



FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL MECÁNICA

**ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO MECÁNICO EN FRACTURA Y
DELAMINACIÓN DE MATERIAL COMPUESTO POR RESINA
EPÓXICA REFORZADA CON NANOCOMPONENTES**

**MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE
INGENIERO CIVIL MECÁNICO**

PROF. GUÍA: GONZALO PINCHEIRA

EDUARDO AVELLO ARANCIBIA

**CURICÓ – CHILE
2020**

CONSTANCIA

La Dirección del Sistema de Bibliotecas a través de su encargado Biblioteca Campus Curicó certifica que el autor del siguiente trabajo de titulación ha firmado su autorización para la reproducción en forma total o parcial e ilimitada del mismo.



Two circular official stamps and handwritten signatures in blue ink. The left stamp is from the 'DIRECCIÓN SISTEMA DE BIBLIOTECAS UNIVERSIDAD DE TALCA' and the right stamp is from the 'SISTEMA DE BIBLIOTECAS CAMPUS CURICO'.

Curicó, 2022

AGRADECIMIENTOS

Agradezco, en primer lugar, a mi familia por su constante apoyo en todo mi proceso académico, siendo eslabón fundamental para conseguir mi objetivo.

A la Fundación de Hogar de Estudiantes Universitarios, por su acogimiento en mi llegada a la ciudad de Curicó, contribuyendo a una formación íntegra y solidaria de mi persona durante estos años.

A mis amigos, que siempre estuvieron en los momentos indicados para recargar energías y crear la necesaria distracción.

Finalmente agradecer a los profesores de la Universidad de Talca por su siempre buena disposición y entrega en transmitir los conocimientos para la formación de buenos profesionales.

DEDICATORIA

(A mi hijo Benjamín, quien es la principal motivación en mi vida).

RESUMEN

En el presente informe se realiza un estudio de los efectos que producen diferentes refuerzos del orden nanométrico, en una matriz polimérica. Para esto se realizó una revisión de la literatura de investigación para lograr comparar resultados y analizar los diferentes parámetros que pueden ir variando en tener una mejora eficaz de las propiedades mecánicas en un material compuesto. Este estudio se basó específicamente en la caracterización de los materiales frente al comportamiento de fractura en modo I y modo II según la norma internacional ASTM D5045-14; y de delaminación en modo I según la norma ASTM D5528. Finalmente se llega a concluir que los refuerzos con mayor desplante vienen dados por los grupos funcionales agregados a estos que cooperan con una fuerte unión interfacial, además de refuerzos híbridos que, en conjunto, alcanzan grandes resistencias mecánicas. Respecto a la cantidad en peso de los refuerzos dentro del material compuesto, estos alcanzan sus mayores propiedades, en promedio, con un 1% en peso. Estos antecedentes se vuelven importantes para la efectividad en el comportamiento mecánico de materiales compuestos, siendo relevantes para el diseño de ingeniería.

Palabras claves: Materiales compuestos, fractura, delaminación, análisis.

ÍNDICE GENERAL

AGRADECIMIENTOS	ii
DEDICATORIA	iii
RESUMEN	iv
ÍNDICE DE FIGURAS	vii
ÍNDICE DE TABLAS	x
CAPITULO 1. INTRODUCCIÓN	1
1.1 ANTECEDENTES Y MOTIVACIÓN	2
1.2 DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA	3
1.3 SOLUCIÓN PROPUESTA	4
1.4 OBJETIVOS	4
1.4.1 Objetivo general	4
1.4.2 Objetivos específicos	4
1.5 RESULTADOS ESPERADOS	5
1.6 METODOLOGÍA	5
CAPITULO 2. MARCO TEÓRICO	7
2.1 MATERIALES COMPUESTOS	8
2.1.1 RESINA EPÓXICA	11
2.1.2 GRAFENO	14
2.1.3 ÓXIDO DE GRAFENO	15
2.1.4 NANOTUBOS DE CARBONO	15
2.1.5 FIBRA DE CARBONO	17
2.2 CARACTERIZACIÓN MECÁNICA	19
2.2.1 FRACTURA	19
2.2.2 DELAMINACIÓN	25

CAPITULO 3. ANÁLISIS BIBLIOGRÁFICO DE RESULTADOS EXPERIMENTALES	29
.....	29
3.1 ESTRATEGIA.....	30
3.2 FRACTURA	30
3.2.1 CANTIDAD DE REFORZAMIENTO.....	30
3.2.2 AGLOMERADOS	40
3.3 DELAMINACIÓN	43
CAPITULO 4. CONCLUSIONES Y APLICACIONES	56
CONCLUSIONES.....	57
FRACTURA.....	57
DELAMINACIÓN	58
APLICACIONES	59
REFERENCIAS	61
ANEXOS	67
Anexo 1: Autoclave grande utilizado para fabricar las alas de un Boeing 787. Fuente: K.K. Chawla, 2013	67
Anexo 2: Partes fabricadas de material compuesto en avión comercial Airbus A-380. Fuente: Hinrichsen 2003.....	68

