



Universidad Autónoma del Estado de México

Facultad de Ingeniería

Ingeniería en Sistemas Energéticos Sustentables

Tesis:

“Caracterización de los materiales fibra de vidrio unidireccional y triaxial mezclados con resina epóxica utilizados en la fabricación de las aspas de un aerogenerador de 30 kW”

María Jazmín Morales Piña

Asesor:

Dra. Miriam Sánchez Pozos

Caracterización de los materiales fibra de vidrio unidireccional y triaxial mezclados con resina epóxica utilizados en la fabricación de las aspas de un aerogenerador de 30 kW.

RESUMEN

Este trabajo presenta la teoría, proceso de manufactura, ensayos y análisis de resultados de pruebas de caracterización mecánica de polímeros reforzados base epoxi con fibra de vidrio en su arreglo unidireccional y triaxial, los cuales fueron utilizados en la fabricación de las aspas de un aerogenerador de 30kW. De esta experimentación se obtuvieron propiedades tales como, el módulo de Young, el esfuerzo permisible a tracción, cortante y compresión. Los valores resultantes fueron comparados con los teóricos calculados, lo cual permitió analizar y cuantificar el porcentaje de afectación presente en la manufactura de las probetas.

Este trabajo es sustentado como parte del proyecto P07: Integración y consolidación de capacidades nacionales para el desarrollo de pequeños aerogeneradores mediante el diseño, construcción y pruebas exhaustivas de un aerogenerador con capacidad de 30kW, del Centro Mexicano de Innovación en Energía Eólica (CEMIE-eólico), bajo los auspicios del Fondo CONACYT-SENER-Sustentabilidad Energética, fue realizado en las instalaciones del Centro de Tecnología Avanzada (CIATEQ) unidad Querétaro.

Contenido

Resumen.....	3
Índice de figuras.....	6
Índice de tablas	9
Introducción	10
Capítulo 1 – Marco Teórico.....	11
1.1 La energía eólica y su relación con el compuesto matriz-fibra.....	12
1.2 Compuesto fibra-matriz	14
1.2.1 Fibra.....	14
1.2.2 Resina.....	16
1.3 Procesos de manufactura del material compuesto fibra-resina	17
1.3.1 Moldeo por contacto	17
1.3.2 Preimpregnados.....	18
1.3.3 Moldeo al vacío.....	18
1.3.4 Moldeo por compresión	19
1.3.5 Variantes de los procesos de manufactura	20
1.4 Propiedades mecánicas del compuesto fibra-matriz.....	20
1.4.1 Análisis macromecánico de un laminado fibra-matriz.....	24
1.4.1.1 Lámina lineal a 0° o 90°	24
1.4.1.2 Láminas colocadas en distintos ángulos	27
1.4.1.3 Laminados.....	30
1.4.2 Análisis micromecánico de una lámina fibra-matriz.....	32
1.4.2.1 Módulo de Young	33
1.4.2.2 Coeficiente de Poisson.....	33
1.4.2.3 Módulo cortante	34
1.5 Pruebas mecánicas del compuesto fibra-matriz	34
1.5.1 Procedimientos.....	36
1.5.1.1 Tensión.....	37
1.5.1.2 Compresión.....	40
1.5.1.3 Cortante.....	43
1.5.2 Contenido de fibra.....	47
1.6 Fallas en los compuestos fibra-matriz.....	48
Capítulo 2 - Desarrollo experimental.....	50
2.1 Matriz de ensayos	51

2.2	Plan de trabajo.....	52
2.2.1	Fibra de vidrio unidireccional (UD).....	53
2.2.1.1	Pruebas de tensión.....	53
2.2.1.2	Pruebas de compresión.....	56
2.2.1.3	Pruebas de cortante	59
2.2.2	Fibra de vidrio triaxial (TRIAX).....	62
2.2.2.1	Pruebas de tensión.....	62
2.2.2.2	Pruebas de compresión.....	65
2.2.2.3	Pruebas de cortante	68
2.3	Materiales.....	71
2.3.1	Infusión	71
2.3.2	Maquinado	73
2.3.3	Pruebas.....	74
2.4	Procedimientos.....	75
2.4.1	Construcción del material compuesto	75
2.4.2	Maquinado de muestras	77
2.4.3	Instrumentación de las probetas.....	80
2.4.4	Caracterización mecánica del material compuesto	82
2.4.4.1	Ensayos de contenido de fibra	82
2.4.4.2	Ensayos de tracción.....	85
2.4.4.3	Ensayos de compresión.....	88
2.4.4.4	Ensayos de cortante.....	90
Capítulo 3	– Resultados	92
3.1	Contenido de fibra.....	93
3.2	Evaluación teórica de las propiedades mecánicas.....	94
3.3	Tensión.....	98
3.4	Compresión	103
3.5	Cortante.....	106
3.6	Análisis general de los resultados	111
Conclusiones	114
Referencias	116
Anexo A.	Deformación nominal.....	119
Anexo B.	Accesorios de carga para pruebas de compresión	120
Anexo C.	Planos para corte de platos antes del pegado de las pestañas	123
Anexo D.	Planos para obtención de muestras finales	128

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Sección transversal de la pala de un aerogenerador danés (Aeroestar). Referencia: (Hau E. , 2006, pág. 236).	13
Figura 2 Tres tipos de tejidos en la fibra de vidrio. Fuente: (SAERTEX, 2019).	15
Figura 3 Esquema moldeo por contacto. Fuente: (Barbero, 2011)	17
Figura 4 Moldeo al vacío. Fuente: (Barbero, 2011).....	19
Figura 5 Pasos del moldeo por compresión. Fuente: (Barbero, 2011).....	19
Figura 6 Direcciones en un material compuesto. Fuente: Elaboración propia.....	21
Figura 7 Representación de esfuerzos. Fuente: (Ferdinand P. Beer, 2010)	21
Figura 8 Comparación de las propiedades de tracción entre la fibra, matriz y el compuesto. Fuente: (Campbell, 2010)	22
Figura 9 Tipos de arreglos para los materiales compuestos. Fuente: (Campbell, 2010).....	23
Figura 10 Representación de una carga aplicada en la dirección 2 de una lámina. Fuente: (Hodgkinson E. b., 2000)	26
Figura 11 Representación de la carga aplicada en la dirección 1-2 de una lámina. Fuente: (Hodgkinson E. b., 2000)	27
Figura 12 Ejes locales y globales de una lámina orientada a cierto ángulo. Fuente: (Hodgkinson E. b., 2000)	27
Figura 13 Representación de la carga aplicada en un laminado con cierto ángulo sobre la dirección x. Fuente: (Hodgkinson E. b., 2000).....	29
Figura 14 Módulo de corte en el plano xy como una función del ángulo de la lámina para una lámina de carbón con resina epóxica. Fuente: (Hodgkinson E. b., 2000)	30
Figura 15 Arreglo [0/30/60] s. Fuente: (Hodgkinson E. b., 2000).	31
Figura 16 Galga extensométrica. Fuente: Vishay Precision Group, 2019	35
Figura 17 Diagramas esfuerzo-deformación de dos materiales dúctiles típicos. Fuente: (Ferdinand P. Beer, 2010)	35
Figura 18 Tabla de clasificación de normativa. Fuente: Elaboración propia.....	37
Figura 19 Ubicación de las galgas en una probeta de tensión. Fuente: (ASTM International, 2017).....	38
Figura 20 Probeta con pestañas. Fuente: Elaboración propia	39
Figura 21 Obtención de cupones con pestañas. Fuente: ISO 527-5:2009 pág.10.....	39
Figura 22 Ubicación de galgas en cupones para pruebas de compresión. Fuente: (ASTM D6641/D6641M-16, 2016)	41
Figura 23 Modos y áreas de falla en probetas para pruebas de compresión. Fuente: (ASTM D6641/D6641M-16, 2016)	42
Figura 24 Plato con pestañas para pruebas de compresión. Fuente: ISO 14126:1999 pág. 13	43
Figura 25 Representación de prueba de cortante y ubicación de galgas. Fuente: (ASTM D5379M, 2012).....	44
Figura 26 Espécimen para pruebas de cortante, dimensiones en mm. Fuente: ISO 14126:1997 pág. 3....	44
Figura 27 Tipos de fallas en un laminado. Fuente: (Daniel Gay, 2003).	49
Figura 28 Modos de falla ocasionados por cargas excedentes. Fuente: (Daniel Gay, Composite Materials Design and Applications, 2003).....	49
Figura 29. Dirección de carga aplicada en las probetas (dimensiones en mm). Fuente: Elaboración propia	53
Figura 30. Dirección de flujo de resina y filamentos de la fibra de vidrio en el plato de fabricación AA (dimensiones en mm). Fuente: Elaboración propia.....	54

Figura 31. Acomodo de muestras en el plato (dimensiones en mm). Fuente: Elaboración propia.....	55
Figura 32. Dirección de carga aplicada en los cupones (dimensiones en mm). Fuente: Elaboración propia.	56
Figura 33 Dirección de flujo de resina y filamentos de la fibra de vidrio en el plato de fabricación AB (dimensiones en mm). Fuente: Elaboración propia.....	57
Figura 34 Acomodo de especímenes en el plato (dimensiones en mm). Fuente: Elaboración propia.....	58
Figura 35. Orientación y dimensionamiento de cupón para pruebas de cortante UD (dimensiones en mm). Fuente: Elaboración propia.....	59
Figura 36. Dirección de flujo de resina y dirección de filamentos de la fibra de vidrio en el plato de fabricación AC (dimensiones en mm). Fuente: Elaboración propia.....	60
Figura 37 Acomodo de especímenes en el plato (dimensiones en mm). Fuente: Elaboración propia.....	61
Figura 38 Dimensiones y dirección de carga de los cupones para pruebas de tensión con fibra TX (dimensiones en mm). Fuente: Elaboración propia.....	62
Figura 39 Dirección de flujo de resina y dirección de filamentos de la fibra de vidrio en el plato de fabricación AD (dimensiones en mm). Fuente: Elaboración propia.....	63
Figura 40 Acomodo de especímenes en el plato AD (dimensiones en mm). Fuente: Elaboración propia.	64
Figura 41 Dimensiones y direcciones de carga de los cupones para el plato AE (dimensiones en mm). Fuente: Elaboración propia.....	65
Figura 42 Dirección de flujo de resina y filamentos de la fibra de vidrio en el plato de fabricación AE (dimensiones en mm). Fuente: Elaboración propia.....	66
Figura 43 Acomodo de especímenes en el plato AE (dimensiones en mm). Fuente: Elaboración propia..	67
Figura 44 Orientación de las fibras, dirección de carga y dimensionamiento del cupón para pruebas de cortante triaxial (dimensiones en mm). Fuente: Elaboración propia.....	68
Figura 45 Dirección de flujo de resina y dirección de filamentos de la fibra de vidrio en el plato de fabricación AF (dimensiones en mm). Fuente: Elaboración propia.....	69
Figura 46 Acomodo de especímenes en el plato AF, dimensiones en mm.....	70
Figura 47 Patrones utilizados y trazabilidad metrológica del laboratorio de CIATEQ Hidalgo. Referencia: Informe de medición LSH-18-140 pdf.....	75
Figura 48 Obtención de capas de fibra de vidrio.....	75
Figura 49 Malla de flujo en el plato.....	76
Figura 50 Infusión.....	77
Figura 51 Placas de compuesto terminadas.....	77
Figura 52 Plato con cortes y piezas.....	78
Figura 53 Dimensiones de resguardos (mm).....	79
Figura 54 Presión en los pegados de los platos para el pegado de los resguardos.....	79
Figura 55 OMAX máquina cortadora a chorro de agua.....	80
Figura 56 Probetas después los segundos cortes.....	80
Figura 57 Galgas extensométricas.....	81
Figura 58 Pegado de galga.....	82
Figura 59 Muestras AHFVF.....	83
Figura 60 Colocación de la muestra en el horno de mufla.....	84
Figura 61 Peso de la muestra después de la calcinación.....	84
Figura 62 Resultado de pruebas de contenido de fibra.....	85
Figura 63 Errores de pegado.....	86
Figura 64 Paquete de muestras AATUD0.....	86
Figura 65 Probeta montana en la máquina universal al final del ensayo.....	87
Figura 66 Fallas en pruebas de tensión.....	87

Figura 67 Probetas para pruebas de compresión.....	88
Figura 68 Probeta para pruebas de compresión instrumentada.....	88
Figura 69 Cupón de compresión acoplado a la maquina universal.....	89
Figura 70 Muestra AETXCO-093-02 después de la prueba de compresión.....	89
Figura 71 Prueba de ensayo a cortante.....	90
Figura 72 Muestra de pruebas de cortante con galga a 90°.....	90
Figura 73 Prueba de cortante	91
Figura 74 Coeficientes para la determinación de propiedades mínimas. Fuente: (GL, 2006).....	94
Figura 75 Laminado compuesto con fibra triaxial. Fuente: Elaboración propia.....	95
Figura 76 Gráfico del ensayo AAUDT0-001-01	100
Figura 77 Gráficas de pruebas de tensión a 0° fibra unidireccional	100
Figura 78 Gráficas de pruebas a tensión a 90° fibra unidireccional	101
Figura 79 Gráficas de pruebas de tensión a 0° con fibra triaxial	101
Figura 80 Gráfico de ensayo ADTXT90-080-01	102
Figura 81 Gráficas de pruebas de tensión a 90° con fibra triaxial.	102
Figura 82 Gráfico del ensayo ABUDC0-029-04	105
Figura 83 Gráfico del ensayo AETXC0-094-04	105
Figura 84 Gráfico del ensayo ACUDC45-055-05	108
Figura 85 Gráficas de pruebas de cortante con fibra unidireccional.....	108
Figura 86 Diagrama de esfuerzo cortante. Referencia ISO 14129-1997	109
Figura 87 Gráfico del ensayo AFTXC45-119-02	109
Figura 88 Gráficas para pruebas de cortante con fibra triaxial	110
Figura 89 Análisis estructural en el software FOCUS	113
Figura 90 Diagrama esquemático del accesorio para pruebas de compresión por el método 1 de la norma ISO 14126. Fuente: ISO 14126:1999 pág. 9.....	120
Figura 91 Accesorio de prueba ASTM D 3410/B (ITTRI). Referencia ISO 14126:1999 pág. 14	120
Figura 92 Diagrama esquemático del accesorio para ensayo de compresión descrito en el método 2 de la norma ISO 14126. Fuente: ISO 14126:1999 pág. 10.....	121
Figura 93 Fotografía de un accesorio de carga a compresión combinada típica. Fuente: ASTM D6641M pág. 2.....	121
Figura 94 Accesorio tipo ASTM D95 (modificado). Fuente: ISO 14126:1999 pág. 16.....	122

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Efecto de la fibra y la matriz en las propiedades mecánicas del compuesto. Fuente: (Campbell, 2010)	24
Tabla 2 Dimensiones de muestras para pruebas de compresión.	42
Tabla 3 Fracciones de volumen de fibra comunes en diferentes procesos Referencia: (Daniel Gay, Composite materials, design and applications , 2003).....	48
Tabla 4 Espesores y promedios de una capa de los materiales descritos	51
Tabla 5 Matriz de ensayos	52
Tabla 6 Materiales requeridos para platos de fibra UD y TRIAX. Fuente: Elaboración propia	72
Tabla 7 Metros totales de fibra requeridos.....	72
Tabla 8 Cantidad total de resina y catalizador requeridos	72
Tabla 9 Aproximación de los consumibles utilizados. Fuente: Elaboración propia	73
Tabla 10 Cuantificación de resguardos para cupones de prueba de caracterización mecánica. Fuente: Elaboración propia	73
Tabla 11 Galgas extensométricas. Fuente: Elaboración propia	74
Tabla 12 Capacidades de la máquina para cada tipo de prueba. Fuente: Elaboración propia.....	74
Tabla 13 Clasificación de muestras para ensayo de contenido de fibra. Fuente: Elaboración propia.	82
Tabla 14 Resultados de ensayo de contenido de fibra. Fuente: Elaboración propia	93
Tabla 15 Fracción volumétrica de la fibra. Fuente: Elaboración propia.....	93
Tabla 16 Fracción volumétrica de los materiales utilizados. Fuente: Elaboración propia.....	93
Tabla 17 Propiedades de los platos para pruebas de tensión. Fuente: Elaboración propia	98
Tabla 18 Observaciones de placas para pruebas de tensión. Fuente: Elaboración propia	99
Tabla 19 Promedios de las dimensiones de las muestras para pruebas de tensión	99
Tabla 20 Resultados finales pruebas de tensión con fibra triaxial	103
Tabla 21 Resultados finales pruebas de tensión con fibra unidireccional.....	103
Tabla 22 Características de las placas para pruebas de compresión. Fuente: Elaboración propia.....	103
Tabla 23 Observaciones placas para pruebas de compresión	104
Tabla 24 Dimensiones finales pruebas de compresión	104
Tabla 25 Resultados finales ensayos de compresión con fibra unidireccional	106
Tabla 26 Resultados finales ensayos de compresión con fibra triaxial.....	106
Tabla 27 Características de las placas para pruebas de cortante. Fuente: Elaboración propia.....	106
Tabla 28 Dimensiones de las probetas para ensayos de cortante.....	107
Tabla 29 Observaciones a placas para pruebas de cortante. Fuente: Elaboración propia	107
Tabla 30 Resultados de pruebas de cortante con fibra unidireccional	110
Tabla 31 Resultados de pruebas de cortante con fibra triaxial.....	110
Tabla 32 Valores teóricos	111
Tabla 33 Tabla general de resultados del valor de los módulos de elasticidad en pruebas experimentales	112

INTRODUCCIÓN

Las propiedades de los plásticos (resinas) reforzados con fibra de vidrio son fuertemente influenciadas por su manufactura (Bent F. Sorensen, 2010). La presencia de defectos relacionados con la fabricación como la ondulación y la desalineación de la fibra provocan una falta de conjugación entre las propiedades de cada uno de los materiales involucrados, por lo que de acuerdo a la forma de manufacturarlos puede existir una significativa diferencia entre sus propiedades. Estos defectos se presentan de manera habitual en las aspas, por lo tanto, se requirió de una caracterización para cerciorarse de que, a pesar de estos, las propiedades del material en el aspa no excedan los factores de seguridad establecidos en el diseño.

El objetivo del presente fue fabricar probetas con arreglos de fibra de vidrio unidireccional y triaxial mezcladas con resina epóxica, para llevar a cabo pruebas de tensión, compresión y cortante con el fin de obtener propiedades tales como el módulo de elasticidad, la relación de Poisson, el módulo cortante, el esfuerzo de tensión permisible y su relación fibra-resina de los materiales. Analizar los resultados obtenidos, permitió conocer de qué manera afectan cada una de las fallas en la manufactura de las aspas, así como validar las propiedades que se utilizaron en el diseño del aerogenerador de 30 kW, lo que a su vez beneficiará en su posible certificación. La base de datos final es de gran valor académico para CIATEQ, ya que funcionará como guía en futuros proyectos.

En el capítulo 1 se encuentra la base teórica del trabajo (definiciones, conceptos y formulas), también se mencionan las recomendaciones de las normas que se eligieron como base para la realización de este proyecto. En el capítulo 2 se describe el procedimiento experimental, desde la propuesta de las características de los especímenes, pasando por la manufactura en donde estos se maquinaron, midieron y clasificaron, hasta terminar efectuando los ensayos de caracterización. El capítulo 3 expone el análisis y discusión de los resultados de las pruebas, en donde estos se comparan con los valores teóricos calculados.

CAPÍTULO 1 – MARCO TEÓRICO

1.1 LA ENERGÍA EÓLICA Y SU RELACIÓN CON EL COMPUESTO MATRIZ-FIBRA

La innovación en las formas de obtener energía eléctrica radica principalmente en la necesidad de reducir la contaminación del ambiente. Actualmente, una de las tecnologías con más apuesta a su innovación es la energía eólica, la cual “genera energía eléctrica a través de la fuerza del viento, mediante la utilización de la energía cinética producida por efecto de las corrientes de aire” (Asociación Empresarial Eólica, 2018). El viento es una fuente de energía limpia e inagotable, al utilizarse en las turbinas eólicas no produce emisiones de CO_2 , esto permite que sea una excelente alternativa para sustituir a los combustibles fósiles.

La energía eólica ha crecido de manera impresionante los últimos años: se estima que, en el 2020 está contribuyendo a satisfacer el 8.2% de la demanda mundial de electricidad (Sathyajith Mathew, 2011). En México la importancia y desarrollo de la energía eólica también ha crecido, la principal razón es el gran potencial que tiene el país en dicho recurso. Al respecto, la zona sur es acreedora de un buen calentamiento en la superficie terrestre, el cual por medio de la evaporación del agua (que provoca la radiación solar) favorece la creación de zonas con excelentes corrientes de aire, un claro ejemplo es el Istmo de Tehuantepec en el estado de Oaxaca, en el cual ahora existen grandes parques eólicos (M.A., 2013).

Los avances tecnológicos han permitido fabricar turbinas cada vez más grandes, con mayor eficiencia en su rendimiento, más confiables, e incluso se han instalado en ambientes de trabajo adversos; no menos importantes son los retos que imponen los altos consumos de energía, pues estos provocan que se necesite instalar una mayor cantidad de formas de producir energía eléctrica alrededor del mundo. Dentro de los países que hoy en día son pioneros en energía eólica se encuentran Holanda, EUA, China, España y Alemania entre otros (Gasch R., Teweel J., Ohde. K., & Schubert M., 2012).

Actualmente, existen diversos tipos de aerogeneradores, tanto de eje horizontal como de eje vertical sus componentes son: una torre, el buje o cubo (en donde se encuentra el generador eléctrico) y los mecanismos de control. Por último, se tienen las aspas cuyo diseño varía de acuerdo a cada aerogenerador. Los de eje horizontal, son los más utilizados y se conforman principalmente de tres aspas consideradas el elemento más importante de la turbina, pues es el elemento que se encarga de aprovechar al máximo la energía del viento (Hau E. , Load and structural stresses, 2006).

El diseño de las aspas del aerogenerador sigue las aportaciones de la tecnología aerodinámica, y los materiales utilizados en su fabricación, deben ser capaces de proporcionar la resistencia estructural y la rigidez necesaria, además de garantizar una alta integridad estructural en ambientes severos, por lo tanto, estos procesos requieren de una exhaustiva examinación (A. R. Jha, 2011). De los elementos usados en los aerogeneradores, dos de los más importantes son los composites y el acero. Los primeros, se utilizan en las aspas y generalmente están constituidos de al menos dos materiales diferentes; comúnmente fibras sostenidas por resina usada como matriz (J. F. Manwell, 2002).

Los materiales compuestos logran propiedades superiores a las que tienen cada uno de los materiales de forma individual, las fibras proporcionan la mayor parte de la rigidez y resistencia. La matriz une las fibras entre sí, lo que facilita la transferencia de cargas entre estas. Además, protege a las fibras de los daños que sufren debido al ambiente (Harry S. Katz and John V. Milewski, 1987).

Las aspas consisten de un larguero encerrado entre dos piezas formando un álabe, el objetivo principal es darle al aspa una forma aerodinámica para crear fuerzas que permitan hacer rotar la turbina eólica, las cuales se transmiten al cubo de la turbina a través del larguero, que a su vez se fabrica como una viga de carga o como laminados de fibra dentro del álabe (Hau E. , Load and structural stresses, 2006).

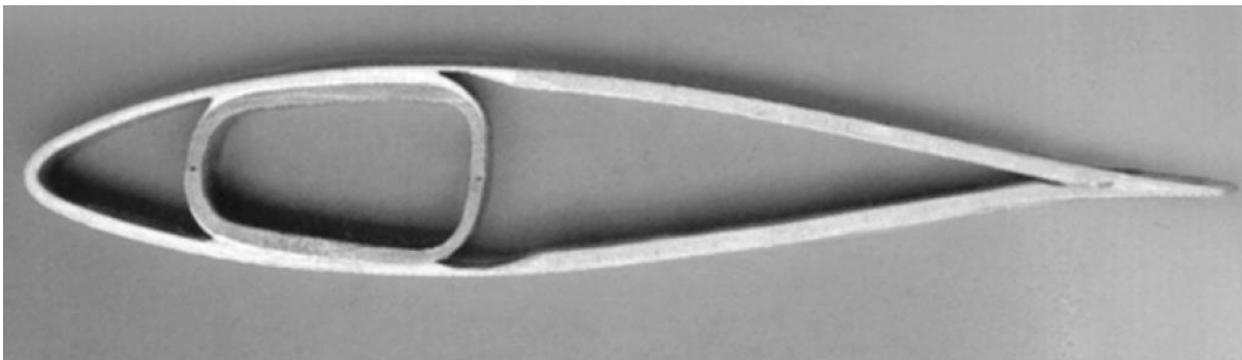


Figura 1 Sección transversal de la pala de un aerogenerador danés (Aeroestar). Referencia: (Hau E. , 2006, pág. 236).

Entre las técnicas más comunes para manufacturar las aspas se encuentra la de laminado que consiste en poner las capas de fibra de vidrio en un molde negativo e impregnar con resina todo el material, para eso se utiliza un proceso de curado a temperatura ambiente o a temperaturas mayores (entre 70 y 80 °C). Existen también varias técnicas para la aplicación de la resina, la más utilizada es la que se hace provocando un vacío superficial en los materiales, en este proceso la presión succiona la resina y así se obtiene una aplicación uniforme, más exitosa y rápida, también ayuda a tener un control adecuado de la proporción fibra-resina.

Además de fibra de vidrio también suele utilizarse fibra de carbono. Este material tiene una baja densidad, ofrece un módulo de elasticidad mayor, alta resistencia y una buena vida útil a la fatiga, la fibra de carbono se usa en el aspa como un material para refuerzo selectivo, dentro de sus pocas pero importantes desventajas, están el alto costo, la sensibilidad a defectos relacionados con la ondulación de la fibra y su alta conductividad eléctrica (Hau E. , Rotor Blades, 2006).

El material con el que se fabrica el aspa necesita ser lo suficientemente resistente para soportar las fuerzas que genera el peso de esta más las fuerzas centrífugas provocadas por el viento. Dichos estados se conocen como estados límite y se definen como una fase más allá en la cual la estructura ya no satisface los requisitos. Las siguientes categorías de estados límite son relevantes para las estructuras: estado límite final (ULS), estado límite de fatiga (FLS) y estado límite de servicio (SLS), por lo que para asegurarse de que los materiales tengan las propiedades adecuadas se debe llevar a cabo una caracterización (Hau E. , Vibrations problems, 2006).

1.2 COMPUESTO FIBRA-MATRIZ

En la industria el término “compuesto” es el que mejor describe a los plásticos reforzados, desde su desarrollo, estos materiales son conocidos comúnmente por sus siglas en inglés como GRP (Plástico Reforzado con Fibra de Vidrio) o FRP (Plástico Reforzado con Fibra). Para producir un material compuesto se necesitan dos componentes básicos: fibra y resina, si así se requiere pueden contener más de dos materiales (Barbero, 2011). Lo que hace únicos a los materiales compuestos es que el material de construcción y el producto final se producen simultáneamente, además de ser materiales ligeros, duraderos y sorprendentemente resistentes (Scott Bader Company Limited, 2005). Los constituyentes individuales se describen a continuación:

1.2.1 Fibra

La fibra se puede clasificar por su longitud, de acuerdo a su resistencia y/o rigidez, o según su composición química, orgánica e inorgánica (Barbero, 2011). Las fibras inorgánicas utilizadas en los materiales compuestos son las hechas de vidrio, carbono, boro, cerámica, mineral y metal. En el caso de las fibras orgánicas las más utilizadas son las poliméricas. En una segunda clasificación se tienen fibras continuas, discontinuas o en partículas, estas difieren en el tamaño en el que se presentan los filamentos.

Para realizar la selección de alguna fibra se analiza principalmente la compensación entre el costo y las propiedades mecánicas y ambientales de cada una, por ejemplo, para producir un compuesto con fibras continuas se deben usar métodos específicos los cuales resultan ser costosos y lentos pues requieren generalmente de colocación manual, preparación de preimpregnado, un proceso de embolsado al vacío (dependiendo del método de fabricación usado), de la inyección de resina y el curado de la pieza. De manera contraria usar fibras discontinuas facilita su manufactura pues se utiliza el moldeo por inyección, este es más rápido y de menor costo, sin embargo, la carga en los materiales compuestos se transfiere principalmente de fibra a fibra a través de la matriz y debido a esto la fuerza resultante en la fibra discontinua es menor, entonces si se desea la máxima resistencia y rigidez se utilizan fibras continuas (Barbero, 2011).

Las propiedades más destacadas de la fibra de vidrio son: su dureza, resistencia a la corrosión, flexibilidad, ligereza, además es económica a comparación con otras fibras como las de carbono, por lo tanto, ésta es el tipo de fibra más utilizada en aplicaciones industriales. La fibra de vidrio se procesa a partir de vidrio a granel, el cual es una sustancia amorfa fabricada a partir de una mezcla de arena, piedra caliza y otros compuestos oxidados, su principal constituyente es el dióxido de silicio (SiO_2).

La composición química de la fibra se puede controlar logrando obtener una amplia variedad de fibras de vidrio para distintas aplicaciones. Todas ellas tienen una rigidez similar, pero diferentes valores de resistencia y firmeza a la degradación ambiental. Una alta resistencia, por ejemplo, se atribuye al bajo número y tamaño de los defectos en la superficie de la fibra. De acuerdo entonces a su composición química, existe otra clasificación: las fibras de vidrio E que se utilizan cuando se requiere una alta resistencia a la tracción y buena resistencia química.

Las fibras S y S-2 tienen la mayor resistencia, pero son de aplicación limitada debido a su alto precio en el mercado. Se tienen también las de tipo C, que son las que tienen mejor resistencia a la corrosión; las D son utilizadas para aplicaciones eléctricas, por ejemplo, el refuerzo del núcleo de aisladores cerámicos de alto voltaje. Las A y AR se utilizan para velos o esteras (piezas de tejido) de superficies livianas, y por último se tienen las tipo R, fibras de vidrio europeas con un alto módulo, resistencia, así como buena humedad y estabilidad a la fatiga, este tipo de fibras son usadas en aplicaciones industriales de alto rendimiento (Lee, 1991).

La fibra de vidrio en su forma continua se puede encontrar en tres arreglos, unidimensional, bidimensional y tridimensional. Las formas unidimensionales se presentan como cables, hilos o cintas en una dirección, bidimensionalmente se tiene a los tejidos o fieltros (textil no tejido) y tridimensionalmente se encuentran las telas con fibras orientadas en más de tres direcciones en forma de trenzas (Daniel Gay, Composite Materials Design and Applications, 2003).

La fibra en un producto de carácter aerodinámico generalmente está representada como tejidos en una o más direcciones (bidimensional) Figura 2, de esta manera se obtiene un efecto de refuerzo multiaxial. Todos los tejidos bidimensionales están descritos por su arquitectura y peso por unidad de área de superficie representada en g/m^2 , la arquitectura de la fibra se refiere a la orientación y el peso de cada componente del tejido (Barbero, 2011).

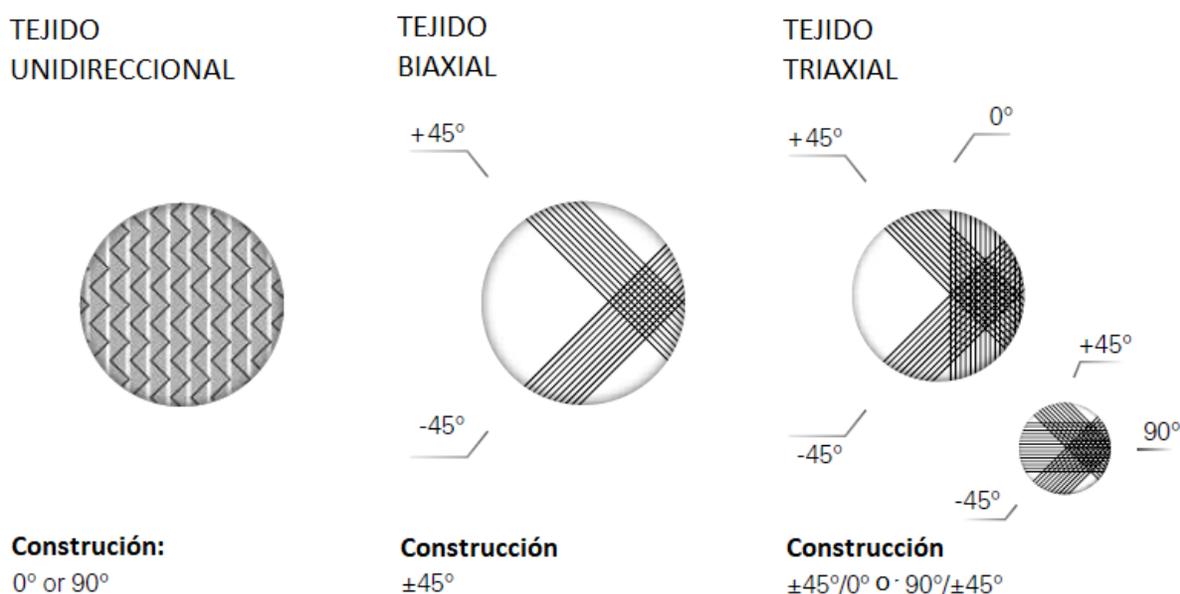


Figura 2 Tres tipos de tejidos en la fibra de vidrio. Fuente: (SAERTEX, 2019).

Existe otra forma de presentar a los refuerzos con fibra de vidrio, conocidos como materiales de núcleo de baja densidad, se utilizan para aumentar la rigidez sin aumentar el peso de la pieza. Hay dos categorías; estructural y no estructural. Algunos de los más comunes son las hojas de poliuretano de células rígidas usadas en aplicaciones no estructurales. Existen también las espumas de PVC (cloruro de polivinilo) las cuales son duras, rígidas y de alta resistencia, están disponibles como hojas lisas, perforadas o telas de malla. Por último, se tiene la espuma de acrilonitrilo

estireno, este material combina la alta resistencia y rigidez con baja absorción de agua, lo hace ideal para su uso en aplicaciones de flotabilidad en el mar (Scott Bader Company Limited, 2005).

1.2.2 Resina

La resina utilizada puede ser un poliéster, epoxi o viniléster, normalmente se suministra como un líquido viscoso que se convierte en un sólido cuando reacciona adecuadamente. En los materiales compuestos las resinas sirven como matriz, estas mantienen juntas a las fibras y son las encargadas de transportar algunas cargas, principalmente las de tensión transversal. La matriz también determina la apariencia final de la pieza, así como las condiciones de servicio permisible dentro de las cuales se encuentran: el rango de temperatura, resistencia química, resistencia de abrasión y capacidad de resistencia a la intemperie (Barbero, 2011).

Las resinas están compuestas por grandes cadenas de moléculas conocidas como polímeros, estas se producen natural o sintéticamente. La mayoría de las resinas sintéticas están hechas de productos químicos derivados del petróleo comúnmente llamadas “plásticos”; entre las producidas naturalmente se encuentran: la celulosa, las proteínas y el caucho (Scott Bader Company Limited, 2005). Existen tres tipos de matrices que pueden ser utilizadas en materiales compuestos, las cuales se describen a continuación:

- Matriz polimérica: resinas termoplásticas y resinas termoestables
- Matriz mineral: carburo de silicio, carbono
- Matriz metálica: aleaciones de aluminio, titanio y eutécticos orientados.

Los materiales compuestos de matriz polimérica son los más utilizados debido a que las resinas termoestables tienen una baja viscosidad lo cual, permite una excelente impregnación del refuerzo de fibra y se clasifican de la siguiente forma:

- Resinas de poliéster: buena relación rendimiento/costo y baja viscosidad.
- Resinas de éster vinílico: propiedades elevadas de alargamiento y resistencia a la corrosión, altamente resistentes a los ácidos, álcalis, disolventes, hipocloritos y peróxidos.
- Resinas epoxi: altas propiedades mecánicas, como resistencia a la corrosión, excelentes características de unión cuando se usan con adhesivos y tienen un proceso de curado simple.
- Resinas fenólicas: baja inflamabilidad, poca producción de humo, buena estabilidad dimensional y elevadas propiedades adhesivas.

Las resinas termoplásticas son el segundo tipo dentro de las matrices poliméricas, estas no sufren ninguna transformación durante su manufactura y tienen una alta viscosidad, lo que dificulta su procesamiento al mezclarse con las fibras.

Para que la resina presente su punto físico final (estado sólido) necesita de un catalizador: los más utilizados son los peróxidos orgánicos en combinación con resinas poliéster por ejemplo: el peróxido de metil etil cetona (MEKP), el peróxido de ciclohexanona (CHP), el peróxido de acetyl acetona (AAP) y el peróxido de benzoilo (BPO), (Scott Bader Company Limited, 2005).

1.3 PROCESOS DE MANUFACTURA DEL MATERIAL COMPUESTO FIBRA-RESINA

El proceso de fabricación es la consideración inicial en el diseño de una estructura de material compuesto, esto se debe a que el tipo de matriz y fibras que se elijan afectan directamente en el costo, volumen de producción y adecuación del proceso. Cada uno impone limitaciones particulares en el diseño estructural, los principales pasos se pueden resumir de la siguiente forma:

- El tendido o colocación de fibras en el molde
- Impregnación de las fibras con resina
- Curado o solidificación del polímero
- Extracción del molde
- Devanado de filamentos (recorte)

Cualquiera que sea la técnica empleada para producir un material compuesto, la construcción del molde juega un papel vital. Éste asegura la calidad final del componente. Un molde generalmente está fabricado de madera, metal, yeso, plásticos o compuestos, además de varias capas de otros elementos como el gelcoat que es un material basado en resina epóxica o de poliéster utilizado para darle un terminado de alta calidad. El molde puede ser de tipo macho o hembra, dependiendo de cuál es la superficie que se requiere lisa. Las técnicas usadas para fabricar un material compuesto se describen a continuación:

1.3.1 Moldeo por contacto

Es el proceso de fabricación más simple y utilizado, implica la colocación manual de los refuerzos (fibra) y la resina en el molde. Para facilitar la aplicación de la resina se utilizan rodillos manuales así se obtiene una distribución uniforme y la eliminación de las bolsas de aire. Como se observa en la Figura 3, el primer paso es colocar las fibras en el molde e ir humedeciéndolas con resina enseguida la siguiente capa de refuerzo y así sucesivamente hasta lograr el espesor deseado.

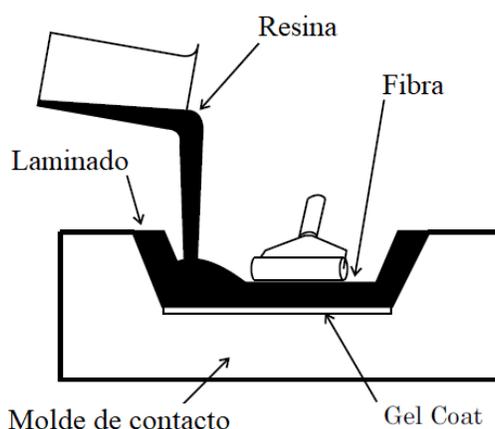


Figura 3 Esquema moldeo por contacto. Fuente: (Barbero, 2011)

Posteriormente comienza el proceso del curado: dependiendo del tipo de resina esta requerirá solo del catalizador y de temperatura ambiente, en caso contrario, existen resinas que necesitan de

la adición de calor para iniciar este proceso. El curado a temperatura ambiente es lento, puede tardar incluso días; para reducir el tiempo se puede someter a la pieza a un poscurado en el cual después de 3 horas a temperatura ambiente, está se eleva con ayuda de calentadores y sopladores durante 8 horas posteriores o más, según se requiera.

Después del curado se presenta el desmolde de la pieza, este paso puede facilitarse con la aplicación de películas plásticas o cera en el molde antes del acomodo de las fibras. Las piezas pesadas suelen ser más difíciles de desmoldar y se requieren de herramientas como mazos de goma. Como es de esperarse en los bordes del molde puede quedar material adicional a la pieza entonces son cortadas con tijeras o cuchillas teniendo cuidado de no delaminar el material hasta obtener el acabado deseado.

1.3.2 Preimpregnados

Esta clase de moldeo se trabaja con un material en donde desde un inicio la resina está parcialmente curada o espesada, las fibras pueden encontrarse en forma unidireccional, telas tejidas o como laminados. Lo que difiere este moldeo del manual es que las fibras se encuentran impregnadas a la fibra desde un principio. La mayoría de los preimpregnados están hechos de sistemas de resina epóxica y los refuerzos generalmente incluyen vidrio, carbono y fibras de aramida.

Los preimpregnados suelen utilizarse para piezas aeroespaciales de alto rendimiento y geometrías complejas. Sin embargo, el contenido de resina en este proceso es muy alto por lo tanto se requiere de un procedimiento extra para eliminarla ya que produce vacíos en el material, esto es necesario porque en cada 1% de huecos hay una resistencia al corte del 7% y se producen reducciones significativas en la resistencia a la compresión para un contenido de vacío superior al 2% (Reinhart, 1987).

1.3.3 Moldeo al vacío

Para realizar una pieza de material compuesto con moldeo al vacío primero se colocan las películas plásticas en el molde para facilitar la liberación final de la pieza, enseguida se acomodan los laminados de fibra para cubrirse con una bolsa flexible perfectamente sellada, luego se aplica el vacío para extraer el aire de la bolsa. Proceso durante el cual, la presión atmosférica actúa uniformemente sobre el laminado. Sin liberar el vacío, por medio de una entrada se agrega la resina, se aplica calor para curar la pieza y se obtiene el resultado final. Ver Figura 4.

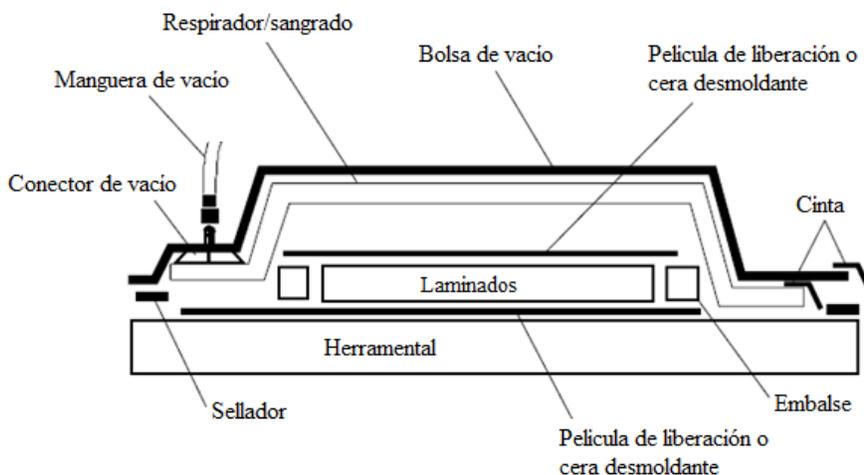


Figura 4 Moldeo al vacío. Fuente: (Barbero, 2011)

La presión que se aplica antes de que la pieza cure mejora la consolidación de las fibras y elimina el exceso de resina, aire y compuestos volátiles de la matriz. Las bolsas de vacío permiten la producción de piezas grandes de alta calidad y de menor costo.

1.3.4 Moldeo por compresión

El moldeo por compresión requiere un molde de metal de dos matrices emparejadas (macho y hembra) para formar la pieza deseada. Después de prepararlos, se les carga con cierta cantidad de fibra y resina, entonces se utiliza una prensa hidráulica que usando calor y una presión alta cura la pieza cerrando las matrices, como se muestra en la Figura 5. Una vez curado el material se libera la presión y se expulsa la pieza del molde.

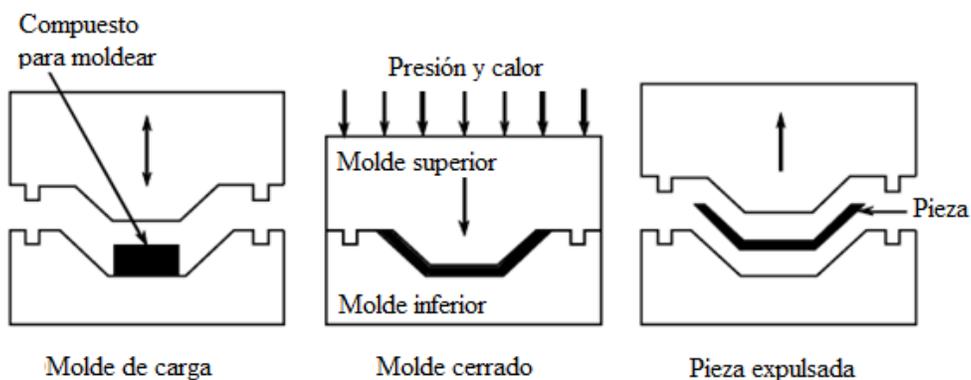


Figura 5 Pasos del moldeo por compresión. Fuente: (Barbero, 2011).

Este proceso es simple y se puede automatizar fácilmente, lo que permite un alto volumen de producción. Dentro de sus ventajas están: mano de obra mínima, bajo nivel de desperdicios y reducción del acabado secundario. Como desventajas se tiene que la prensa es la parte más cara y no permite un alto contenido de fibra por lo que este método no es adecuado para estructuras primarias.

1.3.5 Variantes de los procesos de manufactura

Además de los cuatro tipos de procesos de manufactura presentados existe una gran cantidad de variantes dentro de los cuales se encuentra el moldeo por transferencia (RTM) en el que se bombea la resina al refuerzo seco en un molde cerrado hasta llenarlo por completo de ahí se procede al curado. El moldeo por transferencia de resina asistida por vacío (VARTM), en el que el flujo de resina puede ser asistido por microprocesadores integrados en el molde, la presión aplicada al refuerzo impregnado se debe a la diferencia de presión entre el vacío aplicado y la acción de la presión atmosférica sobre la superficie expuesta. Algunos aspectos de esta tecnología están patentados y comercializados con el nombre de SCRIMP™ (Hard Core Dupont SCRIMP Systems).

Pultrusión es un proceso de fabricación continuo, de bajo costo, el cual logra la conversión directa de fibras continuas y resina en una pieza terminada, las cuales se impregnan continuamente y se estiran a través de una matriz calentada en donde se conforman y curan. La mayoría de las formas generadas a través de éste, son superficies de revolución como cilindros y esferas. Por último, el moldeo por inyección de resina, en donde los refuerzos en forma de telas se colocan entre el molde y el contra molde en donde se inyecta la resina. La presión en este proceso es baja por lo tanto la inversión es menos costosa y tiene una gran aplicación en carrocerías de automóviles (Barbero, 2011).

1.4 PROPIEDADES MECÁNICAS DEL COMPUESTO FIBRA-MATRIZ

La función de un material se determina de acuerdo a sus propiedades. Se ha mencionado que los compuestos fibra-matriz son los mejores para utilizar en los aerogeneradores. Para llegar a esta afirmación se debía conocer primero la capacidad del material para resistir las cargas a las que estará expuesta sin tener una deformación excesiva o una falla, esta propiedad es inherente al material mismo y debe determinarse por experimentación. Entre las pruebas más importantes están las de tensión y compresión (Hibbeler, 2006). Antes de explicar a detalle el procedimiento experimental, se describen los conceptos básicos y el comportamiento común de los materiales compuestos.

En general todos los materiales pueden clasificarse como isotrópicos o anisotrópicos, los materiales isotrópicos tienen las mismas propiedades en todas las direcciones y las cargas que se les aplican solo crean deformaciones normales¹. Los materiales anisotrópicos en cambio tienen propiedades diferentes en todas las direcciones y las cargas crean tanto deformaciones normales como deformaciones a cortante². Los compuestos suelen tratarse como materiales anisotrópicos, pertenecientes a la subclase ortotrópicos, estos tienen propiedades en tres direcciones mutuamente

¹ “La deformación unitaria normal es el alargamiento o contracción de un segmento de línea por unidad de longitud” (Hibbeler, 2006).

² “La deformación unitaria cortante es el cambio de ángulo que ocurre entre dos segmentos de línea, inicialmente perpendiculares entre sí” (Hibbeler, 2006).

perpendiculares, las características ortotrópicas son una función de la orientación, por lo tanto, las deformaciones son definidas debido a la orientación en la que la carga es aplicada (Figura 6).

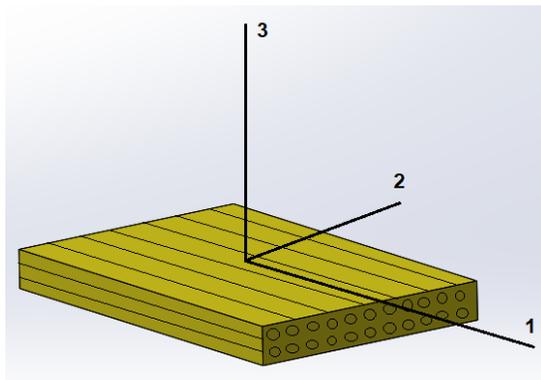


Figura 6 Direcciones en un material compuesto. Fuente: Elaboración propia.

