

**ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO MECÁNICO A TENSIÓN DE UN
MATERIAL COMPUESTO CON MATRIZ POLIMÉRICA DE RESINA EPOXI
REFORZADO CON FIBRAS DE CARBONO DE ALTA RESISTENCIA CON UN
TEJIDO CUATRIAXIAL**

SANDRA LILIANA PEDRAZA ROSAS

SERGIO ANDRES TOLOZA MEZA

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA
BUCARAMANGA**

2016

**ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO MECÁNICO A TENSIÓN DE UN
MATERIAL COMPUESTO CON MATRIZ POLIMÉRICA DE RESINA EPOXI
REFORZADO CON FIBRAS DE CARBONO DE ALTA RESISTENCIA CON UN
TEJIDO CUATRIAXIAL**

SANDRA LILIANA PEDRAZA ROSAS

SERGIO ANDRES TOLOZA MEZA

Proyecto de Grado para optar al título de Ingeniero Mecánico

Director

DIEGO FERNANDO VILLEGAS BERMÚDEZ

Ingeniero Mecánico, PhD

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO MECÁNICAS**

ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA

BUCARAMANGA

2016

DEDICATORIA

A Dios por estar siempre junto a mí, por darme fortaleza y sabiduría en los momentos difíciles

A mi mamá Ángela Rosas por enseñarme a no decaer frente a los problemas, por siempre confiar en mí y alegrarme en los días grises.

A mi papá Mario Pedraza por enseñarme el valor del trabajo duro, por las risas, los juegos y por apoyarme siempre.

A mi hermana Lorena porque me ha apoyado de diferentes formas, por estar conmigo en las buenas y en las malas y por enseñarme de entereza en momentos difíciles.

A mi hermana Carolina, por nunca perder la fe en sí misma ni en mí y por apoyarme desde la distancia.

A mis pequeñas sobrinas por ser otra razón para alcanzar este logro y para alcanzar los que faltan.

A Luisa, Manuel, la señora Carmen y Don Silvestre, por recibirme siempre en su casa y por los buenos consejos.

A mis amigos Martha y Yeison por el apoyo, las risas y los buenos recuerdos aun estando tan lejos.

A mi compañero de proyecto por la paciencia, no fue fácil pero lo logramos.

A todos mis compañeros y las personas con las que compartí por las risas, los buenos y malos momentos.

A mi familia por estar pendientes de mí.

Sandra Liliana Pedraza Rosas

DEDICATORIA.

A Dios por darme la salud, sabiduría, la fortaleza, y acompañarme para concluir este proceso.

A mi mamá Dámaris Meza por ser un pilar fundamental, quien me brindó todo su apoyo, comprensión y acompañamiento en esta etapa, todo lo realizado fue posible por ella y sus grandes esfuerzos, gracias por tanto.

A toda mi familia por su apoyo, por estar alentándome y pendientes de poder terminar mi carrera, en especial a mis hermanos que me dieron con su ejemplo una motivación para continuar todos los días y a mi abuela Isabel por tantas palabras que me llenaron de fortaleza.

A mis amigos por ayudarme de una u otra forma a realizar este proyecto por su ayuda, consejos, preocupación y apoyo incondicional quienes en muchos aspectos fueron una guarida para mí.

A Matilde Blanco por abrirme las puertas de su casa y brindar todo el apoyo, paciencia, por toda su amabilidad y generosidad.

A mi compañera de proyecto por estar siempre brindando su apoyo, disposición y paciencia en todo momento.

Al profesor Diego Villegas por estar al pendiente de nuestro proceso, por siempre abrir un espacio para recibirnos y tener la mejor disposición para orientarnos.

Sergio Andrés Toloza Meza

AGRADECIMIENTOS

Los autores ofrecen un especial agradecimiento a las siguientes personas que de una u otra forma contribuyeron con el desarrollo de este proyecto

A nuestro director de proyecto Diego Fernando Villegas Bermúdez, Ing. Mecánico por su interés, colaboración y aportes a este proyecto.

A Jaime Alberto Cadena Técnico de soporte académico del laboratorio de Caracterización de Materiales de Construcción por la colaboración en la realización de los ensayos de tracción y el aporte de datos requeridos para el desarrollo de este proyecto

A Mario Alfonso Navarrete Técnico de soporte académico del laboratorio de Procesos de Moldeo de la escuela de metalúrgica por facilitarnos un lugar adecuado para la fabricación del material

Al señor Adalberto Polo Peña Técnico de sistemas de refrigeración y aire acondicionado por su colaboración en el préstamo de herramientas para realizar el proceso de infusión.

A los demás docentes que contribuyeron en nuestra formación como ingenieros mecánicos con sus conocimientos y consejos en las diferentes áreas.

A nuestros compañeros de carrera profesional por el acompañamiento y apoyo durante este proceso de formación.

CONTENIDO

INTRODUCCION.....	19
1. FORMULACION DEL PROBLEMA	21
1.1. IDENTIFICACIÓN DEL PROBLEMA.....	21
1.2 .JUSTIFICACION PARA SOLUCIONAR EL PROBLEMA.....	23
1.3. OBJETIVOS DEL TRABAJO DE GRADO.....	25
1.3.1 Objetivo general:.....	25
1.3.1. Objetivos específicos:	25
2. MARCO TEORICO	26
2.1. MATERIALES COMPUESTOS	26
2.2. LOS MATERIALES COMPUESTOS COMPARADOS CON LOS MATERIALES CONVENCIONALES	27
2.3. MATRICES EN MATERIALES COMPUESTOS	28
2.4. LOS POLÍMEROS	28
2.5. FUNCIONES DE LA MATRIZ POLIMERICA EN EL MATERIAL COMPUESTO	28
2.6. RESINAS.....	29
2.6.1 Resinas epoxi:	30
2.7. FIBRAS PARA MATERIALES COMPUESTOS.....	32
2.7.1 Fibra de carbono:.....	34
2.7.2 Clasificación de la fibra de carbono	35
2.7.3 Proceso de obtención	37
2.7.4 Tejidos de fibra de carbono:.....	38
2.8. PROPIEDADES DE LOS COMPUESTOS DE MATRIZ POLIMERICA REFORZADOS CON FIBRAS.....	40
2.9. ENSAYO DE TRACCION.....	41
2.9.1 Probeta de ensayo.....	42
2.10. GRAFICA ESFUERZO CONTRA DEFORMACIÓN INGENIERIL	42
2.11. GRAFICAS TENSION DEFORMACION DE MATERIALES COMPUESTOS	43
2.12. ESFUERZO INGENIERIL:	45
2.13. DEFORMACIÓN INGENIERIL:	45
2.14. MÓDULO DE ELASTICIDAD:	46

2.15. LIMITE ELÁSTICO (PUNTO DE FLUENCIA):.....	46
3. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL	47
3.1. METODOLOGIA EXPERIMENTAL	47
3.2. FLUJOGRAMA EXPERIMENTAL	47
3.3. MATERIALES:	47
3.4. PROCESO DE FABRICACIÓN DEL MATERIAL COMPUESTO.....	49
3.4.1. CARACTERISTICAS DEL TEJIDO	49
3.4.2 MÉTODO DE INFUSIÓN DE RESINA:	52
3.5. ADECUACIÓN DE LA MUESTRA.....	61
3.6. PROCEDIMIENTO DEL ENSAYO DE TRACCION.....	63
4. RESULTADOS.....	66
4.1. TEJIDO CUATRIAXIAL.....	66
4.2. TEJIDO PLANO	79
4.3. ANÁLISIS DEL TEJIDO CUATRIAXIAL.....	93
4.4. ANÁLISIS DEL TEJIDO PLANO.....	95
4.5. ANALISIS COMPARATIVO DEL COMPORTAMIENTO DE LOS TEJIDOS.....	96
5. CONCLUSIONES	101
6. RECOMENDACIONES	103
BIBILOGRAFIA.....	105

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Microscopía electrónica de barrido (SEM) de una fibra de carbono	34
Figura 2. Comparativa de los diferentes tipos de fibras clasificadas en función de sus propiedades mecánicas.....	37
Figura 3. Tejido plano	39
Figura 4. Tejido cruzado	39
Figura 5. Tejido satín	40
Figura 6. Tejido Tri-axial	40
Figura 7. Esfuerzo contra deformacion ingenieril.....	43
Figura 8. Gráfica tension-deformacion para materiales compuestos.....	44
Figura 9. Gráfica tension-deformacion para materiales compuestos.....	45
Figura 10. Medidas del tejido final	49
Figura 11. Ubicación de la trama en el marco	50
Figura 12. Forma en que se tejen trama y urdimbre	51
Figura 13. Ubicación del sesgo en el tejido	51
Figura 14. ubicación del sesgo en el tejido	52
Figura 15. Aplicación desmoldante (PVA).	53
Figura 16. Ubicación del tejido de carbono en el molde.	54
Figura 17. Ubicación del peel-ply (tejido antiadherente).....	55
Figura 18. Ubicación de la malla de transferencia.	55
Figura 19. Ubicación de la espiral de transferencia.	56
Figura 20. Ubicación del plastico de vacio.....	57
Figura 21. Trampa de resina.....	58
Figura 22. Prensa en C.....	58
Figura 23. Bomba de vacio.	59
Figura 24. Mezcla de resina-endurecedor.	60
Figura 25. Sentidos de angulos de las probetas	61
Figura 26. Medidas probeta 90°	61
Figura 27. Medidas probeta 45° y 30°.....	62

Figura 28. Medidas probeta 90°.....	62
Figura 29. Probeta final.....	63
Figura 30. Máquina de ensayos MTS 810 (Material Testing Systems).....	64
Figura 31. Probetas ensayadas	65
Figura 32. Interfaz MTS 810.	65
Figura 33. Datos de deformación para el tejido cuatriaxial a 0°.....	67
Figura 34. Datos de esfuerzo para el tejido cuatriaxial a 0°.....	67
Figura 35. Datos del módulo de elasticidad para el tejido cuatriaxial a 0°.....	68
Figura 36. Datos del límite elástico para el tejido cuatriaxial a 0°.....	68
Figura 37. Datos de la deformación para el tejido cuatriaxial a 30 °.....	70
Figura 38. Datos del esfuerzo para el tejido cuatriaxial a 30°.....	70
Figura 39. Datos del módulo de elasticidad para el tejido cuatriaxial a 30°.....	71
Figura 40. Datos del límite elástico para el tejido cuatriaxial a 30°.....	71
Figura 41. Datos de deformación para el tejido cuatriaxial a 45°.....	73
Figura 42. Datos de esfuerzo para el tejido cuatriaxial a 45°.....	74
Figura 43. Datos del módulo de elasticidad para el tejido cuatriaxial a 45°.....	74
Figura 44. Datos del límite elástico para el tejido cuatriaxial a 45°.....	75
Figura 45. Datos de deformación para el tejido cuatriaxial a 90°.....	76
Figura 46. Datos de esfuerzo para el tejido cuatriaxial a 90°.....	77
Figura 47. Datos de módulo de elasticidad para el tejido cuatriaxial a 90°.....	77
Figura 48. Datos de límite elástico para el tejido cuatriaxial a 90°.....	78
Figura 49. Datos de deformación para el tejido plano a 0°.....	79
Figura 50. Datos de esfuerzo para el tejido plano a 0°.....	80
Figura 51. Datos del módulo de elasticidad para el tejido plano a 0°.....	80
Figura 52. Datos del límite elástico para el tejido plano a 0°.....	81
Figura 53. Datos de deformación para el tejido plano a 45°.....	82
Figura 54. Datos de esfuerzo para el tejido plano a 45°.....	83
Figura 55. Datos del módulo de elasticidad para el tejido plano a 45°.....	83
Figura 56. Datos del límite elástico para el tejido plano a 45°.....	84
Figura 57. Datos de deformación para el tejido plano a 90°.....	85

Figura 58. Datos de esfuerzo para el tejido plano a 90° .	86
Figura 59. Datos del módulo de elasticidad para el tejido plano a 90° .	86
Figura 60. Datos del límite elástico para el tejido plano a 90° .	87
Figura 61. Curvas esfuerzo-deformación diferentes orientaciones tejido cuatriaxial	89
Figura 62. Contraste del esfuerzo a diferentes orientaciones en el tejido cuatriaxial.	89
Figura 63. Contraste del módulo de elasticidad en diferentes orientaciones en el tejido cuatiraxial	90
Figura 64. Contraste del límite elástico en diferentes orientaciones en el tejido cuatiraxial	90
Figura 65. Contraste del esfuerzo diferentes orientaciones en el tejido plano	91
Figura 66. Contraste del módulo de elasticidad diferentes orientaciones en el tejido plano	91
Figura 67. Comportamiento del límite elástico en el tejido plano.	92
Figura 68. Gráfica comparativa del esfuerzo de los tejidos.	96
Figura 69. Gráfica comparativa del módulo de elasticidad de los tejidos.	97
Figura 70. Gráfica comparativa del Límite elástico de los tejidos.	98
Figura 71. Gráfica comparativa del esfuerzo en la dirección sin fibra.	99
Figura 72. Gráfica comparativa del módulo de elasticidad en la dirección sin fibra.	99
Figura 73. Gráfica comparativa del límite elástico en la dirección sin fibra.	100

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Materias primas que componen un material compuesto.....	26
Tabla 2. Propiedades mecánicas para las resinas epoxi.	32
Tabla 3. Clasificación de las fibras según su origen	33
Tabla 4. Propiedades de los hilos usados como refuerzo en materiales compuestos.....	33
Tabla 5. Clasificación de las fibras de carbono según sus propiedades mecánicas.	36
Tabla 6. Geometría recomendada para la probeta a tensión.....	42
Tabla 7. Datos del ensayo a tensión para el tejido cuatriaxial a 0°.....	66
Tabla 8. Resultados del ensayo a tensión para el tejido cuatriaxial a 0°.....	69
Tabla 9. Datos del ensayo a tensión para el tejido cuatriaxial a 30°.....	69
Tabla 10. Resultados del ensayo a tensión para el tejido cuatriaxial a 30°.....	72
Tabla 11. Datos del ensayo a tensión para el tejido cuatriaxial a 45°.....	73
Tabla 12. Resultados del ensayo a tensión para el tejido cuatriaxial a 45°.....	75
Tabla 13. Datos del ensayo a tensión para el tejido cuatriaxial a 90°.....	76
Tabla 14. Resultados del ensayo a tensión para el tejido cuatriaxial a 90°.....	78
Tabla 15. Datos del ensayo a tensión para el tejido plano a 0°.....	79
Tabla 16. Resultados del ensayo a tensión para el tejido plano a 0°.....	81
Tabla 17. Datos del ensayo a tensión para el tejido plano a 45°.....	82
Tabla 18. Resultados del ensayo a tensión para el tejido plano a 45°.....	84
Tabla 19. Datos del ensayo a tensión para el tejido plano a 90°.....	85
Tabla 20. Resultados del ensayo a tensión para el tejido plano a 90°.....	87
Tabla 21. Resultados del ensayo de tensión.....	92

LISTA DE ANEXOS

Estos anexos se encuentran en la carpeta adjunta.

ANEXO A. Curvas fuerza axial- desplazamiento axial tejido cuatriaxial.

ANEXO B. Curvas esfuerzo- deformación tejido cuatriaxial.

ANEXO C. Determinación del límite elástico tejido cuatriaxial.

ANEXO D. Curvas fuerza axial- desplazamiento axial tejido plano.

ANEXO E. Curvas fuerza esfuerzo- deformación tejido plano.

ANEXO F. Determinación el límite elástico tejido cuatriaxial.

ANEXO G. Ecuaciones.

RESUMEN

TITULO: ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO MECÁNICO A TENSIÓN DE UN MATERIAL COMPUESTO CON MATRIZ POLIMÉRICA DE RESINA EPOXI REFORZADO CON FIBRAS DE CARBONO DE ALTA RESISTENCIA CON UN TEJIDO CUATRIAXIAL.*

AUTOR: Sandra Liliana Pedraza Rosas, Sergio Andrés Toloza Meza.

PALABRAS CLAVE: Material compuesto, Matriz polimérica, cuatriaxial, tensión.**

DESCRIPCION: Durante los últimos años se ha presentado un gran crecimiento en el estudio y análisis de nuevos materiales, tales como los denominados materiales compuestos, principalmente para aplicaciones espaciales, subacuáticas y en la industria de medios de transporte, las cuales requieren materiales ligeros con exigentes prestaciones mecánicas. La presente investigación tiene como finalidad estudiar el comportamiento mecánico a tensión del material compuesto de matriz polimérica de resina epoxi reforzada con un tejido cuatriaxial de fibras de carbono determinando propiedades como esfuerzo último de rotura, límite elástico y módulo de elasticidad basados en la norma ASTM D3039/D3039M-14.

Se ensayaron veinte probetas en total, divididas en grupos de cinco probetas con diferentes orientaciones (0°, 30°, 45°, 90°), y adicionalmente, fueron ensayadas seis probetas de un tejido plano (el más común en el mercado), dos probetas por orientación (0°, 45° y 90°), con el fin de contrastar el comportamiento de estas frente al tejido propuesto. Se comprobó que las propiedades en los materiales compuestos varían según la dirección en que estén orientadas las fibras, y los resultados mostraron que el tejido cuatriaxial el valor del esfuerzo es menor que el tejido plano solo en la dirección cero (0°) en un 39% al poseer el tejido plano mayor número fibras en esa orientación, mayor en la orientación de noventa (90°) en un 17% y en el caso de cuarenta y cinco el valor es mayor en un 82%. De la misma forma al estudiar las orientaciones donde no tiene fibra, en el tejido plano la dirección en la cual no se tienen fibras es la de cuarenta y cinco (45°) y en el tejido propuesto es la de treinta grados (30°) y se puede observar que el en este caso el comportamiento del tejido cuatriaxial es mayor el valor del esfuerzo en un 66%.

* Proyecto de Grado.

** Facultad de Ingenierías Físico-mecánicas, Escuela de Ingeniería Mecánica, Director: Diego Fernando Villegas Bermúdez

ABSTRACT

TITLE: STUDY OF BEHAVIOR MECHANICAL TENSILE A COMPOSITE WITH POLYMER MATRIX EPOXY RESIN CARBON FIBER REINFORCED HIGH STRENGTH WITH A WOVEN CUATRIAXIAL.*

AUTHOR: Sandra Liliana Pedraza Rosas, Sergio Andrés Toloza Meza.**

KEY WORDS: Composite, polymer matrix, cuatriaxial, tensile.

SUMMARY: In recent years there has been a great growth in the study and analysis of new materials, as so-called composite materials, primarily for space applications, underwater industry and transport, which require lightweight materials with demanding mechanical performance. This research aims to study the mechanical behavior tensile a composite with polymer matrix epoxy resin carbon fiber with a woven cuatriaxial determining properties such as ultimate breaking strength, yield strength and modulus of elasticity based on standard ASTM D3039/D3039M-14.

Twenty specimens were tested in total, divided into groups of five specimens with different orientations (0°, 30°, 45°, 90°), and additionally, six pieces were tested plain weave (the most common on the market), two specimens per orientation (0°, 45° and 90°), in order to contrast the behavior of these against the proposed woven. It was found that the properties in the composites vary the direction in which the fibers are oriented, the results showed that the woven cuatriaxial the stress value is less than the plain weave only in the direction zero (0°), in a 39%, due plain weave has more fibers in that direction, higher in the direction of ninety (90°) in a 17% and in the case of forty five value is greater in a 82%. In the same way as the study of the orientations where no have fiber, in the plain weave the direction in which They not have the fibers is forty-five (45°) and in woven proposed it is the degree thirty (30°) and it can be seen that in this case the behavior of tissue cuatriaxial is the greater value of stress in a 66%.

* Graduation project

** Faculty of Physical Engineering- Mechanical. School of mechanical engineering. Director Diego Fernando Villegas Bermudez, Mechanical engineer.

INTRODUCCION

Durante los últimos años se ha presentado un gran crecimiento en el estudio y análisis de nuevos materiales, entre ellos los materiales compuestos debido a que estos tienen diversas aplicaciones gracias a sus propiedades de mecánicas y por su bajo peso, principalmente en el sector aeroespacial. Por ejemplo el avión de pasajeros más moderno de Boeing, el Boeing 787 y que ha logrado reducir su consumo de combustible en un 20%¹, utiliza el plástico reforzado con fibra de carbono (CFRP, por sus siglas en inglés), desarrollado en Japón para aproximadamente la mitad de sus materiales estructurales (el fuselaje, la cola y las alas). Esto lo convierte en el primer avión de pasajeros que contiene una mayor proporción de CFRP que de aluminio por peso estructural. El CFRP también se utiliza en el MRJ y el Airbus A350, que entró en servicio en 2013² y sigue operando en la actualidad.

El uso de los materiales compuestos otorga diferentes ventajas en comparación con otros materiales principalmente los metales, entre las cuales se puede citar: menor peso, buena resistencia a la fatiga, tienen una fuerza específica y una rigidez específica excelentes y no se oxida, por lo que no es necesario llevar a cabo mantenimiento tan a menudo como con los materiales convencionales³. Esto contribuye a reducir el impacto ambiental y el coste de las compañías aéreas.

A causa de las diversas aplicaciones de los materiales compuestos y que el más usado actualmente en la industria es el conformado por matriz polimérica de resina epoxi y reforzado con fibras de carbono, se hace necesario estudiar el comportamiento de estos materiales y proponer más configuraciones de tejido y ubicación de la fibra de refuerzo con el fin de avanzar aún más en el desarrollo de

¹ Boeing. Reinventa los planes de vuelo y transforma los planes de negocios (s.f). Recuperado de: <<http://www.boeing.es/787>>

² AIKO, H. Desarrollo de materiales compuestos para aeronáutica. (2012). Recuperado de: <<http://www.nippon.com/es/features/c00506/>>

³ AIKO. Óp., cit.

este campo y poder usar estos materiales en otras aplicaciones que sean más comunes aprovechando la ventaja de los mismos. Con el fin de contribuir a las diferentes investigaciones que se han elaborado a los materiales compuestos y especialmente a los formados de matriz polimérica reforzados con fibras. Para ello se sometió un material conformado por matriz polimérica de resina epoxi y reforzado con un tejido de fibra de carbono a un ensayo de tracción hasta llevarlo a la rotura y con esto obtener datos como carga de rotura y desplazamiento axial y con estos determinar las propiedades mecánicas, tales como límite elástico, módulo de elasticidad y esfuerzo último a la tensión para caracterización del mismo.

1. FORMULACION DEL PROBLEMA

1.1. IDENTIFICACIÓN DEL PROBLEMA

En la actualidad en la industria automovilística y la aeronáutica existe la gran necesidad de reducir el peso y aumentar la funcionalidad, es claro que un mayor peso debido a los materiales implica que tanto las aeronaves como los automóviles consuman más combustible. Sumado a esto los materiales más comúnmente usados en estas industrias (metales) se oxidan con el tiempo⁴, por lo que se hace necesario un mantenimiento más frecuente. Estructuras elaboradas con polímeros reforzados con fibras de carbono permiten un ahorro de peso del 20% en comparación con el aluminio. Otras ventajas en comparación con los materiales tradicionales incluyen la alta resistencia a la corrosión, y la resistencia a las cargas de tipo cíclico (fatiga)⁵. Además el uso de este material tiene un adicional de confort puesto que si se utiliza aluminio como material estructural principal, la humedad dentro del avión debe mantenerse a un 10% como máximo. Pero gracias al polímero reforzado con fibra de carbono, la humedad en cabina en el Boeing 787 puede aumentarse hasta casi un 50%⁶.

Los materiales compuestos presentan altas propiedades, como una durabilidad formidable y una alta resistencia específica, que son difíciles de obtener de los materiales tradicionales. Además, permiten la elaboración de complejas formas geométricas e ingeniería de materiales personalizados, especialmente preparados para responder a las demandas de aplicaciones particulares. Estas características útiles han permitido la rápida incorporación de materiales compuestos en una

⁴ AIKO, H. Desarrollo de materiales compuestos para aeronáutica. (2012). Recuperado de: <<http://www.nippon.com/es/features/c00506/>>

⁵ SELIP s.p.a. Informaciones generales sobre los materiales compuestos. (2011). Recuperado de: <<http://es.selip.biz/Informaciones-generales-sobre-los-materiales-compuestos.aspx>>

⁶ AIKO, H. Desarrollo de materiales compuestos para aeronáutica. (2012). Recuperado de: <<http://www.nippon.com/es/features/c00506/>>

amplia gama de sectores, desde los océanos a las exploraciones polares y espaciales a las turbinas eólicas, puentes y a los coches de alto rendimiento⁷.

La mayoría de las tecnologías modernas requiere materiales con una combinación inusual de propiedades, imposible de conseguir con los metales, las cerámicas y los polímeros convencionales. Esta necesidad es muy evidente en aplicaciones espaciales, subacuáticas y en los transportes. Por ejemplo, los ingenieros aeronáuticos solicitan, cada vez más, materiales de baja densidad que sean resistentes y rígidos, y también resistentes al impacto, a la abrasión y a la corrosión. Frecuentemente, los materiales convencionales más resistentes son relativamente densos como es el caso de los metales. Las combinaciones de propiedades de los materiales y la gama de sus valores se han ampliado, y se siguen ampliando, mediante el desarrollo de materiales compuestos por esto se hace necesario el estudio del comportamiento mecánico a tensión de un material compuesto con matriz polimérica y la aplicación de un tejido cuatriaxial con el fin de diversificar y hallar características adicionales a los materiales compuestos de matriz polimérica y de tejidos convencionales.

El desafío actual de los materiales compuestos consiste en dar con las mejores asociaciones de fibra-matriz, proporcionando cada vez materiales con mejores prestaciones para el fin que son concebidos, en la actualidad se encuentran distintos materiales tanto para la fibra como para la matriz, en el presente estudio se seleccionó como matriz la resina epoxi ya que esta presenta uno de los valores más altos de alargamiento a la rotura con un porcentaje de 6-8% comparándolo con las demás resinas que se encuentran en la industria, además de presentar una ventaja al poderse realizar el moldeo a temperatura ambiente hasta 170 [°C]⁸. La fibra a usar en nuestro ensayo es la fibra de carbono puesto que presenta una excelente resistencia a la rotura en tracción y compresión, buena resistencia a la

⁷ SELIP s.p.a. Informaciones generales sobre los materiales compuestos. (2011). Recuperado de: <<http://es.selip.biz/Ventajas.aspx>>

⁸ BESEDNJAK, A. Materiales Compuestos procesos de fabricación de embarcaciones,2005,P.8

humedad⁹, además de la estabilidad dimensional puesto que al lograr conservar su forma podemos tener una probeta de material idónea al someterlo a las cargas de tracción.

Es importante destacar que dependiendo de la orientación de estas fibras, el refuerzo puede ser más fuerte en una dirección determinada o igualmente fuerte en todas las direcciones. Las fibras ofrecen sus mejores propiedades cuando se entretrejen en la dirección de las tensiones, es decir, que en un caso ideal deberían alinearse las direcciones de las fibras con la dirección de la fuerza exterior. Por esta razón, una pequeña pieza puede soportar el impacto de muchas toneladas y deformarse mínimamente, ya que las fuerzas del choque se distribuyen y son amortiguadas por la malla¹⁰. De ahí la importancia en la elección del número y orientación de las fibras que forman el tejido para obtener una rigidez y resistencia, es por esto que se propone un tejido cuatriaxial (usado en las sillas de mimbre) que nos brinde más propiedades en el mayor número de direcciones posibles, además de que los tejidos nos brindan la posibilidad de contar con una sola lamina de refuerzo lo cual reduciría el espesor y por ende el peso del material, por otra parte, entre más hilos contenga un tejido en diferentes orientaciones se puede tener un material compuesto más isotrópico al poder soportar mayor esfuerzo a diferentes ángulos.