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1. Importancia relativa en el uso de los materiales a través del tiempo. Fuente: Ashby 2014.	3
Figura 2.1. Clasificación de los principales tipos de compuestos. Fuente: Elaboración propia. .8	
Figura 2.2. Deformación en la matriz que rodea una fibra sometida a una carga de tracción. Fuente: William D. Callister, David G. Rethwisch, 2009.	9
Figura 2.3. Esquema de diferentes configuraciones para materiales compuestos; unidireccional, laminado, fibras cortadas y partículas. Fuente: Ashby, M.F. 2011	11
Figura 2.4. Estructura química de un polímero epoxi. Fuente: Coussy, 2015.....	13
Figura 2.5. Unión química de resina epoxi con agente endurecedor. Fuente: Coussy, 2015. ...	13
Figura 2.6. Gráfica esquemática de tensión vs deformación de un polímero plástico. Fuente: Callister William, 2009.....	14
Figura 2.7. Alótropos de carbono: a) grafito (3D); b) grafeno (2D); c) nanotubos de carbono (1D); d) fullereno (0D); Fuente: Vargas 2016.	15
Figura 2.8. Propiedades de varias fibras de reforzamiento. Fuente: Miravete 2012.	18
Figura 2.9. Modos de carga aplicados en una grieta. Fuente: Anderson, Ted. 2020.....	19
Figura 2.10. Líneas de fuerzas alrededor de una grieta bajo carga. Fuente: Coussy 2015.....	21
Figura 2.11. Geometría de probetas para ensayos. Fuente: ASTM D5045-14.....	22
Figura 2.12. Prueba SENB para modo I de fractura. Fuente: ASTM D5045-14.....	22
Figura 2.13. Muestra de prueba de cuatro apoyos con carga antisimétrica (ASFPB). Fuente: Ayatollahi, Shadlou y Shokrieh, 2011.....	24
Figura 2.14. Probeta de doble viga en voladizo (DCB). Fuente: ASTM D 5528.....	26
Figura 2.15. Distancias a considerar en la instalación de los bloques de carga. Fuente: ASTM D 5528.	27
Figura 2.16. Extrapolación en gráfico $C13$ vs a . Fuente: ASTM D 5528.	28
Figura 3.1 Gráfico de fracción de peso vs energía de deformación en resina epoxi con MWCNTs, con t correspondiendo a diferentes espesores de interfases. Fuente: Shokrieh y Zeinedini, 2016.....	31

Figura 3.2. Gráfico del módulo de Young vs la fracción másica de SWCNT en dos diferentes matrices (LDPE y HDPE). Fuente: Oseli et al 2020.	32
Figura 3.3. Gráfico de deformación máxima vs fracción másica de SWCNT en dos matrices diferentes (LDPE y HDPE). Fuente: Oseli et al 2020.	33
Figura 3.4. Gráfico representativo del comportamiento de 4 investigaciones, referente a la tasa de liberación de energía de deformación vs la cantidad de refuerzo agregado. Fuente: Elaboración propia.....	35
Figura 3.5. Gráfico de resistencia a la fractura para diferentes configuraciones de SCF/EG/PEI, respectivamente. Fuente: Sun et al. 2021.	36
Figura 3.6. Representación de los enlaces de hidrogeno entre GO y caucho. Fuente: Wen et al. 2017.	37
Figura 3.7. Resultados experimentales de resistencia y energía liberada en fractura vs porcentaje de masa de refuerzo, Fuente: Kumar et al. 2020.	39
Figura 3.8. Imágenes TEM de diferentes disposiciones de MWCNT en matriz de policarbonato: a) aglomerado inicial, b) MWCNT bien dispersos, c) aglomerados secundarios. Fuente: Pegel, Pötschke y Petzol 2008.....	40
Figura 3.9. Imágenes SEM de una aglomeración de GNP, 5000X y 22000X respectivamente de ampliación. Fuente: Gapstur 2018.....	42
Figura 3.10. Gráfico comparativo de energía de delaminación vs longitud de grieta, para material compuesto con espesor de resina epóxica intercalada entre lamina. Fuente: Hojo et al. 2006.	43
Figura 3.11. Gráfico de tasa de liberación de energía vs avance de la grieta, para dos tipos de compuestos carbono/epoxi. Fuente: Blondeau, Pappas y Botsis 2021.....	45
Figura 3.12. Vista lateral de muestras DCB. a) formación de puentes significativos para CP004 y b) Ausencia de puentes en SE-84. Fuente: Blondeau, Pappas y Botsis 2021.....	46
Figura 3.13. Micrografías de secciones transversales en el inicio de la grieta para compuesto CP004 y SE-84, respectivamente. Fuente: Blondeau, Pappas y Botsis 2021.....	46
Figura 3.14. Gráfico de energía de deformación vs la densidad de área de refuerzos intercalados de SCF y CNT-SCF en compuesto de resina epóxica con fibras de carbono. Fuente: Zhou et al. 2017.	48

Figura 3.15. Gráfico de resistencia a la fractura vs longitud de grieta de resina epóxica con intercalación de poliamida con nanocargas de óxido de grafeno. Fuente: Zhao et al, 2020.	49
Figura 3.16. Gráficos de tasa de liberación de energía vs longitud de propagación de la grieta para matriz epóxica reforzada con nanoplaquetas de grafeno (UG) y óxido de grafeno (GO), respectivamente. Fuente: Ahmadi-Moghadam y Taheri, 2015.	50
Figura 3.17. Gráficos de tasa de liberación de energía vs longitud de propagación de la grieta para matriz epóxica reforzada con nanoplaquetas de grafeno funcionalizados con grupo amino (G-NH ₂) e hidruro de silicio (G-Si), respectivamente. Fuente: Ahmadi-Moghadam y Taheri, 2015.	51
Figura 3.18. Comportamiento de la energía de delaminación vs longitud de grieta en laminado de resina epóxica con fibra de carbono con refuerzos intercalados de PEI y PPS. Fuente: Ínal et al. 2021.	53
Figura 3.19. Gráfico de <i>GIC</i> para diferentes refuerzos intercalados de velos de polímeros. Fuente: Elaboración propia.....	55

