

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BAJA CALIFORNIA

FACULTAD DE INGENIERÍA



**ANÁLISIS DE FRACTURA POR FLEXIÓN EN MATERIALES COMPUESTOS
DE MATRIZ POLIMÉRICA CON FIBRA DE BASALTO**

TESIS

Que presenta para obtener el grado de MAESTRO EN CIENCIAS
JUAN FERNANDO BONINO DERAS

Director de tesis
Dra. Virginia García Ángel

Codirector de tesis
Dra. Miriam Siqueiros Hernández

Mexicali, Baja California, septiembre de 2023

RESUMEN de la Tesis de Juan Fernando Bonino Deras, presentada como requisito parcial para la obtención del grado de MAESTRO EN CIENCIAS. Mexicali, Baja California, México. Septiembre 2023.

**ANÁLISIS DE FRACTURA POR FLEXIÓN EN MATERIALES COMPUESTOS
DE MATRIZ POLIMÉRICA CON FIBRA DE BASALTO**

Resumen aprobado por:

Dra. Virginia García Ángel
Director de tesis

El uso de materiales compuestos de matriz polimérica con fibra de basalto esta aumentando para aplicaciones estructurales en diversas industrias, como la aeroespacial y automotriz, como un sustituto más económico y ecológico que otros refuerzos comúnmente utilizados como la fibra de vidrio y la fibra de carbono. Esto vuelve importante tener conocimiento detallado de las propiedades mecánicas de los compuestos de basalto para ser capaz de diseñar componentes de manera eficiente y segura con este material. Mientras que múltiples estudios se han llevado a cabo para caracterizar sus propiedades mecánicas elásticas, no se han realizado experimentos relevantes para determinar la resistencia a la fractura.

En esta investigación, la prueba estándar de fractura de flexión por modo mixto es utilizada en laminados de material compuesto de matriz de resina epoxica reforzada por fibra de basalto unidireccional para caracterizar experimentalmente la resistencia interlaminar a la fractura en este material, y posteriormente compararla con resultados de referencia de fibra de vidrio y de carbono para evaluarla como sustituto en aplicaciones estructurales propensas a fallo por fractura.

Los resultados de la experimentación determinan que la resistencia a la fractura del material compuesto de basalto es generalmente mejor que la de los refuerzos de fibra de carbono y fibra de vidrio, particularmente en relaciones de fractura intermedias por modo mixto.

Palabras clave: materiales compuestos, fibra de basalto, resistencia a la fractura, fractura por modo mixto.

ABSTRACT of the thesis, presented by Juan Fernando Bonino Deras, in order to obtain the MASTER of SCIENCE Mexicali, Baja California, México. September 2023.

**FRACTURE ANALYSIS BY BENDING OF FIBER REINFORCED POLYMER
MATRIX COMPOSITE MATERIALS**

Approved by:

Virginia García Ángel, PhD
Thesis Advisor

Use of basalt fiber reinforced polymer composite materials has been increasing for structural purposes in multiple industries, such as aerospace and automotive, as an economic and ecological alternative to other commonly used reinforcement, such as glass fiber and carbon fiber. Due to this, it is important to have detailed knowledge on the mechanical properties of basalt fiber composites to be able to design efficiently and safely using this material. While multiple studies have been done in the past to characterize its elastic mechanical properties, no relevant studies have been completed to determine its fracture resistance.

The standard mixed mode bending fracture test is used in this research for unidirectional basalt fiber reinforced epoxy laminate composite materials to experimentally characterize this material's interlaminar fracture resistance, and subsequently compare the results to reference data for glass and carbon fiber reinforcements to evaluate basalt fiber as a substitute for structural applications that are subject to fracture failures.

Experimental results reveal that the basalt fiber composite fracture resistance is generally higher than that of carbon and glass fiber composites, particularly for intermediate mixed mode fracture.

Keywords: composite materials, basalt fiber reinforced polymer, fracture toughness, mixed mode bending.

Agradecimientos

A mi familia por siempre apoyarme y estar presentes en mi vida.

A mis amigos por su comprensión y apoyo incondicional en todo lo que me propongo.

A mi directora de tesis la Dra. Virginia García Ángel por su ayuda y paciencia a lo largo de todo el desarrollo del proyecto.

A mi co – directora de tesis la Dra. Miriam Hernández Siqueiros por su asistencia y guía durante los procesos de experimentación y revisión del proyecto.

A los miembros del SACC Mecánica – Aeroespacial por sus recomendaciones durante los múltiples seminarios de investigación que ayudaron a encaminar esta investigación.

Índice de contenidos

Agradecimientos	5
Índice de Figuras	8
Índice de Tablas	12
1. Introducción.....	14
1.1. Planteamiento del problema	15
1.2. Justificación	17
1.3. Objetivos	20
1.3.1. Objetivo general	20
1.3.2. Objetivos específicos	20
1.4. Hipótesis	21
2. Estado del arte	22
3. Marco teórico	37
3.1. Materiales compuestos	37
3.2. Materiales compuestos laminados	37
3.2.1. Refuerzos	40
3.2.2. Matrices.....	42
3.2.3. Mecánica estructural de materiales compuestos laminados.....	43
3.3. Basalto	47
3.3.1. Fibra de basalto como refuerzo	47
3.3.2. Fabricación de fibras de basalto	49
3.4. Mecánica de fractura	50
3.4.1. Mecánica de fractura lineal elástica.....	50
3.5. Fractura en materiales compuestos	54
3.5.1. Delaminación en materiales compuestos laminados	56
3.5.2. Resistencia a la fractura en laminados.....	58
3.6. Método del elemento finito	65
3.6.1. Factores de intensidad de esfuerzo en ANSYS Workbench	65
3.6.2. Técnica de cierre de grieta virtual (VCCT)	66
4. Metodología.....	68
4.1. Fabricación de probetas.....	69
4.1.1. ASTM D3039.....	70
4.1.2. ASTM D3518.....	76
4.1.3. ASTM D6671	79
4.2. Desarrollo de prueba	86
4.2.1. ASTM D3039	86
4.2.2. ASTM D3518.....	91
4.2.3. ASTM D6671	93

4.3. Modelo de Elemento Finito	99
4.3.1. ASTM D6671	99
5. Resultados	102
5.2. Resultados de pruebas mecánicas	102
5.2.1. ASTM D3039	102
5.2.2. ASTM D3518	110
5.2.3. ASTM D6671	116
6. Análisis de resultados	122
6.1. Conclusión	125
Referencias bibliográficas	126

Índice de Figuras

Figura 1.1. Mapa de la meseta de basalto de Columbia [20].	19
Figura 3.1. Lamina unidireccional (izquierda) y laminado cuasi isotrópico (derecha) [3].	38
Figura 3.2. Presentaciones típicas de refuerzos [3].	41
Figura 3.3. Resistencia y rigidez de materiales compuestos típicos y metales [46].	42
Figura 3.4. Estado de esfuerzos en un elemento cualquiera [46].	44
Figura 3.5. Lámina con refuerzo unidireccional [46].	46
Figura 3.6. Esquema simplificado de una línea de procesamiento de fibra de basalto [50].	50
Figura 3.7. Placa de longitud infinita sometida a tensión con una grieta elíptica a través del espesor [9].	51
Figura 3.8. Modos fundamentales de apertura de grieta [10].	52
Figura 3.9. Sistema coordinado en la punta de grieta [9].	53
Figura 3.10. Caminos de carga y orientaciones de grieta en los experimentos de Wu [46].	55
Figura 3.11. Tipos de crecimientos de grieta en compuestos laminados. Auto similar (izquierda) y No auto similar (derecha) [46].	56
Figura 3.12. Fractura intralaminar contra delaminación interlaminar [12].	57
Figura 3.13. Aparato de pruebas y espécimen.	58
Figura 3.14. Montura de prueba de flexión por modo mixto [16].	59
Figura 3.15. Diagrama de las probetas con dimensiones recomendadas en unidades del sistema internacional [16].	60
Figura 3.16. Gráfica de ejemplo de resistencia a la fractura en modo mixto [16].	61
Figura 3.17. Ilustración de probeta con dimensiones nominales en unidades del sistema internacional [57].	62

Figura 3.18. Diagrama de una probeta instrumentada con galgas extensiométricas [57].	63
Figura 3.19. Configuración de una probeta ASTM D3518 a comparación de la dirección de la carga aplicada [58].....	64
Figura 3.20. Diagrama de grieta en 2D en un modelo de elemento finito [59].	66
Figura 3.21. Ejemplo del modelado de una grieta en elemento finito utilizando contactos [59].....	67
Figura 4.1. Diagrama general de la metodología	68
Figura 4.2. Láminas de fibra para especímenes: a) 0°, b) 90°	71
Figura 4.3. Molde metálico plano con área de trabajo delimitada.	72
Figura 4.4. a) Proceso de laminado; b) Bolsa de vacío; c) Cara frontal del laminado; d) Cara trasera del laminado.....	72
Figura 4.5. a) Sierra y b) disco continuo de diamante utilizados para cortar los especímenes.	73
Figura 4.6. Fibra seca para laminado a $\pm 45^\circ$	77
Figura 4.7 y 4.8 Insertos de delaminación de PTFE colocados en los bordes del laminado sobre la lámina 5.	80
Figura 4.9. Diagrama de plan de corte del laminado ASTM D6671 que ejemplifica la posición de los insertos de PTFE.	80
Figura 4.10. Diagrama de metodología de la prueba ASTM D3039.....	86
Figura 4.11. Modos de falla típicos en probetas sometidas a tensión [57].	87
Figura 4.12. Diagrama de metodología de la prueba ASTM D3518.....	91
Figura 4.13. Diagrama de metodología de la prueba ASTM D6671.....	93
Figura 4.14. Ejemplo de la categorización de puntos en la curva carga – desplazamiento para la prueba ASTM D6671 [16].....	96
Figura 4.15. Vista lateral del MEF.	99
Figura 4.16. Definición de la interface entre el cuerpo superior e inferior del MEF.....	99

Figura 4.17. Frente de grieta al final de la delaminación inicial.....	100
Figura 4.18. Definición de la interface de delaminación.....	100
Figura 4.19. Condiciones de frontera aplicadas.....	101
Figura 5.1. Ejemplo de la ejecución de prueba a tensión	102
Figura 5.2. Curvas esfuerzo – deformación de especímenes a 0°	104
Figura 5.3. Modo de falla y curva esfuerzo – deformación del espécimen #1 a 0°	104
Figura 5.4. Modo de falla y curva esfuerzo – deformación del espécimen #2 a 0°	105
Figura 5.5. Modo de falla y curva esfuerzo – deformación del espécimen #3 a 0°	105
Figura 5.6. Modo de falla y curva esfuerzo – deformación del espécimen #4 a 0°	106
Figura 5.7. Modo de falla y curva esfuerzo – deformación del espécimen #6 a 0°	106
Figura 5.8. Curvas esfuerzo – deformación de especímenes a 90°	107
Figura 5.9. Modo de falla y curva esfuerzo – deformación del espécimen #2 a 90°	107
Figura 5.10. Modo de falla y curva esfuerzo – deformación del espécimen #3 a 90°	108
Figura 5.11. Modo de falla y curva esfuerzo – deformación del espécimen #4 a 90°	108
Figura 5.12. Modo de falla y Curva esfuerzo – deformación del espécimen #5 a 90°	109
Figura 5.13. Modo de falla y Curva esfuerzo – deformación del espécimen #6 a 90°	109
Figura 5.14. Especímenes de prueba ASTM D3518 con galgas extensiométricas instaladas.	110
Figura 5.15. Especímenes de prueba sometido a tensión.	111
Figura 5.16. Especímenes de prueba ASTM D3518 después de completar el ensayo de tensión.	111

Figura 5.17. Curva esfuerzo cortante – deformación cortante de todos los especímenes.	113
Figura 5.18. Curva esfuerzo cortante – deformación cortante del espécimen #1. ..	113
Figura 5.19. Curva esfuerzo cortante – deformación cortante del espécimen #3. ..	114
Figura 5.20. Curva esfuerzo cortante – deformación cortante del espécimen #4. ..	114
Figura 5.21. Curva esfuerzo cortante – deformación cortante del espécimen #5. ..	115
Figura 5.22. Curva esfuerzo cortante – deformación cortante del espécimen #6. ..	115
Figura 5.23. Banco de pruebas ASTM D6671, sección inferior.	116
Figura 5.24. Banco de pruebas ASTM D6671, sección superior.	116
Figura 5.25. Ensamble del banco de pruebas ASTM D6671 con una probeta instalada.	117
Figura 5.26. Ejemplo de una prueba de fractura por modo mixto en curso.	117
Figura 5.27. Criterio de fractura por modo mixto para compuesto de basalto	119
Figura 5.28. Especímenes de fractura por modo mixto 1 - 5.	120
Figura 5.29. Especímenes de fractura por modo mixto 6 - 10.	120
Figura 5.30. Especímenes de fractura por modo mixto 11 - 15.	121
Figura 5.31. Especímenes de fractura por modo mixto 16 - 20.	121

Índice de Tablas

Tabla 3.1. Comparativa de propiedades de la fibra de basalto contra otros refuerzos [22], [51], [52].	48
Tabla 4.1. Características físicas y mecánicas de la fibra de basalto utilizada	69
Tabla 4.2. Propiedades mecánicas de la mezcla de resina 2000 y catalizador 2120 [60].	70
Tabla 4.3. Dimensiones esperadas para los especímenes de prueba ASTM D3039.	70
Tabla 4.4. Medidas extendidas para las probetas ASTM 3039 a 0°	74
Tabla 4.5. Medidas promediadas para las probetas ASTM 3039 a 0°	74
Tabla 4.6. Medidas extendidas para las probetas ASTM 3039 a 90°	75
Tabla 4.7. Medidas promediadas para las probetas ASTM 3039 a 90°	75
Tabla 4.8. Medidas promediadas de la población de probetas ASTM D3039 a 0°	76
Tabla 4.9. Medidas promediadas de la población de probetas ASTM D3039 a 90°	76
Tabla 4.10. Dimensiones esperadas para los especímenes de prueba ASTM D3518.	76
Tabla 4.11. Medidas extendidas para probetas ASTM D3518	78
Tabla 4.12. Medidas promediadas para probetas ASTM D3518	78
Tabla 4.13. Medidas promediadas de la población de probetas ASTM D3518	78
Tabla 4.14. Dimensiones esperadas para los especímenes de prueba ASTM D6671.	79
Tabla 4.15. Medidas sin promediar de las probetas ASTM D6671 en GII/GT=0.2	81
Tabla 4.16. Medidas promediadas de las probetas ASTM D6671 en GII/GT=0.2	82
Tabla 4.17. Medidas sin promediar de las probetas ASTM D6671 en GII/GT=0.4	82

Tabla 4.18. Medidas promediadas de las probetas ASTM D6671 en $GII/GT=0.4$...	83
Tabla 4.19. Medidas sin promediar de las probetas ASTM D6671 en $GII/GT=0.6$	83
Tabla 4.20. Medidas promediadas de las probetas ASTM D6671 en $GII/GT=0.6$...	84
Tabla 4.21. Medidas sin promediar de las probetas ASTM D6671 en $GII/GT=0.8$	84
Tabla 4.22. Medidas promediadas de las probetas ASTM D6671 en $GII/GT=0.8$...	85
Tabla 4.23. Medidas promediadas de la población de probetas ASTM D6671 en todas las relaciones de fractura	85
Tabla 4.24. Reporte estándar utilizado para reportar los resultados de una prueba de fractura por modo mixto ASTM D6671 [16]......	98
Tabla 5.1. Resultados de los especímenes ASTM D3039 a 0°	103
Tabla 5.2. Resultados de los especímenes ASTM D3039 a 90°	103
Tabla 5.3. Resultados de los especímenes ASTM D3518	112
Tabla 5.4. Resultados de experimentos de fractura por modo mixto.	118
Tabla 5.5. Dimensiones de los brazos de palanca C de acuerdo a la relación GII/GT	118
Tabla 6.1. Comparación de resultados ASTM D3039.....	122
Tabla 6.2. Comparación de resultados ASTM D3518.....	123
Tabla 6.3. Comparación de resistencia a la fractura entre el refuerzo de basalto y el refuerzo de carbono	124
Tabla 6.4. Comparación de resistencia a la fractura entre el refuerzo de basalto y el refuerzo de vidrio	124

Capítulo 1

1. Introducción

El uso de materiales compuestos de matriz polimérica con refuerzo se ha vuelto parte integral de las industrias de alto desempeño que requieren materiales con alta resistencia y bajo peso. En la industria aeroespacial cada vez se ven mayores porcentajes de material compuesto en la construcción de las aeronaves, donde si bien originalmente el porcentaje de uso de compuestos en aviones era casi 0, hoy en día llega a abarcar casi el 40% de la estructura en algunos aviones como el jet JSF [1]. En la industria marítima, reportes indican que hasta un 70% de todos los botes de recreación se fabrican de material compuesto [2]. En aplicaciones automotrices específicas como la fórmula 1 – donde el dinero no es un impedimento para la selección de materiales – prácticamente toda la estructura de estos vehículos se fabrica de materiales compuestos; incluido el chasis, suspensión y cubierta del motor [3].

Los refuerzos de fibra de carbono y vidrio han dominado el mercado durante décadas y por esto se tienen bien documentadas sus propiedades mecánicas, incluidas sus propiedades de fractura.

En los últimos años se ha propuesto la fibra de basalto en matrices poliméricas como un refuerzo alternativo, ecológico y de resistencia similar a la fibra de vidrio, pero a una fracción del costo [4]–[7]. Si bien se han hecho múltiples estudios en sus propiedades, su poco uso en aplicaciones estructurales hace que muchas de estas no estén bien divulgadas. Las propiedades de fractura en particular de este material no están documentadas extensivamente por lo que no se pueden hacer análisis de fractura y predicción de vida

detallados. Esto impide que la matriz polimérica con refuerzo de basalto se utilice en aplicaciones estructurales que ya están dominadas por otro tipo de refuerzos.

Esta investigación pretende determinar por medio de pruebas estándar de flexión en materiales compuestos las propiedades de resistencia a la fractura del basalto en matriz polimérica y utilizar estos resultados para realizar análisis de fractura en materiales compuestos reforzados con basalto que normalmente se fabrican de otro material, pudiendo comparar así sus capacidades contra refuerzos tradicionales

1.1. Planteamiento del problema

Se han desarrollado múltiples estudios sobre las propiedades mecánicas y de fractura de materiales compuestos que son utilizados comúnmente en industrias de alto desempeño como la aeroespacial, automotriz y marítima. Sin embargo, dichas investigaciones se centran en materiales compuestos de matriz polimérica con refuerzo de fibra de carbono, vidrio o aramida que son los más utilizados en las industrias mencionadas, mientras que no se ha prestado suficiente atención a opciones de refuerzo alternativo como lo es la fibra de basalto que se ha demostrado tiene propiedades estructurales deseables y puede hacer competencia a la fibra de vidrio y carbono ya que se ha demostrado que tiene propiedades estructurales superiores a la fibra de vidrio y en términos de costos es más económica que la fibra de carbono [5].

Los fallos por fractura han existido desde que se construyen estructura, pero la sociedad actual se enfrenta a estos cada vez más debido a que cada vez construimos más y de manera más compleja. Un estudio realizado en la década de los 80 en los Estados Unidos estimó que el costo derivado de estos fallos ascendía a 119 mil millones de dólares al año en ese entonces, lo que correspondía a un 4% del PIB de ese país [8], y eso sin contar la pérdida

de vidas humanas. El campo de la mecánica de fractura comenzó a tener su mayor desarrollo a partir de la segunda guerra mundial cuando empezaron a requerirse estudios más detallados para anticiparse a los fallos en materiales [9]. Fue en este mismo periodo en que se comenzó a introducir el uso de materiales compuestos -que bajo las circunstancias adecuadas tienen rendimiento superior a los metales a una fracción del peso- lo que los hace altamente deseables en la industria aeroespacial y automotriz [1]. Debido a lo antes mencionado es claro que el análisis de fractura debe ser aplicado rigurosamente en materiales compuestos. Sin embargo, debido a la reciente introducción de esta disciplina y materiales, la cantidad de recursos en conocimiento científico experimental y de vanguardia en estos temas aún es escasa a comparación de otros campos y materiales tradicionales como los metales.

Si bien el análisis de fractura en materiales compuestos de matriz polimérica tiene relativamente pocos años de desarrollo, se le ha dado un gran empuje debido a su relevancia en sectores de alto desempeño. Es por esto que actualmente es un área que hasta la fecha sigue siendo de rápido crecimiento y se han publicado diversos textos que explican con gran detalle la aplicación de teorías de mecánica de fractura en materiales compuestos. Parhizgar [10] presenta una investigación completa en placas de fibra de vidrio-resina epoxica incluyendo teoría matemática, propiedades de fractura, y verificaciones experimentales con pruebas y análisis de elemento finito. Yang [11] realizó estudios de falla por flexión en láminas de carbono-resina epoxica de las que determinó propiedades de materiales y modos de falla en especímenes con agujeros. De la misma forma, otros autores [12], [13] presentan estudios detallados de los típicos modos de fractura por delaminación en compuestos de carbono-resina epoxica.

Como los mencionados anteriormente se pueden encontrar múltiples estudios de fractura en materiales compuestos de matriz polimérica. Sin embargo, estos siempre se

enfocan a fibras que ya son ampliamente utilizados en la industria. Como se estipuló en un principio los refuerzos de fibra de basalto tienen propiedades mecánicas equiparables a la fibra de vidrio por lo que se podría esperar que la resistencia a la fractura sea similar. No obstante, estas propiedades no pueden asumirse y requieren de pruebas y análisis extensivos para lograr un consenso en la comunidad científica de modo que puedan utilizarse estos resultados en otras investigaciones y desarrollo de productos. Lo más cercano que pudo encontrarse fueron estudios de parámetros de fractura de materiales de matriz de concreto con fibra de basalto [14], [15] y que, si bien sus resultados pueden ser relevantes a esta investigación a modo de comparación en el rendimiento de la fibra de basalto en diferentes matrices, no puede considerarse conocimiento establecido en el tema que se pretende estudiar.

Es por los fundamentos arriba mencionados que se considera que el conocimiento existente en el tema es insuficiente y que habría gran beneficio científico al realizar investigación especializada en el análisis de fractura por flexión de materiales compuestos de matriz polimérica con fibra de basalto.

1.2. Justificación

A través del desarrollo de esta investigación se pretende obtener conocimiento empírico de las propiedades de fractura por flexión del material estudiado a través de pruebas fundamentadas por estándares ingenieriles internacionales [16], así como de conocimiento científico al correlacionar los datos recopilados con la teoría de mecánica de fractura.

En cuanto a las necesidades del estudio de análisis de fractura y materiales compuestos en México y específicamente la región noroeste del país; Un estudio de la FEMIA revela que Baja California es el estado con más empresas del ramo aeroespacial [17]

en donde, como se ha mencionado, se trabaja extensamente con este tipo de materiales. La región noroeste (Baja California, Sonora y Chihuahua) incluso concentra más de la mitad de toda la industria nacional [18]. Debido a esto la comunidad científica que radica en la región y particularmente los que tienen lazos estrechos con la industria se verán beneficiados de gran manera por el desarrollo de esta investigación, pues proveerá información de gran utilidad en estos materiales alternativos.

Las propiedades y características de la fractura en los compuestos de fibra de basalto en matriz polimérica (FBMP desde ahora) que se obtengan de este proyecto podrán ser utilizados por investigadores para hacer predicciones de vida en base al crecimiento de grietas para hacer diseños avanzados y seguros al poder anticiparse a posibles fallos utilizando el conocimiento de este trabajo.

En cuanto a la justificación del uso de basalto como refuerzo y su disponibilidad, se sabe que esta roca es la más común en la corteza terrestre, teniendo Rusia reservas de cerca de 197 millones de metros cúbicos en sus 30 canteras activas. Mientras tanto en Estados Unidos, los estados de Washington, Oregon e Idaho tienen cientos de miles de millas cuadradas de superficie cubiertas de roca de basalto. Sólo la meseta de basalto de Columbia tiene por sí sola cerca de 100,000 millas cuadradas de basalto [19].

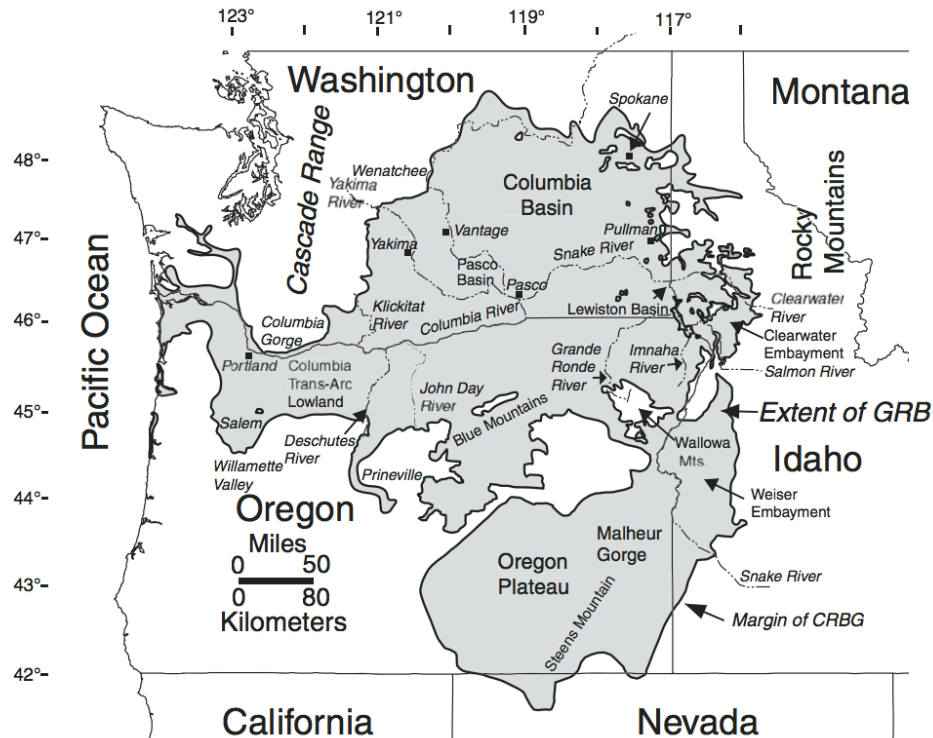


Figura 1.1. Mapa de la meseta de basalto de Columbia [20].

Por el lado del costo de producción y ahorro energético, el proceso de manufactura de la fibra de basalto es similar al de la fibra de vidrio, -por lo que se puede reutilizar el mismo equipo- pero consumiendo menos energía y sin utilizar aditivos, lo que vuelve esta fibra más barata que la de vidrio y de carbono [6].

La fibra de basalto también es reconocida como un material “eco compatible” que se caracteriza por su facilidad de reciclaje al compararse, por ejemplo, con la fibra de vidrio. El principal problema al reciclar la fibra de vidrio es que esta se derrita al incinerar el material, lo que hace que se adhiera a la cámara de incineración y que resulta en un proceso de limpieza costoso. Este no es el caso con el basalto, cuyo elevado punto de fundición de 1400°C permite que se recicle fácilmente incinerando el material compuesto, dejando como residuo la fibra de basalto completamente utilizable [5].

Debido a estas razones, el basalto puede considerarse como un material sustentable y sostenible, lo que lo vuelve su uso más atractivo adicional a sus propiedades mecánicas.

Se espera que al tener esta investigación como base se pueda desarrollar aún más el campo de los compuestos de fibra de basalto al complementarse con otros trabajos más robustos y pueda así comenzar a usarse este refuerzo como una alternativa viable a otras fibras más convencionales -como la de vidrio y carbono- que tienen ya años en el campo y tienen todo un historial de trabajos de investigación que explican a detalle sus propiedades.

1.3. Objetivos

1.3.1. Objetivo general

Obtener por medio de pruebas, fundamentándose en la teoría de mecánica de fractura, las propiedades de fractura de materiales compuestos de matriz polimérica con refuerzo de basalto para utilizarlas en análisis de fractura y prevención de fallas en nuevos productos, así como el uso de este conocimiento como base para futuras investigaciones que involucren fractura en FBMP. Se pretende poder utilizar este conocimiento para comparar el rendimiento de este material contra otros refuerzos tradicionales en matriz polimérica cuando se les somete a fractura.

1.3.2. Objetivos específicos

- Identificar las teorías y conceptos de mecánica de fractura requeridos para correlacionar resultados de pruebas con cálculos analíticos.
- Manufactura de especímenes a través de métodos estandarizados.
- Obtener las propiedades de fractura de material compuesto de FBMP por medio de experimentación.

- Corroborar las propiedades obtenidas de manera empírica realizando análisis de fractura por flexión en materiales compuestos y asegurar que estos reflejen el comportamiento real del material.
- Divulgar los resultados obtenidos una vez comprobado que sean válidos para fomentar el estudio de materiales de FBMP a través de la publicación de resultados en revistas de alto impacto.

1.4. Hipótesis

Los materiales compuestos de matriz polimérica con fibra de basalto tienen una mayor resistencia a la fractura que los materiales que usan otros refuerzos más utilizados, como la fibra de vidrio o de carbono, debido a que las propiedades de adhesión de interface de las fibras de basalto con la matriz polimérica son mayores que las de dichos refuerzos, y en materiales compuestos laminados la resistencia a la fractura es dependiente de la fuerza de adhesión entre láminas

Capítulo 2

2. Estado del arte

Diversos autores han realizado estudios extensivos en las propiedades mecánicas básicas (tensión, compresión, cortante, flexión) e incluso en algunos casos de fractura, de los polímeros reforzados por fibra de basalto (BFRP por sus siglas en inglés) por lo que estas características son cada vez más conocidas.

Zhao et al. [21] caracterizó las propiedades estáticas y de la fibra de basalto (FB) en diferentes matrices de resina. Para esto se fabricaron especímenes de FB continuas en matrices de resina epoxica y vinyl éster para determinar el efecto de diferentes matrices en las propiedades de este material compuesto.

Las pruebas estáticas realizadas encontraron que para todas las matrices el BFRP tiene resistencia estática mayor a 2300 MPa, lo que es superior a los polímeros reforzados por E-Glass (GFRP) que tienen una resistencia de 1600-2300 MPa pero inferior a los polímeros reforzados por fibra de carbono (CFRP) que tiene una resistencia estática a la tensión de 3830 – 6600 MPa. En cuanto a la selección de matriz, se observó que por lo general la resina epoxica produce un material compuesto de mejores propiedades mecánicas que la de vinyl éster; por el lado las pruebas de fatiga, se descubrió que la matriz vinyl éster se fracturaba con mayor facilidad, esto debido a que es más frágil que la matriz epoxica. Cabe destacar que una matriz más dúctil otorga mejores propiedades ante fatiga y fractura debido a que se reduce la propagación de grietas.

Otro estudio [22] comparó de manera más extensa el BFRP contra las propiedades del GFRP y CFRP, adicionando a ensayos de tensión exposiciones a elevadas temperaturas para verificar el comportamiento de estos materiales compuestos sometidos a condiciones

extremas. Para este fin se fabricaron especímenes por medio de enrollado de filamentos de fibra con previo tratamiento térmico de entre 100 y 600°C para un impregnado posterior, teniendo así probetas de fibras tejidas. También se fabricaron por la misma técnica placas laminadas utilizando un molde cuadrado para darle esta forma a la probeta.

Los ensayos de tensión posteriores a los tratamientos térmicos con pistola de aire caliente determinaron que los BFRP tienen mayor resistencia a la tensión que los GFRP a bajas temperaturas, sin embargo, a temperaturas superiores a 300°C las propiedades de los materiales reforzados por basalto caen por debajo de los de vidrio. Los compuestos de fibra de carbono por su parte exhibieron propiedades superiores a los de vidrio y basalto y se mantuvieron constantes hasta los 300°C, punto donde la resistencia a la tensión decrece rápidamente hasta una temperatura de 500°C donde la fibra se descompone. Cabe destacar que este comportamiento no se observa en la fibra de basalto ni en la de vidrio.

La caracterización de los BFRP también se ha llevado a cabo para propiedades de resistencia a la tensión en aros (hoop tensile strength) y para esfuerzo cortante interlaminar (ILSS por sus siglas en inglés) [23]. En este caso se comparan dichas propiedades en tubos de material compuesto reforzados por fibra de basalto (FB) y fibra de vidrio (FV) fabricados por enrollado de filamento, utilizando una matriz de resina epoxica-bisfenol. El tejido se hizo en una configuración de 90°, 30°, -30° cortando los tubos fabricados en especímenes de anillo con un ancho de 10 milímetros.

Tanto las pruebas de resistencia a la tensión de aro como las de ILSS posicionan los compuestos de FB por encima de los de FV, con una resistencia última de 727 MPa contra 500 MPa respectivamente, y de 70.1 MPa contra 62.9 MPa en el caso de ILSS. El aumento en la resistencia al esfuerzo cortante interlaminar en el BFRP indica que hay una mejor adhesión en la interfaz refuerzo – matriz a comparación del GFRP.

También se han realizado estudios de fibra de basalto en matriz de poliéster [24]. En este caso se fabricaron por medio de un proceso de moldeo por transferencia de resina (RTM por sus siglas en inglés) de laminados bidireccionales en configuración de $0^{\circ}/90^{\circ}$, para posteriormente caracterizar las propiedades de este material en pruebas de tensión, compresión, cortante y flexión en base a las normas de ASTM. Los resultados de este estudio posicionan al refuerzo de fibra de basalto entre la fibra de vidrio E-Glass y la de carbono en relación a su módulo de elasticidad.

Un análisis de modos de falla de compuestos de FB en resina epóxica [25] corroboró la superioridad del refuerzo de basalto contra el de vidrio en cargas de esfuerzo cortante interlaminar, así como también en resistencia a flexión. En este estudio se utilizó fibra de basalto “non – crimp” (NCF) en la que el 85% de las fibras están alineadas a 0° , 13% están a 90° , y el restante es tejido de poliéster. Esta configuración le da estabilidad a la fibra unidireccional y evita que se desalinee. El material compuesto formado por este tejido refuerza una matriz de resina epóxica y se comparan las propiedades antes mencionadas contra un refuerzo tejido sencillo $0^{\circ}/90^{\circ}$ (plain woven) de basalto/resina epoxica y un compuesto plain woven de vidrio/resina epoxica.