1.2. JUSTIFICACION PARA SOLUCIONAR EL PROBLEMA

En la industria se están desarrollando proyectos e investigaciones con materiales compuestos reforzados con fibras para obtener mejores características mecánicas como la resistencia a la tracción y el módulo de elasticidad. Esto se puede lograr usando materiales que presenten una baja densidad, tanto en la matriz como el refuerzo (las fibras). Estas características le permiten a los materiales compuestos

⁹ MATA, F. Utilización de composites de matriz polimérica en la fabricación de automóviles, 2004, p.44 Tomada de: <http://www.tecnicaindustrial.es/tiadmin/numeros/13/40/a40.pdf>

¹⁰ Llano, C. (s.f). Fibra de Carbono, Presente y futuro de un material revolucionario. Revista metal actual, P. 14.

ser empleados como componentes en la industria aeronáutica, aeroespacial, del transporte y militar.

Aunque la fibra de carbono es un material de significativo valor monetario tiene propiedades que son muy útiles, puesto que tiene un módulo de ruptura muy cercano al del acero, siendo en un 75 % más liviano que dicho metal.

No obstante, se pueden distinguir dentro de los distintos tipos de refuerzos de fibra de carbono los laminados que requieren una mayor cantidad de capas pero por ende terminan siendo de gran espesor y más pesados, en contra parte los refuerzos en fibra tejida usan menos capas para alcanzar los espesores deseados haciendo que sean más livianos y sus propiedades mecánicas estén muy cercanas o mejores que en el caso de los laminares.

Para llevar a cabo un análisis de estos materiales es necesario realizar a estos, diferentes pruebas que nos permitan hallar las características de cada material, una de estas es el ensayo a tensión, que nos permite determinar el comportamiento mecánico de un material que es el reflejo de la relación entre su respuesta o deformación ante una fuerza o carga aplicada

Por lo cual se realizará un estudio de tensión a diferentes orientaciones sobre las probetas para estudiar las características más relevantes de materiales compuestos en este caso particular resultantes de una matriz de resina y un refuerzo de fibra tejida de carbono (por sus características de alta resistencia), para presentar un material que puede ser de gran beneficio para la industria.

1.3. OBJETIVOS DEL TRABAJO DE GRADO

1.3.1 Objetivo general: Contribuir con la misión del programa de Ingeniería Mecánica de la Universidad Industrial de Santander de formar ingenieros con alta calidad humana, técnica y científica; mediante el estudio de un material compuesto reforzado con fibra tejida de carbono, con el fin de reconocer propiedades de desempeño que superen a materiales simples o alternativos que favorezcan a la solución apropiada de problemas tecnológicos que requieran materiales con alta resistencia y bajo peso.

1.3.1. Objetivos específicos:

- Estudiar el comportamiento a tensión de un compuesto con matriz polimérica reforzado con fibras de carbono tejidas y compararlo a diferentes ángulos.
- Realizar ensayos a tensión bajo la norma ASTM D3039 sobre placas de material compuesto, siendo muy relevante el diseño de la geometría de la probeta, ángulo de las fibras y su orientación.
- Determinar las propiedades mecánicas obtenidas del ensayo de tracción tales como límite elástico, módulo de elasticidad y esfuerzo último a la tensión para caracterización del mismo.

2. MARCO TEORICO

2.1. MATERIALES COMPUESTOS

Los materiales compuestos constan fundamentalmente de una matriz o fase continua, plástica, metálica o cerámica, y un relleno o refuerzo, compuesto por partículas de pequeñas dimensiones o fibras de elevada relación longitud/diámetro. Es decir, la fabricación de materiales compuestos está relacionada con tres elementos básicos: matriz, refuerzo e interface. De esta manera, la combinación de dos fases bien diferenciadas en un mismo material ha posibilitado que las ventajas inherentes a ambos componentes se conjuguen para dar lugar a un material con nuevas propiedades.¹¹

A continuación se mostraran diferentes materias primas que pueden ser componentes de un material compuesto.

Tabla 1. Materias primas que componen un material compuesto.

FIBRAS	Fibras Cerámicas (Carburo de silicio, Alúmina)
	Fibras Metálicas
	Fibras Inorgánicas (Carbono, Vidrio, Boro)
	Fibras Orgánicas (Aramida, Polietileno)
MATRICES	Matrices Inorgánicas (Cemento, Geopolímeros, Yeso)
	Matrices Termoestables (Epoxi, Viniléster, Poliéster, Fenólica, Esteres, Cianato, Bismaleimidas, Poliimididas, Polieteramida)
	Matrices Termoplásticas (ABS, Polipropileno, Policarbonato, Acetato, PTB, Polieterimida, PET, Nilón, Poliamida, PEEK, PAI, PAS)
NÚCLEOS	Nidos de abeja (Aluminio, Nomex, Polipropileno)
	Espumas (Poliuretano, Poliestireno, PVC)
	Sándwich Tejido 3D, madera de balsa
ADHESIVOS	Epoxi, Poliuretano, Acrílicos
RECUBRIMIENTOS	Cerámicos, Fenólicos, Epoxi+ Arena, Intumescentes, Mats

Fuente: MIRAVETE, Antonio. Materiales compuestos. Barcelona, Reverté, 2007.1P.

¹¹ BAYER, Jordi. Valoración de materiales compuestos de HDPE reforzados con fibras de agave sisalana. Aproximación a un paradigma de geometría fractal para las fibras. (Tesis Doctoral). Gerona. Universidad de Gerona, 2013. P.9.

La matriz polimérica confiere al material compuesto, entre otros, La gran ventaja de su bajo peso. El objetivo de la matriz es proteger el relleno o refuerzo, y transferirle las tensiones externas a las que se ve sometida. Además, la matriz confiere ductilidad al material compuesto, mientras que las fibras de refuerzo son las encargadas de soportar las tensiones a las que se ve sometido el material.

En los materiales compuestos, además de la matriz y las fibras cabe destacar la interfase, parte de la matriz que rodea la superficie de las fibras y que presenta propiedades locales diferentes al resto de la matriz. Su tamaño y tipo varía dependiendo de la naturaleza y superficie de las fibras y de la matriz empleada.

2.2. LOS MATERIALES COMPUESTOS COMPARADOS CON LOS MATERIALES CONVENCIONALES

Ha habido un rápido crecimiento en el uso de materiales reforzados con fibras en aplicaciones ingenieriles en los últimos años. El rápido crecimiento se ha alcanzado principalmente por el reemplazo de los materiales tradicionales, en principio los metales. Esto sugiere que en algunos aspectos, los materiales compuestos tienen propiedades superiores. Las ventajas de los materiales compuestos aparecen cuando se consideran el módulo de elasticidad por unidad de peso (módulo específico) y la resistencia por unidad de peso (resistencia específica). El mayor módulo específico y resistencia específica de los materiales compuestos significa que el peso de los componentes puede reducirse. Este es un factor de gran importancia en las piezas móviles, especialmente en todas las formas de transporte donde las reducciones de peso dan como resultado un mayor rendimiento y ahorro de energía.¹²

¹² HULL, Derek. Materiales Compuestos. Barcelona, Reverté, 1987. P.3-4.

2.3. MATRICES EN MATERIALES COMPUESTOS

Existen materiales compuestos de matrices metálicas, de matrices cerámicas y de matrices poliméricas. De acuerdo con esta clasificación basada en las matrices, podemos encontrar en cada grupo numerosos materiales que puedan ser utilizados como elemento aglutinante.¹³

A nivel industrial principalmente se emplean matrices poliméricas, de los dos tipos de polímeros: termoplásticos y termoestables de forma general las resinas termoestables permiten obtener una estructura con forma fija permanente, no se pueden reciclar, no se funden y cuando son sometidas a altas temperaturas se descomponen y degradan. El poliéster, viniléster y epoxi son ejemplos de este tipo de resinas.¹⁴

2.4. LOS POLÍMEROS

Químicamente se define como un material constituido por grandes moléculas, las cuales se forman por la secuencia repetitiva de moléculas pequeñas o agrupaciones de átomos simples enlazadas unas a otras por enlaces primarios (usualmente del tipo de covalentes simples). Estas unidades estructurales sencillas (moléculas pequeñas) que dan origen a los polímeros reciben el nombre de monómeros.¹⁵

2.5. FUNCIONES DE LA MATRIZ POLIMERICA EN EL MATERIAL COMPUESTO

Las matrices constituyen, junto con los elementos de refuerzo, los dos elementos básicos e indispensables del material compuesto. Entre las funciones principales que cumplen las matrices, podemos destacar las siguientes:

¹³ BESSEDNJAK, Alejandro. Materiales compuestos procesos de fabricación de embarcaciones. Barcelona, 2005, P.19

¹⁴ GARCÍA, Shirley. Análisis de laminados de materiales compuestos con precarga en su plano y sometidos a impacto. (Tesis Doctoral). Madrid. Universidad Carlos III de Madrid. Departamento de mecánica de medios continuos y teoría de estructuras, 2007. P.15.

¹⁵ BESSEDNJAK. Óp., cit.,P.19

- Transmiten los esfuerzos a las fibras de refuerzo a través de la interfaz (frontera entre fibra y matriz).
- Protegen a las fibras de los esfuerzos de compresión.
- Unen las diferentes fibras de refuerzo por medio de fuerzas adhesivas.
- Aseguran a las fibras de refuerzo de acuerdo con el orden preestablecido.
- Resguardan a las fibras de los ataques externos como humedad, ataque químico, etc.¹⁶

2.6. RESINAS

El tipo de resina más importante utilizado en materiales compuestos son las resinas líquidas termoestables, algunas veces llamadas químico-estables. Existen diferentes versiones químicas, estas a su vez pueden ser clasificadas en un segundo estado según la conveniencia, sobre todo con las resinas avanzadas. También se tienen en cuenta las resinas termoplásticas, éstas, por definición, son sólidas a temperatura ambiente y se debe aumentar su temperatura hasta el estado líquido cuando se van a utilizar en cualquier proceso. Aparte del cambio de estado de sólido a líquido y viceversa, no sufren cambio químico y el ciclo de fundición-solidificación se puede repetir indefinidamente.

Algunas resinas termoestables, especialmente aquellas con las mejores prestaciones a elevadas temperaturas, son sólidas o virtualmente sólidas a temperatura ambiente en su estado antes del curado. Estas resinas deben ser primero convertidas a líquido mediante calentamiento o mediante el uso de algún solvente de manera que pueda ser impregnada y se pueda consolidar el refuerzo (fibras) para que posteriormente se cure por calentamiento a temperatura más elevada.¹⁷

¹⁶ *Ibid.*, p. 24

¹⁷ MIRAVETE, Antonio. Materiales compuestos I. Barcelona, Reverté, 2007, P.24

2.6.1 Resinas epoxi: Las resinas epoxi son las resinas más utilizadas en los materiales compuestos de alta calidad, fundamentalmente por que poseen mejores propiedades físicas y mecánicas que las resinas de poliéster y viniléster. Si sumamos a esto su buena capacidad de adhesión sobre una gran cantidad de materiales de refuerzo, se obtienen como resultado laminados con un elevado contenido de fibra.

Su formulación se basa en los epóxidos (generalmente bisfenol A) que curan por las reacciones de poliadición al reaccionar con agentes de curado (iniciadores) polifuncionales como fenoles, aminas o poliácidos la reacción se controla mediante el uso de catalizadores y aceleradores. Las resinas epoxi son un compleja mezcla de resinas, agentes de curado, aceleradores, catalizadores modificadores termoplásticos y otros aditivos.

Las características finales de la resina dependerán del tipo de epóxido y del agente de reticulación (resistencia térmica, modo de endurecimiento y ductilidad). El proceso de curado es similar al de las resinas de poliéster y viniléster. La adición del endurecedor debe hacerse según las recomendaciones del fabricante y los porcentajes del mismo, por lo general suelen ser fijos. Una falta de endurecedor provocara una reacción incompleta, y una adición en exceso provocará una reacción diferente, con la modificación del peso molecular de la resina, y por lo tanto unas propiedades finales inferiores.

Para que la mayoría de las resinas epoxi curen completamente es necesario la aportación de calor externo, a través de un proceso de curado o postcurado. Si se desea obtener buenas propiedades a temperatura ambiente, deben utilizarse agentes catalíticos específicos a tal fin.

Poseen las mejores propiedades mecánicas, una mayor resistencia térmica y una buena resistencia a la abrasión; baja contracción durante el curado (0-1%), buenas propiedades eléctricas y térmicas, y buena resistencia al ataque de agentes químicos. Las propiedades mecánicas pueden modificarse por adición de sustancias inertes. Y la contracción puede anularse mediante aditivos o con una adecuada combinación con la fibra de refuerzo. También se pueden conseguir elongaciones superiores a las del poliéster mediante la utilización de aditivos. Poseen una baja absorción de agua, que las hace idóneas para estructuras marinas.

La viscosidad de las resinas epoxi es muy elevada, hecho que dificulta su aplicación y procesado. Se pueden utilizar diluyentes, pero siempre siendo recomendación del fabricante.

La variedad de las resinas epoxi presentes en el mercado es muy amplia, y su elección se fundamenta en el tipo de propiedades finales deseadas, la técnica de procesado y el tipo de aplicación. Estas variedades se obtienen por diferentes combinaciones de los endurecedores (determinado por el fabricante y para cada resina en particular), derivando así en tiempos de gel y propiedades finales particulares.¹⁸

Las resinas epoxi se pueden clasificar en tres grupos de acuerdo con su estructura química: TGMDA (dianilina tetraglicidil metileno), DGEBA (diglicidil éter de bisfenol A) y fenolformaldehido epoxi novolaca.¹⁹

A continuación se mostrara una tabla con las propiedades mecánicas para las resinas epoxi más utilizadas.

¹⁸ BESSEDNJAK. Op, cit.,P.31-32

¹⁹ GARCIA. Op, cit.,P.23

Tabla 2. Propiedades mecánicas para las resinas epoxi.

TIPO DE RESINA EPOXI	PROPIEDAD CARACTERISTICA
TGMDA	Alto módulo de elasticidad Baja deformación a la rotura Alta temperatura de servicio
DGEBA	Menores propiedades mecánicas que la TGMDA Mayor deformación a la rotura Menor absorción de agua
Fenolformaldehido epoxi novolaca	Menor deformación a la rotura

Fuente: GARCIA, Shirley. Análisis de laminados de materiales compuestos con precarga en su plano y sometidos a impacto. Tesis doctoral. Leganés, España. Universidad Carlos III de Madrid, 2007. P 17

2.7. FIBRAS PARA MATERIALES COMPUESTOS

La fibra es el componente de refuerzo del material compuesto. Aporta resistencia mecánica, rigidez y dureza y va a ser determinante para obtener las principales propiedades mecánicas. Las características más sobresalientes de las fibras de los materiales compuestos son su resistencia a la tracción específica y su elevado modulo específico.

Los tipos de fibras de refuerzo se pueden clasificar según su origen. Las fibras pueden ser de origen mineral y de origen orgánico.²⁰

²⁰ MIRAVETE. Op, cit.P. 124-125

Tabla 3. Clasificación de las fibras según su origen

FIBRAS DE ORIGEN MINERAL	Fibras cerámicas (Carburo de Silicio, Armida)
	Fibras Metálicas
	Fibras de origen inorgánico (Carbono, Vidrio, Boro)
FIBRAS DE ORIGEN ORGANICO	Aramida, Polietileno

Fuente: MIRAVETE, Antonio. Materiales compuestos. Barcelona, Reverté, 2007.1P.

Actualmente se usan tres tipos principales de fibras sintéticas para reforzar materiales plásticos: vidrio, aramida y carbono. El vidrio es, por amplio margen, la fibra de refuerzo que se usa más y a menudo la de menor costo. Las fibras de aramida y de carbono tienen alta resistencia y baja densidad, por lo cual se usan en muchas aplicaciones, sobre todo aeroespaciales, a pesar de tener un costo más alto.

A continuación se mostraran algunas características comparativas de los hilos usados como refuerzo en los materiales compuestos.

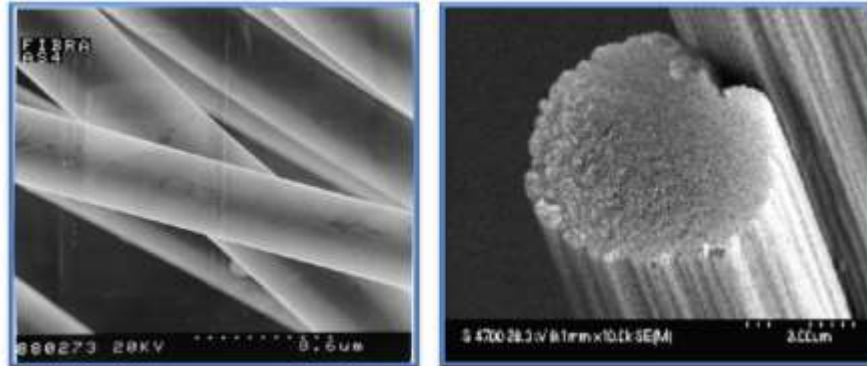
Tabla 4. Propiedades de los hilos usados como refuerzo en materiales compuestos.

PROPIEDAD	VIDRIO	CARBONO	ARAMIDA
Resistencia a la tensión, Ksi (MPa)	450 (3100)	500 (3450)	525 (3600)
Módulo de tensión, Msi (GPa)	11.0 (76)	33 (228)	19 (131)
Elongación en el punto de ruptura (%)	4.5	1.6	2.8
Densidad	2.54	1.8	1.44

Fuente: SMITH, William. Fundamentos de la ciencia e ingeniería de materiales. México, McGraw-Hill, 2006.653 P.

2.7.1 Fibra de carbono: La fibra de carbono está compuesta por muchas fibras que se presentan en forma de hebras o hilos. Existen muchas clases de fibra de carbono con propiedades diversas, adaptadas a distintas aplicaciones.

Figura 1. Microscopía electrónica de barrido (SEM) de una fibra de carbono



Fuente: SANCHEZ, Laura. "Análisis mecánico y fisicoquímico de un material compuesto de matriz termoestable y refuerzo de fibra de carbono: comparativa de propiedades del material curado fuera y dentro de autoclave. Proyecto fin de carrera. Leganés, España. Universidad Carlos III de Madrid, 2011. P 26

La fibra de carbono es muy utilizada en aplicaciones estructurales donde se requiere alta resistencia a la fatiga o en aquellas situaciones en la que es necesario un buen comportamiento mecánico bajo condiciones estáticas.

Entre las principales características que presenta la fibra de carbono se encuentran:

- Baja densidad, lo que implica que sus propiedades mecánicas específicas por unidad de peso sean muy elevadas.
- Estabilidad dimensional, pues presenta un bajo coeficiente de dilatación térmica y alta resistencia a la abrasión.
- Estabilidad química y biológica.
- Alta resistencia a la fatiga.
- Elevada resistencia a la corrosión y alta conductividad eléctrica.²¹

²¹ GARCIA. Óp., cit.,P.20

Aunque se ha investigado una gran cantidad de materiales como precursores de la fibra de carbono, el poliacrilonitrilo (PAN), una mesofase del alquitrán y la celulosa (en orden decreciente de uso actual), son los tres precursores que actualmente se utilizan para fabricar las fibras de carbono. Las fibras que están basadas en el PAN tienen diámetros que oscilan entre las 5 y 7 mm, y aquellas cuyo precursor es el alquitrán están entre las 10 y 12 [mm].

El poliacrilonitrilo es el precursor más común utilizado actualmente para obtener fibras de carbono, y generalmente no es PAN al 100%. Normalmente, es un copolímero que contiene metil acrilato, metil metacrilato, vinil acetato, ácido itacónico, o cloruro de vinilo. El PAN (o su copolímero) es hilado utilizando la técnica de hilado húmedo (la técnica de hilado fundido se ha desarrollado también para el hilado del PAN).²²

2.7.2 Clasificación de la fibra de carbono Las fibras de carbono se pueden clasificar atendiendo a diferentes criterios como son sus propiedades mecánicas, la temperatura del tratamiento térmico final al que se les somete o el tamaño del haz de filamentos o estopa.

En la siguiente tabla se muestra la clasificación de las fibras de carbono según sus propiedades mecánicas.

²² MIRAVETE. Óp., cit.,P.

Tabla 5. Clasificación de las fibras de carbono según sus propiedades mecánicas.

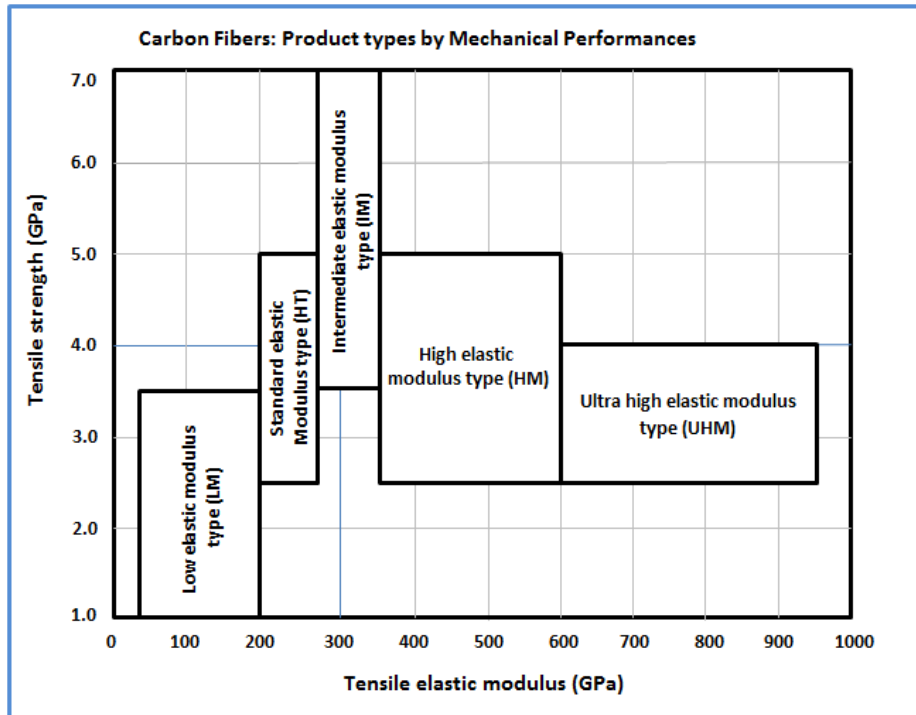
	UHM Ultra alto módulo elástico	HM Alto módulo elástico	IM Módulo elástico intermedio	Módulo elástico estándar y alta resistencia	LM Bajo módulo elástico
Módulo elástico a tracción	> 600 [GPa]	> 350 [GPa]	280-350 [GPa]	200-280 [GPa]	50-200 [GPa]
Resistencia a la tracción	> 2500 [MPa]	> 2500 [MPa]	> 3500 [MPa]	> 2500 [MPa]	> 3500 [MPa]

Fuente: SANCHEZ, Laura. "Análisis mecánico y fisicoquímico de un material compuesto de matriz termoestable y refuerzo de fibra de carbono: comparativa de propiedades del material curado fuera y dentro de autoclave. Proyecto fin de carrera. Leganés, España. Universidad Carlos III de Madrid, 2011. P 30'

Existe una relación entre la resistencia a tracción (esfuerzo al que es sometido un cuerpo por la aplicación de dos fuerzas en sentido opuesto) y el módulo elástico (medida que relaciona la tensión y la deformación de un cuerpo). En el gráfico que se muestra en la siguiente figura se puede ver una comparativa de los diferentes tipos de fibras clasificadas en función de sus propiedades mecánicas, atendiendo a los datos expuestos en la tabla anterior.²³

²³ SANCHEZ. Óp., cit.,P.35

Figura 2. Comparativa de los diferentes tipos de fibras clasificadas en función de sus propiedades mecánicas



Fuente: SANCHEZ, Laura. "Análisis mecánico y fisicoquímico de un material compuesto de matriz termoestable y refuerzo de fibra de carbono: comparativa de propiedades del material curado fuera y dentro de autoclave. Proyecto fin de carrera. Leganés, España. Universidad Carlos III de Madrid, 2011. P 30

2.7.3 Proceso de obtención: En todos los procesos de obtención de la fibra de carbono se produce una oxidación controlada y carbonización (proceso de pirolisis controlada en varias fases) de las fibras precursoras a elevadas temperaturas. En función de la temperatura final alcanzada durante el proceso (desde 1200 °C hasta 3000 °C), se obtienen fibras de mayor resistencia y módulo y modulo elástico más elevado.

Las fases del proceso para la obtención de una fibra de carbono procedente de fibras de poliacrilonitrilo son las siguientes:

Estabilización y oxidación: las fibras son estiradas para alinear sus redes internamente; luego se produce un calentamiento en atmosfera oxidante desde temperaturas de 200°C hasta 250 °C manteniendo la tensión sobre las fibras.

Carbonización: calentamiento en atmosfera inerte a temperaturas de hasta 1500°C. Se eliminan fundamentalmente el H y N de la fibra original, transformándose en fibras de carbono.

Grafitación: calentamiento en atmósfera no oxidante hasta 2500°C - 3000 °C, para obtener un módulo de elasticidad mayor, a expensas de una alta resistencia a la tracción.

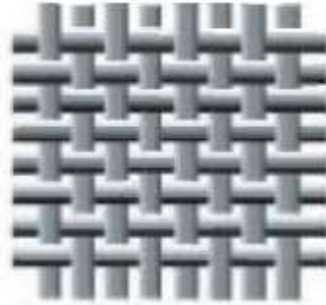
Los productos primarios resultantes del proceso anterior son fibras de filamentos continuos con un contenido de carbono de entre 92 y el 100%, según sean las propiedades que se persigan. Todos los demás productos por ejemplo fibras de filamentos discontinuos, se obtienen de operaciones secundarias.

Las fibras de carbono deben ser sometidas a un proceso de preparación superficial para poder ser utilizadas y mejorar la adhesión con las diferentes matrices.

2.7.4 Tejidos de fibra de carbono: Es importante destacar que dependiendo de la orientación del tejido, la tela de carbono puede ser más fuerte en una dirección determinada o igualmente fuerte en todas las direcciones. Algunos de los tejidos más comunes que se encuentran en el mercado son los siguientes:

Tejido plano: Es aquel en el que cada hilado longitudinal y transversal pasa por encima de un hilo y por debajo del próximo.

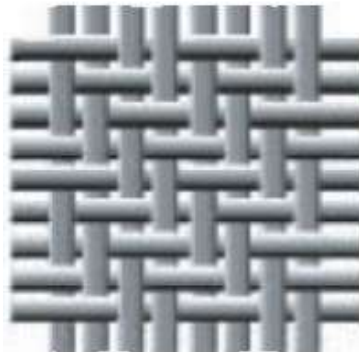
Figura 3. Tejido plano



Fuente: LLANO, Carolina. Fibra de Carbono, Presente y futuro de un material revolucionario. Metal actual. (11).abril 2009. P 13-14[citado en 26 de enero de 2016]
Disponible en internet <<http://www.metalactual.com/revista/11/materialescarbono.pdf>>

Tejido cruzado o twill: En un tejido cruzado el número de hilados longitudinales que pueden pasar sobre los transversales (y recíprocamente) pueden variarse, dando distintas construcciones de tejidos cruzados.