Los materiales compuestos son cuerpos elásticos por lo tanto cuando se estudia su comportamiento mecánico (teoría elástica) se debe considerar que estos, al someterse a fuerzas de tensión se deforman de manera reversible. Las propiedades mecánicas de los compositos pueden obtenerse de distintas formas, basándose en las características de cada componente, teóricamente o empíricamente. Los resultados teóricos no siempre son iguales a los de las pruebas experimentales debido a que la fibra en si misma presenta cierto grado de anisotropía (Daniel Gay, 2003).

Generalmente los materiales pueden estar sometidos a dos tipos de fuerzas, la normal que actúa perpendicularmente al área provocando un esfuerzo de tensión o compresión en función de si el material es jalado o empujado (identificados con la letra griega sigma en sus tres direcciones como: $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$) y la fuerza o esfuerzo cortante que se provoca cuando las cargas actúan tangencialmente ocasionando que dos segmentos del cuerpo resbalen uno sobre el otro (representados por la letra griega tau $\tau_{12}, \tau_{23}, \tau_{13}$) (Hibbeler, 2006). Ver Figura 7.

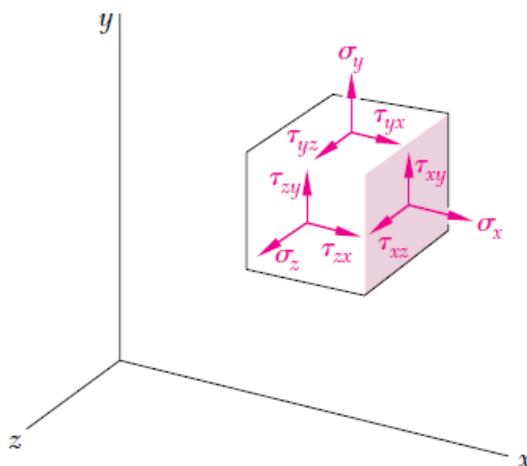


Figura 7 Representación de esfuerzos. Fuente: (Ferdinand P. Beer, 2010)

Las fórmulas teóricas para encontrar los esfuerzos y el módulo de un material compuesto son una función de la fracción volumétrica de la fibra. Este concepto es crítico por lo cual se definen las fracciones de masa en la sección 1.4.2.

Cuando se analizan por separado las propiedades de la resina y la fibra, se aprecia que en la resistencia máxima medida en las pruebas de fibra (ASTM D3379) pueden obtenerse valores muy altos de resistencia a comparación con los resultados en el compuesto. La razón radica en que las fibras sufren daños durante las diversas etapas del procesamiento, debido a tensiones residuales y cargas secundarias provocadas por el corte y dirección transversal de la fibra (Lee, 1991). En la Figura 8 se observa la comparación gráfica de las propiedades a tensión en los materiales, individualmente y como compuesto.

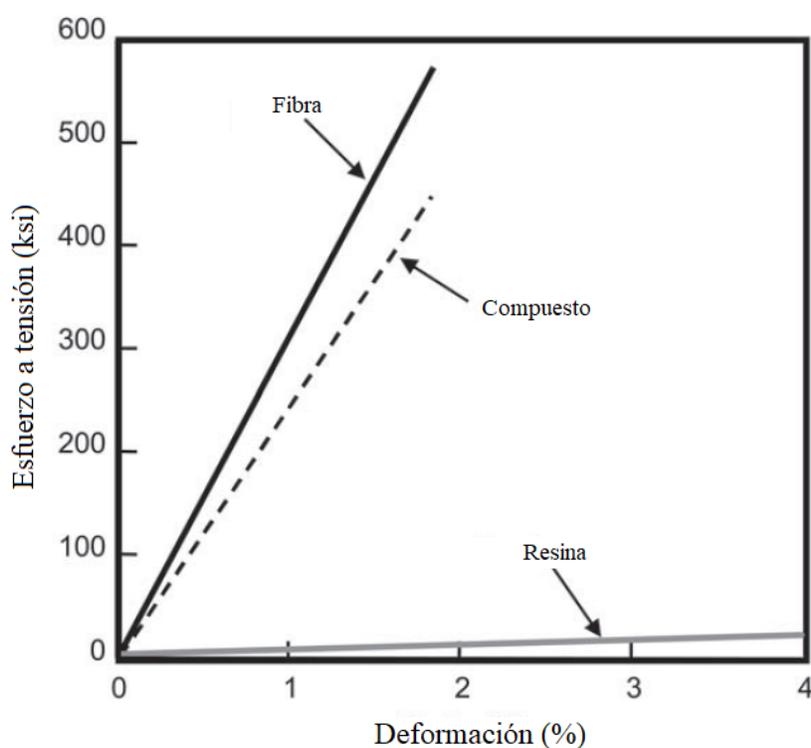


Figura 8 Comparación de las propiedades de tracción entre la fibra, matriz y el compuesto. Fuente: (Campbell, 2010)

Distintos factores afectan las propiedades del compuesto y de los materiales individualmente, por ejemplo, las altas temperaturas disminuyen la resistencia a la tracción de las fibras de vidrio a excepción de las de clase S y R. Los refuerzos con susceptibles a químicos como los álcalis (la humedad es la causante de que las fibras entren en contacto con esta sustancia), dicha corrosión también afecta la resistencia a tracción. En el diseño de materiales compuestos se usa una relación a tensión (similar a un factor de seguridad) de 3.5 en caso de que las piezas estén sometidas a una carga permanente ya que este efecto provoca la corrosión por tensión (U. S. Department of Transportation, 1994).

La resistencia química de un compuesto depende en gran medida de la matriz, si esta se degrada se pueden absorber disolventes y dañar la fibra. La resina puede desgastarse además por procesos de oxidación, efecto de radiación UV y por degradación térmica. Los compuestos también tienen una resistencia al impacto de nivel medio a bajo siempre inferior al de los materiales metálicos. Los materiales compuestos tienen una excelente resistencia al fuego, sin embargo, los humos que emiten cierto tipo de matrices son tóxicos.

Existen dos clases de arreglos para los tejidos en los materiales reforzados con fibra (Figura 9), el primero, es en donde las capas de material se apilan en la misma orientación el cual es conocido como lámina. Cuando las capas se apilan en varios ángulos la disposición se llama laminado. El arreglo que predomina en los materiales compuestos es el laminado ya que las capas están orientadas en direcciones que mejorarán la resistencia en la dirección de carga primaria, pero se reforzarán en las otras direcciones.

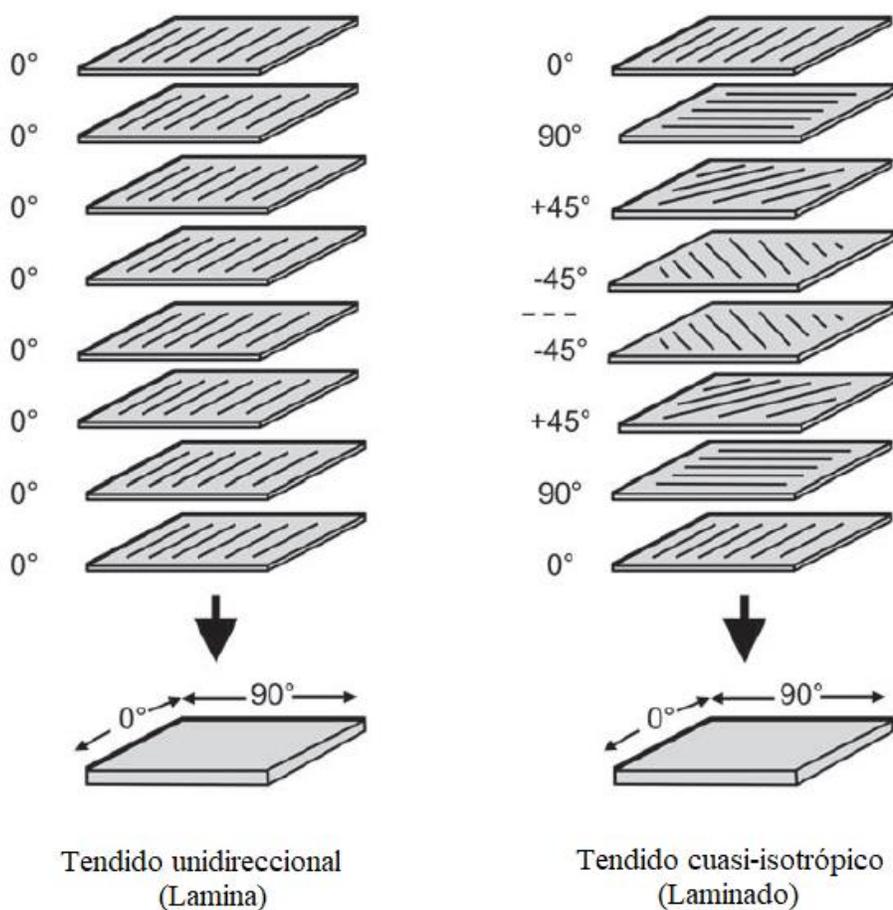


Figura 9 Tipos de arreglos para los materiales compuestos. Fuente: (Campbell, 2010)

La tensión longitudinal y las cargas de compresión son transportadas por las fibras, mientras que la matriz distribuye las cargas entre las fibras en tensión, las estabiliza y evita que se doblen en compresión. La matriz también es el principal portador de carga para el corte interlaminar (entre las capas) y la tensión transversal (90°). En general la orientación de la fibra afecta directamente

a sus propiedades. En la Tabla 1, se esquematiza que material influye al compuesto de acuerdo a dirección y tipo de esfuerzo.

Tabla 1 Efecto de la fibra y la matriz en las propiedades mecánicas del compuesto. Fuente: (Campbell, 2010)

Propiedades mecánicas	Compuesto dominante	
	Fibra	Matriz
Unidireccional		
0° tensión	✓	...
0° compresión	✓	✓
Cortante	...	✓
90° tensión	...	✓
Laminado		
Tensión	✓	...
Compresión	✓	✓
En plano cortante	✓	✓
Cortante interlaminar	...	✓

1.4.1 Análisis macromecánico de un laminado fibra-matriz

Como se menciona anteriormente un laminado es la unión de varias capas de refuerzos, este puede encontrarse de forma continua o discontinua (mat) generalmente cada lámina tiene un espesor de 0.125 mm. El diseño y análisis de los laminados exigen el conocimiento de las tensiones y deformaciones presentes en el material cuando se le aplica una carga. Si el laminado está fabricado con láminas y una matriz homogéneas e isotrópicas, la rigidez de la lámina varía de un punto a otro dependiendo si el punto está en la fibra, la matriz o la interfaz fibra-matriz. Por esta razón, el análisis macromecánico de una lámina se basa en las propiedades promedio y considera que la lámina es homogénea (Hodgkinson E. b., 2000).

El conocimiento de las fuerzas internas en todos los puntos del cuerpo del laminado es esencial porque estas deben ser menores a la resistencia final del material utilizado. El esfuerzo el cual se define como la intensidad de la carga por unidad de área, determina este conocimiento pues las resistencias del compuesto son conocidas en términos del esfuerzo. Igual de importante es conocer las deformaciones provocadas por las fuerzas aplicadas externamente, esto se debe a que un estado de tensión en un punto tiene seis componentes, pero solo hay tres ecuaciones de fuerza-equilibrio, una en cada dirección (Hodgkinson E. b., 2000).

1.4.1.1 Lámina lineal a 0° o 90°

En una lámina de material compuesto en donde sus fibras están orientadas en una sola dirección, ya sea a 0° o 90°, es delgada y no transporta cargas fuera del plano se pueden asumir condiciones de tensión plana, por lo tanto, $\sigma_3 = 0$, $\tau_{23} = 0$ y $\tau_{31} = 0$ entonces, las relaciones de la ley de Hooke se expresan como lo muestran las ecuaciones (1 a-b):

$$\begin{aligned}\varepsilon_3 &= S_{13}\sigma_1 + S_{23}\sigma_2, \\ \gamma_{23} &= \gamma_{31} = 0\end{aligned}\tag{1 a-b}$$

La deformación ε_3 es una función de ε_1 y ε_2 , por lo tanto, se puede omitir, al igual que las deformaciones γ_{23} y γ_{31} ya que en este caso resultan ser cero. Entonces las reducciones provocan que la ecuación de matrices quede de la siguiente forma:

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \gamma_{12} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & 0 \\ S_{12} & S_{22} & 0 \\ 0 & 0 & S_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \tau_{12} \end{bmatrix}\tag{2}$$

La ecuación de flexibilidad invertida da como resultado la ecuación siguiente:

$$\begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \tau_{12} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Q_{11} & Q_{12} & 0 \\ Q_{12} & Q_{22} & 0 \\ 0 & 0 & Q_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \gamma_{12} \end{bmatrix}\tag{3}$$

Donde los coeficientes Q_{ij} son los pertenecientes a la matriz de rigidez y en términos de la matriz de flexibilidad se describen como lo indican las siguientes ecuaciones:

$$\begin{aligned}Q_{11} &= \frac{S_{22}}{S_{11}S_{22} - S_{12}^2} \\ Q_{12} &= -\frac{S_{12}}{S_{11}S_{22} - S_{12}^2} \\ Q_{22} &= \frac{S_{11}}{S_{11}S_{22} - S_{12}^2} \\ Q_{66} &= \frac{1}{S_{66}}\end{aligned}\tag{4 a-d}$$

En un laminado de esta clase pueden presentarse tres formas distintas de carga, la primera es cuando se aplica una carga de tensión pura sobre la dirección 1 de la placa, esto significa que $\sigma_1 \neq 0$, $\sigma_2 = 0$, $\tau_{12} = 0$, debido a esto las constantes elásticas del material se definen de la siguiente manera:

$$\begin{aligned}\varepsilon_1 &= S_{11}\sigma_1 \\ \varepsilon_2 &= S_{12}\sigma_1 \\ \gamma_{12} &= 0\end{aligned}\tag{5 a-e}$$

$$E_1 = \frac{\sigma_1}{\varepsilon_1} = \frac{1}{S_{11}}$$

$$\nu_{12} = -\frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_1} = -\frac{S_{12}}{S_{11}}$$

El segundo caso se presenta cuando se aplica una carga pura en la dirección 2 del laminado, Figura 10.

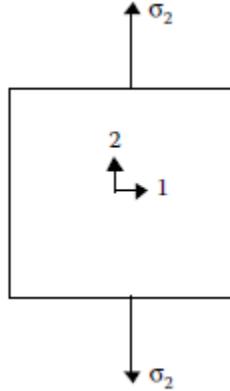


Figura 10 Representación de una carga aplicada en la dirección 2 de una lámina. Fuente: (Hodgkinson E. b., 2000)

Para este caso los valores de las tensiones y el esfuerzo cortante resultan ser: $\sigma_1 = 0$, $\sigma_2 \neq 0$, $\tau_{12} = 0$, por lo tanto, las ecuaciones de los coeficientes elásticos son de la siguiente forma:

$$\varepsilon_1 = S_{12}\sigma_2$$

$$\varepsilon_2 = S_{22}\sigma_2$$

$$\gamma_{12} = 0$$

$$E_2 = \frac{\sigma_2}{\varepsilon_2} = \frac{1}{S_{22}} \quad (6 a-f)$$

$$\nu_{21} = -\frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_2} = -\frac{S_{12}}{S_{22}}$$

o

$$\frac{\nu_{12}}{E_1} = \frac{\nu_{21}}{E_2}$$

En el tercer caso se tiene una carga aplicada de cortante pura en el plano 1-2, Figura 11; lo cual quiere decir que $\sigma_1 = 0$, $\sigma_2 = 0$, $\tau_{12} \neq 0$, $\varepsilon_1 = 0$, $\varepsilon_2 = 0$.

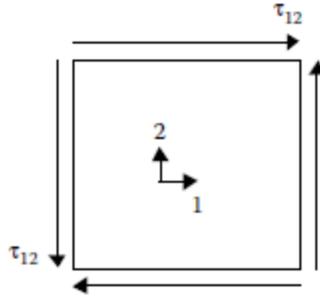


Figura 11 Representación de la carga aplicada en la dirección 1-2 de una lámina. Fuente: (Hodgkinson E. b., 2000)

Las ecuaciones resultantes de este tipo de carga son las siguientes:

$$\begin{aligned} \gamma_{12} &= S_{66}\tau_{12} \\ G_{12} &= \frac{\tau_{12}}{\gamma_{12}} = \frac{1}{S_{66}} \end{aligned} \quad (7 a-b)$$

1.4.1.2 Láminas colocadas en distintos ángulos

Comúnmente los arreglos de los laminados en las estructuras son colocados en distintas direcciones debido a la baja rigidez de la sección transversal (dirección 2), es necesario entonces calcular las relaciones de los coeficientes de elasticidad tomando en cuenta el ángulo al que las fibras están orientadas. En este caso la dirección paralela a las fibras será conocida como la dirección 1 y aquella perpendicular a la dirección 1 será conocida como dirección 2. Ver Figura 12.

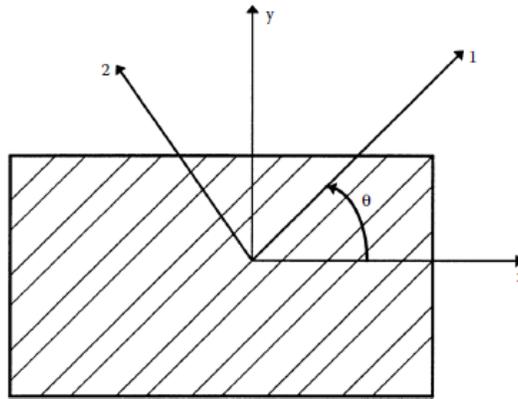


Figura 12 Ejes locales y globales de una lámina orientada a cierto ángulo. Fuente: (Hodgkinson E. b., 2000)

Las tensiones globales y locales se relacionan entre sí a través del ángulo de la lámina θ de manera que:

$$\begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{bmatrix} = [T]^{-1} \begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \tau_{12} \end{bmatrix} \quad (8)$$

En donde [T] es la matriz de transformación y se define como:

$$[T]^{-1} = \begin{bmatrix} c^2 & s^2 & -2sc \\ s^2 & c^2 & 2sc \\ sc & -sc & c^2 - s^2 \end{bmatrix}$$

y

$$[T] = \begin{bmatrix} c^2 & s^2 & 2sc \\ s^2 & c^2 & -2sc \\ -sc & sc & c^2 - s^2 \end{bmatrix} \quad (9)$$

$$c = \text{Cos}(\theta)$$

$$s = \text{Sen}(\theta)$$

Se sigue una serie de ecuaciones para llegar a representar las matrices anteriores en términos de las matrices de rigidez y flexibilidad, lo que da como resultado:

$$\begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{Q}_{11} & \bar{Q}_{12} & \bar{Q}_{16} \\ \bar{Q}_{12} & \bar{Q}_{22} & \bar{Q}_{26} \\ \bar{Q}_{16} & \bar{Q}_{26} & \bar{Q}_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{bmatrix} \quad (10)$$

En esta ecuación se representan los elementos que forman la matriz de rigidez reducida transformada \bar{Q}_{ij} y están dados por las siguientes ecuaciones (los elementos faltantes son funciones de las seis principales mostradas a continuación):

$$\begin{aligned} \bar{Q}_{11} &= Q_{11}c^4 + Q_{22}s^4 + 2(Q_{12} + 2Q_{66})s^2c^2 \\ \bar{Q}_{12} &= (Q_{11} + Q_{22} - 4Q_{66})s^2c^2 + Q_{12}(c^4 + s^2) \\ \bar{Q}_{22} &= Q_{11}s^4 + Q_{22}c^4 + 2(Q_{12} + 2Q_{66})s^2c^2 \\ \bar{Q}_{16} &= (Q_{11} - Q_{12} - 2Q_{66})c^3s - (Q_{22} - Q_{12} - 2Q_{66})s^3c \\ \bar{Q}_{26} &= (Q_{11} - Q_{12} - 2Q_{66})c^3s - (Q_{22} - Q_{12} - 2Q_{66})c^3s \\ \bar{Q}_{66} &= (Q_{11} + Q_{22} - 2Q_{12} - 2Q_{66})s^2c^2 + Q_{66}(s^4 + c^4) \end{aligned} \quad (11)$$

Invirtiendo la ecuación (10) da como resultado:

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{S}_{11} & \bar{S}_{12} & \bar{S}_{16} \\ \bar{S}_{12} & \bar{S}_{22} & \bar{S}_{26} \\ \bar{S}_{16} & \bar{S}_{26} & \bar{S}_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{bmatrix} \quad (12)$$

Donde S_{ij} son los elementos de la matriz de flexibilidad reducida transformada y están dados por:

$$\begin{aligned}
 \bar{S}_{11} &= S_{11}c^4 + (2S_{12} + S_{66})s^2c^2 + S_{22}s^4 \\
 \bar{S}_{12} &= S_{12}(s^4 + c^4) + (S_{11} + S_{22} - S_{66})s^2c^2 \\
 \bar{S}_{22} &= S_{11}s^4 + (2S_{12} + S_{66})s^2c^2 + S_{22}c^4 \\
 \bar{S}_{16} &= (2S_{11} - 2S_{12} - S_{66})sc^3 - (2S_{22} - 2S_{12} - S_{66})s^3c \\
 \bar{S}_{26} &= (2S_{11} - 2S_{12} - S_{66})s^3c - (2S_{22} - 2S_{12} - S_{66})sc^3 \\
 \bar{S}_{66} &= 2(2S_{11} + 2S_{22} - 4S_{12} - S_{66})s^2c^2 + S_{66}(s^4 + c^4)
 \end{aligned} \tag{13}$$

Las ecuaciones anteriores son para esfuerzos de tensión-deformación en una lámina ortotrópica, en estos casos cuando se tiene un ángulo de por medio, si solo se aplican tensiones normales a una lámina de ángulo, las tensiones de cortante son distintas de cero, si solo se aplican tensiones de cortadura las deformaciones normales son distintas de cero (Hodgkinson E. b., 2000).

A continuación, se presentan las ecuaciones que dan como resultado las constantes de ingeniería de un laminado orientado con cierto ángulo de acuerdo con sus matrices de rigidez y flexibilidad transformadas. En el primer caso se describen las ecuaciones cuando al laminado se le aplica una carga sobre la dirección x Figura 13 , en donde $\sigma_x \neq 0$, $\sigma_y = 0$, $\tau_{xy} = 0$.

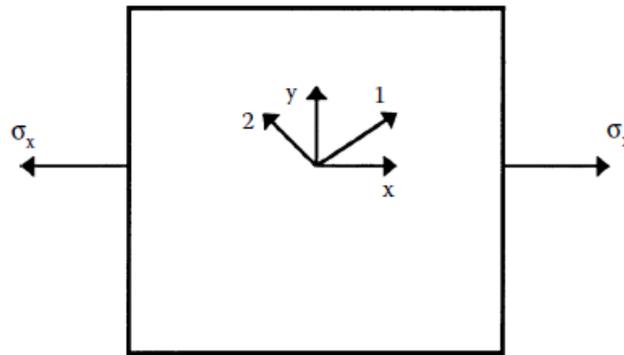


Figura 13 Representación de la carga aplicada en un laminado con cierto ángulo sobre la dirección x. Fuente: (Hodgkinson E. b., 2000)

$$\begin{aligned}
 \varepsilon_x &= \bar{S}_{11}\sigma_x \\
 \varepsilon_y &= \bar{S}_{12}\sigma_x \\
 \gamma_{xy} &= \bar{S}_{16}\sigma_x
 \end{aligned} \tag{14 a-f}$$

$$E_x = \frac{\sigma_x}{\varepsilon_x} = \frac{1}{\bar{S}_{11}}$$

$$\nu_{xy} = -\frac{\varepsilon_y}{\varepsilon_x} = -\frac{\bar{S}_{12}}{\bar{S}_{11}}$$

Las ecuaciones para los otros dos casos que existen a la hora de aplicar una carga sobre el eje y y sobre la dirección cortante τ_{xy} , en este trabajo serán omitidas.

El módulo de corte G_{xy} es máximo cuando el ángulo de la orientación de las fibras es igual a 45° y es mínimo para capas de 0° y 90° , debido a que las tensiones principales para la carga de corte pura en una capa de 45° están a lo largo del eje del material, esto puede comprobarse en la gráfica de la Figura 14.

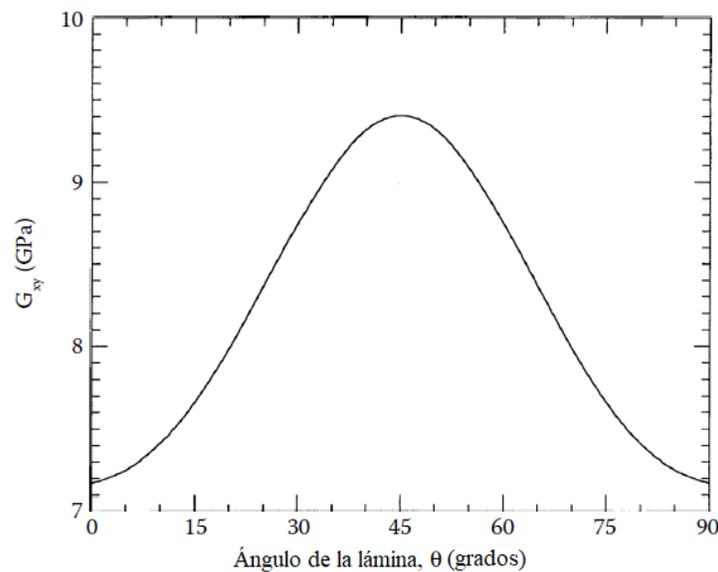


Figura 14 Módulo de corte en el plano xy como una función del ángulo de la lámina para una lámina de carbón con resina epóxica. Fuente: (Hodgkinson E. b., 2000)

En este caso y derivado de las ecuaciones anteriores se tiene entonces que el módulo cortante máximo se calcula como lo muestra la ecuación (15).

$$G_{xy-45^\circ} = \frac{E_1}{(1 + 2\nu_{12} + \frac{E_1}{E_2})} \quad (15)$$

1.4.1.3 Laminados

En las estructuras de los productos fabricados con materiales compuestos se pueden encontrar los laminados de fibra-matriz en un grupo de distintas capas, a veces orientadas a diferentes

ángulos. Existen diferentes tipos de arreglos de laminados: simétricos, laminados de capas cruzadas, laminados de ángulo de capa, no-simétricos y balanceados.

Este trabajo se enfoca en los laminados simétricos ya que estos tienen la ventaja de evitar que la estructura final sufra flexión ya que el conjunto de capas de fibra provoca momentos mecánicos en el proceso de curado. Un laminado recibe el nombre de simétrico si el material, el ángulo y el grosor de las capas son iguales por encima y por debajo del plano medio, tal y como se observa en la Figura 15.

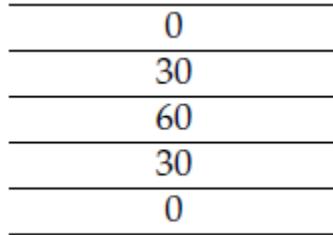


Figura 15 Arreglo [0/30/60] s. Fuente: (Hodgkinson E. b., 2000).

Para evaluar teóricamente un laminado simétrico se definen las ecuaciones de cargas (N) como se muestra a continuación:

$$\begin{bmatrix} N_x \\ N_y \\ N_{xy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & A_{16} \\ A_{12} & A_{22} & A_{26} \\ A_{16} & A_{26} & A_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_x^0 \\ \varepsilon_y^0 \\ \gamma_{xy}^0 \end{bmatrix} \quad (16)$$

Los elementos de la matriz de rigidez $[A]$ están dados por la ecuación, donde h representa los espesores del laminado:

$$A_{ij} = \sum_{k=1}^n [(\bar{Q}_{ij})]_k (h_k - h_{k-1}), \quad i = 1,2,6; \quad j = 1,2,6 \quad (17)$$

Las constantes de elasticidad del laminado están dadas por la ecuación siguiente en donde la matriz $[a]$ es la inversa de la matriz $[A]$:

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_x^0 \\ \varepsilon_y^0 \\ \gamma_{xy}^0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{16} \\ a_{12} & a_{22} & a_{26} \\ a_{16} & a_{26} & a_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} N_x \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (18)$$

Entonces los módulos, las deformaciones y el coeficiente de Poisson son:

$$\varepsilon_x^0 = a_{11} N_x \quad (19 a-h)$$

$$E_x = \frac{1}{ha_{11}}$$

$$\varepsilon_y^0 = a_{22}N_y$$

$$E_y = \frac{1}{ha_{22}}$$

$$\gamma_{xy}^0 = a_{66}N_{xy}$$

$$G_{xy} = \frac{1}{ha_{66}}$$

$$\nu_{xy} = -\frac{a_{12}}{a_{11}}$$

$$\nu_{yx} = -\frac{a_{12}}{a_{22}}$$

1.4.2 Análisis micromecánico de una lámina fibra-matriz

El análisis micromecánico ayuda al diseñador a seleccionar los materiales adecuados para el compuesto. Dentro de los cálculos más importantes tenemos la obtención de las fracciones volumétricas del compuesto. En las ecuaciones siguientes los subíndices c , f y m , se referirán al compuesto, la fibra y la matriz (resina) respectivamente.

La fracción volumétrica de la fibra V_f y la fracción volumétrica de la matriz V_m se definen en las ecuaciones siguientes en donde v representa el volumen.

$$V_f = \frac{v_f}{v_c} \tag{20 a-b}$$

y

$$V_m = \frac{v_m}{v_c}$$

La suma de las fracciones volumétricas es igual a 1

$$V_f + V_m = 1 \tag{21}$$

De la misma manera que la suma de los volúmenes de la fibra y la matriz es igual al volumen del compuesto.

$$v_f + v_m = v_c \tag{22}$$

La masa de los elementos del material compuesto está representada por la letra w y la fracción de masa por la letra M , la cual se define en las ecuaciones siguientes:

$$M_f = \frac{w_f}{w_c} \quad (23 \text{ a-b})$$

$$M_m = \frac{w_m}{w_c}$$

$$M_f + M_m = 1 \quad (24)$$

Si ρ_f y ρ_m son la densidad (masa específica) de la fibra y la matriz, respectivamente, se tiene que:

$$V_f = \frac{\frac{M_f}{\rho_f}}{\frac{M_f}{\rho_f} + \frac{M_m}{\rho_m}} \quad (25 \text{ a-b})$$

$$M_f = \frac{V_f \rho_f}{V_f \rho_f + V_m \rho_m}$$

La densidad del compuesto en términos de las fracciones de volumen se encuentra a continuación:

$$\rho_c = \rho_f V_f + \rho_m V_m \quad (26)$$

1.4.2.1 Módulo de Young

El módulo de elasticidad mencionado anteriormente como parte fundamental de la ecuación de Hooke, puede ser representado en términos de la fracción volumétrica de los materiales a lo largo de la dirección de la fibra (0°) como:

$$E_l = E_f V_f + E_m V_m$$

o

$$E_l = E_f V_f + E_m (1 - V_f) \quad (27 \text{ a-b})$$

Y la dirección transversal (90°) como:

$$\frac{1}{E_t} = \frac{V_f}{E_f} + \frac{V_m}{E_m} \quad (28)$$

1.4.2.2 Coeficiente de Poisson

La relación de Poisson se define como el negativo de la relación de la deformación normal en la dirección transversal a la deformación normal en la dirección longitudinal, cuando se aplica una carga normal en la dirección longitudinal (Kaw, 2006). En términos de la fracción volumétrica se

define en las ecuaciones (29 a-d) en donde ε representa la deformación transversal (índice T) o longitudinal (índice L) de los elementos del compuesto.

$$\mu_{12} = \mu_f V_f + \mu_m V_m$$

$$\mu_f = -\frac{\varepsilon_f^T}{\varepsilon_f^L} \quad (29 \text{ a-d})$$

$$\mu_m = -\frac{\varepsilon_m^T}{\varepsilon_m^L}$$

$$\mu_{12} = -\frac{\varepsilon_c^T}{\varepsilon_c^L}$$

1.4.2.3 Módulo cortante

La deformación cortante del compuesto está representada por γ , el esfuerzo cortante por τ , la deformación por δ y el espesor por t . De la definición del esfuerzo cortante se tiene que:

$$\begin{aligned} \delta_c &= \gamma_c t_c \\ \delta_f &= \gamma_f t_f \\ \delta_m &= \gamma_m t_m \end{aligned} \quad (30 \text{ a-c})$$

De la ley de Hooke para la fibra, la matriz y el compuesto, se obtienen las ecuaciones (31) en donde G es el módulo cortante:

$$\begin{aligned} \gamma_c &= \frac{\tau_c}{G_{12}} \\ \gamma_f &= \frac{\tau_f}{G_f} \\ \gamma_m &= \frac{\tau_m}{G_m} \end{aligned} \quad (31)$$

En términos de las fracciones de volumen, el módulo cortante está dado por la expresión:

$$\frac{1}{G_{12}} = \frac{V_f}{G_f} + \frac{V_m}{G_m} \quad (32)$$

1.5 PRUEBAS MECÁNICAS DEL COMPUESTO FIBRA-MATRIZ

Realizar las pruebas mecánicas a un material es de suma importancia, con esto se determina si es apto o no para su uso, en el caso de las aspas para los aerogeneradores, las valoraciones son

necesarias para su aprobación y certificación. En los procesos de certificación se obliga a los productores a validar las características y propiedades de los productos, la norma DNVGL-ST-0376 cuyo objetivo es proporcionar un nivel de seguridad internacional al definir los requisitos mínimos para las palas del rotor de los aerogeneradores, sirve como base de diseño y especifica los requisitos para una certificación.

Establecer el tipo y el alcance de las pruebas depende de la importancia de los esfuerzos en los componentes, a su vez también dependen de la certificación, el análisis de diseño y la implementación de los requisitos en construcción y montaje (Germanischer Lloyd in cooperation with the Wind Energy Committe, 2010).

Las pruebas mecánicas en general requieren de un espécimen o probeta con tamaño y forma específica. Para fabricarlas se usa una máquina que estira el espécimen de manera constante hasta alcanzar el punto de rotura, esta máquina es capaz de leer la carga y el cambio de magnitud que se le está aplicando mientras se extiende. Además, también se pueden utilizar galgas extensométricas, su operación está basada en el cambio de resistencia eléctrica del alambre sumamente delgado del que están compuestas. Las galgas se pegan en el material de manera muy fuerte por lo tanto cuando el material se alargue esta también lo hará. Ver Figura 16.

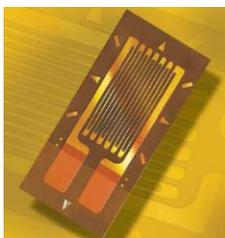


Figura 16 Galga extensométrica. Fuente: Vishay Precision Group, 2019

Con los datos que arroja este tipo de ensayos es posible calcular los valores de los esfuerzos y la deformación del material. Esta relación es una característica importante y se puede graficar, comúnmente es conocida como diagrama de esfuerzo-deformación y ayuda a conocer el comportamiento del material, así como a clasificarlo, sin embargo, estos varían mucho por eso es necesario realizar varias pruebas al mismo material. Ver Figura 17.

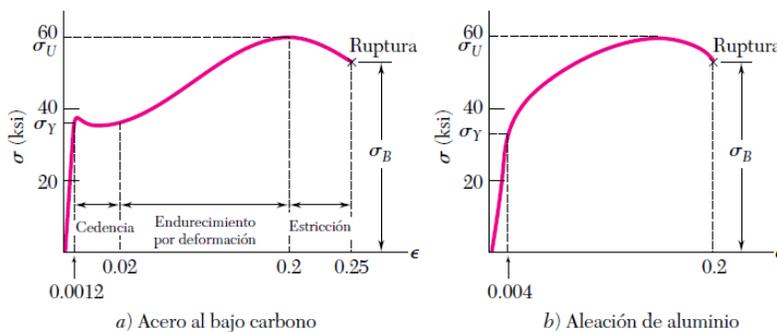


Figura 17 Diagramas esfuerzo-deformación de dos materiales dúctiles típicos. Fuente: (Ferdinand P. Beer, 2010)

En el diagrama esfuerzo deformación la región elástica del material está representada al principio de la prueba en la parte de la curva más recta, el final de esa línea se conoce como límite elástico. Después se aprecia un ligero aumento en el esfuerzo más allá del límite elástico este comportamiento causará la deformación permanente del material conocida comúnmente como deformación plástica, a este comportamiento se le llama fluencia. El endurecimiento por deformación se presenta cuando la fluencia ha terminado, sigue aumentando hasta llegar a un esfuerzo máximo. Antes de llegar a la ruptura el material sufre una deformación conocida como cuello o estricción, en una parte del espécimen el material se está alargando de tal forma que en esta parte se hace más delgado hasta romperse. Debido al comportamiento de la gráfica esfuerzo-deformación los materiales pueden clasificarse como:

- Materiales dúctiles: Aquellos que pueden estar sometidos a deformaciones unitarias grandes antes de su rotura;
- Materiales frágiles: son aquellos materiales que exhiben poca o ninguna fluencia antes de su rotura.

Existe un diagrama real de esfuerzo-deformación: en este, en lugar de usar siempre el área de la sección transversal y la longitud original de la muestra para calcular el esfuerzo y la deformación unitaria, se emplea el área y la longitud reales en el instante en que la carga se está midiendo. Las diferencias entre los dos diagramas comienzan a partir de la zona de endurecimiento, en donde la magnitud de la deformación unitaria es más significativa. Aunque los diagramas son diferentes la mayor parte del diseño en ingeniería se lleva dentro de la zona elástica y usar el diagrama convencional provoca errores alrededor de 0.1 % por lo tanto pueden usarse por igual (Hibbeler, 2006).

1.5.1 Procedimientos

Las pruebas mecánicas en materiales compuestos siguen procedimientos regulados por normas internacionales. En la Figura 18 se aprecian las recomendadas por diferentes organismos como el CENER (Centro Nacional de Energías Renovables) y normas de certificación como la DNVGL-ST-0376 y la norma GL2010.

CENER						
GL 2010						
DNV						
Normas						
Nombre	Fibra de vidrio				Fibra de carbono	
Tipo de fibra	UD			BD	TX	UD
Tensión	ISO 527-5:2009	UNE-EN ISO 527-5 tipo B	UNE-EN ISO 527-5 tipo A			DIN EN 2597:1998-08
	ISO 527-1					
	ASTM D3039/D3039M-14					
Compresión	ISO 527-4:1997					DIN EN 2850:2017-06
	UNE-EN ISO 14126, Método 2	UNE-EN ISO 14126, tipo B	ISO 14126:1999			
	ASTM D6641/D6641M-16e1					
Cortante	ASTM D5379/D5379M-12					
	UNE-EN ISO 14129		ISO 14129:1997			
Contenido en fibra	UNE-EN ISO 1172		ISO 1172:1996			
Condiciones atmosféricas	ISO 291		ISO 291:2008			
Pruebas estructurales	IEC 61400-23:2014					
Curado	ASTM D2584-11					
Equipamento	ISO 5893:2002					
Laboratorio	ISO 17025		ISO 17025:2017			
Pruebas aspas	IEC 61400-23:2014					

Figura 18 Tabla de clasificación de normativa. Fuente: Elaboración propia

Dentro de los principales requerimientos se tiene que los ensayos deben realizarse en laboratorios acreditados, la producción de los especímenes debe ser muy similar al proceso de fabricación del aspa, también como parte de la documentación de la prueba todos los resultados se mencionarán en un informe que cumpla con los requisitos generales de la norma ISO 17025 y, en cualquier caso, que contengan al menos los puntos siguientes:

- Fecha y lugar de fabricación de la muestra
- Identidad de cada material utilizado, incluida la hoja de datos del proveedor y el número de lote
- Almacenamiento de muestras
- Proceso de fabricación de espécimen
- Identidad y designación de especímenes individuales
- Dimensiones de cada espécimen individual
- Fecha y lugar de las pruebas
- Descripción del equipo
- Métodos y estándares aplicados
- Condiciones, incluida la temperatura y la humedad
- Método de normalización del contenido de fibra
- Resultados de la prueba para cada espécimen de prueba individual (tanto normalizado como no normalizado), todos incluidos
- Datos grabados, y en particular todas las lecturas de estrés (o carga) y deformación (o desplazamiento)
- Descripción del modo de falla de cada espécimen probado
- Fotos de cada espécimen probado.

1.5.1.1 Tensión

Las pruebas de tensión consisten en hacer que la muestra (probeta o espécimen), se jale a lo largo de su eje principal a velocidad constante hasta que la muestra se fracture o hasta que la tensión y deformación alcancen un valor predeterminado, generalmente los ensayos se realizan a temperatura ambiente. La norma que se elija como guía en el ensayo indicará la velocidad promedio a la que las muestras deben probarse y la fuerza máxima que debe tener la celda de carga en la máquina universal. Se realizan un mínimo de 5 probetas para cada dirección, aquellas muestras que se rompan o resbalen de los agarres en la máquina se deben descartar.

A las probetas suelen agregarse galgas extensométricas tal como lo muestra la Figura 19, la cantidad de galgas depende de la norma que se tome como guía. Como se mencionó en el apartado anterior las galgas promedian los valores de la deformación del material siempre y cuando esta sea homogénea, si el material comienza a arrugarse la distribución de deformación se vuelve heterogénea y entonces se debe usar la nominal para describir la evolución después de un límite elástico.

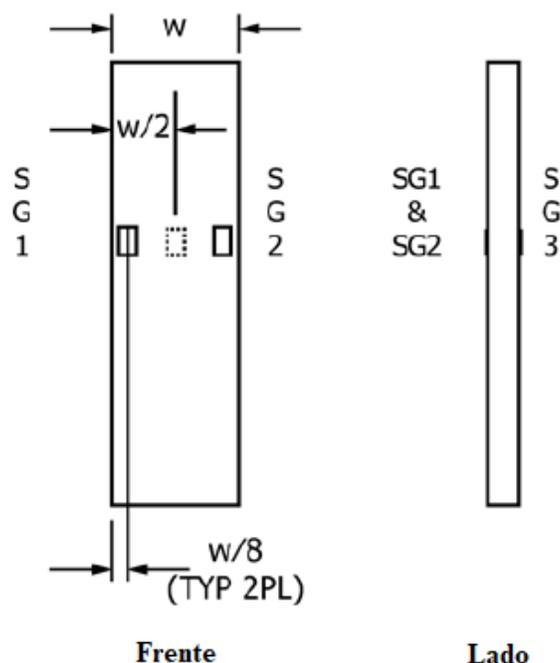


Figura 19 Ubicación de las galgas en una probeta de tensión. Fuente: (ASTM International, 2017)

También suelen existir casos en los que por cuestión de espacio no se usen galgas, aquí también se utiliza la deformación nominal y los métodos de cálculo se describen en el **Anexo A**, para calcular la deformación cuando se tienen galgas se emplea la fórmula (33):

$$\varepsilon = \frac{\Delta L_0}{L_0} \quad (33)$$

Donde:

ε : Valor de la deformación en cuestión (adimensional o en %);

L_0 : Longitud de la galga inicial en la muestra (mm);

ΔL_0 : Incremento de la longitud de la galga (mm).

Para asegurar la integridad de las muestras se adhieren pestañas, las cuales son pequeñas láminas en los extremos del cupón por ambos lados como se muestra en la Figura 20, el material de estas puede ser de resina con fibra o de papel de lija. Su espesor debe estar entre el rango (0,5-2) mm y tener una longitud mayor a 50 mm, en caso de que la longitud de la muestra sea de 200 mm es aceptable una longitud de 25 mm para las pestañas. Es importante mencionar que se debe adherir el material de los resguardos antes de que las muestras se corten del plato tal y como muestra la Figura 21.

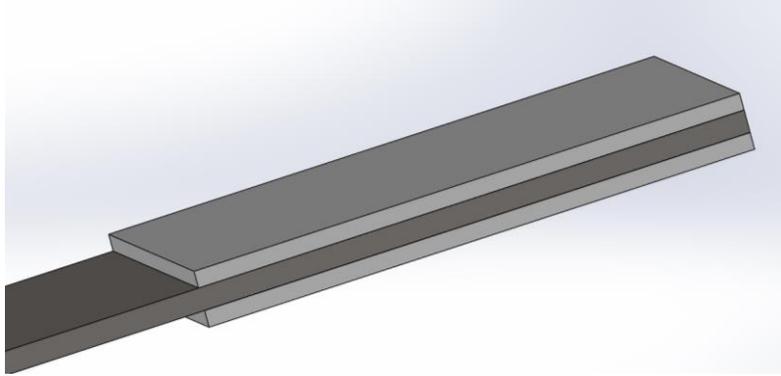


Figura 20 Probeta con pestañas. Fuente: Elaboración propia

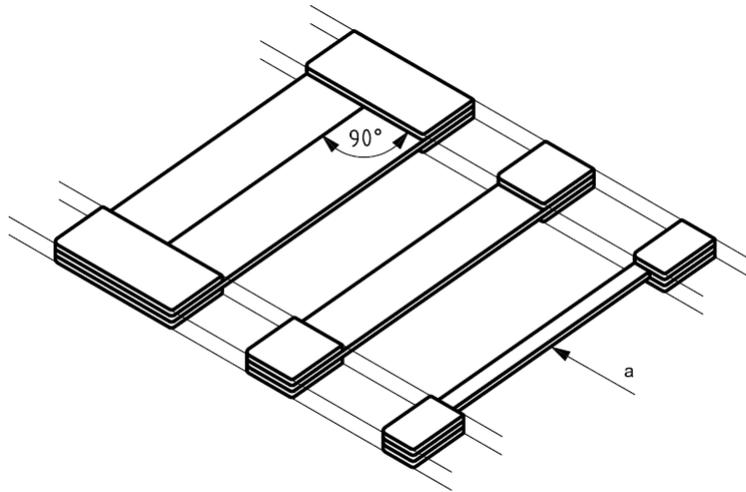


Figura 21 Obtención de cupones con pestañas. Fuente: ISO 527-5:2009 pág.10

Para calcular el módulo de Young en las pruebas de tensión se utiliza la versión desarrollada de la ley de Hooke, se tiene entonces la ecuación (34):

$$E_t = \frac{\sigma_2 - \sigma_1}{\varepsilon_2 - \varepsilon_1} \quad (34)$$

Donde:

E_t : Módulo de tensión (MPa)

σ_1 : Esfuerzo medido en el valor de deformación ε_1 , (MPa);

σ_2 : Esfuerzo medido en el valor de deformación ε_2 , (MPa).

El coeficiente de Poisson se determina graficando el ancho de la muestra como una función de longitud en la sección de la galga, para la parte de la curva de esfuerzo/deformación antes del punto de fluencia, se deben excluir aquellas secciones que pueden verse influenciadas por cambios en la velocidad de prueba. La pendiente $\Delta n / \Delta L_0$ se calcula utilizando un análisis de regresión lineal de mínimos cuadrados entre dos límites, preferiblemente después de la región del módulo y del

cambio de velocidad subsiguiente, si corresponde, que se encuentra en una porción lineal de esta curva (ISO 527-1, 2012). La relación de Poisson se determinará a partir de la ecuación (35):

$$\mu = -\frac{\Delta\varepsilon_n}{\Delta\varepsilon_1} = -\frac{L_0}{n_0} \frac{\Delta n}{\Delta L_0} \quad (35)$$

Donde:

μ : Coeficiente de Poisson (adimensional);

$\Delta\varepsilon_n$: Deformación decreciente de la sección transversal (ancho o espesor) mientras la distancia longitudinal incrementa (adimensional o porcentaje);

$\Delta\varepsilon_1$: Incremento de la distancia longitudinal de la muestra (adimensional o en porcentaje);

L_0, n_0 : Longitudes iniciales en las direcciones longitudinal y transversal (ancho o espesor) respectivamente (mm);

Δn : Decremento en la longitud de la galga en dirección de la sección transversal ($n = b$ (ancho) o $n = h$ (espesor)), (mm);

ΔL_0 : Incremento de la longitud de la galga en dirección longitudinal (mm);

El coeficiente de Poisson es indicado como μ_b si el ancho del espécimen es sobre el que se quiere calcular y como μ_h si se quiere medir sobre el espesor del espécimen. El coeficiente de Poisson se determina en un rango de $0,3 \% \leq \varepsilon \leq \varepsilon_y$, ya que no se recomienda utilizar la misma región usada para calcular el módulo de Young porque la deformación está determinada con una precisión de 1%, es decir, el extensómetro debe ser capaz de medir con una exactitud de 0,1µm, lo cual es una exactitud muy severa (ISO 527-1, 2012).