La resistencia a la flexión del compuesto de basalto NCF/resina epóxica fue de 630 MPa con un módulo de flexión de 22.7 GPa, mientras que su ILSS fue 47 MPa. El autor al comparar estos resultados con referencias encontró que estas propiedades son superiores comparadas a los compuestos plain woven de basalto/epoxica y vidrio/epoxica.

Zhang et al. [26] estudió los efectos de la variación de tasa de deformación y temperatura en las propiedades mecánicas de BFRP. El material se preparó con fibra de basalto unidireccional y resina epoxica por medio de un proceso de infusión de resina asistida por vacío. Se realizaron pruebas cuasi estáticas a una tasa de deformación de $1/600 \text{ s}^{-1}$, a un

rango de tasas de deformación media (19, 28, 82 y 133 s⁻¹), y a diferentes temperaturas (desde -25 hasta 100°C, en incrementos de 25°C).

Se encontró que conforme aumentaba la tasa de deformación entre 19 y 133 s⁻¹ la resistencia a la tensión de los especímenes aumentaba entre 484 y 704 MPa, la deformación máxima aumentó de 0.085 a 0.096 y la tenacidad del material se incrementó de 27.3 a 32.1 MPa. Se observó que el aumento en estas propiedades se debe a que en las pruebas cuasi estáticas (baja tasa de deformación) la fractura ocurre simultáneamente en toda la probeta mientras que en tasas de deformación dinámicas la fractura inicia por uno o varios tejidos, lo que redistribuye entre los tejidos no-fracturados y resulta en una resistencia a la tensión menor. En cuanto a la variación de temperatura se determinó que la resistencia a la tensión no dependía de esta a temperaturas bajas (-25 a 50°C) mientras que esta propiedad se reducía conforme la temperatura se aumentó entre 50 y 100°C, esto se explica por la degradación de la matriz de resina epoxica a elevadas temperaturas.

Chen et al. [27] también realizó pruebas de la variación de propiedades mecánicas del mismo material compuesto a diferentes tasas de deformación en pruebas mecánicas. Para esto se fabricaron laminados de fibra basalto unidireccional en matriz de resina epoxica y se sometieron a pruebas cuasi estáticas y dinámicas a diferentes velocidades para así cubrir un espectro variado de tasas de deformación en un rango de 4.68×10^{-5} hasta 259 s⁻¹ en diferentes incrementos.

Los resultados del estudio indican que tanto la resistencia a la tensión como la deformación al momento del fallo son mayores conforme se incrementa la tasa de deformación. Es decir, a mayor velocidad en la prueba mayor resistencia a la tensión, lo que concuerda con el estudio mencionado anteriormente [26]. Comparando las pruebas cuasi estáticas con las dinámicas a la mayor tasa de deformación de 259 s⁻¹ se observa que la

resistencia a la tensión casi se duplica en el segundo caso, de 1642.2 MPa a 3383.3 MPa. Este estudio también presentó ecuaciones empíricas basadas en sus resultados para calcular las propiedades mecánicas dinámicas del basalto en matriz polimérica en base a sus propiedades mecánicas cuasi estáticas.

Zhao et al. [28] investigó el comportamiento de fatiga a elevados ciclos de 1×10^7 en un BFRP. Esto se llevó a cabo fabricando un compuesto de fibra de basalto en matriz epoxica en tiras de hilos para someterse a una prueba de fatiga a frecuencia de 10 Hz con una relación de esfuerzo máximo/mínimo de 0.8. Se establece que el objetivo es de 1×10^7 ciclos, pero un análisis de vida por el método de Whitney resultó en un 73.98% de alcanzar 2×10^6 ciclos de vida, y 69.6% de llegar a el objetivo de 1×10^7 .

Las observaciones del microscopio y pruebas de fatiga determinaron confirmaron tres modos de daño a diferentes niveles de esfuerzo: a niveles elevados de esfuerzo el modo de falla es ruptura de fibra; para niveles medios y bajos de esfuerzo los patrones de falla más comunes son las grietas en la matriz y la delaminación de interface. Cabe destacar que los especímenes que alcanzaron la meta de 1×10^7 ciclos fueron probados de nuevo para evaluar su resistencia residual, y sorprendentemente la resistencia fue 9% mayor que en los especímenes que no fueron probados a fatiga; esto se explica porque el debilitamiento de la interfaz matriz – fibra permite a la fibra exhibir su resistencia intrínseca al sobreponerse al daño acumulado, así como el enderezamiento de fibras por el mismo motivo.

El efecto de micro partículas para mejorar las propiedades de una matriz es también un tema muy estudiado. Khalili et al. [29] examinó el comportamiento mecánico de materiales de BFRP en el que se le adicionaba micro polvo de vidrio (MGP por sus siglas en inglés) a la matriz de resina epoxica. Las probetas para las pruebas mecánicas se fabricaron de fibra de basalto unidireccional con diferentes concentraciones de MGP a 2.5, 5.5, y 8.5%.

Los ensayos de tensión revelaron que el aumento del porcentaje de MGP incrementa la rigidez de la matriz y la vuelve más frágil. Esto en consecuencia implica que se absorbe menos energía, y se observó que la resistencia última del material no se vio incrementada. En el caso de las pruebas de flexión, el uso de MGP si incrementa las propiedades de flexión del BFRP linealmente a mayor porcentaje de MGP. Lo anterior mencionado implicaría que un refuerzo de partículas de vidrio en una matriz epoxica reduciría las propiedades de fractura de un polímero reforzado por basalto debido a fragilización de la matriz.

Otro estudio [30] mostró que también es posible aumentar la resistencia a la fractura por medio de la adición de micro partículas en una matriz. Este se enfoca al refuerzo de adhesivos epoxicos por medio de partículas “core-shell” de hule (CSR) -que son partículas microscópicas con un núcleo (core) de hule acrílico y una cubierta (shell) de polimetilmetacrilato- para incrementar la resistencia a la fractura de la mezcla.

Los resultados de la resistencia a la fractura en modo I de esta matriz reforzada muestran que la adición del CSR al adhesivo epóxico aumenta la ductilidad del material. Esto a su vez permite un crecimiento de grieta estable, y en consecuencia un aumento en la resistencia a la fractura. Se descubrió que dicha estabilidad se alcanza a partir de 16% de volumen de CSR en el epóxico, mientras que a partir de volúmenes de CSR superiores al 22% se ve una reducción en la ganancia de resistencia. Se determinó que el volumen óptimo de CSR en epóxico para mejorar la resistencia a la fractura es de 30%.

El efecto del refuerzo de nanopartículas en la resistencia a la fractura en laminados de matriz polimérica con refuerzo de basalto también ha sido estudiado [31]. Para esto se fabricaron placas por medio de enrollado de filamentos de fibra de basalto en una matriz de resina epoxica reforzada por nanopartículas de polímero acrílico y de nano arcilla.

Posteriormente se fabricaron especímenes conforme a las pruebas estándar de double cantiléver beam (DCB) para fractura interlaminar por modo I.

Se determinó que el comportamiento de fractura de una matriz frágil como la epoxica puede mejorarse con la adición de nanopartículas, siempre y cuando la adhesión de fibra – matriz fuera lo suficientemente fuerte en un principio y que la zona de deformación de la grieta no se estuviera viendo afectado por interferencia de fibras rígidas. Por esto mismo se concluyó que una reducción en el porcentaje de volumen de fibra aumentaría la resistencia a la fractura interlaminar.

Otros autores [32] probaron el uso de refuerzos híbridos a una matriz polimérica para estudiar su efecto en la resistencia a la fractura del material compuesto. Para esto se fabricaron, por medio de enrollado de filamento, especímenes de CFRP, GFRP, y un polímero reforzado tanto por fibra de vidrio como de carbono. Posteriormente se sometieron a pruebas de flexión, ILSS, y resistencia a la fractura por modo I.

Los resultados experimentales revelaron que la resistencia a la fractura del CFRP era 53% mayor al del GFRP ($16.34 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ para carbono y $10.96 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ para vidrio), mientras que el compuesto híbrido presenta una resistencia a modo I 13% mayor al del CFRP ($18.36 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$). Este efecto se atribuye a que el compuesto de refuerzo híbrido tiene fibras frágiles y de alta resistencia de carbono, así como de moderada resistencia y relativa ductilidad de vidrio.

También se ha estudiado el comportamiento de fractura de un compuesto híbrido de fibra de carbono/basalto en diferentes configuraciones para encontrar una forma de reducir costos y mejorar la resistencia a la fractura[33]. Para esto se llevaron a cabo pruebas de compact tensión (CT) en ocho diferentes configuraciones de especímenes híbridos para

encontrar la configuración ideal de carbono/basalto en matriz epoxica en relación a su resistencia a la fractura en modo I.

De este estudio se puede concluir que aumentar el contenido de fibra de basalto en un compuesto híbrido de carbono/basalto en un porcentaje de 20% – 40% reduce linealmente la resistencia a la fractura entre 5.46% y 8.87%; aumentar significativamente la cantidad de basalto en un compuesto híbrido de este tipo sólo reduce ligeramente la resistencia a la fractura. También se enfatiza que poner el basalto en las capas exteriores, o de manera intercalada en el compuesto híbrido es la manera en la que se tiene una mayor resistencia a la fractura.

Chlup et al. [34] por su parte también estudió la fractura en materiales compuestos de fibras largas unidireccionales de basalto en matrices de polisiloxano y epóxica. Un compuesto fue fabricado con matriz de polisiloxano y curado utilizando pirólisis a 650 °C, mientras que el otro fue fabricado por un proceso de curado a presión constante de 0.3 MPa y temperatura de 250°C. La energía de fractura se calculó en base a la norma ASTM D5528 para el modo I por medio de pruebas de DBC.

La resistencia a la fractura obtenida de las muestras de matriz epoxica y polisiloxano pirolizado es de entre 16 y 20 MPa*m¹⁻², mientras que en el caso de la matriz de polisiloxano con un curado normal es de 10 MPa*m¹⁻². Se observó que la dirección de la grieta en relación a la fibra afecta en gran medida la resistencia a la fractura, un frente de grieta paralelo a la orientación de la fibra resultará en una resistencia menor comparado con un frente de grieta perpendicular a esta. Esto se da debido a una mayor superficie de grieta en el segundo caso.

Sobre el uso de matrices alternativas a la epoxica para mejorar las propiedades de fractura de un laminado, Montenegro et al. [35] propone una matriz de poliuretano (PU) reforzada por fibra de vidrio (PU-GFRP) y obtiene su fractura intralaminar transversal por

modo I, comparando con una matriz epoxica (EP) reforzada por fibra de vidrio (EP-GFRP). En este estudio la resistencia a la fractura obtiene realizando pruebas de single edge notch vending (SENB) y se cuantifica en términos de tasa de liberación de energía de deformación no lineal, J , en función a la extensión de grieta Δa , generando curvas J-R.

Entre los resultados del estudio destaca que, si bien la matriz PU es 30% menos rígida y 23% menos resistente a la flexión que la matriz EP, la primera es considerablemente más dúctil. Esto explica el por qué el PU-GFRP tiene un valor J 6 veces mayor que el EP-GFRP, siendo la resistencia a la fractura del primero de hasta 1.9 kJ/m^2 contra 0.3 kJ/m^2 en el segundo material. Observaciones del mecanismo de fractura bajo microscopio corroboran los valores presentados pues muestran que la propagación de grieta en el material PU-GFRP es más lenta que en el EP-GFRP, siendo que en este otro material el daño comienza a desarrollarse delante de la punta de grieta debido al fallo de adhesión en la interface refuerzo – matriz y posteriormente se propaga por vacíos en la interfaz; esto implica una mejor adhesión fibra – resina en el caso del PU comparado al EP.

En cuanto a fractura por modo II, Almansour et al. [36] investigó la influencia de la absorción de humedad en la resistencia a la fractura por modo II en compuestos laminados de linaza e híbridos de linaza/basalto en diferentes configuraciones. Para esto se probaron los siguientes materiales fabricados por medio de moldeo por transferencia de resina asistida por vacío: sólo resina vinil éster (VE), vinil éster reforzado por fibra de linaza (FVE), y 2 configuraciones diferentes en híbridos de linaza/basalto para fibras tejidas y no tejidas (FBVEs y FBVEu). La prueba a realizar para obtener las propiedades de fractura por modo II fue el three-point-end-notch-flexure (3ENF).

Los experimentos mostraron que la absorción de humedad en la resina aumentaba la ductilidad de esta, lo que la volvía menos propensa a la iniciación de grietas. Sin embargo,

también se observó que la absorción de humedad reducía la resistencia fibra – matriz; esto por su parte disminuía la resistencia a la propagación de grietas. Se destacó también que los compuestos FBVE presentaban mayor resistencia que los FVE; se explica que esto es debido a que la linaza absorbe grandes cantidades de agua por su naturaleza hidrofílica, mientras que una hibridación del refuerzo con basalto permite que esta fibra proteja la matriz al ser más resistente a la humedad. Se concluyó que un compuesto híbrido FBVEu es el que tiene mayor resistencia a la fractura de todos los materiales estudiados, aun comparado con su configuración tejida FBVEs debido a que el proceso de tejido daña el refuerzo, lo que reduce las propiedades del material.

Debido a que en la mayoría de casos de aplicación de carga una grieta se propagaría en modo mixto, Loureiro et al. [37] realizó un estudio de Single-Leg Bending (SLB) para determinar estas propiedades en un laminado unidireccional de CFRP. Para la realización de la prueba se fabricaron dos especímenes y estos se unieron con el adhesivo Araldite. La resistencia a la fractura se obtuvo a través de la energía de la curva carga – desplazamiento.

Los resultados obtenidos están enfocados al adhesivo utilizado pues este es el que se sometió a la fractura por modo mixto. De esto se obtuvieron las leyes cohesivas de tensión y cortante que permiten caracterizar la resistencia del adhesivo a diferentes deformaciones.

Fakoor [38] propuso un criterio de falla para fractura por modo mixto I/II en base a las propiedades de fractura de la matriz para modo I y las propiedades mecánicas del material laminado ortotrópico, así como las propiedades de fractura por modo mixto I/II de los materiales como verificación. Para la obtener la información requerida se fabricaron probetas de fibra de vidrio/resina epoxica para las propiedades del material ortotrópico, así como probetas de resina epoxica para las propiedades de la matriz isotrópica. También se fabricaron especímenes con fibras a diferentes orientaciones para realizarles pruebas de

fractura a diferentes modos de I a II a diferentes ángulos de fibra para comprobar los resultados obtenidos por el criterio matemático.

La principal aplicación de los resultados del criterio determinado en este estudio es que se pueden calcular propiedades de fractura de materiales compuestos en grietas arbitrarias que no necesariamente deben estar en la dirección de la fibra. Esto vuelve el criterio versátil y facilita el su uso pues no requiere realizar pruebas de fractura directamente en el material laminado ortotrópico.

Un modelo analítico fue presentado por Patel et al. [39] para fractura intralaminar de fibra – matriz por daño progresivo. El estudio se realizó con laminados multidireccionales de $0^\circ, 45^\circ, 90^\circ$ de resina epoxica reforzada por fibra de carbono con un volumen de fibra de 61%. El espécimen fabricado es una placa rectangular con una perforación cilíndrica en el centro sometida a tensión, conocido como open hole tensión (OHT). Posteriormente, un análisis similar se hace para otra prueba OHT pero esta vez con un laminado cuasi isotrópico $45^\circ, 0^\circ, -45^\circ, 90^\circ$. Las pruebas se corroboraron con análisis de elemento finito y presentaron buenos resultados en la predicción de lo obtenido en pruebas, presentando el comportamiento detallado de tensión en las láminas de 0° , fractura de matriz por modo mixto en las de 45° , y fractura transversal de matriz en 90° .

Otro estudio analítico [40] modeló el comportamiento micro mecánico de la delaminación fibra – matriz de fibras orientadas perpendicularmente en casos de carga de tensión transversal. Aquí se establece un modelo numérico para tratar de estabilizar la delaminación de interfaces en fibras al posicionar otra fibra cerca de la primera, considerando la posición angular de esta segunda fibra en relación a la primera y la dirección de la carga, y su separación.

El análisis numérico encontró que el crecimiento de la grieta se estabilizaba conforme el ángulo entre las fibras decrecía, es decir que el crecimiento es menor si las fibras están alineadas en relación a la dirección perpendicular de la carga. Se resalta que el modo de fractura se vuelve mixto a mayor ángulo entre las fibras, aumentando el modo II conforme se incrementa el ángulo. Se concluye que un caso ideal para la prevención del crecimiento de grieta sería con poca separación entre fibras y con un ángulo reducido ya que esto reduciría el crecimiento de grieta al estabilizar la delaminación en la interface.

El método del elemento finito (FEM) también ha sido aplicado en múltiples estudios para predecir el comportamiento de fractura en compuestos reforzados por matriz polimérica.

Huang et al. [41] investigó el crecimiento en una grieta por fatiga en un espécimen metálico reparado por placas de CFRP, en donde la grieta está ubicada en el material compuesto y está sujeta a diversos modos de fractura. Para el análisis se utilizó el software ABAQUS junto con un código automatizado de Python para hacer el crecimiento de grieta de manera manual en un proceso iterativo en base a criterios de densidad de energía de deformación (MSEDC), criterio de esfuerzo máximo circunferencial (MCSC), y el criterio de máxima tasa de liberación de energía de deformación (MSERRC). El modelo de crecimiento de grieta fue obtenido del software NASGRO. Para generar una mezcla de modos diversa se aplica la carga en diferentes posiciones de la probeta en una prueba de flexión en cuatro puntos.

Los resultados demuestran que la simulación realizada se apega bastante a los valores obtenidos experimentalmente. Se observó que al realizar la carga en modo mixto la grieta se propaga hacia el punto de aplicación de la carga hasta que el modo I termina dominando la apertura de la grieta. También se obtuvo que la vida de fatiga se reduce conforme aumenta

la mezcla de modo II en respecto al modo I. Otro punto a considerar es que agregar más capas de CFRP como reparación a la placa metálica también incrementa su vida de fatiga.

Mousa et al. [42] también utilizó el software ABAQUS para modelado de elemento finito para estudiar el crecimiento de grieta en modo mixto en un compuesto de matriz poliéster reforzado por fibra de vidrio sometido a flexión en 3 puntos (3pB). En este caso se fabricaron probetas del material mencionado con preimpregnados de fibras largas de vidrio en matriz poliéster. La pre grieta en la parte inferior del espécimen se hizo a 7 ángulos de inclinación diferentes (0° , 15° , 30° , 45° , 60° y 75°) y a diferentes largos de grieta para estudiar diferentes modos mixtos de fractura. Para el modelado FEM se utiliza el método de elemento finito extendido (X-FEM) para los diferentes ángulos y corroborar los resultados con los experimentos.

Se pudo concluir que, sin importar el ángulo inicial de la grieta, el crecimiento se extendía hacia el punto de aplicación de la carga; este comportamiento también se observaba en el estudio anterior [41]. También se observó que el camino que sigue la grieta es independiente de su longitud original. Otro punto importante fue que, para una misma longitud inicial de grieta, la carga máxima aplicada se incrementaba conforme aumentaba la mezcla del modo de fractura.

Por su parte, Joki et al. [43] implementa un modelo cohesivo de material en el software LS-DYNA para simular una prueba de fractura por modo mixto. Se lleva a cabo una prueba de double cantilever beam by uneven bending moments (DCB-UBM) en vinil éster reforzado por fibra de vidrio. La prueba permite la aplicación de diferentes brazos de palanca que a su vez generan varios modos de fractura mixtos dependientes de la distancia del brazo de palanca aplicado; los modos varían entre -1 para fractura por modo I hasta 1 para fractura por modo II, siendo los valores entre -1 y 1 modos mixtos. Los resultados de

los experimentos se corroboran con un modelo de material cohesivo implementado en LS-DYNA en una simulación de una prueba de fractura por modo I, y otra de fractura por modo mixto en base a la norma ASTM D6671.

Los resultados experimentales revelan que los modos mixtos tienen una tasa de liberación de energía de deformación (SERR) de estado estable similar de $3.5 - 4 \text{ kJ/m}^2$, mientras que para el modo II la resistencia de fractura parece aumentar conforme crece la grieta. Esto se explica parcialmente por un efecto de “puenteo” en las fibras conforme avanza la delaminación. Se observa que para los modos puros I y II se tienen valores de SERR críticos en la punta de la grieta de 0.25 kJ/m^2 para el modo I y de 3 kJ/m^2 en el modo II. Comparado con el modelo cohesivo de FEM utilizado se obtuvo una buena correlación, por lo que este tipo de aproximaciones puede utilizarse cuando se corrobora adecuadamente.

Sobre la prevención de propagación de grietas, Canturri et al. [44] estudia la interacción entre la orientación de la fibra, dirección de grietas, y migración entre láminas de un material compuesto. En este estudio se realizan pruebas de End Loaded Split (ELS) en especímenes de carbono/resina epoxica a diferentes orientaciones de grieta inicial -ubicada a la mitad del laminado- con respecto a la dirección de los refuerzos.

Los resultados de la investigación demuestran que una grieta interlaminar cuyo camino coincide con la orientación del refuerzo se expandirá rápidamente hasta que dicha grieta alcance la longitud completa de la lámina, produciendo una delaminación total. En cambio, si el camino de la grieta no es coincidente la grieta esta se trasladará entre láminas hacia una en donde su crecimiento sea más apropiado; diseñar un compuesto con estas consideraciones en mente puede ayudar a mejorar su susceptibilidad al fallo por delaminación.

Otro estudio enfocado en entender los mecanismos de delaminación investiga los efectos del espesor de láminas que conforman un compuesto laminado con su tasa de liberación de energía de deformación en modo I [45]. Aquí se comparan tres espesores de lámina diferente: 0.03, 0.075 y 0.150 mm para formar laminados de igual espesor. Los especímenes, fabricados por curado en autoclave de preimpregnados unidireccionales de carbono/epoxica, son sometidos a pruebas de double cantiléver beam (DCB) para determinar la resistencia a la fractura por modo I de estos.

En los descubrimientos se destaca que, si bien los 3 especímenes tienen el mismo espesor total, las probetas fabricadas por un mayor espesor de lámina resultan en una mayor resistencia a la fractura. Esto es explicado por el efecto de “puente” (bridging) en el que conforme se expande la grieta entre láminas, fibras de refuerzo quedan sujetas a las caras delaminadas del espécimen; aunado a esto, se observa que las láminas de mayor espesor tienen zonas más ricas en resina. Esto contribuye al aumento de resistencia de fractura ya que la matriz es el medio de crecimiento de las grietas.

Capítulo 3

3. Marco teórico

3.1. Materiales compuestos

Se conoce como material compuesto a aquel que se conforma de dos o más materiales a una escala macroscópica, siendo este resultado un tercer material con propiedades útiles. La principal ventaja de un material compuesto es que, si se diseña adecuadamente, puede tener las mejores cualidades de sus componentes e incluso cualidades que ninguno de los materiales que lo componen tiene [46]. A comparación de las aleaciones metálicas, en los materiales compuestos cada material constituyente retiene sus propiedades químicas, físicas y mecánicas individuales [3].

Estos materiales han sido utilizados ampliamente a lo largo de la historia: los egipcios combinaron lodo y paja para construir ladrillos, la combinación de hierro y acero llevó a los barriles de pistola de Damasco y a las espadas samurái, y los puentes y paredes que se construyen en la actualidad combinan acero y concreto [47].

Si bien la definición original de material compuesto puede ser muy amplia y abarcar muchos tipos de materiales, en la actualidad este término es sinónimo de los materiales compuestos laminados como la fibra de vidrio y fibra de carbono que son ampliamente utilizados en múltiples industrias, como la aeroespacial, automotriz y marítima.

3.2. Materiales compuestos laminados

Los materiales compuestos laminados son aquellos materiales que contienen fibras resistentes (también conocidas como refuerzo) rodeadas por un material de matriz más débil

que estos. Esta matriz tiene como función el aislar y proteger de efectos ambientales las fibras, así como transmitir las cargas a estas. Las fibras consisten en miles de filamentos de diámetro micrométrico y estas pueden ser cortas -de unos centímetros de largo- o largas, que suelen tejerse. Los materiales más usados como fibra son el vidrio, aramida, carbono y boro. La matriz por su parte puede ser polimérica, mineral, o metálica [48].

A la combinación de una capa de refuerzo unidireccional con matriz se le conoce como lámina. Las láminas unidireccionales de material compuesto son ortotrópicas, a diferencia de otros materiales isotrópicos como los metales, por lo que estas suelen apilarse una sobre la otra en diferentes orientaciones para obtener un material con propiedades cuasi isotrópicas. A esto se le conoce como laminado [3]. Una representación de un laminado puede verse en la Figura 3.1. Debido a que un laminado es la combinación de múltiples láminas ortotrópicas, se vuelve posible obtener productos con propiedades completamente distintas dependiendo de la cantidad y orientación de dichas láminas.

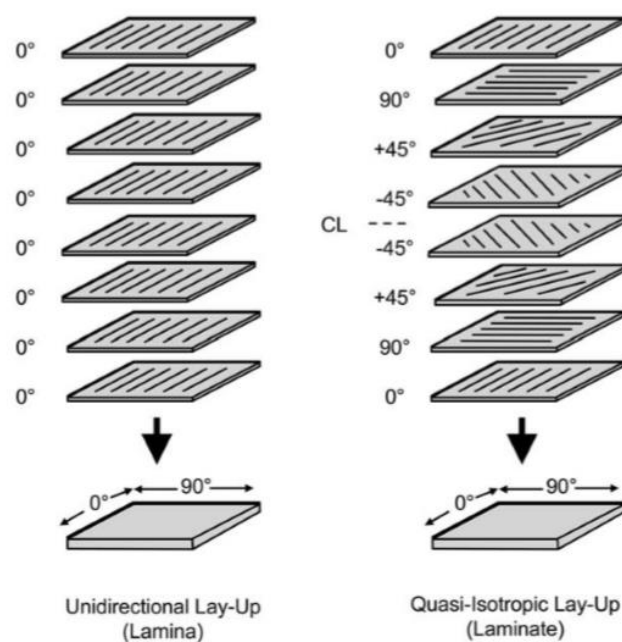


Figura 3.1. Lamina unidireccional (izquierda) y laminado cuasi isotrópico (derecha) [3].

Como se ha mencionado, una lámina de material compuesto es la combinación de un material matriz con un refuerzo. Es por ende posible calcular las propiedades mecánicas de estas láminas utilizando las propiedades individuales de cada constituyente, a esto se le conoce como regla de mezclas.

Para una lámina unidireccional cargada en la dirección longitudinal de la fibra, la ecuación (3.1) descrita por [3] muestra la relación entre el módulo de elasticidad de la matriz y el refuerzo, y de la lámina resultante.

$$E_{11} = E_f V_f + E_m V_m \quad (3.1)$$

Donde E es el módulo de elasticidad y V es el porcentaje de volumen respectivo de cada constituyente. El subíndice 11 indica que la propiedad resultante es en la dirección longitudinal de la fibra, el subíndice f habla de la propiedad de la fibra y el subíndice m de la matriz. De la misma manera, con la ecuación (3.2) se describe la resistencia a la tensión de un laminado, en la que se mantienen las mismas notaciones de la ecuación (3.1) pero esta vez aplicado a resistencia última.

$$\sigma_{11} = \sigma_f V_f + \sigma_m V_m \quad (3.2)$$

Debido a que las propiedades de la fibra eclipsan a las de la matriz, se puede aproximar el módulo de elasticidad y resistencia última de una lámina de la siguiente manera:

$$E_{11} \simeq E_f V_f \quad (3.3)$$

$$\sigma_{11} \simeq \sigma_f V_f \quad (3.4)$$

Las anteriores ecuaciones han descrito las propiedades cuando se carga una lámina en la dirección de su fibra (0°). Para el caso de una lámina cargada a 90° , o transversal, con respecto a la orientación de su fibra el módulo de elasticidad transversal es dado por la ecuación (3.5)

$$\frac{1}{E_{22}} = \frac{V_f}{E_f} + \frac{V_m}{E_m} \quad (3.5)$$

Otras ecuaciones útiles de regla de mezclas son la (3.6) y (3.7) que calculan la relación de Poisson ν_{12} y módulo cortante en el plano G_{12} .

$$\nu_{12} = \nu_f V_f + \nu_m V_m \quad (3.6)$$

$$\frac{1}{G_{12}} = \frac{V_f}{G_f} + \frac{V_m}{G_m} \quad (3.7)$$

3.2.1. Refuerzos

El refuerzo en un material compuesto provee la resistencia y rigidez. Este usualmente es una fibra -continua o discontinua-, o partículas. En la mayoría de los casos, el material de refuerzo es más resistente y rígido que el de la matriz [3]. La fibra tiene una relación de largo – diámetro muy elevada y es esto lo que le da una resistencia y rigidez superior a la que tendría el material en otra presentación [46]. Dependiendo de los requisitos del material a formar el refuerzo se utiliza en diferentes presentaciones, continuo como los tejidos y fibras unidireccional, y discontinuo como la fibra cortada. Ejemplo de esto se observa en la Figura 3.2 [3].

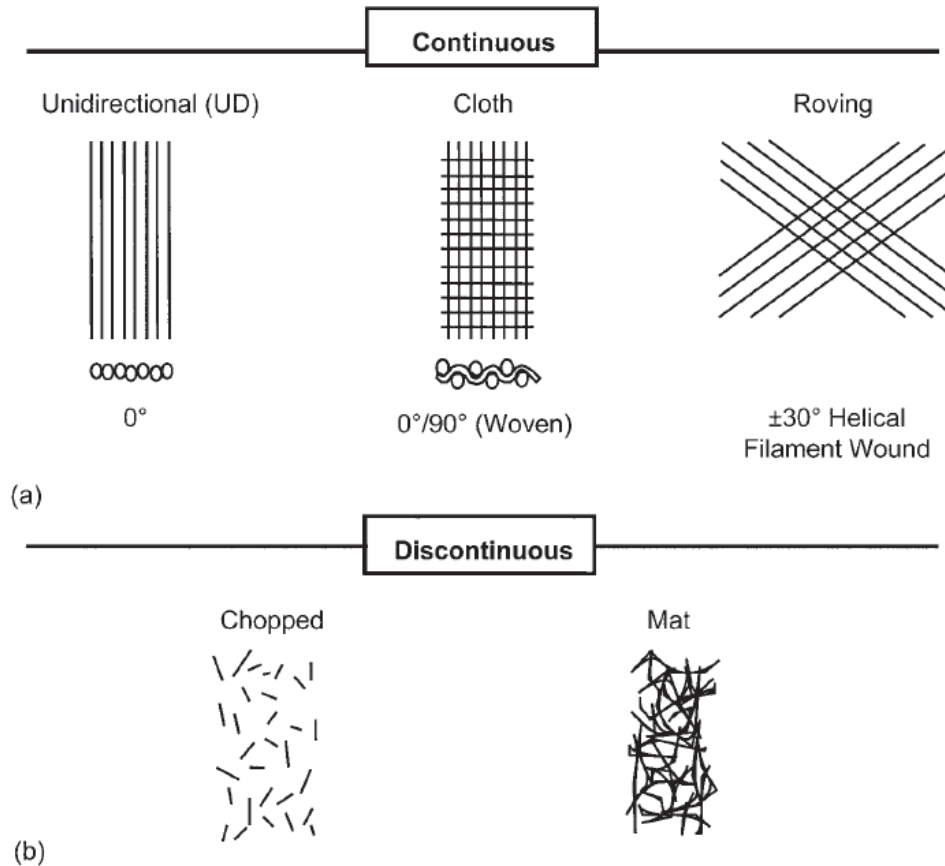


Figura 3.2. Presentaciones típicas de refuerzos [3].

La selección del tipo de refuerzo depende de la aplicación, pero debido a las propiedades inferiores de la fibra discontinua esta suele ser relegada a aplicaciones no estructurales, por lo que la fibra continua es la que se utiliza cuando se busca un producto final con altas propiedades mecánicas. Los principales materiales utilizados como refuerzo son el vidrio, las aramidas el carbono, el boro y el silicio [48]. También destacan refuerzos como el basalto que tienen propiedades mecánicas comparables a estas fibras, pero con ventajas únicas. La Figura 3.3 muestra una comparación entre rigidez específica y resistencia específica en metales y materiales compuestos más utilizados.

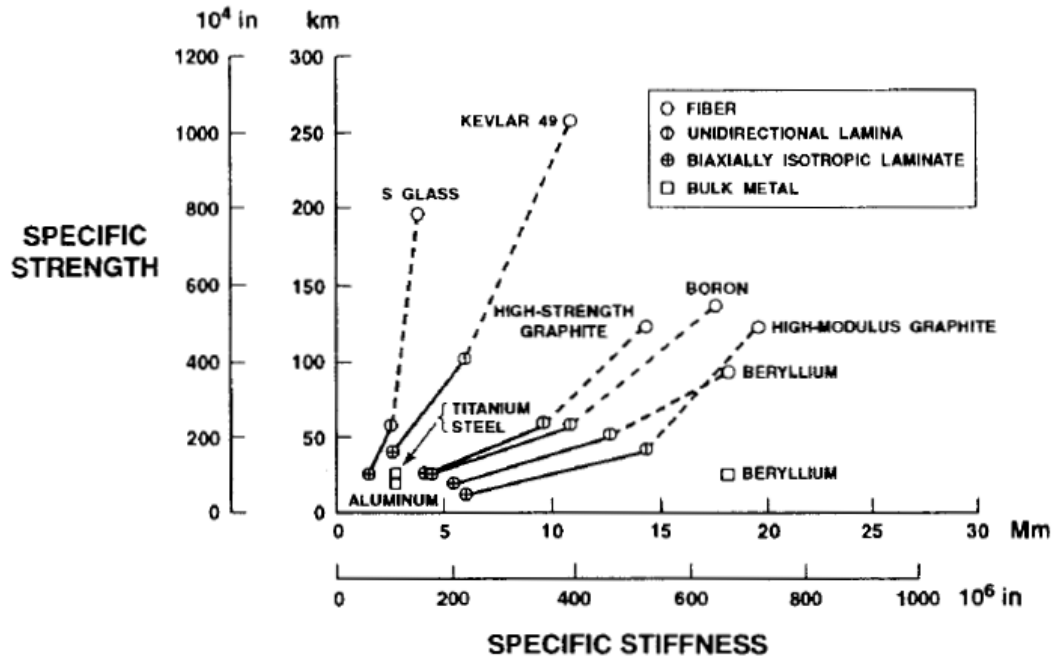


Figura 3.3. Resistencia y rigidez de materiales compuestos típicos y metales [46].