Figura 4. Tejido cruzado

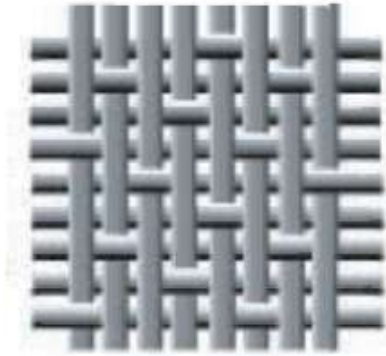


Fuente: Llano, *op. cit.* (2009). P.13 Tomada de:
<<http://www.metalactual.com/revista/11/materialescarbono.pdf>>

Tejido satinado o satín: en las telas del tejido satinado el entrelazado es similar al del cruzado, aunque el número de hilados longitudinales y transversales que pasan recíprocamente por encima y por debajo, antes del entrelazado, es mayor. Por lo tanto, un lado del tejido se construye principalmente con fibras longitudinales, y el otro lado, con transversales.²⁴

²⁴ Llano, C, *op. cit.*, P. 13-14

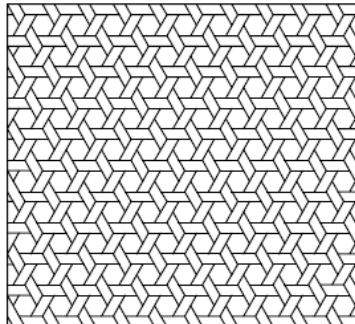
Figura 5. Tejido satín



Fuente: Llano, *óp. cit.* (2009). P.13 Tomada de:
<<http://www.metalactual.com/revista/11/materialescarbono.pdf>>

Tejido Tri-axial: Telas tejidas compuestas por un hilo de trama y urdimbre de dos hilos de $\pm 60^\circ$.

Figura 6. Tejido Tri-axial



Fuente: Villegas, D. Mechanical behavior of a p/m aluminum matrix Composite reinforced with woven carbon fiber (2003).P.13.

2.8. PROPIEDADES DE LOS COMPUESTOS DE MATRIZ POLIMERICA REFORZADOS CON FIBRAS

Numerosas características atractivas distinguen a los plásticos reforzados con fibra como materiales de ingeniería. Las más notables son 1) alta relación de resistencia al peso, 2) altas relaciones de módulo al peso y 3) baja gravedad específica. Un polímero reforzado con fibras típico pesa, cuando mucho, una quinta parte del acero; además, el módulo de resistencia es comparable en la dirección de la fibra. Otras propiedades y características de los plásticos

reforzados con fibra incluyen 4) buena resistencia a la fatiga; 5) buena resistencia a la corrosión, aunque debe hacerse notar que los polímeros son solubles en varios productos químicos; 6) baja expansión térmica para muchos polímeros reforzados con fibras, lo cual conduce a una buena estabilidad dimensional, 7) propiedades significativas de anisotropía.²⁵

2.9. ENSAYO DE TRACCION

El ensayo de tracción uniaxial constituye el método fundamental para la determinación de datos tales como la especificación del material, inspección, investigación, desarrollo y diseño de componentes estructurales.

Para materiales compuestos unidireccionales y tejidos podemos medir los siguientes parámetros:

$$E_x, E_y, \nu_{xy}, X \text{ e } Y$$

Siendo E_x y E_y los módulos de Young en la dirección de la fibra y en la dirección transversal respectivamente.

ν_{xy} , El coeficiente de Poisson

X e Y , la resistencia en la dirección de la fibra y en la dirección transversal, respectivamente.

Para laminados simétricos multidireccionales, podemos medir:

E_1, ν_{12} y X (resistencia a la tracción de laminados)

Siendo E_1 , el modulo del laminado en la dirección de aplicación de la carga.

ν_{12} , Coeficiente de Poisson.

X , Resistencia a tracción del laminado en la dirección de aplicación de la carga.

²⁵ GROOVER, Mikel. Fundamentos de manufactura moderna. México, Prentice-Hall, 1997, P.235

2.9.1 Probeta de ensayo Se aceptan universalmente probetas rectangulares, de sección constante con lengüetas incorporadas en los extremos.²⁶

Según la norma ASTM D 3039. A continuación se mostrara una tabla con las medidas recomendadas por la norma.

Tabla 6. Geometría recomendada para la probeta a tensión.

Orientación	Ancho, mm [in]	Longitud Total, mm [in]	Espesor, mm [in]
0° Unidireccional	15 [0.5]	250 [10.0]	1.0 [0.040]
90° Unidireccional	25 [1.0]	175 [7.0]	2.0 [0.080]
Equilibrado y Simétrico	25 [1.0]	250 [10.0]	2.5 [0.100]
aleatorio-Descontinuo	25 [1.0]	250 [10.0]	2.5 [0.100]

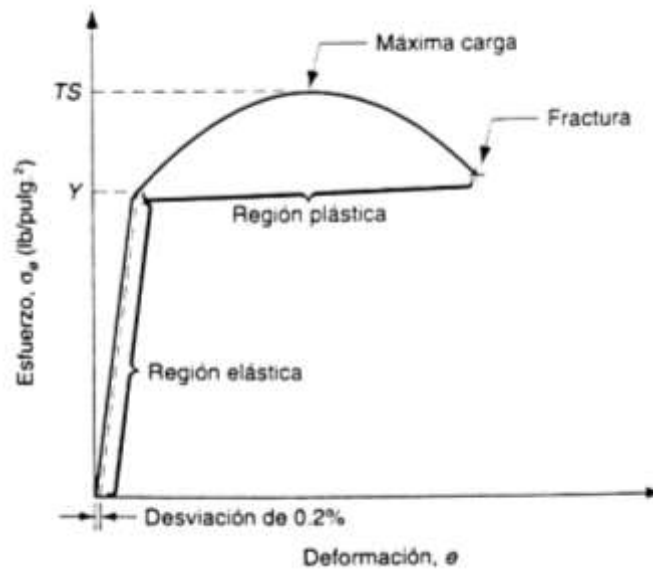
Fuente: ASTM D 3039. 2000. Standard test method for tensile Properties of polymer Matrix Composite Materials. Estados Unidos, Julio 2000. P110.

2.10. GRAFICA ESFUERZO CONTRA DEFORMACIÓN INGENIERIL

La relación esfuerzo deformación de la figura tiene dos regiones que indican dos formas distintas de comportamiento: 1) elástico y 2) plástico. En la región elástica, la relación entre esfuerzo y deformación es lineal, y el material exhibe un comportamiento elástico que recobra su longitud original cuando se libera la carga (esfuerzo).

²⁶ MIRAVETE, Antonio. Materiales compuestos II. Barcelona, Reverté, 2007, P.1073

Figura 7. Esfuerzo contra deformación ingenieril.



Fuente: GROOVER, Mikel. Fundamentos de manufactura moderna. México, Prentice-Hall, 1997, P.45

2.11. GRAFICAS TENSION DEFORMACION DE MATERIALES COMPUESTOS

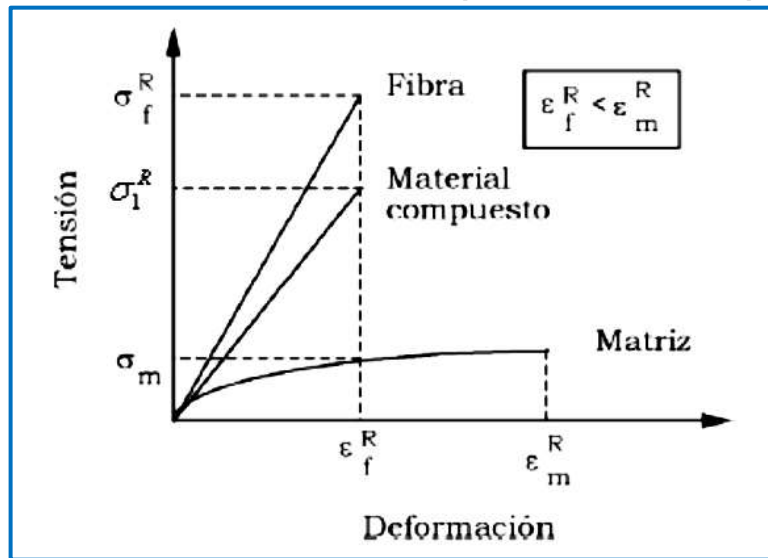
Como se ha dicho anteriormente los materiales compuestos están conformados por fibras y matrices donde cada uno de estos componentes tiene sus propiedades específicas, por lo que el comportamiento final del compuesto está influenciado por las características de cada uno de estos componentes. Como es habitual para conocer el comportamiento de un material es necesario conocer las gráficas de tensión–deformación para poder conocer así las tensiones de rotura a las que está sometido el material.

En el análisis de los materiales compuestos se pueden utilizar dos hipótesis fundamentales para conocer cómo se produce la rotura en estos, o sea:

1. La fibra posee una deformación de rotura inferior a la de la matriz.
2. La matriz posee una deformación de rotura inferior a la de la fibra.

En el primer caso $\varepsilon_f^R < \varepsilon_m^R$, donde ε_f^R , ε_m^R son las deformaciones de rotura en tracción de la fibra y la matriz respectivamente. Si se considera que la fibra y la matriz trabajan solidariamente o sea que sufran ambas la misma deformación, se puede observar en la figura 8 que la fibra rompe antes que la matriz.

Figura 8. Gráfica tensión-deformación para materiales compuestos.



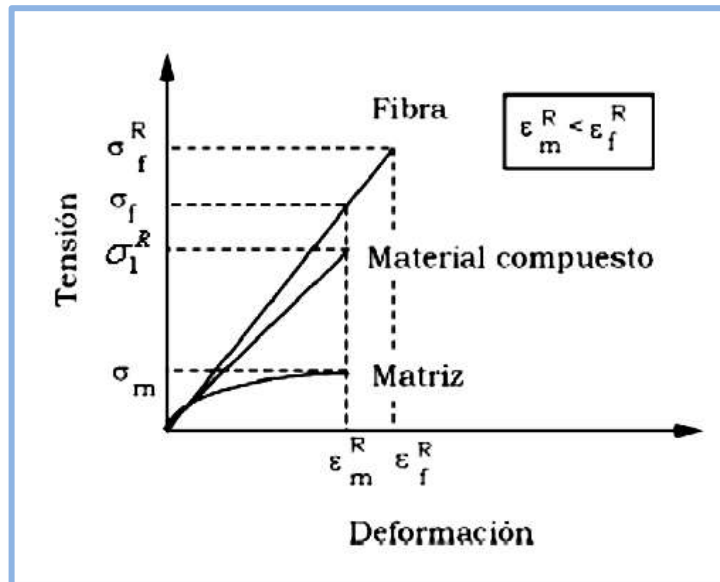
Fuente: ARAYA, Yuniesky. Análisis y diseño de materiales compuestos de fibra de vidrio. (Trabajo de grado). Santa clara. Universidad Central "Marta Abreu" de las Villas, Facultad de Construcciones, Departamento de Ingeniería Civil, 2009. P.32

En el gráfico anterior σ_f^R y σ_1^R representan la tensión de rotura de la fibra y la lámina respectivamente y σ_m representa la tensión a la que se encuentra la matriz en el momento de la rotura y que es inferior a su tensión de rotura.²⁷

En el segundo caso $\varepsilon_m^R < \varepsilon_f^R$, las curvas de tensión-deformación quedan como se muestra en la figura 9.

²⁷ ARAYA, Yuniesky. Análisis y diseño de materiales compuestos de fibra de vidrio. (Trabajo de grado). Santa clara. Universidad Central "Marta Abreu" de las Villas, Facultad de Construcciones, Departamento de Ingeniería Civil, 2009. P.31-32

Figura 9. Gráfica tensión-deformación para materiales compuestos.



Fuente: Ibíd., p. 33

2.12. ESFUERZO INGENIERIL:

Se define en cualquier punto de la curva como la fuerza dividida por el área original.

$$\sigma = \frac{F}{A}$$

Dónde:

σ = Esfuerzo ingenieril, lb/pul^2 (MPa); F = Fuerza aplicada en el ensayo, lb (N); y A = Area original del espécimen de prueba, pul^2 (mm^2).

2.13. DEFORMACIÓN INGENIERIL:

La deformación ingenieril en cualquier punto del ensayo está dado por:

$$e = \frac{L - L_0}{L_0}$$

Dónde:

e = Deformación ingenieril, pul/pul (mm/mm); L = longitud en cualquier punto durante la elongación, pul (mm); y L_0 =longitud original de calibración, pul (mm).Las unidades de la deformación ingenieril están dadas en pul/pul (mm/mm), pero podemos considerar que representa la elongación por unidad de longitud, sin unidades.²⁸

2.14. MÓDULO DE ELASTICIDAD:

Representa la rigidez del material (esto es, su resistencia a la deformación elástica), y se manifiesta como la cantidad de deformación durante la utilización normal del material por debajo de su límite elástico y también como el grado de recuperación elástica del material durante el conformado.

2.15. LIMITE ELÁSTICO (PUNTO DE FLUENCIA):

Representa la resistencia del metal a la deformación permanente y también indica la facilidad con la que el material puede ser conformado mediante las operaciones de laminado y estirado.²⁹

Se define típicamente como el esfuerzo que provoca una desviación del 0,2% con respecto a la línea recta. El punto de fluencia es una característica de la resistencia del material, también se le llama resistencia a la fluencia.³⁰

²⁸ GROOVER, Mikel. Fundamentos de manufactura moderna. México, Prentice-Hall,1997, P.45-46

²⁹ SHACKELFORD, James. Introducción a la ciencia de materiales para ingenieros. México, Prentice-Hall, 2007, P 187.

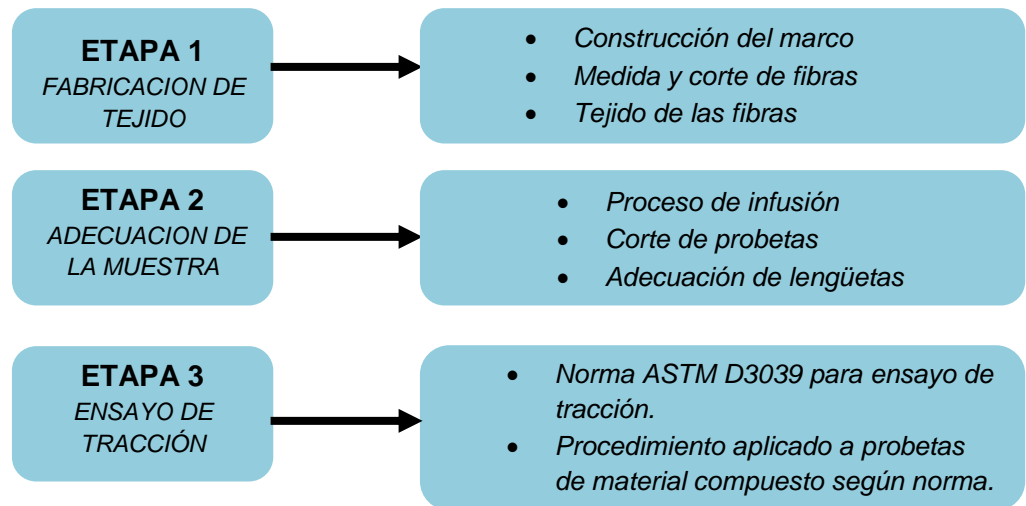
³⁰ GROOVER, , M,*op. cit.*, P. 46

3. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

3.1. METODOLOGIA EXPERIMENTAL

A continuación se presentará la metodología y la norma usada para la fabricación, estudio y caracterización de dos tipos diferentes de tejido de material compuesto. Para ello se elaboraron aproximadamente 30 probetas con las medidas especificadas en la norma y se comparó su comportamiento mecánico a tensión a diferentes ángulos.

3.2. FLUJOGRAMA EXPERIMENTAL



3.3. MATERIALES:

- Bomba de vacío.
- Trampa de resina.
- Indicador de vacío.
- Mangueras.
- Desmoldante (PVA azul).

- Hilo plano de fibra de carbono de 12k.
- Resina epoxi.
- Endurecedor epóxido para epoxi.
- Tela antiadherente (Peel-ply).
- Malla para infusión de resina.
- Plástico para bolsa de vacío.
- Tubo en espiral.
- Cinta de sellado para vacío.
- Unión T de bronce.
- Contenedor de mezcla de resina.
- Molde de aluminio.
- Prensa en C.
- Guantes de nitrilo.
- Cinta de enmascarar.
- Mascarilla.
- Mezclador de resina (Baja lengua).
- Grapadora (para tapizados)

3.4. PROCESO DE FABRICACIÓN DEL MATERIAL COMPUESTO

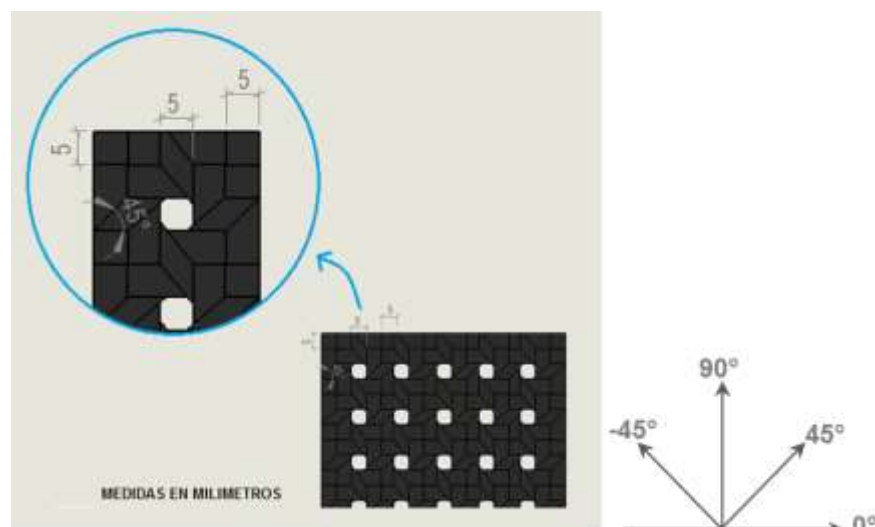
A continuación se realiza una descripción de los pasos a seguir para la fabricación del material compuesto (Fibra de Carbono-Resina Epoxi). Para este proceso de fabricación del material es necesario contar con todos los materiales, incluidos los instrumentos necesarios para generar vacío, mantenerlo y así facilitar la infusión, para ello se requiere una fuente de extracción de vacío y los materiales idóneos para que no se presenten fugas.

3.4.1. CARACTERISTICAS DEL TEJIDO

Tejido cuatriaxial (Tejido Propuesto): Las fibras ofrecen sus mejores propiedades cuando se entretajan en la dirección de las tensiones, es decir, que en un caso ideal deberían alinearse las direcciones de las fibras con la dirección de la fuerza exterior. De ahí la importancia en la elección del número y orientación de las fibras que forman el tejido para obtener una rigidez y resistencia que cumpla con los requisitos deseados en la aplicación. El tejido que se propone en el presente trabajo es el siguiente:

Dos hilos de trama separados cada 5 [mm] y dos hilos de urdimbre separados la misma distancia con dos hilos de sesgo tejidos a 45° y -45° .

Figura 10. Medidas del tejido final



Fuente: Los autores.

Para tener claridad sobre el método de elaboración del tejido se detalla cada uno de los pasos a seguir y los implementos necesarios para construir el tejido cuatriaxial propuesto:

En primer lugar para tener definida la geometría del tejido (la longitud y el ancho) se fabricó un marco rectangular de 40 [cm] por 50 [cm] al cual se fijará las fibras, se procede a cortar las fibras de 46 [cm] de longitud para sujetar la trama al marco por medio de una grapadora (para tapizar) se grapán de la siguiente forma se ubica una fibra y se fija luego se agrega otra fibra sin dejar espacio luego de fijar estas dos se procede a dejar una separación de 3 mm y se repite el proceso para cada nuevo par de fibras como se muestra en la siguiente figura.

Figura 11. Ubicación de la trama en el marco

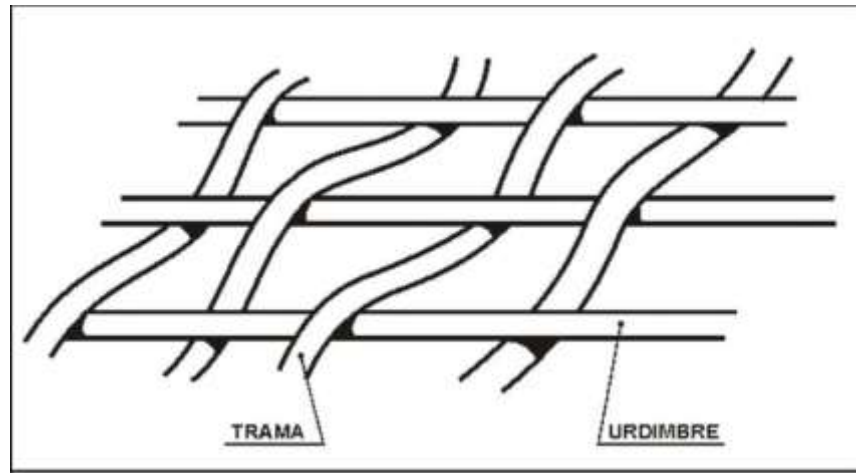


Fuente: Los autores.

Luego se cortan las fibras de 36 [cm] para la construcción del urdimbre y posteriormente tejerlos en la trama, para ello se pasa una fibra por debajo de la primera fibra que compone la trama luego por la otra fibra por encima realizándolo esta forma intercalando por toda la trama hasta llegar al otro extremo. La siguiente fibra en esta ocasión se teje de la siguiente forma: se pasa la fibra por encima de la primera fibra de la trama y luego por debajo de la próxima fibra de la trama así

hasta llegar al otro extremo de la trama, estas también se sujetan al marco en pares, separadas una distancia de 3 [mm].

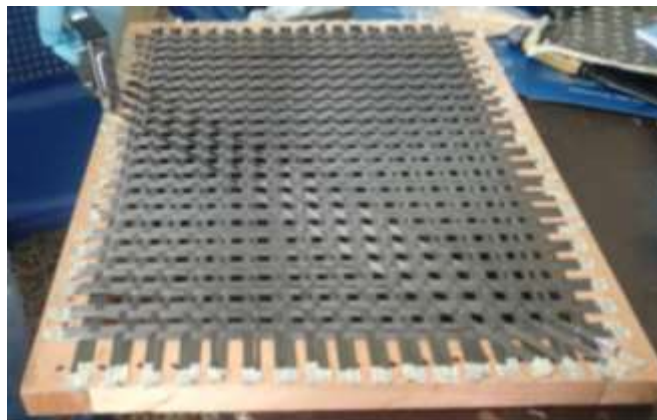
Figura 12. Forma en que se tejen trama y urdimbre



Fuente: Disponible en internet: <<http://dicter.usal.es/lema/urdimbre>> [citado 09 de octubre de 2016]

Por último se tejen las fibras de sesgo con ángulos de 45° y -45° . La fibra tejida a 45° se ubica diagonalmente en los recuadros que se conforman por urdimbre y trama, esta fibra pasa primero por debajo de la trama luego sobre el urdimbre desde una esquina del tejido hasta atravesar todo el tejido este proceso se repite hasta que todas las fibras se haya pasado por toda la trama y urdimbre.

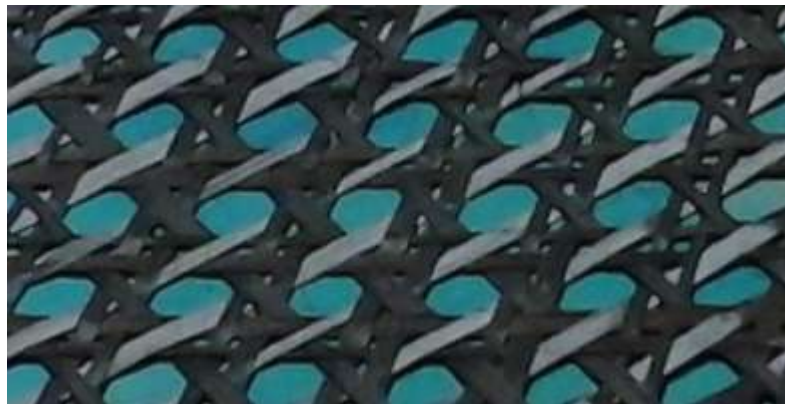
Figura 13. Ubicación del sesgo en el tejido



Fuente: Los autores.

Así mismo la fibra en la dirección - 45° pasa sobre la trama y luego bajo el urdimbre comenzando en una esquina hasta que llegue al otro extremo del tejido, esto se realiza con todos los recuadros que genera la trama y el urdimbre hasta tener todo el tejido finalizado como se muestra a continuación.

Figura 14. ubicación del sesgo en el tejido



Fuente: Los autores.

El orificio que se genera en el proceso de tejido al principio por la separación entre el par de fibras en sentido horizontal (urdimbre) y vertical (trama) luego se amplía un poco al pasar las fibras diagonales (sesgo) y tendrá las medidas de la (Figura 10) posteriormente se extraen las grapas y se obtiene el tejido cuatriaxial de fibra de carbono con el que se fabricará el material compuesto.

3.4.2 MÉTODO DE INFUSIÓN DE RESINA: El método de infusión es el proceso más sofisticado de manufactura de materiales compuestos con fibra de Carbono el cual nos permite generar piezas con geometrías más complejas libres de poros e inclusiones además de ser altamente utilizado en líneas de producción masiva. El proceso de infusión, el refuerzo se ubica sobre el molde seco (sin resina al cual previamente se le ha aplicado un desmoldante) y luego se apilan una serie de materiales en una secuencia específica para garantizar el flujo de la resina por todo el molde manteniendo el vacío que lo proporciona una bomba de vacío.

A continuación se hará una descripción del proceso:

1. Ubicar en la zona de trabajo todos los materiales para realizar el proceso de vacío (la fibra, el molde, el plástico de vacío (bolsa de vacío), tejido, resina, pinzas, etc.), asegurarse que el área esté libre de polvos y agente contaminantes que puedan afectar el proceso de fabricación y el producto final (el material compuesto).
2. Limpiar el tejido de Fibra de Carbono por si se han adherido partículas de polvo o suciedad.
3. La superficie del molde donde se va a posicionar el tejido debe estar muy limpio y se debe aplicar el desmoldante (PVA Azul en el caso particular) para garantizar un correcto desmolde después del curado de la resina. La función del desmoldante es facilitar la extracción de la pieza del molde y protege la superficie de la misma, cuando no se aplica correctamente o quedan espacios (del molde) sin cubrir la resina se adhiere al molde y esto ocasiona desprendimiento de la misma lo que genera una superficie rugosa e irregular.

Figura 15. Aplicación desmoldante (PVA).



Fuente: Los autores.

4. Colocar la cinta de sellado de vacío alrededor del molde en los bordes donde no se ha aplicado el desmoldante PVA, si se aplica el desmoldante no se va adherir a la superficie del molde (se recomienda retirar el PVA en caso de haberlo aplicado), tener la precaución de no dejar espacios o burbujas de aire entre el molde y la bolsa, ya que no se garantizará un buen sellado.
5. Cortar el tejido según el tamaño y la geometría del molde para no tener excesos que pueda impedir el sellado.

Figura 16. Ubicación del tejido de carbono en el molde.



Fuente: Los autores.

6. Se debe seccionar el peel-ply (tejido antiadherente) cuyas dimensiones deben ser un poco mayores a la del tejido (esto facilita el desprendimiento de la malla de transferencia del material compuesto en el desmolde). Ubicar el tejido antiadherente (Peel-ply) sobre el tejido de fibra de carbono, es la primera capa para nuestro sistema de infusión por vacío este nos permite ser retirado con facilidad al desmoldar la pieza. Se utiliza una capa (o dos para asegurar una buena extracción) que cubra todo el área sobre el cual se está posicionado el tejido dejando un pequeño espacio alrededor de los bordes para ubicar la cinta de sellado de la bolsa.