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1. Principales polímeros termoestables y termoplásticos. Fuente: Princeton 1988.	12
Tabla 2.2. Ventajas y desventajas de los polímeros. Fuente: Elaboración propia.	12
Tabla 2.3. Propiedades de resinas epóxicas. Fuente: Gómez 2017.	14
Tabla 3.1. Tabla comparativa de resultados de prueba de fractura en modo I y modo II, con diferentes porcentajes de CNT como refuerzo, respecto a dos diferentes matrices. Fuente: Coussy 2015.	33
Tabla 3.2. Tabla comparativa de resultados de diferentes autores para la tasa de energía de deformación de compuestos reforzados con nanotubos, según el porcentaje en masa del refuerzo. Fuente: Elaboración propia.	34
Tabla 3.3. Resultados de diferentes autores sobre la energía de delaminación para la iniciación y propagación de la grieta, utilizando refuerzos intercalados de termoplásticos en material compuesto de resina epóxica con fibras de carbono. Fuente: Elaboración propia.	54
Tabla 4.1. Porcentajes de mejora para los principales nanorefuerzos analizados, con 1% de concentración en peso para el modo I de fractura y delaminación. Fuente: Elaboración propia.	59
Tabla 4.2. Ejemplos de piezas fabricadas con material compuesto. Fuente: Elaboración propia.	60

CAPITULO 1. INTRODUCCIÓN

1.1 ANTECEDENTES Y MOTIVACIÓN

El constante estudio de materiales compuestos durante las últimas décadas ha ido en alza, como se aprecia en la figura 1.1; por las diferentes propiedades que logran alcanzar. El presente proyecto de memoria nace de la necesidad de conocer el comportamiento de los compuestos reforzados por distintos tipos de nanoestructuras, respecto a la caracterización de materiales, profundizando en la literatura para realizar un análisis profundo en todos los aspectos relevantes para una efectiva utilización.

Los materiales compuestos han alcanzado gran utilidad en la industria del diseño de ingeniería, por lo que se convierte atractivo la investigación de materiales con mejores propiedades, ya sea modificando estructuras o creando compuestos nuevos. Los componentes de refuerzo insertos en la matriz, creando el material compuesto, son los encargados de suministrar las mayores propiedades mecánicas en el conjunto, teniendo una clasificación general según los diferentes orígenes de estos, tales como naturales o sintéticos.

El carbono como material de interés dentro de los principales refuerzos, es un elemento de grandes prestaciones a nivel estructural. Según variadas investigaciones, estos materiales prometen ser de gran atracción para la innovación en tecnologías futuras por su utilidad diversa, como por ejemplo, en pantallas planas que utilizan nanotubos de carbono como emisores de campo, sensores biológicos y químicos para detectar sustancias contaminantes, administración de fármacos, pilas de combustibles, raquetas de tenis o bicicletas; abarcando sectores como electrónica, materiales, sensores, biotecnología, química, energía, mecánica, instrumentación científica y fotónica, entre otros. (Rivas, Román y Cosme.).

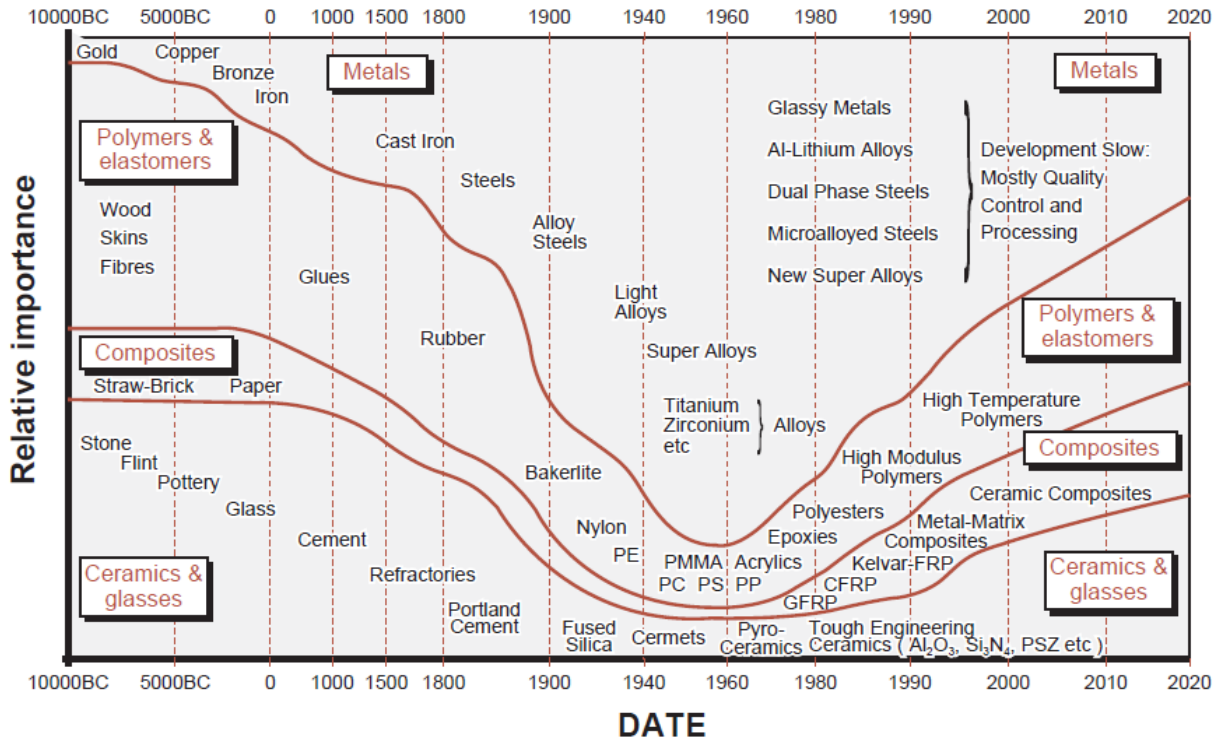


Figura 1.1. Importancia relativa en el uso de los materiales a través del tiempo. Fuente: Ashby 2014.