3.2.2. Matrices

La matriz en un compuesto le da la forma al componente. Esta puede ser un polímero, metal o cerámico. Sus principales funciones son:

- 1) Transferir la carga hacia y desde las fibras
- 2) Separar la fibra para prevenir fallos de fibras adyacentes cuando una falla
- 3) Proteger el refuerzo del medio ambiente

Si bien las propiedades mecánicas de un compuesto dependen en su mayoría del refuerzo, algunas propiedades son dominadas por la matriz. Algunas de estas son la resistencia ambiental y a la temperatura, la resistencia a la compresión longitudinal, resistencia transversal a la tensión y resistencia al cortante [1].

El principal determinante al elegir un material de matriz es la temperatura de operación. Las matrices poliméricas son utilizadas hasta un máximo de 600 °F, las metálicas pueden variar desde 500 °F para aleaciones de aluminio hasta 1000 °F en titanio. Por otra

parte, los cerámicos son capaces de soportar temperaturas superiores a los 2000 °F. De los tres materiales principales utilizados como matriz, la matriz polimérica es la que tiene menor densidad, por lo que siempre y cuando se esté por debajo de su temperatura de operación es este material el que se suele utilizar [47]. Dentro de las matrices poliméricas, una muy utilizada es la resina epoxica debido a sus excelentes propiedades mecánicas, poca reducción de tamaño, y forman uniones adecuadas con las fibras [1], esto las vuelve muy utilizadas en industrias de alto desempeño como la aeroespacial.

3.2.3. Mecánica estructural de materiales compuestos laminados

De acuerdo a [46], para un elemento cualquiera la ley de Hooke generalizada que relaciona el esfuerzo y la deformación se presenta en la ecuación (3.8).

$$\sigma_i = C_{ij}\varepsilon_j \quad (3.8)$$

Donde basado en el cubo de la Figura 3.4, σ_i es el vector de componentes de esfuerzo, C_{ij} es la matriz de rigidez, ε_j es el vector de componentes de deformación y $ij = 1, \dots, 6$. Desarrollando completamente la expresión anterior se tiene la ecuación (3.9) que describe el comportamiento de un material anisotrópico, es decir sin planos de simetría en sus propiedades.

$$\begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \tau_4 \\ \tau_5 \\ \tau_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & C_{14} & C_{15} & C_{16} \\ C_{12} & C_{22} & C_{23} & C_{24} & C_{25} & C_{26} \\ C_{13} & C_{23} & C_{33} & C_{34} & C_{35} & C_{36} \\ C_{14} & C_{24} & C_{34} & C_{44} & C_{45} & C_{46} \\ C_{15} & C_{25} & C_{35} & C_{45} & C_{55} & C_{56} \\ C_{16} & C_{26} & C_{36} & C_{46} & C_{56} & C_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \\ \gamma_{23} \\ \gamma_{31} \\ \gamma_{12} \end{bmatrix} \quad (3.9)$$

Donde los términos σ corresponden al esfuerzo axial, τ al esfuerzo cortante, ε a los componentes de deformación, y γ a la deformación cortante.

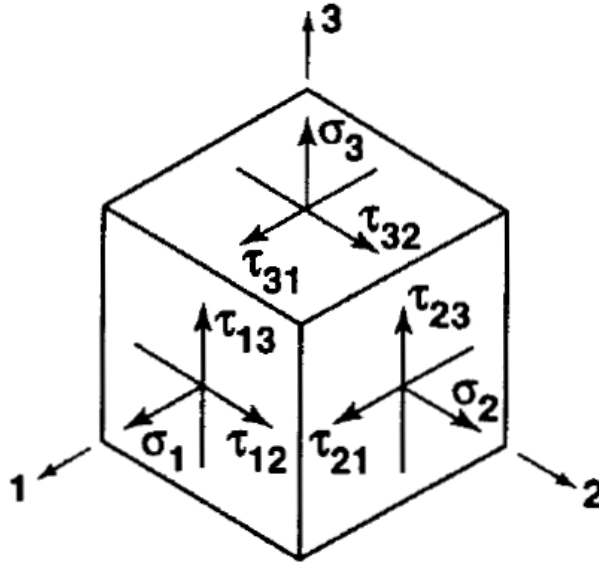


Figura 3.4. Estado de esfuerzos en un elemento cualquiera [46].

Por otra parte, si se tienen dos planos de simetría ortogonales, habrá un tercer plano de simetría mutuo entre estos. Este tipo de comportamiento de material, conocido como ortotrópico y cuya relación esfuerzo – deformación se aprecia en la ecuación (3.10), es el que representa a los materiales compuestos laminados en tres dimensiones.

$$\begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \tau_4 \\ \tau_5 \\ \tau_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & 0 & 0 & 0 \\ C_{12} & C_{22} & C_{23} & 0 & 0 & 0 \\ C_{13} & C_{23} & C_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & C_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & C_{55} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & C_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \\ \gamma_{23} \\ \gamma_{31} \\ \gamma_{12} \end{bmatrix} \quad (3.10)$$

La ecuación (3.10) también es ampliamente utilizada en forma de relación deformación – esfuerzo, sustituyendo la matriz de rigidez $[C_{ij}]$ por su matriz inversa, también conocida como matriz de conformidad $[S_{ij}]$. Es decir que:

$$[C_{ij}] = [S_{ij}]^{-1} \quad (3.11)$$

Esto lleva a la ecuación (3.12) que expresa la relación deformación – esfuerzo en un material ortotrópico.

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \\ \gamma_{23} \\ \gamma_{31} \\ \gamma_{12} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & S_{13} & 0 & 0 & 0 \\ S_{12} & S_{22} & S_{23} & 0 & 0 & 0 \\ S_{13} & S_{23} & S_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & S_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & S_{55} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & S_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \tau_4 \\ \tau_5 \\ \tau_6 \end{bmatrix} \quad (3.12)$$

La relación deformación – esfuerzo suele utilizarse más que la relación esfuerzo deformación debido a las ventajas que tiene la matriz de conformidad $[S_{ij}]$ contra la matriz de rigidez $[C_{ij}]$. Las componentes de conformidad S pueden obtenerse más fácilmente de pruebas de caracterización mecánica que las de la matriz de rigidez. Esto se aprecia en la ecuación (3.13) donde se muestra la matriz de conformidad sustituyendo los componentes S por su equivalente en constantes de ingeniería.

$$[S_{ij}] = \begin{bmatrix} \frac{1}{E_1} & -\frac{\nu_{21}}{E_2} & -\frac{\nu_{31}}{E_3} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu_{12}}{E_1} & \frac{1}{E_2} & -\frac{\nu_{32}}{E_3} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu_{13}}{E_1} & -\frac{\nu_{23}}{E_2} & \frac{1}{E_3} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{23}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{31}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{13}} \end{bmatrix} \quad (3.13)$$

Donde E_i es el módulo de elasticidad en cada dirección, ν_{ij} es la relación de Poisson, y G_{ij} es el módulo cortante en cada dirección. La relación entre la relación de Poisson y el módulo de elasticidad en diferentes direcciones se ve en la ecuación (3.14), donde $i,j=1,2,3$ e $i \neq j$.

$$\frac{\nu_{ij}}{E_i} = \frac{\nu_{ji}}{E_j} \quad (3.14)$$

De acuerdo a [49], al analizar compuestos laminados se suele asumir que la lámina se encuentra en un estado bidimensional de esfuerzo. La ecuación (3.15) muestra esta

suposición en una relación deformación – esfuerzo de un material ortotrópico, se puede observar que los componentes de esta se ven reducida a comparación de la ecuación (3.12), lo que facilita los cálculos. Y es válido debido a que a nivel lamina la mayor parte de la carga es soportada por la dirección del refuerzo.

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \gamma_{12} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & 0 \\ S_{12} & S_{22} & 0 \\ 0 & 0 & S_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \tau_{12} \end{bmatrix} \quad (3.15)$$

Sustituyendo constantes de ingeniería en la matriz de conformidad de la ecuación (3.15) se obtiene la ecuación (3.16) que es utilizada para análisis en laminas unidireccionales como las observadas en la Figura 3.5.

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \gamma_{12} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{E_1} & -\frac{\nu_{12}}{E_1} & 0 \\ -\frac{\nu_{12}}{E_1} & \frac{1}{E_2} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{G_{12}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \tau_{12} \end{bmatrix} \quad (3.16)$$

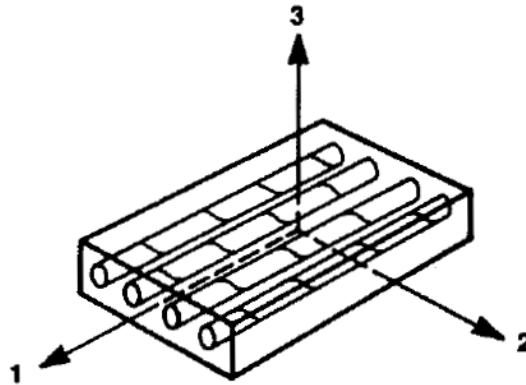


Figura 3.5. Lámina con refuerzo unidireccional [46].

3.3. Basalto

Se conoce como basalto a una roca volcánica conocida principalmente por su resistencia a alta temperatura, resistencia y durabilidad. Históricamente ha sido utilizado como protección contra incendios, siendo una alternativa segura al asbesto. Cuando se le mezcla con una matriz polimérica es uno de los pocos materiales compuestos que puede reciclarse debido a que el basalto tiene un punto de fusión de 1400 °C, temperatura mucho menor que el punto de fusión de las matrices poliméricas, por lo que puede recuperarse la fibra después. Su método de fabricación es similar al de la fibra de vidrio, pero requiere menos energía. Esto aunado a la alta disponibilidad de materia prima (la roca de basalto puede encontrarse en grandes cantidades en todo el mundo) resulta en un costo de producción menor que el de la fibra de vidrio [5].

El basalto como materia prima se puede ubicar en grandes cantidades en Rusia, donde se construyeron las primeras plantas de procesamiento de esta roca en 1980. Mientras tanto, estados unidos cuenta con cientos de miles de millas cuadradas cubiertas de roca de basalto en los estados de Washington, Oregon e Idaho [19].

3.3.1. Fibra de basalto como refuerzo

Investigaciones han determinado que la fibra de basalto en matriz polimérica (FBMP) tiene una mejor relación precio – beneficio que la fibra de carbono en matriz polimérica (FCMP) y al compararla con la fibra de vidrio en matriz polimérica (FVMP) la FBMP tiene mejor resistencia a la flexión y compresión, así como un mayor módulo de flexión [7]. Otros autores [50] agregan que la FBMP puede reemplazar a la FVMP debido a que su densidad promedio y módulo de elasticidad promedio son prácticamente iguales, mientras que el costo de producción de la fibra de basalto es sólo la mitad del de la fibra de vidrio. En otros estudios

[24] también se coloca a la fibra de basalto en una posición intermedia entre la de vidrio y la de carbono debido a que su módulo de elasticidad y propiedades se ubica en medio de estos. Por su parte, Parnas et al [19] en su investigación indica que no se encontraron diferencias significativas en la rigidez y resistencia de FBMP y la FVMP.

Quizá más importante que el consenso en la posición de las propiedades mecánicas de la FBRP entre diversos autores es la observación que hacen múltiples fuentes [7], [19], [23], [51] de que la fibra de basalto tiene mejores propiedades de adhesión de interface con una matriz de resina epoxica, mejores que las fibras de vidrio y de carbono. Uno de estos estudios [23] presenta una resistencia al esfuerzo cortante interlaminar (ILSS) 11% mayor para la FBMP que en la FVMP, lo que implica menor delaminación.

La Tabla 3.1 muestra una comparativa de las propiedades de densidad, resistencia a la tensión y módulo de elasticidad entre refuerzos de fibra de basalto, de vidrio y de carbono en base a los estudios realizados por diversos autores [22], [51], [52]. En esta se observa que la resistencia a la tensión del refuerzo de basalto es sólo inferior al del S-Glass con una densidad ligeramente superior, mientras que su módulo de elasticidad es sólo segundo al de la fibra de carbono. La densidad del basalto como refuerzo es ligeramente superior al de la fibra de vidrio y medianamente superior al de la fibra de carbono.

Tabla 3.1. Comparativa de propiedades de la fibra de basalto contra otros refuerzos [22], [51], [52].

Material	Densidad (g/cm³)	Resistencia a la tensión (MPa)	Módulo de elasticidad (GPa)
Basalt	2.74	4773	96
E-Glass	2.55	3967	80
S-Glass	2.44	6005	96
Carbon	1.79	4667	244

3.3.2. Fabricación de fibras de basalto

La fabricación de la fibra de basalto sigue el mismo proceso que el de la fibra de vidrio. Se utiliza como materia prima la roca volcánica de basalto en un horno en donde se derrite a una temperatura de 1450°C - 1500°C. El material fundido es forzado a través de un buje de platino/rodio, lo que crea las fibras por extrusión [6].

Un diagrama completo del proceso se observa en la Figura 3.6. Este está dividido en 11 estaciones:

- 1) Silo de roca triturada
- 2) Estación de carga
- 3) Sistema de transporte
- 4) Estación de carga de lotes
- 5) Zona de fundición inicial
- 6) Zona de calentamiento secundaria con control preciso de temperatura
- 7) Bujes de formación de filamentos
- 8) Aplicador de dimensionado
- 9) Estación de formado de tejidos
- 10) Estación de tensado de fibra
- 11) Estación de enrollado automática

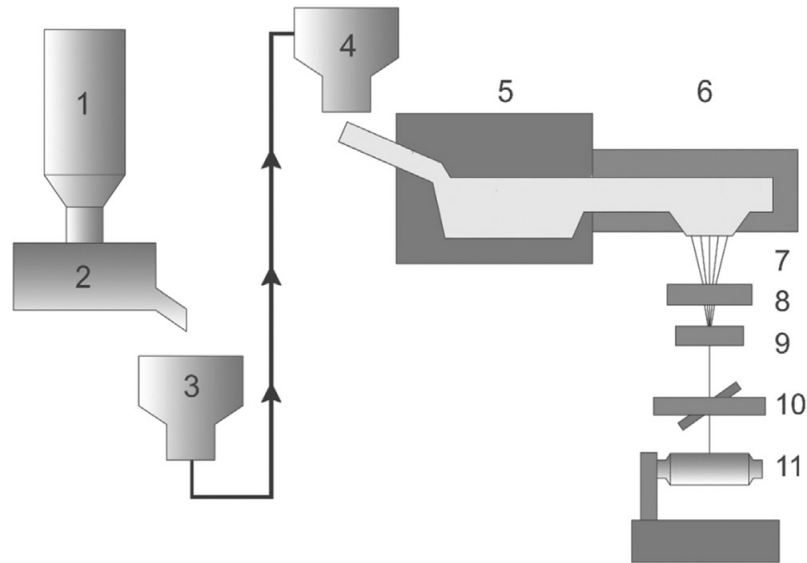


Figura 3.6. Esquema simplificado de una línea de procesamiento de fibra de basalto [50].

Si bien el material está ampliamente disponible a bajo costo, es de notar que tanto las propiedades químicas como mecánicas dependen de la calidad de la materia prima debido a que el proceso no utiliza aditivos. Diferencias en la composición de esta conllevan a diferencias en las cualidades finales de la fibra de basalto como tal [53].

3.4. Mecánica de fractura

3.4.1. Mecánica de fractura lineal elástica

El primer criterio para describir fractura en materiales lineales isotrópicos es el criterio de energía propuesto por Griffith y posteriormente modificado por Irwin. Este establece que la extensión de una grieta ocurrirá cuando la energía disponible para el crecimiento de la misma sea superior a la resistencia del material. La resistencia del material puede incluir energía superficial, trabajo plástico, u otros tipos de disipación de energía asociados con el crecimiento de grietas [9]. La ecuación (3.17) describe este criterio en una placa de longitud infinita con una grieta de tamaño:

$$G = \frac{\pi \sigma^2 a}{E} \quad (3.17)$$

Aquí G corresponde a la tasa de liberación de energía, definida como la tasa de cambio en energía potencial dentro del área de la grieta para un material lineal elástico, y se dice que una grieta se propaga cuando G alcanza un valor crítico G_c que corresponde a la resistencia a la fractura del material. Por otra parte, el término a corresponde a la mitad de la longitud de la grieta mientras que E es el módulo de elasticidad de la placa. Un diagrama de esta aproximación se observa en la Figura 3.7.

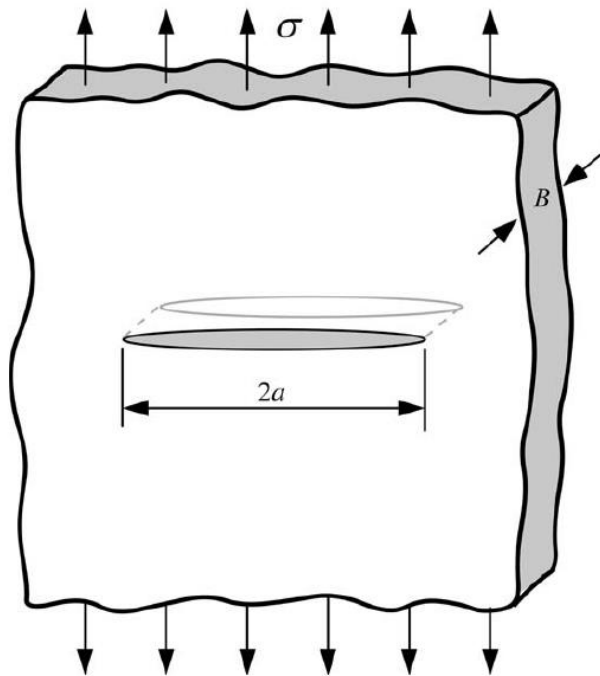


Figura 3.7. Placa de longitud infinita sometida a tensión con una grieta elíptica a través del espesor [9].

Este criterio es aplicable para situaciones reales siempre y cuando el comportamiento del material sea predominantemente lineal elástico y el ancho de la placa sea mucho mayor que la longitud de la grieta.

El segundo criterio ampliamente utilizado es el del factor de intensidad de esfuerzos. Esta aproximación involucra describir el campo de esfuerzos en la punta de la grieta para predecir su comportamiento. Para esto se identifican 3 modos de apertura de grieta, conocidos

como modo 1-3 como se observa en la Figura 3.8. El modo 1 es apertura a tensión, el modo 2 es apertura por cortante deslizante dentro del plano, mientras que el modo 3 es apertura por cortante fuera del plano.

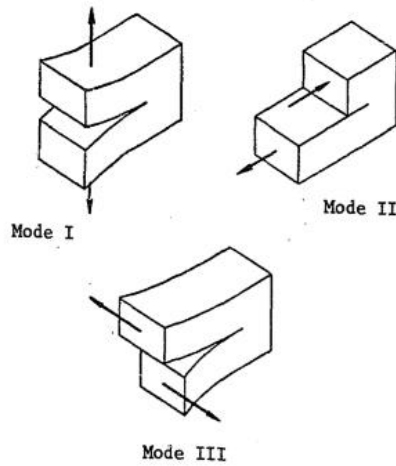


Figura 3.8. Modos fundamentales de apertura de grieta [10].

El eje coordinado que se utiliza por convención en el estudio de grietas se ve en la Figura 3.9, en base a esto Anderson [9] presenta las ecuaciones (3.18) - (3.21) para describir el campo de esfuerzos en la punta de una grieta en un material lineal elástico isotrópico bajo un modo I de apertura de grieta.

$$\sigma_{xx} = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \cos\left(\frac{\theta}{2}\right) \left[1 - \sin\left(\frac{\theta}{2}\right) \sin\left(\frac{3\theta}{2}\right)\right] \quad (3.18)$$

$$\sigma_{yy} = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \cos\left(\frac{\theta}{2}\right) \left[1 + \sin\left(\frac{\theta}{2}\right) \sin\left(\frac{3\theta}{2}\right)\right] \quad (3.19)$$

$$\tau_{xy} = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \cos\left(\frac{\theta}{2}\right) \sin\left(\frac{\theta}{2}\right) \sin\left(\frac{3\theta}{2}\right) \quad (3.20)$$

Mientras que σ_{zz} es 0 en condiciones de esfuerzo plano y para deformación plana es de acuerdo a la ecuación (3.21)

$$\sigma_{zz} = \nu(\sigma_{xx} + \sigma_{yy}) \quad (3.21)$$

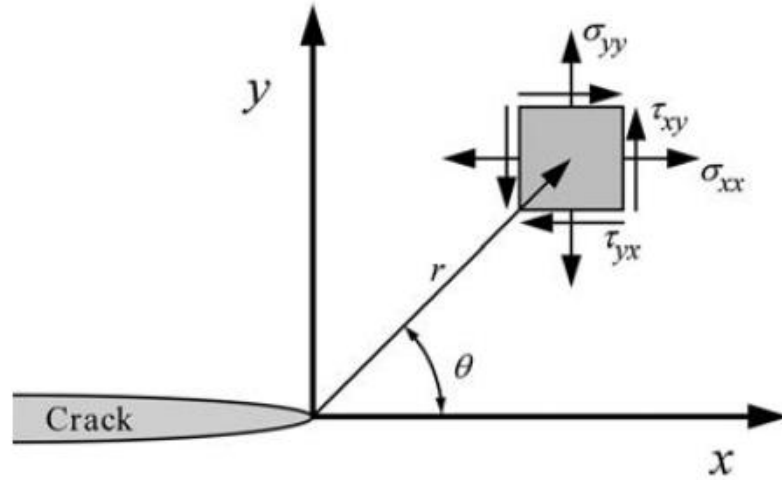


Figura 3.9. Sistema coordenado en la punta de grieta [9].

Para un modo II de apertura de grieta el campo de esfuerzo se describe con las siguientes ecuaciones [9]:

$$\sigma_{xx} = -\frac{K_{II}}{\sqrt{2\pi r}} \sin\left(\frac{\theta}{2}\right) \left[2 + \cos\left(\frac{\theta}{2}\right) \cos\left(\frac{3\theta}{2}\right)\right] \quad (3.22)$$

$$\sigma_{yy} = \frac{K_{II}}{\sqrt{2\pi r}} \sin\left(\frac{\theta}{2}\right) \cos\left(\frac{\theta}{2}\right) \cos\left(\frac{3\theta}{2}\right) \quad (3.23)$$

$$\tau_{xy} = \frac{K_{II}}{\sqrt{2\pi r}} \cos\left(\frac{\theta}{2}\right) \left[1 - \sin\left(\frac{\theta}{2}\right) \sin\left(\frac{3\theta}{2}\right)\right] \quad (3.24)$$

Bajo esta condición se mantiene que σ_{zz} es 0 en para esfuerzo plano, mientras que para deformación plana es de acuerdo a la ecuación (3.21).

El concepto de K presentado en las ecuaciones anteriores representa la magnitud de la intensificación del esfuerzo en la región de la punta de la grieta y se define como el factor de intensidad de esfuerzos. K determina, por lo tanto, el efecto de la introducción de una grieta en una estructura, ya que una vez conocido K, el campo de esfuerzos alrededor de una grieta queda definido por completo [54]. El factor K es descrito entonces para una placa como en la Figura 3.7, por medio de la ecuación (3.25).

$$K = \sigma\sqrt{\pi a} \quad (3.25)$$

Donde K es el factor de intensidad de esfuerzos en unidad es de $MPa\sqrt{m}$ y a es la media longitud de la grieta. Es importante mencionar que la solución de la ecuación (3.25)

es válida sólo para grietas en placas de longitud infinita, y que hay múltiples soluciones analíticas ya derivadas en bibliografía para distintas geometrías de grieta.

Al igual que para la aproximación del criterio de energía donde hay un crecimiento de grieta cuando la resistencia a la fractura de un material es igual a la tasa de liberación de energía $G_c = G$, el mismo caso ocurre con el factor de intensidad de esfuerzos. En este caso habrá un crecimiento de grieta cuando $K_c = K$, donde K_c es la resistencia del material y K es el factor de intensidad de esfuerzos actual. Debido a esta similitud, ambos factores pueden relacionarse con la ecuación (3.26)

$$G = \frac{K_1^2}{E} \quad (3.26)$$

Debido a esto, ambas aproximaciones son esencialmente equivalentes cuando se aplican a materiales lineales elásticos [9].

3.5. Fractura en materiales compuestos

Los materiales compuestos son ortotrópicos y la fractura en este tipo de material difiere significativamente de la fractura en materiales isotrópicos. Los principios matemáticos de igual manera son mucho más complejos. Se ha observado que los principios de LEFM se mantienen válidos en materiales compuestos unidireccionales que tienen una grieta a lo largo de la dirección de la fibra. Sin embargo, dicho principio no se mantiene por completo cuando la grieta tiene un ángulo con respecto a la fibra [10].

Esto fue confirmado por Wu [55] cuando realizó estudios para 4 caminos de carga como se ve en la Figura 3.10 para determinar si los principios de mecánica de fractura lineal elástica eran aplicables a materiales compuestos. En estos tomó registros del crecimiento de grietas en placas laminadas con grietas a diferentes ángulos en respecto a las direcciones de las fibras. Wu determinó que los principios de MFLE son aplicables cuando la grieta se ubica

en la dirección de las fibras, independientemente de la dirección de aplicación de la carga, y comprobó que para un laminado sometido a tensión pura en dirección transversal a las fibras y con una grieta orientada en la misma dirección de la fibra, el factor de intensidad de esfuerzos se da por las ecuaciones (3.27) y (3.28), lo que es equivalente a lo observado apertura de grietas por puro modo I en placas isotrópicas lineales elásticas [46].

$$K_1 = \sigma_c^\infty \sqrt{a_c} \quad (3.27)$$

$$K_2 = 0 \quad (3.28)$$

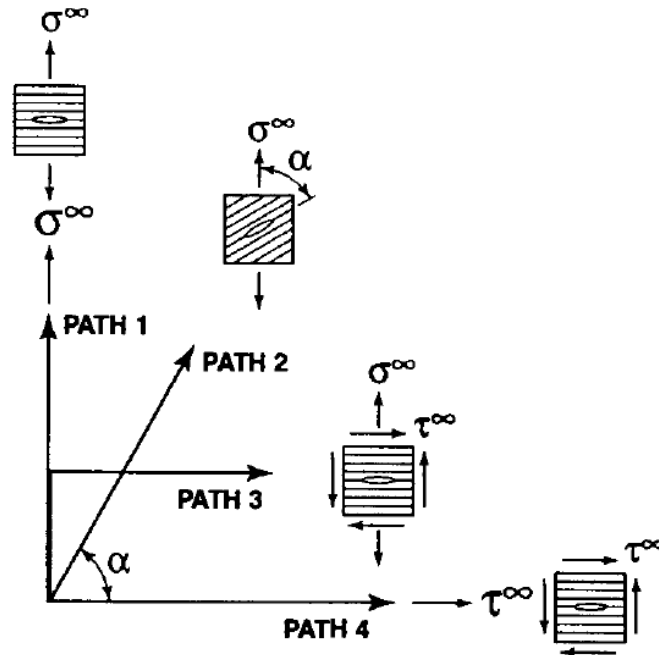
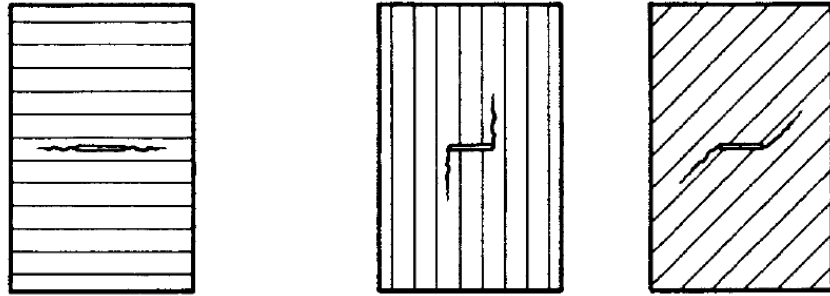


Figura 3.10. Caminos de carga y orientaciones de grieta en los experimentos de Wu [46].

Este tipo de grietas que crecen a lo largo de la dirección de las fibras se conocen como auto similares, y es bajo esta condición que se pueden hacer predicciones de crecimiento de grieta lineal elástico. En materiales compuestos laminados se le conoce como delaminación a estas grietas que crecen entre láminas en la interface matriz – refuerzo. Estas suposiciones no son válidas para grietas que crecen de manera no auto similar, como se ve en la Figura 3.11.



a Self-Similar Crack Growth

b Non-Self-Similar Crack Growth

Figura 3.11. Tipos de crecimientos de grieta en compuestos laminados. Auto similar (izquierda) y No auto similar (derecha) [46].

3.5.1. Delaminación en materiales compuestos laminados

Sobre las fracturas en materiales compuestos, Marat-Mendes [56] establece:

“Los fallos en estructuras compuestas suelen desarrollarse como delaminación entre laminas. Estos fallos son los más críticos pues reducen la vida de las estructuras. La delaminación es usualmente considerada como una propagación de grieta entre 2 láminas adyacentes. Esta delaminación puede iniciar en un defecto interlaminar o por grietas en la matriz, que pueden ser causadas por cargas de impacto o estáticas que son aplicadas perpendicularmente al plano.” (p. 2)

A este tipo de grietas formadas entre láminas de un material compuesto se les conoce como “grietas interlaminares” debido a que están confinadas a un plano. Los modos de falla de apertura de grieta mostrados en la Figura 3.8 son de igual manera aplicables a esta condición cuando la grieta se está abriendo a través de la interface matriz – refuerzo.

La delaminación es uno de los pocos ejemplos en los que se ven las grietas auto similares en compuestos laminados, siendo esta en efecto una grieta que separa laminas adyacentes con un plano de grieta que yace en el plano de la interface entre láminas. Al igual que en las grietas en materiales metálicos, una delaminación crecerá de manera estable hasta llegar a un tamaño crítico, a partir de donde crecerá de manera inestable. Estas características

vuelven a la fractura interlaminar el mejor candidato para análisis de mecánica de fractura [49]. Además, debido al complejo estado de esfuerzos que tiene lugar en el plano de delaminación, estos problemas pueden resolverse adecuadamente con la aproximación de tasa de liberación de energía de deformación.

Es importante mencionar que cuando se analizan los fenómenos de fractura confinados a los planos interlaminares la matriz del material domina la respuesta a la fractura y la mecánica de fractura elástico lineal (LEFM) puede predecir el comportamiento de la fractura en el material [13].

Además de las grietas interlaminares, también se pueden dar grietas *intralaminares* en un material compuesto. Como su nombre lo indica estas se propagan perpendiculares a la dirección de las láminas. A continuación, en la Figura 3.12 puede verse una comparación de estos dos tipos de defectos.

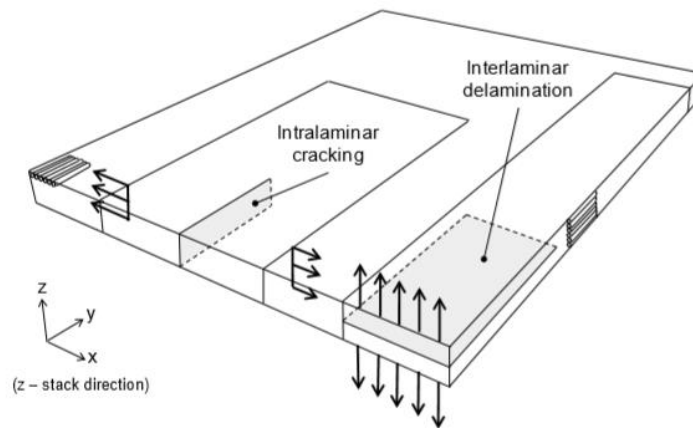


Figura 3.12. Fractura intralaminar contra delaminación interlaminar [12].

Czabaj [12] explica la relación entre las grietas intralaminares e interlaminares en un material dado de la siguiente manera:

“A menudo se asume que el crecimiento de las grietas intralaminares puede predecirse basada en la propiedad de resistencia a la fractura obtenidas de pruebas interlaminares (o de delaminación). Esta suposición se basa en la

idea de que para un modo de carga dado el comienzo de las delaminaciones y grietas intralaminares está relacionada con la resistencia a la fractura de la resina y las propiedades de la interfaz matriz-refuerzo, que en teoría deberían ser independientes de del plano y dirección de la delaminación macroscópica o el avance de la grieta.” (p. 2)

3.5.2. Resistencia a la fractura en laminados

Una prueba estándar para determinar la resistencia de fractura interlaminar en materiales compuestos es la ASTM D6671: “*Standard Test Method for Mixed Mode I-Mode II Interlaminar Fracture Toughness of Unidirectional Fiber Reinforced Polymer Matrix Composites*”.

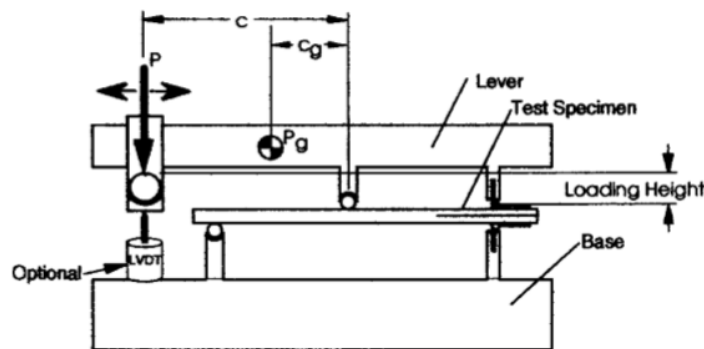


Figura 3.13. Aparato de pruebas y espécimen.

