tracción	1	6,502	275	10 728,30	1 052,09	152 590,76
	2	6,504	280	10 904,91	1 069,41	155 102,72
	3	6,501	275	10 683,87	1 047,73	151 958,85

Fuente: elaboración propia.

Tabla XLVI. **Ensayo de flexión resina epóxica y 5.0 % de nanocelulosa**

Ensayo	Probeta	Luz	Carga (Kgf)	Esfuerzo		
				Kgf/cm ²	MPa	PSI
Tensión/ tracción	1	6,512	205	8 001,76	784,70	113 810,61
	2	6,512	200	7 783,24	763,27	110 702,52
	3	6,511	200	7 813,20	766,21	111 128,71

Fuente: elaboración propia.

Tabla XLVII. **Ensayo de flexión resina epóxica y 10,0 % de nanocelulosa**

Ensayo	Probeta	Luz	Carga (Kgf)	Esfuerzo		
				Kgf/cm ²	MPa	PSI
Tensión/ tracción	1	6,510	50	1 945,21	190,76	27 667,13
	2	6,511	55	2 148,63	210,71	30 560,39
	3	6,511	50	1 953,30	191,55	27 782,18

Fuente: elaboración propia.

4.1.5. Ensayo de torsión

Los resultados del ensayo de torsión realizado a probetas, se detallan a continuación.

Tabla XLVIII. Ensayo de torsión resina epóxica y 0 % de nanocelulosa

Ensayo	Probeta	Carga (Kg _f)	Esfuerzo		
			Kg _f /cm ²	MPa	PSI
Tensión/ tracción	1	8 300	42 144,89	4 133,00	599 435,24
	2	8 325	42 398,78	4 157,90	603 046,29
	3	8 300	42 018,84	4 120,64	597 642,31

Fuente: elaboración propia.

Tabla XLIX. Ensayo de torsión resina epóxica y 0,25% de nanocelulosa

Ensayo	Probeta	Carga (Kg _f)	Esfuerzo		
			Kg _f /cm ²	MPa	PSI
Tensión/ tracción	1	14 400	73 118,85	7 170,51	1, 039 984,03
	2	14 600	74 357,02	7 291,93	1, 057 594,70
	3	14 800	75 149,93	7 369,69	1, 068 872,48

Fuente: elaboración propia.

Tabla L. **Ensayo de torsión resina epóxica y 0,50% de nanocelulosa**

Ensayo	Probeta	Carga (Kgf)	Esfuerzo		
			Kgf/cm ²	MPa	PSI
Tensión/ tracción	1	10 800	54 186,94	5 313,92	770 711,75
	2	10 600	55 637,73	5 456,20	791 346,51
	3	10 600	52 397,53	5 138,44	745 260,59

Fuente: elaboración propia.

Tabla LI. **Ensayo de torsión resina epóxica y 0,70 % de nanocelulosa**

Ensayo	Probeta	Carga (Kgf)	Esfuerzo		
			Kgf/cm ²	MPa	PSI
Tensión/ tracción	1	8 700	43 650,59	4 280,66	620 851,13
	2	8 600	43 668,20	4 282,39	621 101,57
	3	8 650	42 758,36	4 193,16	608 160,76

Fuente: elaboración propia.

Tabla LII. **Ensayo de torsión resina epóxica y 1,0 % de nanocelulosa**

Ensayo	Probeta	Carga (Kgf)	Esfuerzo		
			Kgf/cm ²	MPa	PSI
Tensión/ tracción	1	6 300	31 893,82	3 127,71	453 632,12
	2	6 200	31 481,73	3 087,30	447 770,90
	3	6 325	32 020,38	3 140,13	455 432,25

Fuente: elaboración propia.

Tabla LIII. **Ensayo de torsión resina epóxica y 2,5 % de nanocelulosa**

Ensayo	Probeta	Carga (Kg _f)	Esfuerzo		
			Kg _f /cm ²	MPa	PSI
Tensión/ tracción	1	5 400	27 337,56	2 680,90	388 827,53
	2	5 325	27 038,74	2 651,59	384 577,43
	3	5 415	27 578,30	2 704,51	392 251,73

Fuente: elaboración propia.

Tabla LIV. **Ensayo de torsión resina epóxica y 5,0 % de nanocelulosa**

Ensayo	Probeta	Carga (Kg _f)	Esfuerzo		
			Kg _f /cm ²	MPa	PSI
Tensión/ tracción	1	2 300	11 678,71	1 145,29	166 108,56
	2	2 315	11 754,87	1 152,76	167 191,88
	3	2 320	11 780,26	1 155,25	167 552,98

Fuente: elaboración propia.

Tabla LV. **Ensayo de torsión resina epóxica y 10 % de nanocelulosa**

Ensayo	Probeta	Carga (Kg _f)	Esfuerzo		
			Kg _f /cm ²	MPa	PSI
Tensión/ tracción	1	280	1 417,50	139,01	20 161,43
	2	310	1 574,09	154,37	22 388,55
	3	250	1 273,24	124,86	18 109,50

Fuente: elaboración propia.

4.1.6. Pruebas adicionales

Para mejorar la experimentación, se realizaron pruebas de ensayos de compresión, tensión y flexión de probetas con dimensiones más grandes con fines de demostración; con la ayuda y el apoyo del Centro de Investigaciones de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala. Siendo parte del programa de ayuda y desarrollo del estudiante de la Facultad de Ingeniería.

Las dimensiones de las probetas experimentales usadas fueron las siguientes:

Tabla LVI. Dimensiones de probetas experimentales

Ensayo	Probeta	Ancho (cm)	Espesor (cm)	Observaciones
Compresión	1	4,082	4,048	Ninguna
	2	4,147	4,144	Ninguna
	3	4,087	4,206	Ninguna
Tensión	4	1,604	3,956	Ninguna
	5	1,829	3,871	Ninguna
	6	1,747	3,780	Ninguna
Flexión	7	4,352	4,041	Longitud = 19,0 cm y Luz = 17,5 cm
	8	4,817	4,243	Longitud = 16,9 cm y Luz = 15 cm
	9	4,144	4,214	Longitud = 18,8 cm y Luz = 17,5 cm

Fuente: elaboración propia.

4.1.6.1. Resultados obtenidos

Para mayor compresión se presentan los resultados.

Tabla LVII. Ensayo de compresión

Probeta	Porcentaje de nanocelulosa (%)	Carga (Kg)	Esfuerzo		
			Kg/cm ²	MPa	PSI
1	0	10 800	653,59	64,09	9 296,24
2	0,5	2 600	151,29	14,83	2 151,87
3	1	2 700	157,07	15,40	2 234,02

Fuente: elaboración propia.

Tabla LVIII. Ensayo de tensión

Probeta	Porcentaje de nanocelulosa (%)	Carga (Kg)	Esfuerzo		
			Kg/cm ²	MPa	PSI
1	0	2 500	393,98	38,64	5 603,72
2	0,5	700	98,87	9,69	1 406,23
3	1	1 800	272,57	26,73	3 876,90

Fuente: elaboración propia.

Tabla LIX. **Ensayo de flexión**

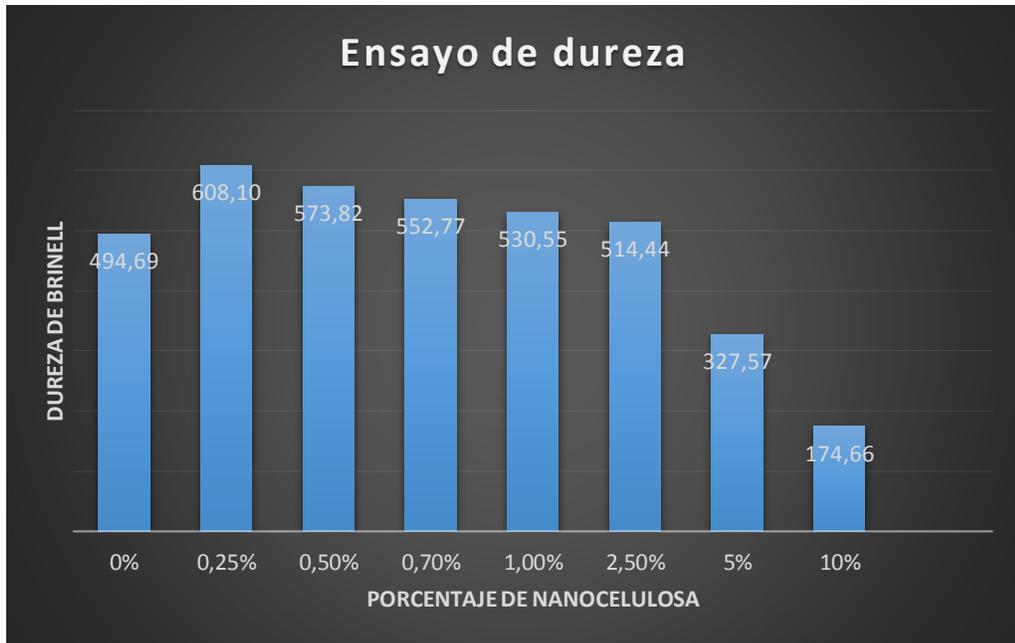
Probeta	Porcentaje de nanocelulosa (%)	Carga (Kg _f)	Esfuerzo		
			Kg _f /cm ²	MPa	PSI
1	0	450	166,22	16,30	2 364,14
2	0,5	950	287,56	28,20	4 090,04
3	1	500	152,88	14,99	2 174.41

Fuente: elaboración propia.