1.2 DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA

Desde hace años, se encuentra en alza la utilización de materiales compuestos para diferentes fines, ya que estos nos entregan propiedades más específicas ante los requerimientos de diseño, como lo pueden ser reducción de peso, mayor rigidez y ductilidad adecuada; que se pueden apreciar en la construcción de aviones, automóviles y barcos que buscan mejores propiedades estructurales y las emplean con estos materiales, siendo más utilizados a medida que pasa el tiempo, lo que se convierte en una necesidad conocer el comportamiento de los compuestos en ciertas propiedades frente a diferentes nanoestructuras de refuerzo. (Anexo 1)

Los polímeros reforzados con nanopartículas se han vuelto comunes dentro de esta familia, ya que consiguen las prestaciones estructurales requeridas para ciertos casos (K. Chawla 2013). Siendo aún más específicos, el carbono y sus derivados como refuerzos nanométricos tienen gran efectividad según diferentes investigaciones, por su gran resistencia a la tracción y alto módulo de Young. Sin embargo, al ser actuales temas de estudios, aún existen inconvenientes

para lograr desarrollar el máximo potencial de estos materiales para así lograr una estructura estable, con un rendimiento confiable y mejoras de transferencias de carga.

1.3 SOLUCIÓN PROPUESTA

Se opta por una investigación literaria con el fin de analizar diferentes casos experimentales y realizar comparaciones en las mejoras mecánicas que ofrecen estos según los componentes involucrados.

1.4 OBJETIVOS

1.4.1 Objetivo general

Analizar el comportamiento de polímeros reforzados con nanocomponentes, ante pruebas mecánica, específicamente, fractura y delaminación, logrando una recopilación de información técnica para su efectiva caracterización.

1.4.2 Objetivos específicos

- Estudiar el estado del arte para contextualizar la definición de materiales compuestos y los principales componentes.
- Identificar las normas internacionales para la caracterización de los modos mencionados de caracterización.
- Analizar en la literatura estudios referente a la fractura en materiales compuestos para conocer el comportamiento de estos frente a diferentes nanorefuerzos.
- Analizar en la literatura estudios referente a la delaminación en materiales compuestos para conocer el comportamiento de estos frente a diferentes nanorefuerzos.
- Realizar análisis comparativo entre distintos parámetros que influyen la efectividad en la caracterización mecánica.

1.5 RESULTADOS ESPERADOS

Ante la comparación de los materiales constituyentes por separado, se espera que el material compuesto logre un alza en la resistencia mecánica gracias a la distribución de carga que entregan los refuerzos agregados, sumando sus grandes propiedades resistivas. Como se describe en el artículo de (Gastelum et al. 2018), el material compuesto debiera aumentar su módulo de elasticidad y reducir el porcentaje de deformación del material en fractura y delaminación.

Sin embargo, también se pueden reconocer posibles fallas que lleven a un ineficiente comportamiento del material compuesto, que se pueden relacionar con distribuciones de las cargas de una manera no uniforme, sobrecargando zonas de esfuerzos.

1.6 METODOLOGÍA

El informe de este proyecto de memoria se desglosará en los siguientes capítulos:

- Capítulo 1: Introducción.

En este primer capítulo se da a conocer la contextualización de este informe de memoria en general, entregando antecedentes de manera de identificar la problemática y los objetivos necesarios para dar solución a esta.

- Capítulo 2: Marco teórico.

El capítulo 2 presenta el estado del arte referente a los materiales compuestos, entendiendo sus composiciones, fabricaciones y características principales.

- Capítulo 3: Análisis literario de resultados experimentales.

El capítulo 3 aborda un completo análisis literario, realizando tablas y gráficos comparativos con el fin de conocer los diferentes comportamientos que adquieren materiales reforzados con nanocomponentes.

Capítulo 1. Introducción

- Capítulo 4: Conclusiones y aplicaciones.

Por último, este capítulo da a conocer las conclusiones que se pueden obtener luego del análisis realizado en el capítulo 3, entregando datos relevantes para la eficaz composición de estos materiales y la ejemplificación de esto en aplicaciones ingenieriles.

CAPITULO 2. MARCO TEÓRICO

2.1 MATERIALES COMPUESTOS

Un material compuesto es el que presenta dos elementos principalmente: matriz y refuerzo. Se define como la unión de dos materiales con el fin de conseguir en conjunto, combinado adecuadamente, materiales con mejores propiedades que las de cada elemento por sí solo; como lo son rigidez, resistencia, peso, dureza, conductividad eléctrica, entre otras.

La fibra es el componente general para un material compuesto, sin embargo, siendo específicos pueden conformarse, también de componentes como cargas de partículas y aditivos, que también dotan de características superiores al material, y, además, pueden componerse de más de dos partes.