Esta prueba permite conocer la resistencia a la fractura G_c a diferentes relaciones de modos de fractura entre modo I y modo II en materiales compuestos laminados unidireccionales de matriz polimérica. La prueba consiste en utilizar una montura especializada, mostrada en la Figura 3.14, en un espécimen con una delaminación inicial en un extremo para aplicar simultáneamente una flexión en el centro de la muestra y una separación en el extremo. Esto permite delaminar la probeta por modo I mientras que se aplica fractura por cortante por modo II. La relación entre estos modos se ajusta al variar la

distancia del brazo de palanca C de la montura, un diagrama detallado puede apreciarse en la Figura 3.13.

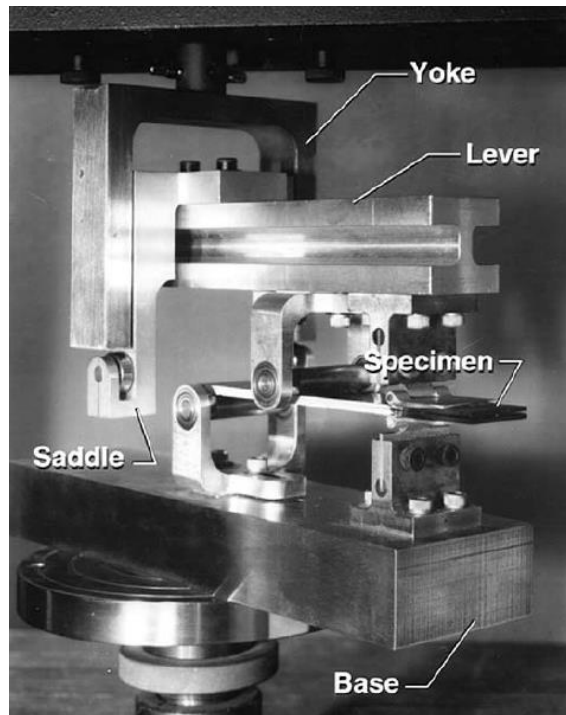


Figura 3.14. Montura de prueba de flexión por modo mixto [16].

El alcance de la prueba específica que está delimitado a laminados de material compuesto de fibra de carbono unidireccional con matrices poliméricas frágiles y duras de una fase. Sin embargo, se especifica que la prueba también se ha utilizado con éxito para compuestos de fibra de carbono y uniones adhesivas por lo que es de esperarse que también sería aplicable en compuestos de fibra de basalto [16].

En cuanto a los métodos y fabricación, se requiere un mínimo de 5 especímenes para obtener resultados significativos. Estos deben fabricarse de fibra unidireccional en un laminado simétrico a 0° , Una película no adhesiva – preferentemente de polimérica – debe ser insertada en extremo de la probeta a la mitad del laminado para generar la delaminación inicial. Una ilustración con dimensiones recomendadas puede observarse en la Figura 3.15.

Se recomienda adherir bisagras al extremo con la delaminación inicial por medio de un adhesivo de cianoacrilato.

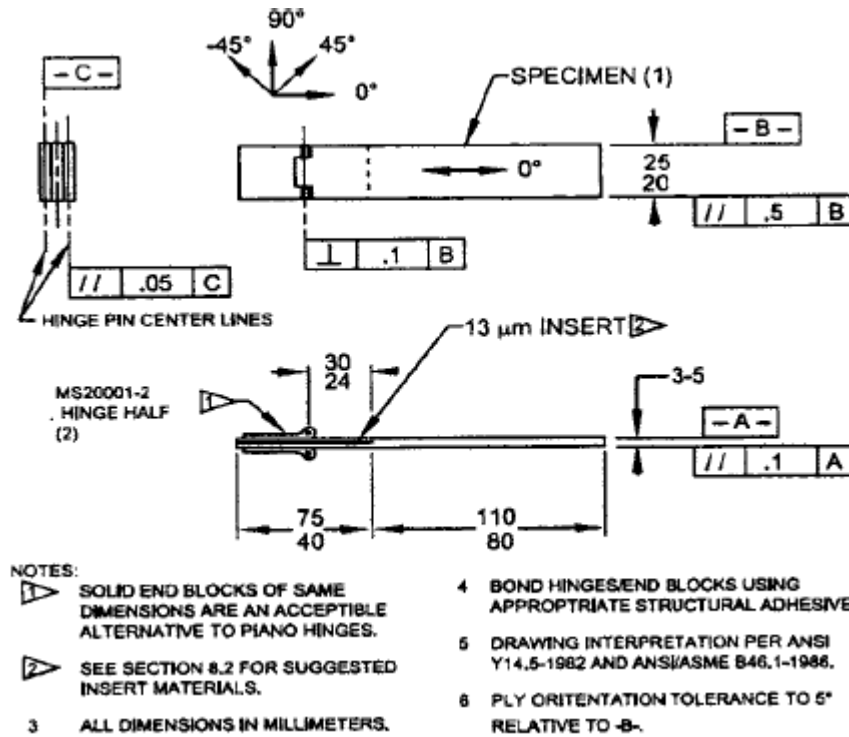


Figura 3.15. Diagrama de las probetas con dimensiones recomendadas en unidades del sistema internacional [16].

Es necesario tomar un registro de la carga – desplazamiento al realizar las pruebas, y se recomienda utilizar un sensor de respuesta sónica sobre las probetas de modo que se pueda tener un registro del punto en el que comienza a propagarse la grieta.

Conociendo las propiedades mecánicas del material, y con los resultados de carga y desplazamiento, es posible calcular la resistencia a la fractura G_c , así como el porcentaje de contribución del modo I y modo II para esa configuración en específico. Al tabular estos resultados para diversas relaciones de modos se puede realizar una gráfica de resistencia a la fractura en modo mixto, como se ve en la Figura 3.16, y que permite conocer el comportamiento del material en diferentes condiciones.

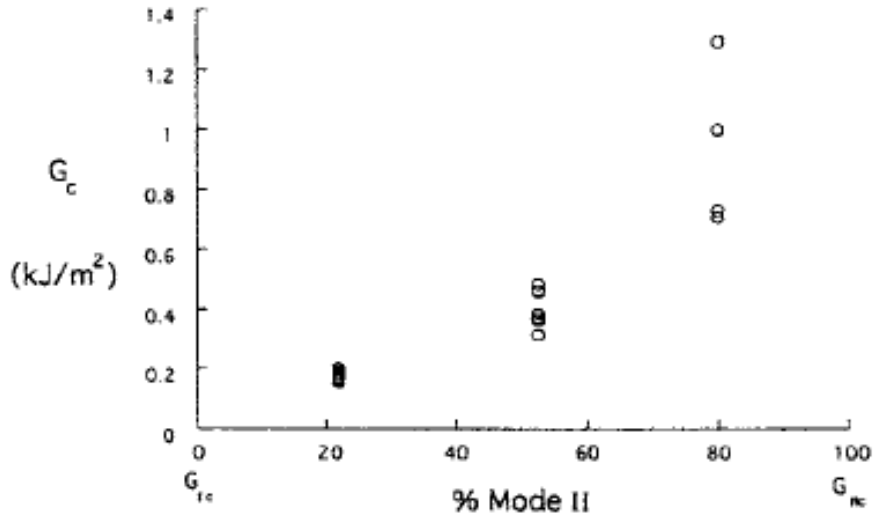


Figura 3.16. Gráfica de ejemplo de resistencia a la fractura en modo mixto [16].

Debido a que es necesario caracterizar el material con el que se va a trabajar para poder calcular su resistencia a la fractura, es necesario realizar pruebas mecánicas al material en cuestión. La prueba “*ASTM D3039: Método estándar de pruebas para propiedades a tensión de materiales compuestos de matriz polimérica*” permite conocer las propiedades a tensión en materiales compuestos de matriz polimérica reforzados por fibra de módulo elevado. Esta se limita a fibra continua o discontinua, en el que los laminados son balanceados y simétricos en la dirección de la prueba. En esta prueba se somete a tensión una probeta de material compuesto laminada en la dirección de la fibra hasta que ocurre un fallo en esta, y de acuerdo a la respuesta de la máquina de prueba e instrumentación se vuelve posible conocer las propiedades mecánicas del material.

La metodología de realización de la prueba implica fabricar un mínimo de 5 probetas en un laminado unidireccional con matriz polimérica. El espesor y otras dimensiones pueden variarse a conveniencia, pero un recomendado se observa en la Figura 3.17

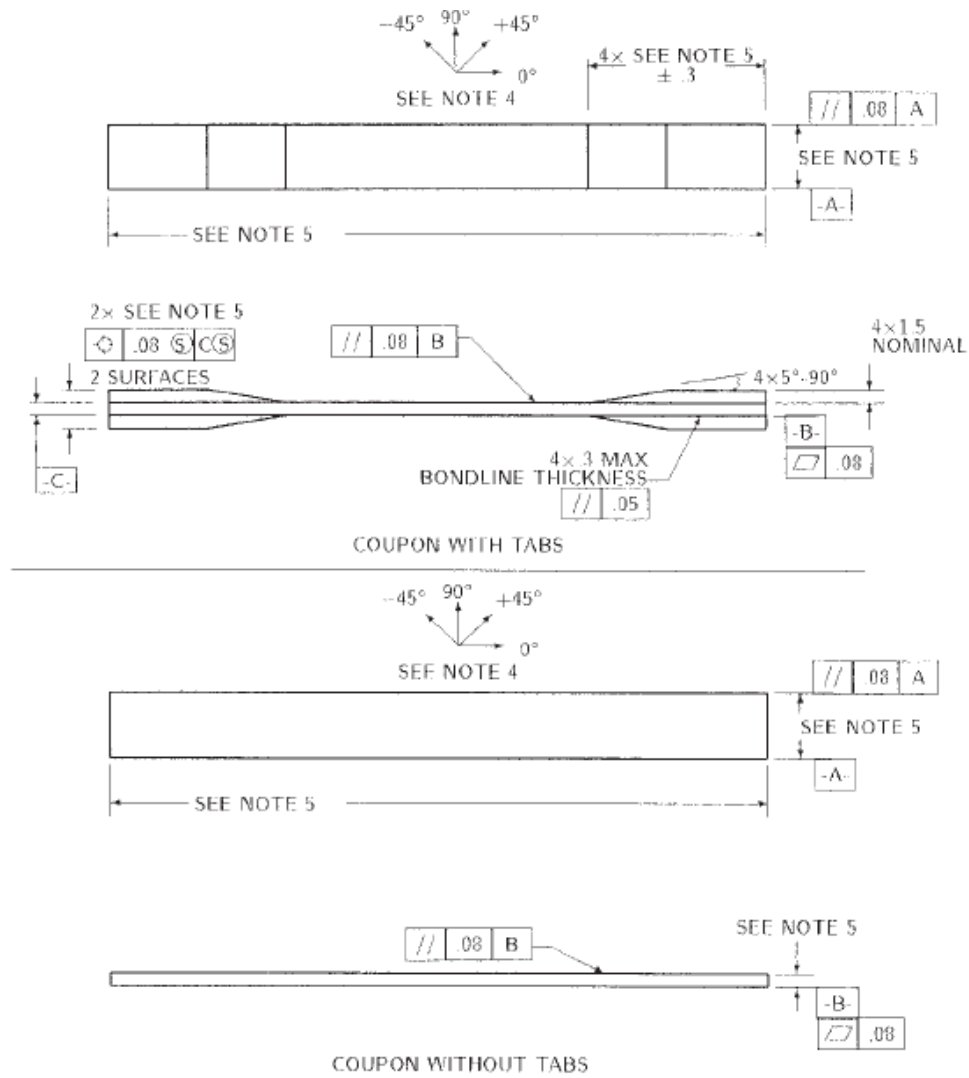


Figura 3.17. Ilustración de probeta con dimensiones nominales en unidades del sistema internacional [57].

Debido a que se requiere la curva esfuerzo – deformación para conocer las propiedades del material, es necesario utilizar galgas extensiométricas o extensómetros para medir la deformación en X e Y de la prueba, ejemplo del posicionamiento de las galgas se aprecia en la Figura 3.18.

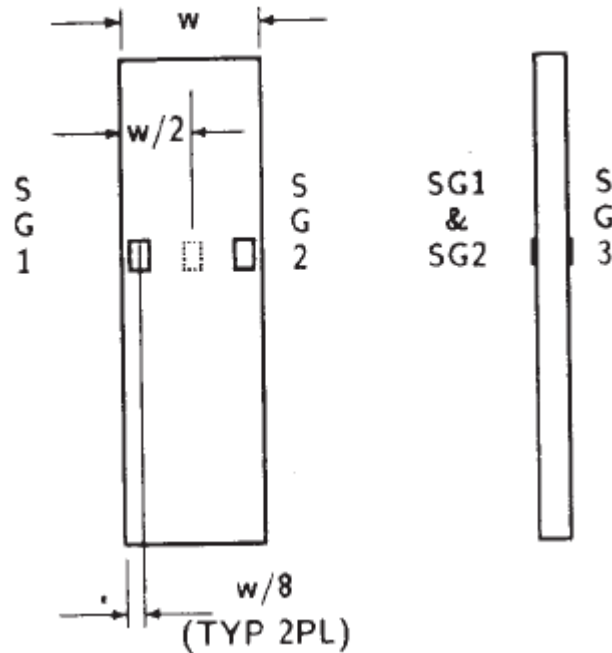


Figura 3.18. Diagrama de una probeta instrumentada con galgas extensiométricas [57].

Por medio de la respuesta de carga – desplazamiento del ensayo de tensión, y de las deformaciones de las galgas extensiométricas o extensómetro, es posible calcular la curva esfuerzo deformación para el material probado. De esta se obtienen las siguientes propiedades mecánicas:

- Resistencia última a la tensión
- Deformación última a la tensión
- Módulo de elasticidad a tensión
- Relación de poisson

Cabe destacar que, debido a que las propiedades calculadas son en la dirección de la fibra, la prueba se realizaría dos veces: una en la dirección 0° y otra en 90° .

Para las propiedades de respuesta al esfuerzo cortante, la prueba “*ASTM D3518: Método estándar de pruebas para respuesta cortante en el plano de materiales compuestos de matriz polimérica por prueba de tensión de laminado a $\pm 45^\circ$* ” permite conocer la

respuesta de esfuerzo cortante en el plano en una probeta laminada de manera simétrica a $\pm 45^\circ$ en laminados de fibra continua en matriz polimérica. La prueba se realiza en la dirección “X” de la probeta. El desarrollo de esta es idéntico al que se sigue en la norma ASTM D3039, a excepción de la configuración del laminado. En la Figura 3.19 se observa una ilustración donde se ejemplifica la carga en respecto a la dirección del laminado.

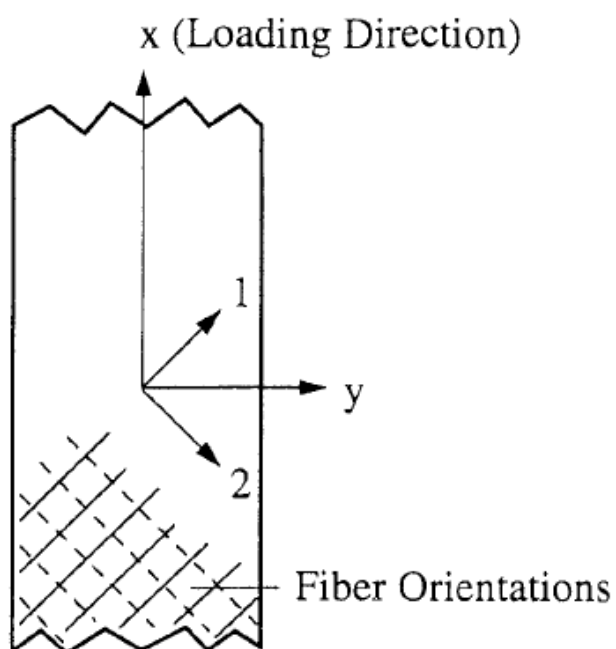


Figura 3.19. Configuración de una probeta ASTM D3518 a comparación de la dirección de la carga aplicada [58].

La fabricación de especímenes se lleva a cabo de manera similar a la ASTM D3039 en donde se realiza una prueba a tensión de un mínimo de 5 probetas laminadas. A diferencia de esta, sin embargo, los laminados son a $+45^\circ$ y -45° de forma simétrica. Las dimensiones se mantienen igual al de la prueba anterior, a excepción del espesor que está dado por la configuración del laminado. En un laminado unidireccional es recomendada una configuración de 16, 20 o 24 capas, manteniéndose una simetría de 45° y -45°

Por medio de la respuesta de carga – desplazamiento del ensayo de tensión, y de las deformaciones de las galgas extensiométricas o extensómetro, se puede graficar la curva esfuerzo cortante – deformación cortante para el material probado. De esta curva se pueden obtener las siguientes propiedades mecánicas:

- Máximo esfuerzo cortante en el plano para un laminado $+45^\circ$
- Máxima deformación cortante en el plano para un laminado $+45^\circ$
- Módulo de elasticidad cortante en el plano

3.6. Método del elemento finito

3.6.1. Factores de intensidad de esfuerzo en ANSYS Workbench

La paquetería de software ANSYS puede resolver problemas de mecánica de fractura computacional por medio de diferentes métodos. Para calcular factores de intensidad de esfuerzo (K) se utiliza el método de la integral de dominio. Por medio de este método se evalúa el área discretizada alrededor de la punta de la grieta con una integral de interacción, mostrada en la ecuación (3.29)

$$I_0 = \frac{-\int_V q_{i,j} [\sigma_{kl} \varepsilon_{kl}^{aux} \delta_{ij} - \sigma_{kj}^{aux} u_{k,i} - \sigma_{kj} u_{ki}^{aux}] dV}{\int_S \delta q_n dS} \quad (3.29)$$

Donde σ_{ij} , ε_{ij} y u_i son el esfuerzo, deformación y desplazamiento. σ_{ij}^{aux} , ε_{ij}^{aux} y u_i^{aux} son el esfuerzo, deformación y desplazamiento del campo auxiliar, y q_i es el vector de extensión de grieta. Posteriormente los factores de intensidad de esfuerzo se obtienen al relacionarse con la integral de interacción en la ecuación (3.30).

$$I = \frac{2}{E^*} (K_1 K_1^{aux} + K_2 K_2^{aux}) + \frac{1}{\mu} K_3 K_3^{aux} \quad (3.30)$$

Donde K_i son los factores de intensidad de esfuerzo para modo I, II y III. K_i^{aux} son los factores de intensidad de esfuerzos auxiliares, E^* es el módulo de elasticidad para una

condición de esfuerzo plano y $E^* = \frac{E}{(1-\nu^2)}$ para deformación plana, ν es el módulo de Poisson y μ es el módulo cortante del material. Es importante mencionar que el campo auxiliar es el sistema coordenado local basado en las coordenadas de la punta de la grieta.

3.6.2. Técnica de cierre de grieta virtual (VCCT)

Este método se basa en los principios del criterio de energía de Griffith discutidos con anterioridad para calcular la tasa de liberación de energía de deformación como criterio de fractura. La suposición de este método es que la energía requerida para separar la superficie del frente de grieta – es decir crecer la grieta – igual a la energía requerida para cerrar la grieta. La energía por este método es calculada con la ecuación (3.31)

$$G = \frac{F\delta}{2A} \quad (3.31)$$

Donde G es la columna vectorial de la tasa de liberación de energía de deformación, F son las fuerzas nodales en el frente de delaminación como se observa en la Figura 3.20, δ es una columna vectorial que consiste en los desplazamientos relativos del par de nodos en el frente de grieta, y A es el área superficial creada por el crecimiento de la grieta [59].

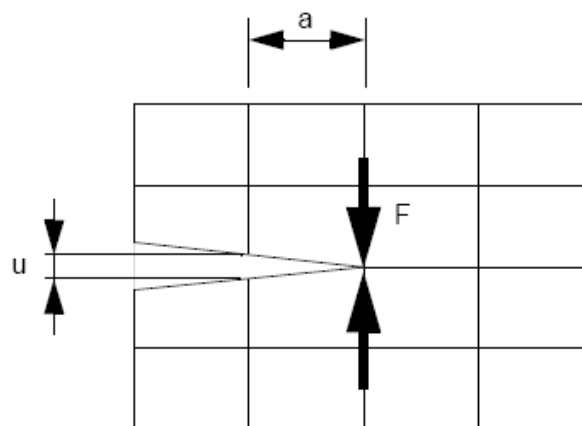


Figura 3.20. Diagrama de grieta en 2D en un modelo de elemento finito [59].

El criterio de crecimiento de grieta de VCCT se expresa en la ecuación (3.32) donde si dicho índice es superior a 1 se da un crecimiento de grieta.

$$\frac{G_T}{G_c} \geq 1 \quad (3.32)$$

Siendo G_T la suma de los componentes individuales para los 3 modos de falla G_I , G_{II} y G_{III} , y G_c la resistencia a la fractura del material.

El método VCCT es aplicable en ANSYS y la forma más común de simular delaminación utilizando esta técnica se ve en la Figura 3.21 . Aquí se establece una zona de delaminación inicial en donde se ubicará el frente de grieta (observado en rojo en la imagen a y c) y los nodos posteriores (zona azul en las imágenes b y c) – a través de los que se propagará la grieta – se unen por medio de contactos. Esta zona unida por contactos posteriormente podrá delaminarse si se alcanza el criterio de la ecuación (3.32).

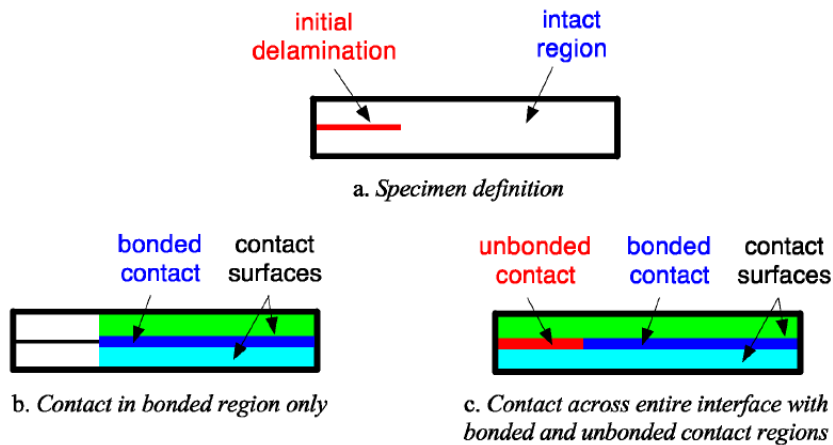


Figura 3.21. Ejemplo del modelado de una grieta en elemento finito utilizando contactos [59].

Capítulo 4

4. Metodología



Figura 4.1. Diagrama general de la metodología

El flujo de proceso general para el desarrollo de la metodología se observa en la Figura 4.1.

La manufactura de los especímenes toma primer lugar. La fabricación y experimentación en estas se lleva a cabo de acuerdo a las normas siguiendo el proceso descrito en las siguientes secciones.

Se desarrolla un modelo de elemento finito de la prueba ASTM D6671 para corroborar el comportamiento de la delaminación de compuestos con las pruebas

experimentales debido a que esta es la prueba experimental más compleja, y los resultados del MEF dan información adicional a la prueba física una vez que se corroboran los resultados.

Los resultados experimentales y del MEF son corroborados con referencias bibliográficas para darles validez, al mismo tiempo que se comparan los resultados experimentales y del MEF.

Las propiedades mecánicas de la FBMP se comparan con las de otros materiales compuestos en matriz polimérica – como la fibra de vidrio y de carbono – para identificar sus ventajas y desventajas prácticas.

Finalmente, en base a las propiedades obtenidas y su comparación con otros materiales, se buscan aplicaciones estructurales en las que la FB sea viable como sustituto de otros refuerzos en materiales compuestos.

4.1. Fabricación de probetas

El refuerzo utilizado para todas las pruebas es fibra de basalto unidireccional proveída por Smarter Building Systems LLC – número de serie UD-300-13-60 – cuyas propiedades mecánicas en base a las pruebas del proveedor son mostradas en la Tabla 4.1. Estos valores se obtuvieron al solicitarse directamente del proveedor ya que no se encuentran accesibles en línea de forma abierta.

Tabla 4.1. Características físicas y mecánicas de la fibra de basalto utilizada

Propiedad	Unidades	Requerimiento	Resultado
Espesor	mm	0.36 ± 0.1	0.37
Peso superficial	g/m^2	$300 \pm 8\%$	311
Resistencia de fibra	N/25mm	> 2250	2975

La matriz es resina epoxica System 2000 Laminating Epoxy Resin proveída por FIBREGLAST, y curada con catalizador 2120 Hardener de esta misma empresa. Las

propiedades mecánicas de esta mezcla resina – catalizador se resumen en la Tabla 4.2 en base a la hoja técnica del fabricante.

Tabla 4.2. Propiedades mecánicas de la mezcla de resina 2000 y catalizador 2120 [60].

Propiedad	Unidades	Resultado
Densidad	g/m ³	1.134
Resistencia a tensión	MPa	316.26
Módulo elástico	MPa	17374.79
Resistencia a la flexión	MPa	459.65

El método de fabricación para todas las pruebas mecánicas es de hand lay up asistido por bolsa de vacío. En base a las especificaciones de la resina utilizada se permite un tiempo de curado de 24 horas a temperatura ambiente (25° C o más) antes del proceso de desmoldado para asegurar un catalizado completo de la matriz.

La configuración de los laminados y dimensiones de las probetas son realizados de acuerdo a las dimensiones establecidas en las siguientes secciones, fundamentado en la normativa correspondiente. El maquinado en todos los casos se lleva a cabo con una sierra de corte – con lubricación de agua de ser posible – y cuidando que la superficie de corte sea uniforme.

4.1.1. ASTM D3039

Las dimensiones objetivo se observan en la Tabla 4.3. Estas son las medidas mínimas a las que se busca llegar, pero el resultado final puede ser mayor. La Figura 3.17 muestra un dibujo de las probetas sin dimensiones.

Tabla 4.3. Dimensiones esperadas para los especímenes de prueba ASTM D3039.

Orientación	Largo (mm)	Ancho (mm)	Espesor (mm)	Número de láminas	Número de probetas
0°	250	25	1	5	6
90°	175	25	2	6	6

Se fabrican probetas con una dirección de fibra de 0° y de 90° debido a que se requieren las propiedades mecánicas en la dirección longitudinal (0°) y transversal (90°) de la fibra. El número de láminas se determina en base al espesor de la fibra mostrada en la Tabla 4.1 para alcanzar el espesor mínimo requerido por la Tabla 4.3, agregando láminas extra para considerar el efecto de reducción en el espesor que pueda ocasionar el proceso de vacío en la manufactura.

Se cortaron las láminas de fibra seca de tal manera que se pudiera alcanzar el número y dimensión de los especímenes esperados en la Tabla 4.3. La Figura 4.2 muestra el resultado de esto.

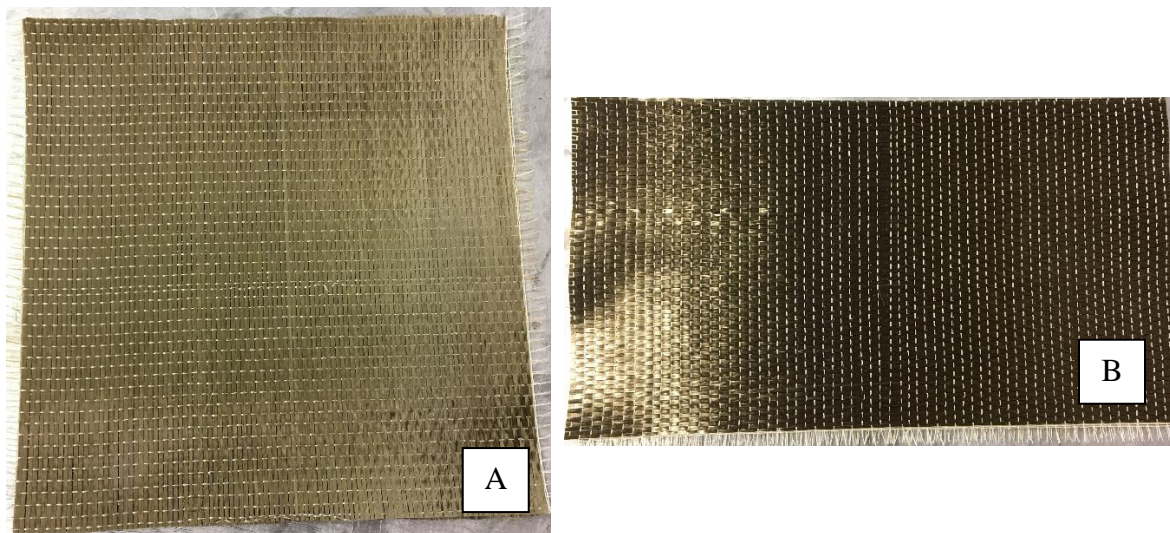


Figura 4.2. Láminas de fibra para especímenes: a) 0° , b) 90°

El molde en el que se realizaron los laminados se observa en la Figura 4.3. Una placa metálica de 30 in de altura que fue limpiada y desinfectada antes de cada laminado para evitar contaminantes en las piezas.



Figura 4.3. Molde metálico plano con área de trabajo delimitada.

La fabricación se llevó a cabo por medio de laminado manual (hand lay-up) asistido por bolsa de vacío. Las Figura 4.4 muestra el procedimiento resumido del proceso de laminado y desmoldado. Se utilizaron 6 capas de desmoldante para facilitar la separación del laminado con el molde metálico mostrado en la Figura 4.3, en el que previamente se había delimitado un área de trabajo con cinta adhesiva

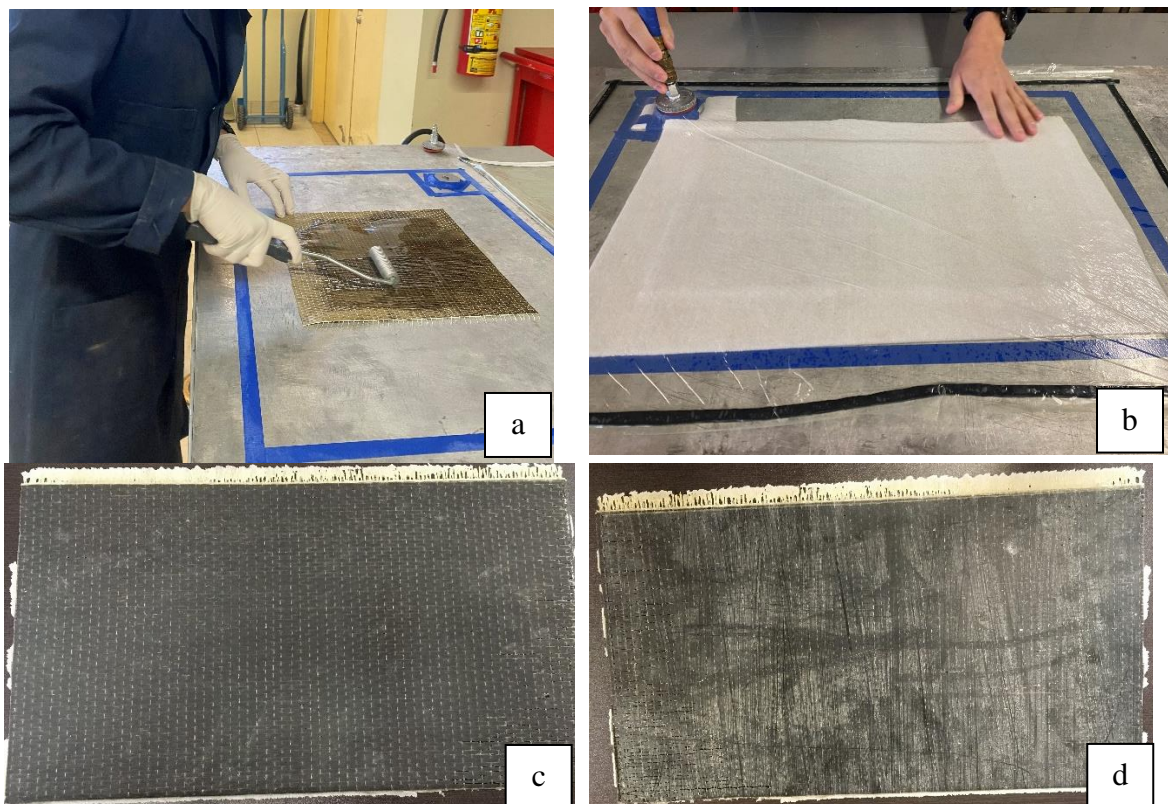


Figura 4.4. a) Proceso de laminado; b) Bolsa de vacío; c) Cara frontal del laminado; d) Cara trasera del laminado.

Una vez desmoldadas los laminados, se procedió a realizar los cortes para llegar a las dimensiones de probetas esperadas. Esta operación se logró utilizando la sierra cortadora y disco mostrados en la Figura 4.5.

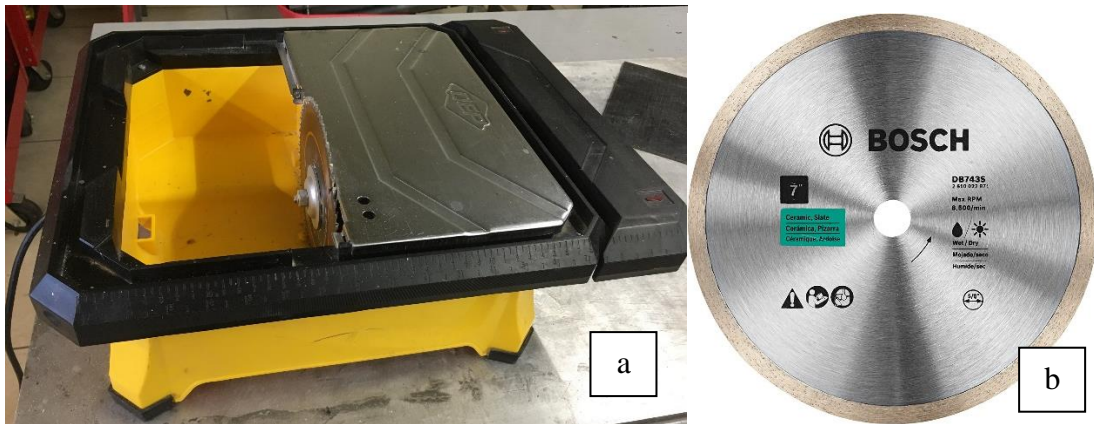


Figura 4.5. a) Sierra y b) disco continuo de diamante utilizados para cortar los especímenes.