4.2. Porcentaje de mejora de propiedades mecánicas

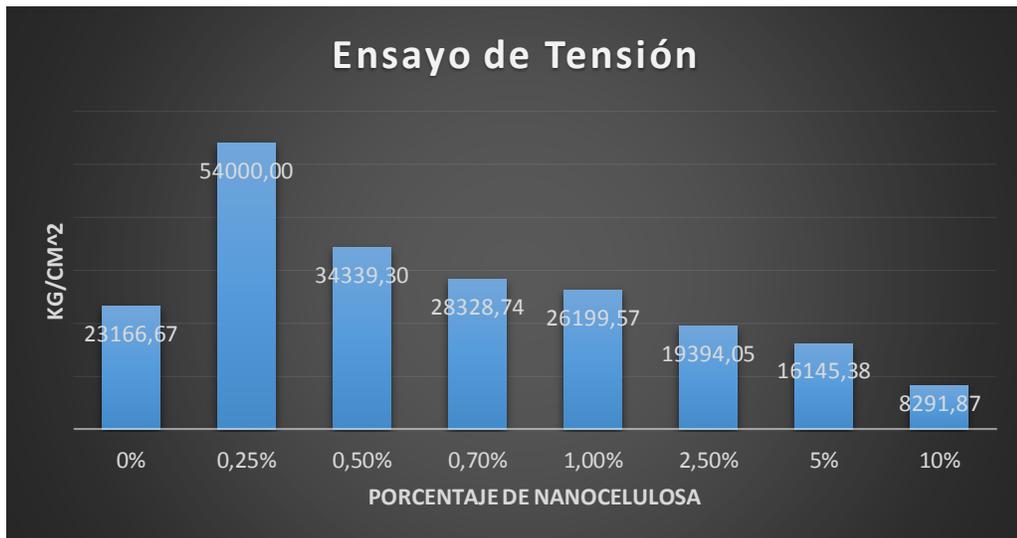
Para la comparación de mejora de propiedades mecánicas, se realizó un promedio de esfuerzos obtenidos de los ensayos de cada porcentaje de nanocelulosa adicionado a la resina epóxica. Además, se muestran los siguientes gráficos para mejorar la visualización de resultados obtenidos en unidades de presión de kg_f/ cm².

Figura 60. **Ensayo de dureza**



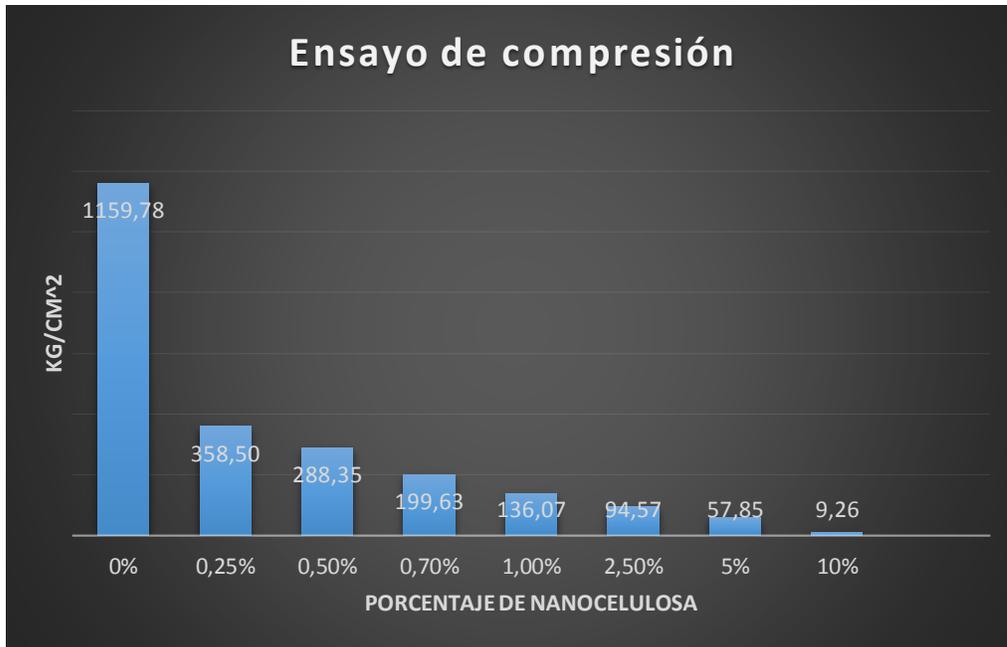
Fuente: elaboración propia.

Figura 61. **Gráfico de ensayo de tensión**



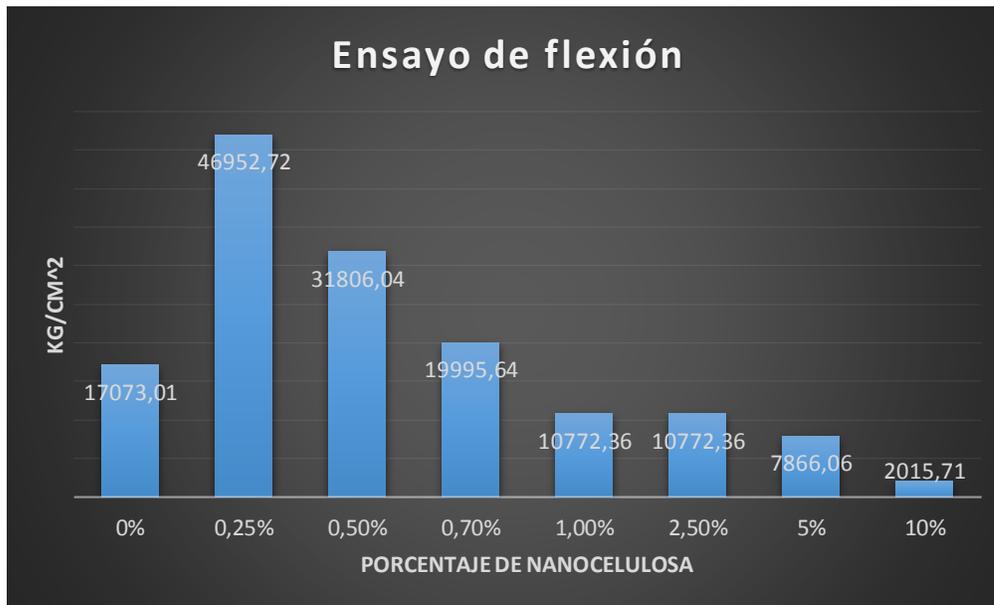
Fuente: elaboración propia.

Figura 62. **Gráfico de ensayo de compresión**



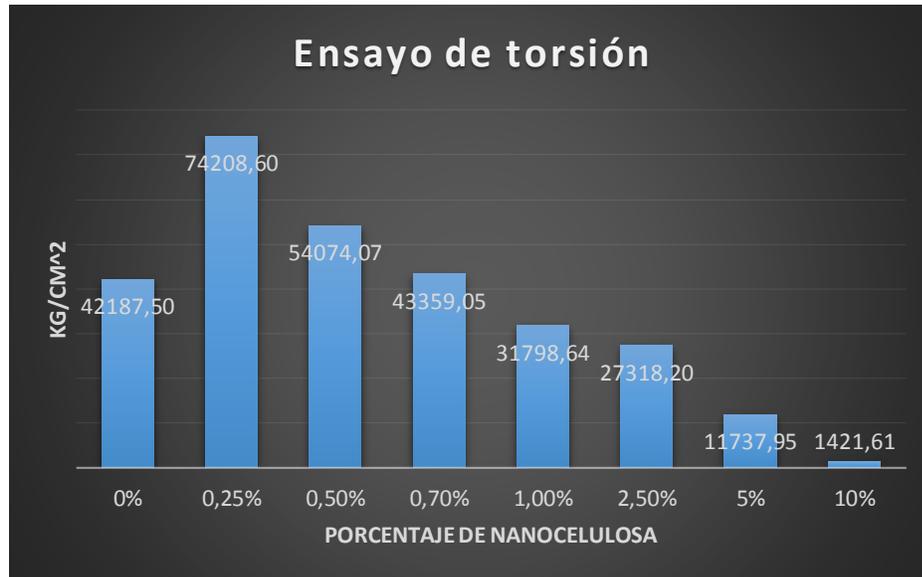
Fuente: elaboración propia.