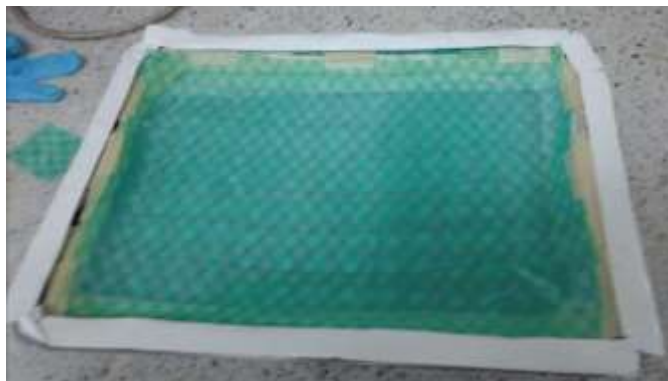
Figura 17. Ubicación del peel-ply (tejido antiadherente).



Fuente: Los autores.

7. Seccionar la malla de transferencia cuyas dimensiones son iguales a la del refuerzo igualmente se realizan dos cortes adicionales de malla de transferencia que se ubicaran en los extremos donde ingresa y se extrae la resina. Situar la malla de transferencia dentro del molde, se ubica encima del tejido antiadherente, su función es garantizar que la resina fluya libremente desde la captación de resina (toma de resina) hasta la trampa de resina por todo el tejido.

Figura 18. Ubicación de la malla de transferencia.



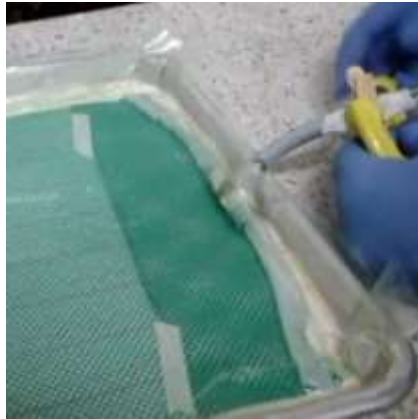
Fuente: Los autores.

8. Ubicar los conectores en forma de T en los extremos de la malla, estos se encargan de distribuir la resina desde la espiral de entrada por todo el tejido

hasta recoger el excedente de resina en la espiral de salida, estos se sitúan en la mitad de la longitud de las espirales de transferencia de resina.

Acomodar la espiral de transferencia, esta debe ir al inicio y al final de la malla de transferencia en caso de tener un tamaño considerable el tejido se recomienda posicionar una más en el centro de la pieza, las espirales se ubican en sentido longitudinal y por encima de la malla para garantizar el flujo de resina en toda la pieza.

Figura 19. Ubicación de la espiral de transferencia.



Fuente: Los autores.

9. Conectar y sellar la manguera de ingreso de resina para ello se procede a corta un extremo a 45° (forma de v) este irá al recipiente que contiene la resina esto garantiza un flujo continuo así se ubique en el fondo del recipiente verificando que no se presenten dobladuras o torceduras. El otro extremo de la manguera se unirá al conector de la espiral se aconseja aplicar un poco de cinta de sellado alrededor de la manguera en el lugar donde entrara en contacto con el molde para asegurar que no se presente fugas y dobleces que puedan provocar pérdidas de vacío en esta zona. Así mismo conectar y sellar la manguera de salida que ira conectada a la trampa de resina.

10. Realizar el recorte del plástico de un tamaño mayor al del molde para poder generar unas pestañas (doblecres) en el plástico durante el ensamble, esto para que en el instante de generar el vacío se pueda ejercer una mayor presión en dichas áreas y garantizar un buen vacío en el interior del montaje. Ubicar el plástico de vacío sobre todo el conjunto debe sobresalir un poco de la cinta de sellado de vacío para evitar fugas y tener un buen sellado. Se retira el protector de la cinta y se va aplicando presión desde un extremo del montaje verificando que no quede arrugas o poros, tensionando manualmente el plástico hasta tener todo el plástico presionado junto con la cinta de vacío.

Figura 20. Ubicación del plástico de vacío.



Fuente: Los autores.

11. Ensamblar la trampa de resina a la manguera que sale de la bolsa de vacío para esto se debe conectar a la entrada de la tapa de la trampa hasta llegar al recipiente en su interior que recibirá la resina excedente, agregar cinta de vacío para realizar el sellado alrededor de la manguera con el recipiente y aplicar presión para lograr un buen sellado.

Figura 21. Trampa de resina.



Fuente: Los autores.

12. Bloquear la manguera de ingreso de resina para que no haya flujo de aire o resina mientras se hace el vacío inicial. (El bloqueo en este caso se realizó con una prensa en c)

Figura 22. Prensa en C.



Fuente: Los autores.

13. Conectar la manguera a la bomba de vacío y al acople que se encuentra en la trampa de resina luego se enciende la bomba para chequear que se esté realizando el vacío y no se presenten fugas dentro de la bolsa de vacío, en ese momento se debe ir acomodando el plástico de vacío con el fin de corregir los espacios que hayan quedado como en las esquinas que son lugares de difícil acceso, esto con el fin de cubrir correctamente toda la superficie del molde con el plástico y la cinta de vacío.

Figura 23. Bomba de vacío.



Fuente: Los autores.

14. Calcular la cantidad de cada componente tanto resina como como endurecedor, estos deben ser pesados y mezclados en las proporciones (partes) que indica el fabricante, es importante usar una balanza con buena precisión para pesar la cantidad correcta de cada componente a continuación realizar la mezcla de estos dos componentes.

Figura 24. Mezcla de resina-endurecedor.



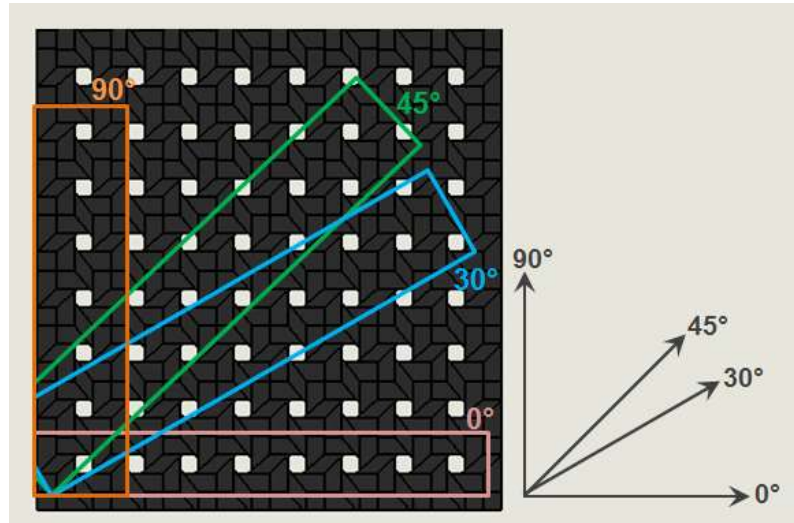
Fuente: Los autores.

15. Posicionar el recipiente contenedor de resina fijarlo en un lugar donde quede estable y colocar la manguera dentro del recipiente para asegurar que todo el tiempo haya absorción de resina, ya que si se presenta alguna falla en el posicionamiento del recipiente o la manguera puede presentarse ingreso de aire y arruinarse la pieza.
16. Retirar la prensa en C que bloquea el paso de la resina y presionar la manguera para que esta retome su forma y permitir un mejor flujo de resina hacia el molde.
17. Monitorear todo el proceso el tiempo que sea necesario hasta que el flujo de resina llegue a la trampa de vacío.
18. Bloquear tanto la entrada de resina como la salida hacia la trampa con las prensas en C y apagar la bomba.
19. Finalmente esperar 24 horas para que la resina cure y proceder al desmolde.

3.5. ADECUACIÓN DE LA MUESTRA

Luego de desmoldar la pieza se procedió a cortar las probetas con los diferentes sentidos de ángulos como se muestra a continuación:

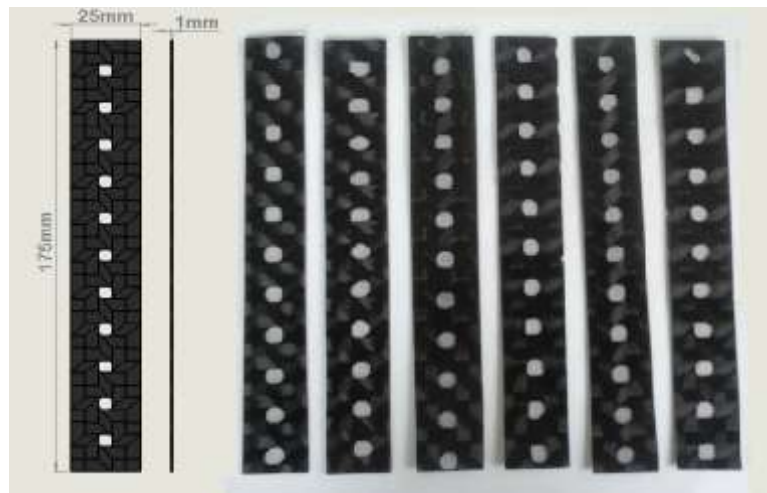
Figura 25. Sentidos de angulos de las probetas



Fuente: Los autores.

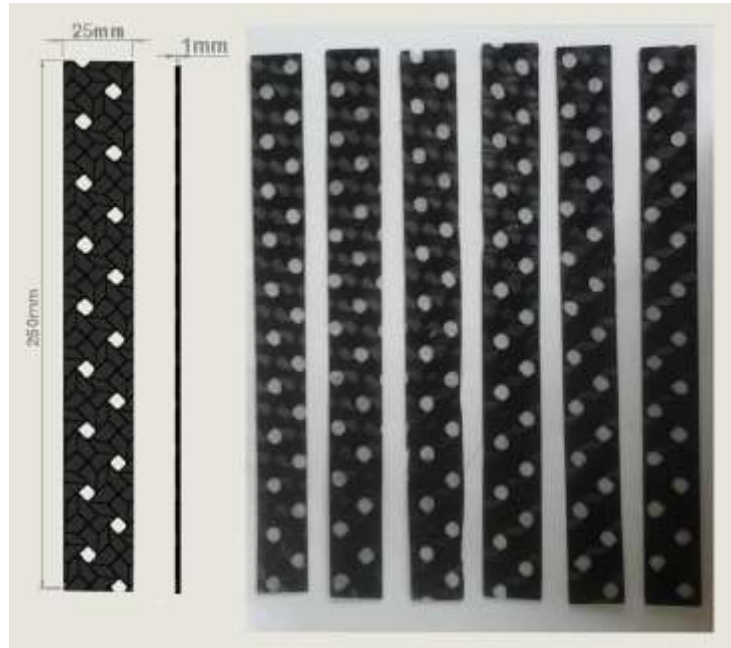
Las probetas fueron elaboradas con las medidas sugeridas en la norma ASTM D3039/D3039M-14, su construcción final se muestra a continuación:

Figura 26. Medidas probeta 90°



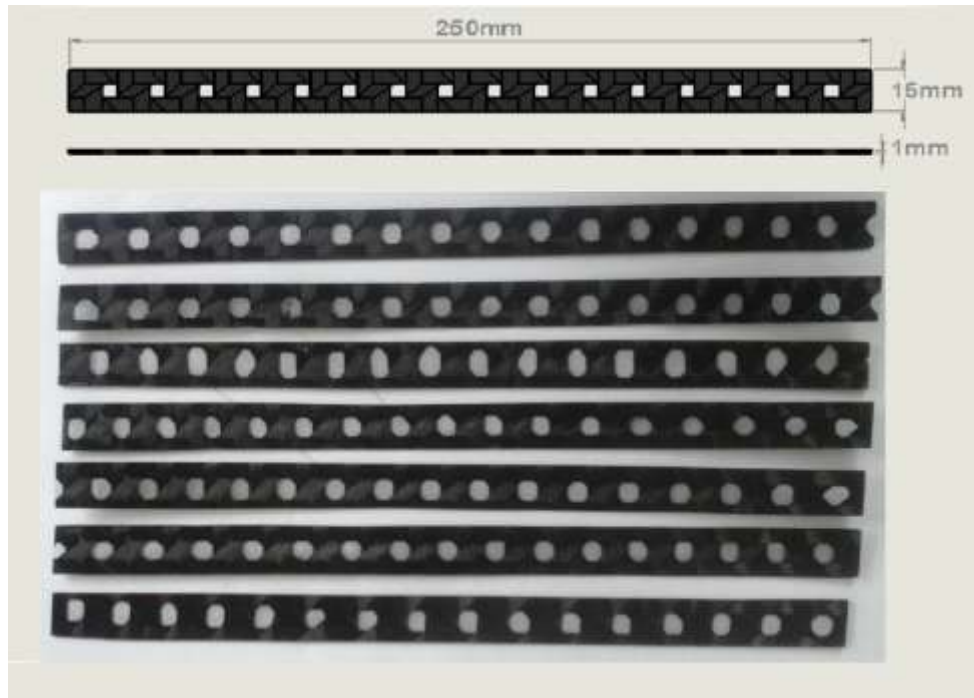
Fuente: Los autores.

Figura 27. Medidas probeta 45° y 30°



Fuente: Los autores.

Figura 28. Medidas probeta 90°



Fuente: Los autores.

Luego de cortar las probetas se procede a lijar y limpiar con acetona para eliminar la capa de desmoldante que quedo adherida a estas, además también es necesario cortar las lengüetas y unirlas a cada una de las probetas con el fin de evitar el deslizamiento de la probeta en la máquina de ensayos.

Figura 29. Probeta final



Fuente: Los autores.

3.6. PROCEDIMIENTO DEL ENSAYO DE TRACCION

La totalidad de las probetas fueron ensayadas en el laboratorio de caracterización de materiales de la Escuela de Ingeniería Civil en una máquina MTS 810 (Material Testing Systems) mostrada en la figura 30, bajo la norma ASTM D3039/D3039M-14 con una velocidad de prueba de 2 [mm/min], el equipo mencionado permite obtener fácilmente información sobre las propiedades mecánicas de los materiales, cuenta con una interfaz gráfica fácil de configurar y ejecutar para cumplir con las necesidades de cada ensayo, su celda de carga es capaz de manejar diferentes valores de esfuerzo y deformación.

Figura 30. Máquina de ensayos MTS 810 (Material Testing Systems).



Fuente: Los autores.

Para el posicionamiento de las probetas la máquina cuenta con unas mordazas, el interior de estas que entra en contacto con la pieza tiene una superficie rugosa para evitar el deslizamiento con la probeta. Debido a que las probetas a ensayar tienen un espesor muy pequeño y las mordazas cuentan con un cierre mínimo entre ellas se hizo necesario agregar unas lengüetas a las probetas que aumentarán el espesor que se ubica dentro de las mordazas esto con el fin de que no se presentará deslizamiento al momento de aplicar la carga.

En la realización de las pruebas se ensayaron como mínimo 5 probetas del tejido propuesto y dos del tejido plano para los diferentes ángulos bajo las mismas condiciones, cada una se introdujo en la máquina y se aplicó carga hasta producir el fallo como se muestra a continuación.

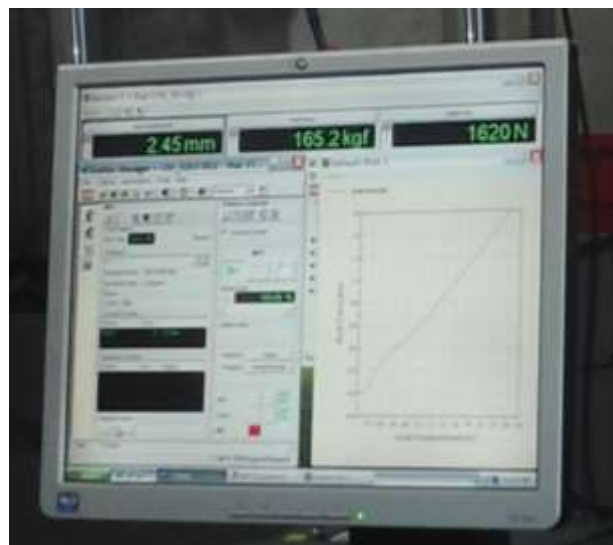
Figura 31. Probetas ensayadas



Fuente: Los autores.

Durante el transcurso de la prueba, la máquina generará la gráfica de fuerza axial-desplazamiento axial (figura 32) y guarda cada uno de los valores los cuales se promediarán para cada tejido y cada ángulo de probeta.

Figura 32. Interfaz MTS 810.



Fuente: Los autores.

4. RESULTADOS

Se realizó un ensayo a tensión de un material compuesto con matriz polimérica de resina epoxi reforzado con fibras de carbono con dos tejidos; un tejido plano (biaxial) y un tejido propuesto (cuatriaxial), para ver las diferencias entre el tejido comercial y el nuevo. Para ello se elaboraron de 5 a 6 probetas por cada orientación de interés de estudio tanto para el tejido propuesto (0°, 30°, 45° y 90°) como para el tejido plano (0°, 45° y 90°) y se halló el valor promedio, su variación estándar y el coeficiente de variación.

A continuación se muestran los valores obtenidos del ensayo además de las propiedades mecánicas halladas para la caracterización del material.

4.1. TEJIDO CUATRIAXIAL.

- El ensayo a tracción realizado arroja los datos de fuerza y desplazamiento para el tejido cuatriaxial en la orientación de cero grados [0°]:

Tabla 7. Datos del ensayo a tensión para el tejido cuatriaxial a 0°.

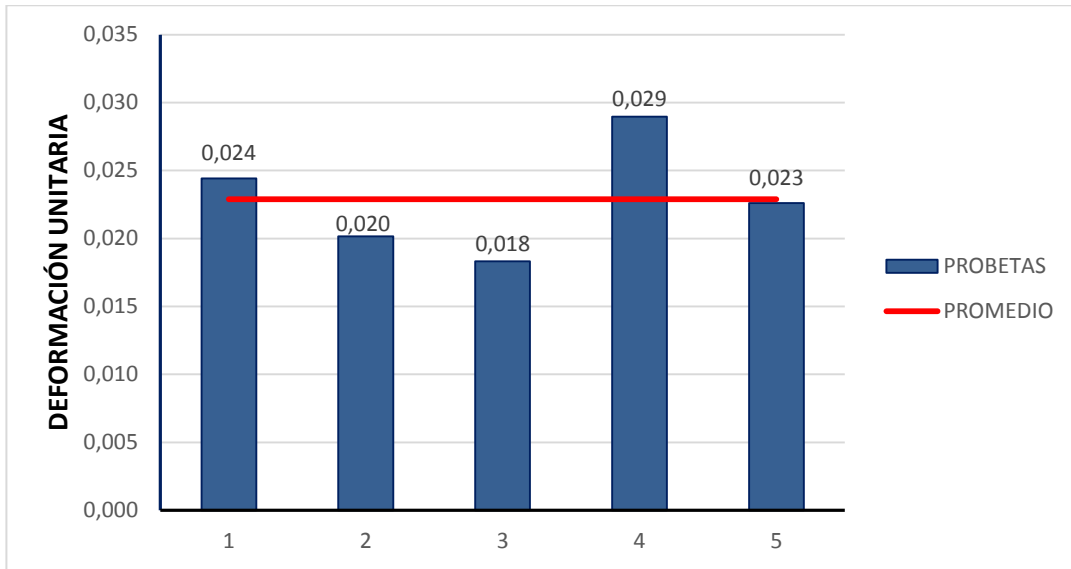
TEJIDO CUATRIAXIAL A 0°		
PROBETA	DESPLAZAMIENTO [mm]	CARGA DE ROTURA [KN]
1	4,637	2,749
2	3,829	3,056
3	3,480	2,676
4	5,502	3,848
5	4,294	3,034

Fuente: Los autores.

Con los datos de desplazamiento y carga de rotura obtenidos de la prueba conociendo previamente la geometría de la probeta para la orientación de 0°, se calcularon por medio ecuaciones el esfuerzo ingenieril, deformación unitaria y

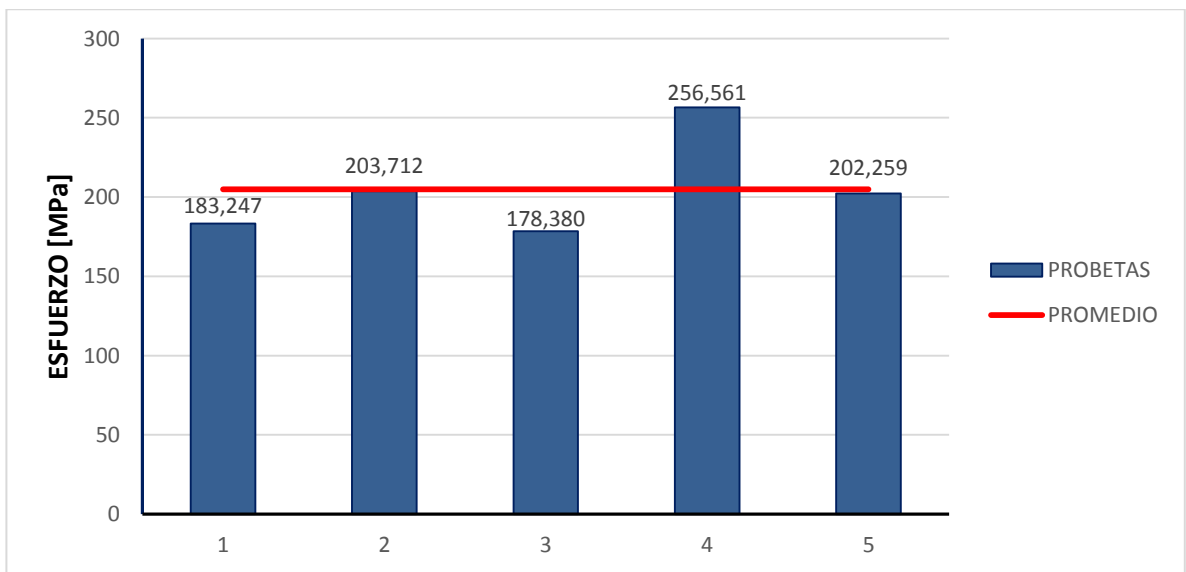
módulo elástico (ver Anexo G) el valor del límite elástico fue obtenido por medio de gráfica.

Figura 33. Datos de deformación para el tejido cuatriaxial a 0°.



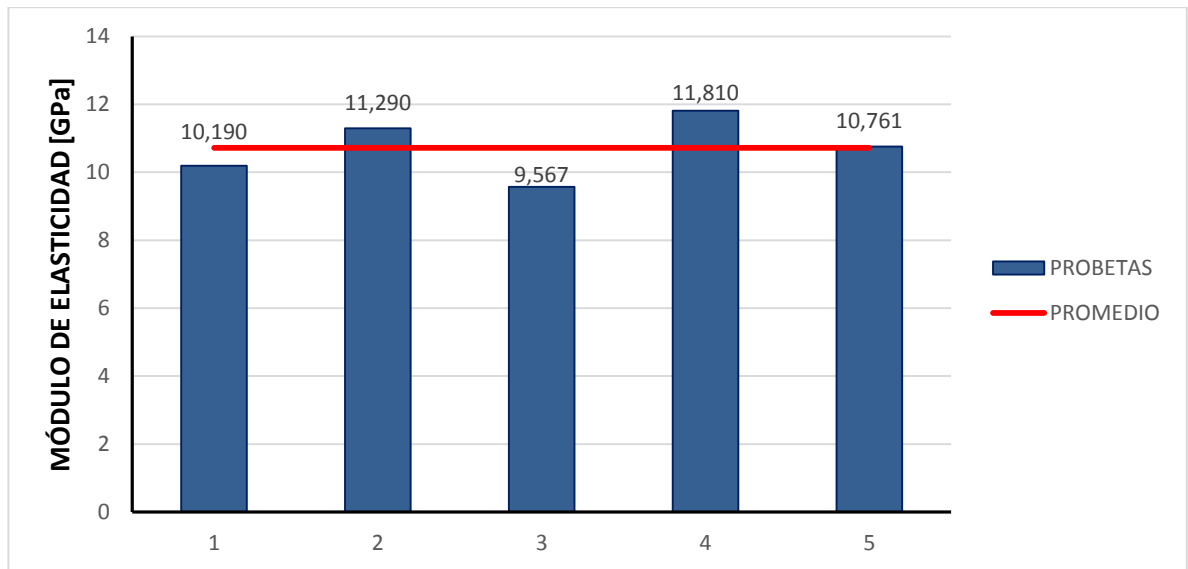
Fuente: Los autores.

Figura 34. Datos de esfuerzo para el tejido cuatriaxial a 0°.



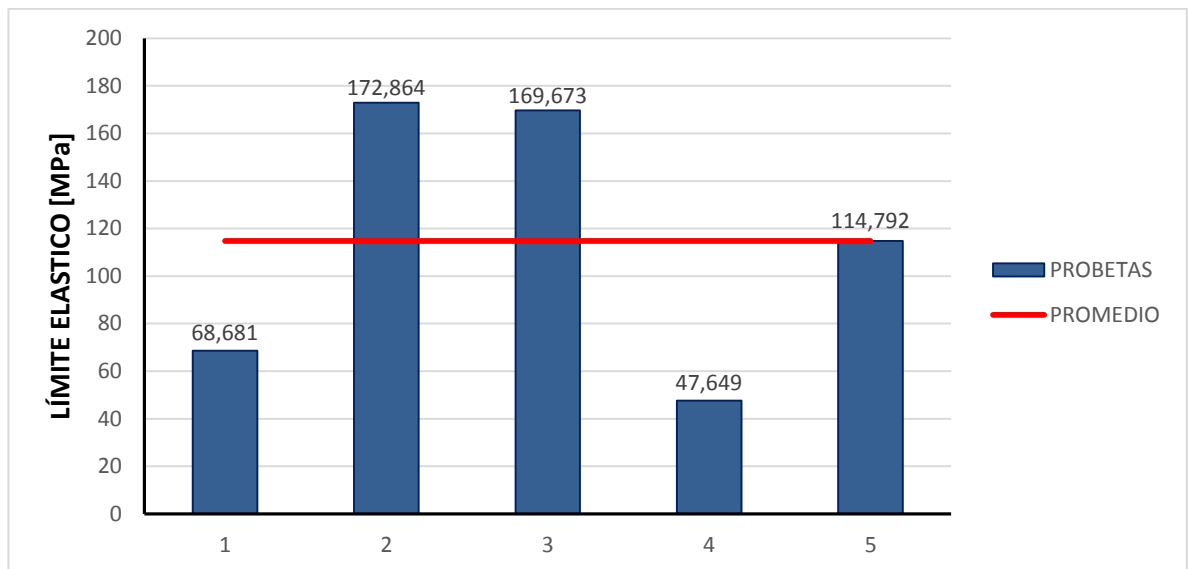
Fuente: Los autores.

Figura 35. Datos del módulo de elasticidad para el tejido cuatriaxial a 0°.



Fuente: Los autores.

Figura 36. Datos del límite elástico para el tejido cuatriaxial a 0°.



Fuente: Los autores.

Con los valores anteriores se realiza un cálculo estadístico de valor promedio, la desviación estándar y el coeficiente de variación (ver ecuaciones en anexo G).

Tabla 8. Resultados del ensayo a tensión para el tejido cuatriaxial a 0°.

TEJIDO CUATRIAXIAL A 0°				
PROBETA	DEFORMACIÓN	ESFUERZO [MPa]	MODULO ELASTICIDAD [GPa]	LIMITE ELASTICO [MPa]
Promedio	0,023	204,832	10,724	114,732
Desviación estándar	0,004	31,022	0,884	57,050
Coefficiente de variación	17,966	15,145	8,242	49,725

Fuente: Los autores

Para el caso del tejido cuatriaxial y su orientación de probeta de cero grados (0°), se obtuvo que los valores medios son: la deformación unitaria un valor de $0,023 \pm 0,004$, el esfuerzo último de rotura un valor de 204 ± 31 [MPa], el módulo de elasticidad es de 10 ± 1 [GPa] y un límite elástico de 114 ± 57 [MPa].