Una vez cortadas las probetas, estas fueron numeradas y se clasificaron de acuerdo a la Tabla 4.3. Los resultados de estas mediciones se encuentran en la Tabla 4.4 para 0° y en la Tabla 4.6 para 90° en versión extendida, y en la

Tabla 4.5 para 0° y

Tabla 4.7 para 90° en su forma promediada.

Por su parte, la Tabla 4.8 muestra las dimensiones promediadas de toda la población de probetas a 0° , mientras que este caso se muestra en la Tabla 4.9 para las de orientación de 90° . Estas tablas muestran la desviación estándar y desviación estándar porcentual para toda la población.

Tabla 4.4. Medidas extendidas para las probetas ASTM 3039 a 0°

Orientación	No.	L (mm)	W (mm)	T (mm)	Longitud área de pruebas (mm)	Área de pruebas (mm ²)
0°	1	249	27.08	2.34	124.64	63.367
			27.22	2.21		60.156
			27.39	2.35		64.367
	2	249	25.88	2.24	123.26	57.971
			25.68	2.28		58.550
			25.62	2.27		58.157
	3	248	27.52	2.39	125.01	65.773
			27.48	2.37		65.128
			27.35	2.41		65.914
	4	249	27.37	2.34	125.69	64.046
			27.35	2.35		64.273
			27.33	2.32		63.406
	5	250	27.45	2.17	123.78	59.567
			27.25	2.11		57.498
			27.15	2.03		55.115
	6	248	27.27	2.09	123.21	56.994
			27.36	2.13		58.277
			27.81	2.05		57.011

Tabla 4.5. Medidas promediadas para las probetas ASTM 3039 a 0°

Orientación	No.	L (mm)	W (mm)	T (mm)	Longitud área de pruebas (mm)	Área de pruebas (mm ²)
0°	1	249	27.230	2.300	124.64	62.630
	2	249	25.727	2.263	123.26	58.226
	3	248	27.450	2.390	125.01	65.605
	4	249	27.350	2.337	125.69	63.908
	5	250	27.283	2.103	123.78	57.393
	6	248	27.480	2.090	123.21	57.427

Tabla 4.6. Medidas extendidas para las probetas ASTM 3039 a 90°

Orientación	No.	L (mm)	W (mm)	T (mm)	Longitud área de pruebas (mm)	Área de pruebas (mm ²)
90°	1	175	28.65	2.44	125.29	69.906
			28.34	2.44		69.150
			28.05	2.43		68.162
	2	175	28.44	2.64	124.91	75.082
			28.83	2.6		74.958
			28.14	2.53		71.194
	3	174	26.81	2.43	124.32	65.148
			26.68	2.36		62.965
			26.6	2.39		63.574
	4	175	28.5	2.45	124.41	69.825
			28.34	2.51		71.133
			28.18	2.51		70.732
	5	175	29.53	2.35	123.78	69.396
			29.86	2.52		75.247
			28.7	2.41		69.167
	6	174	28.71	2.35	123.6	67.469
			28.34	2.34		66.316
			28.46	2.25		64.035

Tabla 4.7. Medidas promediadas para las probetas ASTM 3039 a 90°

Orientación	No.	L (mm)	W (mm)	T (mm)	Longitud área de pruebas (mm)	Área de pruebas (mm ²)
90°	1	175	28.347	2.437	125.29	69.072
	2	175	28.470	2.590	124.91	73.745
	3	174	26.697	2.393	124.32	63.896
	4	175	28.340	2.490	124.41	70.563
	5	175	29.363	2.427	123.78	71.270
	6	174	28.503	2.313	123.6	65.940

Tabla 4.8. Medidas promediadas de la población de probetas ASTM D3039 a 0°

Orientación	L (mm)	σ_L	$\sigma_L \%$	W (mm)	σ_W	$\sigma_W \%$	T (mm)	σ_T	$\sigma_T \%$
0°	248.833	0.687	0.276	27.087	0.614	2.268	2.247	0.113	5.036

Tabla 4.9. Medidas promediadas de la población de probetas ASTM D3039 a 90°

Orientación	L (mm)	σ_L	$\sigma_L \%$	W (mm)	σ_W	$\sigma_W \%$	T (mm)	σ_T	$\sigma_T \%$
90°	174.667	0.471	0.270	28.287	0.793	2.804	2.442	0.085	3.483

4.1.2. ASTM D3518

Las probetas se manufacturan de acuerdo a las dimensiones de la Tabla 4.10. A comparación de las fabricadas para la prueba de propiedades a tensión, en estas probetas sólo se tiene una configuración de laminado simétrico [45/-45]_{5s}, dando un total de 20 láminas. En esta prueba el objetivo no es llegar a un espesor mínimo si no que el espesor esta dado por el número pre establecido de láminas. Un diagrama de ejemplo de la orientación de las fibras se aprecia en la Figura 3.19.

Tabla 4.10. Dimensiones esperadas para los especímenes de prueba ASTM D3518.

Orientación	Largo (mm)	Ancho (mm)	Espesor (mm)	Número de láminas	Número de probetas
±45°	250	25	7.4	16	6

El número de probetas por configuración se mantiene igual que en el caso de la prueba ASTM 3038, siendo en este caso un total de 6 especímenes debido a que sólo se tiene una configuración.

El proceso de manufactura se mantiene igual al de la sección 4.1.1. ASTM D3039, siguiendo el flujo de trabajo mostrado en las Figura 4.4 - 5.6. En este caso la fibra seca utilizada se muestra en la Figura 4.6

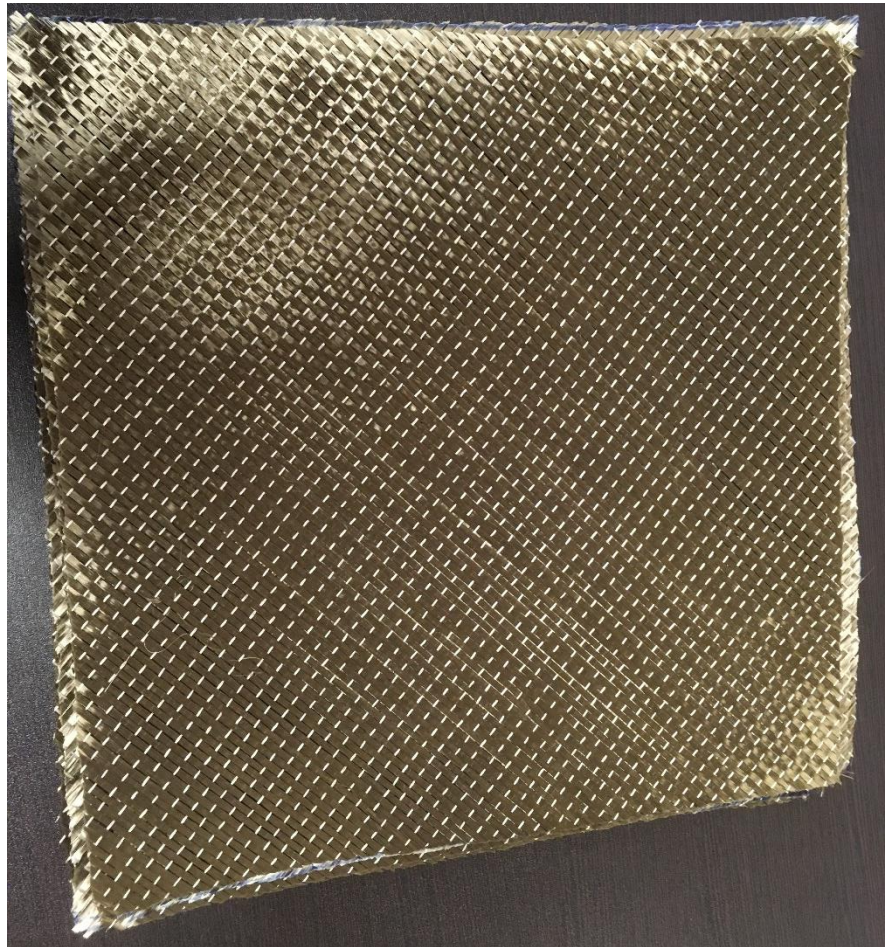


Figura 4.6. Fibra seca para laminado a $\pm 45^\circ$

La Tabla 4.11 presenta los valores sin promediar con las medidas tomadas en 3 puntos de la zona de pruebas de la probeta, mientras que la Tabla 4.12 muestra las medidas promediadas para cada probeta. Por su parte, en la Tabla 4.13 se ve una medida promedio de toda la población de probetas incluyendo desviación estándar y desviación estándar porcentual.

Tabla 4.11. Medidas extendidas para probetas ASTM D3518

Orientación	No.	L (mm)	W (mm)	T (mm)	Longitud área de pruebas (mm)	Área de pruebas (mm ²)
45°	1	209	27.14	6.07	124.01	164.740
			26.44	5.9		155.996
			26.94	6.01		161.909
	2	210	25.24	5.93	124.03	149.673
			25.38	5.83		147.965
			25.33	6.01		152.233
	3	209.5	25.84	5.62	124.39	145.221
			25.53	5.6		142.968
			24.8	5.58		138.384
	4	209	27.77	5.8	123.26	161.066
			27.88	6.14		171.183
			28.59	5.74		164.107
	5	209	26.5	5.98	123.41	158.470
			26.76	6.19		165.644
			27.55	5.99		165.025
	6	209	27.95	5.8	124.02	162.110
			28.07	5.76		161.683
			28.39	5.88		166.933

Tabla 4.12. Medidas promediadas para probetas ASTM D3518

Orientación	No.	L (mm)	W (mm)	T (mm)	Longitud área de pruebas (mm)	Área de pruebas (mm ²)
45°	1	209	26.840	5.993	124.01	160.882
	2	210	25.317	5.923	124.03	149.957
	3	209.5	25.390	5.600	124.39	142.191
	4	209	28.080	5.893	123.26	165.452
	5	209	26.937	6.053	123.41	163.046
	6	209	28.137	5.813	124.02	163.575

Tabla 4.13. Medidas promediadas de la población de probetas ASTM D3518

Orientación	L (mm)	σ_L	$\sigma_L \%$	W (mm)	σ_W	$\sigma_W \%$	T (mm)	σ_T	$\sigma_T \%$
45°	209.25	0.382	0.183	26.783	1.128	4.211	5.879	0.146	2.482

4.1.3. ASTM D6671

Se busca que las dimensiones de los especímenes sean las de la Tabla 4.14, pero de acuerdo al dibujo mostrado en la Figura 3.15 las dimensiones pueden variar siempre y cuando se mantengan dentro del rango establecido.

Tabla 4.14. Dimensiones esperadas para los especímenes de prueba ASTM D6671.

Orientación	Largo total (mm)	Delaminación inicial(mm)	Ancho (mm)	Espesor (mm)	Número de láminas	Número de probetas
0°	160	50	23	3	10	20

El laminado tiene una orientación de 0° y se opta por 10 láminas totales para alcanzar un espesor dentro del rango establecido por el dibujo técnico. La delaminación inicial se logra agregando un inserto de película de Teflón de 50 mm en un extremo del espécimen a la mitad del laminado (entre la lámina 5 y 6).

Se fabrica un total de 20 probetas debido a que las pruebas de modo mixto se realizan a 4 relaciones de modo I – modo II: 0.2, 0.4, 0.6 y 0.8, y para cada condición se requiere fabricar 5 especímenes.

Una vez más, el proceso de fabricación se lleva a cabo siguiendo el flujo de trabajo mostrado en las Figura 4.4 - 5.6. En este caso debido a la necesidad de generar la delaminación inicial se posicionaron 2 rectángulos de PTFE (conocido comercialmente como Teflón) como se observa en la Figura 4.7, posicionados entre la lámina 5 y 6.

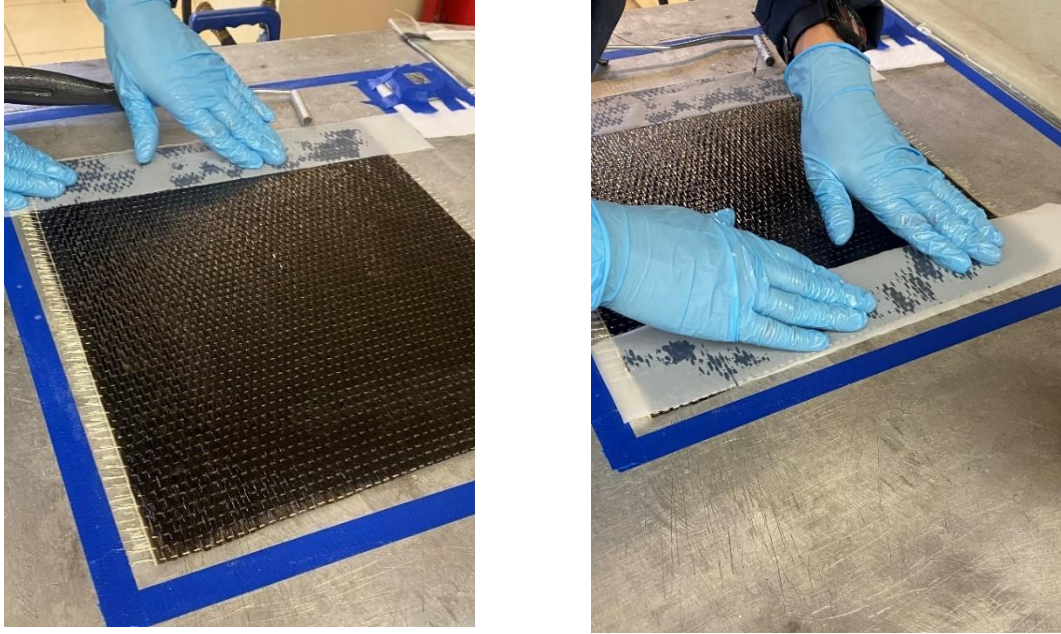


Figura 4.7 y 4.8 Insertos de delaminación de PTFE colocados en los bordes del laminado sobre la lámina 5.

Se utilizaron insertos de PTFE en ambos lados del laminado para hacer uso de ambos extremos para el corte de probetas. Un diagrama que ejemplifica el plan de corte se aprecia en la Figura 4.9.

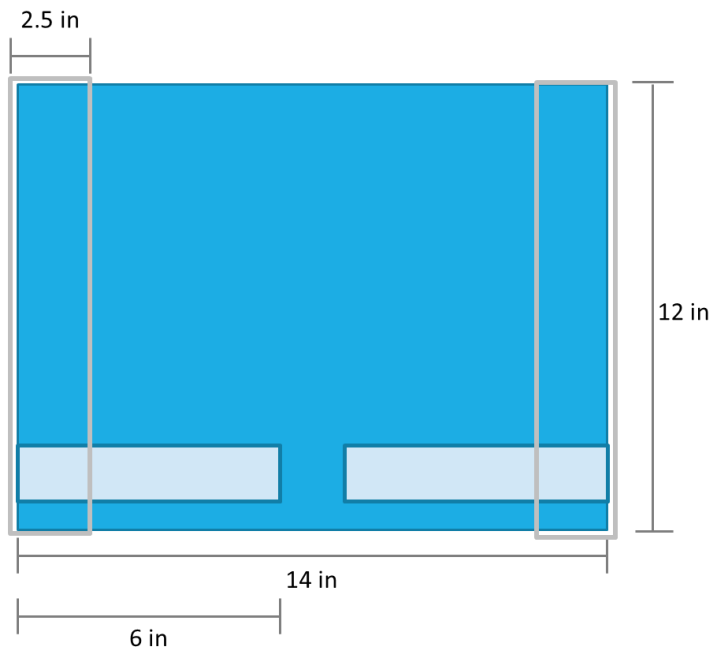


Figura 4.9. Diagrama de plan de corte del laminado ASTM D6671 que ejemplifica la posición de los insertos de PTFE.

Las tablas presentadas a continuación muestran las medidas para cada una de las 20 probetas fabricadas. Debido a que se requieren 5 probetas para cada una de las 4 condiciones de modo mixto a probar – 0.2, 0.4, 0.6 y 0.8 – se presenta una tabla para cada una de estas condiciones. La Tabla 4.23 muestra un resumen de las medidas promediadas de toda la población de probetas para cada condición de GII/GT junto a sus respectivas desviaciones estándares.

Tabla 4.15. Medidas sin promediar de las probetas ASTM D6671 en GII/GT=0.2

GII/GT	No.	L (mm)	W (mm)	T (mm)	a0 (mm)	
0.2	1	161.28	23.05	3.22	49.78	
			22.54	2.84		
			22.81	2.95		
	2	160.33		23.64	3.39	51.7
				23.33	3.05	
				22.69	2.98	
	3	159.23		23.59	3.22	52.43
				23.73	2.84	
				23.74	2.96	
	4	160.85		23.6	3.07	51.01
				24.46	2.87	
				23.83	2.85	
	5	160.35		23.3	3.2	50.01
				22.98	2.8	
				22.89	2.92	

Tabla 4.16. Medidas promediadas de las probetas ASTM D6671 en $GII/GT=0.2$

GII/GT	No.	L (mm)	W (mm)	T (mm)	a0 (mm)
0.2	1	161.28	22.800	3.003	49.78
	2	160.33	23.220	3.140	51.7
	3	159.23	23.687	3.007	52.43
	4	160.85	23.963	2.930	51.01
	5	160.35	23.057	2.973	50.01

Tabla 4.17. Medidas sin promediar de las probetas ASTM D6671 en $GII/GT=0.4$

GII/GT	No.	L (mm)	W (mm)	T (mm)	a0 (mm)
0.4	6	160.03	22.61	3.36	50.75
			23.21	2.95	
			22.68	3.13	
	7	159.17	23.54	3.17	52.17
			23.6	2.88	
			23.49	2.83	
	8	160.56	23.56	3.11	50.74
			23.67	2.66	
			23.51	2.83	
	9	159.45	22.65	3.26	52.38
			22.81	2.88	
			23.26	2.92	
	10	160.98	23.93	3.15	51.13
			23.33	2.78	
			23.81	2.87	

Tabla 4.18. Medidas promediadas de las probetas ASTM D6671 en GII/GT=0.4

GII/GT	No.	L (mm)	W (mm)	T (mm)	a0 (mm)
0.4	6	160.03	22.833	3.147	50.75
	7	159.17	23.543	2.960	52.17
	8	160.56	23.580	2.867	50.74
	9	159.45	22.907	3.020	52.38
	10	160.98	23.690	2.933	51.13

Tabla 4.19. Medidas sin promediar de las probetas ASTM D6671 en GII/GT=0.6

GII/GT	No.	L (mm)	W (mm)	T (mm)	a0 (mm)
0.6	11	160.17	24.1	3.24	50.6
			23.51	2.85	
			23.71	2.91	
	12	160.74	23.27	3.14	50.1
			23.52	2.97	
			23.81	2.91	
	13	159.34	22.79	3.3	51.02
			23.09	2.91	
			22.47	2.9	
	14	159.64	23.83	3.22	50.15
			23.89	2.98	
			23.84	2.97	
	15	159.4	22.76	3.27	51.97
			22.05	3.02	
			22.16	2.97	

Tabla 4.20. Medidas promediadas de las probetas ASTM D6671 en GII/GT=0.6

GII/GT	No.	L (mm)	W (mm)	T (mm)	a0 (mm)
0.6	11	160.17	23.773	3.000	50.6
	12	160.74	23.533	3.007	50.1
	13	159.34	22.783	3.037	51.02
	14	159.64	23.853	3.057	50.15
	15	159.4	22.323	3.087	51.97

Tabla 4.21. Medidas sin promediar de las probetas ASTM D6671 en GII/GT=0.8

GII/GT	No.	L (mm)	W (mm)	T (mm)	a0 (mm)
0.8	16	160.37	22.84	3.18	50.17
			22.7	2.94	
			22.96	3.01	
	17	159.81	23.04	3.23	50.1
			23.1	2.96	
			22.91	2.96	
	18	159.34	23.08	3.35	50.94
			23.32	3	
			23	2.94	
	19	160.31	23.35	3.2	50.74
			23.66	2.92	
			23.12	2.94	
	20	160.38	22.42	3.23	51.45
			21.89	3.07	
			21.95	3.02	

Tabla 4.22. Medidas promediadas de las probetas ASTM D6671 en $GII/GT=0.8$

GII/GT	No.	L (mm)	W (mm)	T (mm)	a0 (mm)
0.8	16	160.37	22.833	3.043	50.17
	17	159.81	23.017	3.050	50.1
	18	159.34	23.133	3.097	50.94
	19	160.31	23.377	3.020	50.74
	20	160.38	22.087	3.107	51.45

Tabla 4.23. Medidas promediadas de la población de probetas ASTM D6671 en todas las relaciones de fractura

GII/GT	L (mm)	σ_L	$\sigma_L \%$	W (mm)	σ_W	$\sigma_W \%$	T (mm)	σ_T	$\sigma_T \%$	a0 (mm)	σ_{a0}	$\sigma_{a0} \%$
0.2	160.408	0.686	0.428	23.345	0.423	1.812	3.011	0.070	2.334	50.986	1.000	1.962
0.4	160.038	0.672	0.420	23.311	0.364	1.561	2.985	0.095	3.166	51.434	0.704	1.369
0.6	159.858	0.529	0.331	23.253	0.599	2.576	3.037	0.032	1.056	50.768	0.688	1.355
0.8	160.042	0.410	0.256	22.889	0.438	1.915	3.063	0.033	1.077	50.680	0.502	0.991

4.2. Desarrollo de prueba

4.2.1. ASTM D3039

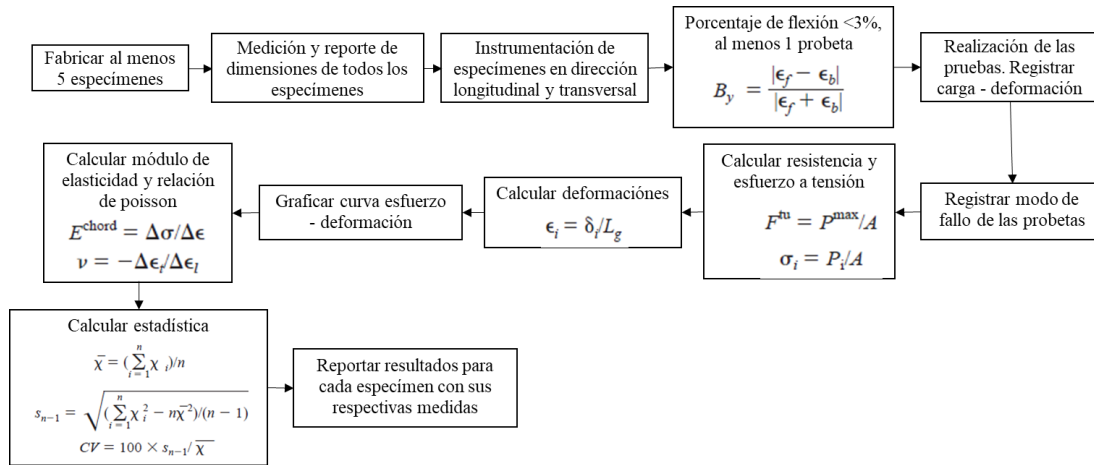


Figura 4.10. Diagrama de metodología de la prueba ASTM D3039

1. Registrar las dimensiones específicas de cada una de las 12 probetas. Marcarlas de forma que puedan ser diferenciadas una de la otra.
2. Determinar el área de la sección transversal en 3 posiciones de la sección de pruebas del espécimen y registrar el promedio.
3. Establecer la velocidad de prueba en la máquina de tensión a utilizar a 2 mm/min.
4. Instalar las galgas extensiométricas de manera simétrica en la parte central de la probeta
5. En un espécimen por condición, colocar galgas extensiométricas para medir las deformaciones en ambas caras y determinar que el porcentaje de flexión no supere 3% de acuerdo a la ecuación (4.1). Si este porcentaje es menor a 3% se puede utilizar una sola galga, caso contrario se utilizan galgas en ambas caras.

$$B_y = \frac{|\epsilon_f - \epsilon_b|}{|\epsilon_f + \epsilon_b|} \quad (4.1)$$

Donde ϵ_f es la deformación unitaria de la galga frontal, ϵ_b es la deformación unitaria de la galga trasera, y B_y es el porcentaje de flexión en la probeta.

6. Montar la probeta en la máquina de tensión a utilizar y aplicar carga hasta el fallo. Registrar la curva carga – desplazamiento proveído por la máquina y el registro de deformaciones unitarias medidas por los transductores.
7. Registrar el modo de falla del espécimen de acuerdo a la Figura 4.11.

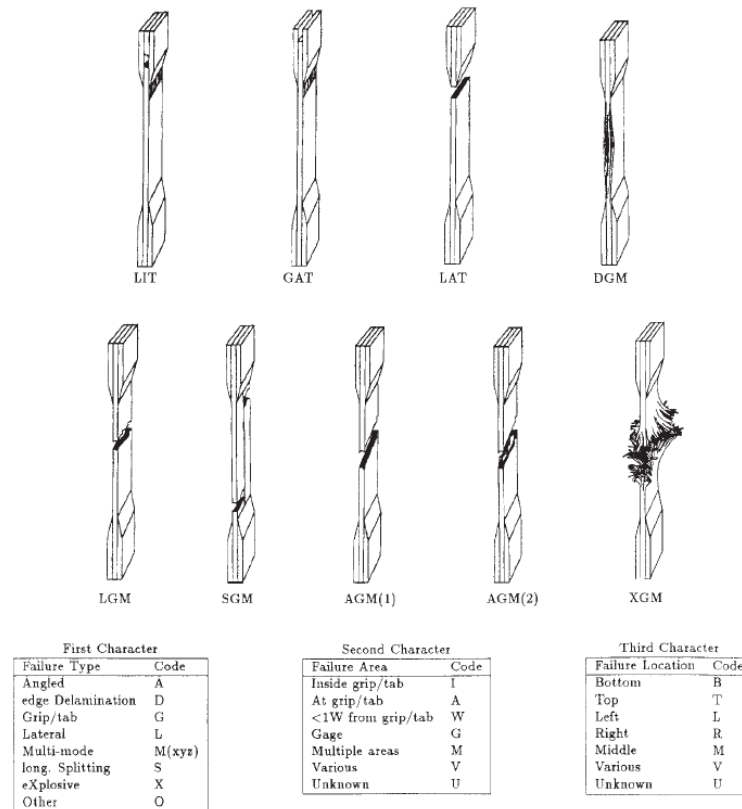


Figura 4.11. Modos de falla típicos en probetas sometidas a tensión [57].

8. Calcular la resistencia de tensión última de acuerdo a la ecuación (4.2) utilizando la fuerza aplicada en la ruptura, y graficar la curva de esfuerzos aplicados utilizando las cargas registradas por la máquina de tensión utilizando la ecuación (4.3).

$$F^{tu} = \frac{P^{max}}{A} \quad (4.2)$$

$$\sigma_i = \frac{P_i}{A} \quad (4.3)$$

Donde F^{tu} es la resistencia última a la tensión, P^{max} es la máxima carga antes del fallo, A es el área promedio de la sección transversal de la probeta, P_i es la carga registrada

en un punto i dado de la curva carga – desplazamiento y σ_i es el esfuerzo axial correspondiente en dicho punto.

- 9.** Calcular el módulo de elasticidad de cuerda en un rango de deformaciones de $1000 \mu\epsilon$ a $3000 \mu\epsilon$ por medio de la ecuación (4.4)

$$E^{chord} = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\epsilon} \quad (4.4)$$

Donde E^{chord} es el módulo de elasticidad a tensión, $\Delta\sigma$ es la diferencia de los esfuerzos entre los 2 puntos de deformación considerados, y $\Delta\epsilon$ es la diferencia entre los dos puntos de deformación.

- 10.** Determinar la relación de Poisson en el rango de deformaciones utilizado para el cálculo del módulo de elasticidad por medio de la (4.5), utilizando las deformaciones unitarias transversales (perpendiculares a la aplicación de la carga) y longitudinales (paralelas a la aplicación de la carga).

$$v = \frac{\Delta\epsilon_t}{\Delta\epsilon_l} \quad (4.5)$$

Donde v es la relación de Poisson, $\Delta\epsilon_t$ es la diferencia de deformaciones unitarias transversales en el rango seleccionado y $\Delta\epsilon_l$ es la diferencia de deformaciones unitarias longitudinales.

- 11.** Calcular para cada serie de pruebas el valor promedio, desviación estándar y coeficiente de variación porcentual de cada propiedad determinada utilizando las ecuaciones (4.6) a (4.8).

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} \quad (4.6)$$

$$s_{n-1} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n x_i^2 - nx^{-2}}{n-1}} \quad (4.7)$$

$$CV = 100 \times \frac{s_{n-1}}{\bar{x}} \quad (4.8)$$

Donde \bar{x} es el promedio de la muestra, s_{n-1} es la desviación estándar de la muestra, CV es el coeficiente de variación porcentual, n es el número de especímenes y x_i es la medición o propiedad calculada.

12. Reportar toda la información relevante al desarrollo de la prueba, incluyendo:

- a. Variaciones al método de prueba o anomalías encontradas.
- b. Identificación del material incluyendo: especificaciones, tipo, designación, fabricante, tipo de material, diámetro de filamento, forma o tejido, peso superficial, tipo de matriz y contenido de matriz.
- c. Descripción del proceso de manufactura incluyendo: fecha de inicio y fin de manufactura, especificaciones del proceso, ciclo de curado y descripción del equipo utilizado.
- d. Orientación del laminado y secuencia de apilado de estas.
- e. Espeso promedio por lámina del material.
- f. Método de preparación del espécimen, incluyendo nomenclatura y forma de registro de las probetas, geometría y dimensiones, método de corte y adhesivos utilizados.
- g. Fechas de calibración para todo el equipo utilizado.
- h. Tipo de máquina de pruebas, monturas, mordazas y sistemas de adquisición de datos utilizados.
- i. Resultados de las evaluaciones de alineación del sistema si se realizaron.
- j. Condiciones ambientales de temperatura y humedad a las que se realizó la prueba.
- k. Número de especímenes probados.

- l. Velocidad de prueba.
- m. Posicionamiento de las galgas extensiométricas, así como su tipo, resistencia, tamaño, factores de compensación, sensibilidad transversal y otros factores de corrección utilizados.
- n. Curvas esfuerzo – deformación y valores tabulados de esfuerzo y deformación utilizados para estas.
- o. Resultados del porcentaje de flexión para cada probeta evaluada.
- p. Valores individuales de resistencia, así como los valores estadísticos calculados para cada población.
- q. Deformación al fallo para cada espécimen, así como los valores estadísticos calculados para cada población.
- r. Rango de deformación unitaria utilizado para el cálculo del módulo elástico y relación de Poisson.
- s. Valores individuales del módulo de elasticidad y relación de Poisson, así como los valores estadísticos calculados para cada población.
- t. Modo de fallo y ubicación del fallo para cada probeta.

4.2.2. ASTM D3518

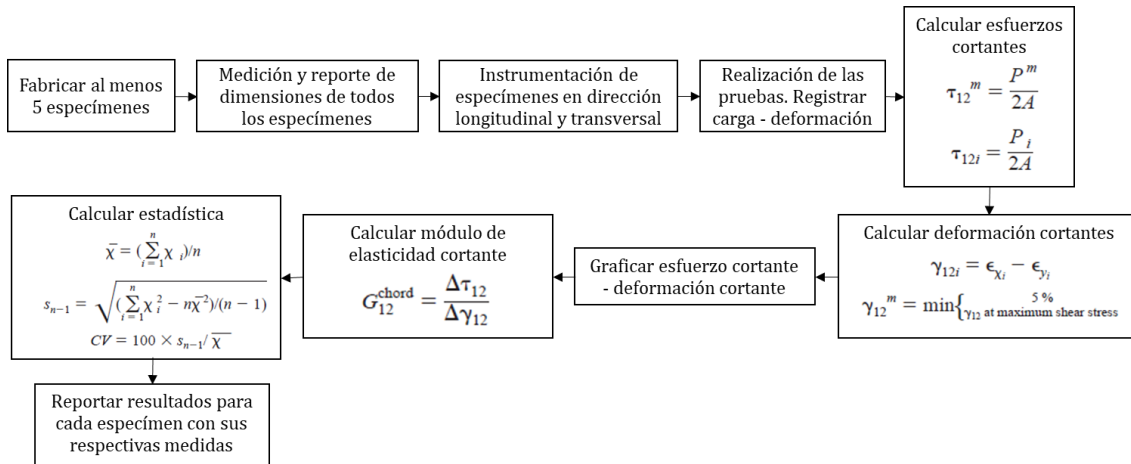


Figura 4.12. Diagrama de metodología de la prueba ASTM D3518

1. Realizar el mismo procedimiento de preparación y prueba de probetas que el utilizado para la prueba ASTM 3018, hasta el paso 7 de la sección 4.2.1. ASTM D3039.
2. Instrumentar las probetas para medir la deformación en la dirección longitudinal y transversal de manera continua durante el desarrollo de las pruebas.
3. Si el fallo de una probeta dada no ocurre dentro del 5% de deformación cortante, truncar los resultados hasta este punto. Registrar si este fue el caso.
4. Calcular el esfuerzo cortante máximo en el plano utilizando la ecuación (4.9). Graficar la curva de esfuerzos cortantes utilizando las cargas registradas por la máquina de tensión utilizando la ecuación (4.10).

$$\tau_{12}^m = \frac{P^m}{2A} \quad (4.9)$$

$$\tau_{12i} = \frac{P_i}{2A} \quad (4.10)$$

Donde τ_{12}^m es el esfuerzo cortante máximo en el plano, P^m es la carga máxima al punto de fractura o de 5% de deformación cortante, τ_{12i} es el esfuerzo cortante en un punto i , P_i es la carga en dicho punto y A es el área promedio de la sección transversal de la probeta.