Figura 63. **Ensayo de flexión**



Fuente: elaboración propia.

Figura 64. **Ensayo de torsión**



Fuente: elaboración propia.

Según el análisis gráfico de propiedades mecánicas, se puede comprobar que la combinación de nanocelulosa y resina epóxica mejora sus propiedades desde un porcentaje de 2,78 % hasta un 100 % de mejora como es el caso de tensión y flexión.

Posteriormente se realizó un análisis de condiciones extremas en un reómetro, experimentando cómo se comportaría un alabe al estar expuesto al ambiente usando como variables las propiedades de temperatura en un rango desde 28 °C hasta los 36 °C, velocidad desde 5 m/s hasta 21 m/s con duración de siete minutos, frecuencias de 0.3, 1, 3, 10 y 30 hercios, con una amplitud de 0,1 % de deformación y usando como porcentaje óptimo respectivamente de nanocelulosa 0,25 % según los resultados posteriormente presentados. Los resultados obtenidos fueron satisfactorios y las propiedades mecánicas fueron constantes, según las variaciones realizadas.

CONCLUSIONES

1. Las propiedades mecánicas de materiales usados en diseños de ingeniería son de suma importancia debido a que mediante la realización de ensayos destructivos se puede determinar el material óptimo por usar para establecer el cumplimiento de la función principal de las piezas, la cual es, soportar fuerzas involucradas. En el caso de álabes de aerogeneradores de 10 kilovatios fabricados con fibra de vidrio, tomados como muestra principal se determina que las propiedades mecánicas son relativamente estándares, teniendo una dureza máxima de Brinell de 514 HB, la resistencia a la tensión máxima de $2\ 100\ \text{kg}_f/\text{cm}^2$, resistencia a la flexión de $425\ \text{kg}_f/\text{cm}^2$ y resistencia a la torsión de $14\ 600\ \text{kg}_f/\text{cm}^2$. Todas estas propiedades de álabes mejoradas ayudan a tener una mejor resistencia al desgaste, mejoran la composición y el mecanizado, además, ayuda a mejorar la influencia de tratamientos térmicos y mecánicos.
2. La nanocelulosa es un compuesto abundante en celulosa vegetal obtenido de desechos orgánicos, por medio de procedimientos químicos que disminuyen su tamaño a una escala nanométrica para intensificar las propiedades de refuerzo, conductividad eléctrica y bajo peso. Por ello se usa la resina epóxica en combinación con nanocelulosa para crear materiales más resistentes y ligeros para la aplicación de alabes de aerogeneradores de 10 kilovatios de potencia.

3. La nanotecnología es una rama de la tecnología dedicada a la manipulación y diseño de estructura nanométricas de materiales, esta tecnología ha sido desarrollada actualmente y poco aprovechada; en combinación con matrices poliméricas como lo es la resina epóxica y la nanocelulosa crea aspas de aerogeneradores con mayores y mejores propiedades mecánicas para satisfacer demandas de generación de energía limpia, cuidando los combustibles fósiles del planeta.

4. La nanocelulosa es parte de los nanobiocompuestos que se desarrollan a partir de desechos orgánicos (cascara de piña), que posee propiedades de resistencia y adherencia con resinas de matrices poliméricas como la resina epóxica que mejora las propiedades de resistencia a la tensión, resistencia a la flexión y resistencia a la torsión desde un 2 % hasta un porcentaje mayor de 100 respecto de su resistencia inicial.

RECOMENDACIONES

1. Para futuros investigadores se considera necesario y normativo realizar los ensayos destructivos con especificaciones extraídas de normas ASTM para obtener datos confiables.
2. La nanocelulosa, a pesar de ser extraída de desechos orgánicos encontrados en la naturaleza, es un material de difícil obtención, para ello se debe seguir las instrucciones de obtención de nanocelulosa debido a que son procesos que involucran reacciones químicas.
3. Se considera importante, para mejorar la incidencia positiva de propiedades mecánicas de aerogeneradores, la experimentación y el análisis de combinación entre resina epóxica y nanocelulosa con valores entre 0 % y 0,25 % integrando así la nanotecnología por medio de nanobiocompuestos.
4. Es conveniente mencionar que, para efectos de investigaciones futuras, la combinación de nanocelulosa y resina epóxica muestra resultados positivos, sí y solo si los porcentajes de nanocelulosa son bajos; como se ve en los resultados de la experimentación las probetas con porcentaje de nanocelulosa mayores de 1,0 % que, en lugar de beneficiar la resistencia del material lo convierten en material frágil.

BIBLIOGRAFÍA

1. BALLESTEROS SALÁN, Maria Nuria. *Tecnología de proceso y transformación de materiales*. Universidad Politécnica de Catalunya, 2005. 570 p.
2. BRONDSTED, Povl; LILHOLT, Hans; LYSTRUP, Aage. *Composite materials for wind power turbine blades*. *Annu. Rev. Mater. Res.*, 2005, vol. 35, p. 505-538.
3. CAMACHO ELIZONDO, Melissa; VEGA BAUDRIT, José; CAMPOS GALLO, Allan. *Uso de nanomateriales en polímeros para la obtención de bioempaques en aplicaciones alimentarias*. *Revista de la Sociedad Química del Perú*, 2011, vol. 77, no 4, p. 292-306.
4. CANET, W.; ESPINOSA, J. *Influencia del proceso de congelación sobre la textura de vegetales. Efecto del escaldado y la velocidad de congelación sobre la textura de zanahoria (Daucus carota L.)*. *Rev. Agroquím. Technol. Aliment*, 1983, vol. 23, no 4, p. 540.
5. CARCHI MAURAT, David Esteban. *Aprovechamiento de los residuos agrícolas provenientes del cultivo de banano para obtener nanocelulosa*. Trabajo de graduación de Ingeniería Química, Universidad de Cuenca, Ecuador. 2014. 77 p.
6. CASTILLO CIFUENTES, Jorge Ivan. *Nanotribología: estudio y comportamiento de la fricción y el desgaste*. DOI: 10.13140/RG.2.1.3190.3128

7. COPPO, J. A. *Nanotecnología, medicina veterinaria y producción agropecuaria*. Publicación oficial de la Facultad de Ciencias Veterinarias de la Universidad Nacional del Nordeste (UNNE). *Revista Veterinaria*, 2009, vol. 20, no 1, p. 61-71.
8. FERNÁNDEZ LÓPEZ, Vicente. *Nanomateriales basados en carbono*. 2009. Tesis Doctoral. Universidad Autónoma de Madrid. 2009. 266 p.
9. FERNÁNDEZ GUERRERO, Ignacio. *Estudio del comportamiento en rotura de un material metálico dúctil: aspectos experimentales y numéricos*. Trabajo de graduación de doctorado en Ingeniería Civil. Facultad de Ingeniería, Universidad Politécnica de Madrid, 2015. 77 p.
10. GONZÁLEZ ZÚNIGA, Carlos Alberto, et al. *Estado del Arte de la Bioeconomía y el Cambio Climático*. Editorial Universitaria, Universidad Nacional Autónoma de México, 2014.
11. GUERRERO, Victor, et al. *Nuevos materiales: Aplicaciones estructurales e industriales*. Ecuador, Quito: Imprefepp, 2011. 390 p.
12. KIM, H. J., et al. *Enhancement of mechanical properties of aluminium/epoxy composites with silane functionalization of aluminium powder*. *Composites Part B: Engineering*, 2012, vol. 43, no 4, p. 1743-1748.