1.5.1.2 Compresión

El principio de las pruebas de compresión se define como la aplicación de una fuerza axial a la longitud de una muestra rectangular en un accesorio de carga, mientras que la carga aplicada y la tensión de esta área se monitorean (ISO 14126, 1999). La fuerza de compresión provocará que el material se contraiga en la dirección que se está aplicando la fuerza y que este se expanda lateralmente.

Generalmente la experimentación requiere una velocidad de prueba aproximada de 1 mm/min \pm 0,5 mm/min (ISO 14126, 1999). La tensión de las probetas se determinará por medio de galgas extensométricas, las cuales se ubicarán en ambas caras Figura 22 (las dimensiones expuestas en esta figura son recomendaciones de la norma ASTM D6641M). Las galgas no deberán medir más de 3 mm de longitud y el error para la deformación no debe exceder el \pm 1 %.

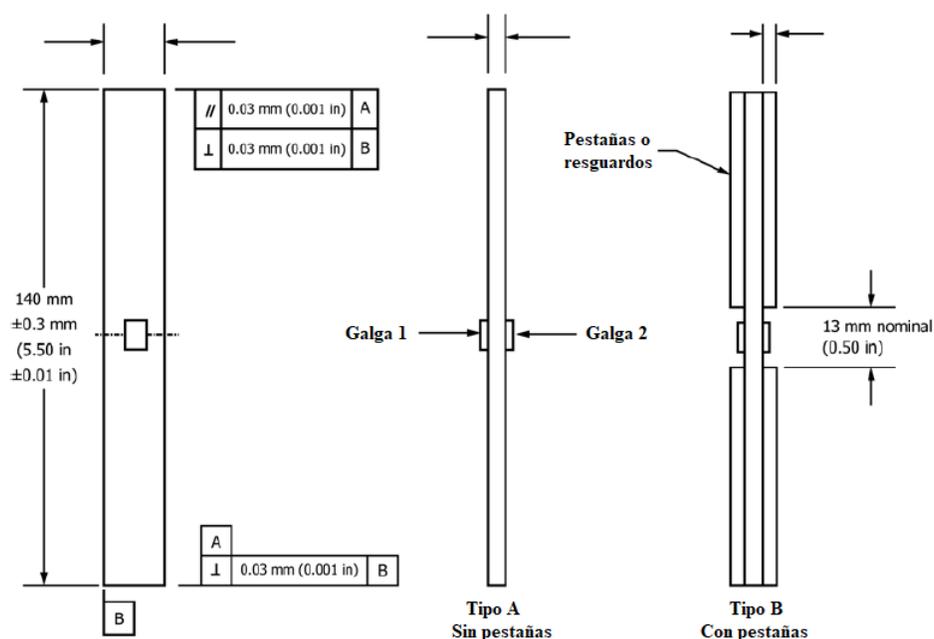


Figura 22 Ubicación de galgas en cupones para pruebas de compresión. Fuente: (ASTM D6641/D6641M-16, 2016)

En el **Anexo B** se describen diferentes accesorios de carga para realizar ensayos de compresión, se puede utilizar cualquiera siempre y cuando la falla de la muestra ocurra por debajo de una deformación por flexión del 10%, esto es debido a que, aunque la probeta no se doble, esta puede ser excesiva debido a imperfecciones en la muestra. Para calcular el porcentaje de flexión se tiene la ecuación (36), en donde el signo indicará la dirección en la que se está produciendo la flexión (ASTM D6641/D6641M-16, 2016).

$$B_y = \frac{\varepsilon_1 - \varepsilon_2}{\varepsilon_1 + \varepsilon_2} \times 100 \quad (36)$$

Donde:

B_1 : Porcentaje de flexión;

ε_1 : Deformación indicada por la galga 1;

ε_2 : Deformación indicada por la galga 2.

Al igual que en las pruebas de tensión una cantidad mínima de 5 probetas deben ser exitosas, para esto la falla en la prueba debe ocurrir dentro de la muestra, no debe haber ruptura en los extremos Figura 23. Para cerciorarse de que las medidas de las muestras tanto el ancho como el espesor sean adecuadas se utiliza un micrómetro, el cual sea capaz de medir una cantidad igual o menor a 0,01 mm.

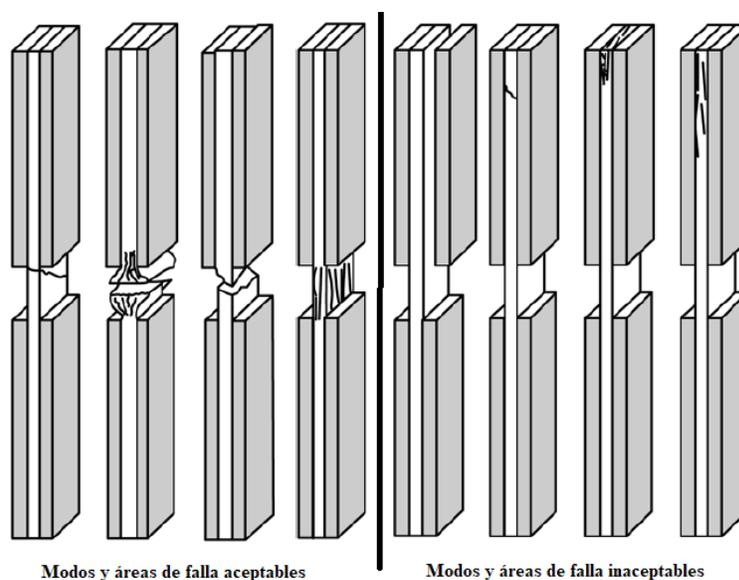


Figura 23 Modos y áreas de falla en probetas para pruebas de compresión. Fuente: (ASTM D6641/D6641M-16, 2016)

Las dimensiones para las probetas de compresión varían de acuerdo al tipo de método y norma que se utiliza, la norma ISO 14126 sugiere medidas descritas en la Tabla 2. En donde las muestras de tipo A serán aquellas que no utilicen resguardos y las de tipo B aquellas que utilizan resguardos en sus extremos.

Tabla 2 Dimensiones de muestras para pruebas de compresión.

Dimensiones [mm]	Símbolo	Muestra tipo A	Muestra tipo B1	Muestra tipo B2
Longitud total	l_0	110 ± 1	110 ± 1	125 ± 1
Espesor	h	$2 \pm 0,2$	$2 \pm 0,2$ a $10 \pm 0,2$	≥ 4
Ancho	b	$10 \pm 0,5$	$10 \pm 0,5$	$25 \pm 0,5$
Distancia entre pestañas/agarraderas	L	10	10	25
Longitud de pestañas	l_t	50	50 (si se requiere)	50 (si se requiere)
Espesor de pestañas	d_t	1	0,5 a 2 (si se requiere)	0,5 a 2 (si se requiere)

Las pestañas en las muestras deben estar orientadas a $0^\circ/90^\circ$, deben ser fabricadas preferentemente con el mismo material que las probetas, pero con fibras orientadas a $\pm 45^\circ$, el espesor debe estar entre 0,5 a 2 mm. Alternativamente también se puede usar otro tipo de material para las pestañas como papel de lija normal o papel de lija de acabado fino. Para el maquinado de las muestras se debe tener especial cuidado en la simetría entre los cortes y los ejes de la fibra, En la Figura 24 se observa un ejemplo de cómo debe ser el maquinado de las muestras.

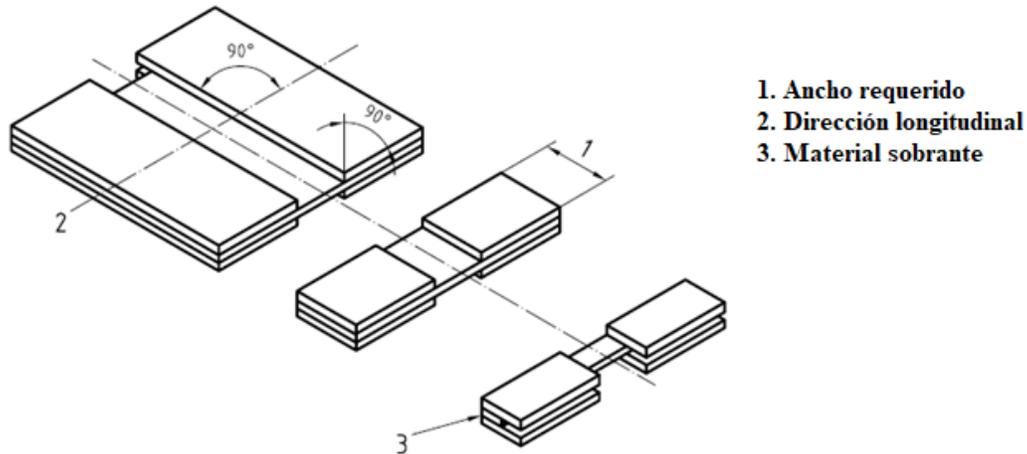


Figura 24 Plato con pestañas para pruebas de compresión. Fuente: ISO 14126:1999 pág. 13

La fórmula (37) da como resultado la obtención del esfuerzo compresivo el cual es expresado en MPa.

$$\sigma_{cM} = \frac{F_{max}}{bh} \quad (37)$$

Donde:

F_{max} : Carga máxima (N);

b : Ancho de la muestra probada (mm);

h : Espesor de la muestra probada (mm).

El módulo de compresión se calcula con la ecuación (38) y es expresada en MPa.

$$E_c = \frac{\sigma''_c - \sigma'_c}{\varepsilon''_c - \varepsilon'_c} \quad (38)$$

Donde:

σ''_c : Esfuerzo compresivo cuando $\varepsilon''_c = 0,0025$, (MPa);

σ'_c : Esfuerzo compresivo cuando $\varepsilon'_c = 0,0005$, (MPa).

En casos de fallo la deformación ε_{cM} se debe calcular a partir de la media de las deformaciones longitudinales ε_{11a} y ε_{11b} .

1.5.1.3 Cortante

Existen varios métodos para los ensayos de cortante, los cuales se describen a continuación:

- Tensión uniaxial de un laminado de $\pm 45^\circ$

- Tensión uniaxial de un laminado fuera de eje de 10°
- Pruebas de corte de dos y tres carriles
- El espécimen de viga con muescas en V
- Torsión de un laminado plano
- Torsión de un tubo de paredes delgadas

La prueba con muescas en V (Figura 25) desarrollada originalmente para caracterizar metales fue adaptada para su uso en materiales compuestos reforzados con fibra. Este método emplea un espécimen rectangular plano con muescas de doble borde, para este ensayo se necesita un accesorio de prueba denominado “Wyoming” (Hodgkinson J. M., 2000).

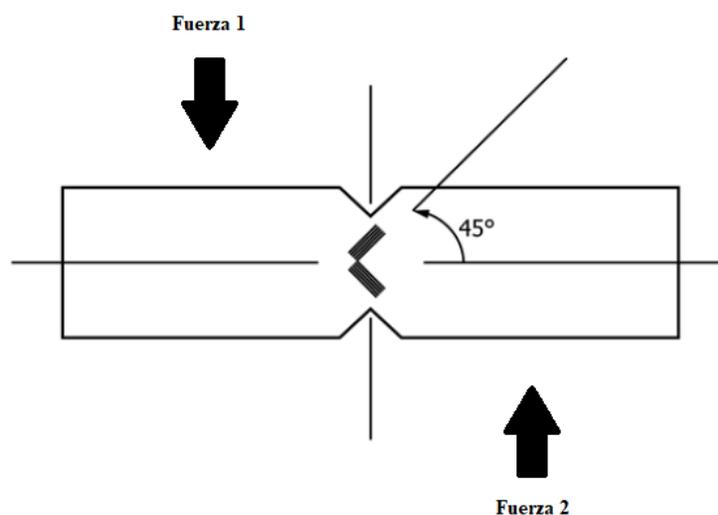


Figura 25 Representación de prueba de cortante y ubicación de galgas. Fuente: (ASTM D5379M, 2012)

En esta sección se le dará énfasis al método de la tensión en un laminado de $\pm 45^\circ$, el cual es relativamente sencillo para determinar las características de cortante en el plano de los sistemas continuos de fibra reforzada.

En la Figura 26 se pueden observar las dimensiones y forma que recomienda la norma ISO 14129:1997 para este tipo de ensayo, se puede observar también la ubicación de las galgas extensométricas, de las que se requieren dos para medir deformaciones paralela y perpendicularmente. Estas deben tener una precisión de $\pm 1\%$ de la escala completa.

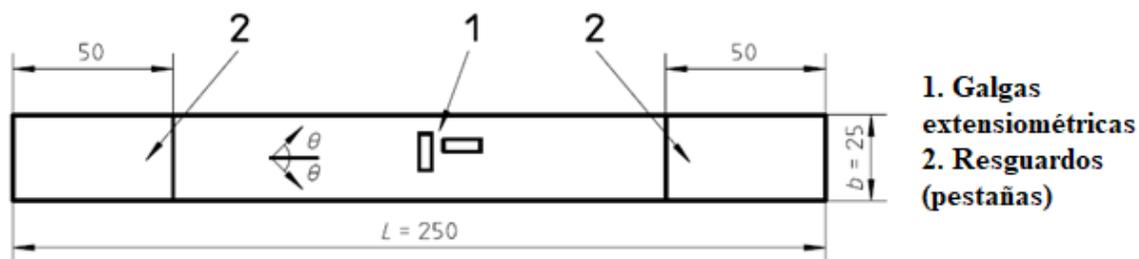


Figura 26 Especimen para pruebas de cortante, dimensiones en mm. Fuente: ISO 14126:1997 pág. 3.

Los especímenes se pueden obtener de los cortes de un plato, para evitar las fallas debido a los agarres de la máquina. Se recomienda adherir pestañas o resguardos en la Figura 26 se puede observar con claridad su ubicación y dimensiones, estos pueden fabricarse del mismo material que el espécimen o de tela cruzada.

La muestra debe estar en óptimas condiciones en caso contrario se descarta, las superficies y los bordes deben estar planas, libres de arañazos y marcas de hundimiento, las probetas planas y libres de torsión; para asegurar que la pieza tenga los bordes rectos y sean planos, se debe hacer una observación visual apoyándose del uso de pinzas micrométricas. Un mínimo de 5 pruebas debe ser exitosa, deben probarse a una velocidad estándar establecida, en caso de no tener este dato se utiliza el siguiente: $v = 2 \text{ mm/min}$ (ISO 14129, 1997).

Cuando se carga un laminado de $\pm 45^\circ$ en tensión uniaxial, se induce un estado biaxial de tensión dentro de cada una de las capas, por lo tanto, las tensiones normales σ_{11} y σ_{22} en el sistema de coordenadas de la lámina depende tanto de la tensión de tracción aplicada σ_{xx} como de la tensión de corte inducida τ_{xy} , mientras que la tensión de corte τ_{12} está relacionada solo con la tensión de tracción aplicada σ_{xx} (Hodgkinson J. M., 2000) de manera que:

$$\begin{aligned}\sigma_{11} &= \frac{\sigma_{xx}}{2} + \tau_{xy} \\ \sigma_{22} &= \frac{\sigma_{xx}}{2} - \tau_{xy} \\ \tau_{11} &= \pm \frac{\sigma_{xx}}{2}\end{aligned}\tag{39 a-c}$$

Este análisis asume que no hay acoplamiento de corte interlaminar, entonces las deformaciones normales de la lámina en el plano ε_{11} y ε_{22} (paralela y perpendicularmente respectivamente) y la deformación cortante γ_{12} se dan mediante las ecuaciones (40 a-b):

$$\begin{aligned}\varepsilon_{11} = \varepsilon_{22} &= \frac{\varepsilon_{xx} + \varepsilon_{yy}}{2} \\ \gamma_{12} &= \varepsilon_{xx} - \varepsilon_{yy}\end{aligned}\tag{40 a-b}$$

Para determinar el módulo de corte G_{12} es necesario conocer las deformaciones paralelas y perpendiculares, estas pueden ser medidas por extensómetros. El módulo esta dado entonces por la formula (41) y sus unidades son los GPa.

$$G_{12} = \frac{\sigma_{xx}}{2(\varepsilon_{xx} - \varepsilon_{yy})} = \frac{\tau_{12}'' - \tau_{12}'}{\gamma_{12}'' - \gamma_{12}'} \quad (41)$$

Donde:

τ_{12}' : Esfuerzo cortante cuando $\gamma_{12}' = 0,001$;

τ_{12}'' : Esfuerzo cortante cuando $\gamma_{12}'' = 0,005$;

La geometría del espécimen se ha seleccionado para garantizar que el módulo de corte no se vea afectado por los efectos del borde, los resultados finales o el estado biaxial de tensión dentro de las láminas. La resistencia al corte se obtiene dividiendo la fuerza instantánea por el doble del área de la sección transversal de la muestra, ecuación (42):

$$\tau_{12} = \frac{F}{2bh} \quad (42)$$

Donde:

F : Fuerza instantánea (N);

b : Ancho de la muestra probada (mm);

h : Espesor de la muestra probada (mm).

El esfuerzo máximo cortante se obtiene antes o al final de la prueba antes de que $\gamma_{12} = 0,05$ esta expresada en MPa y se calcula con la fórmula (43):

$$\tau_{12M} = \frac{F_m}{2bh} \quad (43)$$

Donde:

F_m : Carga en Newtons (N) antes del valor de γ_{12} .

Este tipo de ensayo proporciona un método aceptable para determinar el módulo de corte, pero se debe tener cuidado al interpretar la resistencia al corte y los resultados de tensión máximos, esto se debe a que las láminas están en un estado de tensión biaxial y no pura cortante. Las tensiones normales actúan a lo largo de los planos de cortante lo que provoca una fractura mixta, el agrietamiento de las capas y las delaminaciones internas se producen antes de la fractura final, el verdadero fallo es entonces difícil de determinar y por tal razón las normas recomiendan que la norma finalice en antes del 5% de deformación (Hodgkinson E. b., 2000).

1.5.2 Contenido de fibra

Las pruebas de contenido de fibra no son de naturaleza mecánicas, sin embargo, es necesario mencionarlas ya que son indispensables en el análisis general del material y complementan los resultados de los ensayos mecánicos. Estas pruebas consisten en determinar la cantidad de cada uno de los elementos involucrados en el compuesto, así se conoce con exactitud la cantidad de resina impregnada en la fibra de vidrio (ISO 1172, 1996).

El ensayo requiere de una calcinación³, la norma 1172 describe dos métodos para calcular el contenido de fibra, el método A se aplica cuando dentro de los componentes solo existe fibra de vidrio y resina, el método B se aplica cuando se tienen compuestos minerales en la resina además de la fibra de vidrio.

Para comenzar el procedimiento la norma sugiere tener dos muestras lo más idénticas posibles, si en los resultados entre las primeras dos existe una diferencia menor del 5% la experimentación es aceptable, en caso contrario se requiere una tercera, lo más idéntica posible a las primeras dos, en estos casos se recomienda que todas sean adquiridas de una unidad primaria, si las circunstancias no lo permiten, las siguientes deben ser tan representativas del primer material como sea posible. La norma no limita el número de muestras y la totalidad de estas puede ser definida por el personal (ISO 1172, 1996).

El tamaño de las muestras debe ser de tal manera que quepan en un crisol⁴ de silicio o porcelana, la masa de cada una debe estar de entre 2 a 10 g y de 2 a 20 g para componentes impregnados en un molde. Los instrumentos necesarios son aquellos que normalmente se encuentran en cualquier laboratorio.

El paso primordial consiste en colocar el bote de crisol con la muestra, en el horno de mufla para realizar el precalentado a una temperatura constante de 625°C. Al terminar se deja enfriar en el desecador a temperatura ambiente y se vuelve a pesar. Realizados los pasos necesarios se procede a calcular los resultados, para obtener el contenido de la fibra de vidrio M_{fv} expresada como un porcentaje de la masa inicial se utiliza la ecuación (44):

$$M_{fv} = \frac{m_3 - m_1}{m_2 - m_1} \times 100 \quad (44)$$

Donde:

m_1 : Masa inicial en gramos del crisol seco;

m_2 : Masa inicial en gramos del crisol junto a la muestra seca;

m_3 : Masa final en gramos del crisol más el residuo después de la calcinación.

³ “Someter al calor un cuerpo para eliminar las sustancias volátiles que pueda contener” (Real Academia Española, 2017)

⁴ “Recipiente hecho de material refractario, que se emplea para fundir alguna materia a temperatura muy elevada” (Real Academia Española, 2017)

En el caso de que las muestras contengan materia volátil y el paso de secado se omita se reemplaza de la ecuación anterior, m_2 por m_6 , en donde m_6 es la masa inicial en gramos del crisol más la pieza de prueba sin secar. Los resultados finales se deben expresar como el promedio de dos o tres mediciones individuales. De las pruebas de contenido de fibra se puede calcular la fracción volumétrica, esta se usa como un indicador de que tan efectivo es el procedimiento de fabricación, en la Tabla 3 se describen las fracciones volumétricas comunes en diferentes procesos.

Tabla 3 Fracciones de volumen de fibra comunes en diferentes procesos Referencia: (Daniel Gay, Composite materials, design and applications , 2003)

Proceso de moldeo	Fracción volumétrica de la fibra
Moldeo por contacto	30%
Moldeo por compresión	40%
Devanado de filamentos	60% - 85%
Moldeo por vacío	50% - 80%

Para calcular la fracción volumétrica de la fibra V_f se utiliza la formula (31 a).

1.6 FALLAS EN LOS COMPUESTOS FIBRA-MATRIZ.

La diversidad de propiedades en un material compuesto provoca que los procesos de falla sean complejos, debido a que cada uno de los componentes se comportan de diferente modo, por ejemplo, los daños en la matriz incluyen el crecimiento de huecos, mientras que en las fibras incluye la presencia de microfracturas, en conjunto se puede provocar un daño debido a la desunión. Además, en un arreglo laminado, los compuestos generan propiedades diferentes en cada dirección.

Existen teorías para predecir las fallas en un compuesto con el objetivo de conocer con anticipación si el nivel de degradación en el compuesto es inaceptable. Debido a la naturaleza del material, puede ocurrir que, aunque este no haya fallado catastróficamente, los daños sean tan severos que el material ya no puede soportar las cargas de trabajo. Por otro lado, en algunos casos la estructura puede operar aceptablemente aún después de que hayan ocurrido fallas. Las teorías más utilizadas son la teoría del esfuerzo máximo, a teoría de la deformación máxima, la teoría de falla Tsai-Hill y la teoría de falla Tsai-Wu (Luz Stella Arias Maya, 2004).

El proceso de falla de un laminado consiste en una combinación de micro fallas, cuya ocurrencia depende de muchos factores, tales como las propiedades de las fibras, de la matriz y de la interface (matriz-fibra) y de la interfaz entre láminas. Existe una amplia variedad de modos de falla en laminado Figura 27, como la pérdida de adherencia entre fases, delaminación (separación entre láminas) producida por esfuerzos cortantes o el efecto de una grieta, agrietamiento de la matriz, pandeo local, rotura y extracción. Dependiendo de la longitud de las fibras, éstas podrían ser fracturadas o despegadas y extraídas de la matriz.

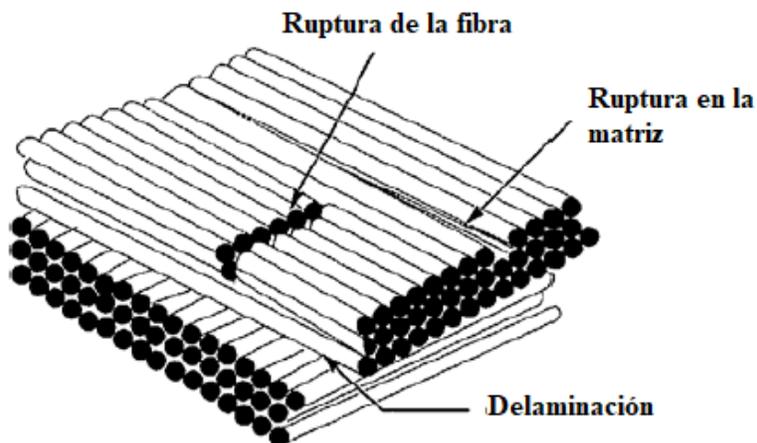


Figura 27 Tipos de fallas en un laminado. Fuente: (Daniel Gay, 2003).

Los modos de falla también se presentan dependiendo del tipo de carga aplicado al material, cuando las cargas exceden los límites críticos como se muestra en la Figura 28. En tensión, las fibras fallan al ser quebradas, lo que puede conllevar a la fractura del laminado, mientras que en compresión la falla ocurre por micro pandeo, por lo tanto, la resistencia a la compresión es menor que la de tracción (Arias, 2004).

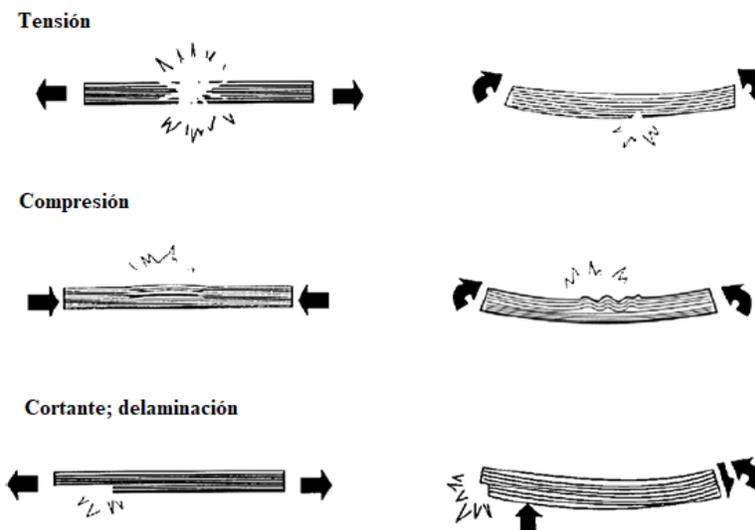


Figura 28 Modos de falla ocasionados por cargas excedentes. Fuente: (Daniel Gay, Composite Materials Design and Applications, 2003)

En la falla de un laminado también intervienen aspectos como; esfuerzos residuales térmicos (producidos durante el curado) y desalineación de la fibra después de ser embebida al laminado. Además, si existen concentradores de esfuerzos como grietas y espacios en la interface (burbujas), la predicción y el proceso se tornará más complejo. Todos los factores mencionados tienen influencia en el comportamiento del compuesto y en caso de utilizar predicciones de falla estos deben estar involucrados.

CAPÍTULO 2 - DESARROLLO EXPERIMENTAL

En el presente trabajo se llevaron a cabo cuatro tipos de pruebas: tensión, compresión, cortante y contenido de fibra; a dos tipos de compuestos uno de fibra unidireccional (UD) y otro con fibra triaxial (TRIAX) los dos mezclados con resina epóxica. Estos compuestos son el material que más se utilizó en la producción de las aspas de un aerogenerador de 30 kW, diseñado y fabricado en las instalaciones del Centro de Investigación CIATEQ, ubicado en el estado de Querétaro, Méx.

Con el objetivo de cumplir con las necesidades del proyecto P07: Integración y consolidación de capacidades nacionales para el desarrollo de pequeños aerogeneradores mediante el diseño, construcción y pruebas exhaustivas de un aerogenerador con capacidad de 30kW, del Centro Mexicano de Innovación en Energía Eólica (CEMIE-eólico), se evaluaron las propiedades de los dos compuestos para cerciorarse que la manufactura este cumpliendo con las propiedades a las que el aerogenerador fue diseñado.

2.1 MATRIZ DE ENSAYOS

Tal como se ha mencionado en el marco teórico, las pruebas en materiales compuestos necesitan especímenes (probetas); para establecer las medidas y características de estos, se tomaron en cuenta las propuestas de la normativa, los datos que arrojó la infusión de capas de refuerzo y las recomendaciones del CENER (Centro Nacional de Energías Renovables). Como resultado en este capítulo se obtiene la matriz de ensayos que describe las características y dimensiones de cada una de las probetas.

En la descripción de los procedimientos para las pruebas en el apartado 1.5.1, se menciona que las normas recomiendan un mínimo de 5 probetas exitosas en las de tensión, compresión y cortante. Entonces, se fabricaron 10 probetas por cada tipo para tener un rango aceptable de error, en el caso de las pruebas para contenido de fibra se producen un total de 6 muestras por cada arreglo de fibras, teniendo un total de 136 especímenes.

Para la aproximación de los espesores de las probetas, se realizó una infusión en dos capas de refuerzo (fibra de vidrio unidireccional y triaxial) con dimensiones de 25cm x 25 cm. A las piezas resultantes se les midieron los espesores con un micrómetro en 5 puntos, los datos y el promedio de estos valores se aprecian en la Tabla 4. Los promedios indican de manera muy aproximada el espesor que tendrá cada una de las capas de refuerzo, por lo tanto, se usaron para estimar la cantidad de capas de fibras que se usaron para obtener el espesor deseado en los especímenes.

Tabla 4 Espesores y promedios de una capa de los materiales descritos

Espesores [mm]	
UD	TRIAX
0.74	0.88
0.78	0.83
0.77	0.88
0.75	0.96
0.78	0.93
<u>0.77</u>	<u>0.88</u>

La geometría (forma y tamaño) en las probetas para las pruebas de tensión fue realizada según la norma ISO 527-5, tipo A. La geometría para las de compresión fue la descrita en la norma ISO 14126, tipo B1. Las de cortante realizadas bajo la norma ISO 527-5 y las de contenido de fibra fueron fabricadas de acuerdo a la descripción de la norma ISO 1172.

Se revisaron distintas propuestas de matriz (en las que los cambios más significativos fueron en los espesores de las probetas), hasta llegar a la matriz descrita en la Tabla 5.

Tabla 5 Matriz de ensayos

ID del plato	Norma utilizada	ID de geometría	Número probetas	ID material	Ángulo de prueba	Ancho de probeta [mm]	Largo de probeta [mm]	Número de telas	Espesor [mm]	Tipo de prueba
AA	ISO 527-5	Tipo A	10	UD-GF-Epoxi	0	15	250	2	1.46	TENSION
	ISO 527-5	Tipo A	10	UD-GF-Epoxi	90	15	250	2	1.46	TENSION
	ISO 1172	-	6	UD-GF-Epoxi	-	30	30	2	1.46	FVF
AB	ISO 14126	Tipo B1	10	UD-GF-Epoxi	0	10	110	4	2.92	COMPRESION
	ISO 14126	Tipo B1	10	UD-GF-Epoxi	90	10	110	4	2.92	COMPRESION
	ISO 1172	-	6	UD-GF-Epoxi	-	30	30	4	2.92	FVF
AC	ISO 14129	-	10	UD-GF-Epoxi	± 45	25	250	16	11.68	CORTANTE
	ISO 1172	-	6	UD-GF-Epoxi	-	30	30	16	11.68	FVF
AD	ISO 527-5	Tipo A	10	TRIAX-GF-Epoxi	$0, \pm 45$	15	250	2	1.76	TENSION
	ISO 527-5	Tipo A	10	TRIAX-GF-Epoxi	$90, \pm 45$	15	250	2	1.76	TENSION
	ISO 1172	-	6	TRIAX-GF-Epoxi	-	30	30	2	1.76	FVF
AE	ISO 14126	Tipo B1	10	TRIAX-GF-Epoxi	$0, \pm 45$	10	110	4	3.52	COMPRESION
	ISO 14126	Tipo B1	10	TRIAX-GF-Epoxi	$90, \pm 45$	10	110	4	3.52	COMPRESION
	ISO 1172	-	6	TRIAX-GF-Epoxi	-	30	30	4	3.52	FVF
AF	ISO 14129	-	10	TRIAX-GF-Epoxi	$\pm 45, 0, 90$	25	250	6	5.28	CORTANTE
	ISO 1172	-	6	TRIAX-GF-Epoxi	-	30	30	6	5.28	FVF

2.2 PLAN DE TRABAJO

Para la obtención correcta de las probetas, se estableció elaborar primeramente placas (laminados o platos) de los compuestos, para después obtener cada una de las piezas. Debido a que algunas de las placas son muy delgadas, se propuso acomodar de forma simétrica y balanceada, esto evitó que se curvaran. Por ejemplo, la fibra de vidrio UD contiene fibras direccionadas a 0° (850 g/m^2) de un lado del tapete y a 90° (81 g/m^2) del otro lado; por lo que el acomodo de 2 capas se propuso de la forma 0/90 - 90/0. Para la fibra de vidrio TRIAX, el acomodo fue de $\pm 45/0 - 0/\pm 45$.

En seguida se muestra la apariencia de cada una de las probetas y se describen los arreglos y características de las placas de las que se obtendrán. Así como, la sugerencia del maquinado para cada una de las piezas.

2.2.1 Fibra de vidrio unidireccional (UD)

2.2.1.1 Pruebas de tensión

ID del plato: AA

Norma utilizada ISO 527-5

Material: UD-GF-Epoxi

Se observa en la Figura 29 las dimensiones de los cupones de fibra unidireccional, también se representa la dirección que llevan las fibras, así como la dirección de la carga que se aplicó en las pruebas.

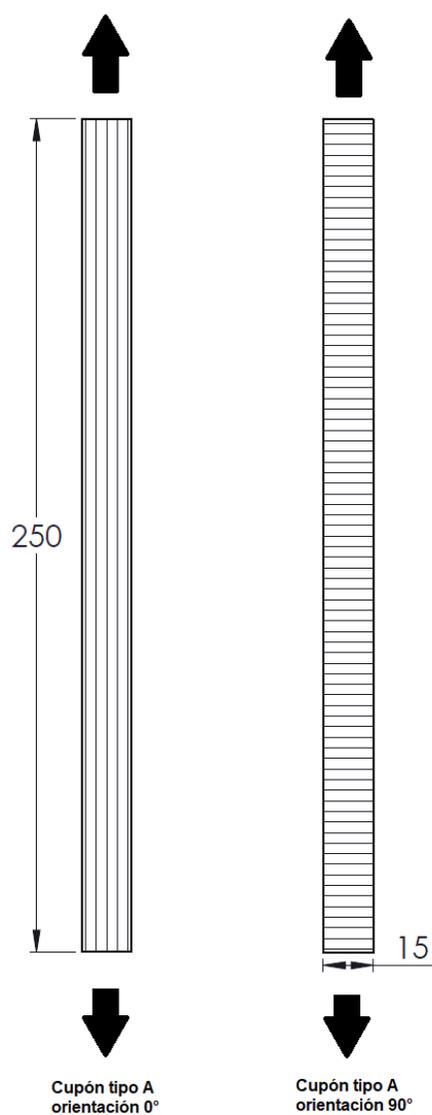
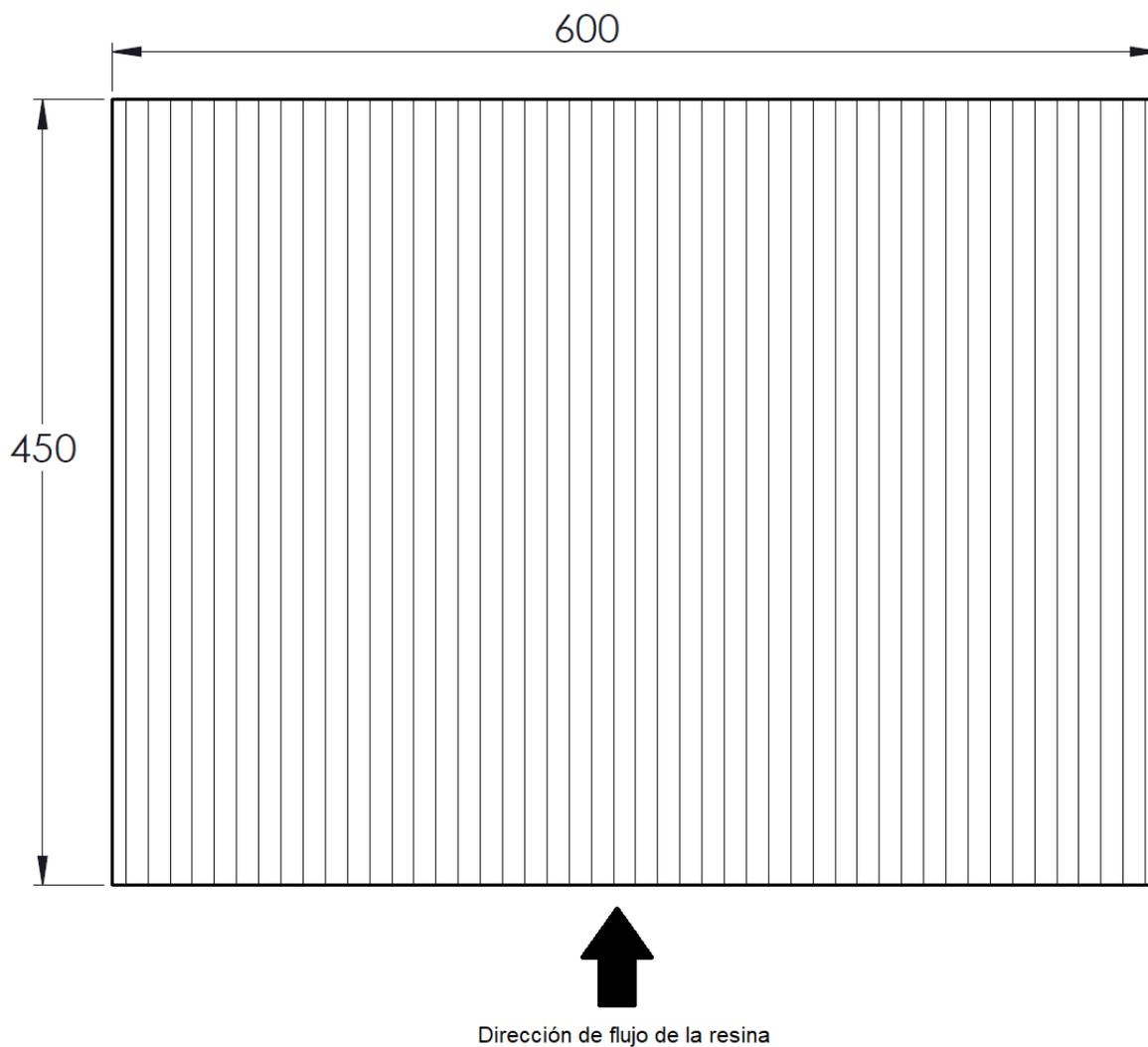


Figura 29. Dirección de carga aplicada en las probetas (dimensiones en mm). Fuente: Elaboración propia

La placa de la cual se obtuvieron los cupones tiene las dimensiones mostradas en la Figura 30, en esta figura se representa también la orientación de los filamentos de la fibra de vidrio. Para la infusión del plato, la resina y la bolsa de vacío se acomodaron de manera que el flujo de entrada de resina siguió la dirección que se muestra en la Figura 30.



*Figura 30. Dirección de flujo de resina y filamentos de la fibra de vidrio en el plato de fabricación AA (dimensiones en mm).
Fuente: Elaboración propia*

2.2.1.2 Pruebas de compresión

ID del plato: AB

Norma utilizada ISO 14126

Material: UD-GF-Epoxi

Tipo de prueba: B

Se observa en la Figura 32 las dimensiones de las probetas, también la dirección en la que los refuerzos se orientaron, así como, la dirección de carga que se les aplico.

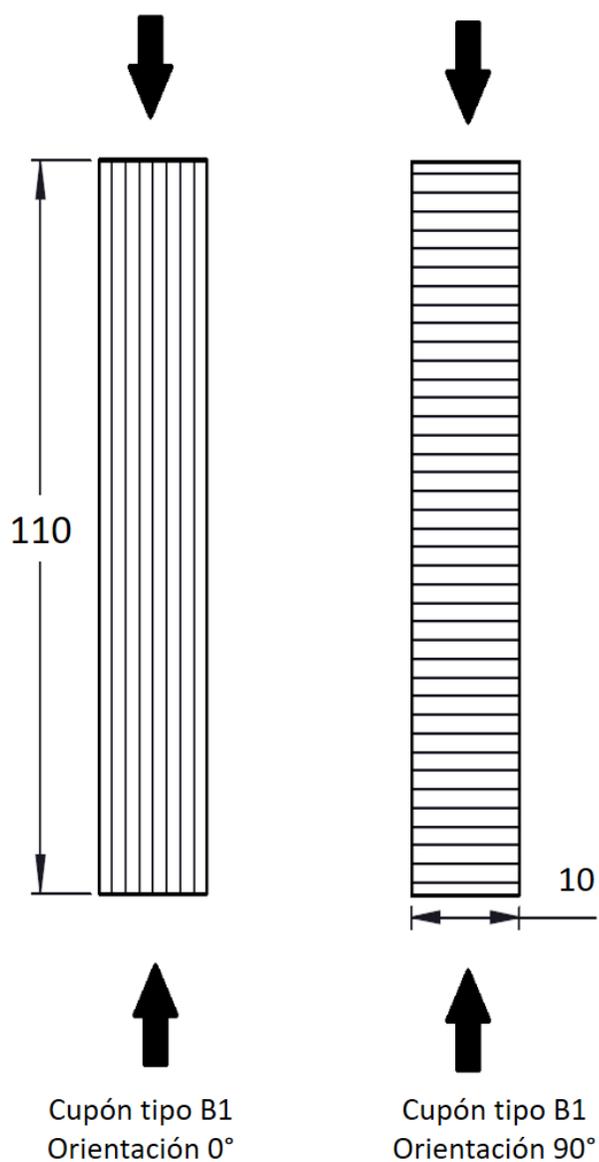
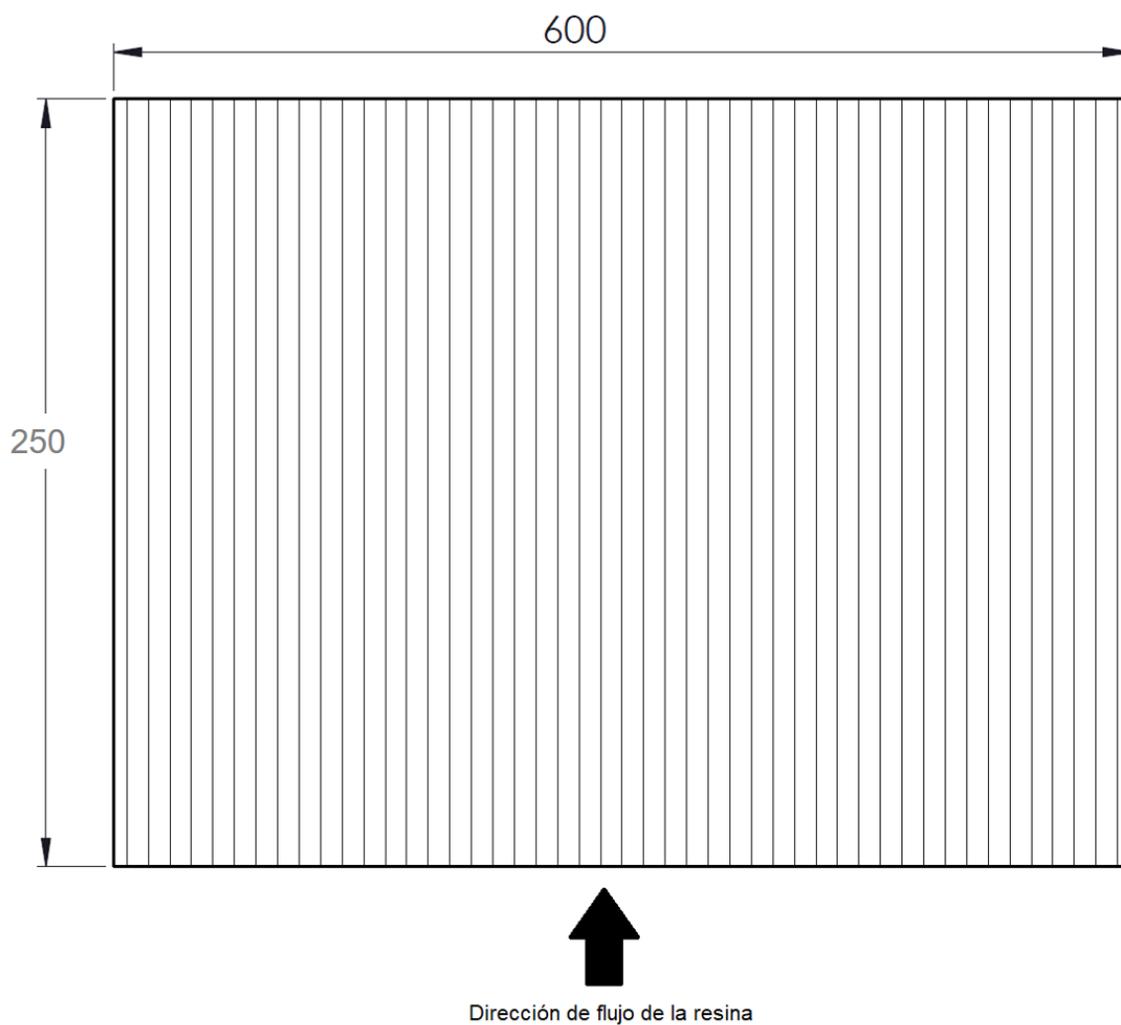


Figura 32. Dirección de carga aplicada en los cupones (dimensiones en mm). Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 33 se muestran las dimensiones a las cuales se fabricó la placa lo mismo que, la orientación de los filamentos de la fibra de vidrio.

Para llevar a cabo la infusión del plato, la resina y la bolsa de vacío se acomodaron de manera que el flujo de entrada de resina siguiera la dirección que se muestra en la Figura 33.



*Figura 33 Dirección de flujo de resina y filamentos de la fibra de vidrio en el plato de fabricación AB (dimensiones en mm).
Fuente: Elaboración propia.*

Para la obtención de cada espécimen, se siguió el acomodo mostrado en la Figura 34, así mismo, se muestran las dimensiones (30x30 mm) de los especímenes los cuales se utilizaron para las pruebas de contenido de fibra, la normativa que referencia estos especímenes es la ISO 1172. El corte de cada una de las probetas se realizó utilizando una cortadora por chorro de agua.

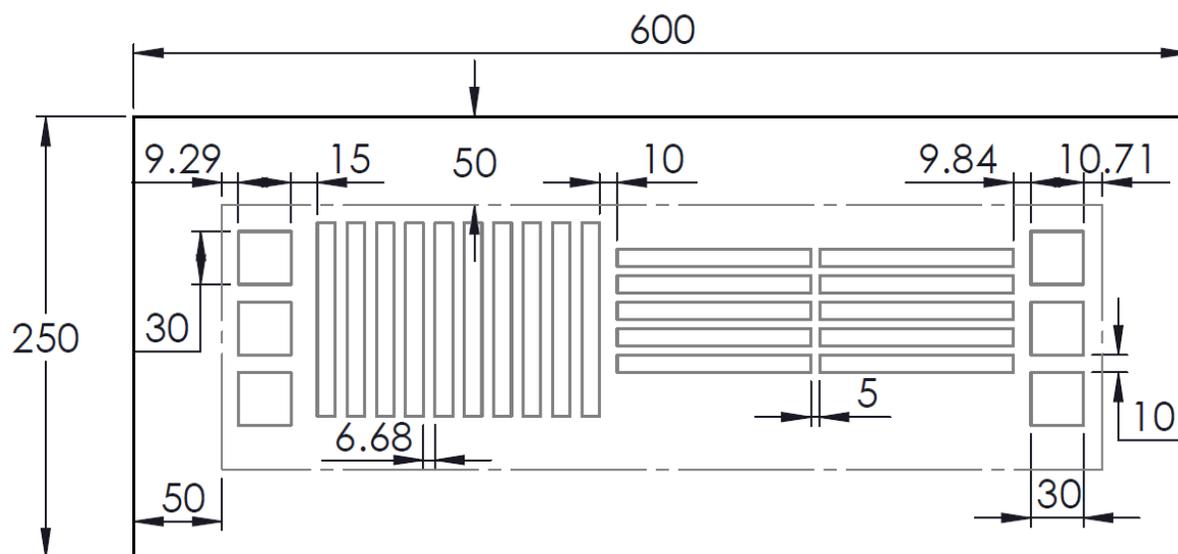


Figura 34 Acomodo de especímenes en el plato (dimensiones en mm). Fuente: Elaboración propia.

2.2.1.3 Pruebas de cortante

ID del plato: AC

Norma utilizada: ISO 14129

Material: UD-GF-Epoxi

Tipo de prueba: n. a.

Se observa en la Figura 35 las dimensiones del cupón, se representa también la dirección de las fibras ($\pm 45^\circ$) la que permitió el arreglo de capas mostrado en la Figura 36, puesto que se pretendían un total de 16. La dirección de los cortes mostrada en la Figura 37 permitió que los cupones tuvieran una secuencia de laminación de la forma $+45/-45/+45/-45/+45/-45/+45/-45/-45/+45/-45/+45/-45/+45$. En la misma figura se muestra también la dirección de la carga que se les aplicó.