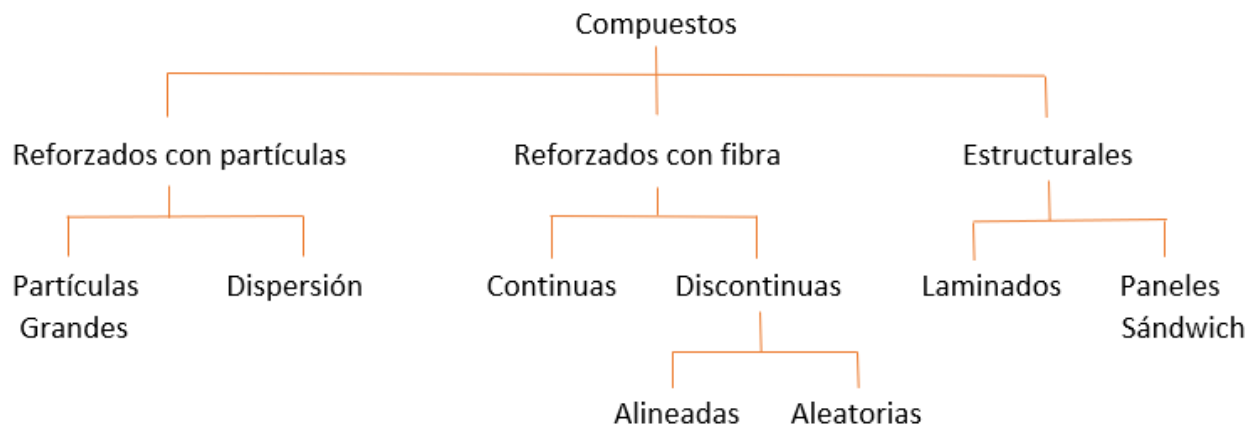


Figura 2.1. Clasificación de los principales tipos de compuestos.

Fuente: Elaboración propia.

Como se aprecia en la figura 2.1, los compuestos reforzados con partículas se subclasifican en ‘partículas grandes’ y en ‘reforzados con dispersión’, donde el primero no puede ser tratado a nivel atómico o molecular la interacción entre las partículas y la matriz, utilizando el concepto de mecánica continua y por eso su mención de “grande”. En cambio, en los compuestos reforzados por dispersión surge una interacción matriz-partícula que ocurre a nivel atómico o molecular, conduciendo al fortalecimiento.

Capítulo 2. Marco teórico

La matriz transfiere parte de la tensión aplicada a las partículas, que soportan una fracción de la carga en cuestión, siendo la matriz la que soporta la mayor parte. Estas tienden a restringir el movimiento de la matriz en las zonas cercanas a las partículas, donde el grado de mejora del comportamiento mecánico dependerá en gran medida de una fuerte unión en la interfaz matriz-partícula. Las pequeñas partículas dispersas dificultan o impiden el movimiento de las dislocaciones en el material, restringiendo la deformación plástica de manera tal que mejoran el rendimiento y la resistencia. (Callister y Rethwisch 2009)

La forma de fibra es utilizada mayoritariamente en compuestos más importantes ante requerimientos de alta resistencia o rigidez, con matriz de baja densidad para restar peso. Como se muestra en la figura 2.1, estos pueden subclasificarse en continuas y discontinuas.

Al influir la transmisión de las cargas a través de la matriz en las características mecánicas, estas no solo dependerán de las características de la fibra; reflejando la importancia de los enlaces interfaciales entre estas. Existe cierta longitud de fibra crítica que cumple la función de fortalecer efectivamente el material, ya que en los extremos de esta se hace más débil la unión interfacial, como se ve en la figura 2.2, la cual refleja una carga en tracción en la fibra, que a su vez arrastra la zona bordante referente a la matriz.

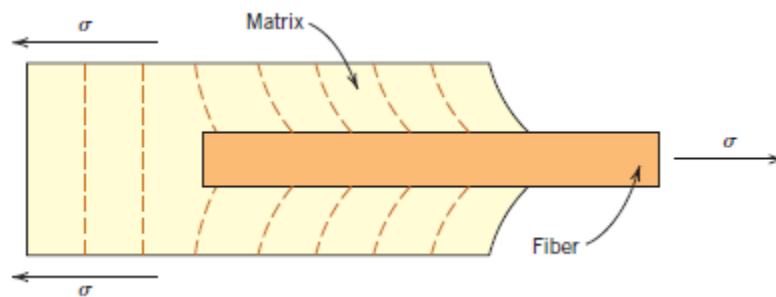


Figura 2.2. Deformación en la matriz que rodea una fibra sometida a una carga de tracción. Fuente: William D. Callister, David G. Rethwisch, 2009.

Cuando la longitud de fibra supera en gran medida la longitud crítica ($L > 15L_c$, siendo L_c longitud crítica) estas se denominan continuas; mientras que, cuando se trata de longitudes más

Capítulo 2. Marco teórico

cortas que esto, se puede hablar de discontinuas. A medida que la longitud de fibra aumenta, el refuerzo de fibra se vuelve más efectivo.

Los compuestos estructurales se conforman principalmente de paneles de materiales tanto homogéneos como compuestos, donde el resultado de diseño dependerá de las propiedades de los constituyentes y de su geometría.

Principalmente existen dos subclasificaciones para este tipo de compuestos; laminados y paneles sándwich. Los laminados se componen de una sucesión de láminas bidimensionales apiladas de tal forma que la orientación de la dirección de la alta resistencia va variando en cada capa. Al tener una dirección de alta resistencia, al ir variando la orientación de las capas se llega a un resultado de efectiva resistencia, por lo que estos tipos de conformación tienen una resistencia alta en varias direcciones del plano bidimensional.