13. MEJIAS SÁNCHEZ, Yoerquis, et al. *La nanotecnología y sus posibilidades de aplicación en el campo científico-tecnológico. Revista Cubana de Salud Pública*, 2009, vol. 35, no 3, p. 0-0.
14. MOLINA, Mario I. *Nanotecnología, ciencia de lo diminuto*. Universidad de Chile. Facultad de Ciencias. *Boletín Sociedad*. p. 17
15. NILSSON, Karl-Fredrik; BLAGOEVA, Darina; MORETTO, Pietro. *An experimental and numerical analysis to correlate variation in ductility to defects and microstructure in ductile cast iron components. Engineering fracture mechanics*, 2006, vol. 73, no 9, p. 1133-1157.
16. PAYÁN, J. V. *Revolución de bionanomateriales: nanocelulosa a la vista. Tecnoacademia. Revista de divulgación juvenil*, 1(1), 54-57. 2016.
17. STORTI, Bruno, et al. *Aerodinámica de turbinas eólicas de baja potencia*. En XXXII Congreso de métodos numéricos y sus aplicaciones ENIEF. 2013.

ANEXOS

- Ficha técnica de resina epóxica

Anexo 1. Ficha técnica de resina



Technical Data Sheet
Epoxy Resin, Catalyst & Fillers
Building, Bonding, Repairing

Revision date: March 2014

Construction and Repairs

- Fiberglass Construction & Repairs
- Home Construction & Repairs
- Bonds to Most Surfaces including Wood, Fiberglass, Metals, Foam, Plastic and Fabrics



PRODUCT DESCRIPTION

HAWK EPOXY is a 100% clear, low-viscosity, low-blush system designed for ease of use in the widest variety of construction and repair projects.

The flexibility of HAWK EPOXY lies in its huge range of CATALYST and FILLERS to adapt to any situation. If you need a fast cure due to schedule constraints or if you need a very thick fairing compound, HAWK EPOXY has the situation covered. After the application is cured, it can be sanded into fine tuned shape for the highest quality finish.

With it's ease of use, thin layer roll out capabilities and low blush, HAWK EPOXY is the easy choice for all epoxy resin projects.



STEP 1 - EPOXY RESIN (CHOOSE SYSTEM SIZE)

R1 Epoxy Resin - a smooth, low-viscosity liquid epoxy resin. With a variety of Hawk Epoxy Catalysts, it can be cured under a wide range of temperatures and environmental conditions to form a high-strength plastic with superior moisture barrier characteristics.

Part #	Description	Size
R1-S1	Epoxy Resin - 1 Quart	Size 1
R1-S2	Epoxy Resin - 1 Gallon	Size 2
R1-S3	Epoxy Resin - 4.36 Gallon	Size 3
R1-S4	Epoxy Resin Drum - TBD	Size 4

Hawk Epoxy is available in four system sizes color coded on each label. Note: Mix ratios vary by catalyst. For optimal product utilization, be sure to choose the same Size for both the resin and catalyst. Refer to page 4 for Directions for Use.

STEP 2 - SELECT YOUR CATALYST

Resin/ Catalyst Advantages	Hawk Epoxy Catalyst	Minimum Recommended Temperature (F)	Pot Life @ 70 F	Working Time Thin Film*	Cure to Solid Thin Film*	Cure to Working Strength	Mix Ratio Resin/ Catalyst
For use in the warmest conditions or when more time is needed for application	C1 Ultra Slow Catalyst	70	40-50 minutes (4 oz.)	3-4 hours	20-24 hours	4-6 days	3:1
For use in moderate temperatures	C2 Slow Cure Catalyst	60	20-25 minutes (6 oz.)	90-110 minutes	10-15 hours	1-4 days	5:1
For use in colder temperatures or when a fast cure is needed	C3 Fast Cure Catalyst	40	9-12 minutes (6 oz.)	60-70 minutes	6-8 hours	1-4 days	5:1
For use in clear coating, carbon fiber application or reduced blush in humid conditions	C5 Clear Finish Catalyst	60	22-27 minutes (4 oz.)	110-130 minutes	12-18 hours	1-4 days	3:1

*Epoxy cures faster at higher temperatures and in thicker applications.

(Page 1 of 4)

NEW NAUTICAL COATINGS, INC.
14805 49th Street North • Clearwater, FL 33762 • 727.523.8053 • 800.528.0997 • FAX 727.523.7325 • www.SeaHawkPaints.com

Continuación de anexo 1.



Technical Data Sheet

Epoxy Resin, Catalyst & Fillers

Building, Bonding, Repairing

C1 ULTRA SLOW CURE CATALYST/R1 RESIN

Designed for use with HAWK EPOXY R1 Resin for construction and repairs with superior adhesion, strength, bonding, filling, and moisture barrier qualities at higher temperatures and for an ultra slow cure. Do not use under Sea Hawk marine wood varnish.

CHARACTERISTICS AND PROPERTIES

Mix by volume:	3.0 : 1
Mix by weight:	3.6 : 1
Viscosity (at 77°F):	65—75 KU
Pot life (4oz at 77°F):	40-50 mins
6 mils DD tack/ not wet (77°F):	3-4 Hrs
6 mils DD cured (77°F):	20-24hrs
6 mils DD Full cured (77°F):	4-9days
Minimum T. at application:	70°F (21°C)
Weight/gallon (lb/gal):	9.16
Hardness (Shore D):	82
Peak Load (lbf):	486.1
Peak Stress (MPa):	53.5
Modulus (MPa):	3048
Chord modulus Strain 1-2 (MPa):	2796
Elongation at peak (in):	0.066
Elongation at peak (%):	3.3
Elongation at Break (%):	5.2
Energy to break (J):	4.3
Break Stress (MPa):	43.9

Part #	Description	System Size
C1-S1	Ultra Slow Catalyst - .58 Pint	Size 1
C1-S2	Ultra Slow Catalyst - .33 Gallon	Size 2
C1-S3	Ultra Slow Catalyst - 1.45 Gallon	Size 3
C1-S4	Ultra Slow Catalyst - TBD	Size 4

C3 FAST CURE CATALYST/R1 RESIN

Designed for use with HAWK EPOXY R1 Resin for construction and repairs with superior adhesion, strength, bonding, filling, and moisture barrier qualities at cooler temperatures and for a fast cure. Do not use under Sea Hawk marine wood varnish.

CHARACTERISTICS AND PROPERTIES

Mix by volume:	5.0 : 1
Mix by weight:	5.3 : 1
Viscosity (at 77°F):	75—85 KU
Pot life (6 oz at 77°F):	9-12 mins
6 mils DD tack/ not wet (77°F):	60-70 mins
6 mils DD cured (77°F):	6-8 hrs
6 mils DD Full cured (77°F):	1-4 days
Minimum T. at application:	40°F (4°C)
Weight/gallon (lb/gal):	9.41
Hardness (Shore D):	83
Peak Load (lbf):	650.6
Peak Stress (MPa):	68.9
Modulus (MPa):	3776
Chord modulus Strain 1-2 (MPa):	3472
Elongation at peak (in):	0.067
Elongation at peak (%):	3.4
Elongation at Break (%):	4.5
Energy to break (J):	4.9
Break Stress (MPa):	61.6

Part #	Description	System Size
C3-S1	Fast Cure Catalyst - .4 Pint	Size 1
C3-S2	Fast Cure Catalyst - .8 Quart	Size 2
C3-S3	Fast Cure Catalyst - .87 Gallon	Size 3
C3-S4	Fast Cure Catalyst - TBD	Size 4

C2 SLOW CURE CATALYST/R1 RESIN

Designed for use with HAWK EPOXY R1 Resin for construction and repairs with superior adhesion, strength, bonding, filling, and moisture barrier qualities at higher temperatures and for a slow cure. Do not use under Sea Hawk marine wood varnish.

CHARACTERISTICS AND PROPERTIES

Mix by volume:	5.0 : 1
Mix by weight:	5.3 : 1
Viscosity (at 77°F):	70—75 KU
Pot life (6oz at 77°F):	20-25 mins
6 mils DD tack/ not wet (77°F):	90-110 mins
6 mils DD cured (77°F):	10-15 hrs
6 mils DD Full cured (77°F):	1-4 days
Minimum T. at application:	60°F (16°C)
Weight/gallon (lb/gal):	9.33
Hardness (Shore D):	82
Peak Load (lbf):	429.6
Peak Stress (MPa):	59.7
Modulus (MPa):	3318
Chord modulus Strain 1-2 (MPa):	3106
Elongation at peak (in):	0.064
Elongation at peak (%):	3.2
Elongation at Break (%):	4.6
Energy to break (J):	3.3
Break Stress (MPa):	48.2

Part #	Description	System Size
C2-S1	Slow Cure Catalyst - .4 Pint	Size 1
C2-S2	Slow Cure Catalyst - .8 Quart	Size 2
C2-S3	Slow Cure Catalyst - .87 Gallon	Size 3
C2-S4	Slow Cure Catalyst - TBD	Size 4

C5 CLEAR FINISH CATALYST/R1 RESIN

Designed for use with HAWK EPOXY R1 Resin for very clear fiberglass cloth and coating applications with exceptional moisture barrier characteristics. Perfect for natural wood and carbon fiber clear coats with no blush. Longer working times in very warm temperatures. May be used under Sea Hawk marine wood varnish.