- Para la orientación de treinta grados [30°] se muestran los datos obtenidos del ensayo a tracción el cual arroja datos de fuerza y desplazamiento para el tejido cuatriaxial:

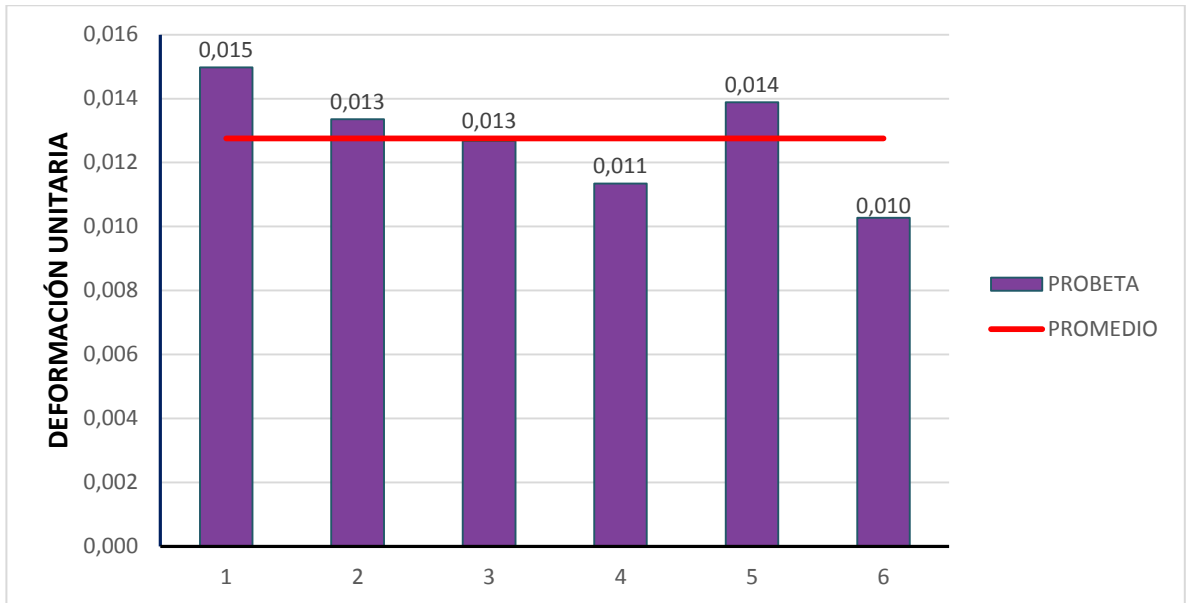
Tabla 9. Datos del ensayo a tensión para el tejido cuatriaxial a 30°.

TEJIDO CUATRIAXIAL A 30°		
PROBETA	DESPLAZAMIENTO [mm]	CARGA DE ROTURA [KN]
1	2,846	2,587
2	2,538	2,310
3	2,408	2,187
4	2,156	1,954
5	2,639	2,063
6	1,951	1,806

Fuente: Los autores.

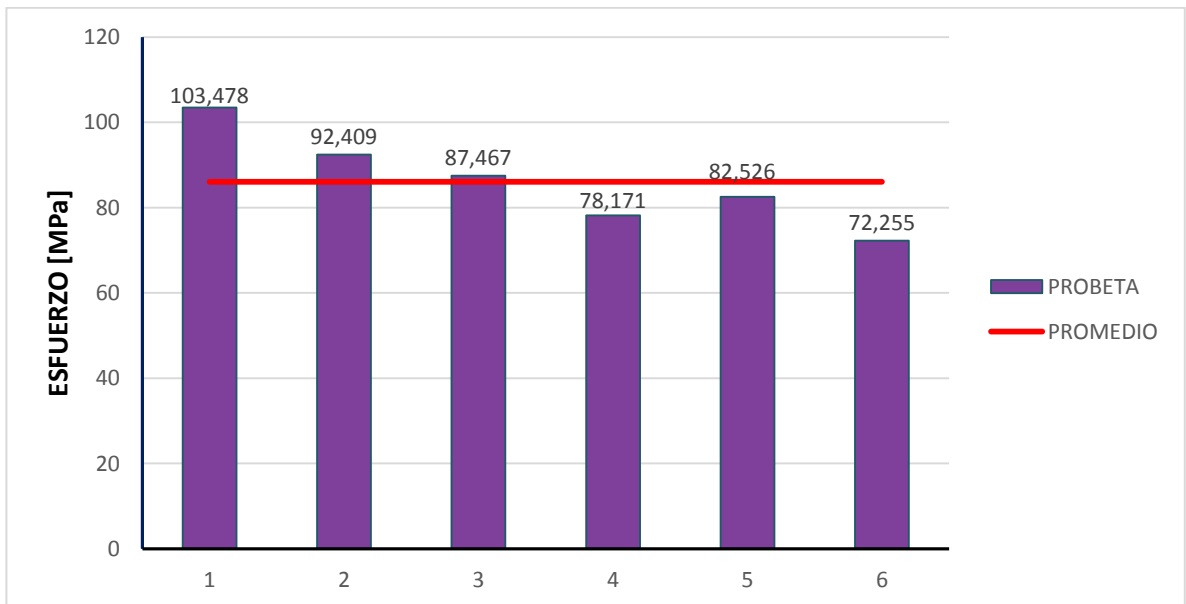
Con los datos anteriores se calculó el esfuerzo ingenieril, deformación unitaria y módulo elástico y limite elástico.

Figura 37. Datos de la deformación para el tejido cuatriaxial a 30 °.



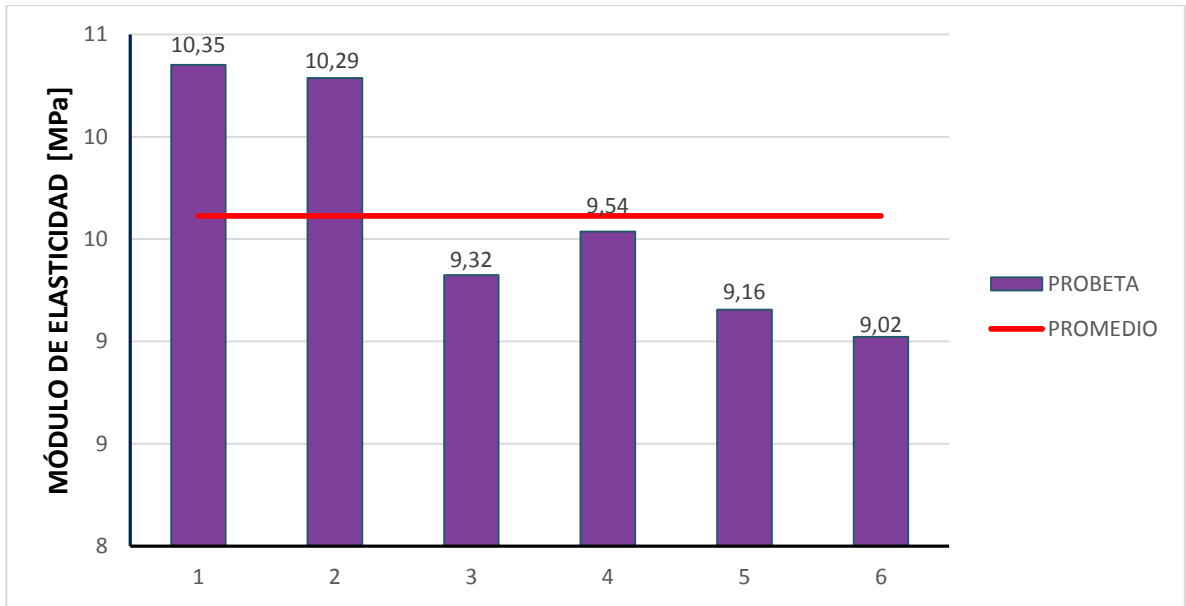
Fuente: Los autores.

Figura 38. Datos del esfuerzo para el tejido cuatriaxial a 30°.



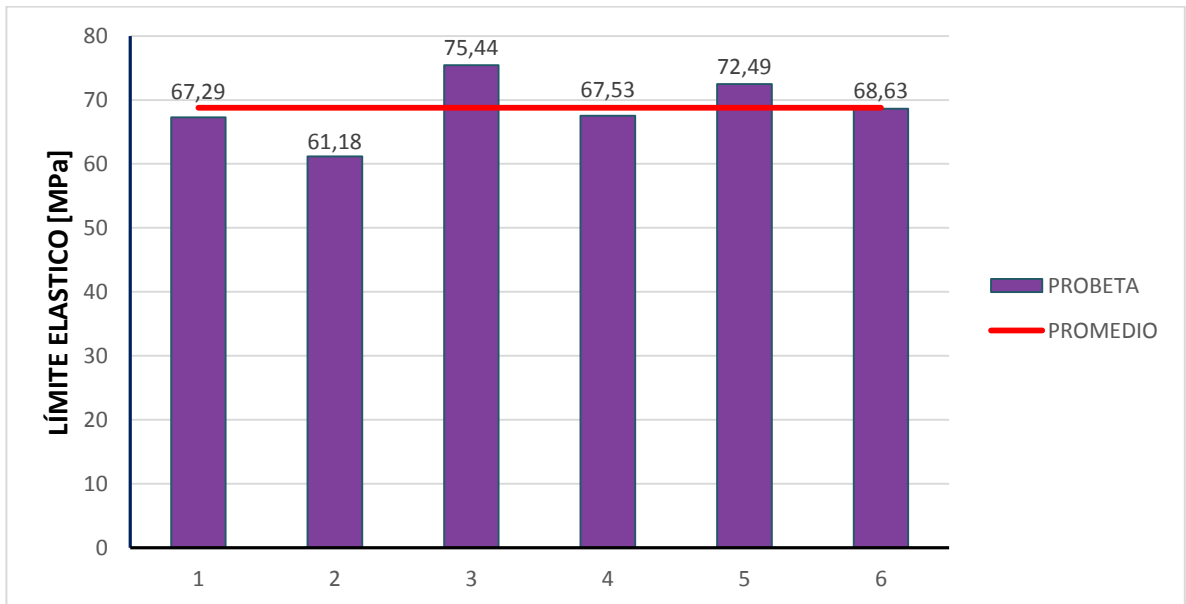
Fuente: Los autores.

Figura 39. Datos del módulo de elasticidad para el tejido cuatriaxial a 30°.



Fuente: Los autores.

Figura 40. Datos del límite elástico para el tejido cuatriaxial a 30°.



Fuente: Los autores.

Con la información anterior se hace un análisis estadístico para determinar la media del valor de cada propiedad, su desviación estándar y el porcentaje de variación de dicho valor.

Tabla 10. Resultados del ensayo a tensión para el tejido cuatriaxial a 30°.

TEJIDO CUATRIAXIAL A 30°				
PROBETA	DEFORMACIÓN	ESFUERZO [MPa]	MODULO ELASTICIDAD [GPa]	LIMITE ELASTICO [MPa]
Promedio	0,013	86,051	9,613	68,761
Desviación estándar	0,002	11,054	0,574	4,894
Coefficiente de variación (%)	13,475	12,846	5,969	7,118

Fuente: Los autores.

Los resultados obtenidos en el tejido cuatriaxial y su orientación de probeta de treinta grados (30°), se tiene que los valores son; la deformación unitaria un valor de $0,013 \pm 0,002$, el esfuerzo a la tracción un valor de 86 ± 11 [MPa], el módulo de elasticidad es de 9 ± 1 [GPa] y un límite elástico de 68 ± 5 [MPa].

- El ensayo aplicado a las probetas de orientación de cuarenta y cinco grados [45°] para el tejido cuatriaxial nos da la siguiente información; datos obtenidos del ensayo a tracción el cual muestra datos de fuerza y desplazamiento:

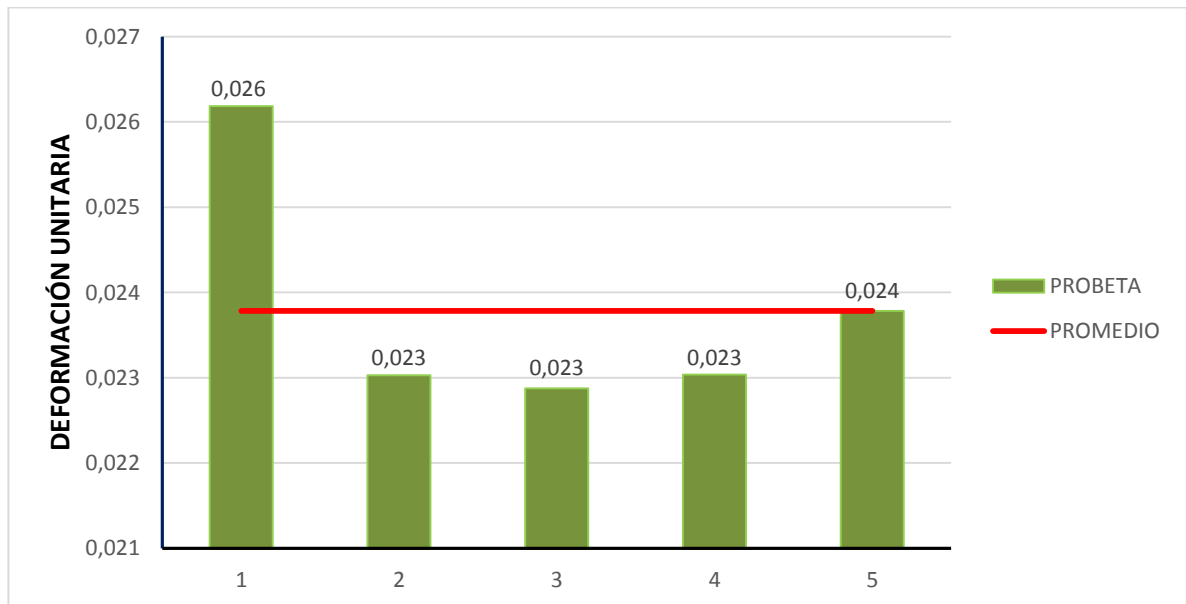
Tabla 11. Datos del ensayo a tensión para el tejido cuatriaxial a 45°.

TEJIDO CUATRIAXIAL A 45°		
PROBETA	DESPLAZAMIENTO [mm]	CARGA DE ROTURA [KN]
1	4,975	3,936
2	4,376	3,996
3	4,346	4,248
4	4,377	3,685
5	4,519	4,200

Fuente: Los autores.

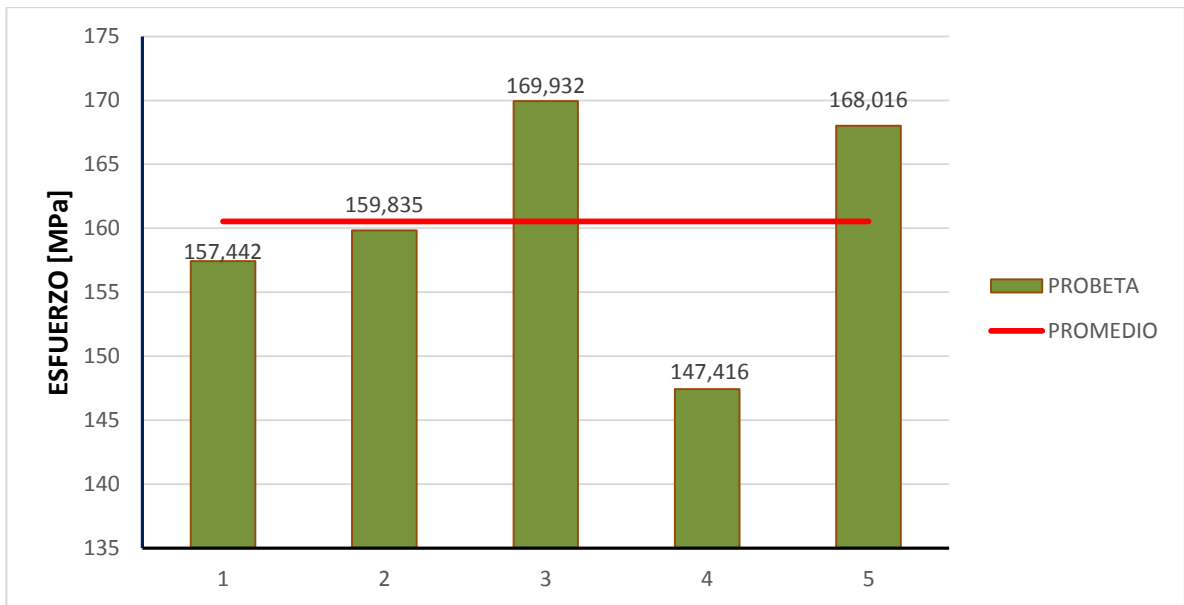
En las siguientes gráficas se presentan los valores de esfuerzo ingenieril, deformación unitaria y módulo elástico y límite elástico para la probeta de 45°.

Figura 41. Datos de deformación para el tejido cuatriaxial a 45°.



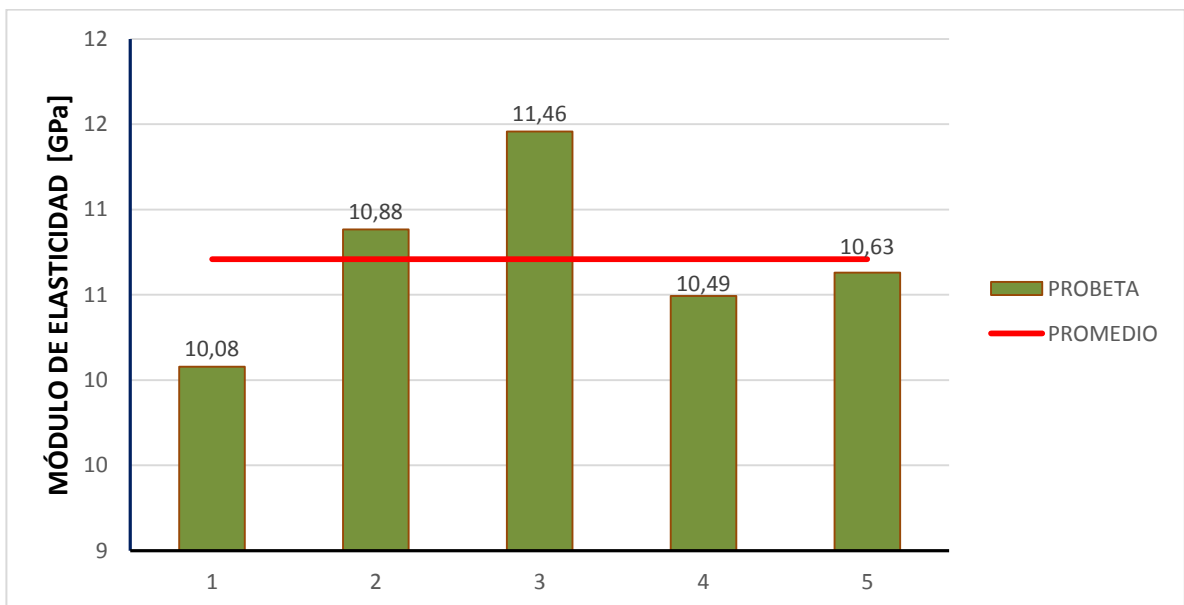
Fuente: Los autores.

Figura 42. Datos de esfuerzo para el tejido cuatriaxial a 45°.



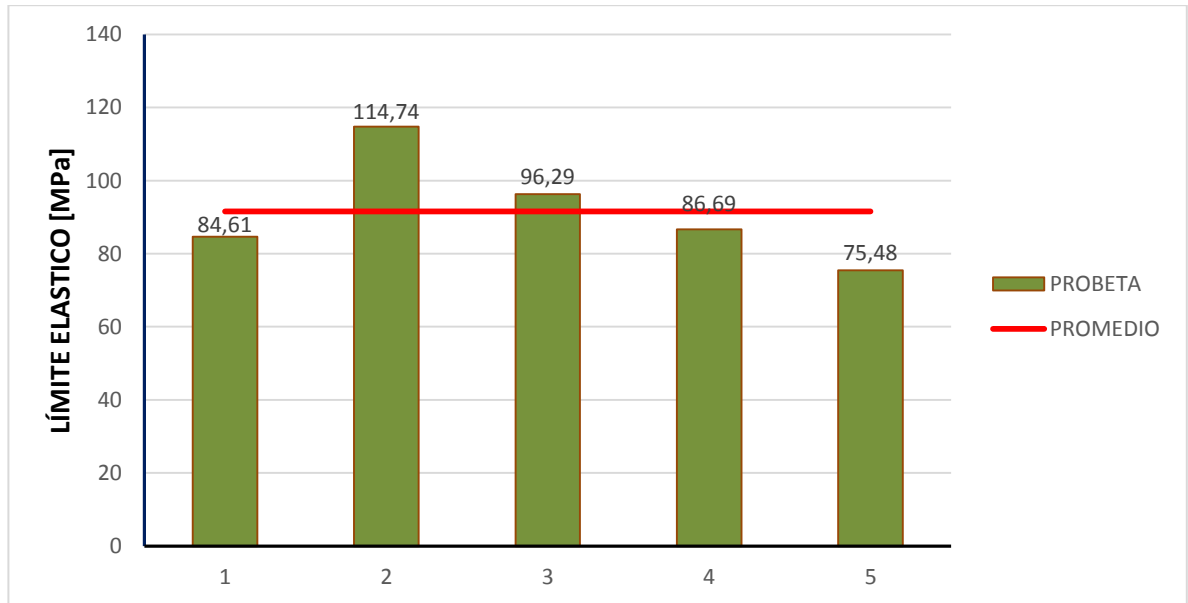
Fuente: Los autores.

Figura 43. Datos del módulo de elasticidad para el tejido cuatriaxial a 45°.



Fuente: Los autores.

Figura 44. Datos del límite elástico para el tejido cuatriaxial a 45°.



Fuente: Los autores.

Al analizar los valores anteriores se procedió a realizar el cálculo estadístico para la probeta de 45°.

Tabla 12. Resultados del ensayo a tensión para el tejido cuatriaxial a 45°.

TEJIDO CUATRIAXIAL A 45°				
PROBETA	DEFORMACIÓN	ESFUERZO [MPa]	MODULO ELASTICIDAD [GPa]	LIMITE ELASTICO [MPa]
Promedio	0,024	160,528	10,708	91,562
Desviación estándar	0,001	9,034	0,510	14,920
Coefficiente de variación	5,844	5,628	4,762	16,294

Fuente: Los autores.

Para el caso de estudio particular del tejido cuatriaxial y su orientación de probeta de cuarenta y cinco grados (45°), se encontró los siguientes valores: la deformación unitaria un valor de $0,024 \pm 0,001$, el esfuerzo a la tracción un valor de 160 ± 9 [MPa], el módulo de elasticidad es de $10 \pm 0,5$ [GPa] y un límite elástico de 91 ± 15 [MPa].

- Datos obtenidos del ensayo a tracción Para la orientación de noventa grados [90°] , el cual presenta los datos de fuerza y desplazamiento para el tejido cuatriaxial:

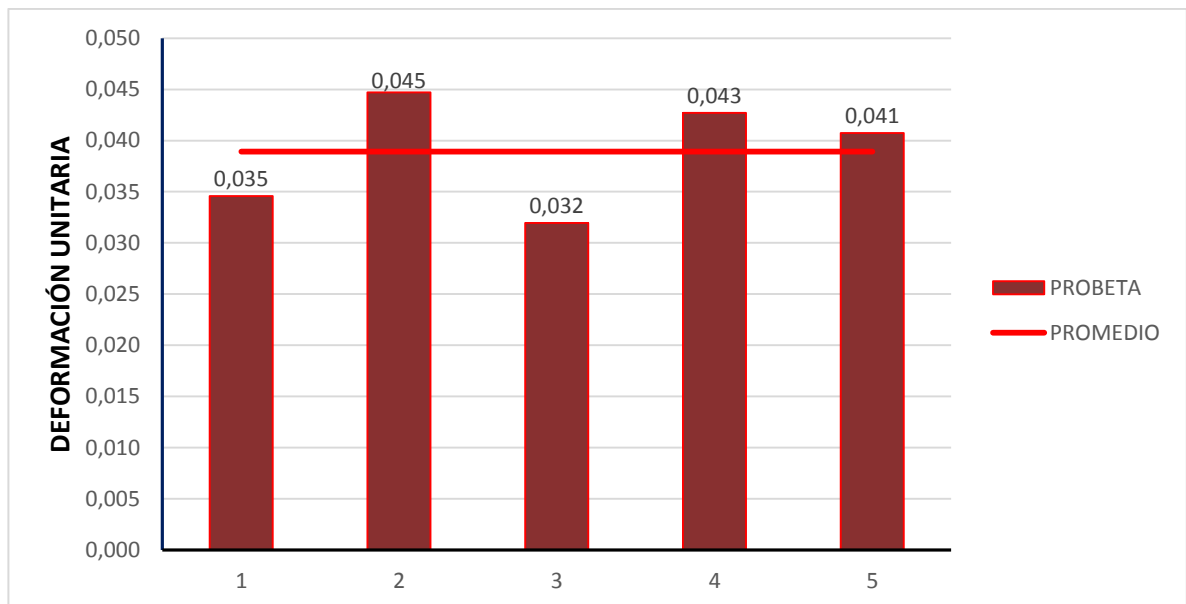
Tabla 13. Datos del ensayo a tensión para el tejido cuatriaxial a 90°.

TEJIDO CUATRIAXIAL A 90°		
PROBETA	DESPLAZAMIENTO [mm]	CARGA DE ROTURA [KN]
1	3,977	4,777
2	5,139	5,437
3	3,675	5,272
4	4,910	7,446
5	4,686	6,021

Fuente: Los autores.

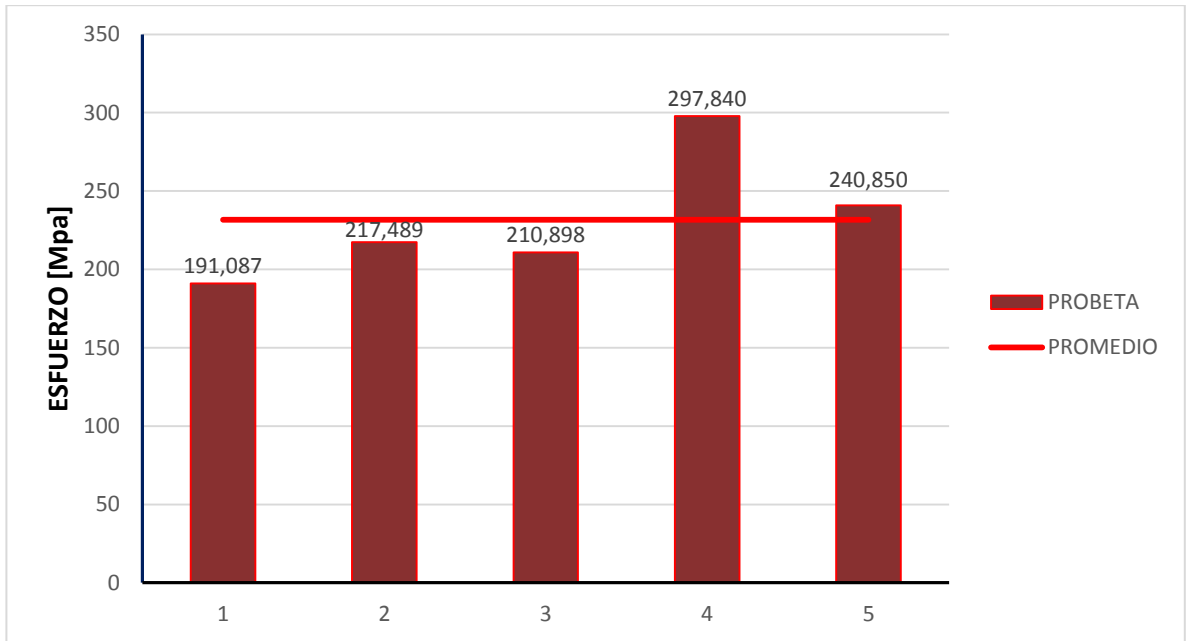
Al estudiar los datos de la tabla anterior (desplazamiento y carga de rotura), se calculó:

Figura 45. Datos de deformación para el tejido cuatriaxial a 90°.