Los tipos de laminados más frecuentes son los siguientes:

- Lamina unidireccional: En este tipo se encuentran fibras orientadas en una única dirección, adquiriendo diferentes tipos de propiedades mecánicas en su dirección perpendicular.
- Lamina tipo tejido: Todas las fibras están orientadas bidireccionalmente de forma perpendicular entre ellas. Se considera que existe ortotropía en este caso.
- Lamina tipo mat: Este tipo de laminado está compuesto por fibras cortas orientadas aleatoriamente.

Por otro lado, los paneles sándwich constan de dos capas exteriores que están separadas por un núcleo más grueso que estas. Generalmente, para las capas exteriores se utiliza un material rígido y resistente con el fin de soportar cargas de tensión y compresión en la estructura; mientras que el núcleo consiste en un material liviano con un bajo módulo de elasticidad, proporcionando soporte para las caras exteriores y siendo lo suficientemente grueso para resistir el pandeo. En la figura 2.3 se pueden ver diferentes configuraciones de refuerzos en materiales compuestos.

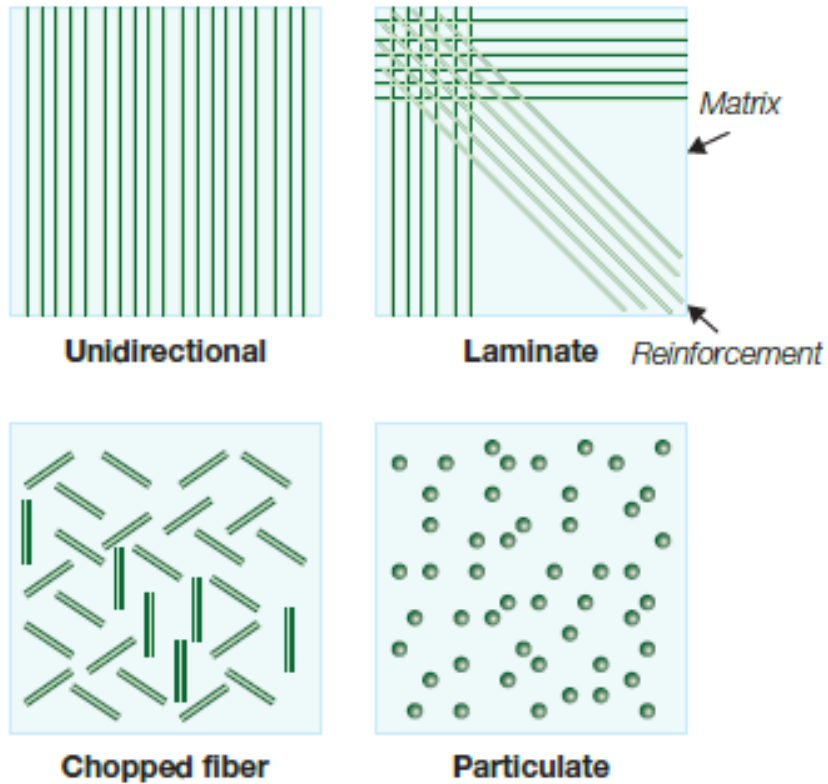


Figura 2.3. Esquema de diferentes configuraciones para materiales compuestos; unidireccional, laminado, fibras cortadas y partículas. Fuente: Ashby, M.F. 2011

2.1.1 RESINA EPÓXICA

Existen variedades de resinas termoplásticas y termoestables, consideradas como matrices orgánicas, sin embargo, las más importantes para la utilización como matriz polimérica son las termoestables. Estas son líquidas a temperatura ambiente y, para alcanzar el estado sólido deben pasar por un proceso de curado, donde al terminar el proceso, estas no pueden volver a fundirse sin sufrir una fuerte degradación, por la mezcla con precursores líquidos o semi sólidos que endurecen irreversiblemente. Los principales polímeros usados se pueden ver en la tabla 2.1, siendo clasificados según su tipo.

Tabla 2.1. Principales polímeros termoestables y termoplásticos. Fuente: Princeton 1988.

Termoestables	Termoplásticos
Epóxica	Polietileno
Poliéster	Poliestireno
Fenólica	Polipropileno
Bismaleimidias (BMI)	Polieteretercetona (PEEK)
Polimidias	Polieterimida (PEI)
	Polietersulfona (PES)
	Sulfuro de polifenileno
	Poliamida-imida (PAI)

La versatilidad de las resinas epoxi se hace evidente ante la gama de propiedades alcanzables en ella. Dentro de estas se pueden mencionar las siguientes: dureza, resistencia química, alta resistencia adhesiva, buena resistencia al calor y alta resistencia eléctrica. (May 1988). En la tabla 2.2, de forma general se pueden observar las ventajas y desventajas de los polímeros.

Tabla 2.2. Ventajas y desventajas de los polímeros. Fuente: Elaboración propia.

Termoestables		Termoplásticos	
Ventajas	Desventajas	Ventajas	Desventajas
Resistentes a la fluencia	Largo tiempo de procesamiento	Corto tiempo de procesamiento	Baja resistencia a disolventes
Buena humectación de fibra	Largo tiempo de curado	Reutilizables	Requiere altas temperaturas de procesamiento
Baja temperatura de procesamiento	Requieren refrigeración para su conservación	Pueden ser reprocesados	Propenso a la fluencia
Conformables en geometrías complejas	Baja energía de fractura	Alta resistencia a la delaminación	Poca durabilidad y adherencia
Resistente a disolventes		No requiere curado	
		Alta energía de fractura	

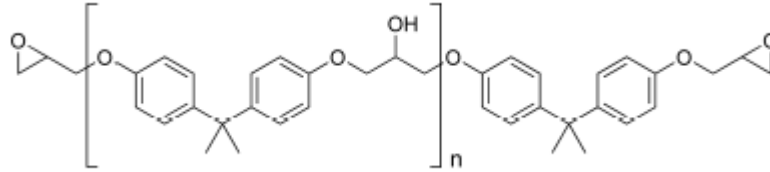


Figura 2.4. Estructura química de un polímero epoxi. Fuente: Coussy, 2015.