CHARACTERISTICS AND PROPERTIES

Mix by volume:	3.0 : 1
Mix by weight:	3.6 : 1
Viscosity (at 77°F):	70—80 KU
Pot life (4oz at 77°F):	22-27 mins
6 mils DD tack/ not wet (77°F):	110-130 mins
6 mils DD cured (77°F):	12-18 hrs
6 mils DD Full cured (77°F):	1-4 days
Minimum T. at application:	60°F (16°C)
Weight/gallon (lb/gal):	9.16
Hardness (Shore D):	84
Peak Load (lbf):	596.4
Peak Stress (MPa):	63.1
Modulus (MPa):	3397
Chord modulus Strain 1-2 (MPa):	3188
Elongation at peak (in):	0.067
Elongation at peak (%):	3.3
Elongation at Break (%):	4.7
Energy to break (J):	4.6
Break Stress (MPa):	49.5

Part #	Description	System Size
C5-S1	Clear Finish Catalyst - .58 Pint	Size 1
C5-S2	Clear Finish Catalyst - .33 Gallon	Size 2
C5-S3	Clear Finish Catalyst - 1.45 Gallon	Size 3
C5-S4	Clear Finish Catalyst - TBD	Size 4

*Epoxy cures faster at higher temperatures and in thicker applications.

(Page 2 of 4)

NEW NAUTICAL COATINGS, INC.
14805 49th Street North • Clearwater, FL 33762 • 727.523.8053 • 800.528.0997 • FAX 727.523.7325 • www.SeaHawkParts.com

Continuación de anexo 1.



Technical Data Sheet
Epoxy Resin, Catalyst & Fillers
Building, Bonding, Repairing

STEP 3 - SELECT YOUR FILLER (OPTIONAL)

HAWK EPOXY FILLER SELECTION GUIDE

← MORE STRENGTH Harder to Sand Easier to Sand LESS STRENGTH →

Use	F1	F2	F3	F4	F5	F6
Bonding Hardware	★★★★★	★★★★	★★★	★★		
General Bonding	★★★★	★★★	★★	★		
Bonding with fillets	★★★	★★★★	★★★	★★	★★	
Laminating	★★★	★★★★	★★★★	★★	★★	
Fairing					★★	★★

Filler suitability:
 ★★★★★ = Best ★★★★ = Better ★★★ = Good No Claw = Do Not Use



F1 High Load Adhesive Fiber Filler - Thickens to a light grey color creating an easy to use adhesive designed for bonding hardware and other applications with dissimilar materials. This mixture will maximize bond strength for anticipated high loads.

F2 Structural Adhesive Filler - Thickens to an off white color, creating a general purpose thickening additive for bonding, gap filling and filleting. Mix to a workable consistency allowing sag-free and easy flow properties for vertical and overhead applications.

F-3 Light Density Adhesive Micro Fiber Filler - Thickens to an off white color. Great for bonding many substrates, especially wood. The mixture also creates a multipurpose adhesive for many other substrates in addition to providing excellent substrate wetting and penetrating characteristics. Increases impact and abrasion resistance.

F4 Bridging Adhesive Filler - Thickens to a brown color, creating an easy to use adhesive with excellent gap filling and filleting qualities. This mixture blends with many different types of wood to allow for a natural looking fillet or gap fill.

F5 Light Density Fairing Filler - Thickens to a reddish brown color, achieving an easy to sand and carve fairing compound while still remaining strong and light weight.

F6 MicroSphere Fairing Filler - Thickens to a white color, creating a lightweight fairing compound for small to large areas. This product holds a feathered edge very well and is suitable for nearly every substrate. This closed celled structure can also be used for increased acoustic and thermal insulation.

EPOXY FILLER DIRECTIONS FOR USE

- Mix HAWK EPOXY resin and catalyst thoroughly as stated in the HAWK EPOXY RESIN instructions.
- Mix the FILLER thoroughly. Then blend in small amounts of FILLER to the mixed resin and catalyst until the desired thickness is achieved.

Depending on use, mixing in more or less of the filler material will allow multiple uses with the same filler. For example:

- For laminating flat panels or bonding large surfaces, filler should be mixed to a pourable or injectable consistency.
- For general bonding, filleting or bonding hardware, mix material to a slightly to moderately thick consistency.
- If you desire a zero-sag effect, mix to a very thick consistency. This can act as a filler for uneven surfaces without worry of sag.
- To ensure maximum adhesion and strength, use only enough filler to avoid sagging or running. When using a resin/catalyst/filler mixture for bonding, a small amount of mixture should squeeze out from between the two items that are being bonded to each other when they are pushed together.

Increasing the filler to resin/catalyst ratio will deduct strength and increase sandability.

NOTE: Please refer to the FILLER SELECTION CHART above for specific uses applicable to each filler.

(Page 3 of 4)

NEW NAUTICAL COATINGS, INC.
 14805 49th Street North • Clearwater, FL 33762 • 727.523.8053 • 800.528.0997 • FAX 727.523.7325 • www.SeaHawkPaints.com

Continuación de anexo 1.



Technical Data Sheet

Epoxy Resin, Catalyst & Fillers

Building, Bonding, Repairing

RESIN & CATALYST DIRECTIONS FOR USE

Preparation: Apply over clean, dry surfaces. Remove all grease, oil, wax, or other foreign material by solvent, such as, S-80 Wax N Grease Killer or detergent washing. (SSPC-SP1). Non-porous substrates must be sanded to create a rough surface for stronger bonding and adhesion. Remove all dust prior to application.

DISPENSING: Do not adjust ratio (R1 Epoxy Resin/Catalyst) to alter cure time. Use the exact mixing ratio as described on page 2 of this document or on the Catalyst Label. Ensure accurate measuring for maximum properties. Particular emphasis was placed in the overall strength and toughness of the cured system. Dispense into a clean, non-porous, straight-sided plastic or metal container. Foam and glass container are unsuitable.

Dispensing with Hawk Pumps: If using the calibrated 30-KT Hawk Pumps, the correct ratio will be dispensed by one pump push of Catalyst and one pump of R1 Resin to equal the correct ratio. See the 30-KT Hawk Pump directions for more details.

MIXING: Stir R1 Epoxy Resin and desired Catalyst well ensuring that all materials from sides and bottom of container are thoroughly mixed for one to two minutes. Then include any Hawk Epoxy Filler (F1, F2, F3, F4, F5, F6) if desired depending on application. Allow for adequate ventilation.

Application Tip: Unless you plan on overcoating Hawk Epoxy (when color variations may not matter), use the same age Hawk Epoxy Catalyst on a particular project to ensure color consistency.

HEAT WARNING! Curing epoxy generates heat and should be mixed in a wide shallow container to increase the surface area of the mixture. Only combine R1 Resin and Catalyst in small batches to reduce to avoid excessive exothermic heat that could shorten the working time melting or igniting the container or flammable materials and damage the skin.

HIGHER TEMPERATURE WARNING: R1 Epoxy Resin will cure faster in warmer temperatures. DO NOT alter mix ratio to compensate for temperature. Doing so could damage the cure and reduce the strength of the epoxy.

LOWER TEMPERATURE WARNING: Extra cure time is required as ambient temperature decreases. Using R1 Epoxy Resin below 40°F (4°C) could damage the cure and reduce the strength of the epoxy. DO NOT alter mix ratio to compensate for temperature.

CLEANUP: Clean up R1 Epoxy Resin, and mixed epoxy resin and Catalyst with S-80 Wax N Grease Killer, acetone, or MEK.

SPILL/LEAK: Use an inert absorbent to complete clean-up. This material reacts with oxidizing materials. Take up carefully to avoid heat and sparks.

STORAGE: Storage temperature: 40°-90°F (32°-4°C). Keep containers sealed and in a well-ventilated area. Hawk Epoxy Catalysts, (C1, C2, C3 and C5) will darken in color with extended storage times. However, this color change will in no way affect the physical characteristics of the finished project. Hawk Epoxy R1 Resin may thicken with extended storage times and may require thorough mixing before combining with Hawk Epoxy Catalysts. If Hawk Epoxy R1 Resin or a Hawk Epoxy Catalyst goes through extreme hot and cold temperatures, 32°F or below, it may get hard and mineralized in appearance. The mineralization will in no way affect the physical characteristics of the finished product. To eliminate mineralization, heat product to no less than 110°F for 1-2 hours.