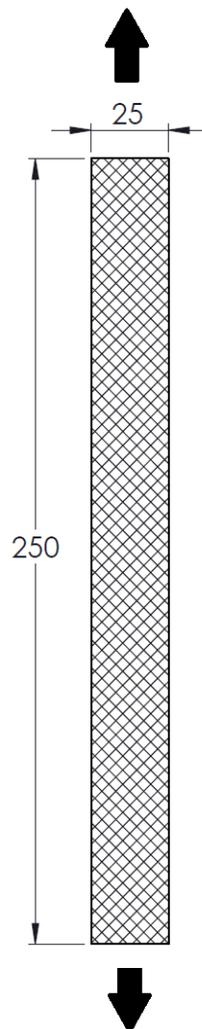


Figura 35. Orientación y dimensionamiento de cupón para pruebas de cortante UD (dimensiones en mm). Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 36 se muestran las dimensiones para la fabricación del plato y la orientación que llevaron las capas de fibra.

Para obtener el resultado mostrado, las capas se ordenaron llevando a cabo la secuencia siguiente de direcciones: 0/90/0/90/0/90/0/90/90/0/90/0/90/0/90/0. Para la infusión del plato, la resina y la bolsa de vacío se acomodaron de manera que el flujo de entrada de resina siguiera la dirección que se muestra en la Figura 36.

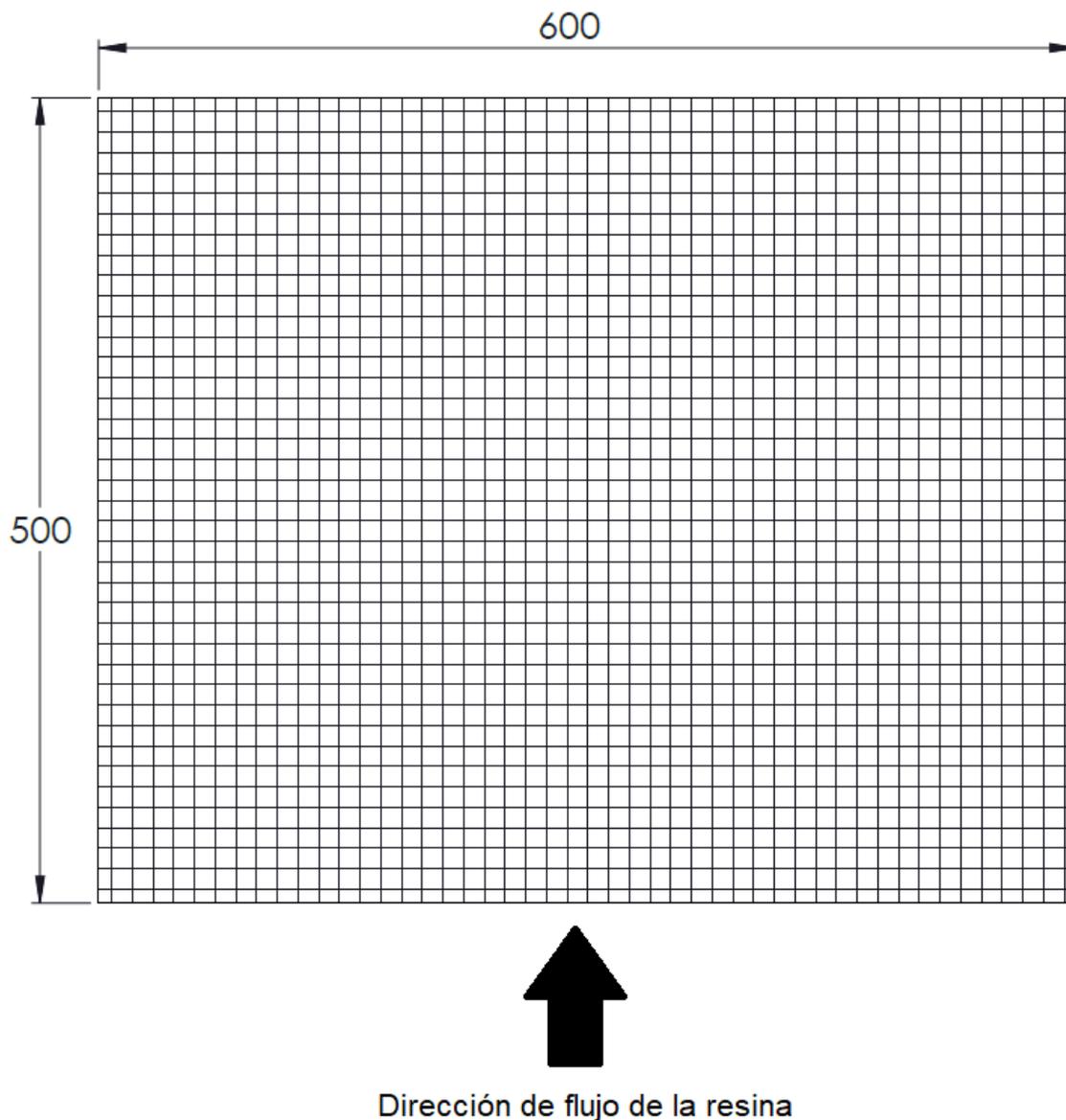


Figura 36. Dirección de flujo de resina y dirección de filamentos de la fibra de vidrio en el plato de fabricación AC (dimensiones en mm). Fuente: Elaboración propia.

Para la obtención de cada espécimen, se siguió el acomodo mostrado en la Figura 37, así mismo, se muestran las dimensiones (30x30 mm) las cuales se utilizaron para las pruebas de contenido de fibra, la normativa de referencia para estas es la ISO 1172. El corte de cada una de las probetas se realizó utilizando una cortadora por chorro de agua.

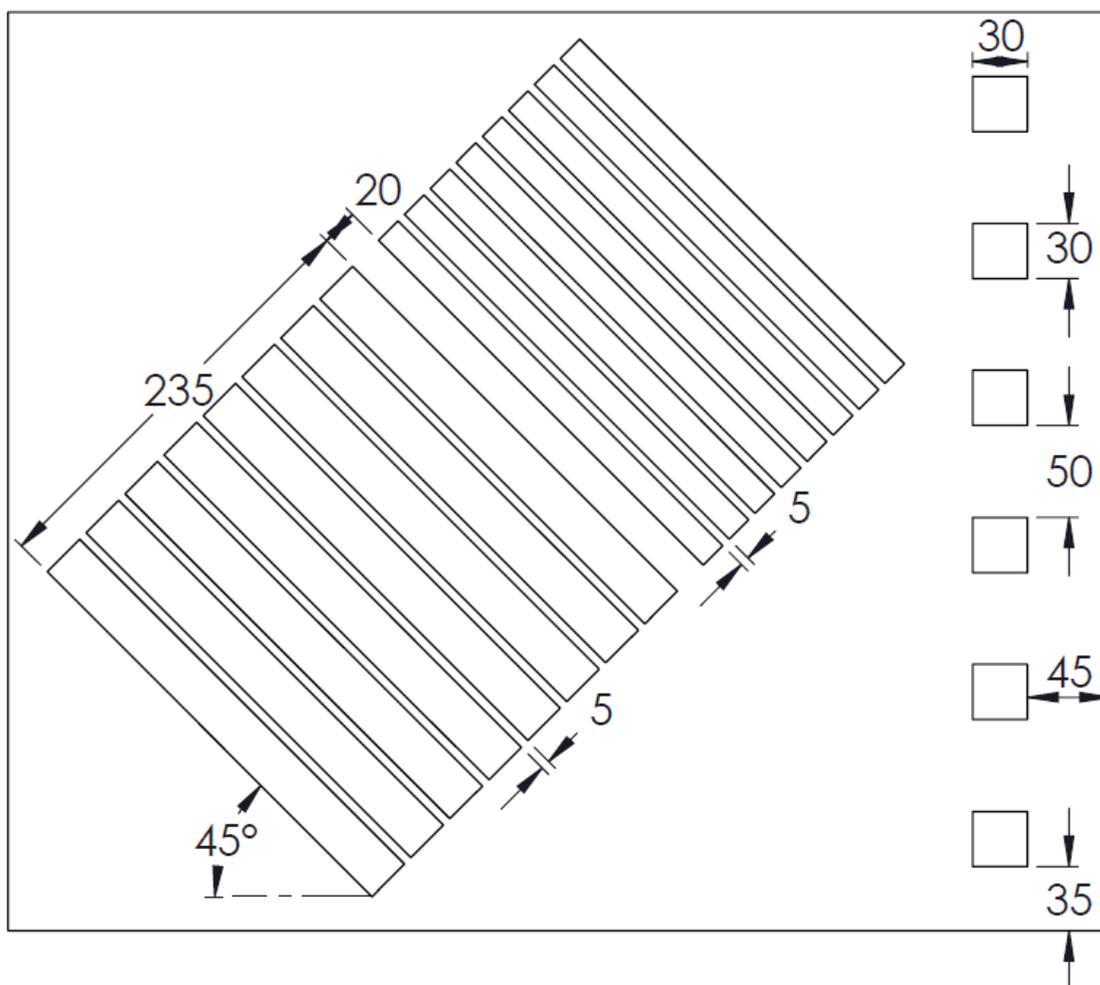


Figura 37 Acomodo de especímenes en el plato (dimensiones en mm). Fuente: Elaboración propia.

2.2.2 Fibra de vidrio triaxial (TRIAX)

2.2.2.1 Pruebas de tensión.

ID del plato: AD

Norma utilizada: ISO 527-5

Material: TRIAX-GF-Epoxi

Tipo de prueba: Tipo A

Se observa en la Figura 38 las dimensiones de las probetas, también la dirección a la que se orientaron las fibras, así como la dirección de la carga que les aplicó.

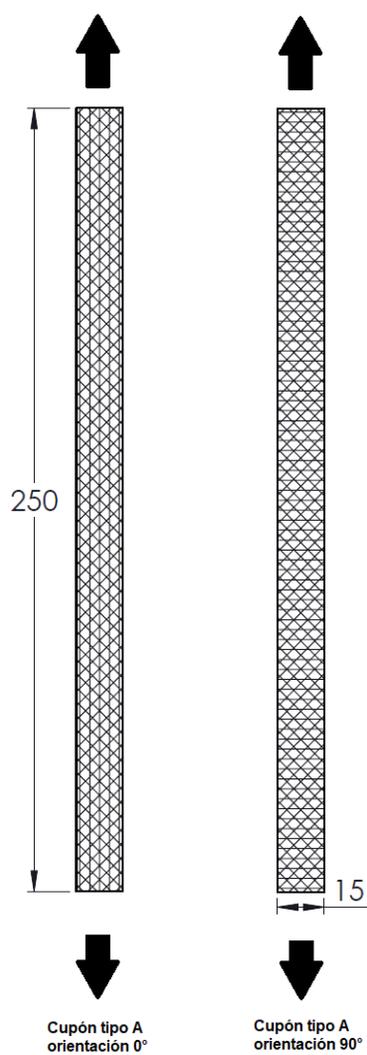


Figura 38 Dimensiones y dirección de carga de los cupones para pruebas de tensión con fibra TX (dimensiones en mm). Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 39 se muestran las dimensiones a las cuales se fabricó el plato lo mismo que la orientación de los filamentos de la fibra de vidrio.

Para llevar a cabo la infusión del plato, la resina y la bolsa de vacío se acomodaron de manera que el flujo de entrada de resina siguió la dirección que se muestra en la Figura 39.

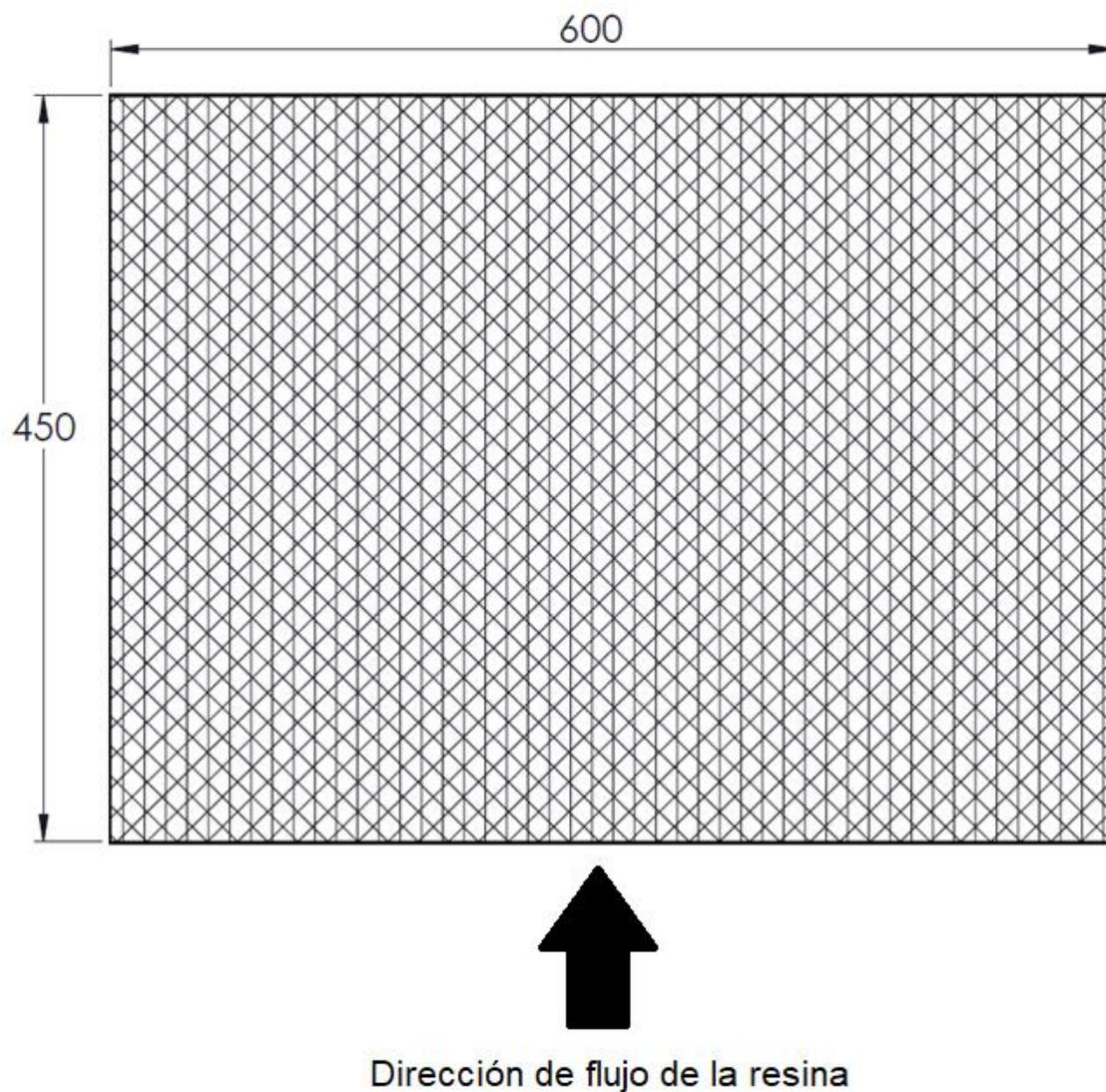


Figura 39 Dirección de flujo de resina y dirección de filamentos de la fibra de vidrio en el plato de fabricación AD (dimensiones en mm). Fuente: Elaboración propia.

Para la obtención de cada espécimen, se siguió el acomodo mostrado en la Figura 40, así mismo, se muestran las dimensiones (30x30 mm) de los especímenes los cuales se utilizaron para las pruebas de contenido de fibra, la normativa que referencia estos especímenes es la ISO 1172. El corte de cada una de las probetas se realizó utilizando una cortadora por chorro de agua.

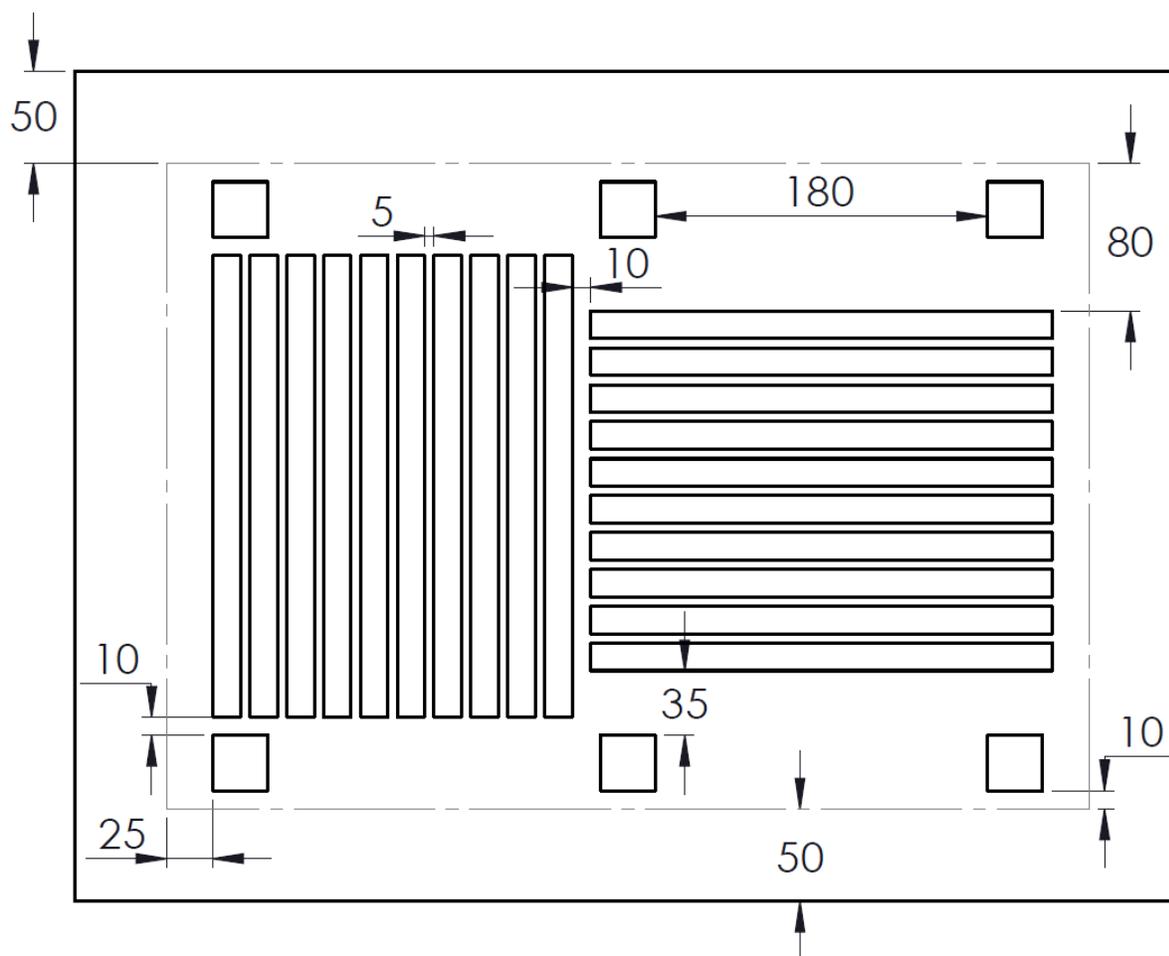


Figura 40 Acomodo de especímenes en el plato AD (dimensiones en mm). Fuente: Elaboración propia.

2.2.2.2 Pruebas de compresión.

ID del plato: AE

Norma utilizada ISO 14126

Material: TRIAX-GF-Epoxi

Tipo de prueba: B

Se observa en la Figura 41 las dimensiones de los cupones, también la dirección a la que se orientaron las fibras, así como la correspondiente a la carga que se les aplicó.

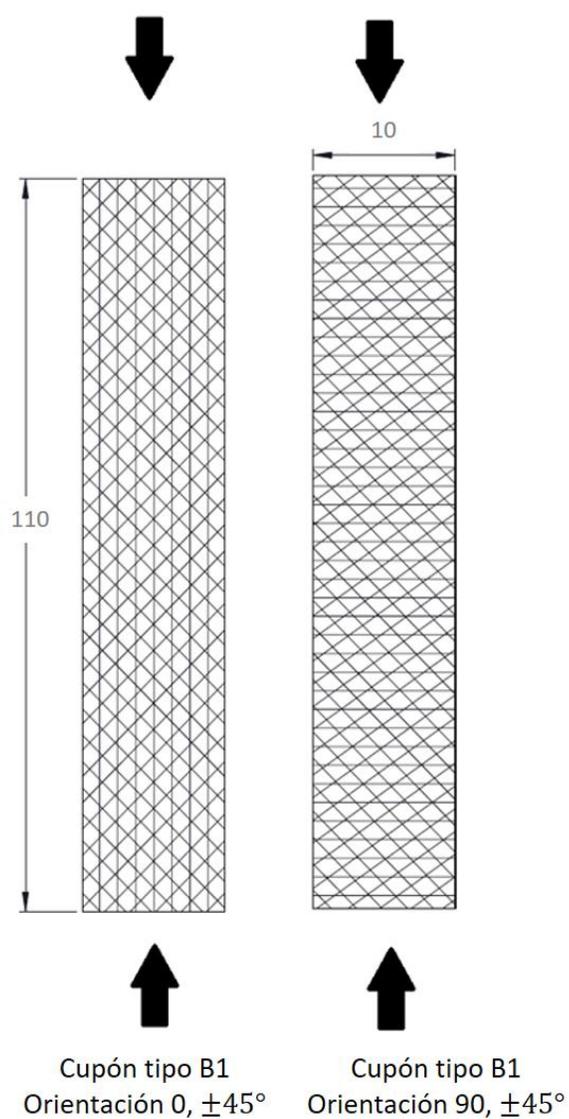
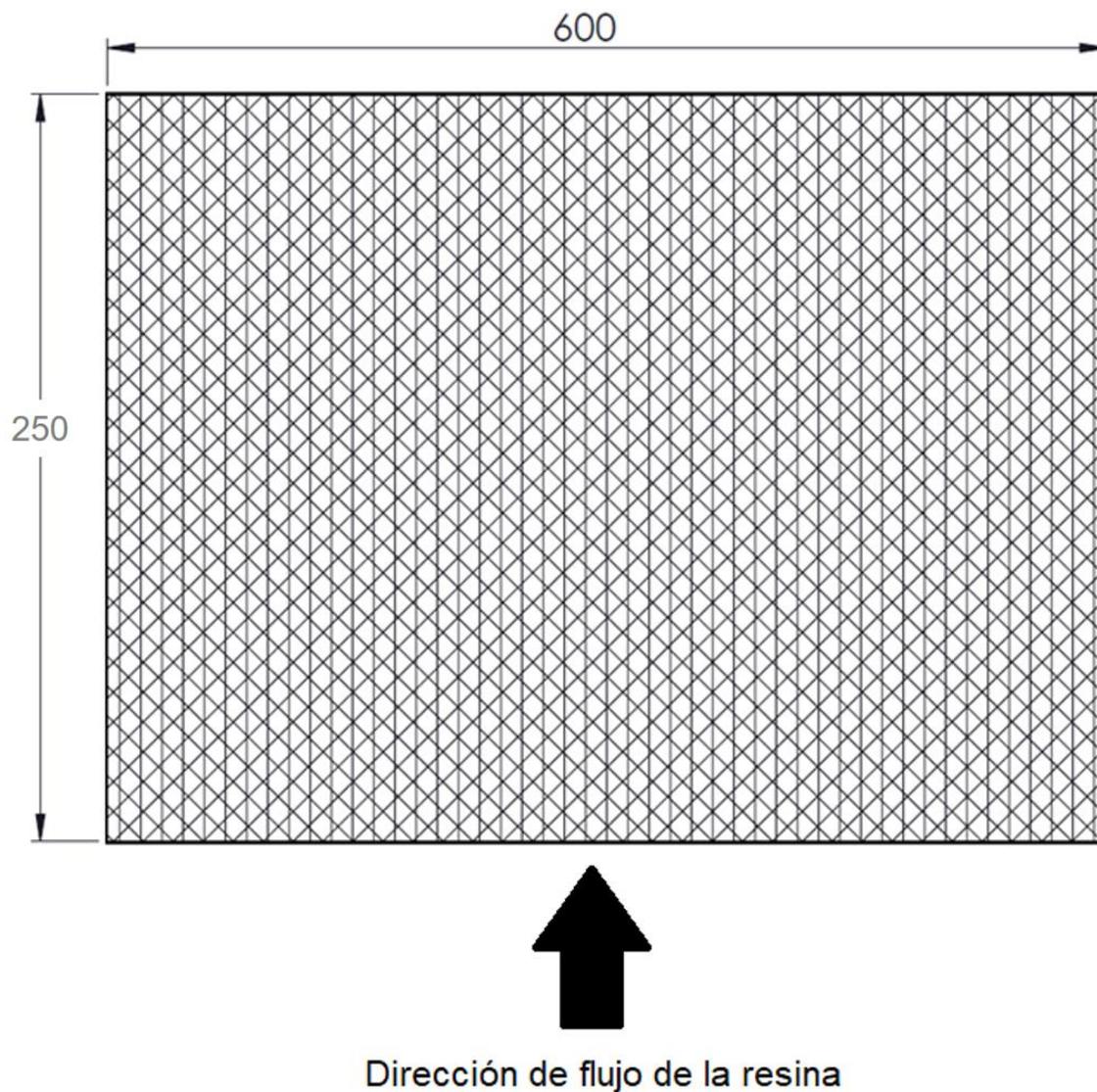


Figura 41 Dimensiones y direcciones de carga de los cupones para el plato AE (dimensiones en mm). Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 42 se muestran las dimensiones a las cuales se fabricó el plato, y la orientación de los filamentos de la fibra de vidrio. Para llevar a cabo la infusión del plato, la resina y la bolsa de vacío se acomodaron de manera que el flujo de entrada de resina siguió la dirección que se muestra en la Figura 42.



*Figura 42 Dirección de flujo de resina y filamentos de la fibra de vidrio en el plato de fabricación AE (dimensiones en mm).
Fuente: Elaboración propia.*

Para la obtención de cada espécimen, se siguió el acomodo mostrado en la Figura 43, así mismo, se muestran las dimensiones (30x30 mm) de éstos los cuales se utilizaron para las pruebas de contenido de fibra, la normativa que referencia dichos especímenes es la ISO 1172. El corte de cada una de las probetas se realizó utilizando una cortadora por chorro de agua.

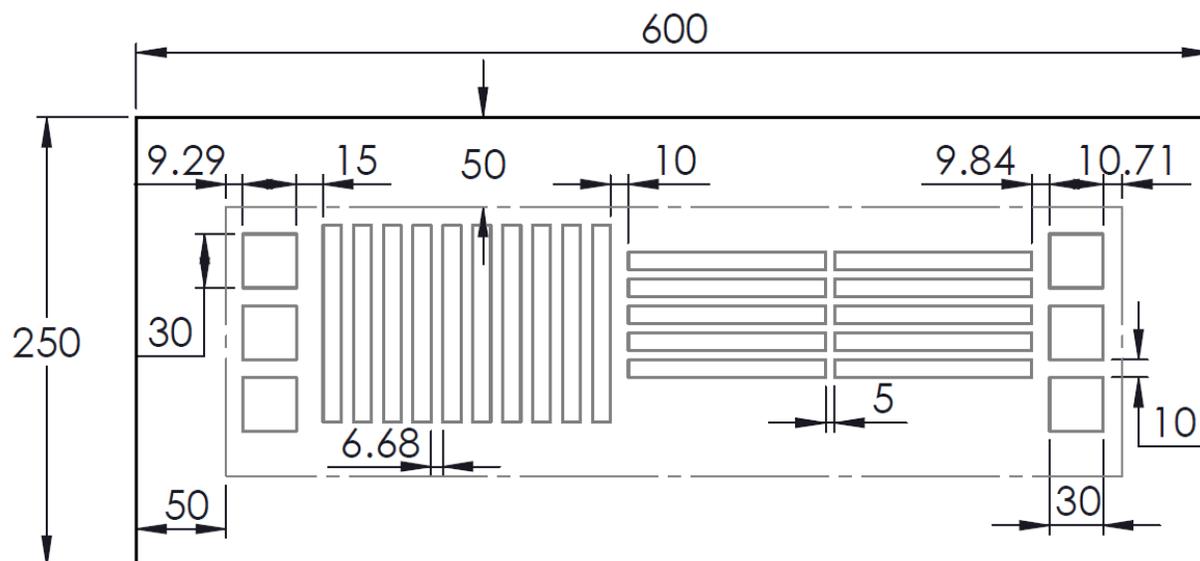


Figura 43 Acomodo de especímenes en el plato AE (dimensiones en mm). Fuente: Elaboración propia.

2.2.2.3 Pruebas de cortante

ID del plato: AF

Norma utilizada: ISO 14129, ISO 1172

Material: TRIAX-GF-Epoxi

Tipo de prueba: n. a.

Se observa en la Figura 44 las dimensiones de la probeta, también la dirección de una capa de fibra triaxial sin embargo, esta cambió de acuerdo al arreglo de capas mostrado en la Figura 45 y los cortes presentados en la Figura 46, puesto que en total se plantearon 16 capas y se debe obtener un cupón simétrico y balanceado. En la Figura 44 también se muestra la dirección de la carga que les aplicó a cada uno de los cupones.

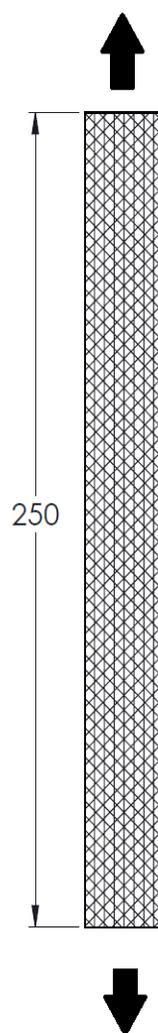


Figura 44 Orientación de las fibras, dirección de carga y dimensionamiento del cupón para pruebas de cortante triaxial (dimensiones en mm). Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 45 se muestran las dimensiones a las cuales se fabricó el plato y la orientación de los filamentos de la fibra de vidrio. Para lograr el resultado mostrado, las capas de la tela triaxial orientadas a 0° se ordenaron llevando a cabo la secuencia siguiente de direcciones: 0/90/0/90/0/90/0/90/0/90/0/90/0/90/0.

La infusión del plato, la resina y la bolsa de vacío se ordenaron de manera que el flujo de entrada de resina siguiera la dirección que se muestra en la Figura 45.

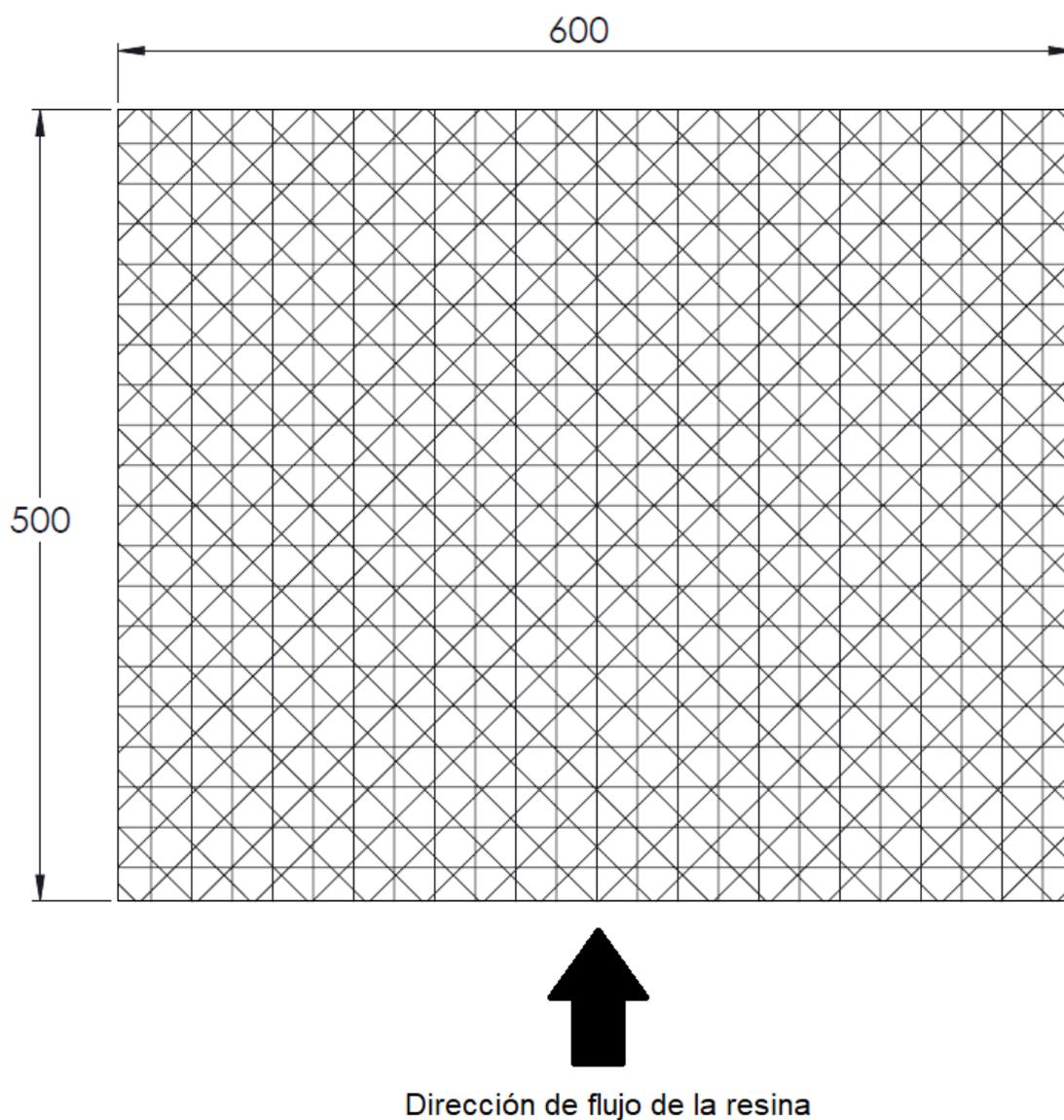


Figura 45 Dirección de flujo de resina y dirección de filamentos de la fibra de vidrio en el plato de fabricación AF (dimensiones en mm). Fuente: Elaboración propia.

Para la obtención de cada espécimen, se siguió el acomodo mostrado en la Figura 46, así mismo, se muestran las dimensiones (30x30 mm) utilizadas para las pruebas de contenido de fibra. La normativa de referencia es la ISO 1172. El corte de cada una de las probetas se realizó utilizando una cortadora por chorro de agua.

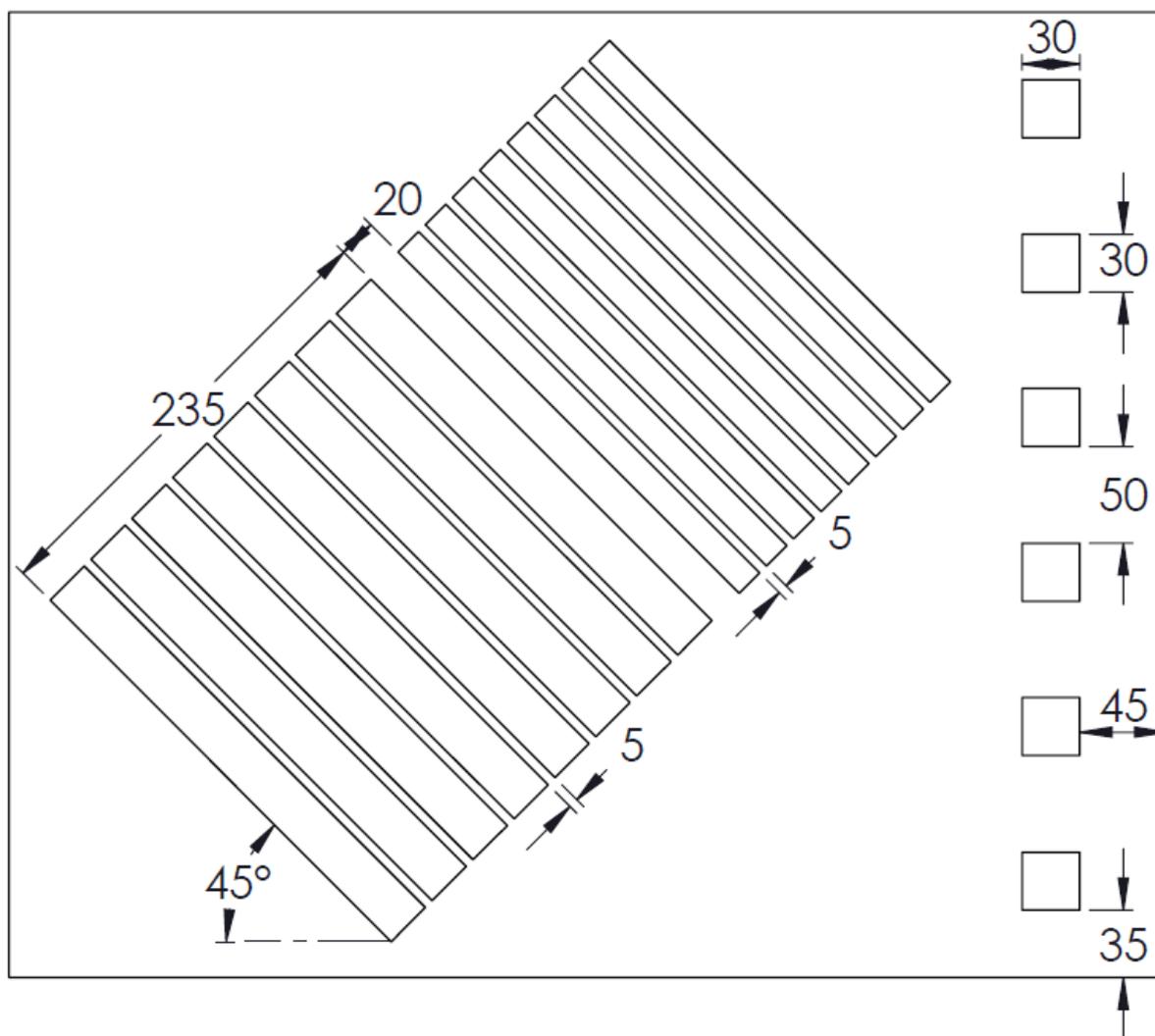


Figura 46 Acomodo de especímenes en el plato AF, dimensiones en mm.

2.3 MATERIALES

2.3.1 Infusión

Enseguida se describen los materiales que se utilizaron en la infusión de cada uno de los platos de material compuesto, así como sus principales características.

El refuerzo que se utilizó es una fibra Saertex® en sus dos modalidades de dirección, unidireccional (UD) y triaxial (TRIAX). La unidireccional (según ficha técnica) tiene una relación masa-área total de 943 g/m^2 y esta elaborada del tipo de fibra E-glass 2.400 TEX. La capa orientada a 0° de la fibra triaxial tiene una relación de 567 g/m^2 e igualmente esta fabricada con E-glass 2.400 TEX, las capas a $\pm 45^\circ$ un valor de 300 g/m^2 y están fabricadas de E-glass 300 TEX, se tiene entonces una relación masa-área total de 1173 g/m^2 , (Saertex).

Para la matriz se utilizó resina RIMR 135 de la marca Hexion™ con un catalizador RIMH 134 de la misma marca. La densidad de esta matriz está en el rango de $[1,13 - 1,17] \text{ g/m}^3$ y tiene una viscosidad entre $[700 - 1.100] \text{ mPa} \cdot \text{s}$, (Hexion, 2006).

En la infusión de cada una de las placas se utilizó una bolsa de nylon para crear el vacío, la bolsa tiene una resistencia tensil de 48 MPa y puede soportar una temperatura de 212°C (Ippilon KM1300, 2015).

En el arreglo previo para la infusión de cada una de las piezas del compuesto, entre la bolsa de vacío y la malla de flujo (descrita a continuación), se utilizó una tela desmoldante la cual permite que las mangueras por las que se inyecta la resina u otro elemento agregado, no se adhieran a la pieza. Esta tela es fabricada de nylon y fue seleccionada por su capacidad de soportar altas temperaturas (232°C), (Bleeder Lease B, 2015).

La malla de flujo fue utilizada en el arreglo previo a la infusión para facilitar la entrada de resina y permitiera que esta fluyera en toda la pieza, (Knitflow 105 HT, 2013).

Para sellar la bolsa de vacío se utilizó una cinta con excelente nivel de adhesión, por lo que las bolsas pudieron recolocarse con facilidad en caso de algún desperfecto. Esta cinta resiste altas temperaturas y fue ideal para el curado, además de que se retira fácilmente (GS-213-3, 2015). Otra de las cintas que se utilizó fue la de pegado, la cual es sensible a la presión y sirvió para unir o acomodar el arreglo.

El flujo de resina y el de aire fueron controlados por medio de mangueras, la primera con una manguera de goma de silicona y tubos de nylon. El segundo con tubos espiral de nylon y conexiones de “T” del mismo plástico, además se utilizó una manguera de membrana especial para la infusión de vacío (MTI).

Por último, se aplicó la película desmoldante, la cual se aplicó en antes de colocar cualquier material en el molde, esta no permitió que ningún componente incluso la misma pieza se adhiriera,

esta película es un agente desprendible con base de agua y resiste temperaturas de hasta 232°C (Release All Safelease 30, 2015).

Para evitar la compra y desperdicio innecesario de materiales se llevó a cabo un cálculo previo de cada uno de estos. El sistema de resina se calculó con un excedente del 60% el cual se perdió en los conductos de entrada y salida. Para el largo de rollo de fibra se utilizó un 25% extra, las aproximaciones se aprecian en la Tabla 6.

Tabla 6 Materiales requeridos para platos de fibra UD y TRIAX. Fuente: Elaboración propia.

ID material	Plato	Largo [mm]	Ancho [mm]	Capas	Espesor esperado [mm]	Sistema de resina [g]	Resina [g]	Endurecedor [g]	Largo de rollo [m]
UD-GF-Epoxi	AA	450	600	2	1.46	364.3	280.3	84.1	0.45
	AB	250	600	4	2.92	404.8	311.4	93.4	0.50
	AC	500	600	16	11.68	3238.6	2491.2	747.4	4.00
	AJ	470	600	10	7.29	1902.7	1463.6	439.1	2.35
TRIAX-GF-Epoxi	AD	450	600	2	1.76	426.1	327.8	98.3	0.45
	AE	250	600	4	3.52	473.5	364.2	109.3	0.50
	AF	500	600	6	5.28	1420.4	1092.6	327.8	1.50
	AK	450	600	46	40.48	9800.7	7539.0	2261.7	10.35

Las Tablas 7 y 8, muestran el total de largo de rollo y resina que se utilizaron para la aproximación, puesto que los datos reales se describen en el apartado de resultados:

Tabla 7 Metros totales de fibra requeridos

Material	Largo de rollo [m]
Fibras de vidrio UD	10
Fibras de vidrio TRIAX	16
Nota: Se consideran rollos de 1270 mm de ancho	

Tabla 8 Cantidad total de resina y catalizador requeridos

Peso de resina [kg]	Peso de endurecedor [kg]
20	6
Notas:	
<ul style="list-style-type: none"> • Se considera la resina epoxi propuesta. • Esta cantidad de resina se calcula con una relación de mezcla por peso de 100:30 	

Los materiales a excepción de la fibra y la resina se clasifican como consumibles, en la Tabla 9 se aprecia la aproximación a la cantidad real utilizada, el excedente del 30% que se les agrego, y las cantidades en unidades de venta, así como la representación adquisitiva real.

Tabla 9 Aproximación de los consumibles utilizados. Fuente: Elaboración propia

Consumibles				
Material	Aproximación real	Más excedente	Unidades de venta	Venta
Tela desmoldante	8.2	10.7	218 yds	1 rollo
Bolsa de vacío	10.8	14.1	1000 ft	1 rollo
Malla de flujo	4.8	6.3	107 m	1 rollo
Manguera omega	6.6	8.6	50 ft	1 rollo
Manguera MTI	6.6	8.6	90 yds	1 rollo
Manguera rígida	5.5	7.2	100 ft	1 rollo
Cinta azul	32.1	41.7	77 yds	1 caja
Cinta selladora	33.4	43.4	100 ft	1 caja
Película desmoldante	0.5	0.7	1 galón	1 galón

2.3.2 Maquinado

Como se mencionó en el apartado 2.2 los cortes de cada una de las placas se realizaron con una cortadora a chorro de agua, en este trabajo se utilizó una máquina OMAX, debido a que su chorro es abrasivo es intrínsecamente un proceso en frío, por lo tanto, no se produjeron derretimientos, impactos, ni humos ocasionados por quema de resina.

A las probetas se les agregaron refuerzos (pestañas) fabricadas con resina fenólica (cuyas características se describen en el apartado 1.2.2) y capas de tela impregnadas bajo presión, este material fue adquirido. Según su ficha técnica posee una resistencia a la tensión de 262 MPa y a la compresión de 455 MPa; el espesor de este material es de 0.158 cm y el cálculo de la cantidad aproximada que se necesitó se aprecia en la Tabla 10.

Tabla 10 Cuantificación de resguardos para cupones de prueba de caracterización mecánica. Fuente: Elaboración propia.

Prueba	Ancho del resguardo [mm]	Largo del resguardo [mm]	Largo requerido para todos los platos [mm]
Tensión	400	50.0	400
	400	50.0	400
Compresión	400	50.0	800
Cortante	400	50.0	800

Para adherir las pestañas a las probetas se requirió de un adhesivo epóxico el cual es capaz de soportar 27.3 MPa. Se calculó un área de pegado para los cupones de 2.56 m², aproximando un espesor adhesivo de 1 mm, se requieren 2.56 litros (0.00256 m³) de adhesivo.

2.3.3 Pruebas

Por recomendación de las normas las probetas se instrumentaron con galgas extensométricas de 350 Ω, el pegado de estas requirió de un kit especial de instrumentación en donde se encontraban, cables, cintas, pinzas, cautines, etc. La propuesta para el total de galgas pegadas en cada probeta se aprecia en la Tabla 11.

Tabla 11 Galgas extensométricas. Fuente: Elaboración propia

Tipo de prueba	ID material	Número de probetas	Número de pruebas	Ángulo de prueba	Galgas	
					Lineal	Bidireccional
TENSION	UD-GF-Epoxi	10	6	0	8	8
	UD-GF-Epoxi	10	6	90	8	
	TRIAX-GF-Epoxi	10	6	0, ±45	8	8
	TRIAX-GF-Epoxi	10	6	90, ±45	8	
COMPRESION	UD-GF-Epoxi	10	6	0	16	
	UD-GF-Epoxi	10	6	90	16	
	TRIAX-GF-Epoxi	10	6	0, ±45	16	
	TRIAX-GF-Epoxi	10	6	90, ±45	16	
CORTANTE	UD-GF-Epoxi	10	6	45	8	8
	TRIAX-GF-Epoxi	10	6	45, 0, 90	8	8
	Total				112	32

Tabla 12 Capacidades de la máquina para cada tipo de prueba. Fuente: Elaboración propia.

Material	Tipo de prueba	Ángulo de fibra	Fuerza máxima de celda de carga de la máquina [kN]
UD-GF-Epoxi	Tensión	0°	100
		90°	25
	Compresión	0°	100
		90°	25
	Cortante	0°	25
		90°	25
TRIAX-GF-Epoxi	Tensión	0°	100
		90°	25
	Compresión	0°	100
		90°	25
	Cortante	0°	25
		90°	25

Las muestras para las pruebas mecánicas se realizaron en dos máquinas universales diferentes: SHIMADZU UH-X ubicada en las instalaciones del Instituto Tecnológico Superior del Oriente

del Estado de Hidalgo y una Zwiick Roell Z030 ubicada en las instalaciones del laboratorio de materiales CIATEQ, Lerma. Las fuerzas necesarias para cada una de las pruebas se establecieron de la información proporcionada por cada una de las normas correspondientes, estas se describen en la Tabla 12.

Las pruebas de contenido de fibra requirieron de material de laboratorio general y específico, las características de las herramientas se describen en la Figura 47 . El laboratorio en donde se realizaron estas pruebas se encuentra en las instalaciones del laboratorio de materiales de CIATEQ unidad Hidalgo.

PATRONES UTILIZADOS Patterns Used			TRAZABILIDAD METROLÓGICA Metrological Traceability				
DESCRIPCIÓN Description	IDENTIFICACIÓN Identification	SERIE Serial No.	NACIONAL National	REFERENCIA Reference	CERTIFICADO Certificate	INCERTIDUMBRE Uncertainty	VIGENCIA Validity
Horno Mufla	LS-Q-0092-16-HI	1285100355006	CENAM	CIATEQ A.C.	LST-CTQ-0016-17-H	1.2°C	2019-03-19
Balanza analítica	LS-Q-0084-P-HI	28709821	CENAM	CIATEQ A.C.	LSM-CTQ-00015-17	U = ± 0.0001 g	2019-03-19

Figura 47 Patrones utilizados y trazabilidad metrológica del laboratorio de CIATEQ Hidalgo. Referencia: Informe de medición LSH-18-140 pdf.