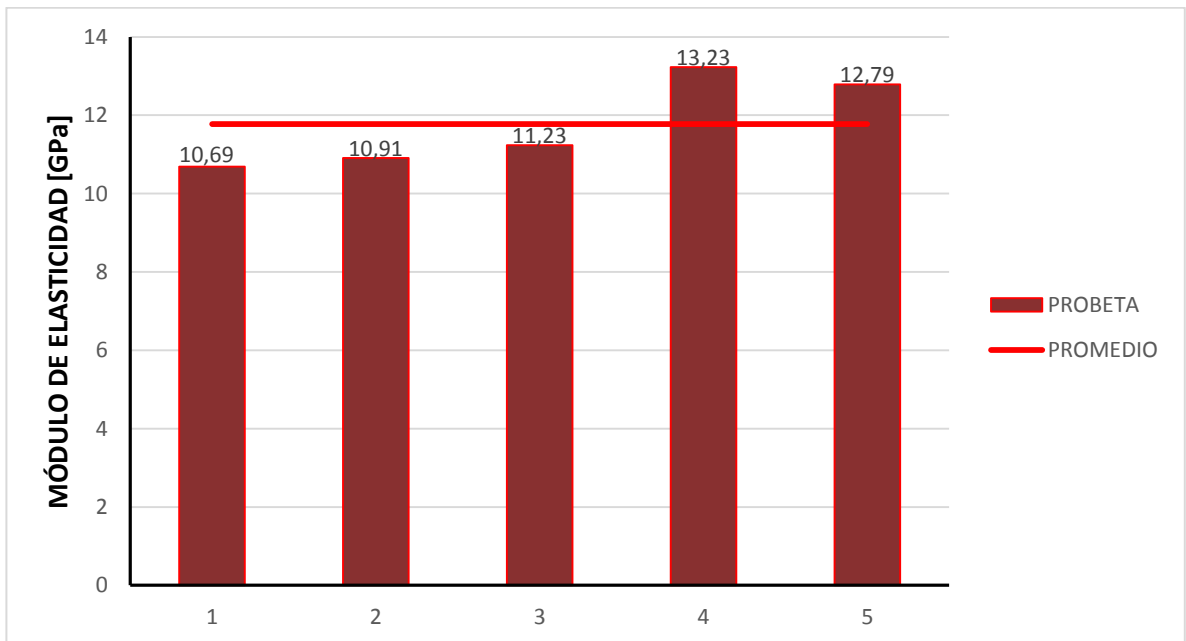
Fuente: Los autores.

Figura 46. Datos de esfuerzo para el tejido cuatriaxial a 90°.



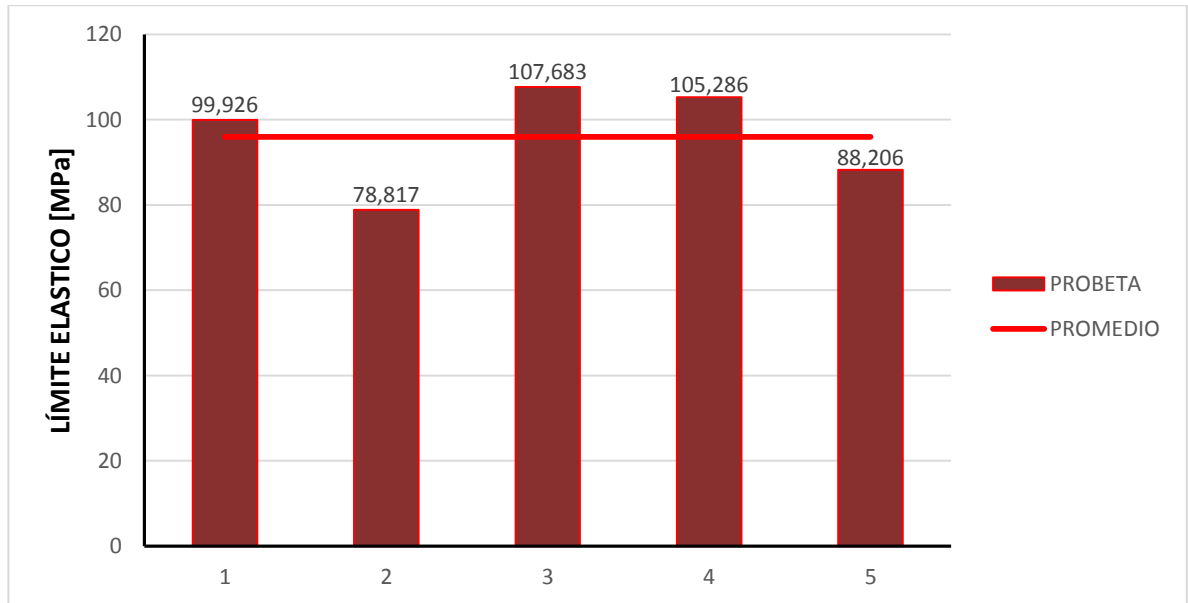
Fuente: Los autores.

Figura 47. Datos de módulo de elasticidad para el tejido cuatriaxial a 90°.



Fuente: Los autores.

Figura 48. Datos de límite elástico para el tejido cuatriaxial a 90°.



Fuente: Los autores.

Al analizar los valores anteriores se procedió a realizar el cálculo estadístico para la probeta de 90°.

Tabla 14. Resultados del ensayo a tensión para el tejido cuatriaxial a 90°.

TEJIDO CUATRIAXIAL A 90°				
PROBETA	DEFORMACIÓN	ESFUERZO [MPa]	MODULO ELASTICIDAD [GPa]	LIMITE ELASTICO [MPa]
Promedio	0,039	231,633	11,772	95,984
Desviación estándar	0,005	41,056	1,158	12,187
Coefficiente de variación	13,966	17,724	9,841	12,697

Fuente: Los autores.

Los resultados obtenidos en el tejido cuatriaxial y su orientación de probeta de noventa grados (90°), se tiene que los valores son; la deformación unitaria un valor de $0,039 \pm 0,005$, el esfuerzo a la tracción un valor de 231 ± 41 [MPa], el módulo de elasticidad es de 11 ± 1 [GPa] y un límite elástico de 95 ± 12 [MPa].

4.2. TEJIDO PLANO

- Para la orientación de cero grados [0°] se muestran los datos obtenidos del ensayo a tracción el cual arroja datos de fuerza y desplazamiento para el tejido plano:

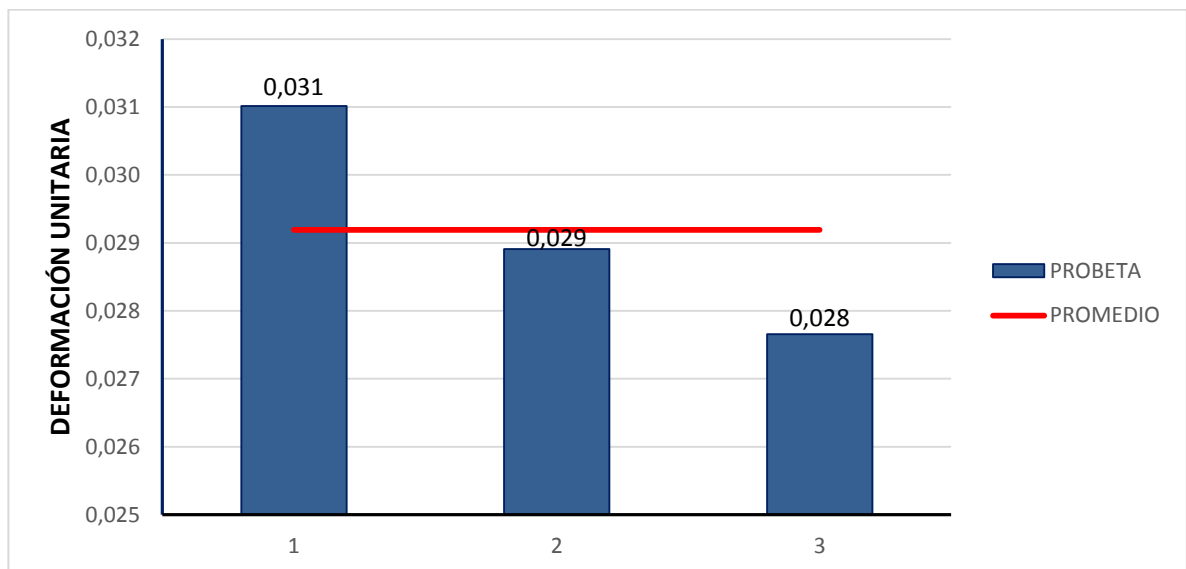
Tabla 15. Datos del ensayo a tensión para el tejido plano a 0°.

TEJIDO PLANO A 0°		
PROBETA	DESPLAZAMIENTO [mm]	CARGA DE ROTURA [KN]
1	5,893	5,450
2	5,453	4,370
3	5,217	5,154

Fuente: Los autores.

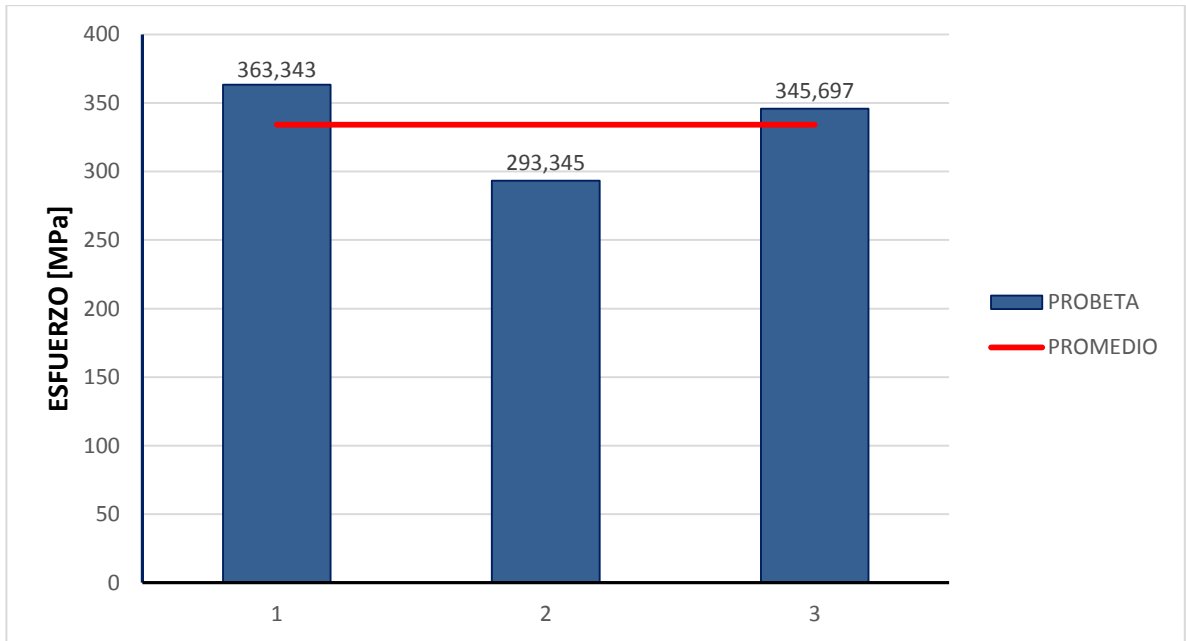
Al estudiar los datos de la tabla anterior (desplazamiento y carga de rotura), se calcularon y representó en las siguientes gráficas la deformación unitaria, el esfuerzo de rotura y el límite elástico:

Figura 49. Datos de deformación para el tejido plano a 0°.



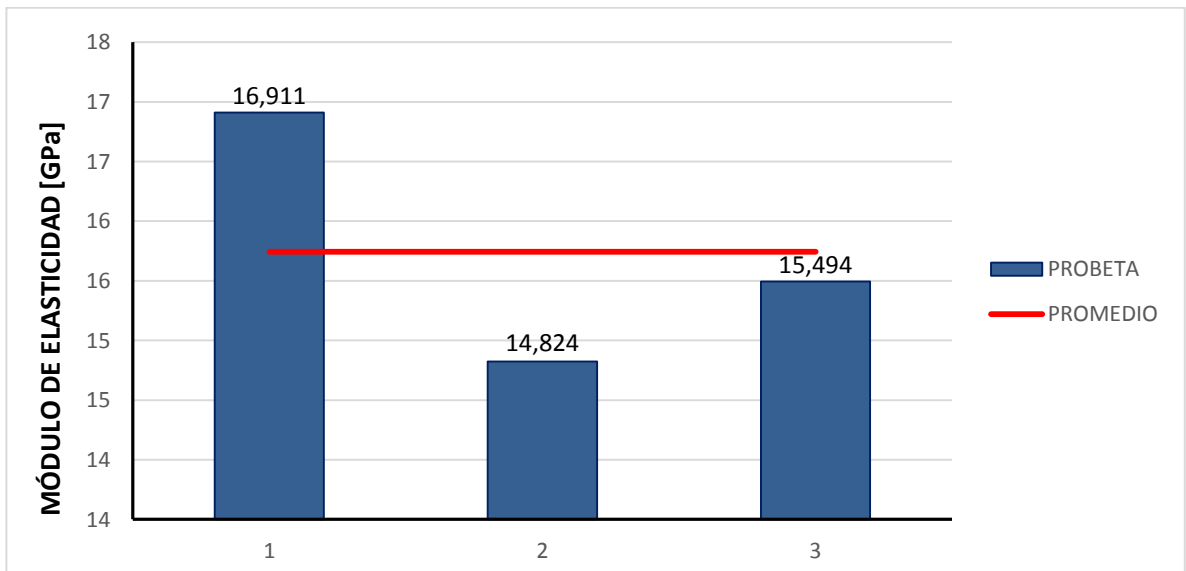
Fuente: Los autores.

Figura 50. Datos de esfuerzo para el tejido plano a 0°.



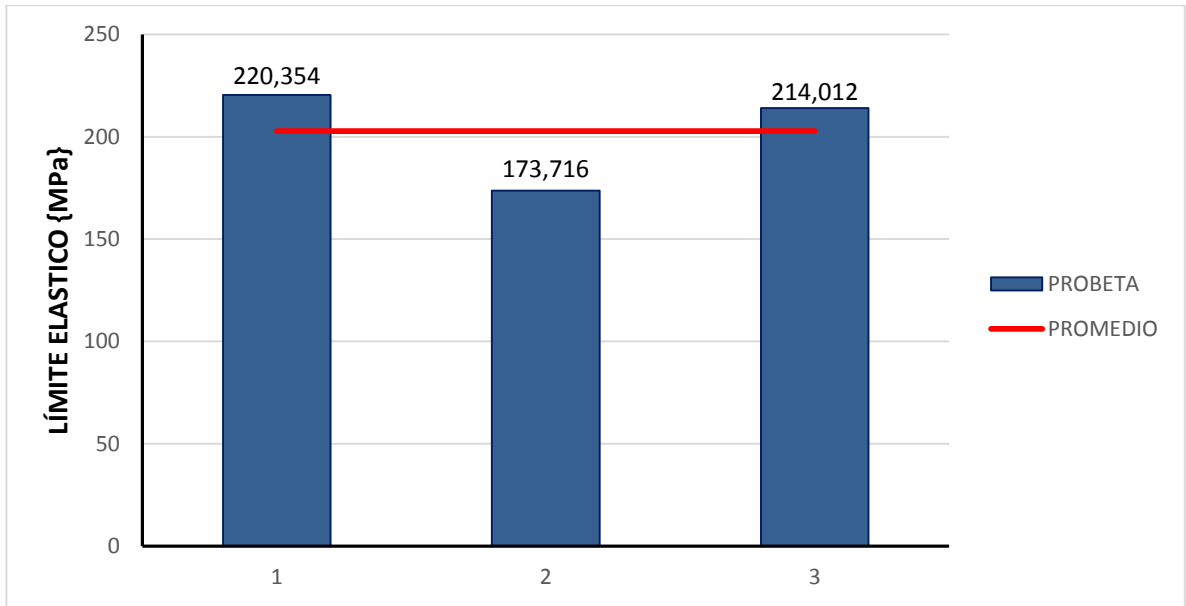
Fuente: Los autores

Figura 51. Datos del módulo de elasticidad para el tejido plano a 0°.



Fuente: Los autores

Figura 52. Datos del límite elástico para el tejido plano a 0°.



Fuente: Los autores

Con los valores anteriores se realiza un cálculo estadístico de valor promedio para la probeta de 0° del tejido plano.

Tabla 16. Resultados del ensayo a tensión para el tejido plano a 0°.

TEJIDO PLANO A 0°				
PROBETA	DEFORMACIÓN	ESFUERZO [MPa]	MODULO ELASTICIDAD [GPa]	LIMITE ELASTICO [MPa]
Promedio	0,029	334,128	15,743	202,694
Desviación estándar	0,002	36,405	1,066	25,295
Coefficiente de variación	5,814	10,895	6,770	12,480

Fuente: Los autores

Para el caso del tejido plano y su orientación de probeta de cero grados (0°), se obtuvo que los valores medios son; la deformación unitaria $0,029\pm 0,002$, el esfuerzo a la tracción un valor de 334 ± 36 [MPa], el módulo de elasticidad es de 15 ± 1 [GPa] y un límite elástico de 202 ± 26 [MPa].

- El ensayo aplicado a las probetas de orientación de cuarenta y cinco grados [45°] para el tejido plano nos da la siguiente información; carga de rotura y desplazamiento:

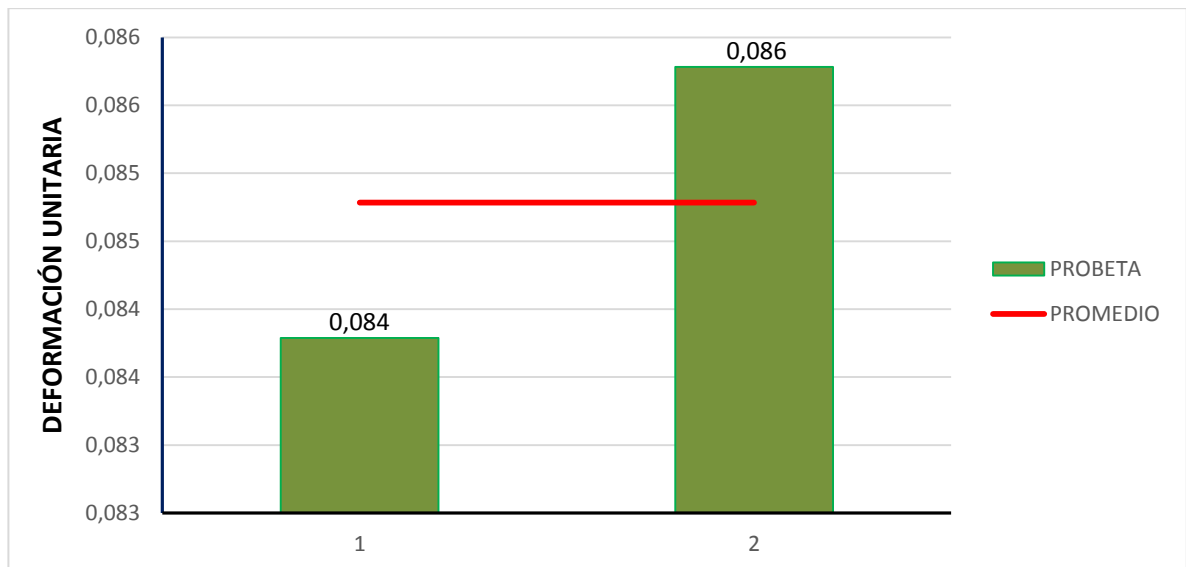
Tabla 17. Datos del ensayo a tensión para el tejido plano a 45°.

TEJIDO PLANO A 45°		
PROBETA	DESPLAZAMIENTO [mm]	CARGA DE ROTURA [KN]
1	15,920	0,745
2	16,232	0,706

Fuente: Los autores.

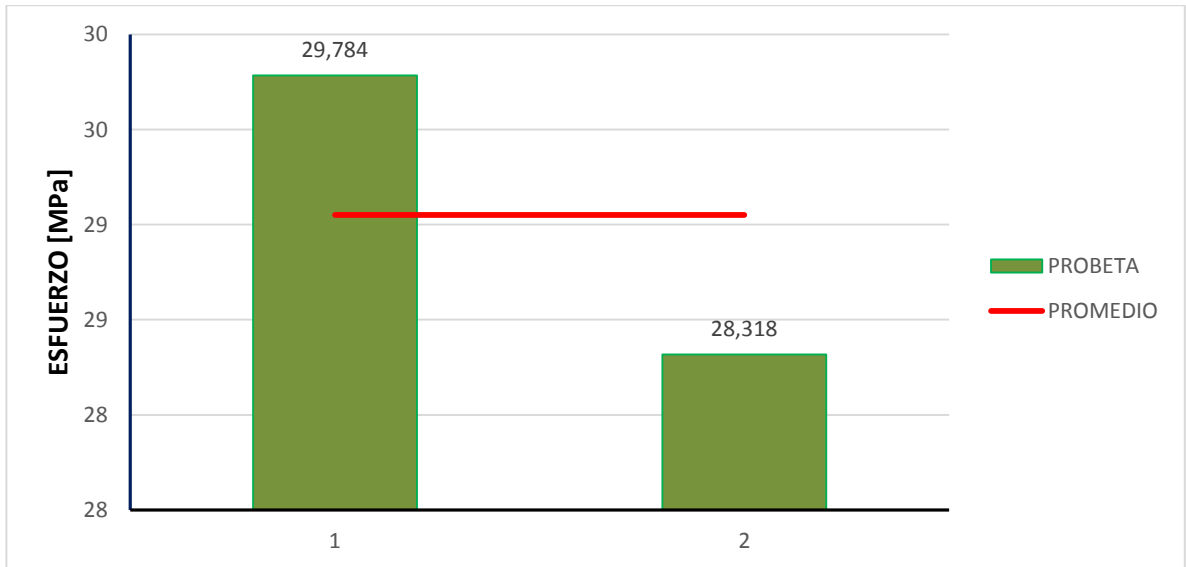
:

Figura 53. Datos de deformación para el tejido plano a 45°.



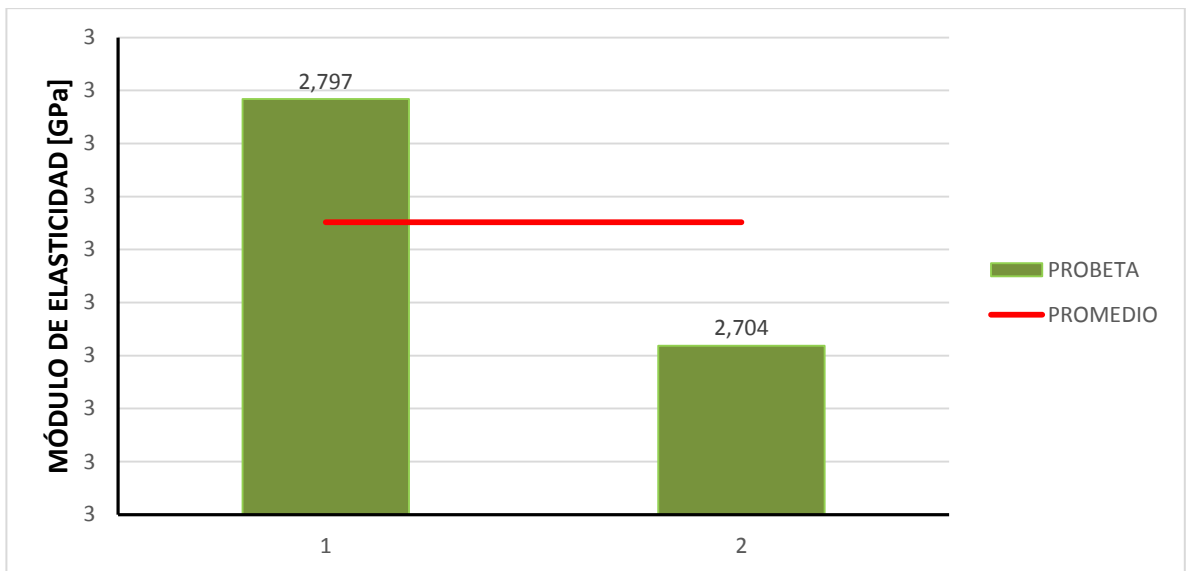
Fuente: Los autores

Figura 54. Datos de esfuerzo para el tejido plano a 45°.



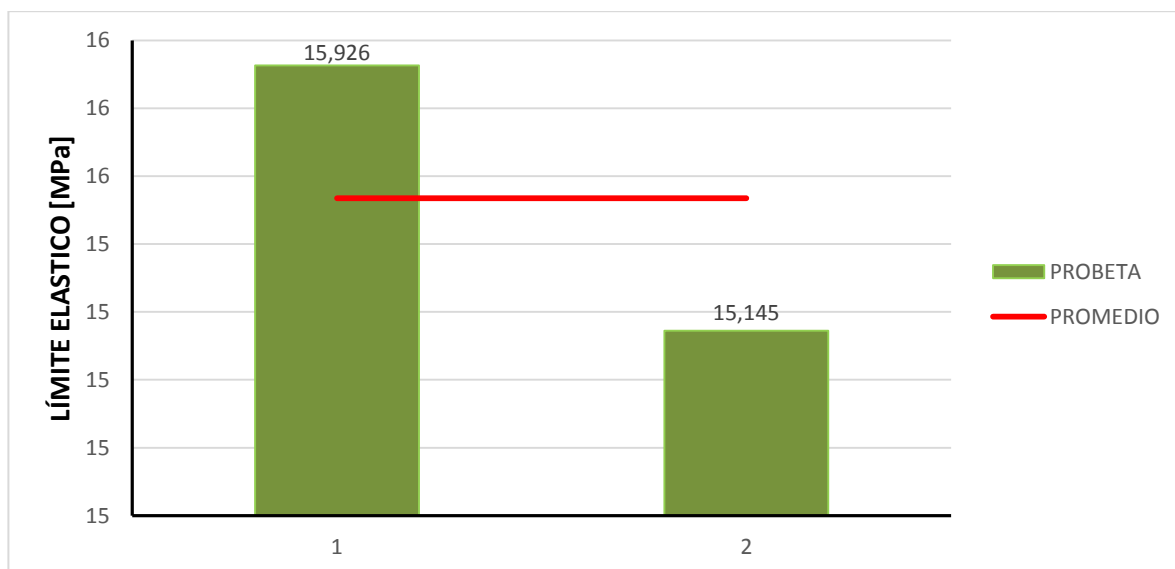
Fuente: Los autores

Figura 55. Datos del módulo de elasticidad para el tejido plano a 45°.



Fuente: Los autores

Figura 56. Datos del límite elástico para el tejido plano a 45°.



Fuente: Los autores

Con los valores anteriores se realiza un cálculo estadístico de valor promedio para la probeta de 45° del tejido plano.

Tabla 18. Resultados del ensayo a tensión para el tejido plano a 45°.

TEJIDO PLANO A 45°				
PROBETA	DEFORMACIÓN	ESFUERZO [MPa]	MODULO ELASTICIDAD [GPa]	LIMITE ELASTICO [MPa]
Promedio	0,085	29,051	2,750	15,535
Desviación estándar	0,001	1,037	0,066	0,553
Coefficiente de variación	1,664	3,569	2,392	3,557

Fuente: Los autores.

Para el caso de estudio particular del tejido plano y su orientación de probeta de cuarenta y cinco grados (45°), se encontró los siguientes valores: la deformación unitaria $0,085 \pm 0,001$, el esfuerzo a la tracción un valor de 29 ± 1 [MPa], el módulo de elasticidad es de $2 \pm 0,1$ [GPa] y un límite elástico de $15 \pm 0,6$ [MPa].