Hawk Epoxy components have an extended shelf life that will last for several years. After extended storage, be sure to mix a small amount of Hawk Epoxy R1 Resin and Hawk Epoxy Catalyst (at correct ratio) and ensure proper curing before proceeding to a larger scope project.

HAWK EPOXY GROUP SIZE AND COATING COVERAGE

Saturation coat porous surfaces

PACKAGE SIZE 1	(R1 : C3/C2)	93-108 ft2
PACKAGE SIZE 1	(R1 : C5/C1)	93-108 ft2
PACKAGE SIZE 2	(R1 : C3/C2)	353-408 ft2
PACKAGE SIZE 2	(R1 : C5/C1)	373-433 ft2
PACKAGE SIZE 3	(R1 : C3/C2)	1533-1788 ft2
PACKAGE SIZE 3	(R1 : C5/C1)	1678-1958 ft2

Buildup coats non-porous surfaces

PACKAGE SIZE 1	(R1 : C3/C2)	123-138 ft2
PACKAGE SIZE 1	(R1 : C5/C1)	123-138 ft2
PACKAGE SIZE 2	(R1 : C3/C2)	465-523 ft2
PACKAGE SIZE 2	(R1 : C5/C1)	493-553 ft2
PACKAGE SIZE 3	(R1 : C3/C2)	2043-2303 ft2
PACKAGE SIZE 3	(R1 : C5/C1)	2238-2523 ft2

Hawk Epoxy Uses:

- Fiberglass Construction & Repairs
- Home Construction & Repairs
- Boat manufacturing & Repairs
- Bonds to Most Surfaces including Wood, Fiberglass, Metals, Fabrics, and various Foams and Plastics

Hawk Epoxy Premium Quality:

- High Tensile Strength
- Strong and Durable
- Easy to Use
- Excellent Bonding Strength
- Water Resistant
- Cost Effective

(Page 4 of 4)

NEW NAUTICAL COATINGS, INC.
14805 49th Street North • Clearwater, FL 33762 • 727.523.8053 • 800.528.0997 • FAX 727.523.7325 • www.SeaHawkPaints.com

Fuente: Dismar. Carretera al Pacifico KM 19.5 Parque Empresarial Naciones Unidas Ofibodega 27 Villa Nueva – Guatemala.

- Probetas con 25 % de nanocelulosa

Las probetas de resina epóxica y 25 % nanocelulosa fueron probetas descartadas para el estudio realizado debido a que presentaban mucha fragilidad. En la siguiente imagen se observa como la probeta sufre una fractura en el momento de aplicar una fuerza axial para estandarizar las probetas.

Anexo 2. **Probetas con 25% de nanocelulosa**



Fuente: Laboratorio Nacional de Nanotecnología, LANOTEC.

- Ensayos realizados en Centro de Investigaciones de Ingeniería

Anexo 3. Probetas después de ensayos destructivos



Fuente: Centro de Investigaciones de Ingeniería, USAC.

- Normas ASTM

Las normas ASTM usadas para la ejecución de ensayos destructivos fueron extraídas de la página oficial de *ASTM International*. A continuación se adjunta una de las normas usadas.

Anexo 4. Norma ASTM D 638



Designation: D 638 – 02a

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 approval. 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 parentheses are for information only.

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 November 10, 2002. Published January 2003. Originally approved in 1941. Last previous edition approved in 2002 as D 638 – 02.

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:

- D 229 Test Methods for Rigid Sheet and Plate Materials Used for Electrical Insulation²
- D 412 Test Methods for Vulcanized Rubber and Thermoplastic Elastomers—Tension³
- D 618 Practice for Conditioning Plastics for Testing⁴
- D 651 Test Method for Tensile Strength of Molded Electrical Insulating Materials⁵
- D 882 Test Methods for Tensile Properties of Thin Plastic Sheeting⁶
- D 883 Terminology Relating to Plastics⁴
- D 1822 Test Method for Tensile-Impact Energy to Break Plastics and Electrical Insulating Materials⁴
- D 3039/D 3039M Test Method for Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Materials⁶
- D 4000 Classification System for Specifying Plastic Materials⁷
- D 4066 Classification System for Nylon Injection and Extrusion Materials⁷
- D 5947 Test Methods for Physical Dimensions of Solid Plastic Specimens⁸
- E 4 Practices for Force Verification of Testing Machines⁹
- E 83 Practice for Verification and Classification of Extensometer⁹
- E 132 Test Method for Poisson's Ratio at Room Temperature⁹
- E 691 Practice for Conducting an Interlaboratory Study to

² Annual Book of ASTM Standards, Vol 10.01.

³ Annual Book of ASTM Standards, Vol 09.01.

⁴ Annual Book of ASTM Standards, Vol 08.01.

⁵ Discontinued; see 1994 Annual Book of ASTM Standards, Vol 10.01.

⁶ Annual Book of ASTM Standards, Vol 15.03.

⁷ Annual Book of ASTM Standards, Vol 08.02.

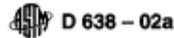
⁸ Annual Book of ASTM Standards, Vol 08.03.

⁹ Annual Book of ASTM Standards, Vol 03.01.

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

Copyright © ASTM International, 100 Barr Harbor Drive, PO Box C700, West Conshohocken, PA 19428-2969, United States.

Continuación anexo 4.



Determine the Precision of a Test Method¹⁰

2.2 ISO Standard:

ISO 527-1 Determination of Tensile Properties¹¹

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.

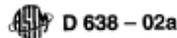
5.1.3.1 *Fixed grips* are rigidly attached to the fixed and movable members of the testing machine. When this type of grip is used extreme care should be taken to ensure that the test specimen is inserted and clamped so that the long axis of the test specimen coincides with the direction of pull through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

¹⁰ Annual Book of ASTM Standards, Vol 14.02.

¹¹ Available from American National Standards Institute, 25 W. 43rd St., 4th Floor, New York, NY 10036.



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—Suitable micrometers for measuring the width and thickness of the test specimen to an incremental discrimination of at least 0.025 mm (0.001 in.) should be used. All width and thickness measurements of rigid and semirigid plastics may be measured with a hand micrometer with ratchet. A suitable instrument for measuring the thickness of nonrigid test specimens shall have: (1) a contact measuring pressure of 25 ± 2.5 kPa (3.6 ± 0.36 psi), (2) a movable circular contact foot 6.35 ± 0.025 mm (0.250 ± 0.001 in.) in diameter, and (3) a lower fixed anvil large enough to extend beyond the contact foot in all directions and being parallel to the contact foot within 0.005 mm (0.0002 in.) over the entire foot area. Flatness of the foot and anvil shall conform to Test Method D 5947.

5.3.1 An optional instrument equipped with a circular contact foot 15.88 ± 0.08 mm (0.625 ± 0.003 in.) in diameter is recommended for thickness measuring of process samples or larger specimens at least 15.88 mm in minimum width.

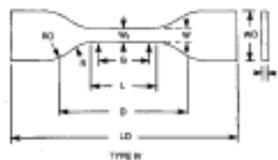
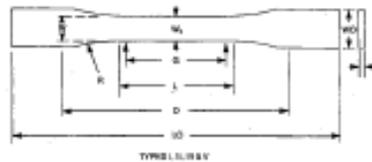
6. Test Specimens

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

Continuación anexo 4.

D 638 - 02a



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 (0.15) 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) ^{h,i}	
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) ^{h,i}	
WO—Width overall, min ^g	19 (0.75)	19 (0.75)	29 (1.13)	19 (0.75)	—	+5.4 (+0.25)	
WD—Width overall, min ^g	—	—	—	—	9.53 (0.375)	+3.18 (+0.125)	
LO—Length overall, min ^g	165 (6.5)	165 (7.2)	246 (9.7)	115 (4.5)	63.5 (2.5)	no max (no min)	
G—Gage length ^h	50 (2.00)	50 (2.00)	50 (2.00)	—	7.62 (0.300)	±0.25 (±0.010) ^{h,i}	
D—Gage length ^h	—	—	—	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	75 (3.00)	75 (3.00)	75 (3.00)	14 (0.56)	12.7 (0.5)	±1 (±0.04) ^{h,i}	
RO—Outer radius (Type IV)	—	—	—	25 (1.00)	—	±1 (±0.04)	

^a Thickness, T, shall be 3.2 to 0.4 mm (0.13 to 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 (0.236 ± 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 out to the dimensions shown, or molded in a mold whose cavity has these dimensions. The dimensions shall be:

- W = 3.18 ± 0.05 mm (0.125 ± 0.004 in.),
- L = 9.53 ± 0.05 mm (0.375 ± 0.005 in.),
- G = 7.62 ± 0.02 mm (0.300 ± 0.001 in.), and
- R = 12.7 ± 0.05 mm (0.500 ± 0.005 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 D20-1939.