2.4 PROCEDIMIENTOS

2.4.1 Construcción del material compuesto

Todos los platos fabricados siguieron las indicaciones descritas a continuación:

Como primer paso se llevó a cabo el cortado de telas de fibra de vidrio con las dimensiones dispuestas en las representaciones gráficas de la sección 2.2, las capas de fibras se obtuvieron directamente del rollo para garantizar un buen estado en las mismas Figura 48.



Figura 48 Obtención de capas de fibra de vidrio

Teniendo cortadas la cantidad de capas necesarias estas se pesaron y se procedió a preparar la superficie en donde se llevó a cabo la infusión. Como se observa en las imágenes correspondientes, la infusión no se realizó en un molde, si no en la superficie de una mesa de aluminio. Se procuró que las superficies estuvieran libres de residuos y sin defectos de mecanizado, utilizando acetona como disolvente de limpieza.

El arreglo de la infusión en cada una de las placas consistió de los pasos siguientes:

1. Se aplicó película plástica la cual se dejó secar aproximadamente 15 minutos.
2. Se acomodaron las capas de refuerzo siguiendo las direcciones establecidas en el apartado 2.2.
3. Después de los refuerzos se colocó la tela desmoldante en la Figura 49 se puede apreciar de color blanco y líneas negras.
4. Encima de la tela desmoldante se instaló la malla de flujo (color verde, Figura 49). Generalmente se cubría $\frac{3}{4}$ de la pieza, en algunos casos esta se aplicó en toda la pieza para permitir mayor velocidad y asegurar que la resina fluyera en cada capa. Este material también tiene como beneficio atrapar las burbujas de aire generadas en la mezcla de la resina con su catalizador, así se evitó que no quedaran plasmadas en la pieza.
5. Dependiendo del tipo de arreglo y de donde se estableció la entrada de resina se colocan las mangueras, la de membrana se aprecia de color blanco (utilizada para succionar el aire) y la de entrada de resina que se observa en un color azulado Figura 49.

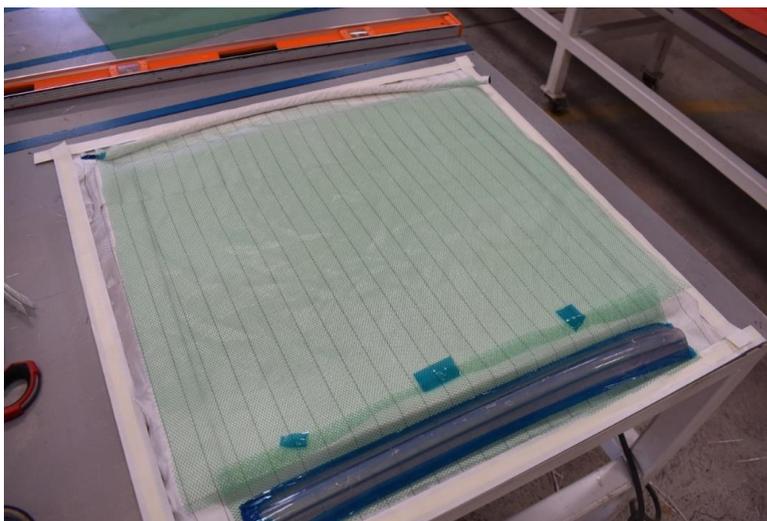


Figura 49 Malla de flujo en el plato

6. Enseguida se procedió a pegar la bolsa de vacío, esto se debe hacer con mucho cuidado procurando un vacío perfecto, un mínimo orificio entre la cinta de sellado y la bolsa, hace fallido el procedimiento, provocando entradas de aire a la resina. Cuando la pieza y la bolsa sostienen el vacío durante más de 20 minutos, se continua con la preparación de la mezcla de resina con endurecedor.
7. La resina y su catalizador se mezclaron durante 5 minutos y se realizó a la infusión, en la Figura 50 se puede observar cómo la presión del vacío extrae la resina desde un recipiente hasta la pieza.

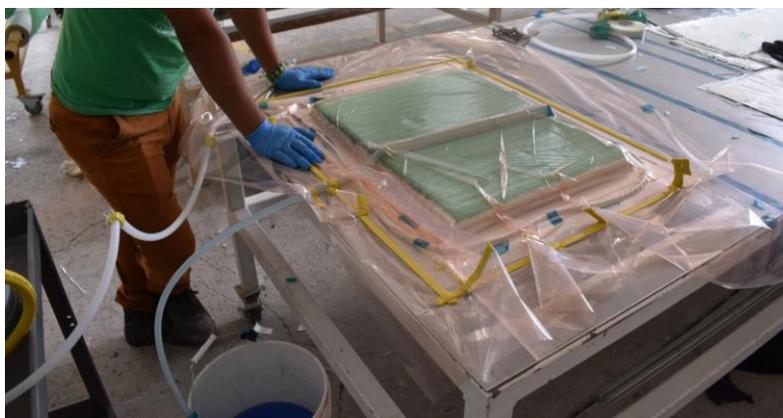


Figura 50 Infusión

8. La pieza al terminar la entrada de resina se sometió a un curado el cual dura aproximadamente 10 horas. Fue necesario crear alrededor de la pieza un horno para mantener el calor, así como calentadores para mantener la temperatura suficiente. Generalmente se le inyectó aire a 130 °C, la superficie de la pieza alcanza hasta los 80 °C, pero siempre es recomendable mantenerla a 60 °C para evitar que se quemen las fibras.
9. Al terminar el tiempo de curado se procedió al desmolde de la pieza, para lo que se requirió de palas o martillos de goma. Para evitar los bordes filosos se realizaron de arreglos de desbaste. En la Figura 51 se aprecian los especímenes terminados.



Figura 51 Placas de compuesto terminadas

2.4.2 Maquinado de muestras

Terminada la fabricación de los platos se procedió al corte de las muestras, las que deben tener las longitudes previstas y en calidad requerida. El corte se dividió en dos pasos, debido a que a las probetas se les adhirieron resguardos (pestañas): en el primero, se obtuvieron una serie de platos más pequeños con la altura requerida en las probetas, pero el ancho total de 10 probetas más 2 cm para asegurar el ancho de cada pieza en el paso del corte Figura 52. Los planos de corte se encuentran en el **Anexo C**.

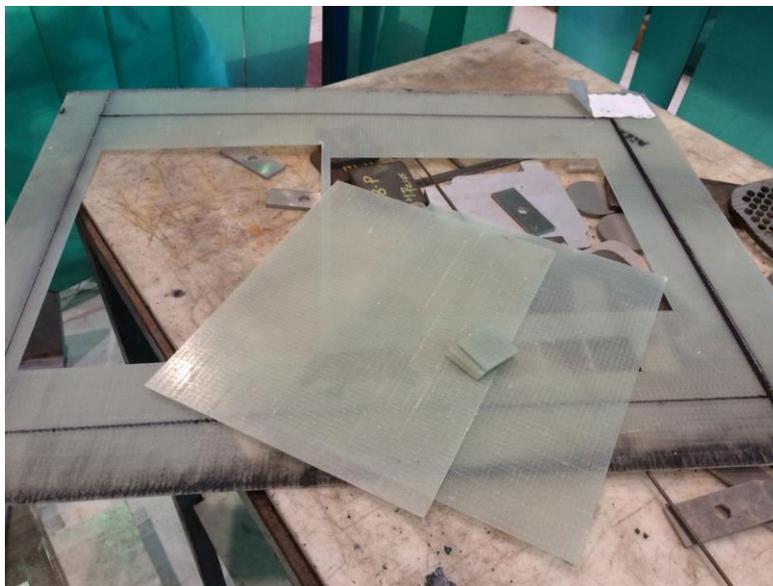


Figura 52 Plato con cortes y piezas

En la Figura 52 también se aprecian pequeños pedazos de piezas, las cuales son las muestras que se utilizaron para las pruebas de contenido de fibra con dimensiones de 30 x 30 mm.

Después del primer corte, se procedió al de los resguardos cuyas dimensiones se aprecian en la Figura 53. El pegado de pestañas requirió de los siguientes pasos:

1. Se lijaron las partes más lisas de ambos materiales (con una lija 180) en el caso de las pestañas solo de un lado (el que se adherio a la pieza) y en el caso de los pequeños platos se lija el lado que lo necesite puesto que ambos deben tener cierta rugosidad.
2. Se limpió la zona de trabajo adecuadamente y la pieza en general, en especial las partes que se unieron, en este paso se utilizo acetona industrial.
3. De acuerdo a las indicaciones del fabricante del adhesivo, este se mezcló adecuadamente y se aplicó en una de las caras (preferentemente la del cupón) uniéndose después a la pieza de las pestañas.
4. Una vez unidas las piezas se les aplicó toda la presión posible con ayuda de agarraderas Figura 54.
5. Se retiró el exceso de adhesivo (sangrado) y se dejó curar según las indicaciones del producto en este caso de 15 a 24 hrs.

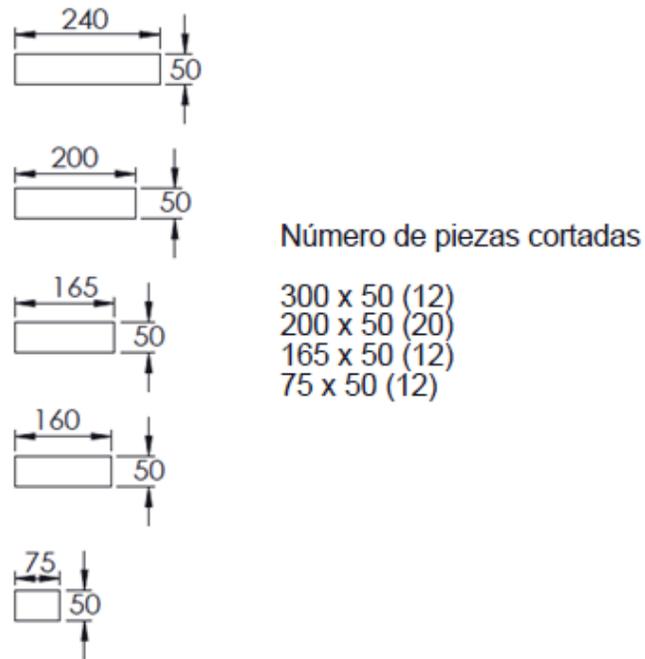


Figura 53 Dimensiones de resguardos (mm)

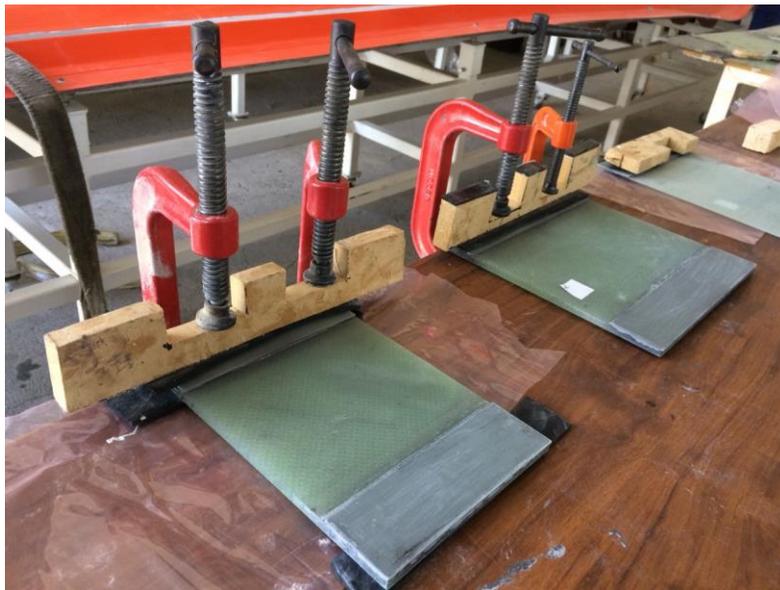


Figura 54 Presión en los pegados de los platos para el pegado de los resguardos.

El segundo corte ocurrió después de que a todos los platos se les adherieron las pestañas, este se realizó similarmente con una máquina de corte a chorro de agua (Figura 55), Los planos de estos cortes se muestran en el **Anexo D**. Los resultados se observan en la Figura 56.



Figura 55 OMAX máquina cortadora a chorro de agua.



Figura 56 Probetas después los segundos cortes

2.4.3 Instrumentación de las probetas

En la Tabla 11, se presenta una planeación con 112 galgas unidireccionales y 32 galgas bidireccionales, sin embargo, se redujeron las cantidades y el total de éstas fue de 30 unidireccionales. Para adherir las galgas a las probetas se llevaron a cabo la siguiente serie de pasos:

1. Las galgas se ubicaron en la parte central de cada cupón, en el caso de las probetas de compresión en ambos lados dirigidas a la misma dirección. Se comenzó con limpiar adecuadamente la superficie de la muestra con papel lija de numeración 220 para eliminar un poco la resina.

2. Después para darle rugosidad se utilizó lija del 440 tallando la misma superficie. Se retiraron los residuos y posteriormente se limpió con el acondicionador MCA-1 el cual seca perfectamente con ayuda de una gasa.
3. Las galgas se deben manipular con pinzas antiestáticas, el soldado de estas no debe ser directo entre galga y cables, se utilizaron filamentos y terminales Figura 57, con la ayuda de una superficie se disipa el calor (barra de aluminio y cinta PDT-3) se transportan y se posicionan. Nota: Toda superficie y elemento que vaya a estar en contacto con la galga deben estar neutralizados (habiendo sido limpiados con una sustancia especial).
4. Los filamentos para la conexión entre la galga y las terminales deben ser de aproximadamente de 2 cm. Se eliminó el barniz de una pequeña sección de sus 2 puntas y se estañaron evitando temperaturas superiores a 600°C. Antes de soldar los filamentos se lijaron en un sentido una pequeña parte de las terminales de la galga con el máximo cuidado, colocando puntos de estaño en las terminales y enseguida se soldaron los filamentos.

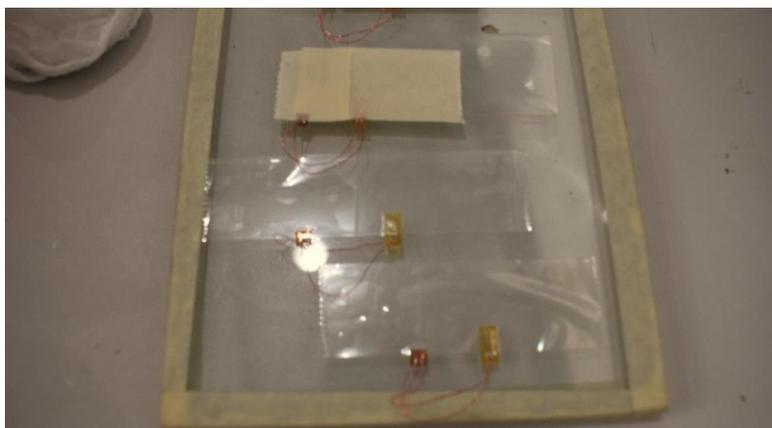


Figura 57 Galgas extensométricas

5. Se seleccionaron y prepararon las terminales adecuadas en este caso de tamaño 50D, también se realizó la elección de los cables a los que se unieron. La preparación de estos consistió en descortezar y estañarlos correctamente. Después se procedió a la unión con soldadura y de ser necesario se limpió la terminal directamente con una brocha.
6. Después de unir los filamentos tanto a la galga, como a la terminal y los cables a esta última, se procedió al pegado de la galga en el material para eso se limpió la superficie con el acondicionador MCA-1 después de lijar adecuadamente la superficie como se mencionó antes se necesitó del apoyo de cinta celofán PCT-2M para sujetar las galgas, esta cinta también ayudó a un adecuado pegado.
7. Habiendo posicionado la galga se aplicó el catalizador en una de las superficies (preferentemente en la galga), la cantidad debió ser exacta ya que podía desprenderse o no curar correctamente.
8. Después del catalizador se aplicó una gota de adhesivo y se unieron las dos superficies provocando una ligera presión con el dedo para distribuir los elementos correctamente, se debe mantener la presión durante al menos un minuto pues esta provoca el calor suficiente para ayudar al curado del adhesivo. Se dejó actuar alrededor de 20 minutos, después de este tiempo se retiró la cinta celofán y se inspeccionó si el resultado fue exitoso. El pegado

de las terminales siguió el mismo procedimiento pues se realizó al mismo tiempo que el de la galga.

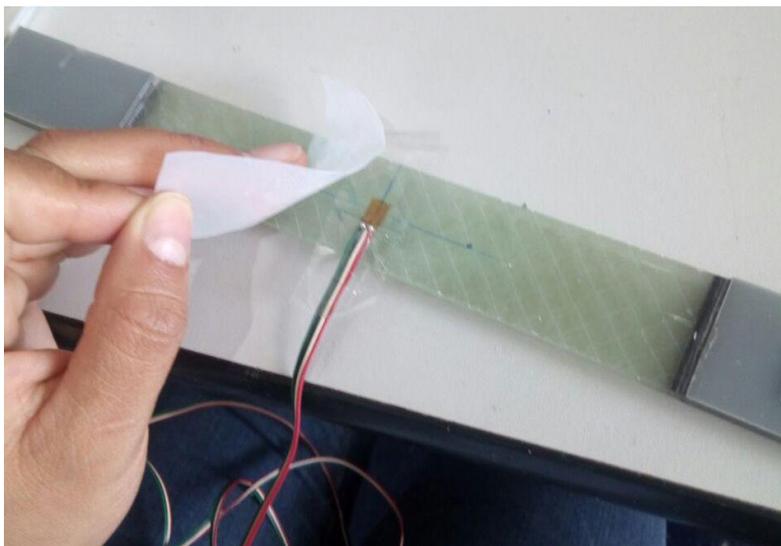


Figura 58 Pegado de galga

9. Teniendo un pegado exitoso se debe limpiar la superficie con alcohol isopropílico, para después aplicar resina M-Flux la cual protege a los materiales contra la humedad. La resina se aplicó tanto a la galga como a la terminal, finalmente se prueba con un voltímetro para asegurar que todo el procedimiento fue exitoso.

2.4.4 Caracterización mecánica del material compuesto

2.4.4.1 Ensayos de contenido de fibra

Para este ensayo se etiquetaron 6 muestras, que se clasificaron como se observa en la Tabla 13, el nombre indica el plato del que se obtuvieron y las siglas por el nombre del ensayo en inglés.

Tabla 13 Clasificación de muestras para ensayo de contenido de fibra. Fuente: Elaboración propia.

AAFVF	ABFVF	ACFVF	ADFVF	AEFVF	AFFVF	AGFVF	AHFVF	AIFVF
AAFVF_01	ABFVF_01	ACFVF_01	ADFVF_01	AEFVF_01	AFFVF_01	AGFVF_01	AHFVF_01	AIFVF_01
AAFVF_02	ABFVF_02	ACFVF_02	ADFVF_02	AEFVF_02	AFFVF_02	AGFVF_02	AHFVF_02	AIFVF_02
AAFVF_03	ABFVF_03	ACFVF_03	ADFVF_03	AEFVF_03	AFFVF_03	AGFVF_03	AHFVF_03	AIFVF_03
AAFVF_04	ABFVF_04	ACFVF_04	ADFVF_04	AEFVF_04	AFFVF_04	AGFVF_04	AHFVF_04	AIFVF_04
AAFVF_05	ABFVF_05	ACFVF_05	ADFVF_05	AEFVF_05	AFFVF_05	AGFVF_05	AHFVF_05	AIFVF_05
AAFVF_06	ABFVF_06	ACFVF_06	ADFVF_06	AEFVF_06	AFFVF_06	AGFVF_06	AHFVF_06	AIFVF_06

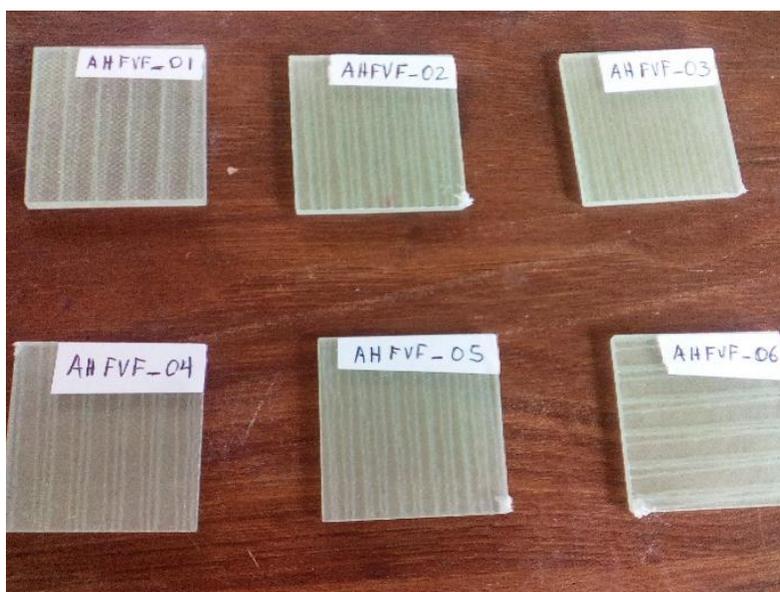


Figura 59 Muestras AHFVF

Las pruebas de contenido de fibra se llevaron a cabo en las instalaciones de los laboratorios de CIATEQ Hidalgo por Karen Escamilla Lara y fueron aprobadas por el ingeniero Alberto Ramírez Castellanos, se presenciaron algunas de estas y a continuación se describe el procedimiento el cual no difirió del método A descrito en la norma ISO 1172. Las condiciones climáticas de ensayo se realizaron bajo un rango de temperatura de 17.4 °C – 20.1 °C, los pasos realizados se describen a continuación:

1. Primeramente, se llevó a cabo el secado del crisol, cada pieza es metida al horno de mufla a una temperatura de 110-115 °C durante 1 h, esto con el propósito de eliminar la humedad del material, una vez terminado el tiempo el crisol se enfría en un recipiente cubierto durante aproximadamente 15 min para estabilizar su peso.
2. El peso del crisol se midió varias veces hasta comprobar que es constante, solo entonces este último valor se establece como una de las variables a utilizar.
3. Cada una de las muestras de material compuesto se pesó junto con el crisol y ese dato es asignado a una variable.
4. Un grupo de 6 muestras es introducido al horno de mufla para su calcinación a 650°C durante 3 h Figura 60. Tres de esas muestras pertenecen a un mismo plato y las otras tres a otro.
5. Realizada la calcinación, las muestras se dejaron enfriar en un recipiente cubierto.
6. Después de todo el tratamiento se volvió a medir el peso de cada muestra, proporcionando un último valor Figura 61.



Figura 60 Colocación de la muestra en el horno de mufla.

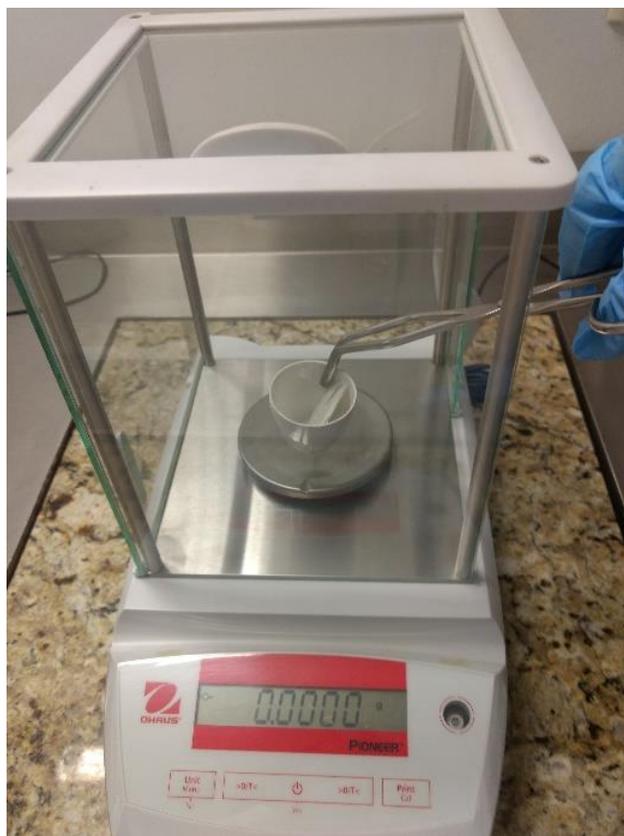


Figura 61 Peso de la muestra después de la calcinación

En la Figura 62 se observan dos grupos de muestras después de la calcinación, se aprecia como la resina se ha evaporado y solo queda el refuerzo.

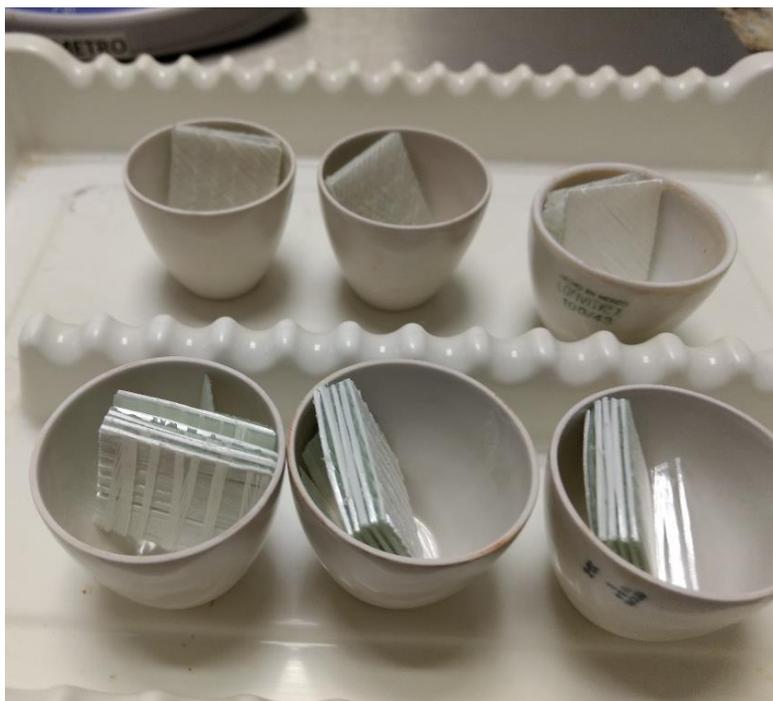


Figura 62 Resultado de pruebas de contenido de fibra

2.4.4.2 Ensayos de tracción

Las probetas para las pruebas de tensión se clasificaron en cuatro grupos:

- AAUDT0
- AAUDT90
- ADTXT0
- ADTXT90

Las primeras dos iniciales representan el plato al que pertenecen, la tercera y cuarta el tipo de fibra con el que se fabricaron, la quinta letra el tipo de prueba al que se sometieron, por último, los dígitos representan la orientación a la que se presentan los filamentos de fibra. Cada grupo está compuesto de 10 muestras, enumeradas del 0 al 10, dependiendo de su estado, la primera según una simple observación se presentó como la más apta para el ensayo. Para catalogar cada probeta se tomó en cuenta principalmente el pegado de los resguardos, ya que estos pudieron presentar defectos como burbujas en el adhesivo o separaciones, provocados por la falta de presión a la hora de la unión de ambas piezas. Ver Figura 63.

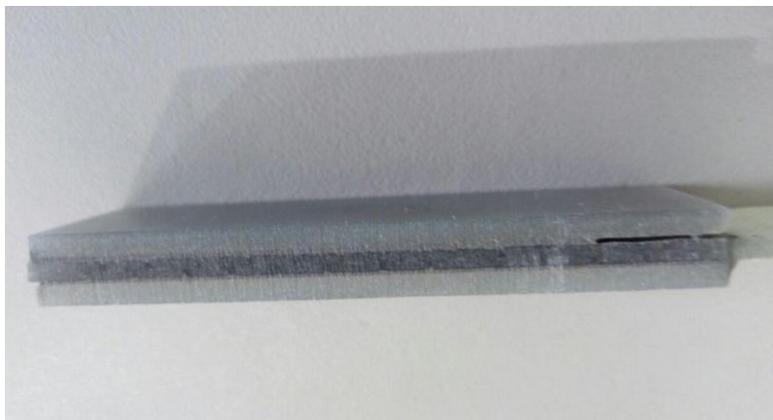


Figura 63 Errores de pegado

Tres de los paquetes se probaron en el laboratorio del Instituto Tecnológico Superior del Oriente del Estado de Hidalgo. Este laboratorio cuenta con una máquina calibrada SHIMADZU UH-X de una capacidad de 500 kN, los ensayos se realizaron bajo la supervisión y apoyo del Ing. Alberto Ramírez Castellanos. El paquete ADTXT90 fue probado en el laboratorio de materiales de las instalaciones de CIATEQ, unidad Lerma, Estado de México con una máquina Zwick Roell Z030.

Ninguna de las probetas utilizadas en este ensayo se instrumentó con galgas extensométricas y las pruebas se efectuaron a una velocidad de 2 mm/min. Para comenzar se necesitó de una probeta de sacrificio, está es la última de la numeración del paquete. La prueba de sacrificio es utilizada para conocer la fuerza máxima aproximada a la cual cada una de las probetas resistirá ya que a veces el centro de carga de la máquina no es lo suficiente grande para detectar las mediciones correctamente o en caso contrario las mediciones son tan pequeñas que pasa por alto las primeras, también, permitió calibrar las mordazas de la maquina universal.



Figura 64 Paquete de muestras AATUDO

Cada uno de los ensayos consistió de la serie de pasos descritos a continuación:

1. Se montó el cupón en la máquina asegurando su correcta colocación.
2. La máquina realizó una precarga para asegurar el buen agarre de la pieza.
3. Se comenzó a generar la carga en dos direcciones opuestas hasta que el material falle (se rompa o deshilache).



Figura 65 Probeta montada en la máquina universal al final del ensayo.

En la siguiente figura se resumen los distintos tipos de fallas que sufrieron las probetas de tensión.



Figura 66 Fallas en pruebas de tensión

2.4.4.3 Ensayos de compresión

En las pruebas de compresión se etiquetaron dos grupos ABUDC0 y AETXC0, con 10 especímenes cada uno. Estas probetas originalmente poseían una longitud de 110 mm, sin embargo, se procedió a un recorte previo debido al tipo de instrumentación que utilizó la máquina universal, de tal forma que la longitud se redujo a alrededor de 97 mm.



Figura 67 Probetas para pruebas de compresión

Los cupones se instrumentaron con dos galgas extensiométricas en la parte media, una de cada lado, direccionadas ambas a 0° . El accesorio utilizado es el ejemplificado en el **Anexo B**, Figura 94. Este atrapa el espécimen entre dos agarres en forma de T mientras que una plataforma en la parte superior de la máquina, baja hasta presionar la pieza generando una compresión, ya que la parte de abajo esta fija Figura 69.

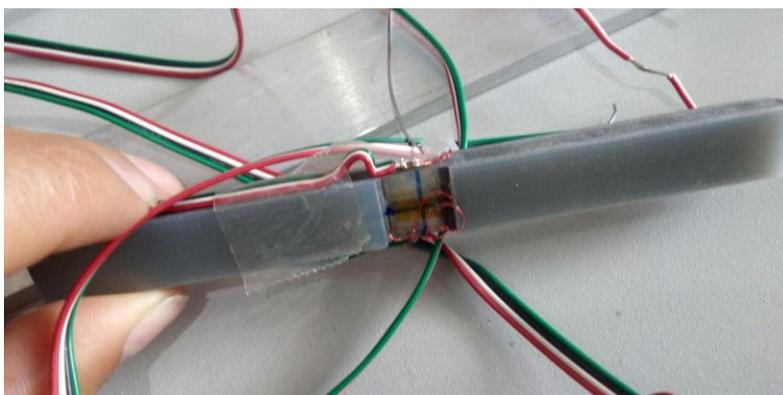


Figura 68 Probeta para pruebas de compresión instrumentada



Figura 69 Cupón de compresión acoplado a la maquina universal

En la Figura 70 y 76 se muestra el resultado de las probetas después de aplicarles la fuerza de compresión, los resultados numéricos y su análisis se muestra en el capítulo siguiente.

La falla en la mayoría de las probetas sucedió en un costado de la muestra reflejando una falla por delaminación, la cual es aceptable de acuerdo con la ISO 14126, sin embargo, para cerciorarse de que sucedió una prueba aceptable se utiliza la formula (36). Se presume que las fallas en esta zona fueron causa de los segundos cortes realizados llevados a cabo para acoplar las muestras en la máquina universal.

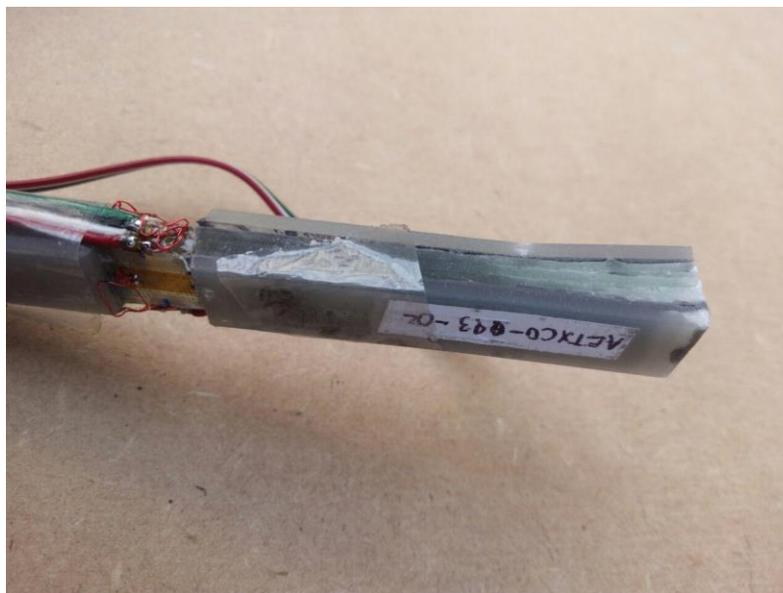


Figura 70 Muestra AETXCO-093-02 después de la prueba de compresión

2.4.4.4 Ensayos de cortante

Los lotes de 10 pruebas se clasificaron en los grupos ACUDC45 y AFTXC45, estas probetas fueron instrumentadas con una galga extensométrica direccionada a 90° , debido al uso de las galgas éstas no suelen llevarse a rotura, a excepción de la prueba de sacrificio. Los resultados se aprecian en la Figura 71.



Figura 71 Prueba de ensayo a cortante

Las pruebas son muy similares a las de tensión, la diferencia es que en estas probetas la fibra está orientada a $\pm 45^\circ$ con respecto al eje de la muestra. En las Figura 72 y 79 se observan los especímenes empotrados a la máquina, así como los extensómetros utilizados. Cuando el material compuesto falla, se puede observar como el color verdoso de la resina se vuelve blanco. Los resultados de esta prueba se muestran en el capítulo siguiente.



Figura 72 Muestra de pruebas de cortante con galga a 90°

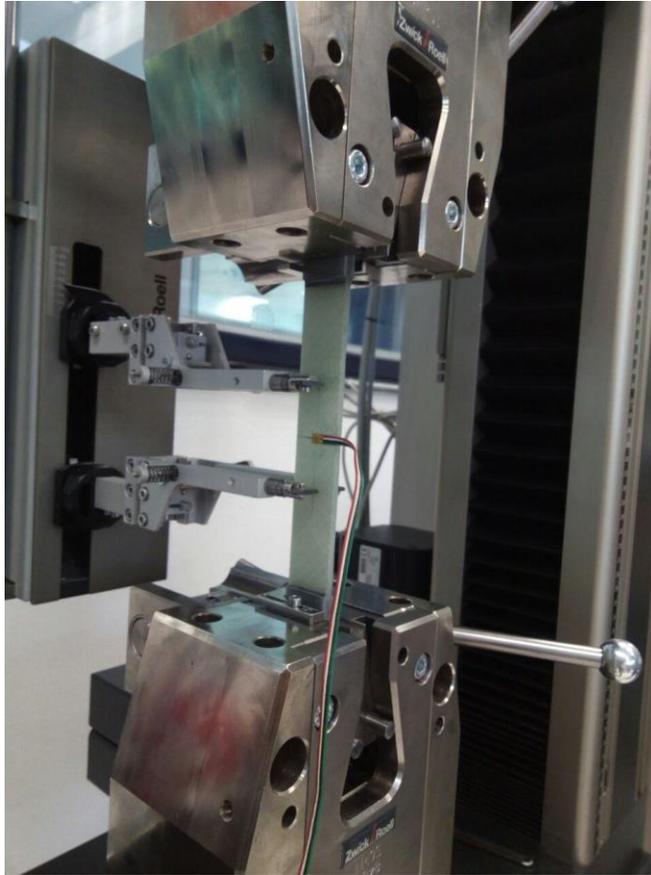


Figura 73 Prueba de cortante

CAPÍTULO 3 – RESULTADOS

3.1 CONTENIDO DE FIBRA

Los resultados de las pruebas fueron aceptados siempre y cuando la dispersión del ensayo no fuese mayor al 5%, en el caso del paquete ADFVF, las primeras 3 muestras excedían el límite de dispersión por tal razón se recurrió a utilizar los otros 3 restantes. En la Tabla 14 se aprecia la cantidad en porcentaje de la fibra de vidrio impregnada en las muestras y la dispersión entre cada una de ellas.

Tabla 14 Resultados de ensayo de contenido de fibra. Fuente: Elaboración propia

Muestra	% De fibra de vidrio	Dispersión al 95 % (±)
AAFVF	69.15	0.20
ABFVF	70.47	0.34
ACFVF	71.21	0.31
ADFVF	73.87	0.72
AEFVF	70.15	0.66
AFFVF	72.91	1.30

Teniendo el porcentaje de refuerzo se procede a calcular la fracción volumétrica del compuesto, para lo cual se utiliza la ecuación(25 a-b). Los datos que se necesitan son la densidad de la fibra (2.6 g/cm^3 según la ficha técnica de los proveedores), la densidad de la resina tiene un valor de 1.15 g/cm^3 (también obtenido de la ficha técnica). Los cálculos dieron los resultados descritos en la Tabla 15.

Tabla 15 Fracción volumétrica de la fibra. Fuente: Elaboración propia

Muestra	Fracción volumétrica [%]
AAFVF	49.78
ABFVF	51.35
ACFVF	52.24
ADFVF	55.56
AEFVF	50.97
AFFVF	54.35

Clasificando los resultados conforme a la dirección del refuerzo se tienen los resultados mostrados en la Tabla 16:

Tabla 16 Fracción volumétrica de los materiales utilizados. Fuente: Elaboración propia

Tipo de fibra de vidrio	Fracción volumétrica [%]
UD	51.12
TX	53.63

3.2 EVALUACIÓN TEÓRICA DE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS

Los resultados de las fracciones volumétricas de los compuestos nos permiten conocer de manera teórica los valores de las propiedades mecánicas como los módulos de Young o los coeficientes de Poisson, en esta sección se describen cada uno de los cálculos.

Primeramente, se calculan los valores mínimos que deben cumplir (GL, 2006), en este caso el de los laminados a 0° de la fibra unidireccional y triaxial. La fórmula utilizada se describe en la ecuación (45).

$$X_{min} = \alpha [X_{ref} \left(\frac{\varphi}{0.4} \right)] \quad (45)$$

Donde:

X_{min} : Valor mínimo requerido

X_{ref} : Valor de referencia para el contenido de volumen de fibra

$$\varphi = 0.4$$

α : Factor de acuerdo a la orientación del laminado

φ : contenido de volumen de fibra $0.2 \leq \varphi \leq 0.6$

Fibra	Propiedades	X_{ref} [MPa]	α			
			0°	$0^\circ / 90^\circ$	$0^\circ / \pm 45^\circ$	$0^\circ / 90^\circ / \pm 45^\circ$
Vidrio	Esfuerzo de tensión	500	1.00	0.55	0.50	0.45
	Módulo de elasticidad	26.000	1.00	0.67	0.57	0.55
	Resistencia a la flexión	650	1.00	0.55	0.45	0.40
Carbón	Esfuerzo de tensión	900	1.00	0.55	0.50	0.45
	Módulo de elasticidad	80.000	1.00	0.55	0.45	0.42
	Resistencia a la flexión	725	1.00	0.55	0.45	0.40
	Esfuerzo a compresión	600	1.00	0.55	0.50	0.45
	Módulo de elasticidad en compresión	70.000	1.00	0.55	0.50	0.45

Figura 74 Coeficientes para la determinación de propiedades mínimas. Fuente: (GL, 2006)

Llevando a cabo las operaciones se tiene que el valor mínimo para el compuesto con fibra unidireccional con dirección a 0° es de 622.25 MPa para el esfuerzo a tensión y 32.36 GPa para el módulo de Young. En el caso del compuesto con fibra triaxial en su arreglo $0^\circ/\pm 45^\circ$ se tienen un valor de 347.25 MPa para el esfuerzo de tensión y 20.58 GPa para el módulo de Young. El valor mínimo de esfuerzo a tensión es de 55 MPa y de 2700 MPa para el módulo de elasticidad (tensión) en resinas epóxicas (GL, 2006).

Las evaluaciones teóricas necesitaron de 4 valores base, los cuales se obtuvieron de las fichas técnicas del material:

Módulo elástico de la fibra $E_f = 80 \text{ GPa}$

Módulo elástico de la resina $E_m = 3.2 \text{ GPa}$

Coefficiente de Poisson de la fibra $\nu_f = 0.22$

Coefficiente de Poisson de la matriz $\nu_m = 0.30$

Usando la ecuación (46) se obtuvo el módulo cortante de cada material (fibra y matriz):

$$G = \frac{E}{2(1 + \nu)} \quad (46)$$

$$G_f = 32.79 \text{ GPa} \text{ Y } G_m = 1.23 \text{ GPa}.$$

Mediante la regla de mezclas descrita en las ecuaciones (27 a-b) y (28) se calculó el módulo elástico a tensión del compuesto con fibras unidireccionales orientadas a 0° y 90° (E_0, E_{90}) . Al igual que el módulo elástico a compresión a 0° (E_{c0}). Del tercer caso cuando las fibras están orientadas a 45° (G_{45}), se obtuvo el módulo cortante con la ecuación (15) para obtener el valor máximo. Los resultados conseguidos son:

$$E_0 = 41.43 \text{ GPa}, E_{90} = 6.13 \text{ GPa}, E_{c0} = 42.64 \text{ GPa} \text{ Y } G_{45} = 5.24 \text{ GPa}$$

En el compuesto reforzado con fibra triaxial se tiene un laminado del tipo simétrico [$0^\circ, \pm 45^\circ$], con un espesor (según los cálculos de la Tabla 4) de 0.88 mm. Ver Figura 75.

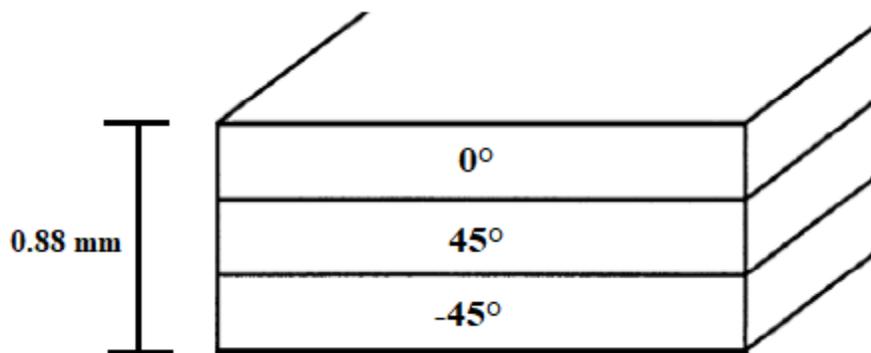


Figura 75 Laminado compuesto con fibra triaxial. Fuente: Elaboración propia

Para realizar los cálculos teóricos de este laminado igualmente se necesitó de la aproximación de los valores mediante la relación de mezclas, ya que esta toma en cuenta la fracción volumétrica (difiere en cada compuesto). Para las muestras AD la fracción volumétrica es $Vf_{AD} = 55.56 \%$ y para las muestras AE se tiene $Vf_{AE} = 50.97 \%$. Los resultados de estas primeras aproximaciones son:

$$E_{AD} = 45.87 \text{ GPa}, E_{AD90} = 6.86 \text{ GPa}, \nu_{12AD} = 0.26, \nu_{21AD} = 0.038 \text{ Y } G_{45AD} = 5.59 \text{ GPa}$$

$$E_{AE} = 42.34 \text{ GPa}, E_{AE90} = 6.27 \text{ GPa}, \nu_{12AE} = 0.26, \nu_{21AE} = 0.038 \text{ Y } G_{45AE} = 5.12 \text{ GPa}$$

Se trabajó con un tercer laminado simétrico $[0^\circ, \pm 45^\circ, 90^\circ]$, con un espesor total de 1.2 mm, el cual perteneció a las muestras tomadas del plato AF, cuya fracción volumétrica fue de $Vf_{AF} = 54.35 \%$. Los valores estimados con la regla de las mezclas son:

$$E_{AF} = 44.94 \text{ GPa}, E_{AF90} = 6.69 \text{ GPa}, \nu_{12AF} = 0.26, \nu_{21AF} = 0.038 \text{ Y } G_{45AF} = 5.46 \text{ GPa}$$

En los siguientes cálculos se trabajó con el ángulo de cada lámina y para eso se utilizaron las ecuaciones descritas en la sección 1.4.1.2 y 1.4.1.3. Se ejemplificarán los cálculos del primer laminado AD el cual se utilizó para las pruebas de tensión, los otros dos laminados siguieron la misma secuencia.

Se comienza por calcular la matriz de flexibilidad (Sa):

$$S_a := \begin{pmatrix} \frac{1}{E_1} & \frac{-\nu_{21}}{E_2} & 0 \\ \frac{-\nu_{12}}{E_1} & \frac{1}{E_2} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{G_{12}} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 2.18 \times 10^{-11} & -5.539 \times 10^{-12} & 0 \\ -5.668 \times 10^{-12} & 1.458 \times 10^{-10} & 0 \\ 0 & 0 & 1.789 \times 10^{-10} \end{pmatrix} \frac{1}{\text{Pa}}$$

La inversa de la matriz de flexibilidad da como resultado la matriz de rigidez (Q):

$$Q := S_a^{-1} = \begin{pmatrix} 4.633 \times 10^{10} & 1.76 \times 10^9 & 0 \\ 1.801 \times 10^9 & 6.928 \times 10^9 & 0 \\ 0 & 0 & 5.59 \times 10^9 \end{pmatrix} \text{ Pa}$$

En seguida se calculó la matriz de rigidez de cada una de las láminas, dependiendo de su dirección:

$$\theta := C \quad \text{co} := \cos(\theta) \quad \text{se} := \sin(\theta)$$

$$MT_{in} := \begin{pmatrix} \text{co}^2 & \text{se}^2 & -2 \cdot \text{co} \cdot \text{se} \\ \text{se}^2 & \text{co}^2 & 2 \cdot \text{se} \cdot \text{co} \\ \text{se} \cdot \text{co} & -\text{se} \cdot \text{co} & \text{co}^2 - \text{se}^2 \end{pmatrix} \quad MT := \begin{pmatrix} \text{co}^2 & \text{se}^2 & 2 \cdot \text{co} \cdot \text{se} \\ \text{se}^2 & \text{co}^2 & -2 \cdot \text{se} \cdot \text{co} \\ -\text{se} \cdot \text{co} & \text{se} \cdot \text{co} & \text{co}^2 - \text{se}^2 \end{pmatrix}$$

$$MR := \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 2 \end{pmatrix} \quad MR^{-1} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0.5 \end{pmatrix}$$

$$Q_0 := MT_{in} \cdot Q \cdot MR \cdot MT \cdot MR^{-1} = \begin{pmatrix} 4.633 \times 10^{10} & 1.76 \times 10^9 & 0 \\ 1.801 \times 10^9 & 6.928 \times 10^9 & 0 \\ 0 & 0 & 5.59 \times 10^9 \end{pmatrix} \text{Pa}$$

$$\theta := \frac{\pi}{4}$$

$$Q_{45} := MT_{in} \cdot Q \cdot MR \cdot MT \cdot MR^{-1} = \begin{pmatrix} 1.979 \times 10^{10} & 8.615 \times 10^9 & 9.86 \times 10^9 \\ 8.615 \times 10^9 & 1.979 \times 10^{10} & 9.86 \times 10^9 \\ 9.84 \times 10^9 & 9.84 \times 10^9 & 1.242 \times 10^{10} \end{pmatrix} \text{Pa}$$

$$\theta := \frac{-\pi}{4}$$

$$Q_{m45} := MT_{in} \cdot Q \cdot MR \cdot MT \cdot MR^{-1} = \begin{pmatrix} 1.979 \times 10^{10} & 8.615 \times 10^9 & -9.86 \times 10^9 \\ 8.615 \times 10^9 & 1.979 \times 10^{10} & -9.86 \times 10^9 \\ -9.84 \times 10^9 & -9.84 \times 10^9 & 1.242 \times 10^{10} \end{pmatrix} \text{Pa}$$

Usando los espesores de cada lámina, tomando como referencia el punto medio del laminado, se calculó la matriz de flexibilidad global en este caso (Ma)

$$h_T = 0.88 \text{ mm}, h_0 = -0.435 \text{ mm}, h_1 = -0.145 \text{ mm}, h_2 = 0.145 \text{ mm}, h_3 = 0.435 \text{ mm}$$

$$MA := Q_0 \cdot (h_1 - h_0) + Q_{45} \cdot (h_2 - h_1) + Q_{m45} \cdot (h_3 - h_2) = \begin{pmatrix} 2.492 \times 10^7 & 5.507 \times 10^6 & 0 \\ 5.519 \times 10^6 & 1.349 \times 10^7 & 0 \\ 0 & 0 & 8.827 \times 10^6 \end{pmatrix} \text{Pa} \cdot \text{m}$$

$$Ma := MA^{-1} = \begin{pmatrix} 4.412 \times 10^{-8} & -1.801 \times 10^{-8} & 0 \\ -1.805 \times 10^{-8} & 8.15 \times 10^{-8} & 0 \\ 0 & 0 & 1.133 \times 10^{-7} \end{pmatrix} \frac{\text{s}^2}{\text{kg}}$$

Se tiene entonces los resultados teóricos del laminado

AD:

$$E_t := \frac{1}{h_T \cdot Ma_{0,0}} = 25.753 \cdot GPa \quad E_y := \frac{1}{h_T \cdot Ma_{1,1}} = 13.944 \cdot GPa \quad G_{xy} := \frac{1}{h_T \cdot Ma_{2,2}} = 10.03 \cdot GPa$$

$$v_{xy} := \frac{-Ma_{1,0}}{Ma_{0,0}} = 0.409 \quad v_{yz} := \frac{-Ma_{1,0}}{Ma_{1,1}} = 0.221$$

De la misma forma se obtienen los resultados de los otros dos tipos de laminados.