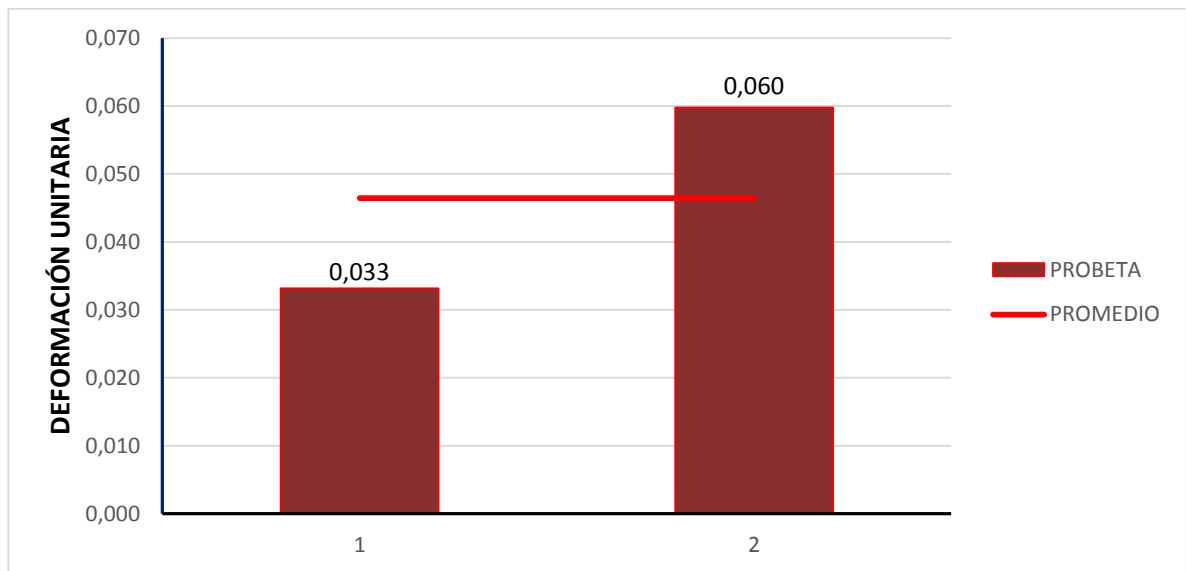
- Para la orientación de noventa grados [90°] se muestran los datos obtenidos del ensayo a tracción el cual presenta los datos de fuerza y desplazamiento para el tejido plano:

Tabla 19. Datos del ensayo a tensión para el tejido plano a 90°.

TEJIDO PLANO A 90°		
PROBETA	DESPLAZAMIENTO [mm]	CARGA DE ROTURA [KN]
1	3,783	3,758
2	6,831	5,875

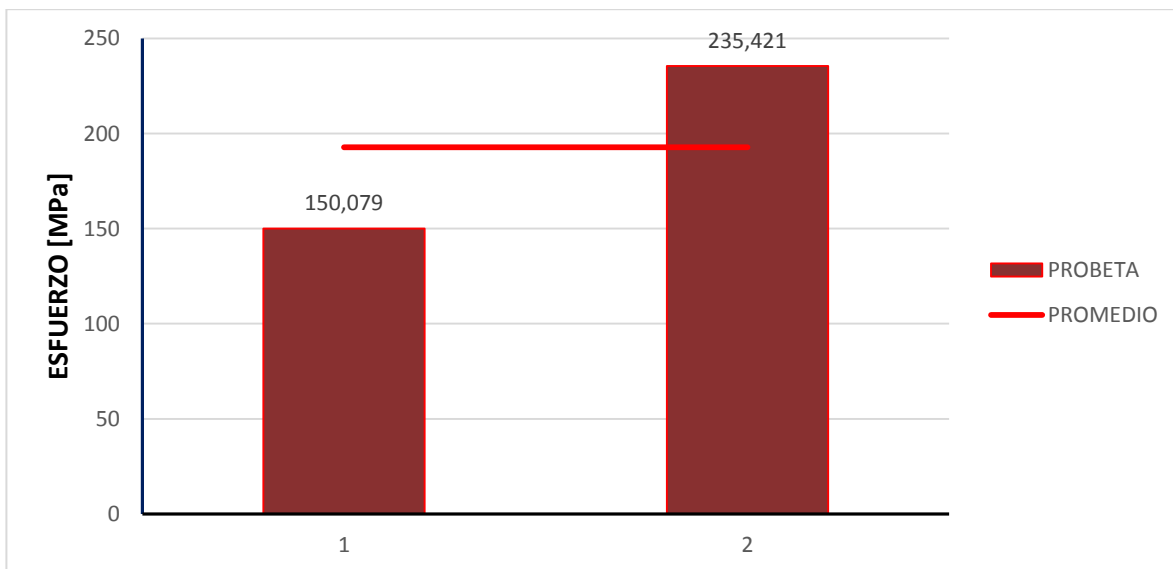
Fuente: Los autores.

Figura 57. Datos de deformación para el tejido plano a 90°.



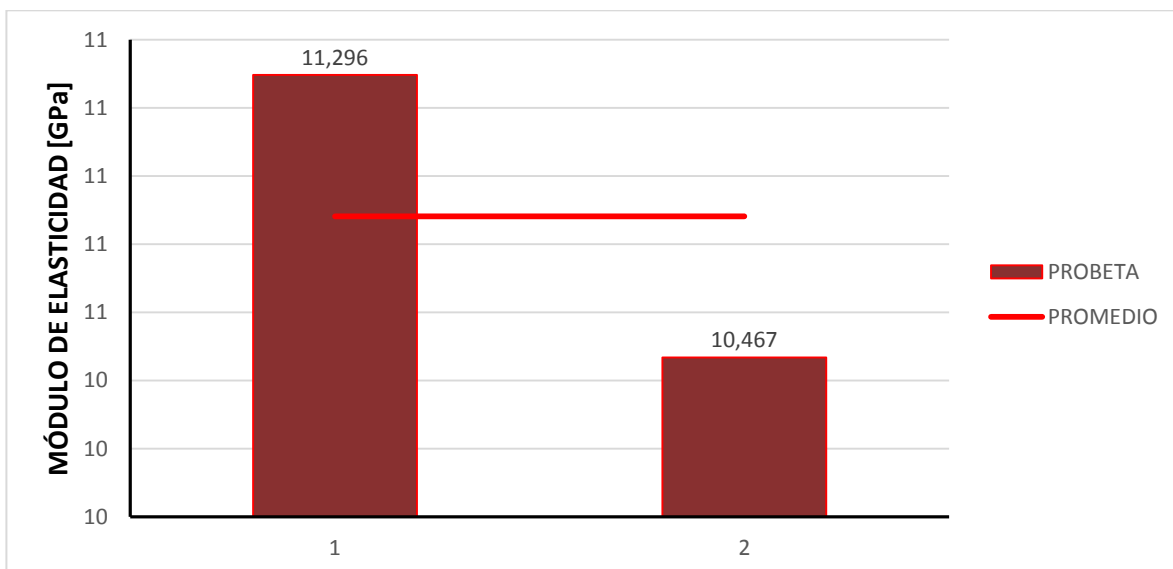
Fuente: Los autores

Figura 58. Datos de esfuerzo para el tejido plano a 90°.



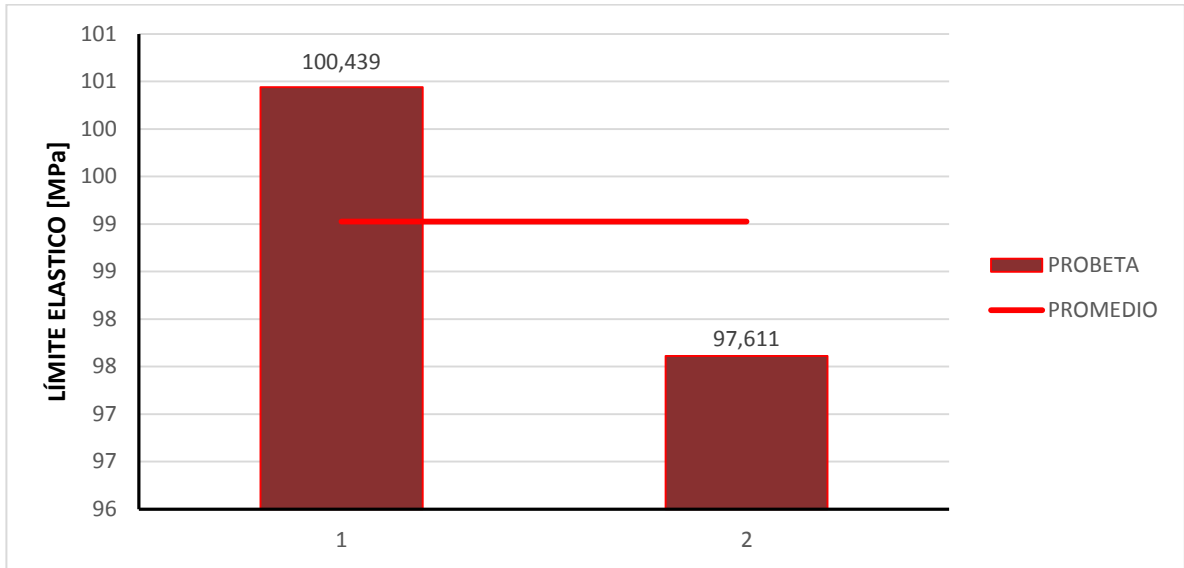
Fuente: Los autores

Figura 59. Datos del módulo de elasticidad para el tejido plano a 90°.



Fuente: Los autores

Figura 60. Datos del límite elástico para el tejido plano a 90°.



Fuente: Los autores

Con la información anterior se hace un análisis estadístico para determinar la media del valor de cada propiedad, cual es la variación y el porcentaje de dicho valor.

Tabla 20. Resultados del ensayo a tensión para el tejido plano a 90°.

TEJIDO PLANO A 90°				
PROBETA	DEFORMACIÓN	ESFUERZO [MPa]	MODULO ELASTICIDAD [GPa]	LIMITE ELASTICO [MPa]
Promedio	0,046	192,750	10,882	99,025
Desviación estándar	0,019	60,346	0,586	2,000
Coefficiente de variación	40,528	31,308	5,386	2,020

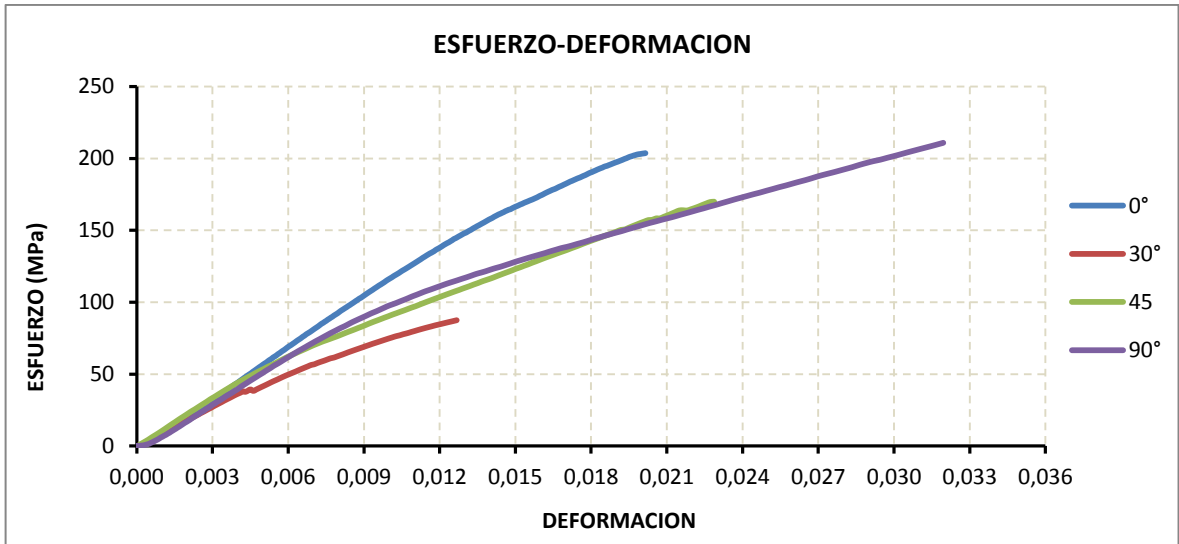
Fuente: Los autores.

Los resultados obtenidos en el tejido plano y su orientación de probeta de noventa grados (90°), se tiene que los valores son; la deformación unitaria con un valor de $0,046 \pm 0,019$, el esfuerzo a la tracción un valor de 192 ± 60 [MPa], el módulo de elasticidad es de 10 ± 1 [GPa] y un límite elástico de 99 ± 2 [MPa].

➤ **TEJIDO CUATRIAXIAL:**

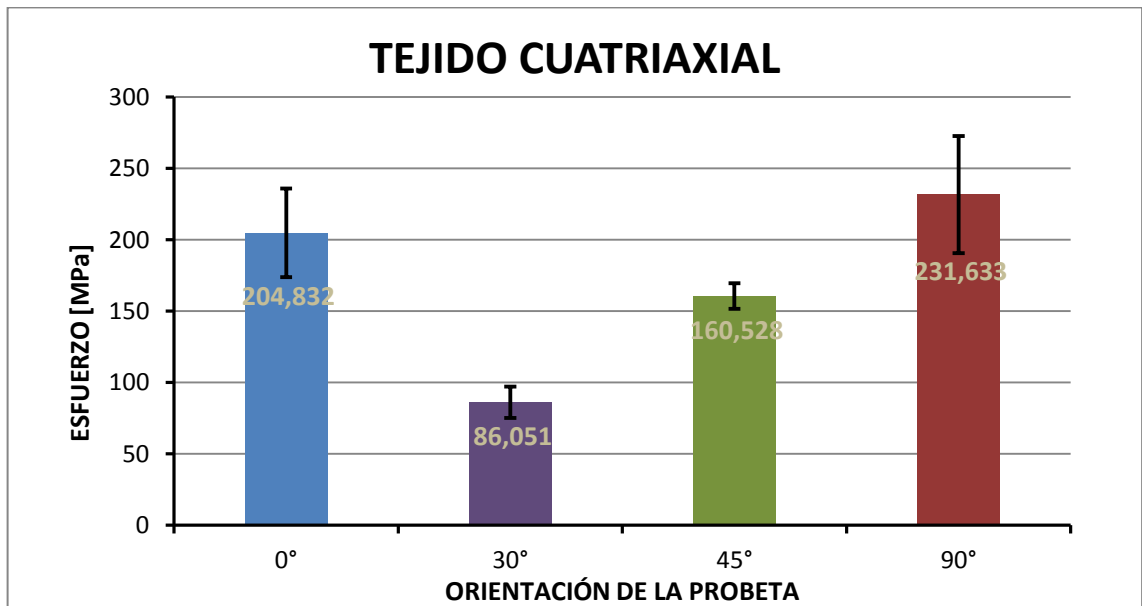
Con los resultados obtenidos se realiza un paralelo entre las diferentes orientaciones para cada tejido como se muestra en las siguientes figuras:

Figura 61. Curvas esfuerzo-deformación diferentes orientaciones tejido cuatriaxial



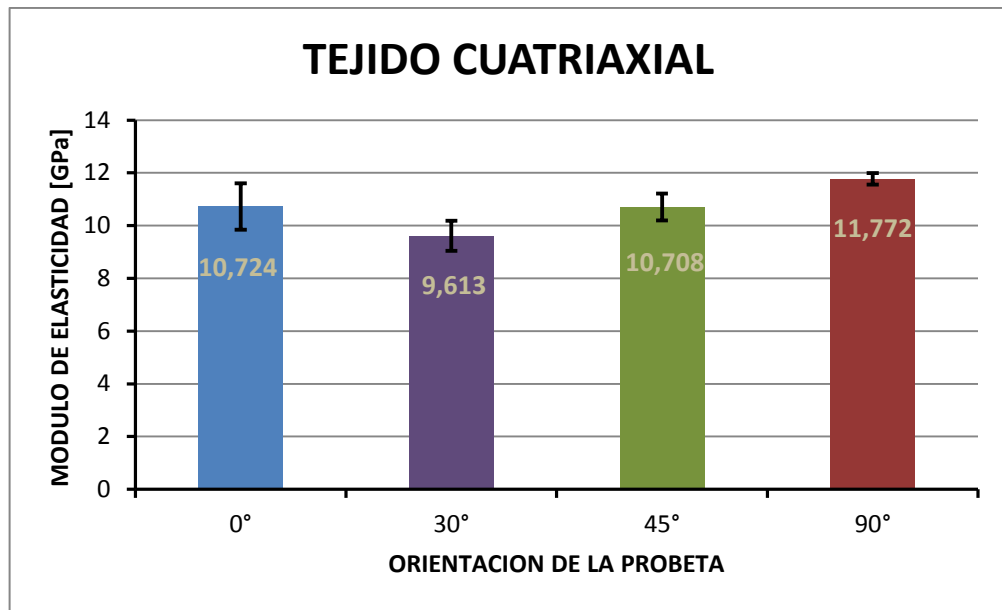
Fuente: Los autores.

Figura 62. Contraste del esfuerzo a diferentes orientaciones en el tejido cuatriaxial.



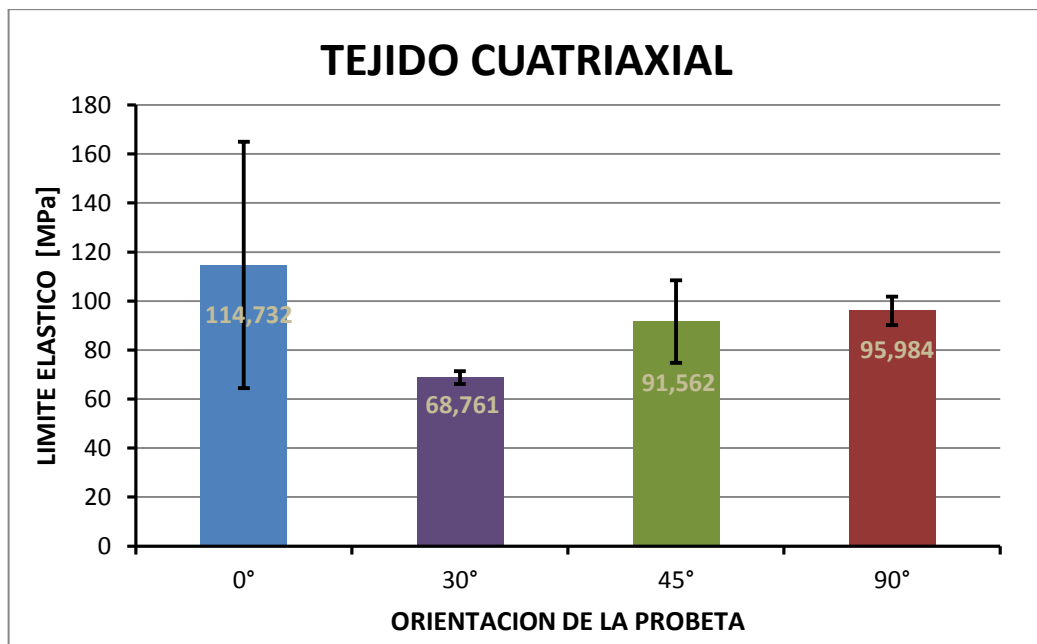
Fuente: Los autores.

Figura 63. Contraste del módulo de elasticidad en diferentes orientaciones en el tejido cuatriraxial



Fuente: Los autores.

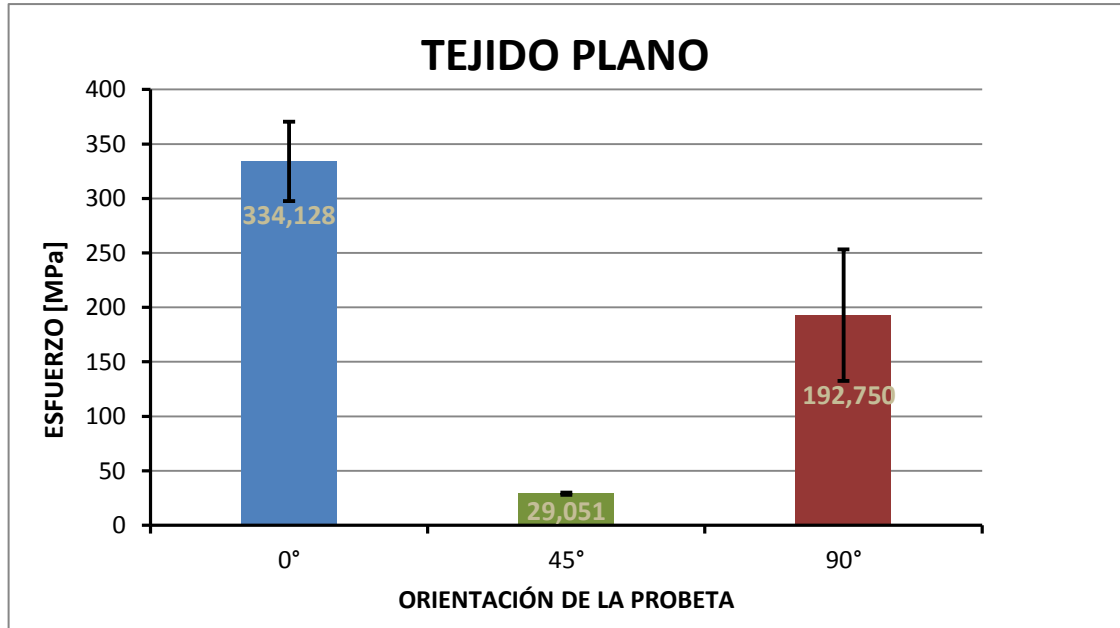
Figura 64. Contraste del límite elástico en diferentes orientaciones en el tejido cuatriraxial



Fuente: Los autores

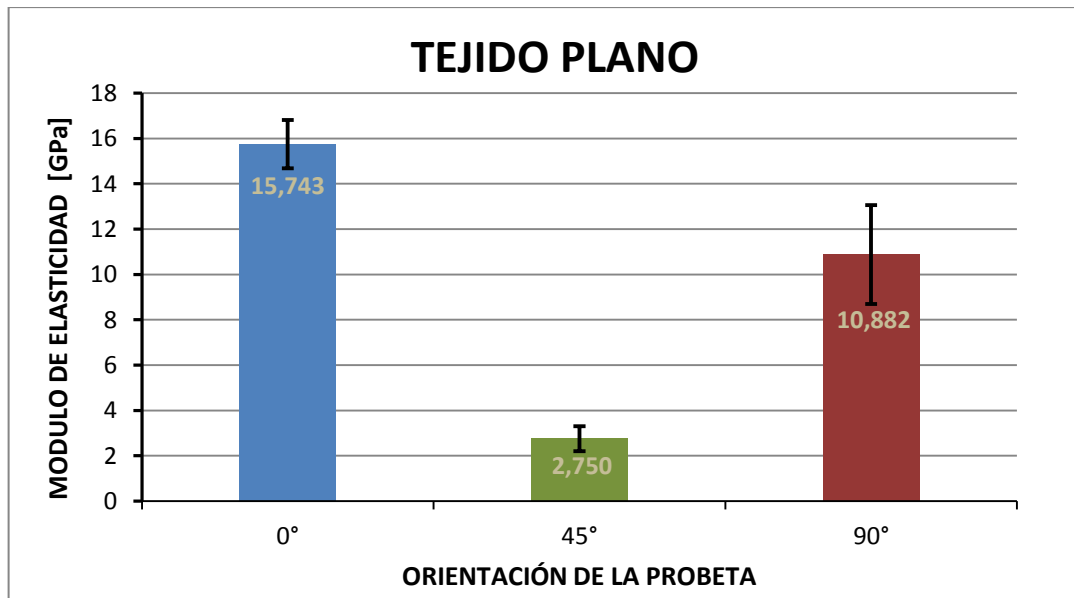
TEJIDO PLANO:

Figura 65. Contraste del esfuerzo diferentes orientaciones en el tejido plano



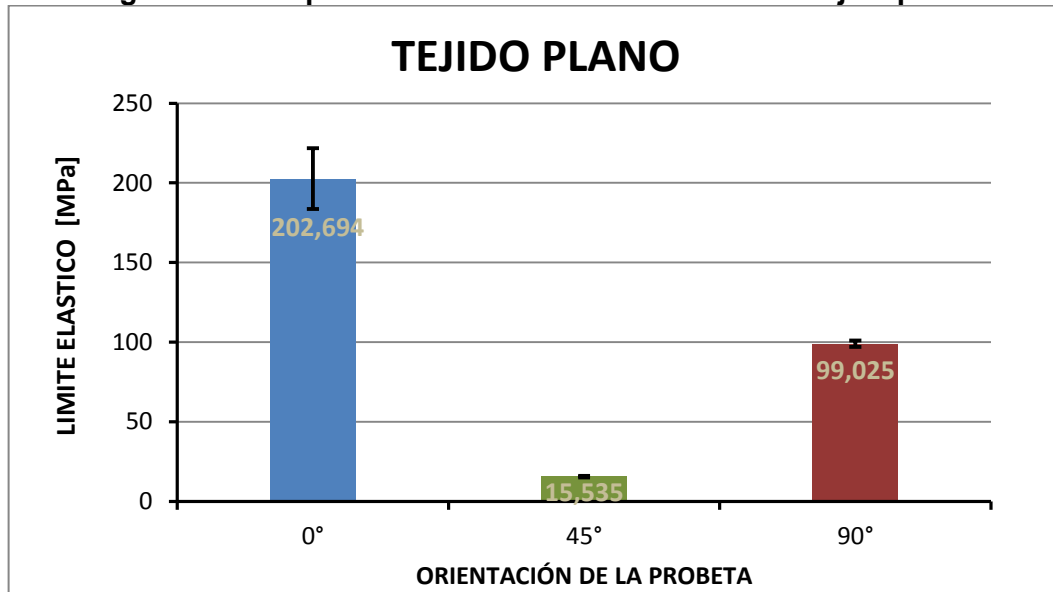
Fuente: Los autores.

Figura 66. Contraste del módulo de elasticidad diferentes orientaciones en el tejido plano



Fuente: Los autores.

Figura 67. Comportamiento del límite elástico en el tejido plano.



Fuente: Los autores.

A continuación se presenta en resumen de las propiedades de esfuerzo y módulo elástico de los tejidos tanto el plano y el cuatriaxial en las diferentes orientaciones de estudio.

Tabla 21. Resultados del ensayo de tensión.

		ESFUERZO [MPa]	MODULO ELASTICO [GPa]	LIMITE ELASTICO [MPa]
TEJIDO PROPUESTO	0°	204±31	10±1	114±57
	30°	86±11	9±1	68±5
	45°	160±9	10±0,5	91±15
	90°	231±41	11±1	95±12
TEJIDO PLANO	0°	334±36	15±1	202±26
	45°	29±1	2±0,1	15±0,6
	90°	192±60	10±1	99±2
FIBRA		690±84	65±4	671±88

Fuente: Los autores.

4.3. ANÁLISIS DEL TEJIDO CUATRIAXIAL.

En la Figura 62 se puede observar el comportamiento de las probetas en las diferentes orientaciones por conocimiento previo se tiene que el material tiene un alto valor de resistencia en la dirección en que están orientadas las fibras, esto se puede observar en el caso de las orientaciones cero (0°), noventa (90°) y cuarenta y cinco (45) que tiene los valores más altos de resistencia a la tracción en contraste con la orientación de treinta grados en esta dirección no están orientadas las fibras por lo cual presenta el valor más bajo del esfuerzo. Al contrastar la dirección de treinta (30°) con respecto a la orientación cero (0°) es más pequeño el valor en un 58%, con la orientación noventa (90°) es menor en un 63% y con respecto a la orientación de cuarenta y cinco (45°) es menor en un 46%.