^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 spans.

^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.

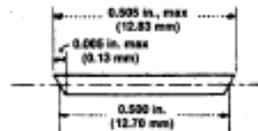


FIG. 1 Tension Test Specimens for Sheet, Plate, and Molded Plastics

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

Continuación anexo 4.

D 638 - 02a

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 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.

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.

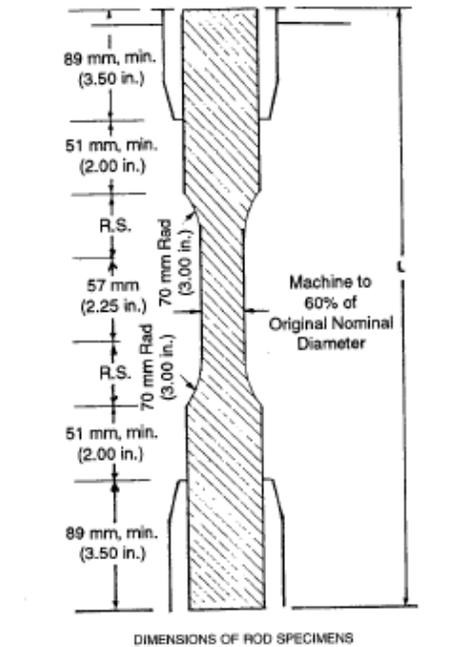
Note 10—When preparing specimens from certain composite laminates such as woven roving, or glass cloth, care must be exercised in cutting the specimens parallel to the reinforcement. The reinforcement will be significantly weakened by cutting on a bias, resulting in lower laminate properties, unless 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



Nominal Diameter	Length of Radial Sections, 2R.S.	Total Calculated Minimum Length of Specimen	Standard Length, <i>L</i> , of Specimen to Be Used for 89-mm (3½-in.) Jaws ^a
mm (in.)			
3.2 (¼)	19.6 (0.773)	356 (14.02)	381 (15)
4.7 (½)	24.0 (0.946)	361 (14.20)	381 (15)
6.4 (¼)	27.7 (1.091)	364 (14.34)	381 (15)
9.5 (¾)	33.9 (1.333)	370 (14.58)	381 (15)
12.7 (½)	39.0 (1.536)	376 (14.79)	400 (15.75)
15.9 (¾)	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 (¾)	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 (16.05)	419 (16.5)
50.8 (2)	76.0 (2.993)	412 (16.24)	432 (17)

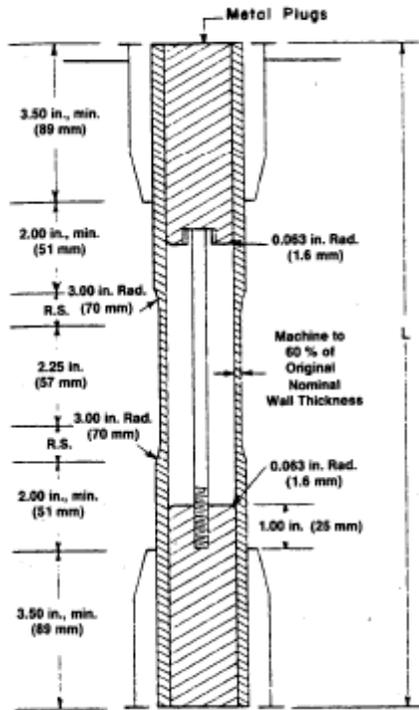
^a For other jaws greater than 89 mm (3.5 in.), the standard length shall be increased by twice the length of the jaws minus 178 mm (7 in.). The standard length permits a slippage of approximately 6.4 to 12.7 mm (0.25 to 0.50 in.) in each jaw while maintaining the maximum length of the jaw grip.

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

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.

Continuación anexo 4.

D 638 - 02a



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 (1/4)	13.9 (0.547)	350 (13.80)	381 (15)
1.2 (1/4)	17.0 (0.670)	354 (13.92)	381 (15)
1.5 (3/8)	19.6 (0.773)	358 (14.02)	381 (15)
2.4 (3/4)	24.0 (0.946)	361 (14.20)	381 (15)
3.2 (3/4)	27.7 (1.091)	364 (14.34)	381 (15)
4.8 (3/4)	33.8 (1.333)	370 (14.58)	381 (15)
6.4 (3/4)	39.0 (1.536)	376 (14.79)	400 (15.75)
7.9 (3/4)	43.5 (1.714)	380 (14.96)	400 (15.75)
9.5 (3/4)	47.6 (1.873)	384 (15.12)	400 (15.75)
11.1 (3/4)	51.3 (2.019)	388 (15.27)	400 (15.75)
12.7 (1/2)	54.7 (2.154)	381 (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

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.

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 1/2 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.

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, max/min (in./in.-min)
Rigid and Semirigid	I, II, III rods and tubes	5 (0.2) ± 25 %	0.1
		50 (2) ± 10 %	1
		500 (20) ± 10 %	10
		5 (0.2) ± 25 %	0.15
		50 (2) ± 10 %	1.5
Nonrigid	IV	500 (20) ± 10 %	15
		1 (0.05) ± 25 %	0.1
		10 (0.5) ± 25 %	1
		100 (5) ± 25 %	10
		50 (2) ± 10 %	1
Nonrigid	IV	500 (20) ± 10 %	10
		50 (2) ± 10 %	1.5
		500 (20) ± 10 %	15

^a Select the lowest speed that produces rupture in 1/2 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.

8.4 Poisson's ratio determinations shall be made at the same speed selected for modulus determinations.

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.

10. Procedure

10.1 Measure the width and thickness of rigid flat specimens (Fig. 1) with a suitable micrometer to the nearest 0.025 mm (0.001 in.) at several points along their narrow sections. Measure the thickness of nonrigid specimens (produced by a Type IV die) in the same manner with the required dial micrometer. Take the width of this specimen as the distance between the cutting edges of the die in the narrow section. 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.

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

	Mean	S_y	S_R	I_y	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

10.2 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 When Poisson's ratio is determined, the speed of testing and the load range at which it is determined shall be the same as those used for modulus of elasticity.

10.3.1.2 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_y	S_R	I_y	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_y	S_R	I_y	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

10.3.1.3 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.

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 14—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 (or pounds-force) by the original minimum cross-sectional area of the specimen in square metres (or square inches). Express the result in pascals (or 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).

Continuación anexo 4.



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.

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

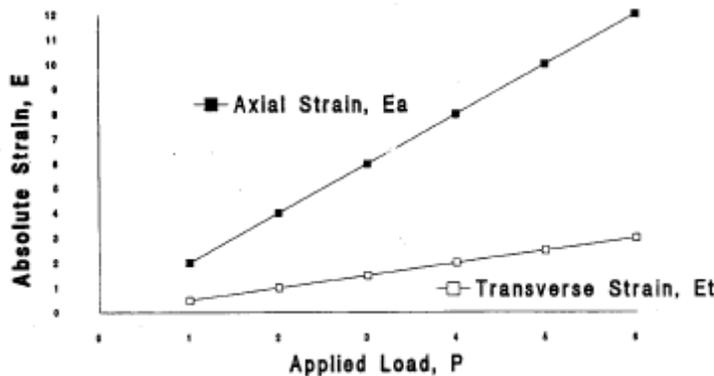


FIG. 4 Plot of Strains Versus Load for Determination of Poisson's Ratio

11.3.1.1 *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.

11.3.1.2 *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.

11.3.1.3 *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.

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 initial cross-sectional area of the test specimens 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

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. A straight line is drawn through each set of points, and the slopes, $d\epsilon_a/dP$ and $d\epsilon_t/dP$, of these lines are determined. 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

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

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

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:

$$s = \sqrt{(\sum X^2 - n\bar{X}^2)/(n-1)} \quad (3)$$

where:

s = estimated standard deviation,
 X = value of single observation,

Continuación anexo 4.

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, 10³ psi, for Eight Laboratories, Five Materials^a

	Mean	S_y	S_R	I_y	I_R
Polypropylene	2.97	1.54	1.65	4.37	4.86
Cellulose acetate butyrate	4.82	0.058	0.100	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	0.898	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_y	S_R	I_y	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.