En las figuras 2.4 y 2.5 se puede observar la disposición atómica de la resina epóxica y la unión con el endurecedor, respectivamente. En general, los polímeros son sensibles a la velocidad de deformación, la temperatura y la naturaleza química del ambiente en el cual se encuentra. Su comportamiento se puede apreciar en la figura 2.6, donde la deformación en un principio es elástica, seguida de una deformación plástica y finalizando nuevamente con una deformación elástica (Callister y Rethwisch 2009)

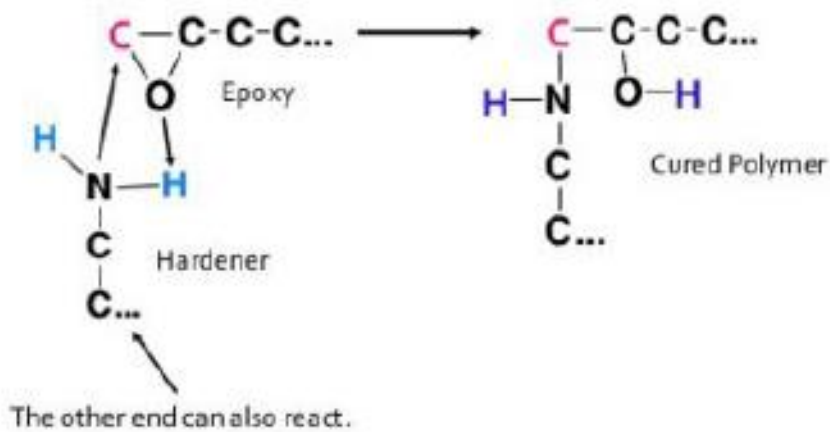


Figura 2.5. Unión química de resina epoxi con agente endurecedor. Fuente: Coussy, 2015.

El punto de fluencia del material se encuentra cuando la curva alcanza su máximo valor, justo en la finalización de la región elástica lineal; mientras que la resistencia a la tracción se produce en el momento de la fractura.

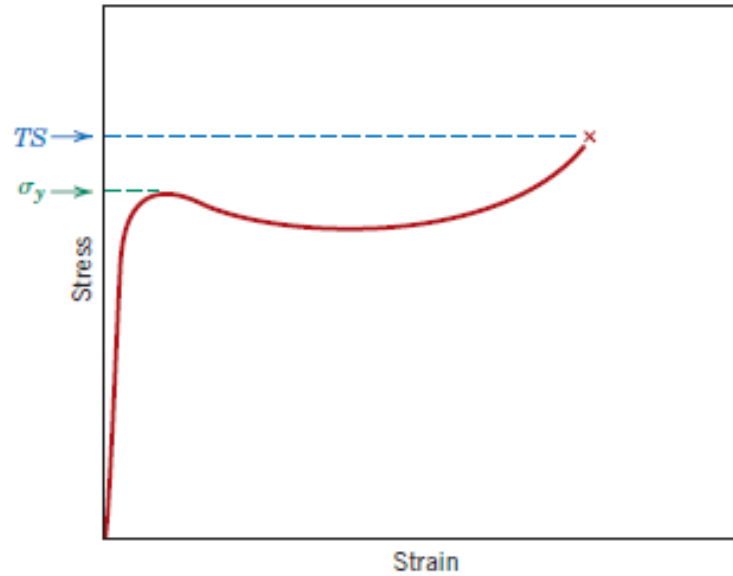


Figura 2.6. Gráfica esquemática de tensión vs deformación de un polímero plástico. Fuente: Callister William, 2009.

En la tabla 2.3 se muestran propiedades de las resinas más utilizadas.

Tabla 2.3. Propiedades de resinas epóxicas. Fuente: Gómez 2017.

Propiedades	TGMDA	Bisfenol A
Módulo de Young (MPa)	3800 – 4500	2750 – 3450
Deformación a rotura (%)	1 – 2	5 – 8
Tg (°C)	175 – 235	120 – 175
Absorción de agua	4 - 6	2 - 3

2.1.2 GRAFENO

El grafeno es un alótropo del carbono, que toma una geometría bidimensional. Su estructura consiste en una red de átomos de carbonos en forma hexagonal y es el principal componente para los demás materiales gráfiticos de diferentes dimensiones.

De esta red surge el grafito, los nanotubos de carbono y el fullereno que se basa en una geometría esférica; como se pueden ver en la figura 2.7.

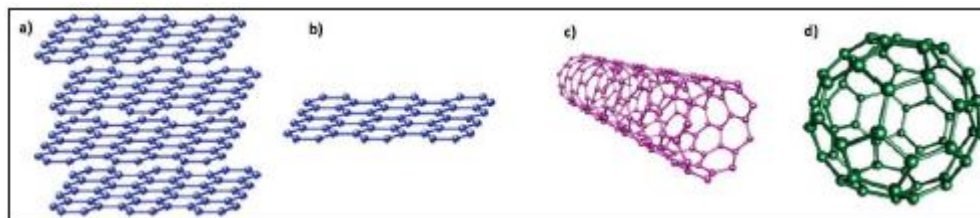


Figura 2.7. Alótropos de carbono: a) grafito (3D); b) grafeno (2D); c) nanotubos de carbono (1D); d) fullereno (0D); Fuente: Vargas 2016.