5. Determinar la deformación cortante unitaria en cada punto de desplazamiento de la curva con la ecuación (4.11). La deformación cortante unitaria máxima se determina con la ecuación (4.12), donde se utiliza el punto menor entre el esfuerzo cortante máximo o el punto de 5% de deformación cortante.

$$\gamma_{12i} = \epsilon_{xi} - \epsilon_{yi} \quad (4.11)$$

$$\gamma_{12}^m = \min \left\{ \begin{array}{l} 5\% \\ \gamma_{12} \text{ máximo esfuerzo cortante} \end{array} \right. \quad (4.12)$$

Donde γ_{12i} es la deformación cortante en un punto dado i , ϵ_{xi} es la deformación longitudinal unitaria en el punto i , ϵ_{yi} es la deformación transversal unitaria en el punto i , y γ_{12}^m es la máxima deformación cortante.

6. Calcular el módulo de elasticidad cortante por medio de la ecuación (4.13) en un rango de deformaciones cortantes de $4000 \pm 200 \mu\epsilon$, comenzando desde un punto menor de 1500 a 2500 $\mu\epsilon$. Reportar el resultado a 3 cifras significativas junto con el rango utilizado para el cálculo.

$$G_{12}^{chord} = \frac{\Delta\tau_{12}}{\Delta\gamma_{12}} \quad (4.13)$$

7. Calcular para cada serie de pruebas el valor promedio, desviación estándar y coeficiente de variación porcentual de cada propiedad determinada utilizando las ecuaciones (4.6) a (4.8), como se realizó para las pruebas de ASTM 3039.
8. Reportar toda la información relevante al desarrollo de la prueba de acuerdo al paso 12 de la sección 4.2.1. ASTM D3039.

4.2.3. ASTM D6671

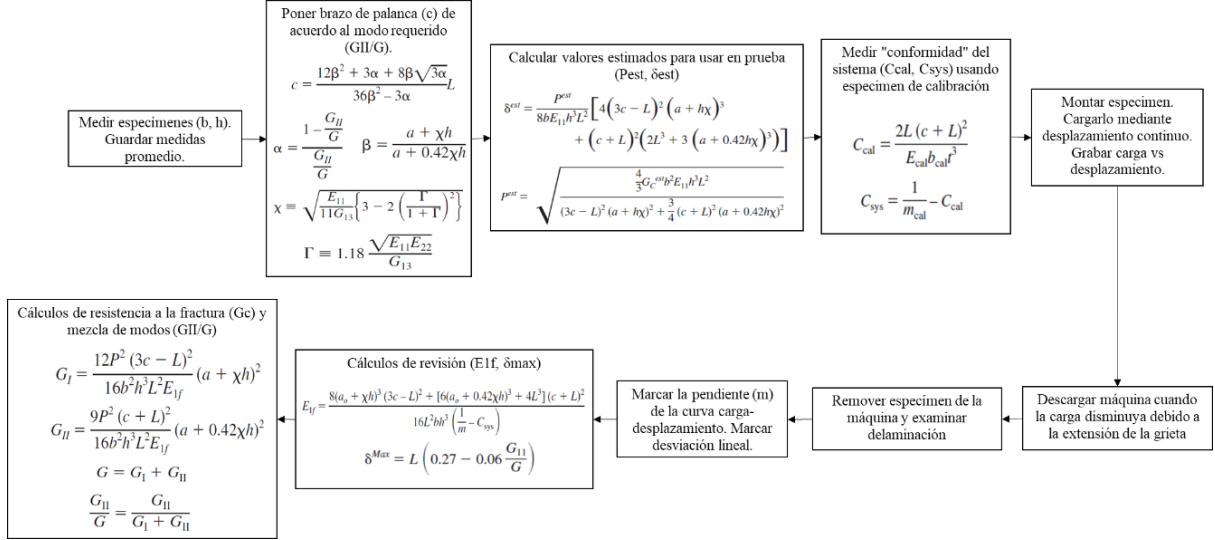


Figura 4.13. Diagrama de metodología de la prueba ASTM D6671.

1. Registrar las dimensiones específicas, incluido el largo de la delaminación inicial, de cada una de las probetas. Marcarlas de forma que puedan ser diferenciadas una de la otra.
2. Determinar la longitud del brazo de palanca C en base a la relación de modo mixto de fractura requerido utilizando las ecuaciones (4.14) a (4.16).

$$c = \frac{12\beta^2 + 3\alpha + 8\beta\sqrt{3\alpha}}{36\beta^2 - 3\alpha} L \quad (4.14)$$

$$\alpha = \frac{1 - \frac{G_{II}}{G}}{\frac{G_{II}}{G}} \quad (4.15)$$

$$\beta = \frac{a - \chi h}{a + 0.42\chi h} \quad (4.16)$$

Donde c es el brazo de palanca a determinar, α es un factor de transformación de modo mixto, $\frac{G_{II}}{G}$ es la relación de modo de fractura, β es un factor de corrección adimensional de longitud de grieta, h es la mitad del espesor de la probeta y χ es un parámetro de corrección de longitud de grieta calculado con la ecuación (4.17):

$$\chi = \sqrt{\frac{E_{11}}{11G_{13}} \left\{ 3 - 2 \left(\frac{\Gamma}{1 + \Gamma} \right)^2 \right\}} \quad (4.17)$$

Donde E_{11} es el módulo de elasticidad longitudinal medido en tensión, G_{13} es el módulo cortante fuera del plano y Γ es el parámetro de corrección de módulo transversal calculado con la ecuación (4.18):

$$\Gamma = 1.18 \frac{\sqrt{E_{11}E_{22}}}{G_{13}} \quad (4.18)$$

Donde E_{22} es el módulo de elasticidad transversal.

3. Calcular la carga y desplazamiento estimados utilizando las ecuaciones (4.19) y (4.20).

$$P^{est} = \sqrt{\frac{\frac{4}{3} G_c^{est} b^2 E_{11} h^3 L^2}{(3c - L)^2 (a + h\chi)^2 + \frac{3}{4} (c - L)^2 (a + 0.42h\chi)^2}} \quad (4.19)$$

$$\delta^{est} = \frac{P^{est}}{8bE_{11}h^3L^2} [4(3c - L)^2 (a + h\chi)^3 + (c - L)^2 (2L^3 + 3(a + 0.42h\chi)^3)] \quad (4.20)$$

Donde a es el largo de la delaminación inicial, b es el ancho del espécimen, G_c^{est} es el valor estimado de la resistencia total a la fractura por modo mixto, L es la mitad del largo del aparato de prueba (desde un apoyo hasta el punto central de aplicación de carga), P^{est} es el valor estimado de la carga crítica y δ^{est} es la deflexión estimada del punto de aplicación de carga.

4. Pegar las bisagras de piano al extremo de la probeta que se delaminará ya sea por medio de adhesivo o por acción mecánica. Asegurarse que estas bisagras sean cuando menos del ancho de la probeta y que sean de un metal con un módulo elástico a 60,000 MPa.
5. Ajustar el brazo de palanca c al requerido para la mezcla de modos que se probará en la serie de especímenes.
6. Medir la conformidad del sistema de carga con la ecuación (4.21) para cada brazo de palanca c . Para esta calibración se requiere una probeta de calibración rectangular

fabricada de un material con un módulo elástico conocido, cuya conformidad es determinada con la ecuación (4.22).

$$C_{sys} = \frac{1}{m_{cal}} - C_{cal} \quad (4.21)$$

$$C_{cal} = \frac{2L(c + L)^2}{E_{cal}b_{cal}t^3} \quad (4.22)$$

Donde C_{sys} es la conformidad del sistema de carga para el brazo de palanca c dado, C_{cal} es la conformidad del espécimen de calibración, E_{cal} es el módulo elástico de la barra de calibración y b_{cal} es el ancho del espécimen de calibración. m_{cal} es la pendiente de la curva carga – desplazamiento obtenida al cargar el espécimen de calibración a un 75% de la carga crítica estimada obtenida por medio de la ecuación (4.19) para el espécimen de pruebas, no el de calibración.

7. Montar la probeta de pruebas de material compuesto en el aparato de prueba. Asegurar que esta está centrada y que no haya un espacio mayor a 0.05 mm en un lado de la probeta cuando se haga contacto con el otro lado de esta.
8. Aplicar una carga con un desplazamiento controlado de 0.5 mm/min, registrando la respuesta carga – desplazamiento de la máquina.
9. Detener la prueba cuando la delaminación se extienda de tal manera que la carga comienza a disminuir. Incluir el ciclo de descarga en el registro de carga – desplazamiento.
10. Desmontar la probeta y delaminarla completamente de manera manual. Tomar una mitad y medir desde el centro del perno de la bisagra hasta el extremo de la delaminación. Medir la longitud de la delaminación en 3 puntos diferentes y promediar los resultados para obtener la longitud de la delaminación inicial a_0 . Si se observan desgarres, dobleces o formas uniformes en el inserto de delaminación entonces los valores de esta probeta no pueden reportarse.
11. Inspeccionar la superficie delaminada buscando líneas que indiquen delaminación instantánea del frente de grieta. Si estas líneas se encuentran indicaría que la delaminación creció de manera uniforme y no se favoreció un lado por sobre el otro. Si la distancia del inicio del inserto de

delaminación hacia los dos bordes es mayor a 2mm la prueba debe repetirse debido a crecimiento no uniforme.

12. Medir la pendiente de la sección inicial de la curva carga – desplazamiento, ignorando no – linealidades que puedan ocurrir en el primer 20% de la curva de carga. Determinar la pendiente de la curva como m . Determinar el punto en donde dicha pendiente y la curva original se desvían y registrar este punto como el punto no lineal, NL. Marcar una segunda línea que intercepte a la primera en el punto de carga 0 y que tenga una pendiente reducida un 5%; encontrar donde intercepta esta pendiente con la curva original de carga; si la intersección ocurre antes de la carga máxima, marcar dicha intersección como el punto 5%/Max, caso contrario registrar la carga máxima como 5%/Max. Ejemplo de estas marcas se ve en la Figura 4.14.

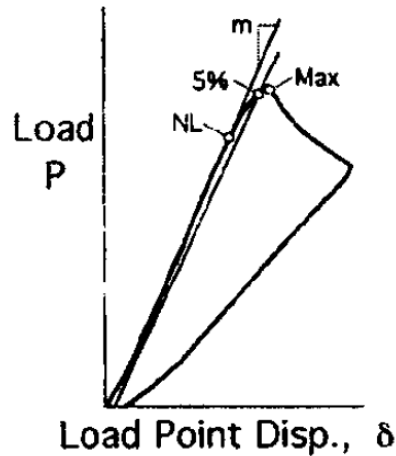


Figura 4.14. Ejemplo de la categorización de puntos en la curva carga – desplazamiento para la prueba ASTM D6671 [16].

13. Calcular el módulo de flexión con la ecuación (4.23) que posteriormente se utiliza para los cálculos de resistencia a la fractura.

$$E_{1f} = \frac{8(a_0 + \chi h)^3(3c - L)^2 + [6(a_0 + 0.42\chi h)^3 + 4L^3](c + L)^2}{16L^2bh^3 \left(\frac{1}{m} - C_{sys}\right)} \quad (4.23)$$

Donde E_{1f} es el módulo elástico en flexión en la dirección de la fibra, a_0 es la longitud de la delaminación inicial medida anteriormente y m es la pendiente de la curva carga – desplazamiento.

14. Verificar que el desplazamiento aplicado durante la prueba no haya excedido el desplazamiento máximo calculado con la (4.24) de modo que se compruebe que no hay errores significativos debido a no – linealidad.

$$\delta^{Max} = L \left(0.27 - 0.06 \frac{G_{II}}{G} \right) \quad (4.24)$$

Si el desplazamiento aplicado supera el desplazamiento máximo, debe repetirse la prueba con especímenes de mayor espesor para evitar no – linealidades geométricas.

15. Calcular la resistencia a la fractura y la relación de mezcla de modos utilizando las ecuaciones

$$G_I = \frac{12P^2(3c - L)^2}{16b^2h^3L^2E_{1f}}(a + \chi h)^2 \quad (4.25)$$

$$G_{II} = \frac{9P^2(c + L)^2}{16b^2h^3L^2E_{1f}}(a + 0.42\chi h)^2 \quad (4.26)$$

$$G = G_I + G_{II} \quad (4.27)$$

$$\frac{G_{II}}{G} = \frac{G_{II}}{G_I + G_{II}} \quad (4.28)$$

Donde G_I es el componente de modo I de la tasa de liberación de energía de deformación, G_{II} es el componente de modo II y G es la tasa de liberación de energía de deformación total en modo mixto. Cuando una condición de carga crítica se utiliza en las ecuaciones anteriores, la tasa de liberación de energía de deformación equivale a la resistencia a la fractura, como se ve en la ecuación

$$G_c = G_{P_c} \quad (4.29)$$

Donde P_c es una condición de carga crítica que puede ser el punto no lineal o la carga 5%/Max.

16. Reportar toda la información relevante al desarrollo de las pruebas, como se ve en el ejemplo de reporte estándar de la Tabla 4.24.

Tabla 4.24. Reporte estándar utilizado para reportar los resultados de una prueba de fractura por modo mixto ASTM D6671 [16].

MMB STANDARD DATA REPORTING SHEET				Lab:	Date:
Material	Mat. Property Source		Adhesive:	Test:	
Producer	Max cure	V_f %	Material	Temp	$^{\circ}C$
Panel No.	Temp $^{\circ}C$	FAW	Surf Prep	Load Rate	N/min
	E_{11} MPa	Γ	Insert:	Rel Humidity	%
	E_{22} MPa	χ	Material		
	G_{13} MPa		Thickness	mm	
Specimen No.	G_r/G nominal	α	c	P_g	N
Avg. b	Ave 2h	β	L	C_g	mm
m	C_{sys}	E_{1f}	δ_{Max}	lever weight correction used	<input type="checkbox"/>
	mm	mm/N	mm	mm	
a (mm)	P (N)	G_I (kJ/m ²)	G_{II} (kJ/m ²)	G_C (kJ/m ²)	G_{II}/G (%)
a_0	NL				
	5%/Max				
Propagation Option					
a_0	Vis				
a_1	1				
a_2	2				
a_3	3				
a_4	4				
a_5	5				
a_{10}	10				
a_{15}	15				
a_{20}	20				
a_{25}	25				
Comments:					

4.3. Modelo de Elemento Finito

4.3.1. ASTM D6671

El modelo de elemento finito (MEF) de la prueba de fractura por modo mixto permite validar y comparar los resultados experimentales, por lo que se busca que la definición de condiciones en este sea tan apegada a la realidad como sea posible. Esto se desarrolla en el software ANSYS Workbench R19, y una vista general del mallado de la probeta se aprecia en la Figura 4.15. Los elementos utilizados en la sección donde se propagará la grieta tienen un mayor refinamiento para poder capturar mejor los efectos de crecimiento.



Figura 4.15. Vista lateral del MEF.

Se utilizan elementos lineales tipo QUAD con 4 nodos (1 en cada esquina). Debido a que el modelo es una sección transversal de la probeta completa, se asume una condición de esfuerzo plano (plane stress) para la formulación del elemento 2D.

En este caso la mitad superior e inferior del modelo son 2 cuerpos individuales para representar la mitad del laminado en la que se realiza la delaminación inicial. La interface entre ambos cuerpos se define como un contacto sin fricción (frictionless) como se ve en la Figura 4.16 para que pueda haber deslizamiento sin penetración entre ambos cuerpos durante la realización de la simulación.

■ Frictionless



Figura 4.16. Definición de la interface entre el cuerpo superior e inferior del MEF.

Para la simulación adecuada de fractura se establece un nodo de frente de grieta correspondiente a la delaminación inicial del espécimen como en la Figura 4.17, y es aquí donde se calculan las tasas de liberación de energía de deformación G a diferentes modos.



Figura 4.17. Frente de grieta al final de la delaminación inicial.

El crecimiento de grieta se realiza por medio del método VCCT, por lo que se requiere establecer una interface de delaminación por la cual se propagará el frente de grieta una vez que la energía G supere la resistencia a la fractura del material. La Figura 4.18 muestra la sección de la probeta que se define para este propósito, siendo esta la sección “unida” que no forma parte de la delaminación inicial.



Figura 4.18. Definición de la interface de delaminación.

Para reproducir el aparato de pruebas se utilizan elementos rígidos tipo CERIG de ANSYS en los que se pueden elegir los grados de libertad a asociar entre los nodos conectados por dichos elementos, dichos elementos se aprecian en la Figura 4.19 donde también se observan las condiciones de frontera.

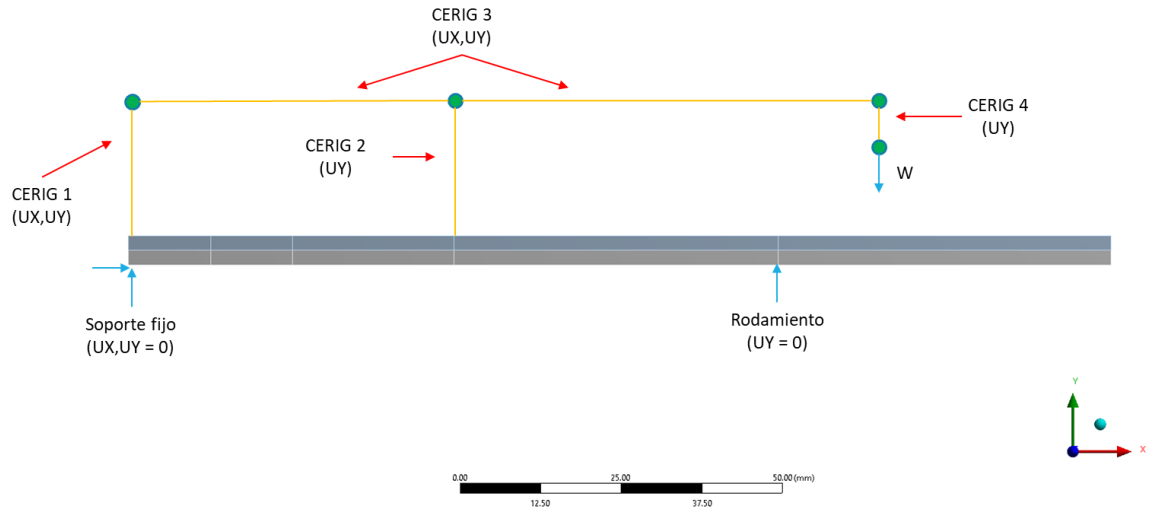


Figura 4.19. Condiciones de frontera aplicadas.

Comparando con el diagrama del aparato de prueba mostrado en la Figura 3.13, se observa que se aplica carga en un extremo por medio de una bisagra y en el centro del espécimen por medio de un rodillo. La conexión de la bisagra se representa con el CERIG 1, asociando los desplazamientos en X e Y, mientras que la conexión de el rodillo se representa con el CERIG 2 con una asociación de desplazamiento en Y. Un tercer elemento rígido conecta los 2 anteriores hacia un elemento en donde se aplica la carga, cuya distancia depende de la relación de modos de fractura y asocia el desplazamiento en X e Y. Finalmente, un cuarto elemento rígido transfiere el desplazamiento en Y.

Para las condiciones de frontera, un desplazamiento fijo en X e Y se aplica en el extremo del espécimen que estaría fijo por una bisagra, mientras que un desplazamiento fijo en Y representa el soporte de rodillo. El desplazamiento registrado durante la prueba experimental se aplica en el extremo del CERIG 4 como carga.

Capítulo 5

5. Resultados

5.2. Resultados de pruebas mecánicas

5.2.1. ASTM D3039

Se ejecutaron las pruebas mecánicas en una máquina de tensión universal de acuerdo a los requisitos de la prueba detallados en la sección 4.2.1. ASTM D3039 a un ritmo de 2 mm/min hasta el fallo. La Figura 5.1 muestra un ejemplo de la forma en que se montaron los especímenes en las mordazas para esta prueba.



Figura 5.1. Ejemplo de la ejecución de prueba a tensión

La Tabla 5.1 y Tabla 5.2 muestran los resúmenes de los resultados de resistencia última a la tensión, módulo de elasticidad, y estadística descriptiva.

Tabla 5.1. Resultados de los especímenes ASTM D3039 a 0°

Especímen	Resistencia última (MPa)	Módulo de elasticidad (MPa)
1	422.72	6947.78
2	386.12	6341.13
3	346.52	6192.98
4	351.06	6331.54
6	380.20	6951.46
Promedio	377.33	6552.98
Desviación estándar	30.76	366.80
Coefficiente de variación (%)	8.15%	5.60%

Tabla 5.2. Resultados de los especímenes ASTM D3039 a 90°

Especímen	Resistencia última (MPa)	Módulo de elasticidad (MPa)
2	17.83	284.80
3	20.74	276.42
4	20.55	285.52
5	18.88	246.63
6	20.17	227.88
Promedio	19.63	264.25
Desviación estándar	1.24	25.77
Coefficiente de variación (%)	6.32%	9.75%

A continuación, se presentan las curvas esfuerzo – deformación y modos de falla para cada uno de los especímenes.