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

Material	Test Speed, in./min	Values Expressed in psi Units				
		Average	S_y	S_R	r	R
LDPE	20	1544	52.4	84.0	146.6	179.3
LDPE	20	1894	53.1	61.2	148.7	171.3
LLDPE	20	1879	74.2	99.9	207.8	278.7
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	548.1	1041.3
HDPE	2	3523	175.9	478.0	492.4	1336.5

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,

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, average value, and standard deviation,

12.1.13 Date of test, and

12.1.14 Revision date of Test Method D 638.

13. Precision and Bias¹²

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.

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

Material	Test Speed, in./min	Values Expressed in Percent Units				
		Average	S_y	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	7.26
HDPE	2	9.27	1.40	2.84	3.91	7.94
HDPE	2	9.83	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_y	S_R	r	R
LDPE	20	1582	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

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 In Tables 2-10, for the materials indicated, and for test results that derived from testing five specimens:

¹² 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.

Continuación anexo 4.

D 638 - 02a

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	86.2	166.6
LDPE	20	569	61.5	89.2	172.3	249.7
LDPE	20	800	26.7	113.8	71.0	318.7
LDPE	20	64.4	6.68	11.7	18.7	32.6
LDPE	20	803	25.7	104.4	71.9	292.5
LDPE	20	782	41.6	96.7	116.6	270.8

13.1.2.1 S_r is the within-laboratory standard deviation of the average; $I_r = 2.83 S_r$. (See 13.1.2.3 for application of I_r .)

13.1.2.2 S_R is the between-laboratory standard deviation of the average; $I_R = 2.83 S_R$. (See 13.1.2.4 for application of I_R .)

13.1.2.3 *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.

13.1.2.4 *Reproducibility*—In comparing two test results for the same material, obtained by different operators using differ-

ent 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.)

13.1.2.5 Any judgment in accordance with 13.1.2.3 and 13.1.2.4 will have an approximate 95 % (0.95) probability of being correct.

13.1.2.6 Other formulations may give somewhat different results.

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

13.1.2.8 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

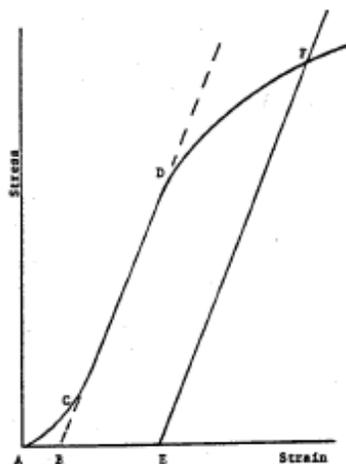
14.1 modulus of elasticity; percent elongation; plastics; tensile properties; tensile strength

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



NOTE 1—Some chart recorders plot the mirror image of this graph.
FIG. A1.1 Material with Hookean Region

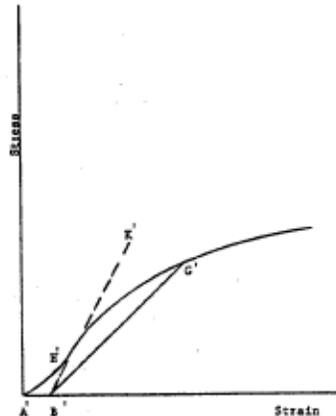
material. It is an artifact caused by a takeup of slack and alignment or seating of the specimen. In order to obtain correct values of such parameters as modulus, strain, and offset yield point, this artifact must be compensated for to give the corrected zero point on the strain or extension axis.

A1.2 In the case of a material exhibiting a region of Hookean (linear) behavior (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 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.

Continuación anexo 4.

ASTM D 638 - 02a



NOTE 1—Some chart recorders plot the mirror image of this graph.
FIG. A1.2 Material with No Hookean Region

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 pounds-force per square inch (megapascals).

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 inches (millimetres). (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*.)

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 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.

Continuación anexo 4.

 D 638 - 02a

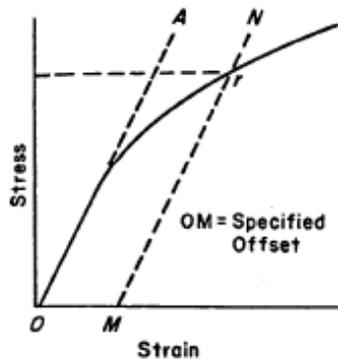


FIG. A2.1 Offset Yield Strength

A2.8.2 *percent elongation at yield*—the percent elongation at the moment the yield point (A2.21) 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 *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).

A2.12 *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.

A2.13 *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.

A2.14 *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.

A2.15 *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.

A2.16 *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.

A2.16.1 *nominal strain at break*—the strain at the moment of rupture relative to the original grip separation.

A2.17 *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 (A2.21), it shall be designated tensile strength at yield. When the maximum stress occurs at break, it shall be designated tensile strength at break.

A2.18 *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 (A2.15), nominal stress calculations may not be meaningful beyond the yield point (A2.21) 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.).

A2.19 *tensile stress-strain curve*—a diagram in which values of tensile stress are plotted as ordinates against corresponding values of tensile strain as abscissas.

A2.20 *true strain* (see Fig. A2.2) is defined by the following equation for ϵ_T :

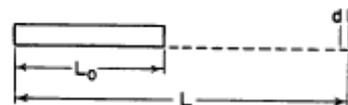


FIG. A2.2 Illustration of True Strain Equation

Continuación anexo 4.

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

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.

A2.21 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.

A2.22 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 A2.17 (Fig. A2.3). (See *offset yield strength*.)

A2.23 Symbols—The following symbols may be used for the above terms:

Symbol	Term
W	Load
ΔW	Increment of load
L	Distance between gage marks at any time
L_0	Original distance between gage marks
L_T	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_0	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
$\%ET$	Percentage elongation
Y.P.	Yield point
E	Modulus of elasticity

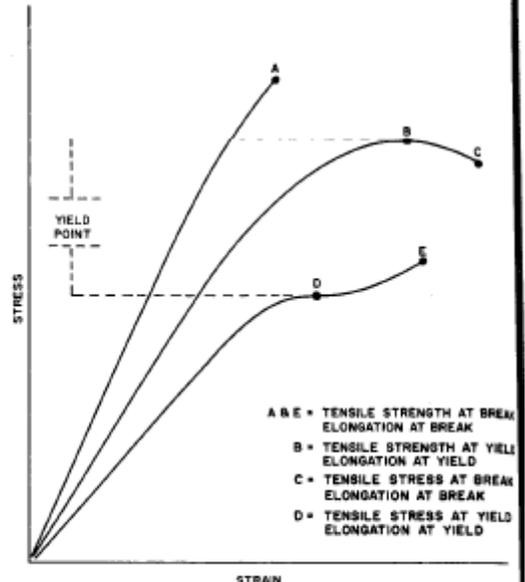


FIG. A2.3 Tensile Designations

A2.24 Relations between these various terms may be defined as follows:

$$\begin{aligned} \sigma &= W/A_0 \\ \sigma_T &= W/A \\ \sigma_U &= W/A_0 \text{ (where } W \text{ is breaking load)} \\ \sigma_{UT} &= W/A_T \text{ (where } W \text{ is breaking load)} \\ \epsilon &= \frac{\Delta L}{L_0} = \frac{(L - L_0)}{L_0} \\ \epsilon_U &= \frac{(L_U - L_0)}{L_0} \\ \epsilon_T &= \int_{L_0}^{L} \frac{dL}{L} = \ln L/L_0 \\ \%ET &= \frac{(L - L_0)}{L_0} \times 100 = \epsilon \times 100 \end{aligned}$$

$$\text{Percent reduction of area (nominal)} = [(A_0 - A_u)/A_0] \times 100$$

$$\text{Percent reduction of area (true)} = [(A_0 - A_T)/A_0] \times 100$$

$$\text{Rate of loading} = \Delta W/\Delta t$$

$$\text{Rate of stressing (nominal)} = \Delta \sigma/\Delta t = (\Delta W/A_0)/\Delta t$$

$$\text{Rate of straining} = \Delta \epsilon/\Delta t = (\Delta L/L_0)/\Delta t$$

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

$$\sigma_T = \sigma(1 + \epsilon) = \sigma U/L_0 \quad (A2.2)$$

$$\sigma_{UT} = \sigma_U(1 + \epsilon_U) = \sigma_U L_U/L_0$$

$$A = A_0/(1 + \epsilon)$$