AE:

$$E_1 = 23.71 \text{ GPa}, E_2 = 12.80 \text{ GPa}, v_{12} = 0.41, v_{21} = 0.22 \text{ Y } G = 9.24 \text{ GPa}$$

AF:

$$E_1 = 21.58 \text{ GPa}, E_2 = 21.58 \text{ GPa}, v_{12} = 0.22, v_{21} = 0.22 \text{ Y } G = 8.81 \text{ GPa}$$

3.3 TENSIÓN

Las características de la fabricación de los platos de los que se obtuvieron las probetas son descritas en la Tabla 17. Es importante tomar en cuenta las condiciones físicas que presentaron las placas puesto que eso afecta de manera directa a cada una de las probetas, en la Tabla 18 se aprecian sus observaciones.

Tabla 17 Propiedades de los platos para pruebas de tensión. Fuente: Elaboración propia

ID del Plato	Fecha	Temperatura	Presión de vacío (kPa)	Tiempo prueba vacío (min)	Peso refuerzo seco (g)	Cantidad resina (kg)	Cantidad endurecedor (kg)	Cantidad total mezcla (kg)	Tiempo infusión (min)	Temperatura infusión (°C)	Tiempo curado (h)	Temperatura promedio curado (°C)	Peso total pos-curado (kg)	Estado
AA	03/04/18	Ambiente	92	25	514.5	0.75	0.25	1	4	26	22	67	0.73	Aprobado
AD	10/04/18	Ambiente	90	35	647.3	1.5	0.45	1.95	6	23	12	59	0.85	Aprobado

Tabla 18 Observaciones de placas para pruebas de tensión. Fuente: Elaboración propia

ID del plato	Platos	Observaciones
AA		Se aprecia un color muy pálido y las líneas de la orientación de la fibra se pueden observar claramente.
AD		En algunas partes de la superficie se tienen fibras desprendidas.

Para calcular correctamente los resultados de las pruebas de tensión y las pruebas en general se debe tener un registro de las dimensiones de cada una de las probetas, en la Tabla 19 se observa un promedio general de las mediciones en cada conjunto de pruebas, como se puede apreciar existen diferencias con respecto a las dimensiones establecidas en la matriz inicial, la diferencia más significativa es en el espesor, para el conjunto de muestras de fibra UD se tiene una diferencia positiva del 4.1% y en el caso de la fibra TX una diferencia negativa de 4.5%. La diferencia positiva en el espesor de las pruebas de tensión nos indica que hubo una mayor cantidad de resina impregnada en la resina, los resultados mostrados en la Tabla 15 lo confirman, esto puede disminuir de manera significativa las propiedades del material.

Tabla 19 Promedios de las dimensiones de las muestras para pruebas de tensión

ID probetas	Ancho [mm]	Espesor [mm]	Longitud de prueba [mm]	Área de prueba [mm ²]
AAUDT0	14.97	1.53	150.56	22.92
AAUDT90	14.99	1.52	150.48	22.74
ADTXT0	15.02	1.68	149.69	25.18
ADTXT90	14.94	1.68	149.82	25.05

El software de la máquina universal arrojó una lista de valores dentro de los cuales se encuentran el tiempo (s), la carga aplicada (N) y el alargamiento (mm). Siguiendo las indicaciones mencionadas en la norma ISO 527-5 se calculó la deformación con la ecuación (33) y el módulo de Young con la ecuación (34), el módulo de Poisson no fue posible calcularlo

debido a la falta de instrumentación. En la Figura 76 se observa la relación carga-deformación de una de una muestra de fibra UD orientada a 0° , la línea roja es una representación del módulo de Young, también se puede apreciar como al iniciar la prueba existe una precarga.

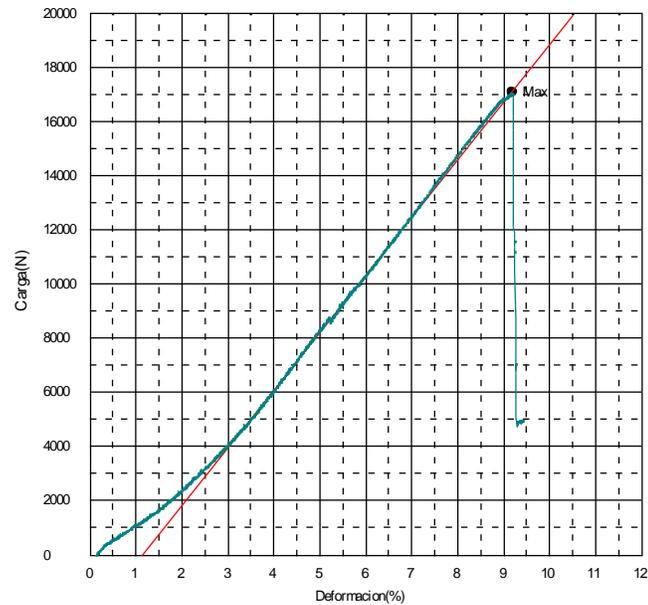


Figura 76 Gráfico del ensayo AAUDT0-001-01

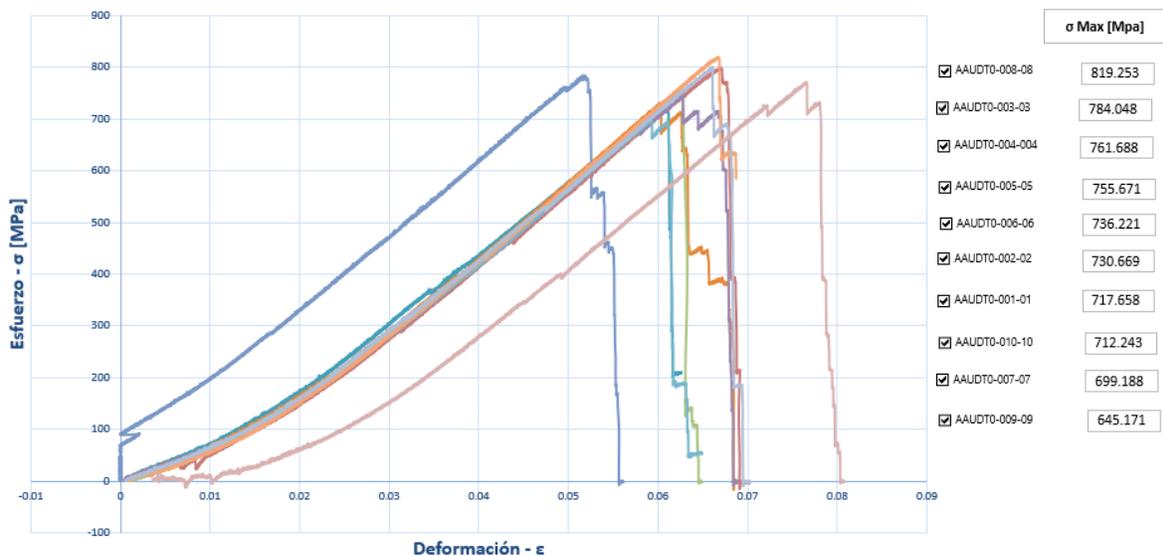


Figura 77 Gráficas de pruebas de tensión a 0° fibra unidireccional

En la Figura 78 se observan las gráficas del ensayo para fibra UD direccionada a 90° , estas muestras se probaron en una máquina con carga menor, muestran una falla generalmente al extremo del cupón, se cree que los agarres de la máquina afectaron en gran medida.

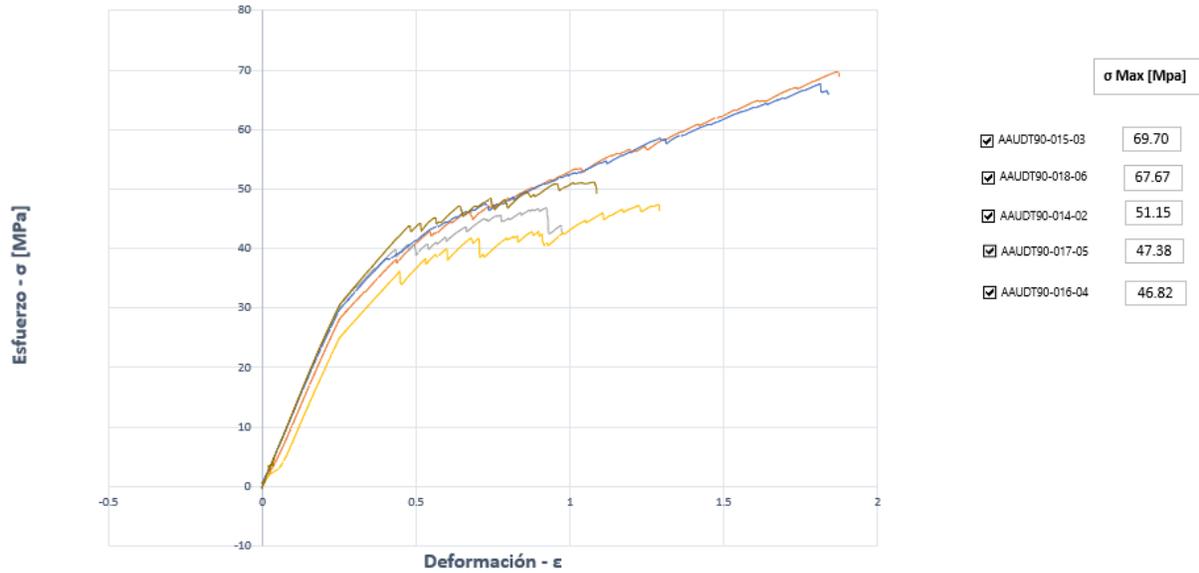


Figura 78 Gráficas de pruebas a tensión a 90° fibra unidireccional

Los resultados de las pruebas con fibra triaxial muestran un comportamiento muy uniforme hasta el momento de su rotura. Ver Figura 79.

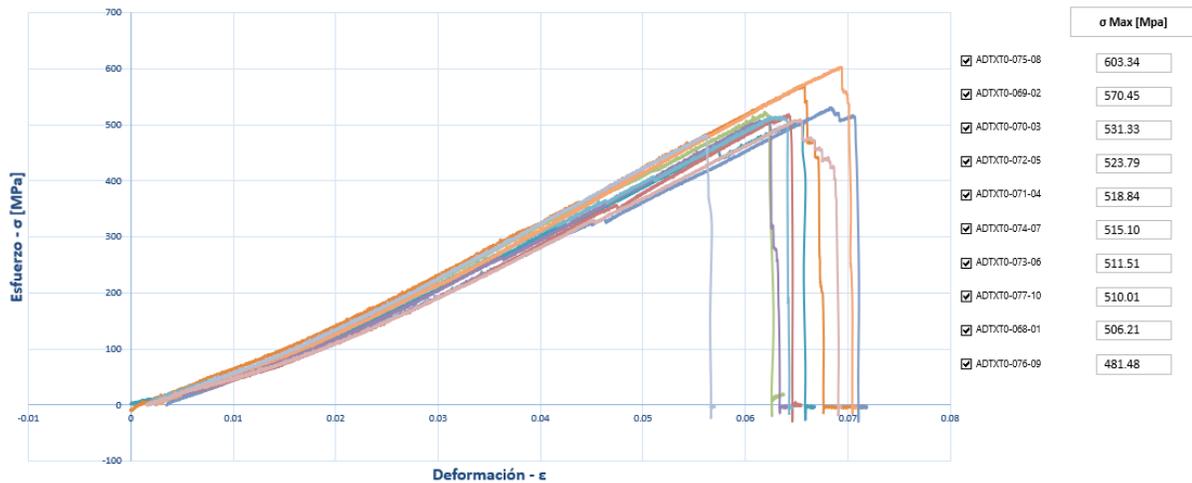


Figura 79 Gráficas de pruebas de tensión a 0° con fibra triaxial

La Figura 80 muestra una de las gráficas resultantes de los ensayos de fibra TX orientada a 90°.

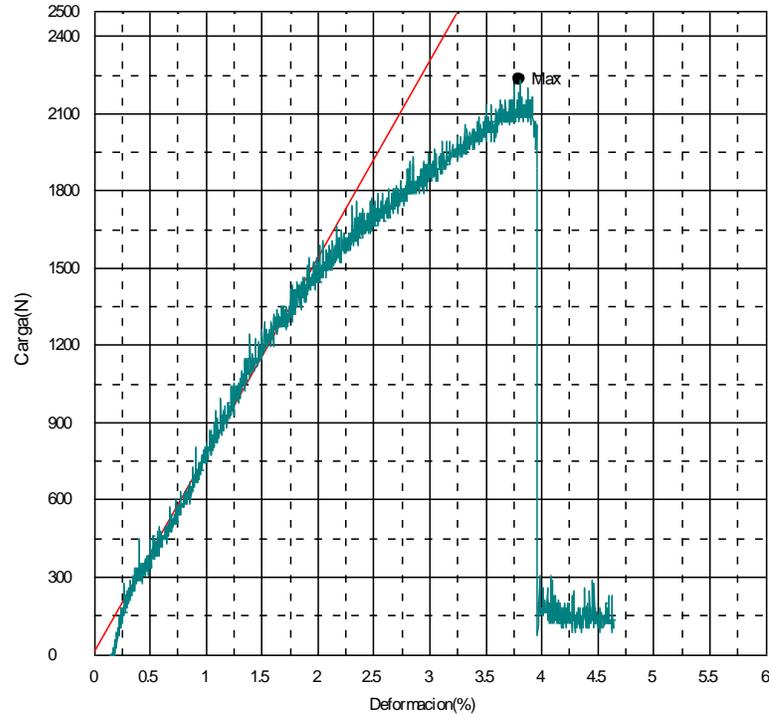


Figura 80 Gráfico de ensayo ADTXT90-080-01

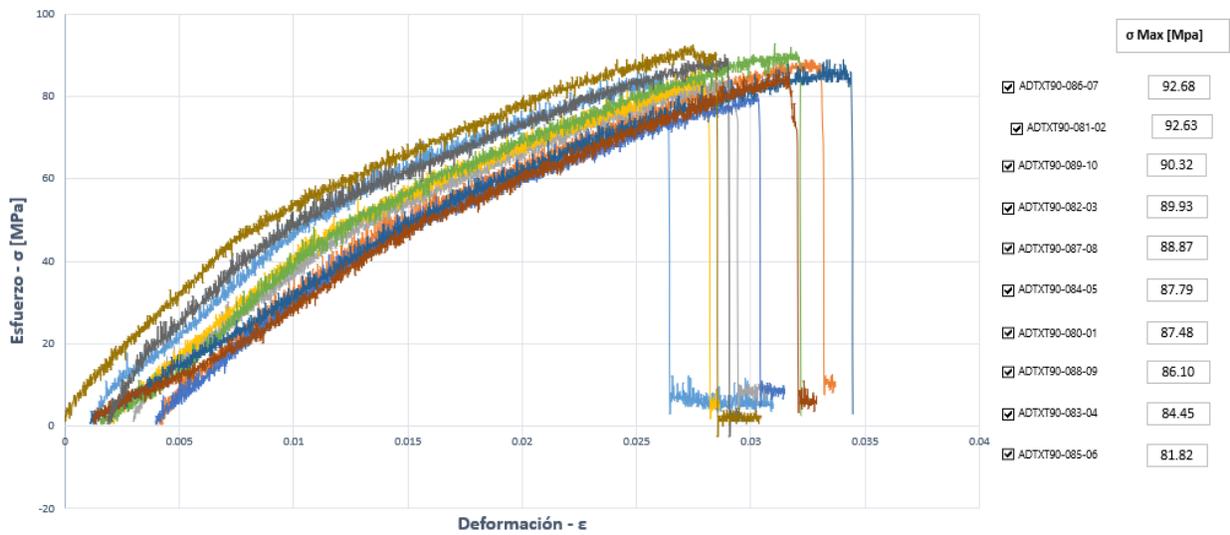


Figura 81 Gráficas de pruebas de tensión a 90° con fibra triaxial.

A continuación, se resumen en las tablas siguientes los resultados de las pruebas de tensión, primeramente, para fibra triaxial y posteriormente para fibra triaxial.

Tabla 20 Resultados finales pruebas de tensión con fibra triaxial

STT-Tensión			
Ángulo de las fibras con respecto a la carga 0°/±45°			
	σ [MPa]	E [GPa]	εmax
Promedio	464	23.19	0.067
DS	91	4.43	0.003
MAX	603	30.17	0.071
MIN	359	17.95	0.064
Ángulo de las fibras con respecto a la carga 90°			
	σ [MPa]	E [GPa]	εmax
Promedio	89	5.37	0.031
DS	3	0.82	0.002
MAX	93	6.57	0.034
MIN	84	4.39	0.029

Tabla 21 Resultados finales pruebas de tensión con fibra unidireccional

STT-Tensión			
Ángulo de las fibras con respecto a la carga 0°			
	σ [MPa]	E [GPa]	εmax
Promedio	762	38.08	0.064
DS	40	2.01	0.017
MAX	819	40.96	0.081
MIN	699	34.96	0.016
Ángulo de las fibras con respecto a la carga 90°			
	σ [MPa]	E [GPa]	εmax
Promedio	56.54	11.64	1.41
DS	11.23	0.42	0.42
MAX	69.70	12.02	1.87
MIN	46.82	10.98	0.97

3.4 COMPRESIÓN

Las características de los platos utilizados para los ensayos de compresión se presentan en la Tabla 22.

Tabla 22 Características de las placas para pruebas de compresión. Fuente: Elaboración propia

ID del Plato	Fecha	Temperatura	Presión de vacío (kPa)	Tiempo prueba vacío (min)	Peso refuerzo seco (g)	Cantidad resina (kg)	Cantidad endurecedor (kg)	Cantidad total mezcla (kg)	Tiempo infusión (min)	Temperatura infusión (°C)	Tiempo curado (h)	Temperatura promedio curado (°C)	Peso total pos-curado (kg)	Estado
AB	05/04/18	Ambiente	90	30	574.5	0.75	0.25	1	2	24	15	54	0.8	Aprobado
AE	16/04/18	Ambiente	80	25	730	0.75	0.25	1	3	21	15	58	1	Aprobado

Tabla 23 Observaciones placas para pruebas de compresión

ID del plato	Platos	Observaciones
AB		La orientación de las fibras se observa claramente, la tinta en las marcas de la fibra provocó el oscurecimiento de algunas zonas.
AE		El color verde refleja una buena infusión, sin embargo, se observa en la superficie destellos blancos (falta de resina)

El promedio de las dimensiones de los conjuntos de muestras se resume en la Tabla 24.

Tabla 24 Dimensiones finales pruebas de compresión

ID probetas	Ancho [mm]	Espesor [mm]	Longitud de prueba [mm]	Área de prueba [mm ²]
ABUDC0	10.10	2.85	9.34	29.25
AETXC0	10.23	3.64	10.11	37.25

Las pruebas de compresión mostraron una falla en uno de sus costados, todas muy similares entre sí por lo que se presume se debió al maquinado de emergencia, estas fallas están dentro de las fallas aceptadas de la norma ISO 14126 pero no de las aceptadas en la norma (ASTM D6641/D6641M-16, 2016), sin embargo, para su aprobación se utilizó la ecuación (36) para corroborar matemáticamente que el resultado de las probetas está dentro de los aceptados, además de que debido a la maquinaria que se utilizó la norma ISO marca como necesario este cálculo.

Los resultados de estas pruebas se tomaron directamente de los proporcionados por el software de la máquina universal ya que en esta se introdujeron correctamente cada una de las dimensiones de las probetas, a manera de comprobación también se realizaron de acuerdo con las fórmulas de la norma ISO 14126, de los cuales se tuvieron diferencias mínimas respecto a los del software lo que comprobó su veracidad.

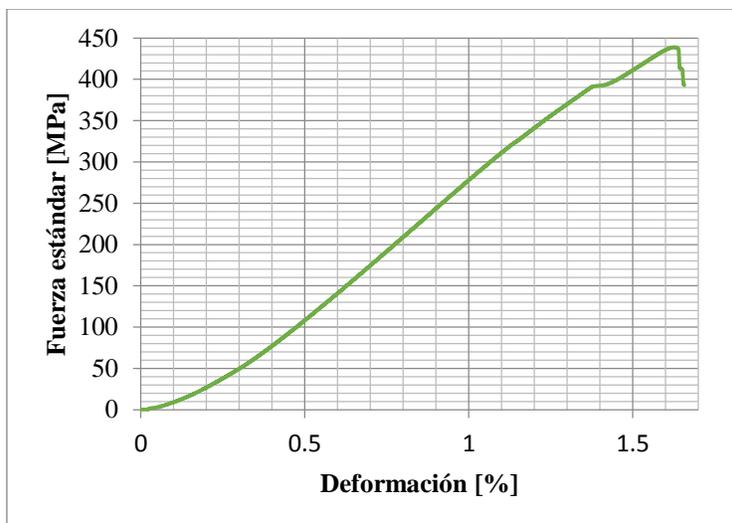


Figura 82 Gráfico del ensayo ABUDC0-029-04

En las gráficas presentadas se aprecia el comportamiento del ensayo de compresión, en la Figura 82 se observa como el principio de la línea representa el momento en el que los herramientas comienzan a hacer presión sobre la probeta. Después, a la mitad de la línea se observa un desplazamiento constante mientras el material resiste el aumento de la carga, al final de la línea se puede ver como la probeta presenta una falla por partes, así en general se representa el comportamiento de las muestras de fibra de vidrio unidireccional en las pruebas de compresión.

De la gráfica presentada en la Figura 83 se deduce que a pesar de que el material sigue resistiendo después de la caída más significativa de la línea, se considera que el material falla desde aproximadamente 230 MPa que es en donde primeramente la línea pierde la continuidad. En general esta gráfica representa el comportamiento de los ensayos de compresión con fibra triaxial. Es importante mencionar que se planearon ensayos en dos direcciones 0° y 90° sin embargo por varias circunstancias desfavorables solo se realizaron los ensayos a 0° .

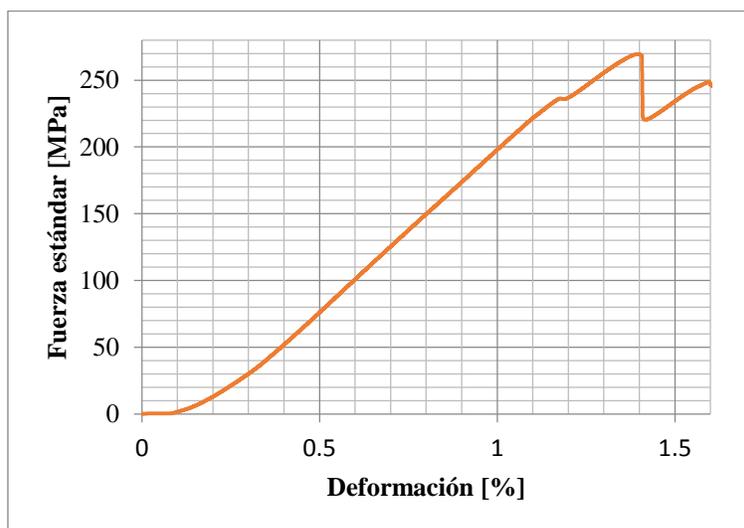


Figura 83 Gráfico del ensayo AETXC0-094-04

Los resultados de los ensayos de compresión se aprecian en la Tabla 25 para la fibra UD y en la Tabla 26 para la fibra TX.

Tabla 25 Resultados finales ensayos de compresión con fibra unidireccional

SSTC-Compresión			
Ángulo de las fibras con respecto a la carga 0°			
	σ [MPa]	E [GPa]	ϵ_{max}
Promedio	-401	20.3	-1.8
DS	63	2.7	0.2
MAX	-310	24.8	-1.6
MIN	-449	17.8	-2.1

Tabla 26 Resultados finales ensayos de compresión con fibra triaxial

SSTC-Compresión			
Ángulo de las fibras con respecto a la carga 0°/±45°			
	σ [MPa]	E [GPa]	ϵ_{max}
Promedio	-323	11.4	-1.9
DS	36	2.5	0.2
MAX	-270	15.8	-1.7
MIN	-355	10.1	-2.2

3.5 CORTANTE

Las características de las placas de las que se obtuvieron las probetas para las pruebas de compresión se muestran en la Tabla 27.

Tabla 27 Características de las placas para pruebas de cortante. Fuente: Elaboración propia

ID del Plato	Fecha	Temperatura	Presión de vacío (kPa)	Tiempo prueba vacío (min)	Peso refuerzo seco (g)	Cantidad resina (kg)	Cantidad endurecedor (kg)	Cantidad total mezcla (kg)	Tiempo infusión (min)	Temperatura infusión (°C)	Tiempo curado (h)	Temperatura promedio curado (°C)	Peso total pos-curado (kg)	Estado
AC	08/04/18	Ambiente	85	20	4600	1.96	0.84	2.8	15	24	10	66	6.15	Aprobado
AF	18/04/18	Ambiente	88	30	2080.5	1.2	0.36	1.56	10	26	14	53	2.85	Aprobado

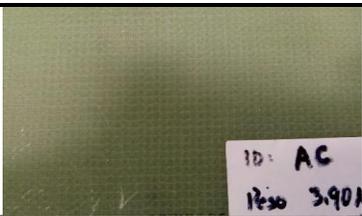
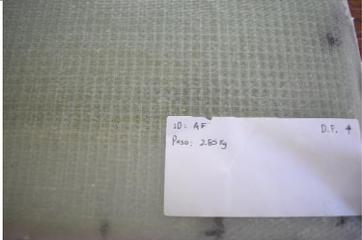
Al igual que los paquetes de muestra anteriores los de cortante se componen de 5 muestras aprobadas. Una de las grandes diferencias en estas probetas es que el espesor de las probetas AC se habían planeado con un espesor de 11.68 mm, sin embargo, por cuestión de que el ajuste máximo de las agarraderas en la máquina universal es de 12 mm, se propuso reducir a la mitad el número de capas, ya que el primer espesor también iba a aumentar con el adhesivo y los resguardos. Por lo tanto, el promedio de las dimensiones finales de las probetas se resume en la Tabla 28.

Tabla 28 Dimensiones de las probetas para ensayos de cortante

ID probetas	Ancho [mm]	Espesor [mm]	Longitud de prueba [mm]	Área de prueba [mm ²]
ACUDC45	25.23	6.85	150.64	172.73
AFTXC45	25.24	4.92	149.69	124.26

En la Tabla 29 se muestran las observaciones realizadas a las placas de donde se obtuvieron las probetas.

Tabla 29 Observaciones a placas para pruebas de cortante. Fuente: Elaboración propia

ID del plato	Platos	Observaciones
AC		En la superficie se observa un color blanquizo, se observa la orientación de las fibras.
AF		Se observa un color verde adecuado también se aprecia la presencia de burbujas en la superficie.

En la gráfica de la Figura 84 se generaliza el comportamiento de los ensayos de cortante con fibra unidireccional, se deduce de la línea que la primera parte es en donde se están llevando el soporte de esfuerzo cortante, en la caída de la pendiente y su reposición indican que después de soportar las fuerzas a cortante el material comienza a comportarse como un material elástico.

Para calcular el esfuerzo cortante se utilizó la ecuación (42), debido a que las pruebas se realizaron mediante el método de pruebas de tensión de $\pm 45^\circ$, por lo tanto, se provocan en el material dos fuerzas cortantes (sección 1.4). El módulo de Young es una pendiente en la gráfica del comportamiento del material, en el caso de las pruebas de cortante se puede apreciar correctamente en la Figura 86.

En la Figura 87 se aprecia la gráfica en la que se genera el comportamiento de las probetas de las pruebas de cortante con fibra triaxial, estas pruebas se realizaron en la máquina universal de 10 kN y fueron instrumentadas con galgas orientadas a 90° , por lo tanto, no se llevaron a rotura. Los datos de los resultados de estos ensayos se muestran en la Tabla 30 y Tabla 31.

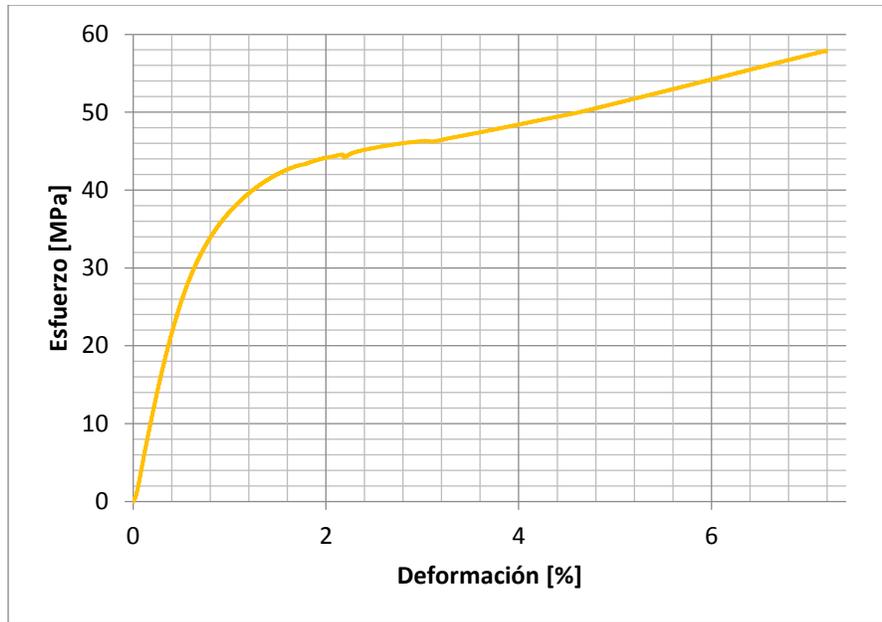


Figura 84 Gráfico del ensayo ACUDC45-055-05

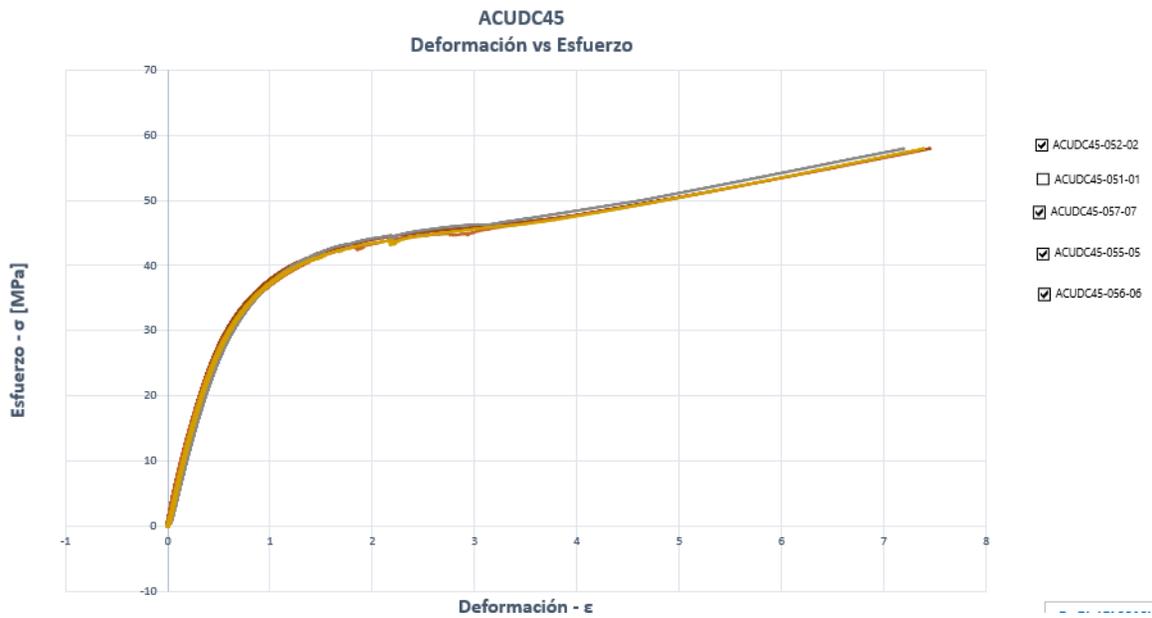


Figura 85 Gráficas de pruebas de cortante con fibra unidireccional

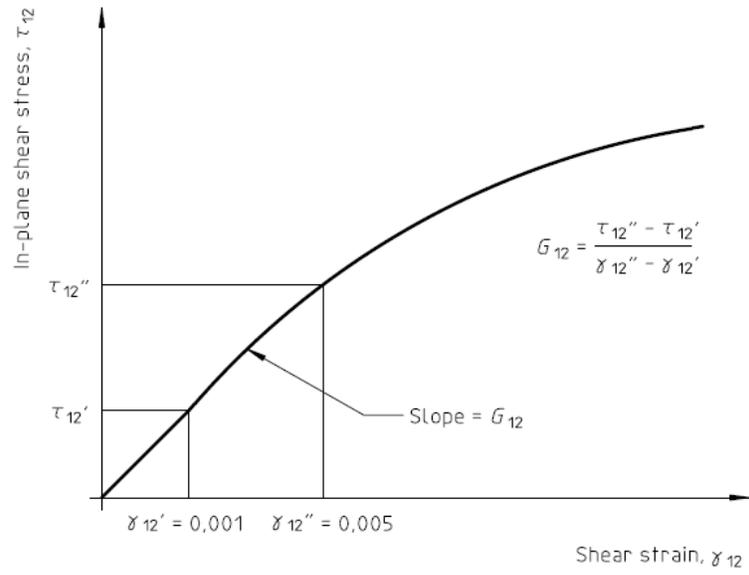


Figura 86 Diagrama de esfuerzo cortante. Referencia ISO 14129-1997

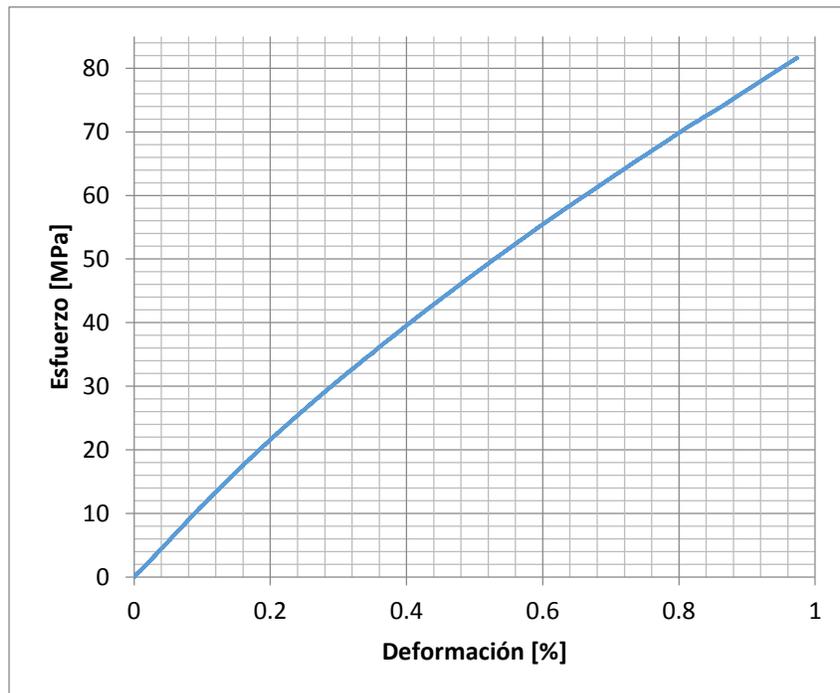


Figura 87 Gráfico del ensayo AFTXC45-119-02

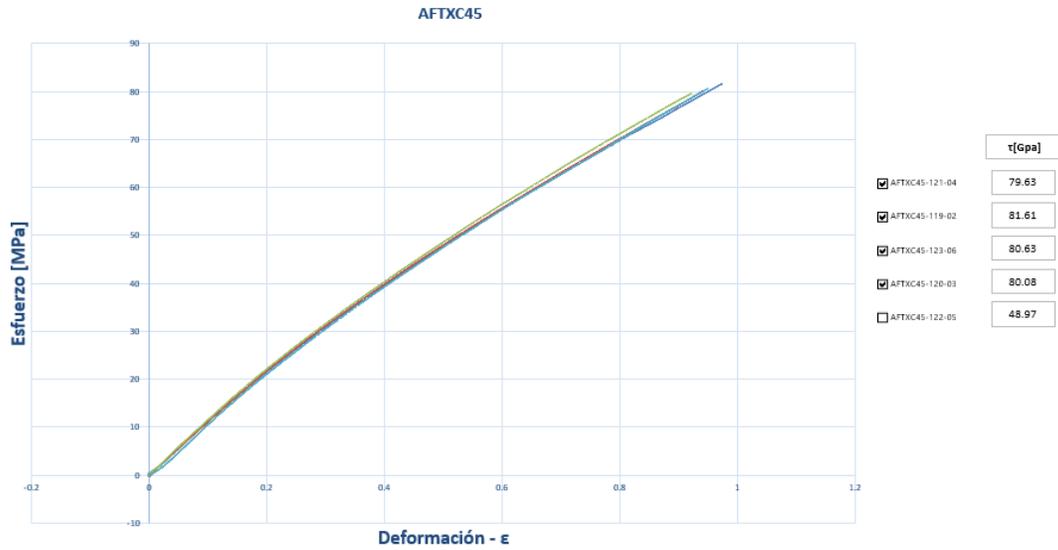


Figura 88 Gráficas para pruebas de cortante con fibra triaxial

Tabla 30 Resultados de pruebas de cortante con fibra unidireccional

STS-Cortante		
Ángulo de las fibras con respecto a la carga 0°/±45°		
	σ [MPa]	G [GPa]
PROMEDIO	69	4.5
DS	2	0.2
MAX	72	4.8
MIN	67	4.3

Tabla 31 Resultados de pruebas de cortante con fibra triaxial

STS-Cortante		
Ángulo de las fibras con respecto a la carga 0°/±45°		
	εmax [%]	G [GPa]
PROMEDIO	0.96	7.1
DS	0.03	0.1
MAX	1.00	7.3
MIN	0.92	7.0

3.6 ANÁLISIS GENERAL DE LOS RESULTADOS

Comúnmente este tipo de experimentaciones es realizado controlando cada una de las condiciones, tratando de que el material probado sea lo más idealizado posible, sin embargo, esta experimentación siguió un proceso más real, razón por la cual como se ha mencionado antes cada uno de los platos fabricados se aceptaron con pequeños defectos. Esto provocó que los promedios de los resultados de las pruebas comparados con los teóricos resulten relativamente por debajo, pero también tomando en cuenta casos específicos se tienen resultados muy buenos datos incluso iguales.

Primeramente, se analizan los resultados de las pruebas de contenido de fibra, como se registra en la Tabla 16 la fibra unidireccional promedia un resultado de 51.12 % en la fracción volumétrica y la fibra triaxial 53.63%, los datos cumplen perfectamente con lo esperado respecto al método de vacío con el que se infundiona (Tabla 3). Las aspas del aerogenerador requieren que la fracción volumétrica de la fibra y resina estén en proporciones iguales, entonces los ensayos también cumplen con este requerimiento. La cantidad de fibra unidireccional (Tabla 14) que contienen la muestras es alrededor del 70.27 % y el restante es de resina, por lo tanto, la resina está ocupando menos del 30% en las muestras.

En seguida se pueden apreciar los valores obtenidos en la experimentación y los resultados teóricos calculados (descritos en la sección 3.2). En la comparación se da prioridad a los módulos de elasticidad. En la Tabla 32 se clasifican los datos teóricos calculados.

Tabla 32 Valores teóricos

Muestra	E [GPa] 0°	E [GPa] 90°	G [GPa] 45°	v12	v21
AA	41.43	6.13	-	0.24	0.03
AB	42.64	-	-	0.26	0.04
AC	-	-	5.24	0.26	0.04
AD	25.75	13.94	-	0.41	0.22
AE	23.71	-	-	0.41	0.22
AF	-	-	8.81	0.22	0.22

En la Tabla 33 se muestran los datos obtenidos experimentalmente de acuerdo a la naturaleza de cada prueba:

Tabla 33 Tabla general de resultados del valor de los módulos de elasticidad en pruebas experimentales

Muestra	E [GPa] 0°	E [GPa] 90°	G [GPa] 45°
AA	38.08	11.64	-
AB	20.25	-	-
AC	-	-	4.46
AD	23.19	5.37	-
AE	11.40	-	-
AF	-	-	7.12

En las probetas reforzadas con fibra unidireccional a 0° se observa una diferencia negativa del 8.08% entre los valores teóricos y los experimentales. En el mismo arreglo, pero con las pruebas orientadas a 90° existe una diferencia positiva del 47.33%, un porcentaje muy alto, esto es debido a que las suposiciones de los cálculos teóricos (en este caso) no son completamente consistentes, existe un desajuste de tensión trasversal en el límite entre la fibra y la matriz en virtud de las ecuaciones de deformaciones utilizadas para obtener el módulo de elasticidad trasversal en función de las fracciones volumétricas.

Una combinación completa de desplazamiento a través del límite entre la fibra y la matriz constituiría una solución rigurosa para el módulo trasversal aparente, para lo cual existen mejores enfoques los cuales pueden encontrarse a un costo de mucha más complejidad (Jones, 1999). La gravedad de las inconsistencias se puede apreciar correctamente en los resultados experimentales, por tal razón se observa una diferencia rotunda en la comparación de los resultados a 90°.

En el caso de las pruebas a compresión del compuesto con fibra unidireccional, se tiene una diferencia negativa de alrededor del 47.49%, en estas pruebas se lidió con un corte de emergencia para disminuir su longitud total y adaptar las probetas al accesorio disponible. Esto se presume fue una de las variables que más afectó el resultado final.

Los ensayos de cortante con fibra unidireccional orientada a 45° presentan una diferencia negativa del 14.88%, el resultado está por debajo de lo esperado ya que fueron probetas que visualmente se apreciaban en muy buen estado. Sin embargo, las pocas burbujas dentro de la resina afectaron de gran manera las pruebas de cortante.

Para el compuesto reforzado con fibra triaxial con orientación a 0° en comparación con los valores teóricos se tiene una diferencia negativa del 9.94%. Al igual que en las pruebas de compresión con fibra unidireccional en las probetas con fibra triaxial se recurrió a un corte de emergencia, se tiene entonces una diferencia negativa del 51.92 % con respecto al valor teórico, sin embargo, en comparación con pruebas similares existe una diferencia negativa del 0.87% un resultado muy bueno, lo cual nos indica que en estas muestras el último corte fue más limpio y los defectos en el plato eran menores.

En las pruebas con fibra triaxial a cortante, se presentó una diferencia negativa del 19.18%, estas muestras presentaron un muy buen color de resina en el curado y no se presentaron muchas burbujas, visualmente se evaluaron como en muy buen estado. Se pudo entonces comprobar que el arreglo que se realizó no favoreció los valores en las propiedades, ya que se tuvo un laminado $[0, \pm 45, 90]$, analizando los datos teóricos en los laminados podemos concluir que existe una mayor resistencia a cortante cuando el laminado es del tipo $[0, \pm 45]$.

Las propiedades generadas en este trabajo crearon una base de datos de gran valor intelectual pues cuenta con la información de todas las condiciones de fabricación, las características y todos los datos que arrojó el comportamiento de las probetas mientras estas fueron probadas. Esta base de datos no solo sirve como referencia en diseños futuros sino también como una guía para caracterizar cualquier otro material necesario en el aspa, así como para validar y rediseñar el aspa del aerogenerador de 30 kW fabricado en CIATEQ, al ser más certero en las propiedades se obtiene un mejor factor de seguridad y también se puede obtener la optimización en el mismo.

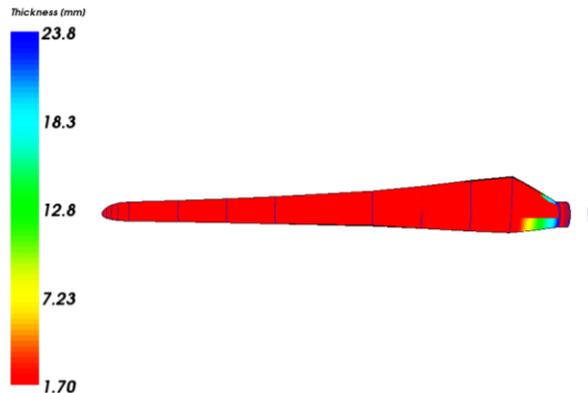


Figura 89 Análisis estructural en el software FOCUS

Dentro de los inconvenientes del trabajo se presentaron cuestiones como: la falta de material, lo cual provocó que se disminuyera la cantidad de pruebas, por ejemplo, no se realizaron las probetas de compresión con la fibra orientada a 90° . Otro de los puntos importantes es que no se realizaron todos los cálculos previstos ya que, debido a la falta de instrumentación, no se pudo llevar a cabo el cálculo del coeficiente de Poisson.

La mayoría de los valores estuvieron por debajo de los referenciados en el diseño, sin embargo, esto no implica que el trabajo realizado tenga un problema por lo contrario se esperaban los mejores resultados y a pesar de los errores se obtuvieron en algunos casos valores muy cercanos a los idealizados.

CONCLUSIONES

Enseguida se enlistan las conclusiones del presente trabajo:

- El valor de las fracciones volumétricas para el moldeo al vacío es de entre 50% y 80%. Los resultados en las pruebas de contenido de fibra con refuerzo unidireccional promedian un valor de 51.12% y con triaxial 53.63%. Las proporciones volumétricas de fibra y resina se encuentran dentro del rango esperado.
- Las fallas identificadas en las probetas son: la presencia de burbujas en la matriz de resina, desalienación de la fibra y burbujas en el pegado de los resguardos.
- Las probetas reforzadas con fibra unidireccional a 0° tienen una diferencia por debajo del valor teórico del 8.08% en el módulo de elasticidad. Para el compuesto con fibra triaxial a 0° se tiene una diferencia del 9.94%.
- El compuesto reforzado con fibra unidireccional soporta más carga a tensión que la fibra triaxial a 0°, los esfuerzos son 60.89% más grandes.
- Las probetas fabricadas para pruebas de tensión a 90° en sus arreglos unidireccional y triaxial muestran diferencias de 47.33% y 38.52% respectivamente en los módulos de elasticidad, en comparación con los teóricos calculados. Debido al desajuste de tensión transversal entre la fibra y la matriz en virtud de las ecuaciones de deformaciones utilizadas para obtener el módulo de elasticidad transversal en función de las fracciones volumétricas.
- Los resultados del módulo elástico para pruebas de compresión se encuentran 47.49% por debajo del valor teórico para la fibra unidireccional y 51.92% para fibra triaxial. Causa de que la falla de rotura se ocasiono en los extremos (resguardos) y no en el área de prueba.
- Para pruebas de cortante existe una diferencia del 14.88% por debajo del valor teórico del módulo de elasticidad con fibra unidireccional y 19.18% con fibra triaxial. Estas probetas presentaron irregularidades en sus espesores.
- Los resultados de los módulos de Young de cada arreglo no fueron los esperados, debido a que cada uno de los valores se encuentran por debajo de los teóricos calculados en más del 5%.