1. Especímenes a 0°

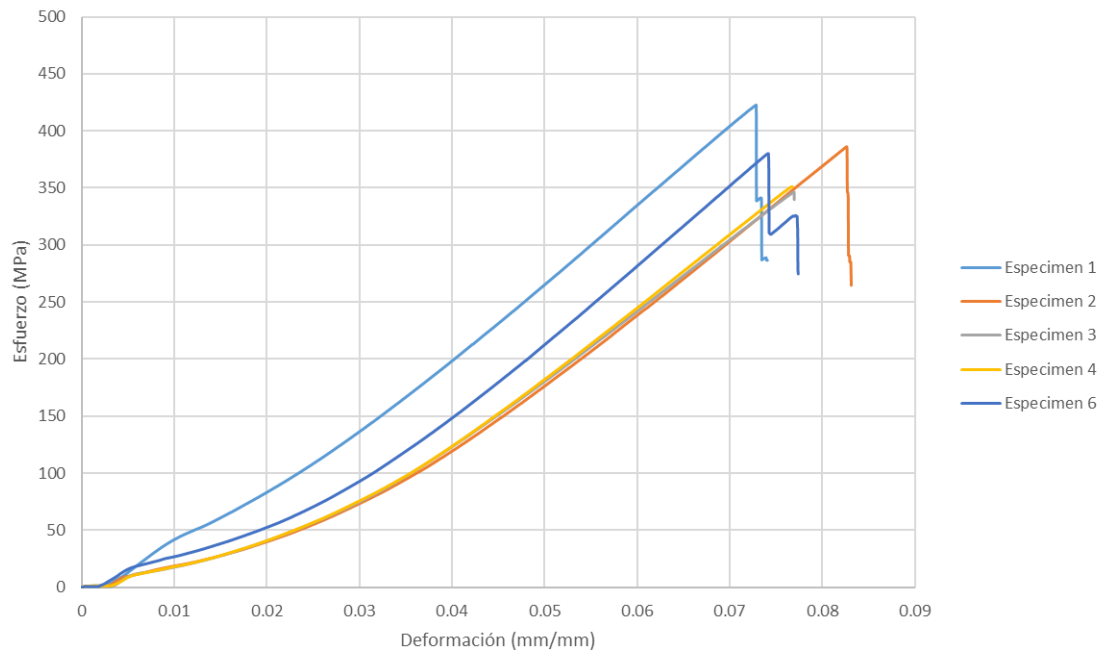


Figura 5.2. Curvas esfuerzo – deformación de especímenes a 0°

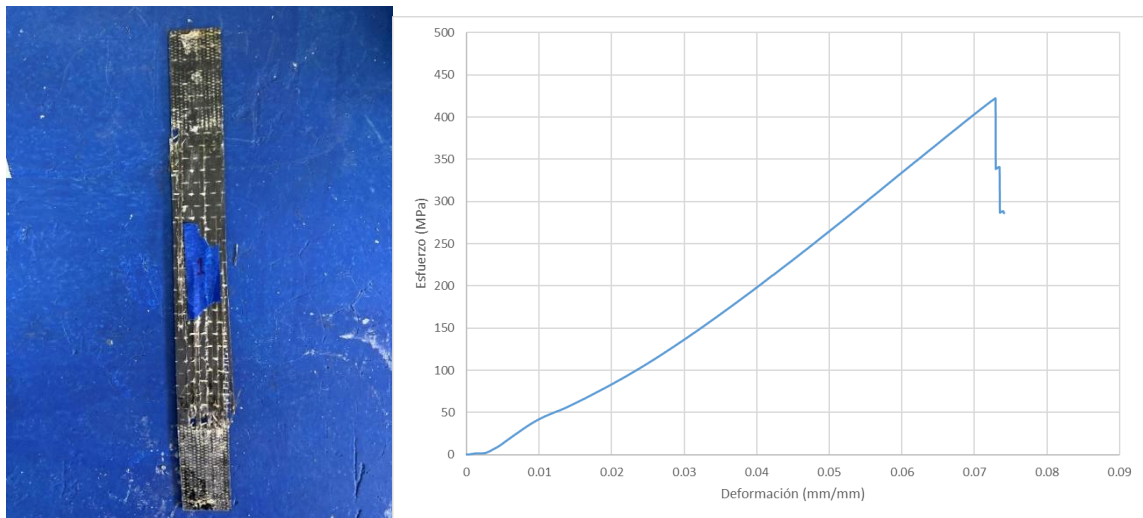


Figura 5.3. Modo de falla y curva esfuerzo – deformación del espécimen #1 a 0°

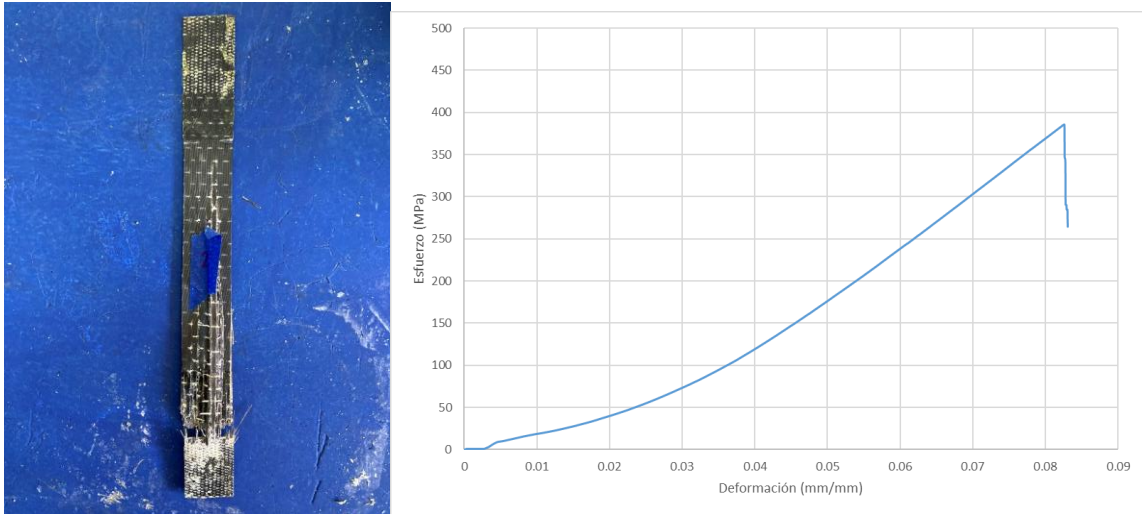


Figura 5.4. Modo de falla y curva esfuerzo – deformación del espécimen #2 a 0°

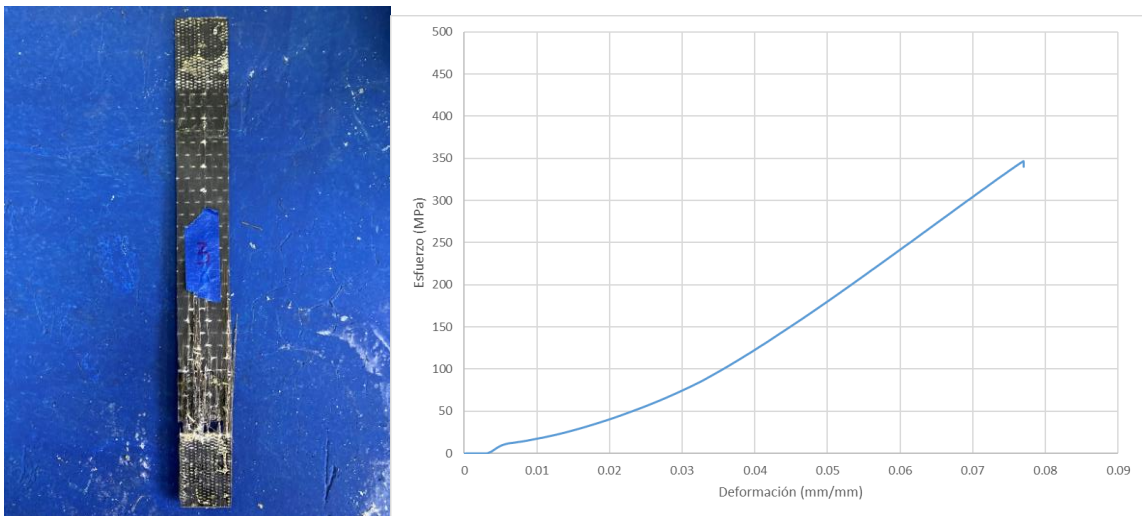


Figura 5.5. Modo de falla y curva esfuerzo – deformación del espécimen #3 a 0°

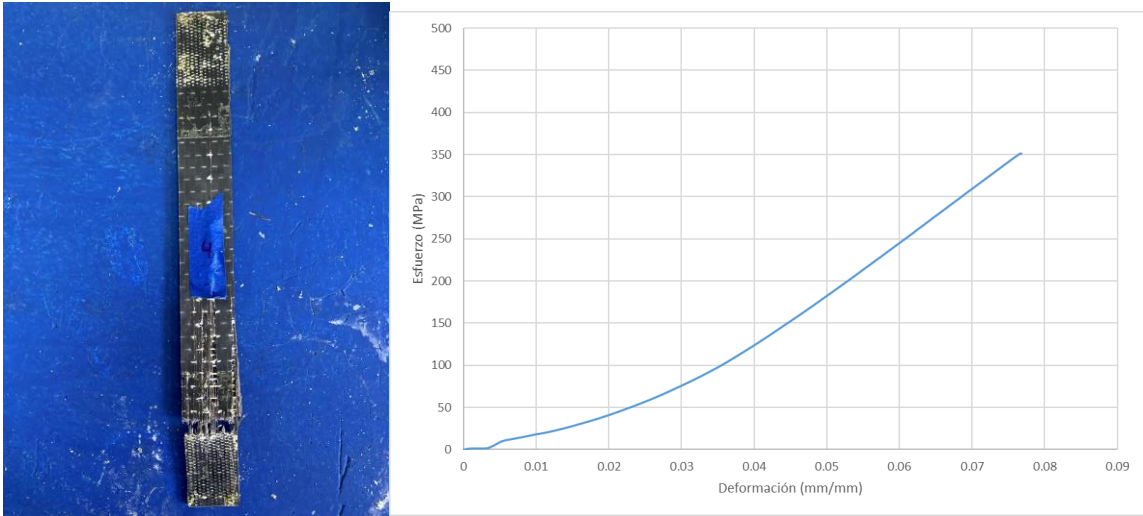


Figura 5.6. Modo de falla y curva esfuerzo – deformación del espécimen #4 a 0°

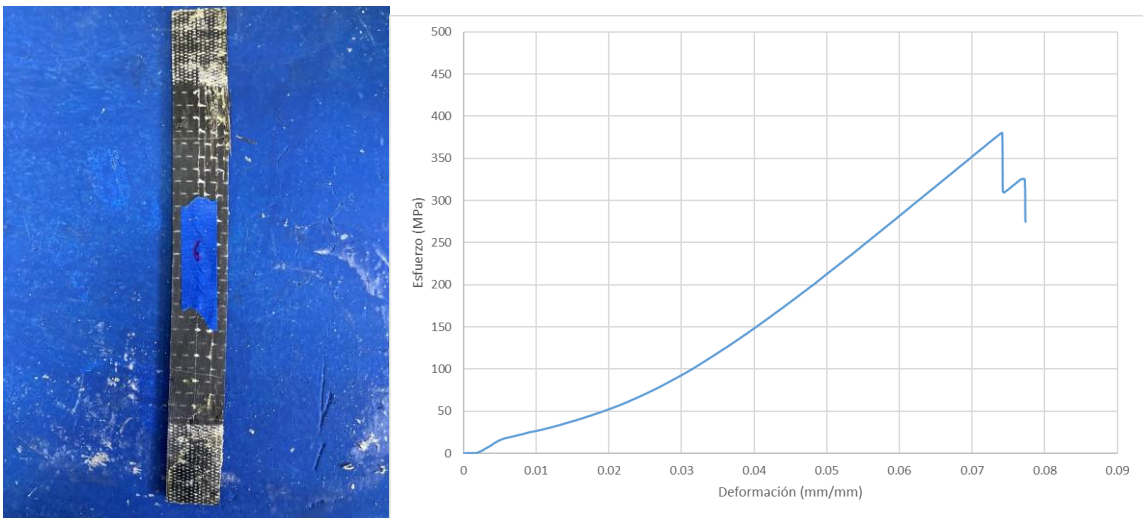


Figura 5.7. Modo de falla y curva esfuerzo – deformación del espécimen #6 a 0°

2. Especímenes a 90°

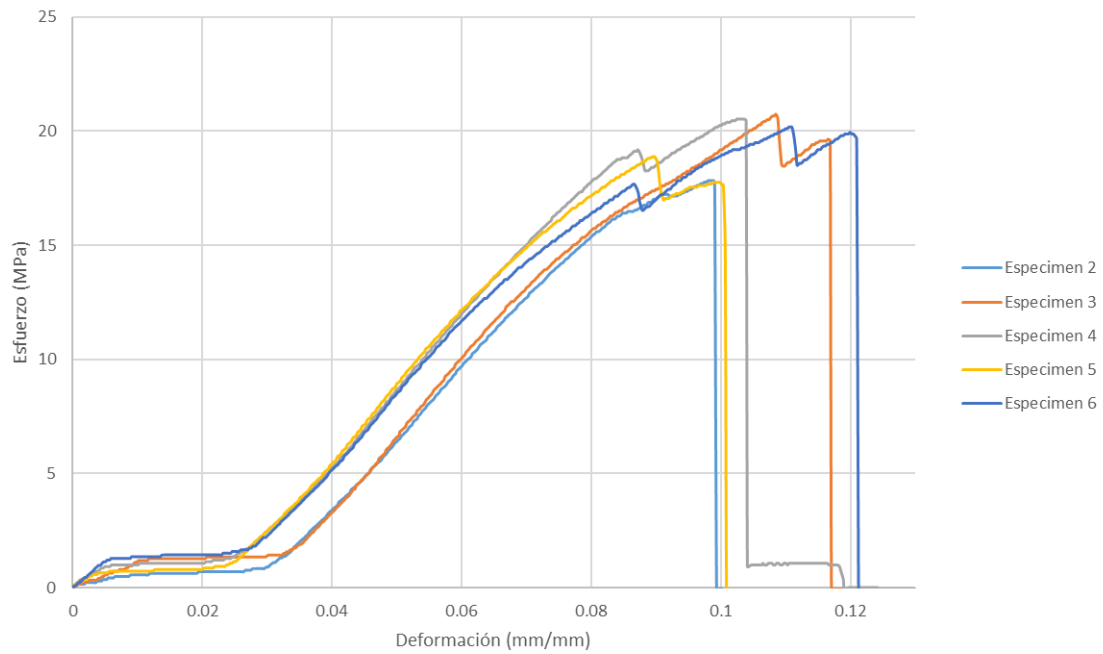


Figura 5.8. Curvas esfuerzo – deformación de especímenes a 90°

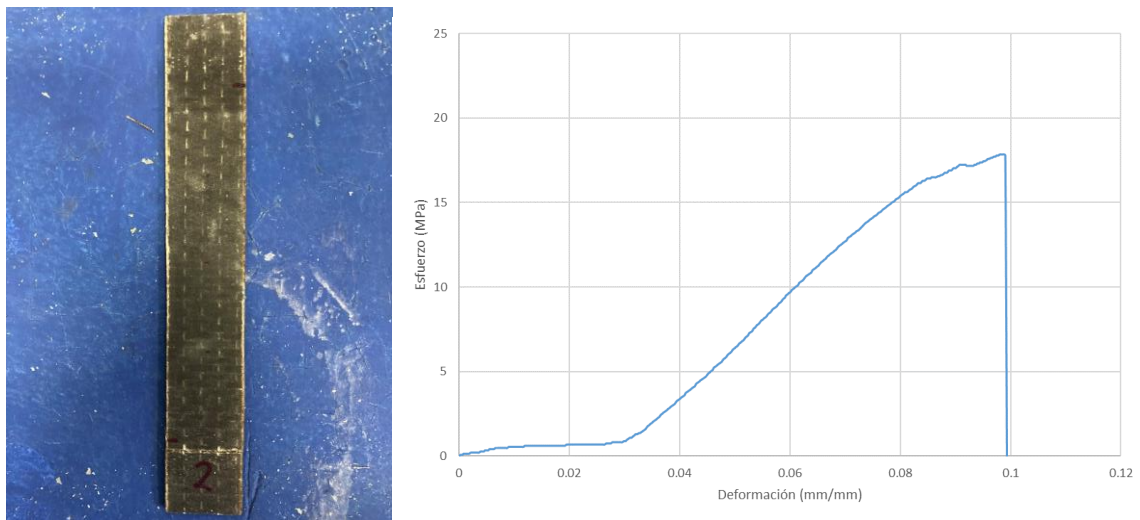


Figura 5.9. Modo de falla y curva esfuerzo – deformación del espécimen #2 a 90°

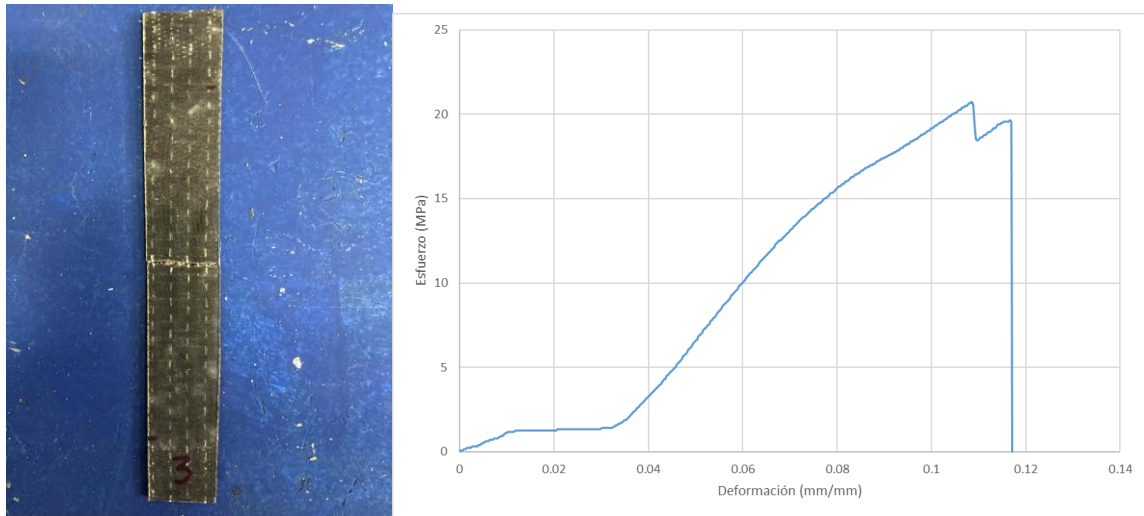


Figura 5.10. Modo de falla y curva esfuerzo – deformación del espécimen #3 a 90°

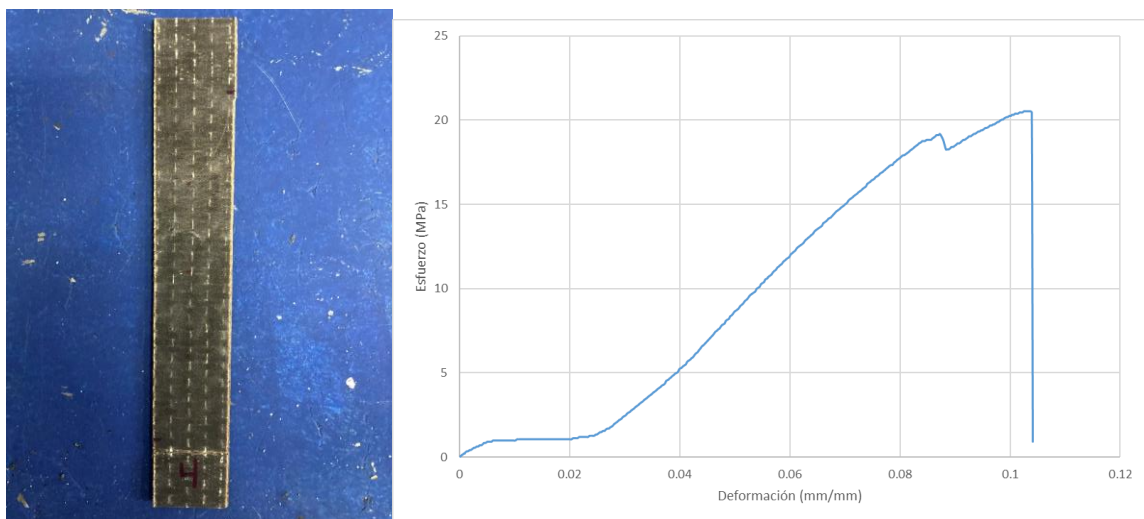


Figura 5.11. Modo de falla y curva esfuerzo – deformación del espécimen #4 a 90°

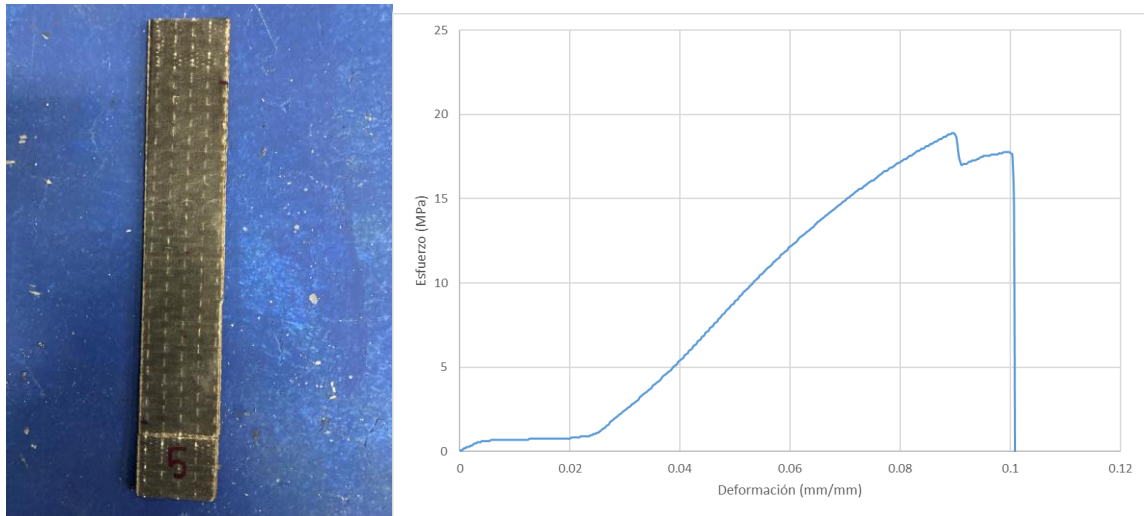


Figura 5.12. Modo de falla y Curva esfuerzo – deformación del espécimen #5 a 90°

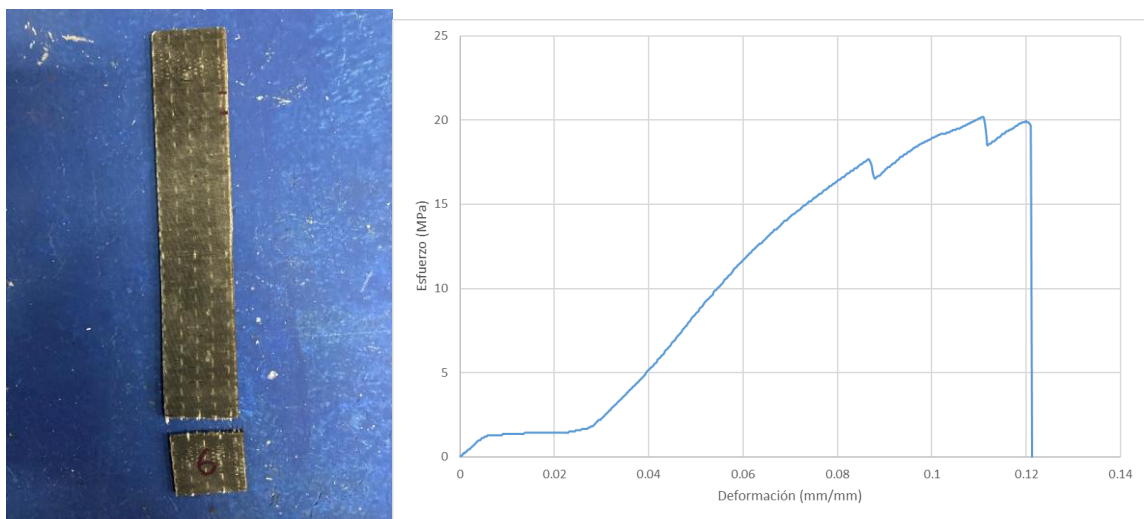


Figura 5.13. Modo de falla y Curva esfuerzo – deformación del espécimen #6 a 90°

5.2.2. ASTM D3518

Los especímenes fabricados en la sección 4.1.2. ASTM D3518 se probaron de acuerdo a la sección 4.2.2. ASTM D3518 a tensión a un ritmo de 2 mm/min. Se registró la carga, deformación longitudinal y axial por medio de galgas extensiométricas para generar las curvas de esfuerzo cortante – deformación cortante mostradas a continuación. Los especímenes no se llevaron al fallo, pero se capturó el esfuerzo cortante máximo y toda la zona de deformación lineal que es requerida para calcular el módulo de cortante.



Figura 5.14. Especímenes de prueba ASTM D3518 con galgas extensiométricas instaladas.



Figura 5.15. Especímenes de prueba sometido a tensión.

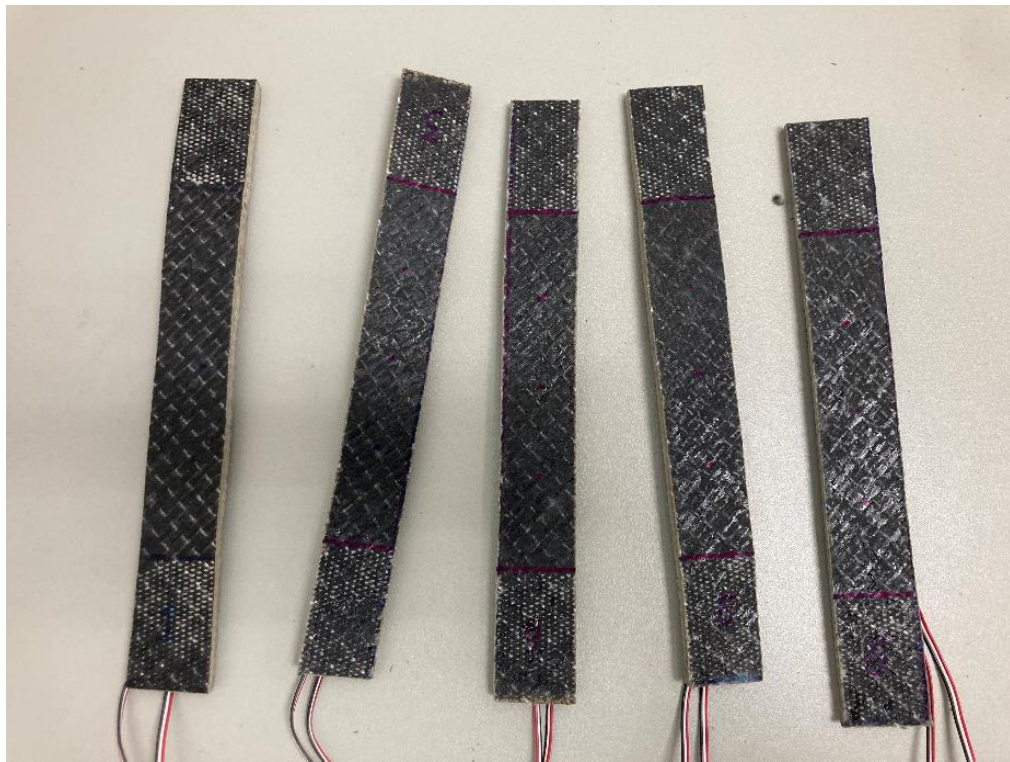


Figura 5.16. Especímenes de prueba ASTM D3518 después de completar el ensayo de tensión.

La Tabla 5.3 muestra el resumen de los resultados de resistencia última cortante, módulo de cizallamiento, y estadística descriptiva.

Tabla 5.3. Resultados de los especímenes ASTM D3518

Especimen	Resistencia última (MPa)	Módulo de cizalladura (MPa)
1	41.72	739.59
3	38.77	709.91
4	34.18	707.18
5	38.10	726.09
6	38.06	744.94
Promedio	38.17	725.54
Desviación estándar	2.69	17.00
Coefficiente de variación (%)	7.04%	2.34%

A continuación, se presentan las curvas esfuerzo cortante – deformación cortante para cada uno de los especímenes.

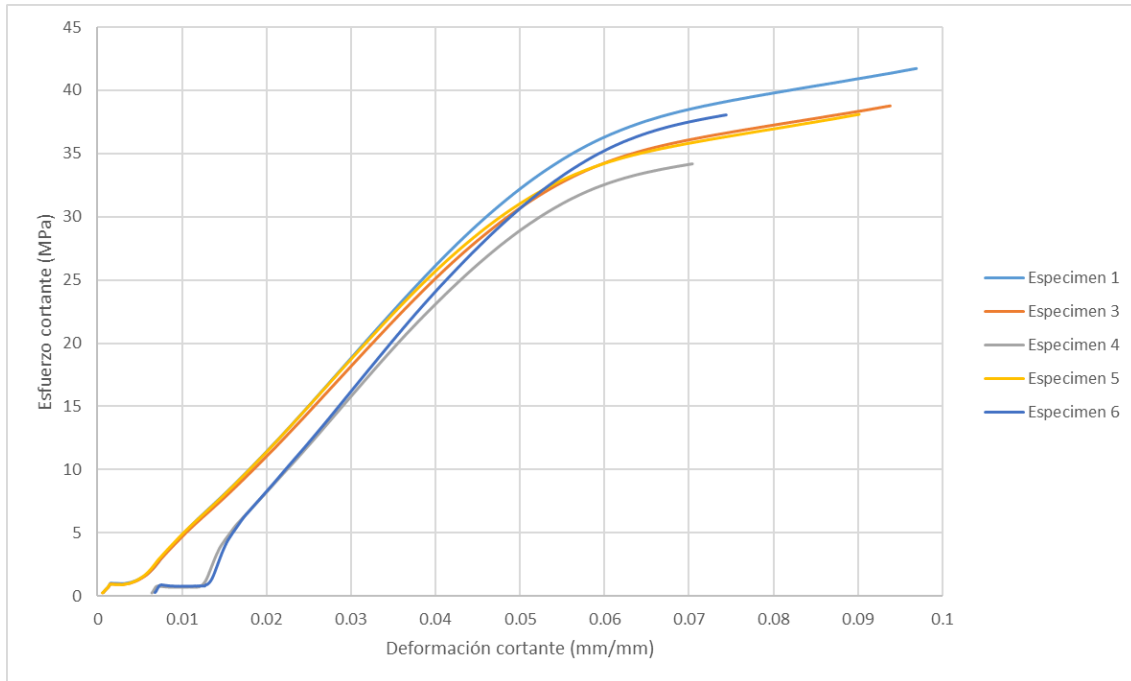


Figura 5.17. Curva esfuerzo cortante – deformación cortante de todos los especímenes.

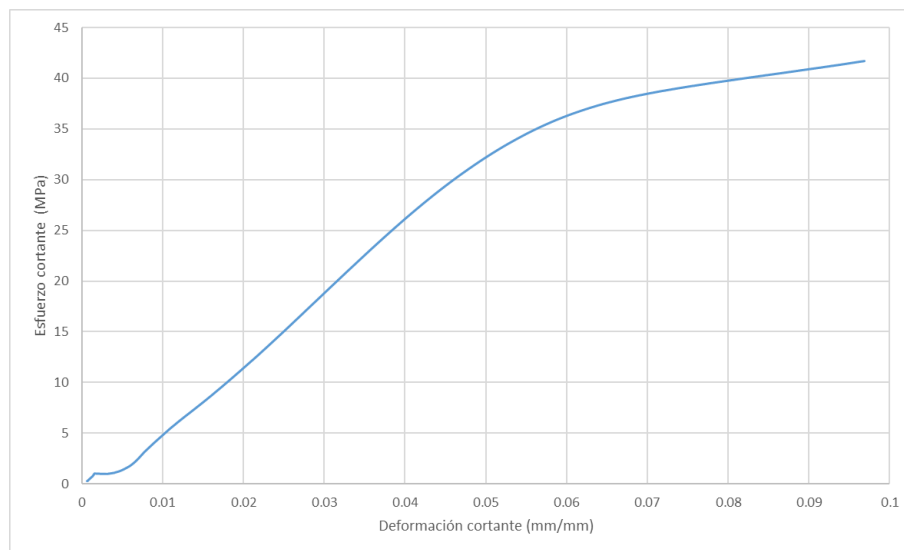


Figura 5.18. Curva esfuerzo cortante – deformación cortante del espécimen #1.

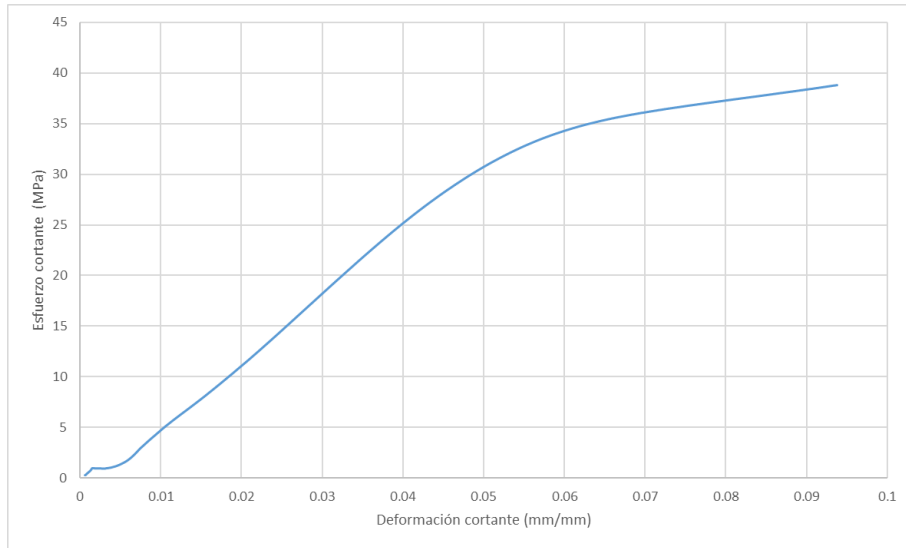


Figura 5.19. Curva esfuerzo cortante – deformación cortante del espécimen #3.

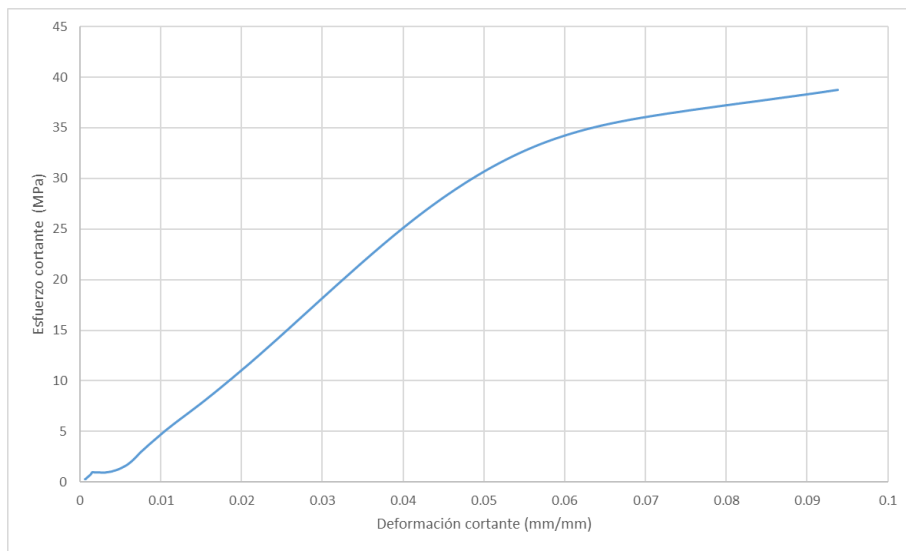


Figura 5.20. Curva esfuerzo cortante – deformación cortante del espécimen #4.

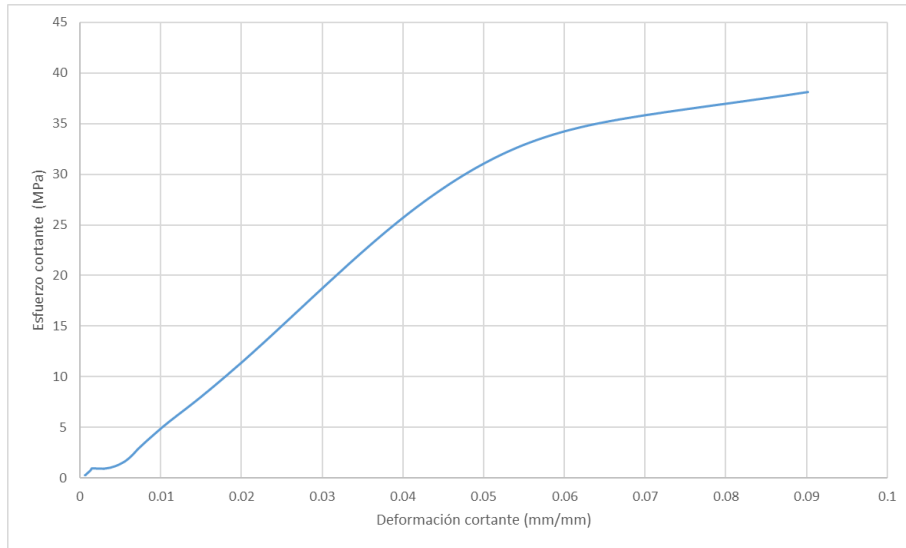


Figura 5.21. Curva esfuerzo cortante – deformación cortante del espécimen #5.

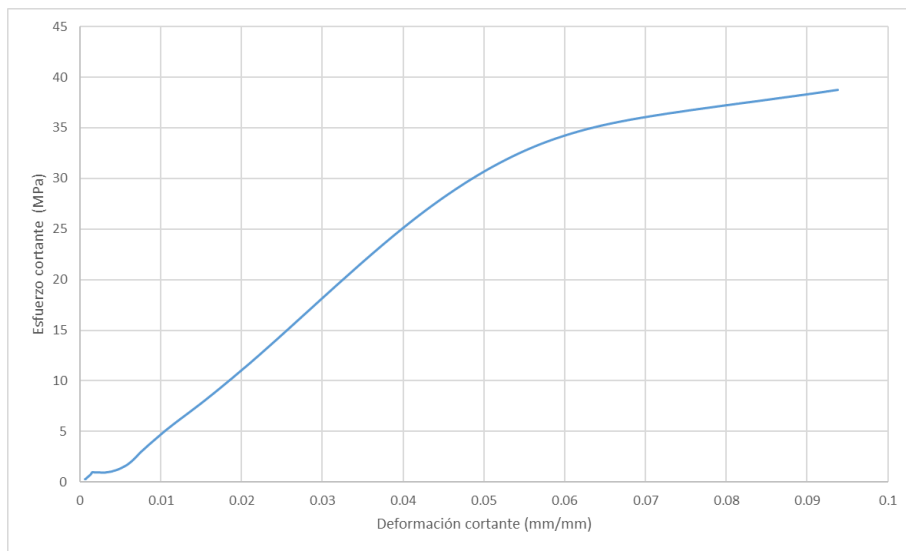


Figura 5.22. Curva esfuerzo cortante – deformación cortante del espécimen #6.

5.2.3. ASTM D6671

El banco de pruebas mostrado en la Figura 5.23 y Figura 5.24 se utilizó para la ejecución de la prueba de fractura por modo mixto descritas en la sección 4.2.3. ASTM D6671 en las relaciones de modo de fractura presentadas en la Tabla 4.23.

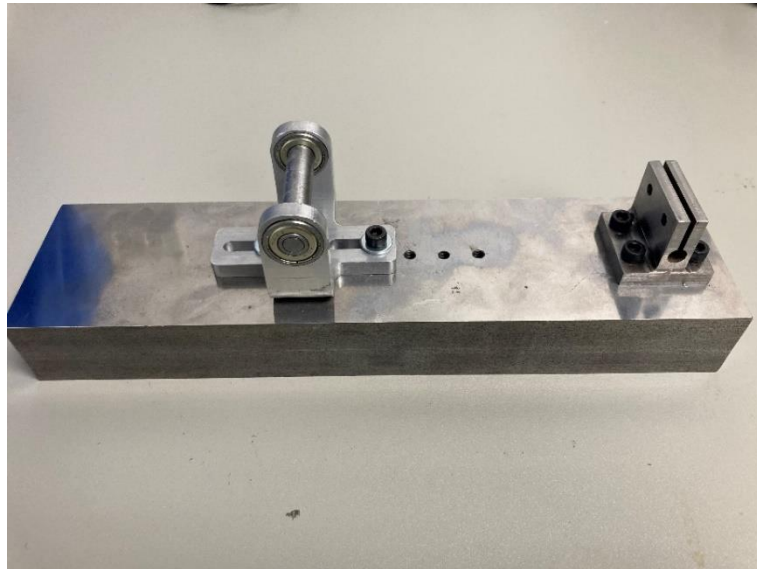


Figura 5.23. Banco de pruebas ASTM D6671, sección inferior.

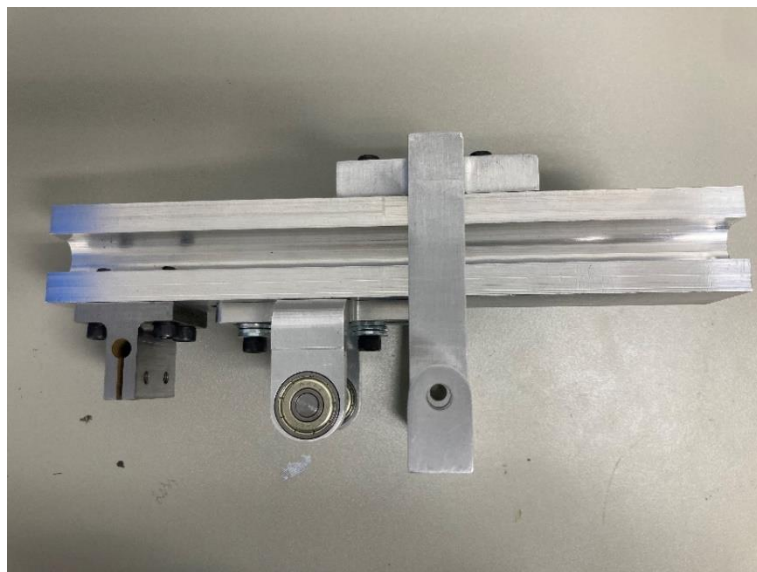


Figura 5.24. Banco de pruebas ASTM D6671, sección superior.

La Figura 5.25 y Figura 5.26 muestran el ensamble del banco de pruebas y el ejemplo de cómo se ejecutó esta prueba-

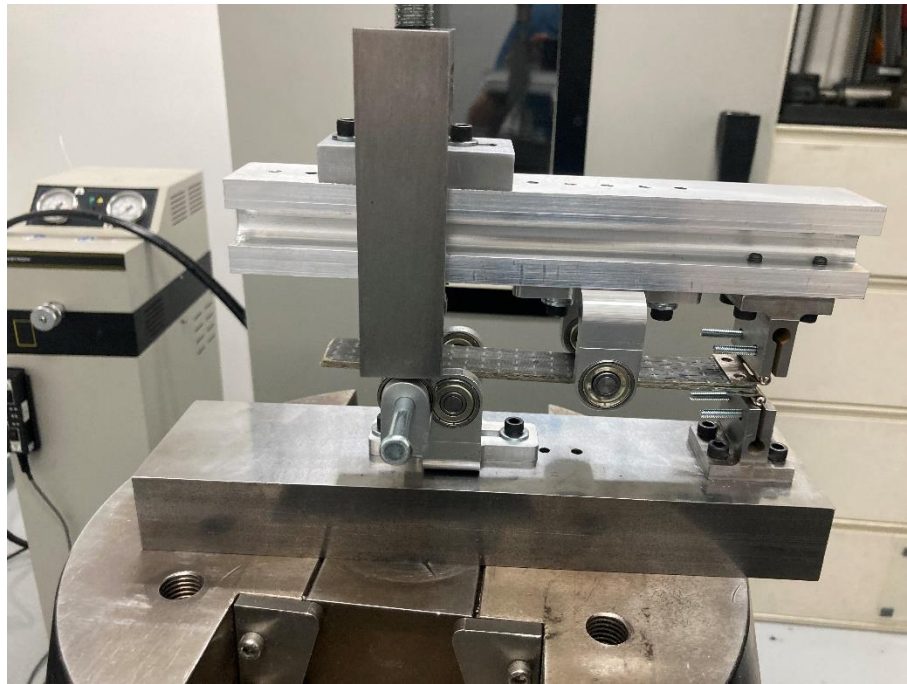


Figura 5.25. Ensamble del banco de pruebas ASTM D6671 con una probeta instalada.



Figura 5.26. Ejemplo de una prueba de fractura por modo mixto en curso.

En la Tabla 5.4 se observan los resultados para cada espécimen de fractura por modo mixto probado en diferentes relaciones GII/GT. El procedimiento de cálculo para la resistencia a la fractura G_c se llevó a cabo de acuerdo a las dimensiones de cada espécimen individual utilizando las ecuaciones presentadas en la sección 4.2.3. ASTM D6671. En la Tabla 5.5 se presentan los brazos de palanca c calculados para alcanzar las relaciones de fractura por modo mixto requeridas.

Tabla 5.4. Resultados de experimentos de fractura por modo mixto.