Al comparar la respuesta de la orientación de cuarenta y cinco (45°) con respecto de las dos orientaciones a las cuales se le realizó el ensayo en la dirección en que contiene las fibras se puede ver que la de cuarenta y cinco (45°) presentó un valor menor con respecto a la orientación de cero (0°) en un 22% y con respecto a la de noventa (90°) en un 31%. De la misma forma al hacer un paralelo del porcentaje en que es menor la orientación de treinta (30°) y cuarenta y cinco (45°) con respecto a las orientaciones de cero y noventa (0° y 90°) se presenta que la orientación de cuarenta y cinco tiene un valor mayor del esfuerzo en un 36% en la dirección cero (0°) y un 32% en la dirección de noventa (90°) con respecto a la orientación de treinta (30°).

En la figura 63 se puede observar los valores obtenidos del módulo de elasticidad según la dirección en que se orientó la probeta, el valor promedio del tejido cuatriaxial es de $10,70 \pm 0,882$ [GPa], lo cual indica que no presenta una desviación estándar significativa en el valor del módulo, el valor de la desviación estándar es de 0,882.

Al estudiar el comportamiento del límite elástico (Figura 64) en el tejido cuatriaxial se halló que las direcciones donde la probeta está orientada junto con la fibra se obtuvieron valores más cercanos y un valor alejado en la dirección donde ninguna fibra está orientada. Al comparar la dirección de treinta (30°) con respecto a las otras orientaciones se puede ver una reducción del límite elástico con respecto a la de cero (0°) de un 40%, con la dirección de noventa (90°) de un 28,4%, finalmente con la de cuarenta y cinco (45°) de un 25%. Así mismo al analizar la dirección de cuarenta y cinco grados con las demás orientaciones que tiene la fibra en la misma dirección (0° y 90°) se encontró un valor menor comparada con la dirección cero (0°) de un 20% y con la dirección de noventa (90°) de un 5%.

Por lo cual se puede percibir que la probeta en la dirección de cuarenta y cinco (45°) con respecto a la de treinta (30°) presenta un valor mayor en la dirección cero (0°) de un 20% y en la dirección de (90°) de un 23%. Por lo tanto, se puede decir que era esperado que en la dirección en donde no este orientadas las fibras tenga un valor más bajo al tener las dos direcciones de cuarenta y cinco y menos cuarenta y cinco (45° y -45°) se obtuvo un valor más alto en la dirección deseada y un valor significativo en la dirección donde no se encontraba el tejido haciendo el material más isotrópico que con la configuración del tejido plano.

4.4. ANÁLISIS DEL TEJIDO PLANO.

El comportamiento del esfuerzo en el caso del tejido plano (Figura 65) presenta variaciones significativas según la orientación de la probeta. La orientación cero (0°) y noventa (90°) grados poseen fibras en dichas direcciones mientras la orientación de cuarenta y cinco grados (45°) no tiene fibras en esa orientación y se puede ver que el valor del esfuerzo es menor que el de cero (0°) en un 91% y con respecto a la orientación de noventa (90°) es menor en un 85% lo que nos evidencia que el tejido plano en la dirección en la cual no se encuentra orientada una fibra disminuye significativamente.

Al revisar la variación del valor del módulo de elasticidad en las diferentes orientaciones del grupo de probetas de tejido plano (Figura 66) se encuentra que el comportamiento en la dirección de cuarenta y cinco no conserva un valor similar, por el contrario presenta un valor bastante menor con respecto a las orientaciones de cero y noventa grados (0° y 90°) al compararla con la orientación de cero (0°) es menor en un 83% y con la orientación de noventa (90°) es menor en un 75% se puede decir que tiene un comportamiento no homogéneo con respecto a esta propiedad la variación es alta.

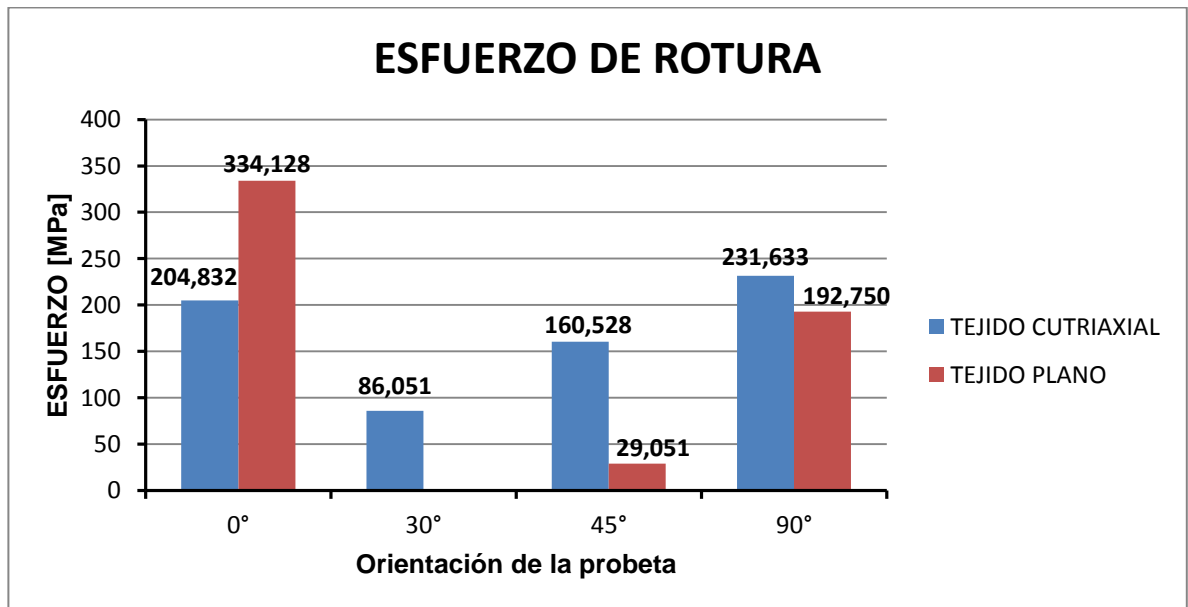
Al examinar los valores del límite elástico en las probetas del tejido plano en las diferentes orientaciones (Figura 67) se puede observar un menor valor de esta propiedad en la dirección en la cual no se encuentran orientadas las fibras (45°). Al comparar la orientación de cuarenta y cinco (45°) con la de cero grados (0°) se encuentra que es menor en un 92% y al compararla con la de noventa grados (90°) su valor es menor en un 84%.

4.5. ANALISIS COMPARATIVO DEL COMPORTAMIENTO DE LOS TEJIDOS

En el siguiente gráfico (Figura 68) se tienen el valor del esfuerzo de cada orientación de probeta según el tejido (plano o cuatriaxial), se puede observar que en la dirección cero (0°) el tejido cuatriaxial es menor en un 39% esto se presenta porque el tejido plano tiene un mayor número de fibras en la probeta para esta orientación con respecto a al tejido propuesto, en la dirección de noventa grados (90°) se puede ver que el valor del tejido plano es menor que la del cuatriaxial en un 17% aun cuando este posee más fibras en esta orientación. En el caso de cuarenta y cinco grados (45°) el tejido plano no tiene fibras orientadas en esa dirección lo que representa un valor menos en un 82%.

Por lo cual se puede decir que en el tejido cuatriaxial el valor del esfuerzo es menor que el tejido plano solo en la dirección cero (0°) en un 39% al poseer el tejido plano mayor número fibras en esa orientación, mayor en la orientación de noventa (90°) en un 17% y en el caso de cuarenta y cinco donde se agregó las fibras en esa dirección el valor es mayor en un 82%

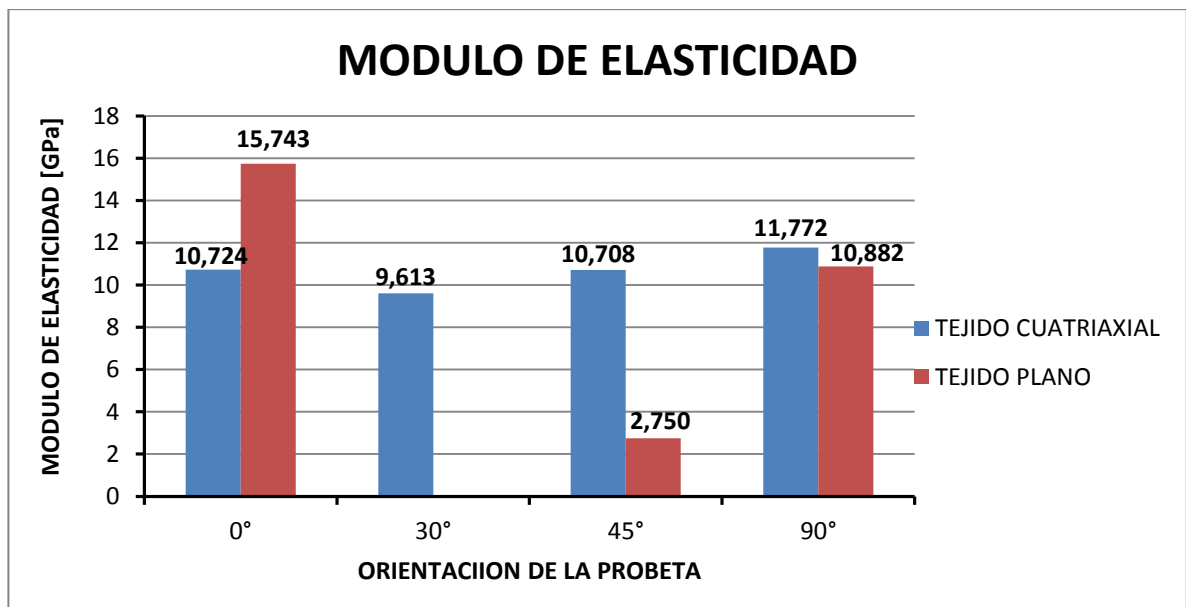
Figura 68. Gráfica comparativa del esfuerzo de los tejidos.



Fuente: Los autores.

En la figura 69 se muestra el comportamiento del módulo de elasticidad según la orientación en los diferentes tejidos, al analizar el comportamiento general el tejido cuatriaxial tiene una variación pequeña con una desviación estándar de un 0,882 comparada con la desviación del tejido plano de un 6,565. Al comparar la dirección de cero (0°) el tejido plano tiene un valor mayor en un 32%, en la dirección de noventa (90°) el tejido cuatriaxial es mayor en un 8% y en la dirección de cuarenta y cinco (45°) es mayor en un 74%.

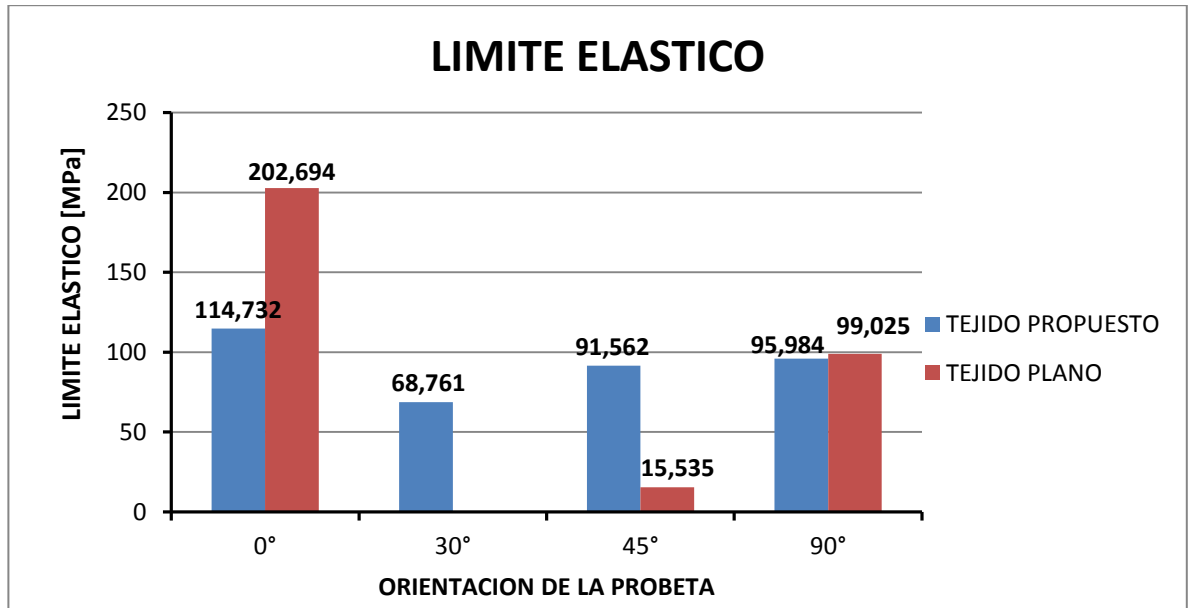
Figura69. Gráfica comparativa del módulo de elasticidad de los tejidos.



Fuente: Los autores.

El límite elástico de los diferentes tejidos se presenta en la figura 70 en el que se puede observar que el tejido cuatriaxial presenta valores más bajos del límite elástico en las orientaciones cero y noventa (0° y 90°), en la orientación de cero (0°) es menor en un 43% y con la orientación de noventa (90°) es menor en un 3%. En la orientación de cuarenta y cinco (45) el tejido cuatriaxial es mayor en un 83% en el cual el tejido plano no posee fibras en esa dirección.

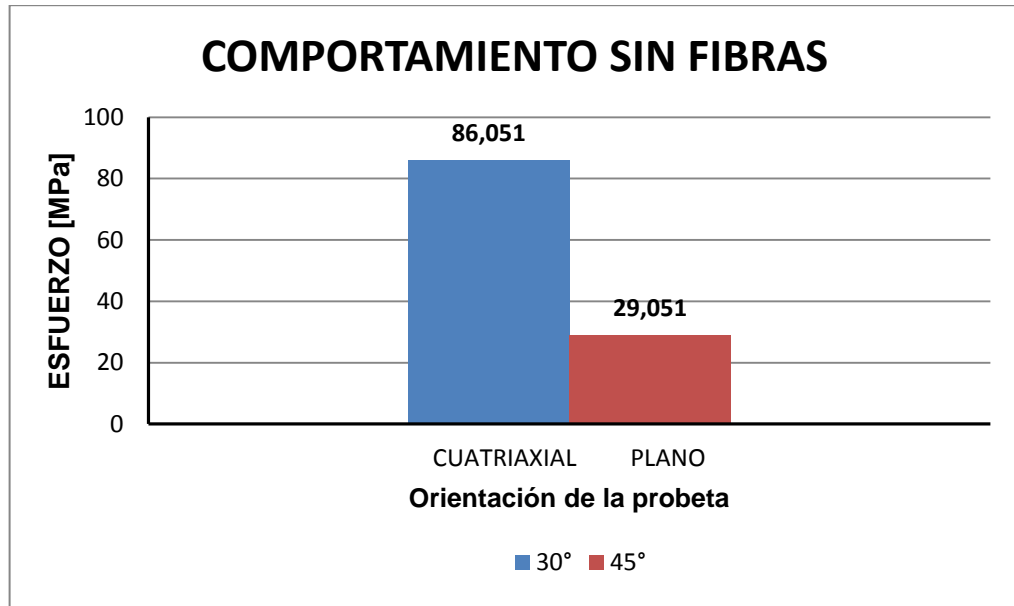
Figura 70. Gráfica comparativa del Límite elástico de los tejidos.



Fuente: Los autores.

En la figura 71 se puede ver las probetas de cada tejido que fueron cortadas en un ángulo en el cual no tenían orientadas las fibras, en el tejido plano la dirección en la cual no se tienen fibras es la de cuarenta y cinco (45°) y en el tejido propuesto es la de treinta grados (30°) y se puede observar que el en este caso el comportamiento del tejido cuatriaxial es mayor el valor del esfuerzo en un 66% que el del tejido plano.

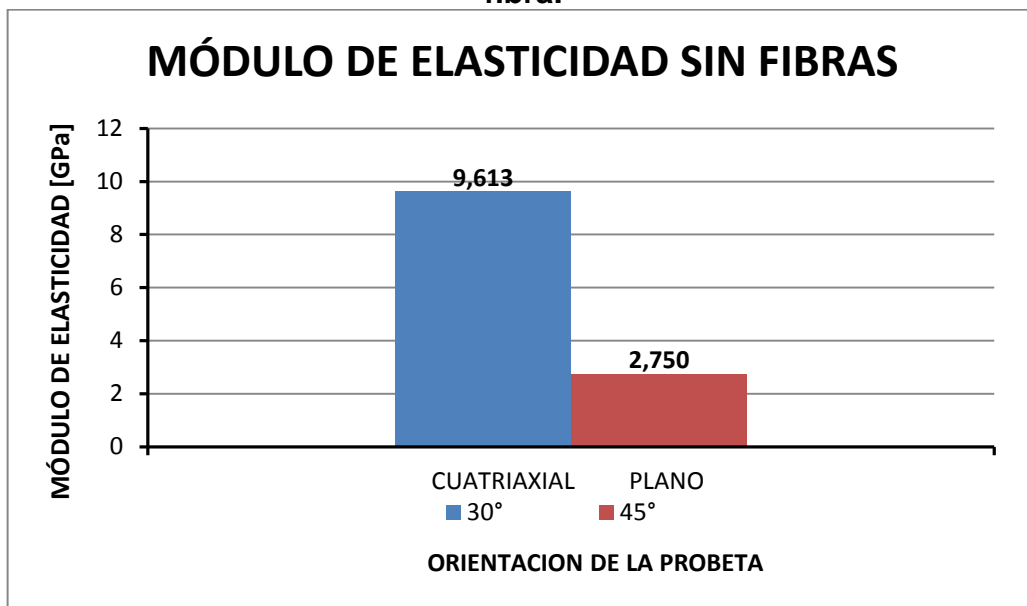
Figura 71. Gráfica comparativa del esfuerzo en la dirección sin fibra.



Fuente: Los autores.

Al analizar la figura 72 en la cual se encuentra los valores del módulo de elasticidad para el tejido plano y cuatriaxial en la dirección en la cual no hay fibras orientadas se puede ver que el tejido cuatriaxial presenta un valor mayor de un 71% que el tejido plano.

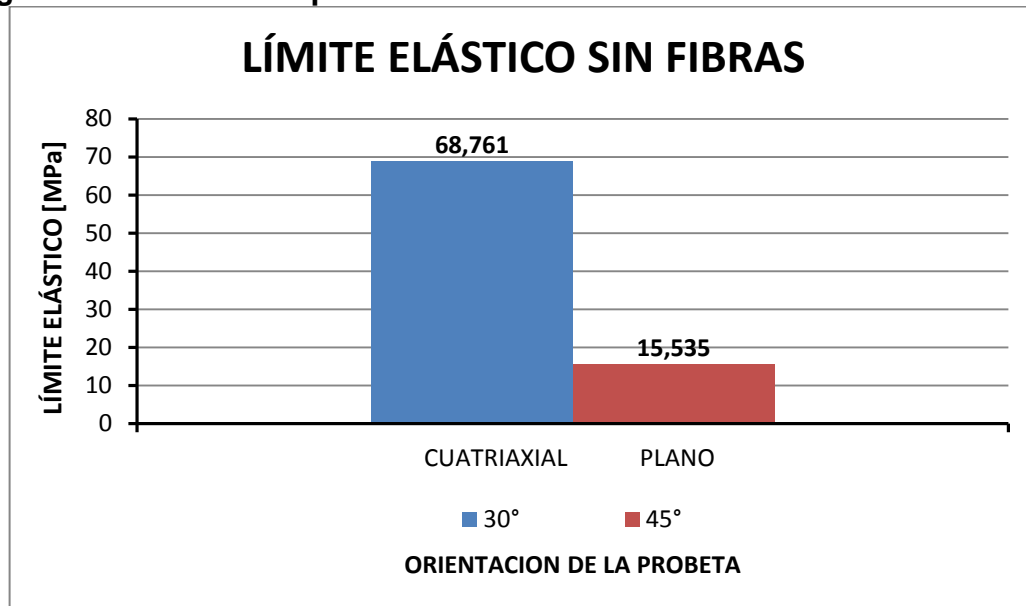
Figura 72. Gráfica comparativa del módulo de elasticidad en la dirección sin fibra.



Fuente: Los autores.

Los valores del límite elástico de los tejidos estudiados en la dirección en la cual no se encuentran fibras orientadas se presentan en la figura 73 donde se observa que el tejido cuatriaxial es mayor el valor del límite elástico en un 77% con respecto al tejido plano.

Figura 73. Gráfica comparativa del límite elástico en la dirección sin fibra.



Fuente: Los autores.

5. CONCLUSIONES

Como resultado del estudio del comportamiento a tensión de un material compuesto con matriz polimérica reforzada con fibras de carbono realizado bajo la norma ASTM D3039/D3039M-14 se puede concluir que:

- El tejido cuatriaxial tiene mayor valor del esfuerzo en todas las orientaciones que el tejido plano excepto en la dirección de cero grados (0°) puesto que en esta orientación tiene un mayor número de fibras.
- Para el valor del módulo en el tejido cuatriaxial no representa una variación significativa su desviación estándar es del 0,882 comparado con el tejido plano que presenta una desviación estándar del 6,565.
- En cuanto al límite elástico el tejido cuatriaxial es mayor solo en la dirección en la cual no posee fibras.
- En el caso del esfuerzo de rotura el tejido cuatriaxial presenta un valor mayor en un 66%, un valor mayor del módulo de elasticidad en un 71% y un valor mayor del límite elástico en un 77% con respecto del tejido plano en la orientación donde no presenta fibras.

Con lo anterior se puede concluir que el tejido cuatriaxial presenta mejores propiedades mecánicas en las direcciones en las que no presenta fibras comparado con el tejido plano, así mismo mejores propiedades de esfuerzo y módulo de elasticidad en las otras orientaciones. Al tener un tejido con mayores prestaciones se necesitan menos capas del mismo para realizar una pieza, esto nos da una pieza más delgada y más ligera al tener menor espesor con buenas propiedades mecánicas.

- Se determinaron las propiedades mecánicas del material compuesto para caracterización del mismo obtenidas del ensayo de tracción, las propiedades halladas fueron límite elástico, módulo de elasticidad y esfuerzo último a la tensión para cada orientación de las probetas los valores hallados fueron los siguientes: Para el tejido cuatriaxial (propuesto) en la orientación de 0° el valor del esfuerzo ultimo de rotura fue de 204 [MPa], el valor del módulo de elasticidad fue 10 [GPa], el valor del límite elástico fue 114 [MPa]; en la orientación de 30° el valor del esfuerzo ultimo de rotura fue de 86 [MPa], el valor del módulo de elasticidad fue 9 [GPa], el valor del límite elástico fue 68 [MPa]; en la orientación de 45° el valor del esfuerzo ultimo de rotura fue de 160 [MPa], el valor del módulo de elasticidad fue 10 [GPa], el valor del límite elástico fue 86 [MPa]; en la orientación de 90° el valor del esfuerzo último de rotura fue de 231 [MPa], el valor del módulo de elasticidad fue 11 [GPa], el valor del límite elástico fue 95 [MPa].

6. RECOMENDACIONES

Para estudios posteriores basados en la temática tratada en este documento se realizan las siguientes recomendaciones:

Para tener una mayor continuidad del tejido y disminuir la aparición de espacios vacíos, se considera apropiado no dejar una luz entre los pares horizontales y verticales, con lo que se reduce el espacio del agujero hexagonal que se forma de manera derivada por el tipo de tejido utilizado. Así mismo, se considera que la utilización de una fibra de menor número de hilos (1k, 2k, 3k, etc.) en vez de una de 12 k (como la utilizada en este proyecto) contribuirá a generar un tejido menos disperso dado que el ancho de este tipo de fibra es menor.

Con el fin de evaluar resultados y compararlos con otros estudios de la literatura, se recomienda que las probetas se elaboren con varias capas de tejido apiladas en diferentes orientaciones. Estas configuraciones pueden arrojar datos significativos en cuanto a resistencia del material y permitir ampliar el campo de estudio; un ejemplo de ello es mezclar el tejido propuesto junto con otro tejido comercial, de forma intercalada, con el fin de evaluar la influencia del tipo de tejido estudiado con los tejidos disponibles en el mercado.

Las dimensiones y parámetros básicos se definieron siguiendo las recomendaciones de la norma ASTM D3039. Sin embargo, la realización de pruebas con variaciones de datos como: largo, ancho, velocidad de desplazamiento del cabezal móvil de la máquina de prueba arrojarían una diferencia de datos significativos que permitiría definir las condiciones óptimas del ensayo, como por ejemplo, definir las dimensiones que provocan que la probeta falle en la mitad de sus longitudes garantizando un esfuerzo uniforme y por ende mejor confiabilidad en los datos obtenidos.

Por último, teniendo en cuenta las herramientas computacionales actuales, se recomienda trabajar en el modelado numérico de las características del

comportamiento de este tipo de materiales y tejidos a la tracción. Las diversas investigaciones disponibles en la literatura pueden servir de fuente para obtener datos con los cuales alimentar y validar los modelos planteados. Tal modelamiento, contribuiría a disminuir tiempo y recursos en pruebas experimentales.

BIBLIOGRAFIA

AMERICAN SOCIETY OF TESTING MATERIALS. Standard Test Method for Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Materials. West Conshohocken, 2014. P.6. ASTM D3039/D3039M – 14.

ARAYA, Yuniesky. Análisis y diseño de materiales compuestos de fibra de vidrio. (Trabajo de grado). Santa clara. Universidad Central “Marta Abreu” de las Villas, Facultad de Construcciones, Departamento de Ingeniería Civil, 2009. P.31-32

BAYER, Jordi. Valoración de materiales compuestos de HDPE reforzados con fibras de agave sisalana. Aproximación a un paradigma de geometría fractal para las fibras. (Tesis Doctoral). Gerona. Universidad de Gerona, 2013. P.9.

BESEDNJAK, Alejandro. Materiales Compuestos procesos de fabricación de embarcaciones, 2005, P.8.

GARCÍA, Shirley. Análisis de laminados de materiales compuestos con precarga en su plano y sometidos a impacto. (Tesis Doctoral). Madrid. Universidad Carlos III de Madrid. Departamento de mecánica de medios continuos y teoría de estructuras, 2007. P.15.

GROOVER, Mikel. Fundamentos de manufactura moderna. México, Prentice-Hall, 1997, P.235.

HULL, Derek. Materiales Compuestos. Barcelona, Reverté, 1987. P.3-4.

INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TECNICAS. Norma técnica colombiana para documentación, presentación de tesis, trabajos de grado y otros trabajos de investigación. Sexta actualización. Santa fe de Bogotá. D.C.: ICONTEC, 2008. P.7-32. NTC 1486.

LLANO, Carolina. Fibra de Carbono, Presente y futuro de un material revolucionario. Revista metal actual, (s.f). P. 14.

MIRAVETE, Antonio. Materiales compuestos I. Barcelona, Reverté, 2007, P.24.

-----, Antonio. Materiales compuestos II. Barcelona, Reverté, 2007, P.1073

SANCHEZ, Laura. "Análisis mecánico y fisicoquímico de un material compuesto de matriz termoestable y refuerzo de fibra de carbono: comparativa de propiedades del material curado fuera y dentro de autoclave. Proyecto fin de carrera. Leganés, España. Universidad Carlos III de Madrid, 2011. P 35.

SHACKELFORD, James. Introducción a la ciencia de materiales para ingenieros. México, Prentice-Hall, 2007, P 187.

VILLEGAS, Diego. Mechanical behavior of a p/m aluminum matrix composite reinforced with woven carbon fiber, Costa Rica. University of Puerto Rico Mayaguez campus, 2003.