REFERENCIAS

- A. R. Jha, P. D. (2011). Wind Turbine Blade Design Requirements . En P. D. A. R. Jha, *Wind Turbine Technology* (págs. 111-134). EUA : CRC Press.
- Asociación empresarial eólica. (12 de septiembre de 2018). *REVE*. Obtenido de Revista eólica y del vehículo eléctrico: <https://www.evwind.com/sobre-la-eolica/definicion/>
- Asociación Empresarial Eólica. (12 de septiembre de 2018). *REVE*. Obtenido de Revista eólica y del vehículo eléctrico: <https://www.evwind.com/sobre-la-eolica/definicion/>
- ASTM D3379-75(1989)e1. (1975). *Standard Test Method for Tensile Strength and Young's Modulus for High-Modulus Single-Filament Materials (Withdrawn 1998)*. West Conshohocken : ASTM International.
- ASTM D5379M. (2012). *Standard Test Method for Shear Properties of Composite Materials by the V-Notched Beam Method*. United States: ASTM International .
- ASTM D6641/D6641M-16. (2016). *Standard Test Method for Compressive Properties of Polymer Matrix Composite Materials Using a Combined Loading Compression (CLC) Test Fixture*. United States: ASTM International.
- ASTM International. (2017). *D3039/D3039M-17 Standard Test Method for Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Materials*. United States: ASTM International.
- Barbero, E. J. (2011). *Introduction to Composite Materials Design* . Boca Raton, London, New York : CRC Press.
- Bent F. Sorensen, J. W. (2010). Blade materials, testing methods and structural design . En W. Tong, *Wind power generation and wind turbine design* (págs. 417-460). Boston: WITpress.
- Bent F. Sorensen, J. W. (2010). Blade materials, testing methods and structural design . En W. Tong, *Wind Power Generation and wind turbine design* (págs. 417-460). Boston: Witpress.
- Bleeder Lease B. (2015). *Hoja Técnica - Tejidos pelables*. Airtech Europe Sarl.
- Campbell, F. C. (2010). Introduction to Composite Materials. En F. C. Campbell, *Structural Composite Materials* (págs. 1-30). ASM International.
- Daniel Gay, S. V. (2003). *Composite Materials Design and Applications*. Paris: CRC PRESS.
- Daniel Gay, S. V. (2003). Ply properties . En *Composite Materials, Design and Applications* (págs. 38-61). London: CRC PRESS.
- DNVGL-ST-0376. (2015). *Rotor blades for wind turbines*. DNV GL AS.
- Ferdinand P. Beer, E. R. (2010). *Mecánica de materiales*. México: Mc Graw Hill.
- Gasch R., Twele J., Ohde. K., & Schubert M. (2012). *Wind Power Plants. Fundamentals, Design, Construction and Operation*. Germany: Springer.
- Germanischer Lloyd in cooperation with the Wind Energy Committee. (2010). *Guideline for the certification of wind turbines* . Hamburg: Germanischer Lloyd .

- GL. (2006). *Part 2 - Inspection and Testing of Fibre Composite Materials*.
- GS-213-3. (2015). *Hoja Técnica - Masillas de sellado*. Airtech Europe Sarl.
- Hard Core Dupont SCRIMP Systems. (s.f.). New Castle: DE.
- Harry S. Katz and John V. Milewski, E. (1987). *Handbook of fillers for plastics*. New York: Van Nostrand Reinhold.
- Hau, E. (2006). Load and structural stresses. En *Wind turbines* (págs. 161-183). Germany: Springer.
- Hau, E. (2006). Rotor Blades. En *Wind Turbines* (págs. 219-252). Germany: Springer.
- Hau, E. (2006). Rotor Blades. En *Wind Turbines. Fundamentals, Technologies, Application, Economics* (2nd ed., págs. 219-252). Berlin: Springer.
- Hau, E. (2006). Vibrations problems. En *Wind turbines* (págs. 389-400). Germany: Springer.
- Hexion. (2006). *Technical Data Sheet*. Hexion Inc. .
- Hibbeler, R. C. (2006). *Mecánica de Materiales* . México: Pearson Educación.
- Hodgkinson, E. b. (2000). *Mechanical testing of advanced fibre composites*. North and South America : CRC Press LLC.
- Hodgkinson, J. M. (2000). *Mechanical testing of advance fibre composites*. England: CRC.
- Ippilon KM1300. (2015). *Hoja Técnica, Bolsa de Vacío*. Airtech Europe Sarl .
- ISO 1172. (1996). *Textile-glass-reinforced plastics prepegs, moulding compounds and laminates - Determination of the textile-glass and mineral-filler content - Calcination methods*. Switzerland: ISO.
- ISO 14126. (1999). *Fibre- reinforced plastic composites - Determination of compressive properties in - plane direction*. Switzerland: ISO.
- ISO 14129. (1997). *Fibre.reinforced plastic composites - Determination of the in-plane shear stress/ shear strain response, including the in-plane shear modulus and strength, by the + 45° tension test method*. Switzerland: ISO.
- ISO. (2009). *Plastics - Determination of tensile properties - Part 5: Test conditions for unidirectional fibre-reinforced plastics composites*. Ginebra: ISO.
- ISO 527-1. (2012). *Plastics - Determination of tensile properties - General principles*. Ginebra: ISO.
- J. F. Manwell, J. G. (2002). En J. G. J. F. Manwell, *Wind Energy Explained Theory, Design and Application* (págs. 259-317). England: John Wiley & Sons, LTD.
- Jones, R. M. (1999). *Mechanics of composite materials. Second Edition*. United States of America: Taylor & Francis.
- Kaw, A. K. (2006). *Mechanics of Composite Materials* . Boca Raton: CRC.
- Knitflow 105 HT. (2013). *Hoja Técnica - Productos para la ifusión de resina*. Airtech Europe Sarl.

- Lee, S. M. (1991). *International Encyclopedia of Composites: Reinforcements, volume 5*. New York : VCH.
- Luz Stella Arias Maya, L. V. (2004). Falla de los materiales compuestos laminados. *Scientia et Technica Año X*, 113-118.
- M.A., B. (2013). Energía eólica. IIE.
- MTI. (s.f.). *Vacuum infusion at its best* . Germany: DD COMPOUND.
- Real Academia Española. (20 de Febrero de 2017). *Diccionario de la lengua española*. Obtenido de <https://dle.rae.es/>
- Reinhart, T. e. (1987). *Engineering Materials Handbook. Vol. 1: Composites*. Metals Park, OH: ASM International .
- Release All Safelease 30. (2015). *Hoja Técnica - Agentes desmoldeantes* . Airtech Europe Sarl.
- Saertex. (s.f.). *Technical Datasheet*. USA.
- Sathyajith Mathew, G. S. (2011). Preface. En *Advances in wind energy conversion technology* (págs. V,VI). Berlín: Springer.
- Scott Bader Company Limited. (2005). *Crystic. Composites Handbook*. Scott Bader .
- U. S. Department of Transportation. (1994). *NHTSA 49 CFR Part 571* (No. 248 ed., Vol. 59). Federal Register.

ANEXO A. DEFORMACIÓN NOMINAL

La deformación nominal se usa cuando no se usan extensómetros en una probeta para medir las deformaciones, este se basa en el aumento de distancia entre los agarres de la máquina con relación a la distancia de agarre inicial (ISO 527-1, 2012). La deformación nominal puede determinarse utilizando alguno de los dos métodos siguientes:

Método A

Registrar el desplazamiento entre los agarres de la maquina desde el inicio del ensayo. Calcular la deformación nominal por medio de la ecuación:

$$\varepsilon_t = \frac{L_t}{L} \quad (47)$$

Donde:

ε_t : Deformación nominal, unidades unidimensionales o en porcentaje;

L : Distancia entre los agarres (mm);

L_t : Incremento de la distancia entre los agarres desde el inicio de la prueba (mm).

Método B

El método B se aplica para probetas de uso múltiple y cuando se tienen formación de cuellos en su zona céntrica pero donde la tensión se ha determinado con precisión de un extensómetro. Para calcular la deformación se registra el desplazamiento entre los agarres de la máquina desde el comienzo de la prueba. La ecuación utilizada es:

$$\varepsilon_t = \varepsilon_y + \frac{\Delta L_t}{L} \quad (48)$$

Donde:

ε_t : Deformación nominal, unidades unidimensionales o en porcentaje;

ε_y : Deformación de rendimiento, unidades unidimensionales o en porcentaje;

L : Distancia entre los agarres (mm);

ΔL_t : Incremento de la distancia entre los agarres desde el inicio del rendimiento en adelante (mm).

ANEXO B. ACCESORIOS DE CARGA PARA PRUEBAS DE COMPRESIÓN

Los accesorios aquí presentados se adaptan a las máquinas universales para poder realizar la prueba de compresión a una probeta. La Figura 90 y Figura 91 representan el mismo accesorio, la primera figura lo representa de manera cercana y la segunda cuando esta empotrado a la máquina universal.

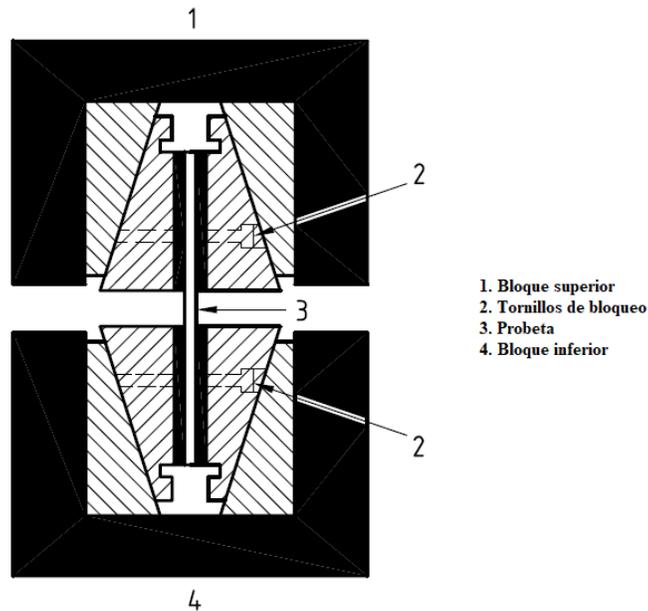


Figura 90 Diagrama esquemático del accesorio para pruebas de compresión por el método 1 de la norma ISO 14126. Fuente: ISO 14126:1999 pág. 9

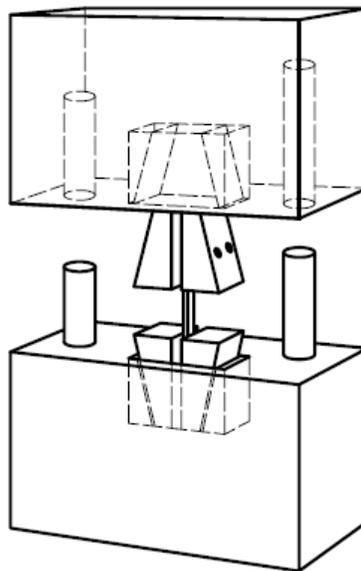


Figura 91 Accesorio de prueba ASTM D 3410/B (ITTRI). Referencia ISO 14126:1999 pág. 14

La Figura 92 y la Figura 93 representan el mismo accesorio visto en diferentes ángulos.

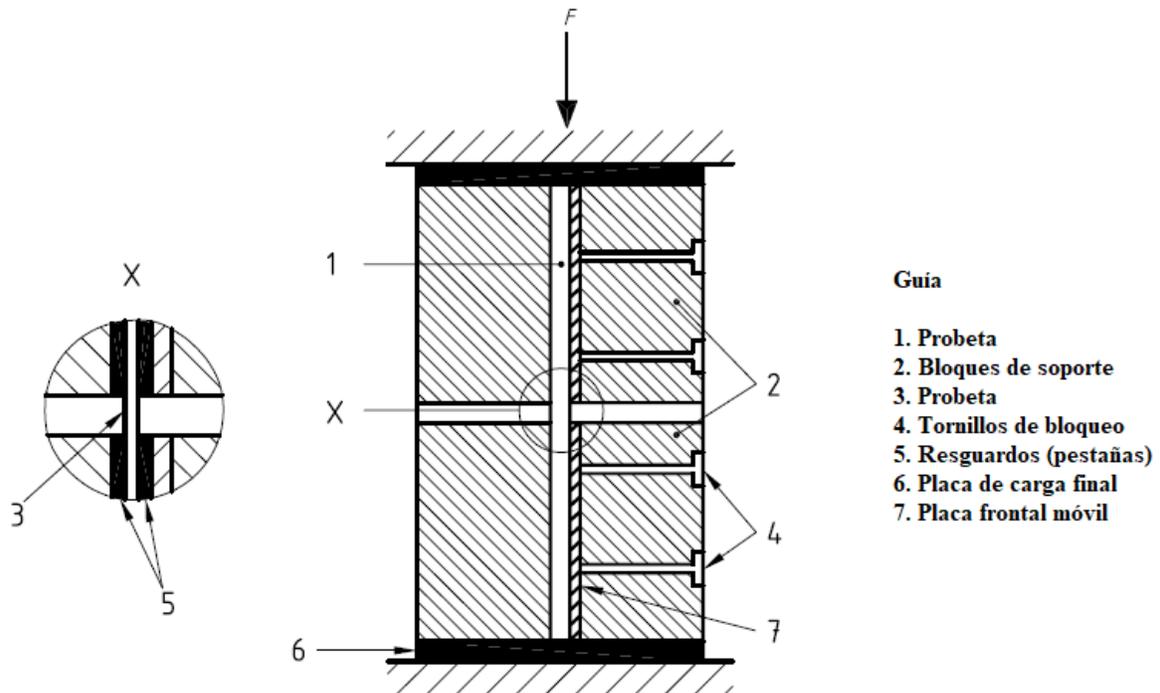


Figura 92 Diagrama esquemático del accesorio para ensayo de compresión descrito en el método 2 de la norma ISO 14126.
Fuente: ISO 14126:1999 pág. 10

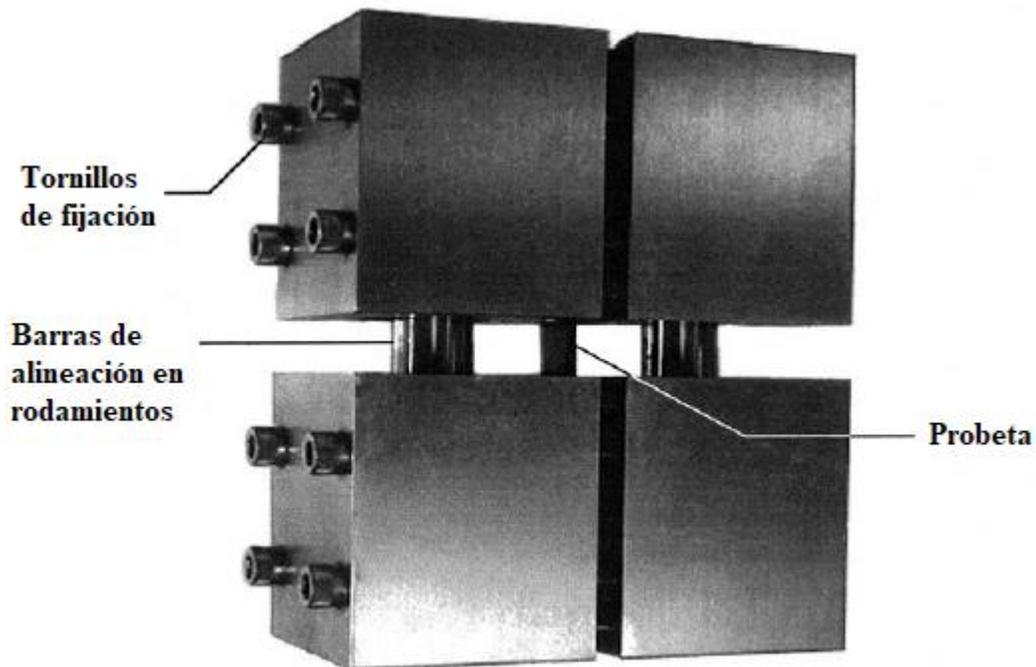


Figura 93 Fotografía de un accesorio de carga a compresión combinada típica. Fuente: ASTM D6641M pág. 2.

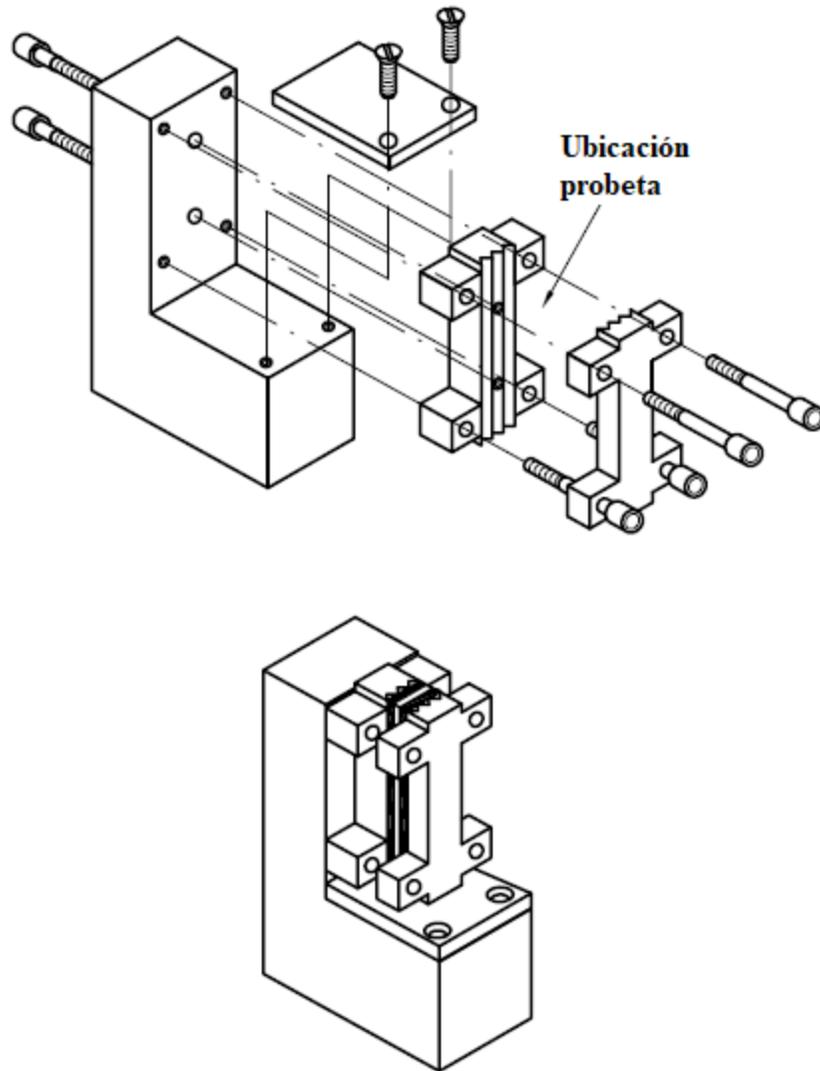
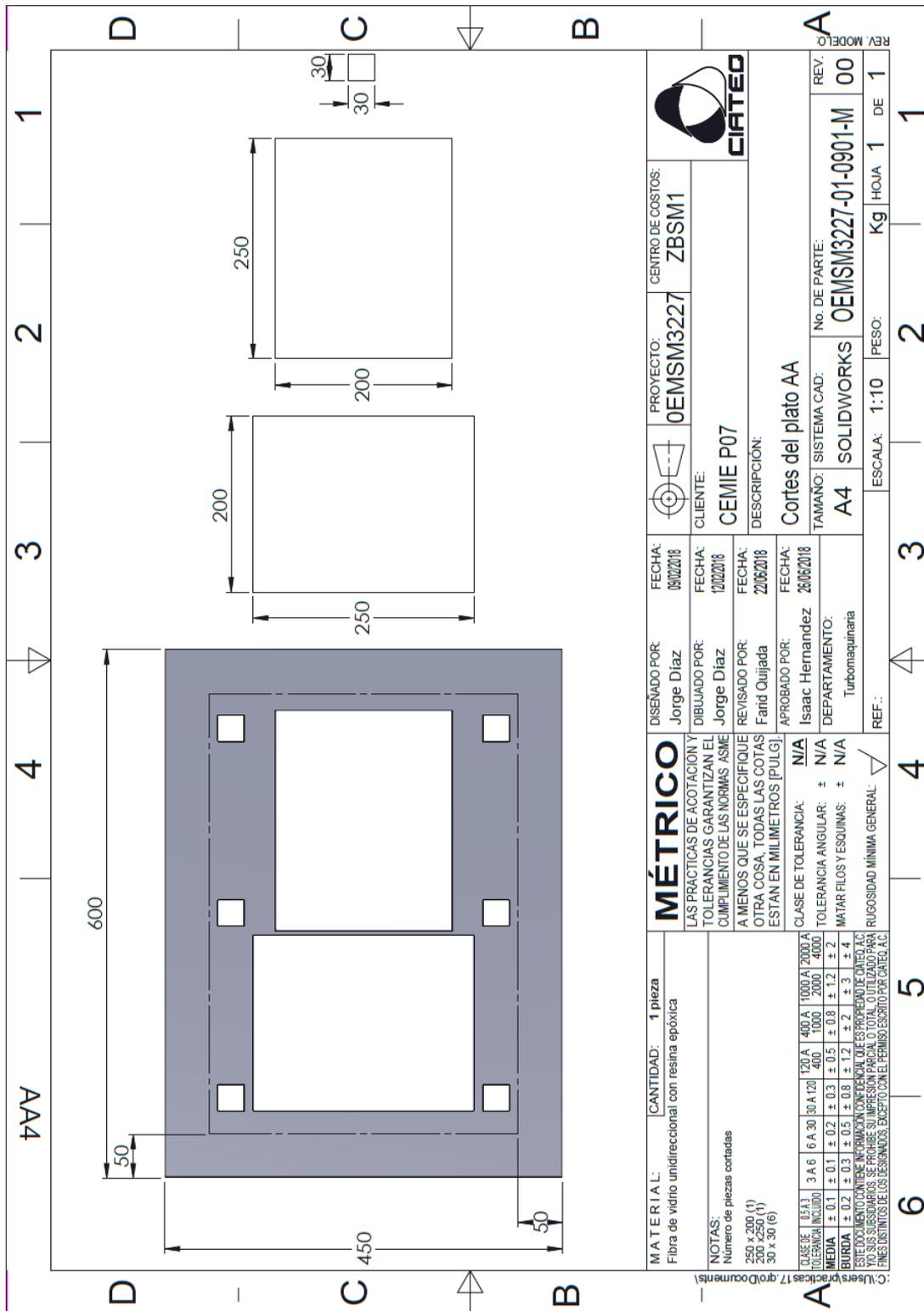
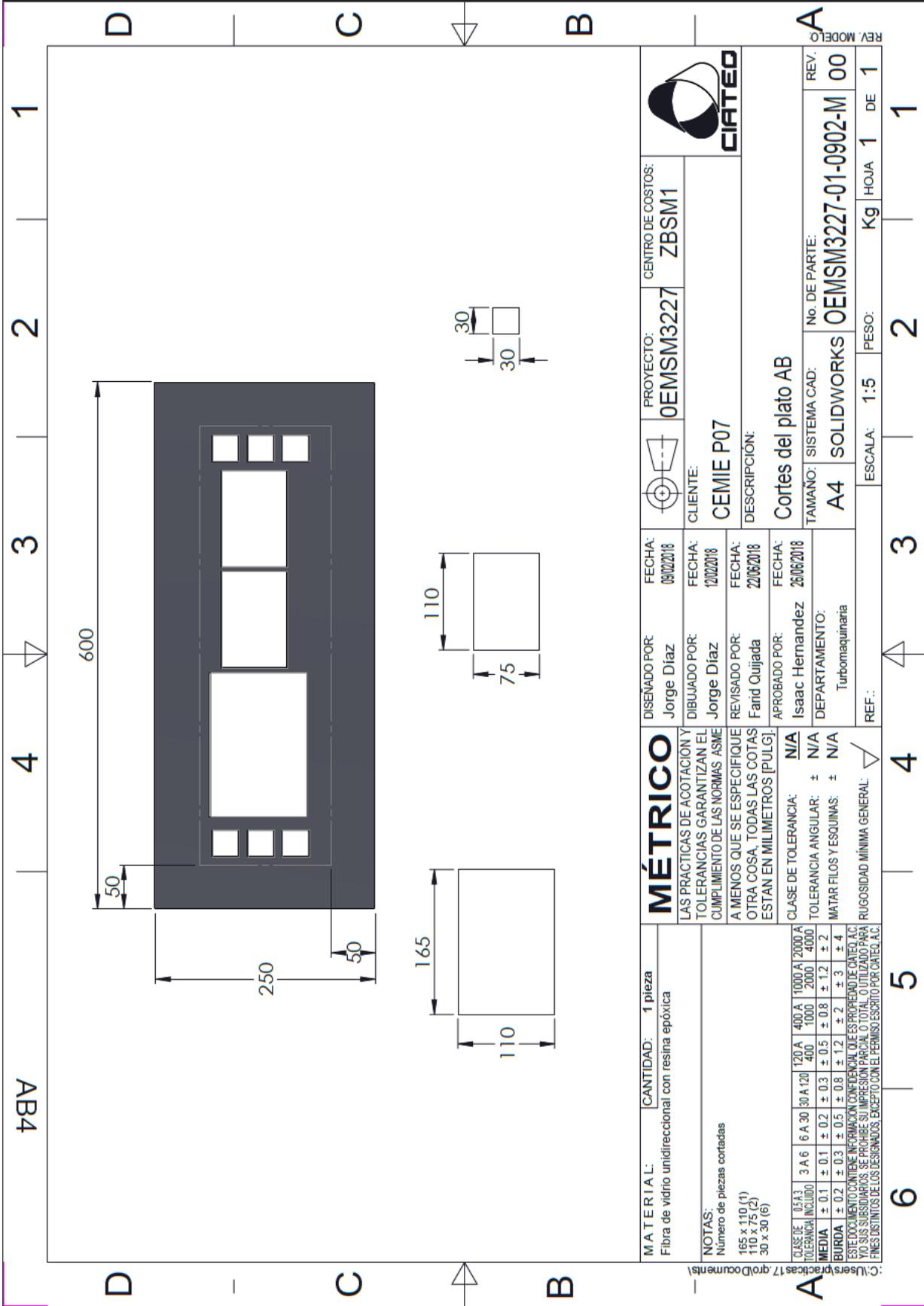


Figura 94 Accesorio tipo ASTM D95 (modificado). Fuente: ISO 14126:1999 pág. 16

ANEXO C. PLANOS PARA CORTE DE PLATOS ANTES DEL PEGADO DE LAS PESTAÑAS





MATERIAL: [CANTIDAD: 1 pieza Fibra de vidrio unidireccional con resina epóxica]	PROYECTO: 0EMSM3227 CENTRO DE COSTOS: ZBSM1		PROYECTO: 0EMSM3227 CENTRO DE COSTOS: ZBSM1	FECHA: 09/02/2018	FECHA: 09/02/2018	FECHA: 12/02/2018	FECHA: 22/06/2018	FECHA: 26/06/2018	REV. MODELO REV. 00
NOTAS: Número de piezas cortadas 165 x 110 (1) 110 x 75 (2) 30 x 30 (6)	DISEÑADO POR: Jorge Díaz DIBUJADO POR: Jorge Díaz REVISADO POR: Fainid Quijada APROBADO POR: Isaac Hernandez	CLIENTE: CEMIE P07 DESCRIPCIÓN: Cortes del plato AB	DEPARTAMENTO: Turbomaquinaria	REF.:	CLASE DE TOLERANCIA: N/A TOLERANCIA ANGULAR: ± N/A MATAR FILOS Y ESQUINAS: ± N/A	TAMANO: A4 SISTEMA CAD: SOLIDWORKS NO. DE PARTE: OEMSM3227-01-0902-M	ESCALA: 1:5 PESO: Kg HOJA 1 DE 1	REV. MODELO REV. 00	

MÉTRICO
 LAS PRACTICAS DE ACOTACION Y TOLERANCIAS GARANTIZAN EL CUMPLIMIENTO DE LAS NORMAS ASME A MENOS QUE SE ESPECIFIQUE OTRA COSA, TODAS LAS COTAS ESTAN EN MILIMETROS [PULG].

ESTE DOCUMENTO CONTIENE INFORMACION CONFIDENCIAL QUE ES PROPIEDAD DE CIATED, A.C. TODOS SUS SUBSIDIARIOS. SE PROHIBE SU IMPRESION PARCIAL O TOTAL, O UTILIZADO PARA FINES DISTINTOS DE LOS DESIGNADOS, EXCEPTO CON EL PERMISO ESCRITO POR CIATED, A.C.

AB4

1

2

3

4

5

6

600

250

50

50

165

110

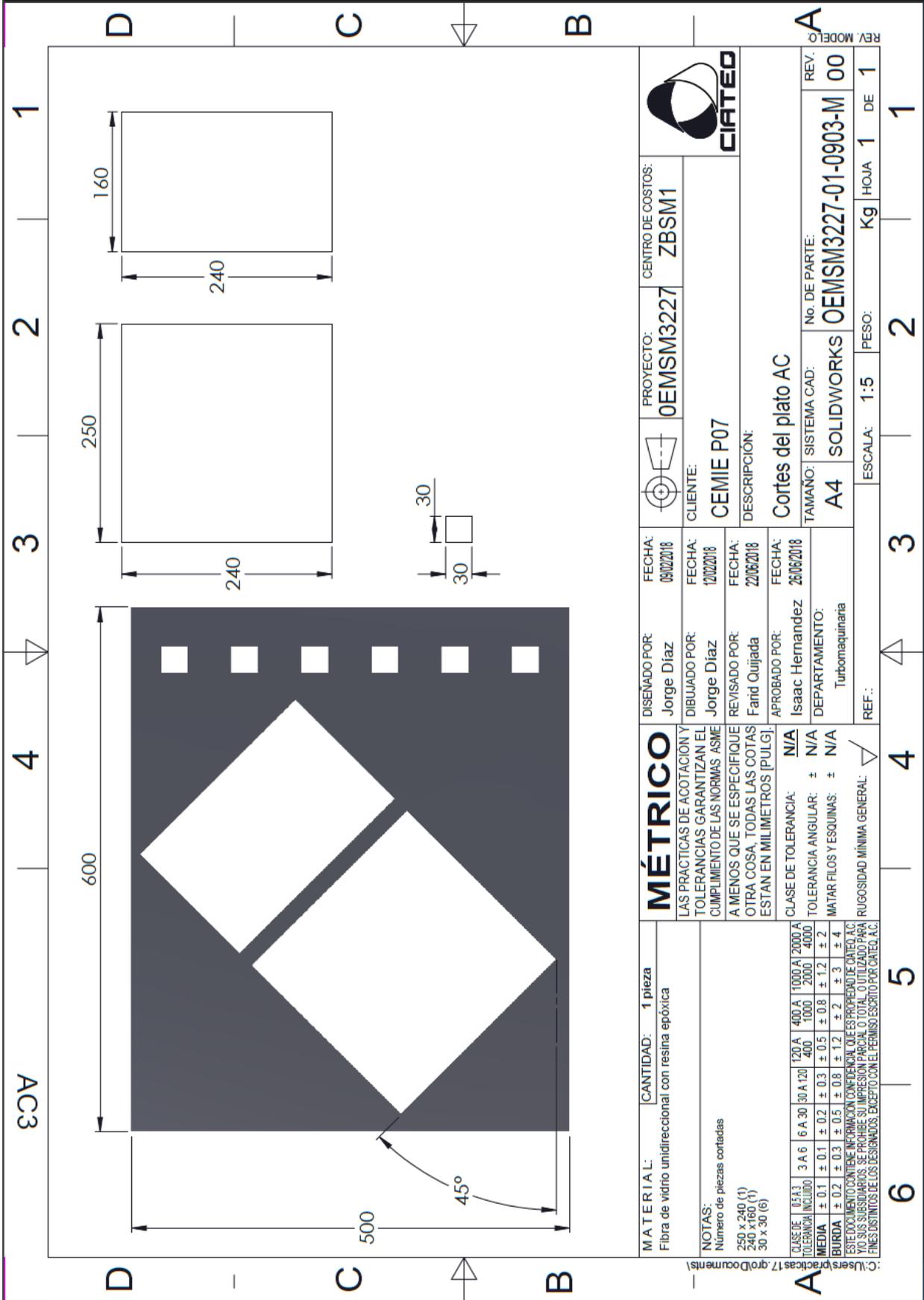
110

75

30

30

C:\Users\p... 17 (groDocuments)



MATERIAL: Fibra de vidrio unidireccional con resina epóxica		CANTIDAD: 1 pieza	
NOTAS: Número de piezas cortadas 250 x 240 (1) 240 x 160 (1) 30 x 30 (6)			
CLASE DE TOLERANCIA: 0.5 A 3		120 A 1000 A	
TOLERANCIA INCLUIDO: 6 A 30 A 120		400 1000 2000 4000	
MEDIDA ± 0.1 ± 0.1 ± 0.2 ± 0.3 ± 0.5 ± 0.8 ± 1.2 ± 2		BURDA ± 0.2 ± 0.3 ± 0.5 ± 0.8 ± 1.2 ± 2 ± 3 ± 4	
ESTE DOCUMENTO CONTIENE INFORMACION CONFIDENCIAL QUE ES PROPIEDAD DE CAIEQ, A.C. Y A SUS SUBSIDIARIOS. SE PROHIBE SU IMPRESION PARCIAL O TOTAL, O UTILIZADO PARA FINES DISTINTOS DE LOS DESIGNADOS, EXCEPTO CON EL PERMISO ESCRITO POR CAIEQ, A.C.			
MÉTRICO LAS PRÁCTICAS DE ACOTACION Y TOLERANCIAS GARANTIZAN EL CUMPLIMIENTO DE LAS NORMAS ASME A MENOS QUE SE ESPECIFIQUE OTRA COSA, TODAS LAS COTAS ESTAN EN MILIMETROS [PULG].		CLASE DE TOLERANCIA: N/A TOLERANCIA ANGULAR: ± N/A MATR FILOS Y ESQUINAS: ± N/A RUGOSIDAD MÍNIMA GENERAL: ∇	
DISEÑADO POR: Jorge Diaz	FECHA: 09/02/2018	DISEÑADO POR: Jorge Diaz	FECHA: 09/02/2018
DIBUJADO POR: Jorge Diaz	FECHA: 12/02/2018	REVISADO POR: Farid Quijada	FECHA: 22/06/2018
APROBADO POR: Isaac Hernandez		FECHA: 26/06/2018	
DEPARTAMENTO: Turbomaquinaria		DEPARTAMENTO: Turbomaquinaria	
PROYECTO: OEMSM3227		CENTRO DE COSTOS: ZBSM1	
CLIENTE: CEMIE P07		CIATED	
DESCRIPCIÓN: Cortes del plato AC			
TAMAÑO: A4	SISTEMA CAD: SOLIDWORKS	No. DE PARTE: OEMSM3227-01-0903-M	REV. MODELO: A
ESCALA: 1:5	PESO: Kg	HOJA: 1	DE: 1

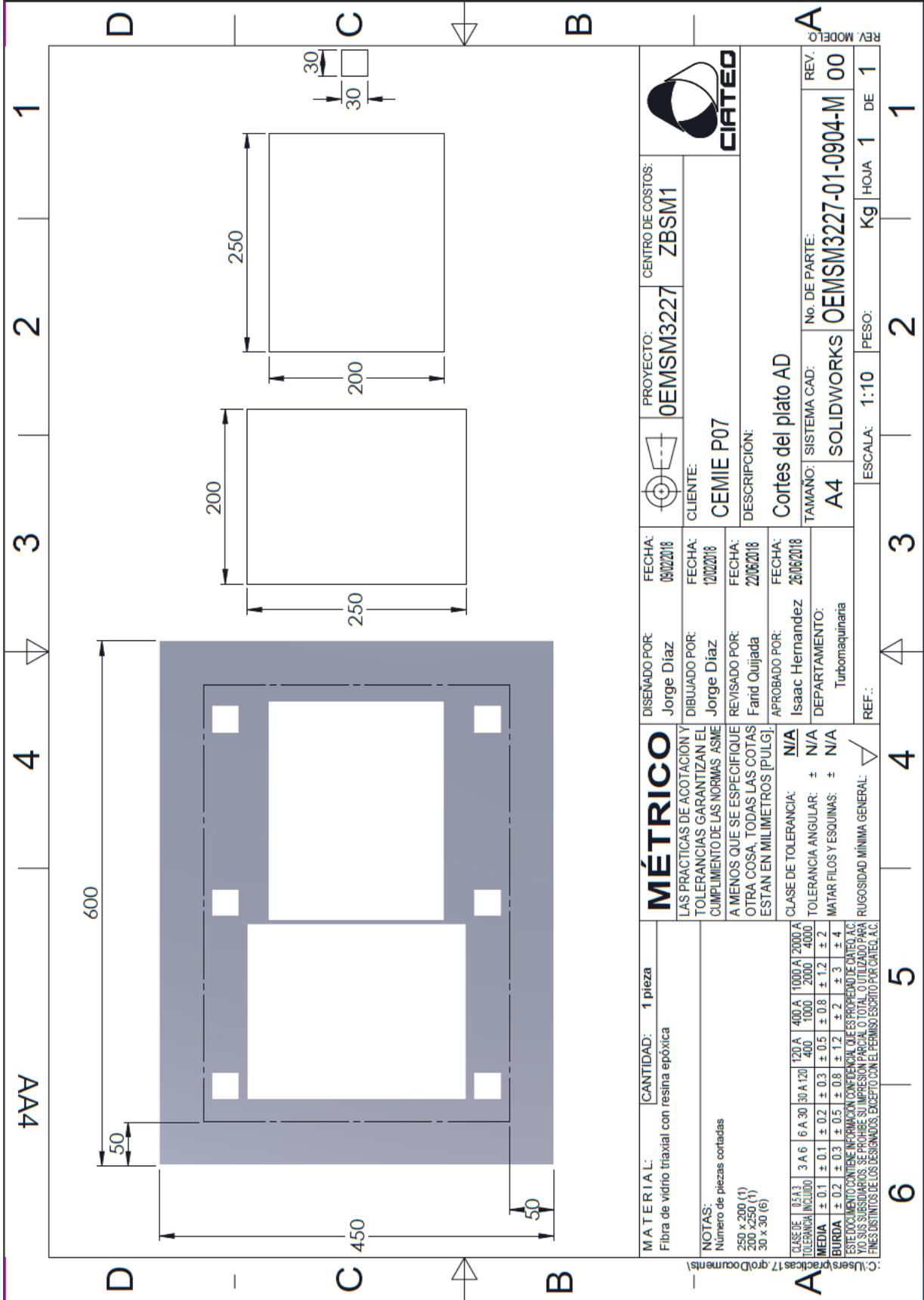
AC3 1 2 3 4

600 240 250 160

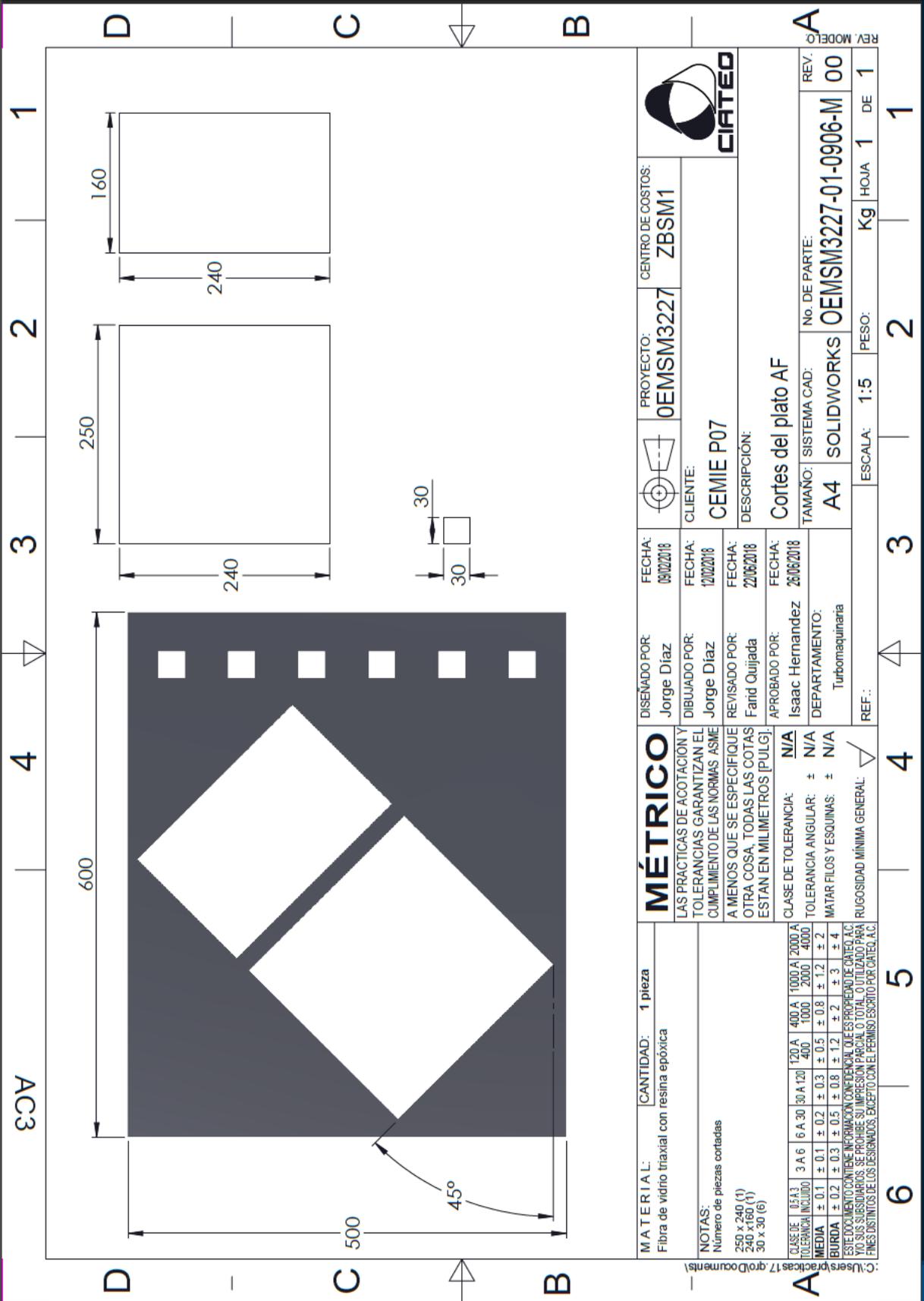
30 30

45°

1 2 3 4 5 6



MATERIAL: CANTIDAD: 1 pieza Fibra de vidrio triaxial con resina epóxica		MÉTRICO LAS PRÁCTICAS DE ACOTACION Y TOLERANCIAS GARANTIZAN EL CUMPLIMIENTO DE LAS NORMAS ASME A MENOS QUE SE ESPECIFIQUE OTRA COSA. TODAS LAS COTAS ESTAN EN MILIMETROS [PULG].		DISEÑADO POR: Jorge Diaz		FECHA: 04/02/2018		PROYECTO: OEMSM3227		CENTRO DE COSTOS: ZBSM1	
NOTAS: Número de piezas cortadas 250 x 200 (1) 300 x 250 (1) 30 x 30 (6)		CLASE DE TOLERANCIA: N/A TOLERANCIA ANGULAR: ± N/A MATAR FILOS Y ESQUINAS: ± N/A RUGOSIDAD MÍNIMA GENERAL: ∇		DIBUJADO POR: Jorge Diaz		FECHA: 12/02/2018		CLIENTE: CEMIE P07		CIATED	
ESTO DOCUMENTO CONTIENE INFORMACION CONFIDENCIAL QUE ES PROPIEDAD DE CIATED. AC TO SUS SUBSIDIARIOS. SE PROHIBEN SU REPRODUCCION, DISTRIBUCION O USO. EL CALIDAD PARA FINES DISTINTOS A LOS DESIGNADOS. EXCEPTO CON EL PERMISO ESCRITO POR CIATED, A.C.		CLASE DE TOLERANCIA: N/A TOLERANCIA ANGULAR: ± N/A MATAR FILOS Y ESQUINAS: ± N/A RUGOSIDAD MÍNIMA GENERAL: ∇		REVISADO POR: Farid Quijada		FECHA: 22/06/2018		DESCRIPCION: Cortes del plato AD		REV. MODELO	
		CLASE DE TOLERANCIA: N/A TOLERANCIA ANGULAR: ± N/A MATAR FILOS Y ESQUINAS: ± N/A RUGOSIDAD MÍNIMA GENERAL: ∇		APROBADO POR: Isaac Hernandez		FECHA: 26/06/2018		TAMANO: SISTEMA CAD: A4 SOLIDWORKS		No. DE PARTE: OEMSM3227-01-0904-M	
				DEPARTAMENTO: Turbomaquinaria				ESCALA: 1:10		PESO: Kg	
				REF.: ∇				1		1	
				4		3		2		1	
				5		6		1		1	



MÉTRICO		DISEÑO POR:	FECHA:	PROYECTO:	CENTRO DE COSTOS:
LAS PRÁCTICAS DE ACOTACIÓN Y TOLERANCIAS GARANTIZAN EL CUMPLIMIENTO DE LAS NORMAS ASME A MENOS QUE SE ESPECIFIQUE OTRA COSA, TODAS LAS COTAS ESTAN EN MILIMETROS [PULG].		Jorge Díaz	08/02/2018	OEMSM3227	ZBSM1
CLASE DE TOLERANCIA: N/A		DIBUJADO POR:	FECHA:	CLIENTE:	
TOLERANCIA ANGULAR: ± N/A		Jorge Díaz	12/02/2018	CEMIE P07	
MATAR FILOS Y ESQUINAS: ± N/A		REVISADO POR:	FECHA:	DESCRIPCIÓN:	
RUGOSIDAD MÍNIMA GENERAL: ∇		Farid Quijada	22/02/2018	Cortes del plato AF	
		APROBADO POR:	FECHA:	TAMAÑO: SISTEMA CAD:	No. DE PARTE:
		Isaac Hernandez	26/02/2018	A4 SOLIDWORKS	OEMSM3227-01-0906-M
		DEPARTAMENTO:		ESCALA:	1:5
		Turbomaquinaria		PESO:	Kg
		REF.:		HOJA	1 DE 1

MATERIAL:	CANTIDAD:	1 pieza
Fibra de vidrio triaxial con resina epóxica		

NOTAS:

Número de piezas cortadas

CLASE DE TOLERANCIA INCLUIDO	3 A 6	6 A 30	30 A 120	120 A 400	400 A 1000	1000 A 2000	2000 A 4000
MEDIA	± 0.1	± 0.1	± 0.2	± 0.3	± 0.5	± 0.8	± 1.2
BURDA	± 0.2	± 0.3	± 0.5	± 0.8	± 1.2	± 2	± 3

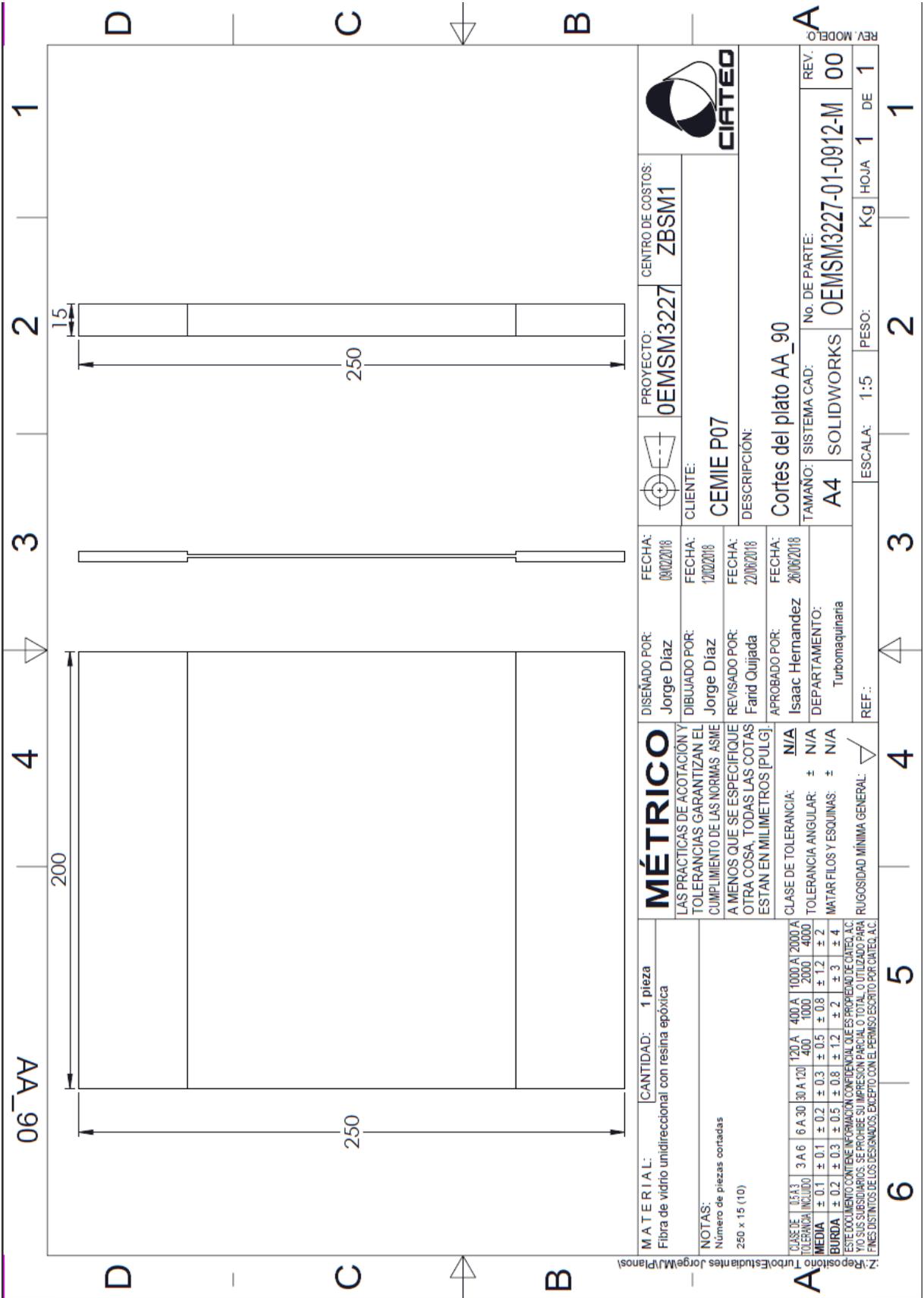
ESTE DOCUMENTO CONTIENE INFORMACIÓN CONFIDENCIAL. CUALSIQUIER USO NO AUTORIZADO DE ESTE DOCUMENTO SIN EL PERMISO ESCRITO DE CIATEO, A.C. LOS SUSCRIBIDOS SE PROHIBE SU IMPRESIÓN PARCIAL O TOTAL, UTILIZACIÓN PARA FINES DISTINTOS DE LOS DESIGNADOS, EXCEPTO CON EL PERMISO ESCRITO POR CIATEO, A.C.