GII/GT	No.	L (mm)	W (mm)	T (mm)	a0 (mm)	Pmax (N)	GI (kJ/m ²)	II (kJ/m ²)	Gc (kJ/m ²)
0.2	1	161.28	22.80	3.00	49.78	42.867	0.121	0.004	0.124
	2	160.33	23.22	3.14	51.70	47.235	0.145	0.004	0.149
	3	159.23	23.69	3.01	52.43	45.600	0.136	0.004	0.140
	4	160.85	23.96	2.93	51.01	50.127	0.164	0.005	0.169
	5	160.35	23.06	2.97	50.01	48.392	0.153	0.004	0.157
0.4	6	160.03	22.8333	3.1467	50.75	129.1148	0.667	0.000	0.667
	7	159.17	23.5433	2.96	52.17	147.655	0.871	0.000	0.871
	8	160.56	23.58	2.8667	50.74	146.4216	0.856	0.000	0.856
	9	159.45	22.9067	3.02	52.38	150.8321	0.934	0.000	0.934
	10	160.98	23.69	2.9333	51.13	146.1922	0.823	0.000	0.823
0.6	11	160.17	23.7733	3	50.6	205.4759	0.880	0.032	0.913
	12	160.74	23.5333	3.0067	50.1	210.4525	0.985	0.036	1.021
	13	159.34	22.7833	3.0367	51.02	221.1558	1.012	0.037	1.050
	14	159.64	23.8533	3.0567	50.15	209.8011	0.978	0.036	1.014
	15	159.4	22.3233	3.0867	51.97	193.4111	0.774	0.029	0.803
0.8	16	160.37	22.8333	3.0433	50.17	281.837	0.886	0.297	1.183
	17	159.81	23.0167	3.05	50.1	273.25	0.833	0.279	1.112
	18	159.34	23.1333	3.0967	50.94	295.89	0.976	0.327	1.304
	19	160.31	23.3767	3.02	50.74	268.77	0.806	0.270	1.076
	20	160.38	22.0867	3.1067	51.45	240.63	0.646	0.216	0.862

Tabla 5.5. Dimensiones de los brazos de palanca C de acuerdo a la relación GII/GT

GII/GT	c (mm)
0.2	108.632
0.4	55.631
0.6	39.528
0.8	29.950

La Figura 5.27 presenta una curva graficada basada en los puntos de resistencia a la fractura G_c mostrado en la Tabla 5.4. Esta curva es el criterio de fractura por modo mixto para el material compuesto de basalto, y describe el comportamiento de este en fractura interlaminar para diferentes relaciones de fractura por modo mixto G_{II}/G_T . Esta ecuación esta descrita por la el polinomio $y = -3.3449x^2 + 4.8487x - 0.6596$.

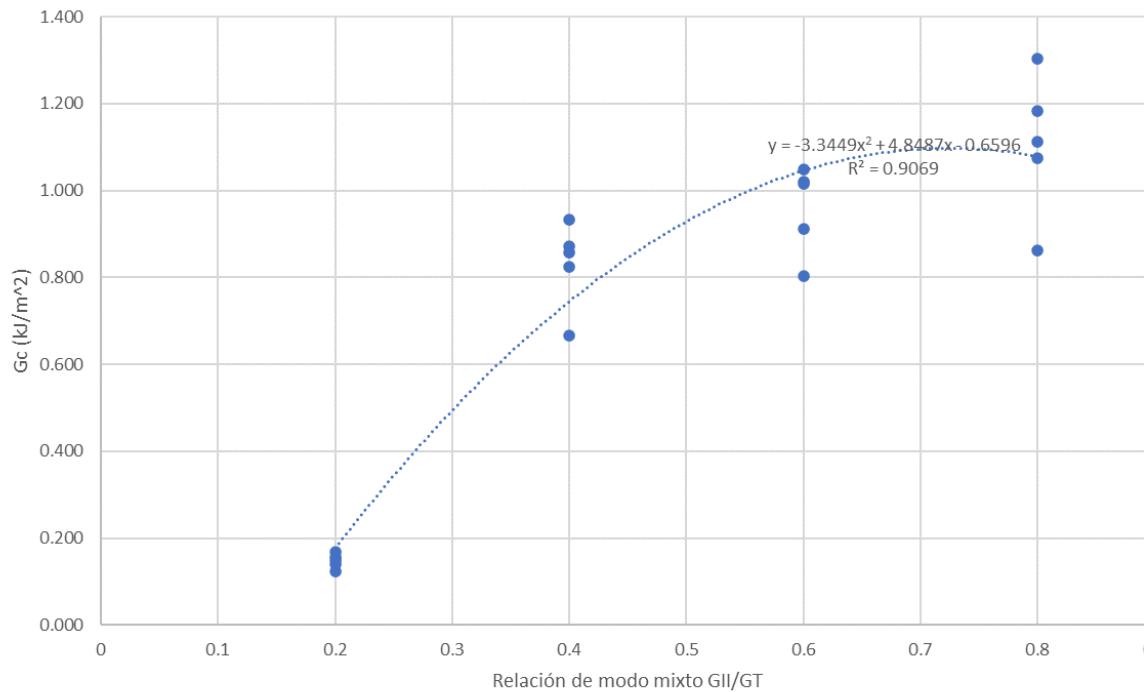


Figura 5.27. Criterio de fractura por modo mixto para compuesto de basalto

A continuación, se muestran los modos de falla para los especímenes de las diferentes relaciones de fractura por modo mixto.

1. $G_{II}/G_T=0.2$

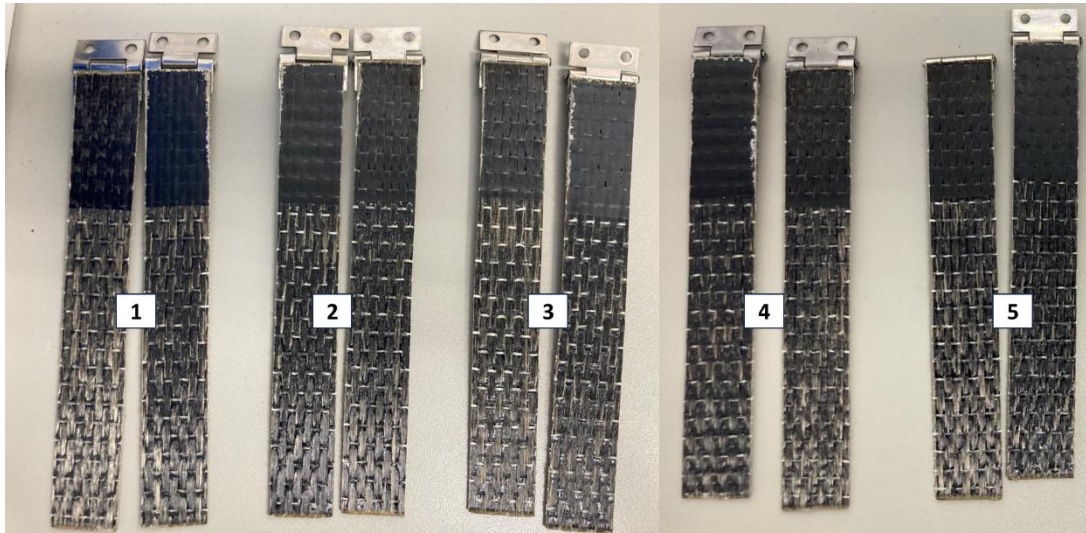


Figura 5.28. Especímenes de fractura por modo mixto 1 - 5.

2. $G_{II}/G_T=0.4$

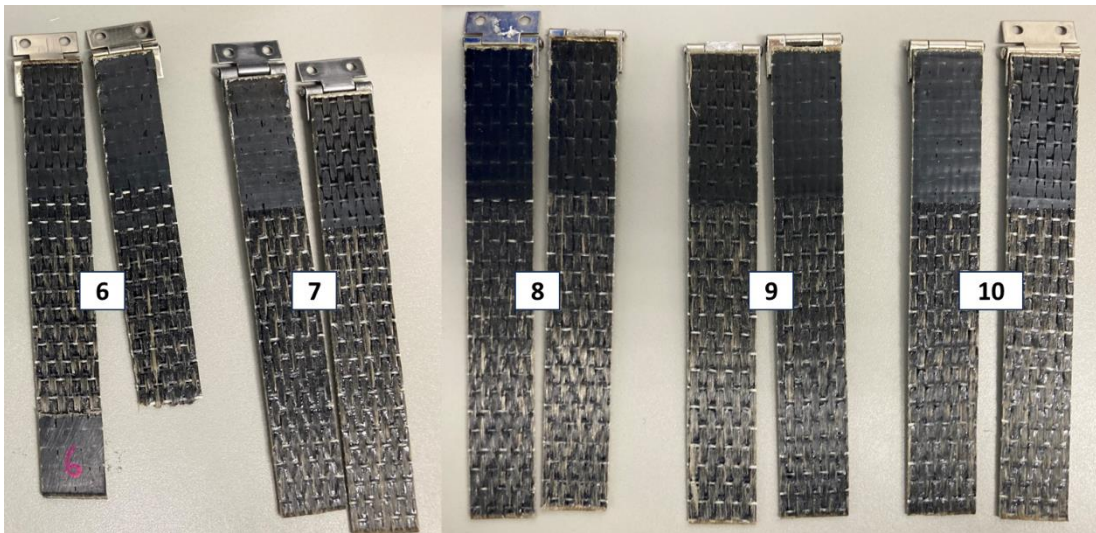


Figura 5.29. Especímenes de fractura por modo mixto 6 - 10

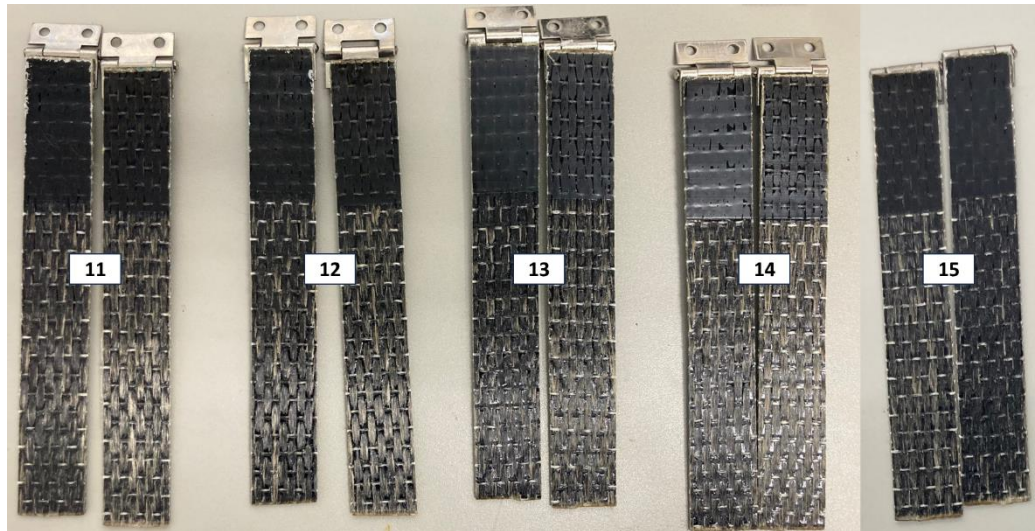


Figura 5.30. Especímenes de fractura por modo mixto 11 - 15.

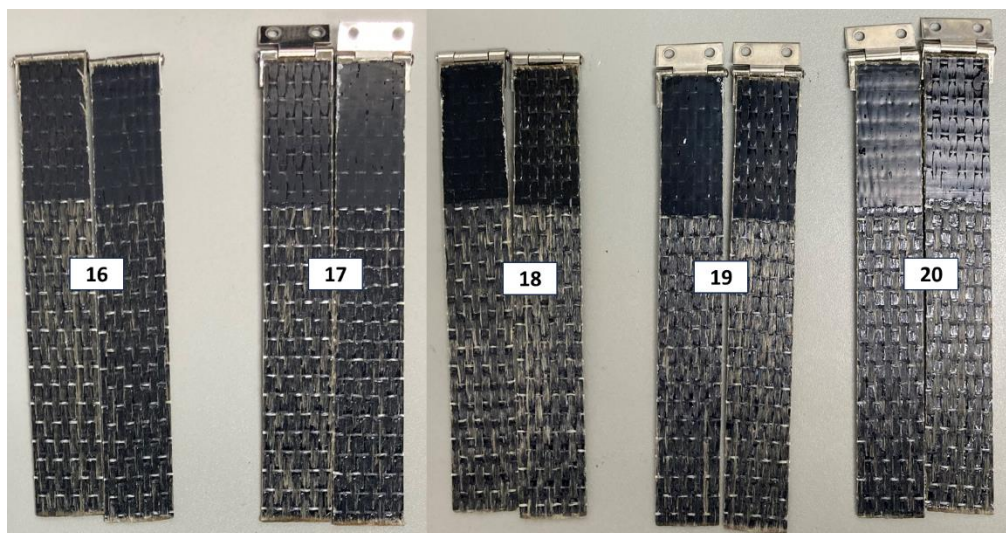


Figura 5.31. Especímenes de fractura por modo mixto 16 - 20.

Capítulo 6

6. Análisis de resultados

La Tabla 6.1 compara los resultados de tensión a 0° presentados en la sección 5.2.1. ASTM D3039 con resultados de bibliografía. Se seleccionaron estos para comparar debido a que estos también utilizan fibra unidireccional. Si bien se observa que tanto la resistencia última (Ftu) como el módulo de elasticidad (E) es menor que las referencias, el bajo coeficiente de variación indica que tanto la manufactura como el proceso de pruebas no presentó desviaciones mayores.

Una investigación de los modos de falla mostrados en la sección 5.2.1. ASTM D3039 a 0° indica que la mayoría de los fallos fueron en el área de la mordaza por lo que no es fallo ideal. Una mejor sujeción por medio de “tabs” en la zona de sujeción como los utilizados en las referencias pudo haber ayudado a que se desarrollara la resistencia completa del material.

Adicionalmente, los especímenes probados por Plappert [61] se fabricaron de compuestos preimpregnados, lo que puede explicar la gran diferencia en resultados contra este caso.

Tabla 6.1. Comparación de resultados ASTM D3039

	Bonino		Khalili [29]		Plappert [61]	
	Ftu (Mpa)	E (GPa)	Ftu (Mpa)	E (GPa)	Ftu (Mpa)	E (GPa)
Promedio	377.33	6.55	578	31.50	1310	44.3
Desviación estándar	30.76	0.367	10.90	6.02	34	2.3
Coefficiente de variación (%)	8.15%	5.60%	1.89%	19.11%	2.60%	5.19%

Una comparación similar se muestra en la Tabla 6.2 para las pruebas de esfuerzo cortante ASTM D3518. Aquí se observa que los resultados de resistencia al cortante correlacionan bastante con las referencias. El módulo de cizalladura sin embargo se observa muy por debajo. Una vez más, el bajo coeficiente de variación calculado demuestra que hay confianza en la manufactura y proceso de prueba. En el caso de Soares [24], los especímenes se fabricaron por medio de proceso de moldeo por transferencia de resina (RTM), lo que también da un mayor control en el proceso de manufactura sobre el proceso de wet lay up utilizado en esta investigación y puede explicar la diferencia en resultados.

Tabla 6.2. Comparación de resultados ASTM D3518

	Bonino		Soares [24]		Plappert [61]	
	Fts (MPa)	G (GPa)	Fts (MPa)	G (GPa)	Fts (MPa)	G (GPa)
Promedio	38.17	0.726	42	2.72	50.5	3.73
Desviación estándar	2.69	0.017	5.3	0.26	2.50	0.29
Coeficiente de variación (%)	7.04%	2.34%	12.62%	9.69%	4.95%	7.77%

Sobre los modos de falla de la prueba de fractura por modo mixto ASTM D6671, las imágenes mostradas en la sección 5.2.3. ASTM D6671 muestran crecimientos de grieta limpios en la frontera de apertura sin rasgaduras, lo que indica resultados válidos según el estándar [16]. Estos resultados presentados en la Tabla 5.4 e ilustrado en la Figura 5.27 son la caracterización de las propiedades de fractura por flexión del material compuesto de basalto en resina epoxica fabricado en esta investigación. Comparando los resultados obtenidos contra referencias bibliográficas donde se estudió la resistencia a la fractura de la fibra de carbono unidireccional [59] y fibra de vidrio tejida [62] se puede tener una idea de cómo se posiciona el basalto contra estos refuerzos tradicionales.

Tabla 6.3. Comparación de resistencia a la fractura entre el refuerzo de basalto y el refuerzo de carbono

	Basalto	Carbono[59]	Diferencia
GII/GT	Gc (kJ/m²)		%
0.0	-	0.212	-
0.2	0.148	0.230	-35.71
0.5	0.929	0.388	139.62
0.8	1.107	0.450	146.03
1.0	0.844	0.774	9.07

Tabla 6.4. Comparación de resistencia a la fractura entre el refuerzo de basalto y el refuerzo de vidrio

	Basalto	Vidrio[62]	Diferencia
GII/GT	Gc (kJ/m²)		%
0.0	-	0.127	-
0.4	0.830	0.451	83.98
0.5	0.929	0.574	61.79
0.8	1.107	1.673	-33.82
1.0	0.844	2.758	-69.39

La comparación el refuerzo de basalto contra el refuerzo de carbono en la Tabla 6.3 muestra que el basalto es menos resistente a la fractura interlaminar en situaciones donde predomina la fractura por modo I (GII/GT=0.2). En comparación, la resistencia es mayor en el basalto para modos intermedio de fractura I y II (GII/GT=0.5 y 0.8). En el caso donde predomina completamente el modo de fractura II la fibra de carbono es ligeramente superior (GII/GT=1).

En el caso de la fibra de vidrio presentado en la Tabla 6.4 sucede un caso similar. En las relaciones de modos de fractura intermedios (GII/GT=0.4 y 0.5) la fibra de basalto se muestra superior a la de vidrio. Caso contrario sucede en casos donde predomina el Modo II de fractura (GII/GT=0.8 y 1) donde la fibra de vidrio es superior. Cabe destacar que al comparar contra este estudio se debe tener precaución pues la fibra de vidrio utilizada en dichas pruebas es tejida, lo que puede incrementar su resistencia a la fractura[62].

6.1. Conclusión

Las propiedades mecánicas de resistencia y elasticidad del laminado de basalto en matriz polimérica mostraron resultados confiables debido a su bajo coeficiente de variación en comparación con los resultados de referencia.

La resistencia a la fractura en modo mixto para el material compuesto de basalto unidireccional resultó ser generalmente superior a la fibra de carbono unidireccional. Al compararlo contra la fibra de vidrio tejida se observó que la resistencia del basalto unidireccional es superior para relaciones de fractura donde predomina el Modo I, mientras que la fibra de vidrio es superior para relaciones de fractura donde predomina el Modo II.

Se considera que los resultados fueron satisfactorios debido a que las propiedades mecánicas caracterizadas fueron generalmente superiores comparados con los refuerzos de referencia, y esta ventaja se ve incrementada debido a que el compuesto de basalto es más económico, ecológico y su método de fabricación fue más simple que los compuestos de referencia.

Puede concluirse que la fibra de basalto es un refuerzo viable en matrices poliméricas para aplicaciones donde se quiera tener alta resistencia a la fractura interlaminar, particularmente para un nivel intermedio de fractura por modo mixto ($GII/GT=0.4$ a $GII/GT=0.8$).

Referencias bibliográficas

- [1] A. Baker, S. Dutton, y D. Kelly, *Composite Materials for Aircraft Structures*, 2da ed. Reston, VA: AIAA Education Series, 2004.
- [2] S. K. Mazumdar, *Composites Manufacturing: Materials, Product, and Process Engineering*, 1ra ed. Boca Raton, FL: CRC Press, 2002.
- [3] F. C. Campbell, *Structural Composite Materials*. Materials Park, OH: ASM International, 2010.
- [4] A. Asadi, F. Baaij, H. Mainka, M. Rademacher, J. Thompson, y K. Kalaitzidou, “Basalt fibers as a sustainable and cost-effective alternative to glass fibers in sheet molding compound (SMC)”, *Compos B Eng*, vol. 123, pp. 210–218, ago. 2017, doi: 10.1016/j.compositesb.2017.05.017.
- [5] P. De Fazio, “Basalt fibra: from earth an ancient material for innovative and modern application”, *Energia Ambiente e Innovazione*, vol. 3, 2011.
- [6] V. Fiore, T. Scalici, G. Di Bella, y A. Valenza, “A review on basalt fibre and its composites”, *Compos B Eng*, vol. 74, pp. 74–94, jun. 2015, doi: 10.1016/j.compositesb.2014.12.034.
- [7] K. Pareek y P. Saha, “Basalt Fiber and Its Composites: An Overview”, mar. 2019.
- [8] R. P. Reed, J. H. Smith, y B. W. Christ, “The Economic Effects of Fracture in the United States”, Washington, D.C., mar. 1983.
- [9] T. L. Anderson, *Fracture Mechanics: Fundamentals and Applications*, 3era ed. Boca Raton, FL: Taylor & Francis, 2005.
- [10] S. Parhizgar, “Fracture mechanics of unidirectional composite materials”, Dissertation, Iowa State University, Ames, IA, 1979. [En línea]. Disponible en: <https://lib.dr.iastate.edu/rtd>
- [11] S.-T. Yang, “Study of Failure in Fibrous Composites Subjected to Bending Loads”, Tesis, Naval Postgraduate School, Monterey, CA, 1994.
- [12] M. W. Czabaj y J. G. Ratcliffe, “Comparison of Intralaminar and Interlaminar Mode-I Fracture Toughness of Unidirectional IM7/8552 Graphite/Epoxy Composite”, Arlington, TX: NASA, ago. 2012. [En línea]. Disponible en: <https://ntrs.nasa.gov/search.jsp?R=20120016494>
- [13] R. Jurf y B. Pipes, “Interlaminar Fracture of Composite Materials”, *Journal of Composite Materials - J COMPOS MATER*, vol. 16, pp. 386–394, mar. 1982, doi: 10.1177/002199838201600503.
- [14] M. Kosior-Kazberuk y J. Krassowska, “Fracture toughness of concrete with basalt fiber”, *MATEC Web of Conferences*, vol. 265, p. 1008, mar. 2019, doi: 10.1051/matecconf/201926501008.
- [15] Y. Zhao *et al.*, “Mechanical Performance and Numerical Simulation of Basalt Fiber Reinforced Concrete (BFRC) Using Double-K Fracture Model and Virtual Crack Closure Technique (VCCT)”, *Advances in Civil Engineering*, vol. 2019, pp. 1–15, mar. 2019, doi: 10.1155/2019/5630805.
- [16] ASTM Standard D 6671/D 6671M – 06, “Standard Test Method for Mixed Mode I-Mode II Interlaminar Fracture Toughness of Unidirectional Fiber Reinforced Polymer Matrix Composites”. ASTM International, West Conshohocken, PA, 2006.

- [17] M. Á. Vázquez Ruiz y C. Bocanegra, “La industria aeroespacial en México: características y retos en Sonora”, *Problemas del Desarrollo. Revista Latinoamericana de Economía*, vol. 49, núm. 195, sep. 2018, doi: 10.22201/iiec.20078951e.2018.195.63183.
- [18] C. A. Morán y A. Mayo, “La ingeniería en la Industria Aeroespacial”, 2013.
- [19] R. Parnas, M. Shaw, y Q. Liu, “Basalt Fiber Reinforced Polymer Composites”, 2007.
- [20] USGS y Volcano Hazards Program, “Columbia River Basalt Group map shows main regions of basalt exposure in Washington, Oregon, Idaho and Nevada, USA”, 1905. <https://www.usgs.gov/media/images/columbia-river-basalt-group-map-shows-main-regions-basalt-exposu> (consultado el 31 de agosto de 2023).
- [21] X. Zhao, X. Wang, Z. Wu, y J. Wu, “Experimental study on effect of resin matrix in basalt fiber reinforced polymer composites under static and fatigue loading”, *Constr Build Mater*, vol. 242, may 2020, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2020.118121.
- [22] E. Kessler, R. Gadov, y J. Straub, “Basalt, glass and carbon fibers and their fiber reinforced polymer composites under thermal and mechanical load”, *AIMS Mater Sci*, vol. 3, núm. 4, pp. 1561–1576, 2016, doi: 10.3934/matersci.2016.4.1561.
- [23] M. H. Lapena y G. Marinucci, “Mechanical characterization of basalt and glass fiber epoxy composite tube”, *Materials Research*, vol. 21, núm. 1, 2018, doi: 10.1590/1980-5373-mr-2017-0324.
- [24] B. Soares, R. Preto, L. Sousa, y L. Reis, “Mechanical behavior of basalt fibers in a basalt-UP composite”, en *Procedia Structural Integrity*, Elsevier B.V., 2016, pp. 82–89. doi: 10.1016/j.prostr.2016.02.012.
- [25] I. R. Chowdhury, N. H. Nash, A. Portela, N. P. O’Dowd, y A. J. Comer, “Analysis of failure modes for a non-crimp basalt fiber reinforced epoxy composite under flexural and interlaminar shear loading”, *Compos Struct*, vol. 245, ago. 2020, doi: 10.1016/j.compstruct.2020.112317.
- [26] H. Zhang, Y. Yao, D. Zhu, B. Mobasher, y L. Huang, “Tensile mechanical properties of basalt fiber reinforced polymer composite under varying strain rates and temperatures”, *Polym Test*, vol. 51, pp. 29–39, may 2016, doi: 10.1016/j.polymertesting.2016.02.006.
- [27] W. Chen *et al.*, “Quasi-static and dynamic tensile properties of basalt fibre reinforced polymer”, *Compos B Eng*, vol. 125, pp. 123–133, sep. 2017, doi: 10.1016/j.compositesb.2017.05.069.
- [28] X. Zhao, X. Wang, Z. Wu, y Z. Zhu, “Fatigue behavior and failure mechanism of basalt FRP composites under long-term cyclic loads”, *Int J Fatigue*, vol. 88, pp. 58–67, jul. 2016, doi: 10.1016/j.ijfatigue.2016.03.004.
- [29] S. M. R. Khalili, V. Daghig, y R. Eslami Farsani, “Mechanical behavior of basalt fiber-reinforced and basalt fiber metal laminate composites under tensile and bending loads”, *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, vol. 30, núm. 8. pp. 647–659, abril de 2011. doi: 10.1177/0731684411398535.
- [30] D. Quan, N. Murphy, y A. Ivankovic, “Fracture behaviour of epoxy adhesive joints modified with core-shell rubber nanoparticles”, *Eng Fract Mech*, vol. 182, pp. 566–576, sep. 2017, doi: 10.1016/j.engfracmech.2017.05.032.
- [31] M. T. Bashar, U. Sundararaj, y P. Mertiny, “Mode-I interlaminar fracture behaviour of nanoparticle modified epoxy/basalt fibre-reinforced laminates”, *Polym Test*, vol. 32, núm. 2, pp. 402–412, 2013, doi: 10.1016/j.polymertesting.2012.10.012.

- [32] K. Chandra Shekar, B. Singaravel, S. Deva Prasad, N. Venkateshwarlu, y B. Srikanth, “Mode-I fracture toughness of glass/carbon fiber reinforced epoxy matrix polymer composite”, *Mater Today Proc*, oct. 2020, doi: 10.1016/j.matpr.2020.09.160.
- [33] I. D. G. A. Subagia, A. H. Yuwono, y Y. Kim, “Effect of interlaminated carbon and basalt fiber reinforced hybrid composites on mode i fracture toughness”, en *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, Institute of Physics Publishing, nov. 2019. doi: 10.1088/1757-899X/553/1/012035.
- [34] Z. Chlup, M. Černý, P. Kácha, H. Hadraba, y A. Strachota, “Fracture resistance of partially pyrolysed polysiloxane preceramic polymer matrix composites reinforced by unidirectional basalt fibres”, *J Eur Ceram Soc*, vol. 40, núm. 14, pp. 4879–4885, nov. 2020, doi: 10.1016/j.jeurceramsoc.2020.01.047.
- [35] D. M. Montenegro *et al.*, “Mode I transverse intralaminar fracture in glass fiber-reinforced polymers with ductile matrices”, *Compos Struct*, vol. 165, pp. 65–73, abr. 2017, doi: 10.1016/j.compstruct.2016.12.008.
- [36] F. A. Almansour, H. N. Dhakal, y Z. Y. Zhang, “Investigation into Mode II interlaminar fracture toughness characteristics of flax/basalt reinforced vinyl ester hybrid composites”, *Compos Sci Technol*, vol. 154, pp. 117–127, ene. 2018, doi: 10.1016/j.compscitech.2017.11.016.
- [37] F. J. C. F. B. Loureiro, R. D. S. G. Campilho, y R. J. B. Rocha, “Mixed-mode fracture toughness of a structural adhesive by the single-leg bending test”, en *Procedia Structural Integrity*, Elsevier B.V., 2020, pp. 63–70. doi: 10.1016/j.prostr.2020.04.010.
- [38] M. Fakoor y N. M. Khansari, “General mixed mode I/II failure criterion for composite materials based on matrix fracture properties”, *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, vol. 96, pp. 428–442, ago. 2018, doi: 10.1016/j.tafmec.2018.06.004.
- [39] D. K. Patel y A. M. Waas, “Multiscale modeling of tensile fracture in fiber reinforced composites”, *Composites Part C: Open Access*, vol. 2, p. 100016, oct. 2020, doi: 10.1016/j.jcomc.2020.100016.
- [40] D. Ashouri Vajari, B. F. Sørensen, y B. N. Legarth, “Effect of fiber positioning on mixed-mode fracture of interfacial debonding in composites”, *Int J Solids Struct*, vol. 53, pp. 58–69, ene. 2015, doi: 10.1016/j.ijsolstr.2014.10.023.
- [41] C. Huang, T. Chen, y S. Feng, “Finite element analysis of fatigue crack growth in CFRP-repaired four-point bend specimens”, *Eng Struct*, vol. 183, pp. 398–407, mar. 2019, doi: 10.1016/j.engstruct.2019.01.045.
- [42] S. Mousa, A. A. Abd-Elhady, A. Abu-Sinna, T. Enab, W. H. Alhazmi, y H. Sallam, “Mixed mode crack growth in functionally graded material under three-point bending”, en *Procedia Structural Integrity*, Elsevier B.V., 2019, pp. 284–291. doi: 10.1016/j.prostr.2019.08.038.
- [43] R. K. Joki, F. Grytten, B. Hayman, y B. F. Sørensen, “A mixed mode cohesive model for FRP laminates incorporating large scale bridging behaviour”, *Eng Fract Mech*, vol. 239, nov. 2020, doi: 10.1016/j.engfracmech.2020.107274.
- [44] C. Canturri, E. S. Greenhalgh, S. T. Pinho, y J. Ankersen, “Delamination growth directionality and the subsequent migration processes - The key to damage tolerant design”, *Compos Part A Appl Sci Manuf*, vol. 54, pp. 79–87, 2013, doi: 10.1016/j.compositesa.2013.07.004.

- [45] G. Frossard, J. Cugnoni, T. Gmür, y J. Botsis, “Mode I interlaminar fracture of carbon epoxy laminates: Effects of ply thickness”, *Compos Part A Appl Sci Manuf*, vol. 91, pp. 1–8, dic. 2016, doi: 10.1016/j.compositesa.2016.09.009.
- [46] R. M. Jones, *Mechanics of Composite Materials*. CRC Press, 2018. doi: 10.1201/9781498711067.
- [47] T. L. Price, G. Dalley, P. C. McCullough, y L. Choquette, “Handbook: Manufacturing Advanced Composite Components for Airframes”, Norwalk, CA, abr. 1997.
- [48] D. Gay, S. V. Hoa, y S. W. Tsai, *Composite Materials: Design and Applications*. Boca Raton, FL: CRC Press, 2003.
- [49] R. F. Gibson, *Principles of Composite Material Mechanics*. McGraw-Hill, 1994.
- [50] T. Czigány, J. Vad, y K. Pölöskei, “Basalt fiber as a reinforcement of polymer composites”, *Periodica Polytechnica, Mechanical Engineering*, vol. 49, pp. 3–14, mar. 2005.
- [51] Z. Li, J. Ma, H. Ma, y X. Xu, “Properties and Applications of Basalt Fiber and Its Composites”, *IOP Conf Ser Earth Environ Sci*, vol. 186, p. 12052, mar. 2018, doi: 10.1088/1755-1315/186/2/012052.
- [52] V. Dhand, G. Mittal, K. Y. Rhee, S.-J. Park, y D. Hui, “A short review on basalt fiber reinforced polymer composites”, *Compos B Eng*, vol. 73, pp. 166–180, may 2015, doi: 10.1016/j.compositesb.2014.12.011.
- [53] A. G. Novitskii, “High-Temperature Heat-Insulating Materials Based on Fibers from Basalt-Type Rock Materials”, *Refractories and Industrial Ceramics*, vol. 45, núm. 2, pp. 144–146, mar. 2004, doi: 10.1023/B:REFR.0000029624.43008.ef.
- [54] J. L. González Velázquez, *Mecánica de Fractura*, 2da ed. México: Limusa, 2004.
- [55] E. M. Wu, “Fracture mechanics of anisotropic plates”, en *Composite materials workshop*, Lancaster, PA: Technomic Pub. Co., Inc., 1968.
- [56] M. J. Freitas, R. Marat-Mendes, y M. Freitas, “A TESTING PROCEDURE FOR MIXED MODE DELAMINATION OF COMPOSITE MATERIALS”, 2004. [En línea]. Disponible en: <https://www.researchgate.net/publication/236841003>
- [57] ASTM Standard D 3039/D 3039M - 00, “Standard Test Method for Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Materials”. ASTM International, West Conshohocken, PA, 2000.
- [58] ASTM Standard D 3518/D 3518M – 94, “Standard Test Method for In-Plane Shear Response of Polymer Matrix Composite Materials by Tensile Test of a $\pm 45^\circ$ Laminate”. ASTM International, West Conshohocken, PA, 1994.
- [59] A. C. Orifici y R. Krueger, “Assessment of Static Delamination Propagation Capabilities in Commercial Finite Element Codes Using Benchmark Analysis”, Hampton, VA, jun. 2010.
- [60] Fibreglast, “System 2000 Laminating Epoxy Resin”, 2020. https://www.fibreglast.com/product/System_2000_Epoxy_Resin_2000#documents (consultado el 31 de agosto de 2023).
- [61] D. Plappert, G. C. Ganzenmüller, M. May, y S. Beisel, “Mechanical Properties of a Unidirectional Basalt-Fiber/Epoxy Composite”, *Journal of Composites Science*, vol. 4, núm. 3, p. 101, jul. 2020, doi: 10.3390/jcs4030101.
- [62] M. L. Benzeggagh y M. Kenane, “MEASUREMENT OF MIXED-MODE DELAMINATION FRACTURE TOUGHNESS OF UNIDIRECTIONAL

GLASS/EPOXY COMPOSITES WITH MIXED-MODE BENDING
APPARATUS”, 1996.