Users practices 17 (grid documents)

REV. MODELO A

1 2 3 4 5 6

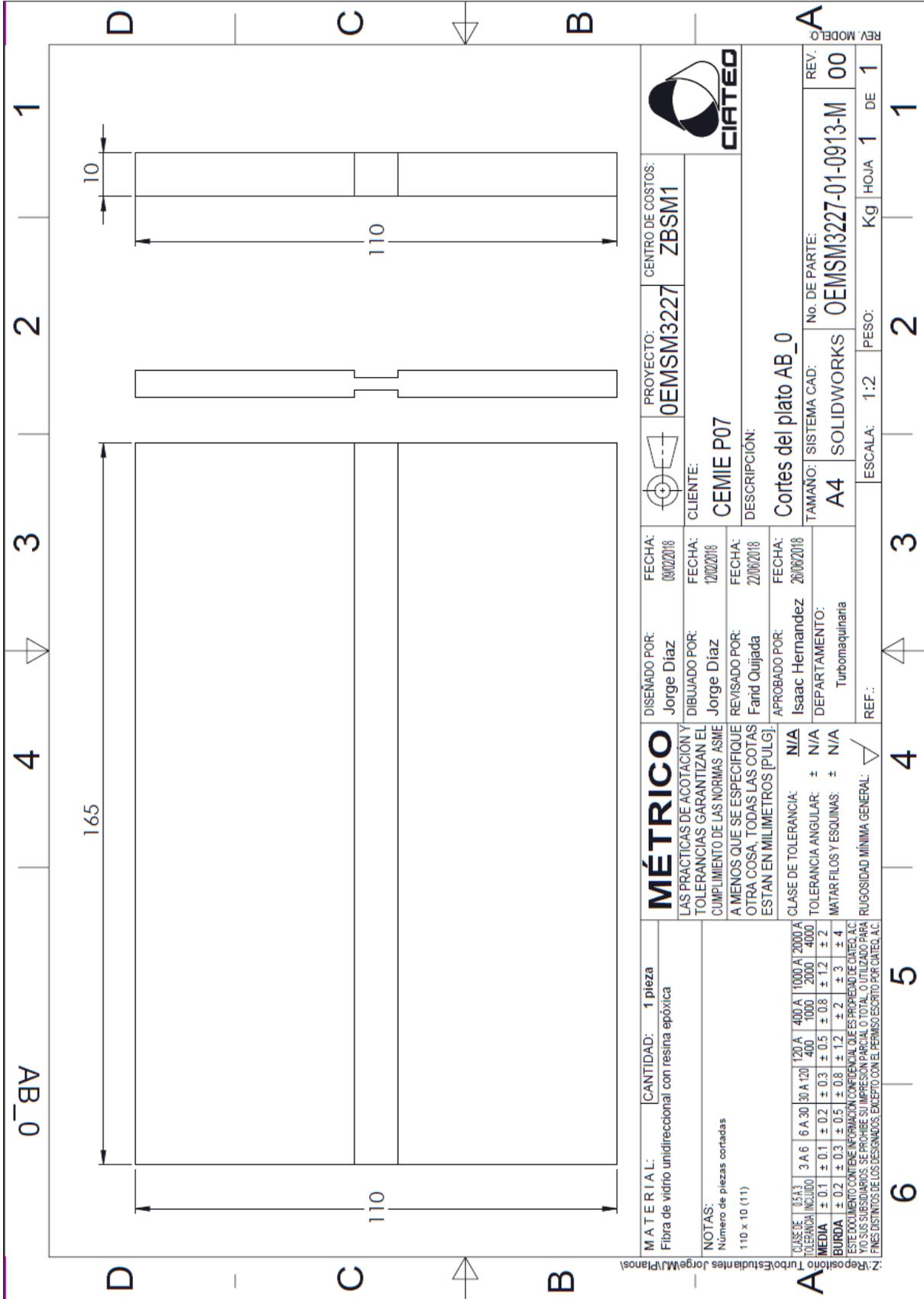
1 2 3 4 5 6



MATERIAL: Fibra de vidrio unidireccional con resina epóxica		CANTIDAD: 1 pieza	
NOTAS: Número de piezas cortadas 250 x 15 (10)			
CLASE DE TOL. A3		CLASE DE TOLERANCIA:	
TOLERANCIA INCLUIDO		N/A	
MEDIDA		TOLERANCIA ANGULAR: ± N/A	
BIURDA		MATAR FILOS Y ESQUINAS: ± N/A	
ESTE DOCUMENTO CONTIENE INFORMACIÓN CONFIDENCIAL QUE ES PROPIEDAD DE CIATED, A.C. VOLOS SUBSIDIARIOS. SE PROHIBE SU IMPRESIÓN, REPRODUCCIÓN, COPIADO, DISTRIBUCIÓN O UTILIZACIÓN PARA FINES DISTINTOS DE LOS DESIGNADOS. EMPEÑO CON EL PERMISO ESCRITO POR CIATED, A.C.			
MÉTRICO		DEPARTAMENTO: Turbo maquinaria	
LAS PRÁCTICAS DE ACOTACIÓN Y TOLERANCIAS GARANTIZAN EL CUMPLIMIENTO DE LAS NORMAS ASME A MENOS QUE SE ESPECIFIQUE OTRA COSA. TODAS LAS COTAS ESTAN EN MILIMETROS [PULG].		RUGOSIDAD MÍNIMA GENERAL: <input checked="" type="checkbox"/>	
DISEÑADO POR: Jorge Diaz		FECHA: 08/02/2018	
DIBUJADO POR: Jorge Diaz		FECHA: 12/02/2018	
REVISADO POR: Fairid Quijada		FECHA: 22/06/2018	
APROBADO POR: Isaac Hernandez		FECHA: 20/06/2018	
PROYECTO: 0EMSM3227		CENTRO DE COSTOS: ZBSM1	
CLIENTE: CEMIE P07		CIATED	
DESCRIPCIÓN: Cortes del plato AA_90		TAMANO: A4	
SISTEMA CAD: SOLIDWORKS		No. DE PARTE: 0EMSM3227-01-0912-M	
ESCALA: 1:5		PESO: Kg	
REF.:		HOJA: 1	
DE:		DE: 1	

REV. MODELO
A

1 2 3 4 5 6 3 4 2 1



MATERIAL: Fibra de vidrio unidireccional con resina epóxica	CANTIDAD: 1 pieza	CLASE DE TOLERANCIA: 120 A 400 A 1000 A 2000 A	TOLERANCIA INCLUIDA: 400 1000 2000 4000
NOTAS: Número de piezas contadas 110 x 10 (11)		MEDIA: ± 0.1 ± 0.1 ± 0.2 ± 0.3 ± 0.5 ± 0.8 ± 1.2 ± 2	BURDA: ± 0.2 ± 0.3 ± 0.5 ± 0.8 ± 1.2 ± 2 ± 3 ± 4
ESTE DOCUMENTO CONTIENE INFORMACIÓN CONFIDENCIAL QUE ES PROPIEDAD DE CIATEO, AC Y SUS SUBSIDIARIOS. SE PROHIBE SU IMPRESIÓN PARCIAL O TOTAL, O UTILIZADO PARA FINES DISTINTOS DE LOS DESIGNADOS, EXCEPTO CON EL PERMISO ESCRITO POR CIATEO, AC.			

MÉTRICO
LAS PRÁCTICAS DE ACOTACIÓN Y TOLERANCIAS GARANTIZAN EL CUMPLIMIENTO DE LAS NORMAS ASME A MENOS QUE SE ESPECIFIQUE OTRA COSA. TODAS LAS COTAS ESTÁN EN MILÍMETROS [PULG].

DISEÑADO POR: Jorge Díaz
DIBUJADO POR: Jorge Díaz
REVISADO POR: Farid Quijada
APROBADO POR: Isaac Hernandez

FECHA: 08/02/2018
FECHA: 12/02/2018
FECHA: 22/06/2018
FECHA: 20/06/2018

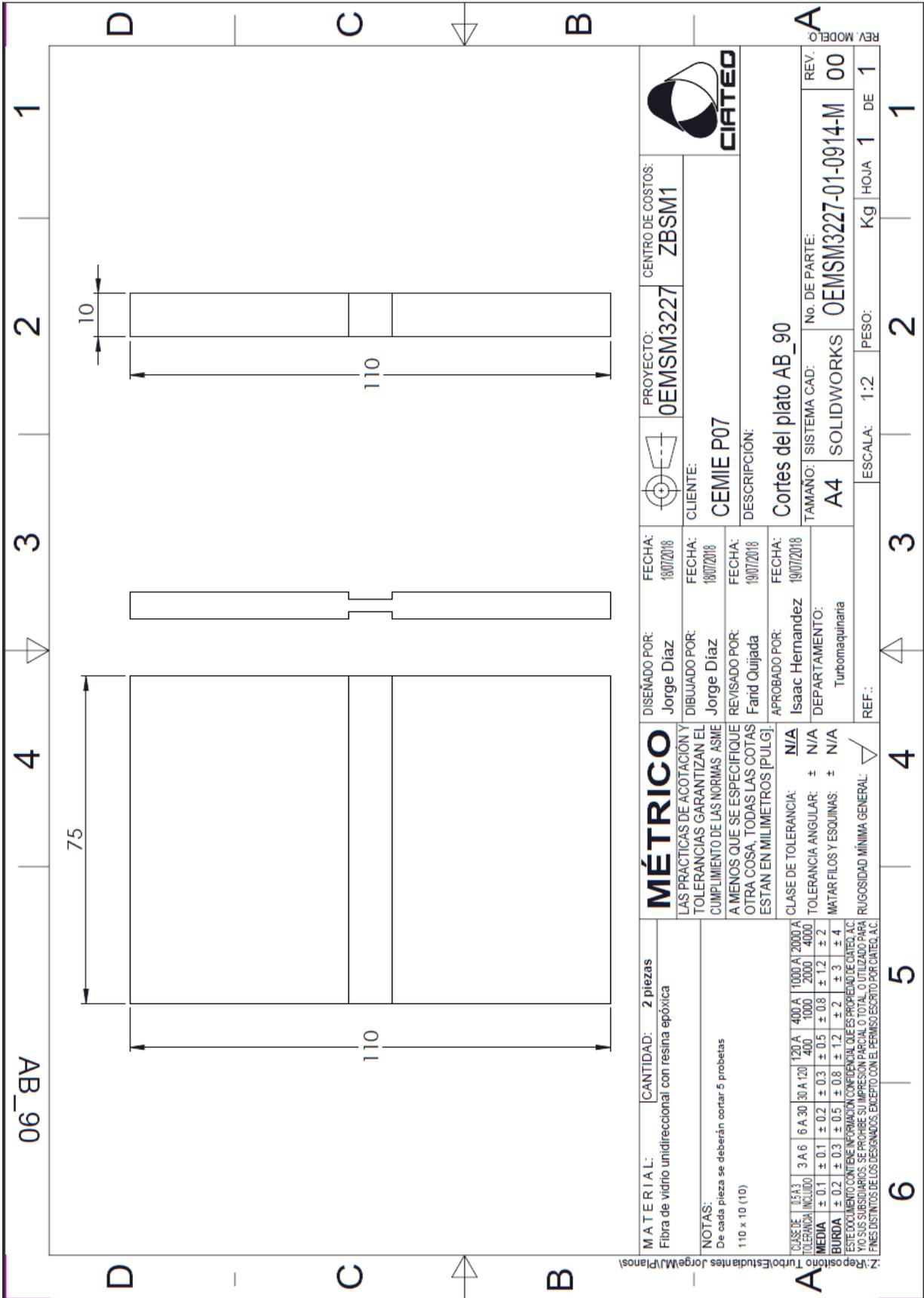
PROYECTO: OEMSM3227
CENTRO DE COSTOS: ZBSM1

CLIENTE: CEMIE P07
DESCRIPCIÓN: Cortes del plato AB_0

TAMAÑO: SISTEMA CAD: A4
NO. DE PARTE: OEMSM3227-01-0913-M
REV.: 00

DEPARTAMENTO: Turbomaquinaria
ESCALA: 1:2
PESO: Kg
HOJA: 1 DE 1

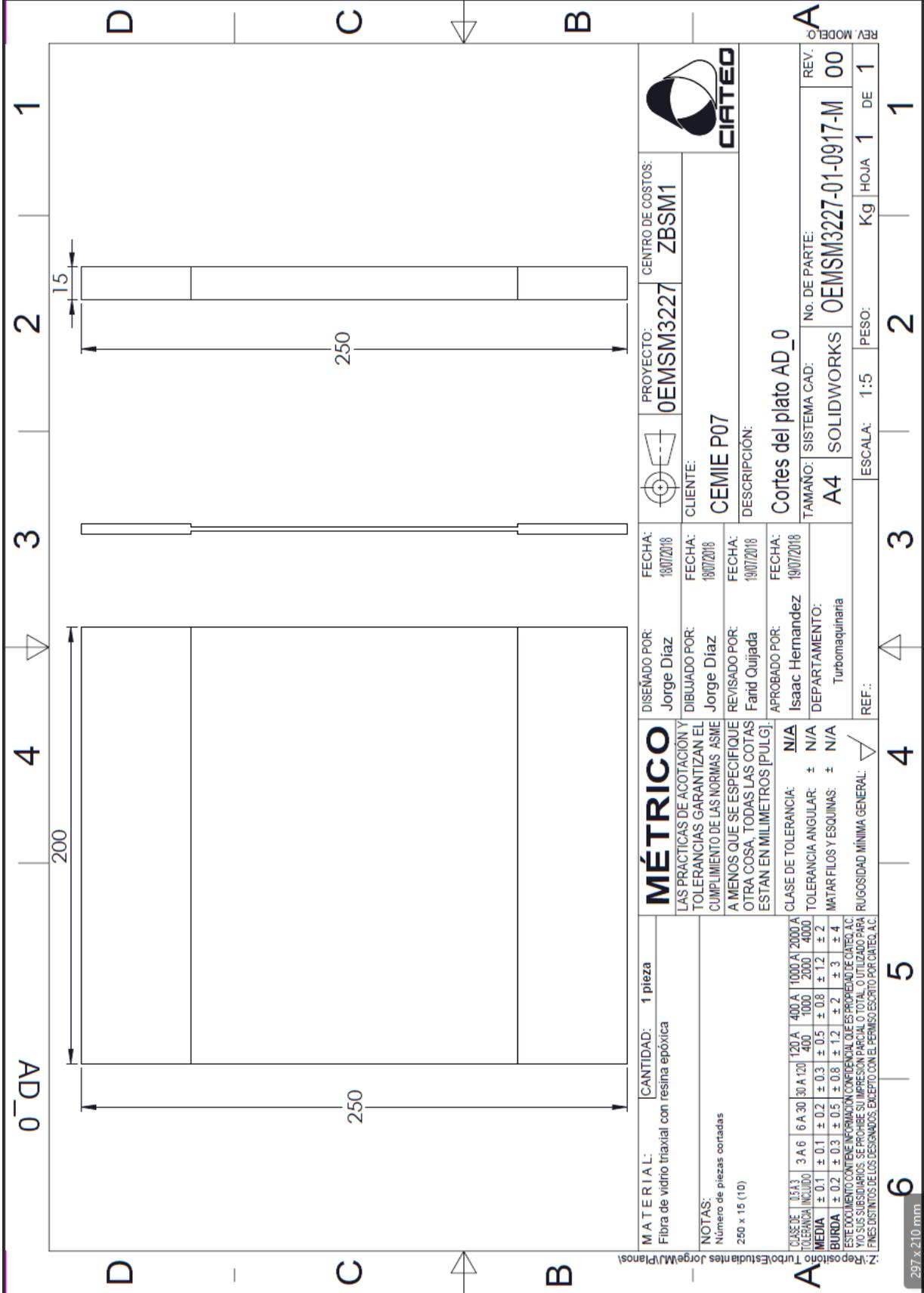
REV. MODELO A



MATERIAL:	CANTIDAD: 2 piezas	MÉTRICO	DISEÑADO POR:	FECHA:	PROYECTO:	CENTRO DE COSTOS:	
Fibra de vidrio unidireccional con resina epóxica		LAS PRACTICAS DE ACOTACIÓN Y TOLERANCIAS GARANTIZAN EL CUMPLIMIENTO DE LAS NORMAS ASME A MENOS QUE SE ESPECIFIQUE OTRA COSA, TODAS LAS COTAS ESTAN EN MILIMETROS [PULG].	Jorge Diaz	18/07/2018	0EMSM3227	ZBSM1	
NOTAS:	De cada pieza se deberán cortar 5 probetas 110 x 10 (10)	CLASE DE TOLERANCIA: N/A	DIBUJADO POR:	FECHA:	CLIENTE:	DESCRIPCIÓN:	REV. MODELO
		TOLERANCIA ANGULAR: ± N/A	Jorge Diaz	18/07/2018	CEMIE P07	Cortes del plato AB_90	
		MATARFILOS Y ESQUINAS: ± N/A	REVISADO POR:	FECHA:	TAMANO:	No. DE PARTE:	REV. 00
		RUGOSIDAD MÍNIMA GENERAL: $\sqrt{\quad}$	Famid Quijada	19/07/2018	A4	SOLIDWORKS	0EMSM3227-01-0914-M
			APROBADO POR:	FECHA:	ESCALA:	1:2	PESO: Kg
			Isaac Hernandez	19/07/2018	1:2	1	HOJA 1 DE 1
			DEPARTAMENTO:				
			Turbomaquinaria				
			REF.:				

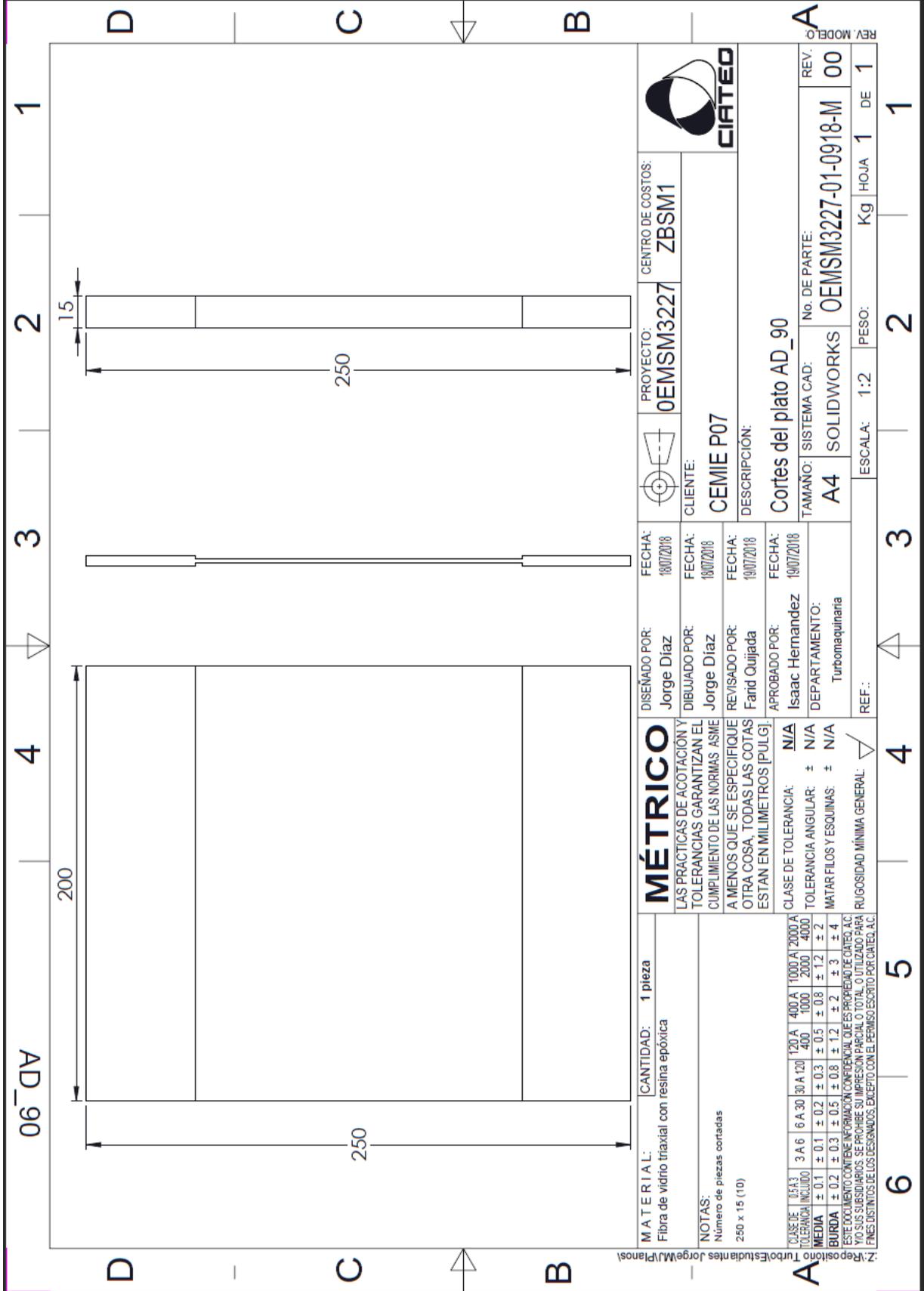
2: Reposición Turbomaquinaria (Plano)

Este documento contiene información confidencial que es propiedad de CIATED, A.C. Ninguno de sus subsidios, separados o conjuntos, o cualquier parte, o cualquier parte de los mismos, se pueden reproducir, copiar, distribuir, publicar, o de cualquier otra manera, sin el consentimiento escrito por CIATED, A.C.



MATERIAL: CANTIDAD: 1 pieza Fibra de vidrio triaxial con resina epóxica		PROYECTO: ZBSM1		CENTRO DE COSTOS: ZBSM1	
NOTAS: Número de piezas cortadas 250 x 15 (10)		CLIENTE: CEMIE P07		CIATEO	
CLASE DE TOLERANCIA: N/A		FECHA: 19/07/2018		DESCRIPCIÓN: Cortes del plato AD_0	
TOLERANCIA INCLUIDO: 3 A 6 6 A 30 30 A 120 120 A 400 400 A 1000 A 1000 A 2000 A 2000 A 4000		FECHA: 19/07/2018		TAMANO: SISTEMA CAD: No. DE PARTE: REV. A	
BIENIA: ± 0.1 ± 0.1 ± 0.2 ± 0.3 ± 0.5 ± 0.8 ± 1.2 ± 2		FECHA: 19/07/2018		A4 SOLIDWORKS OEMSM3227-01-0917-M 00	
TERCERA: ± 0.2 ± 0.3 ± 0.5 ± 0.8 ± 1.2 ± 2 ± 3 ± 4		APROBADO POR: Isaac Hernandez		ESCALA: 1:5 PESO: Kg HOJA 1 DE 1	
CUARTA: ± 0.2 ± 0.3 ± 0.5 ± 0.8 ± 1.2 ± 2 ± 3 ± 4		DEPARTAMENTO: Turbomaquinaria			
QUINTA: ± 0.2 ± 0.3 ± 0.5 ± 0.8 ± 1.2 ± 2 ± 3 ± 4		REF.: <input checked="" type="checkbox"/>			
SEXTA: ± 0.2 ± 0.3 ± 0.5 ± 0.8 ± 1.2 ± 2 ± 3 ± 4		RUGOSIDAD MÍNIMA GENERAL: <input checked="" type="checkbox"/>			

297 x 210 mm

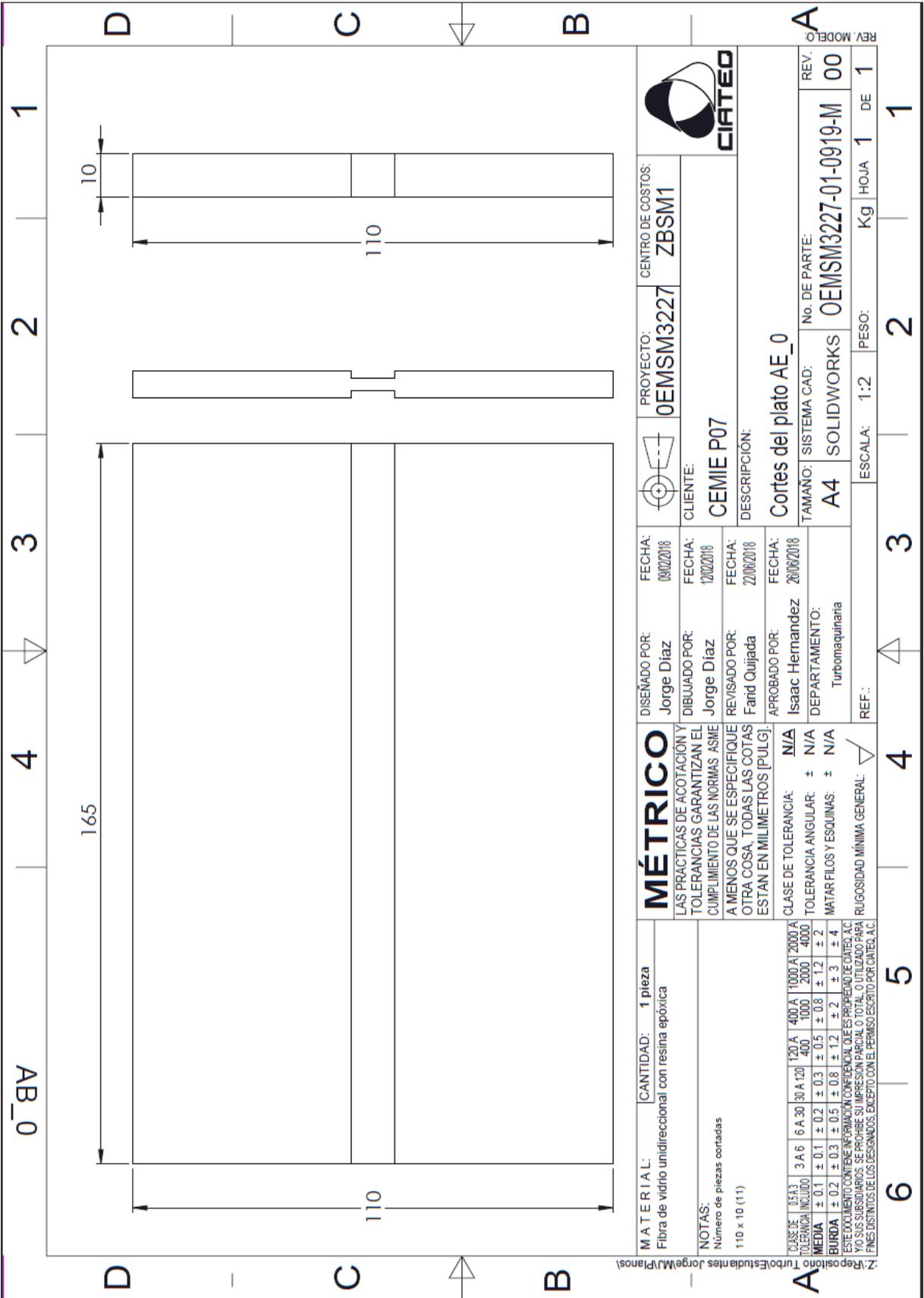


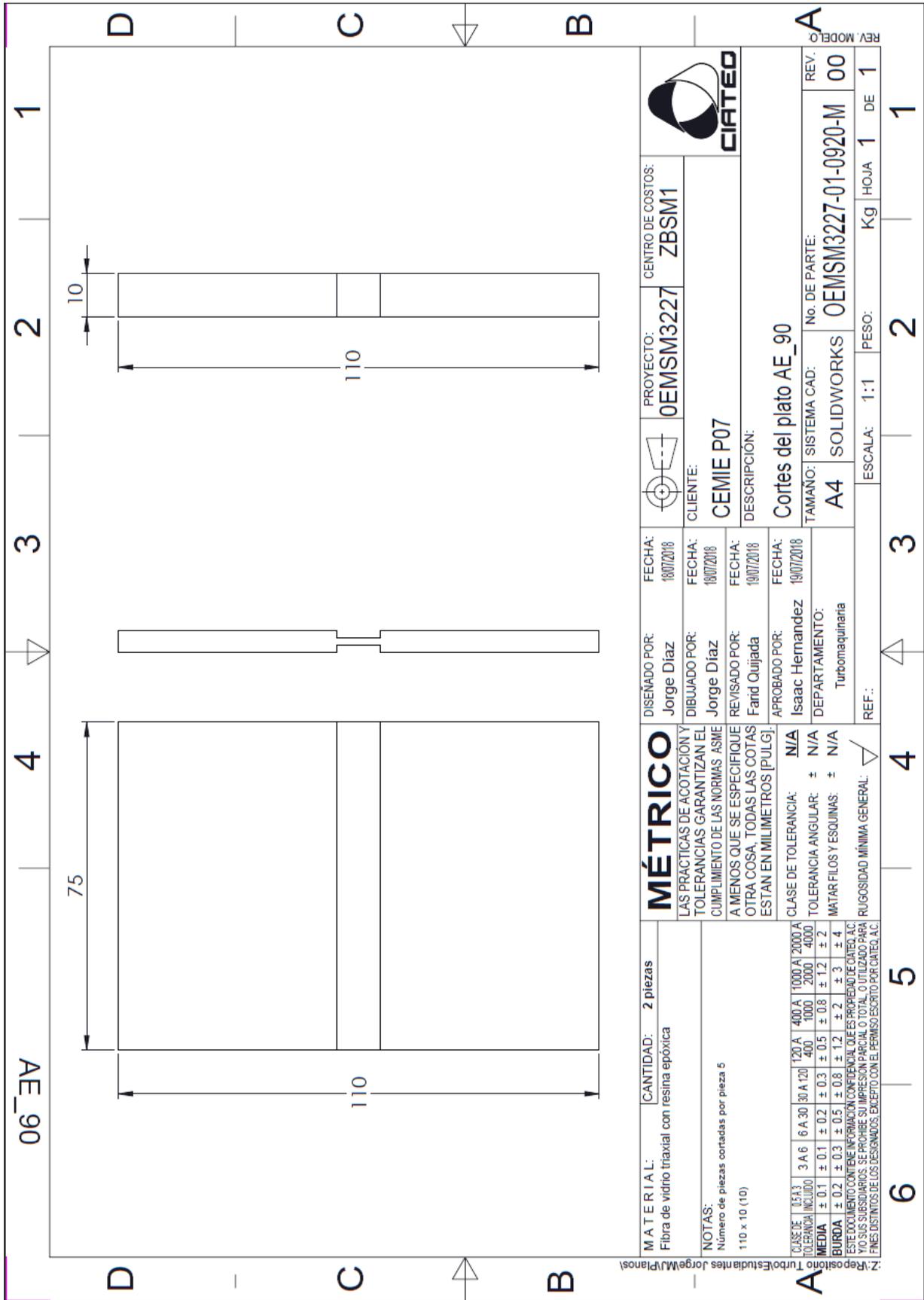
MATERIAL: Fibra de vidrio triaxial con resina epóxica		CANTIDAD: 1 pieza	
NOTAS: Número de piezas cortadas 250 x 15 (10)			
MÉTRICO LAS PRÁCTICAS DE ACOTACIÓN Y TOLERANCIAS GARANTIZAN EL CUMPLIMIENTO DE LAS NORMAS ASME A MENOS QUE SE ESPECIFIQUE OTRA COSA, TODAS LAS COTAS ESTAN EN MILIMETROS [PULG.].		CLASE DE TOLERANCIA: N/A TOLERANCIA ANGULAR: ± N/A MATAR FILOS Y ESQUINAS: ± N/A RUGOSIDAD MÍNIMA GENERAL: ✓	
DISEÑADO POR: Jorge Diaz DIBUJADO POR: Jorge Diaz REVISADO POR: Farid Quijada APROBADO POR: Isaac Hernandez		FECHA: 19/07/2018 FECHA: 19/07/2018 FECHA: 19/07/2018 FECHA: 19/07/2018	
PROYECTO: OEMSM3227		CENTRO DE COSTOS: ZBSM1	
CLIENTE: CEMIE P07		DESCRIPCIÓN: Cortes del plato AD_90	
TAMANO: A4		SISTEMA CAD: SOLIDWORKS	
No. DE PARTE: 00		No. DE PARTE: 00	
ESCALA: 1:2		PESO: Kg	
HOJA 1		DE 1	

DISEÑADO POR: Jorge Diaz DIBUJADO POR: Jorge Diaz REVISADO POR: Farid Quijada APROBADO POR: Isaac Hernandez		FECHA: 19/07/2018 FECHA: 19/07/2018 FECHA: 19/07/2018 FECHA: 19/07/2018	
PROYECTO: OEMSM3227		CENTRO DE COSTOS: ZBSM1	
CLIENTE: CEMIE P07		DESCRIPCIÓN: Cortes del plato AD_90	
TAMANO: A4		SISTEMA CAD: SOLIDWORKS	
No. DE PARTE: 00		No. DE PARTE: 00	
ESCALA: 1:2		PESO: Kg	
HOJA 1		DE 1	

CLASE DE TOLERANCIA: N/A TOLERANCIA ANGULAR: ± N/A MATAR FILOS Y ESQUINAS: ± N/A RUGOSIDAD MÍNIMA GENERAL: ✓	CLASE DE TOLERANCIA: N/A TOLERANCIA ANGULAR: ± N/A MATAR FILOS Y ESQUINAS: ± N/A RUGOSIDAD MÍNIMA GENERAL: ✓
---	---

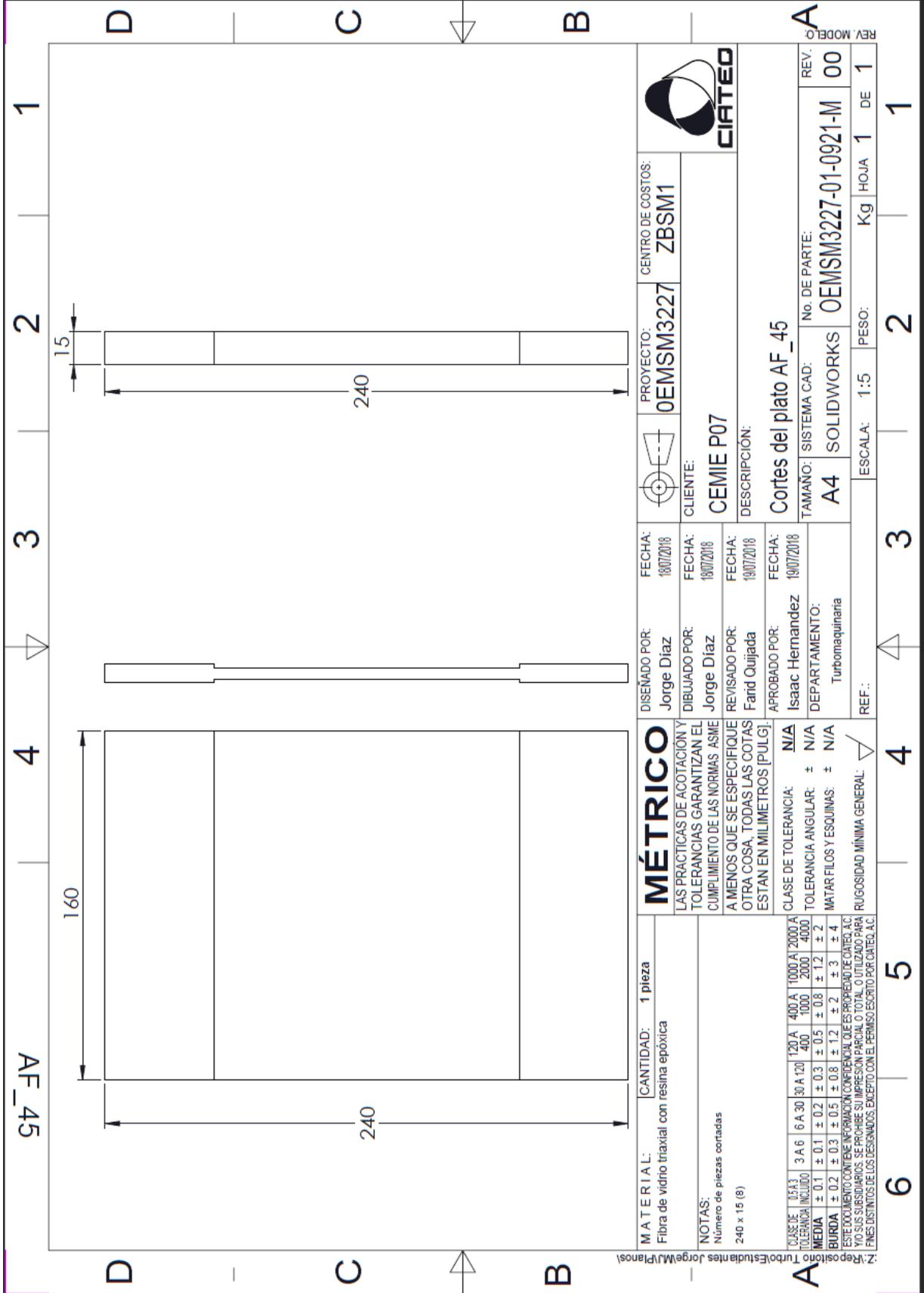
REV. MODELO A

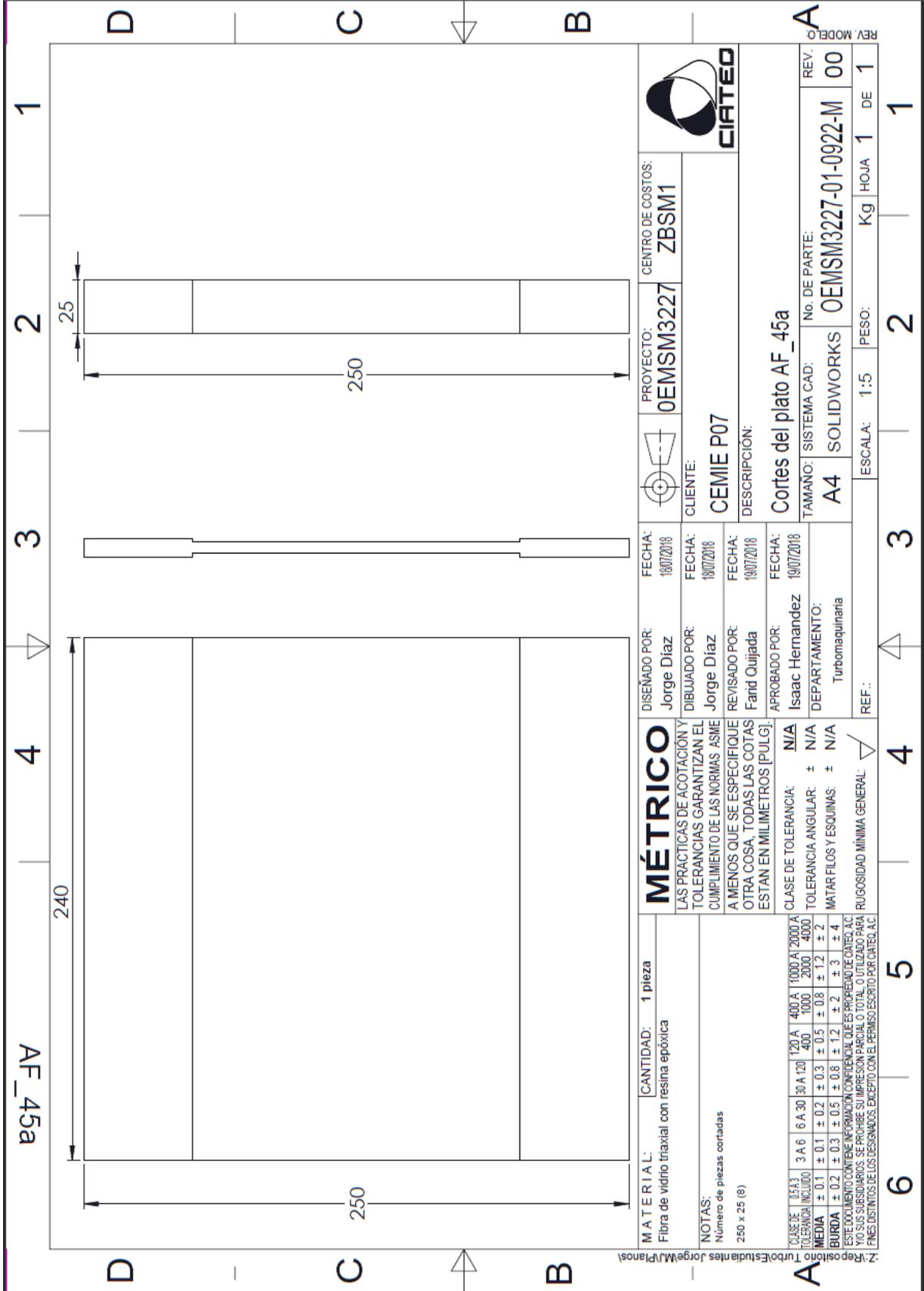




MATERIAL: CANTIDAD: 2 piezas Fibra de vidrio triaxial con resina epóxica		DISEÑO POR: Jorge Diaz		FECHA: 18/07/2018		PROYECTO: 0EMSM3227		CENTRO DE COSTOS: ZBSM1			
NOTAS: Número de piezas cortadas por pieza 5 110 x 10 (10)		DIBUJADO POR: Jorge Diaz		FECHA: 18/07/2018		CLIENTE: CEMIE P07		DESCRIPCIÓN: Cortes del plato AE_90		REV. MODELO: A	
CLASE DE TOL. A3 TOLERANCIA INCLUIDO		APROBADO POR: Isaac Hernandez		FECHA: 19/07/2018		TAMANO: SISTEMA CAD: A4		DEPARTAMENTO: Turbomaquinaria		REV.: 00	
3 A 6 6 A 30 30 A 120 120 A 400 400 A 1000 1000 A 2000 2000 A 4000		DEPARTAMENTO: Turbomaquinaria		DEPARTAMENTO: Turbomaquinaria		DEPARTAMENTO: Turbomaquinaria		DEPARTAMENTO: Turbomaquinaria		DEPARTAMENTO: Turbomaquinaria	
MEDIA ± 0.1 ± 0.1 ± 0.2 ± 0.3 ± 0.5 ± 0.8 ± 1.2 ± 2		DEPARTAMENTO: Turbomaquinaria		DEPARTAMENTO: Turbomaquinaria		DEPARTAMENTO: Turbomaquinaria		DEPARTAMENTO: Turbomaquinaria		DEPARTAMENTO: Turbomaquinaria	
BURDA ± 0.2 ± 0.3 ± 0.5 ± 0.8 ± 1.2 ± 2 ± 3 ± 4		DEPARTAMENTO: Turbomaquinaria		DEPARTAMENTO: Turbomaquinaria		DEPARTAMENTO: Turbomaquinaria		DEPARTAMENTO: Turbomaquinaria		DEPARTAMENTO: Turbomaquinaria	
ESTE DOCUMENTO CONTIENE INFORMACION CONFIDENCIAL QUE ES PROPIEDAD DE CIATED, A.C. Y SUS SUBSIDIARIOS. SE PROHIBE SU IMPRESION PARCIAL O TOTAL O UTILIZADO PARA FINES DISTINTOS DE LOS DESIGNADOS. EXCEPTO CON EL PERMISO ESCRITO POR CIATED, A.C.		DEPARTAMENTO: Turbomaquinaria		DEPARTAMENTO: Turbomaquinaria		DEPARTAMENTO: Turbomaquinaria		DEPARTAMENTO: Turbomaquinaria		DEPARTAMENTO: Turbomaquinaria	
ESCALA: 1:1		ESCALA: 1:1		ESCALA: 1:1		ESCALA: 1:1		ESCALA: 1:1		ESCALA: 1:1	
PESO: Kg		PESO: Kg		PESO: Kg		PESO: Kg		PESO: Kg		PESO: Kg	
HOJA 1		HOJA 1		HOJA 1		HOJA 1		HOJA 1		HOJA 1	
DE 1		DE 1		DE 1		DE 1		DE 1		DE 1	
REV. 00		REV. 00		REV. 00		REV. 00		REV. 00		REV. 00	

Elaborado por: Turbomaquinaria
Dibujado por: Jorge M. Planos





Respositor Turbolistas Jorge M. Planos

Este documento contiene información confidencial de CIATEO, S.C. No. SUS SUBSIDIARIOS. SE PROHIBE SU IMPRESIÓN PARCIAL O TOTAL, UTILIZADO PARA FINES DISTINTOS DE LOS DESIGNADOS, EXCEPTO CON EL PERMISO ESCRITO POR CIATEO, S.C.



Universidad Autónoma del Estado de México
UAEM

Toluca, México a 3 de junio de 2019

Espacio Académico, Subdirector Académico, Coordinador de Programa
Presente

Carta de autorización para publicación en el RI

Declaración de autoría original, libre de embargo, susceptible de ser depositado en el Repositorio Institucional y solicitud de evaluación de grado.

Quien firma al calce, declaro bajo protesta de decir verdad que soy el(la) autor(a) de la obra (tipo de obra) tesis
titulada (título de la obra) Caracterización de los materiales fibra de vidrio unidireccional y triaxial utilizados en la fabricación de las aspas de un aerogenerador de 30KW
y estoy de acuerdo con la totalidad de su contenido, manifiesto mi conformidad y mi autorización para que se publique en Repositorio Institucional de la Universidad Autónoma del Estado de México, con fines académicos y culturales en formato de acceso abierto, en los términos del Reglamento de Acceso Abierto, la Normatividad vigente emitida por la Institución y las legislaciones aplicables en la materia.

Así mismo, declaro que responderé de la autoría y originalidad de la obra de mérito y del ejercicio pacífico de los derechos que autorizo en este acto, manifiesto que no existe otra persona física o moral a la que pertenezca; por lo cual libero de toda responsabilidad a la Universidad Autónoma del Estado de México de cualquier demanda o reclamación que llegara a formular alguna persona física o moral que se considere con derecho sobre la obra, asumiendo todas las consecuencias legales y económicas a que hubiera lugar.

De igual forma permito que la Oficina de Conocimiento Abierto perteneciente a esta Máxima Casa de Estudios, realice lo propio para el almacenamiento, preservación y difusión de la obra, con fines académicos y culturales en formato de acceso abierto y sin fines de lucro.

Firmo de conformidad y bajo protesta de decir verdad

Nombre y firma María Jazmín Morales Piña 
No de cuenta: 1220922