Entre sus propiedades se destacan su alta conductividad eléctrica y térmica, además de su gran resistencia mecánica.

2.1.3 ÓXIDO DE GRAFENO

El óxido de grafeno se trata de una red semi aromática de átomos de carbono, intermitentemente funcionalizados con grupos oxigenados y que no se encuentra disponible naturalmente. En su primera sinterización, cerca del año 1859, se le denominó óxido de grafito, obteniendo un compuesto de formula molecular $C_{11}H_4O_5$.

Con los años se han modificado las formas de sinterización, en las cuales se han aumentado la adición de ácido sulfúrico aumentando la acidez de la mezcla, y llegando finalmente a un óxido de grafeno con mayor grado de oxidación.

En palabras simples, el óxido de grafeno se describe como una hoja de carbono ondulada con más de la mitad de los átomos de carbono funcionalizados con grupos hidroxilos (Vargas Astudillo 2016).

2.1.4 NANOTUBOS DE CARBONO

Los nanotubos de carbono se pueden asimilar como pequeñas láminas de grafito enrolladas, formando un tipo de tubo con diámetros nanométricos y longitudes que logran variar desde las micras, hasta llegar al centímetro en ocasiones; teniendo una relación de longitud/diámetro muy elevada como su principal característica, la que da lugar a sus excepcionales propiedades.

Capítulo 2. Marco teórico

Estos componentes nanométricos son materiales que se están utilizando en variadas aplicaciones por sus excelentes propiedades mecánicas, eléctricas, ópticas, térmicas y químicas, que logran mejorar productos e incluso generar nuevos.

Existen dos tipos principalmente de nanotubos. Los de pared simple (SWCNT), como se puede apreciar en la figura 2.7, que básicamente está constituido por átomos de carbono dispuestos en una red hexagonal cilíndrica, donde sus extremos pueden ser cerrados por media esfera de fullereno (molécula de carbono que puede adoptar una forma geométrica esférica) o pueden quedar abiertos. También existen los nanotubos de carbono de pared múltiple (MWCNT), que cumplen la misma estructura del de pared simple, pero son varios tubos concéntricos de diferentes diámetros, lo que los hace tener múltiples paredes. (Rivas, Román y Cosme.)

Dentro de las propiedades interesantes de los nanotubos de carbono, que dependen claramente de su geometría y disposición en el material, se pueden encontrar las siguientes:

- Mecánicas: alta dureza, tenacidad, resistencia mecánica, flexibilidad y elasticidad, además de ser muy ligeros.
- Eléctricas: puede comportarse como metálicos, semiconductores, emisión de campos, resuenan mecánicamente ante una señal electromagnética incidente, comportamiento resistivo, capacitivo e inductivo; transforman luz en electricidad y producen luz al aplicar exceso de carga.
- Térmicas: alta conductividad térmica (en dirección del eje), aislantes (perpendicular al eje).

Existen estudios que demuestran la intensificación en la búsqueda de propiedades beneficiosas del carbón y sus derivados, prácticamente en todas las áreas científicas, como la investigación de (Lu et al. 2020) que deja en evidencia el gran desplante que tienen los CNT como catalizadores, en conjunto con materiales de adición como el manganeso; dándole mayor utilidad como electrodo de aire en una batería de Zinc-Aire.

Por otro lado, la experimentación en el estudio de (Yu et al. 2000) muestra la resistencia generada en nanotubos de carbono con múltiples paredes concéntricas, examinándolos individualmente; situación que se hacía difícil hace unos años por el pequeño tamaño de estos

componentes. Utilizando el sensor electrónico de barrido LEO 982 FE-SEM, se pudieron obtener resultados para el módulo elástico que oscilan entre 270 y 950 GPa para la capa exterior. Estos resultados inspiran a potenciar la utilización de nanotubos de carbono en aplicaciones mecánicas de alta resistencia.

2.1.5 FIBRA DE CARBONO

La fibra de carbono es un material de refuerzo usado en diferentes aplicaciones donde es crítico el factor de rigidez, cumpliendo variantes de alta resistencia y alto módulo de Young. En general, las fibras de carbono se obtienen a partir de las fibras de PAN (poliacrilonitrilo); un polímero versátil que se utiliza para producir, por ejemplo, fibras para osmosis inversa, membranas de ultrafiltración y como precursor químico de las fibras de carbono. En el proceso de fabricación, se oxidan las fibras de PAN manteniéndolas en tensión, luego se carboniza aumentando la temperatura hasta los 1500 °C aproximadamente, generando algunas fibras de grafito, para finalmente calentarlas con una temperatura mayor a los 1800 °C, donde se aumenta el módulo de Young.

La fibra de carbono es una forma de grafito empaquetado o apretadas, donde las láminas son largas y delgadas y en conjunto logran mantenerse unidas ante fuerzas de tracción, previniendo el deslizamiento entre capas e incrementando su resistencia (Stupenengo 2011). En la figura 2.8 se pueden observar una tabla comparativa con diferentes materiales utilizados como refuerzos mecánicos.

Capítulo 2. Marco teórico

Fibra	Módulo (GPa)	Resist. tracción (GPa)	Densidad (g/cm ³)	Resist. Compr. (GPa)	Resistiv. eléctrica (μΩ·m)	Módulo torsión (GPa)	Deform. rotura (%)
Fibras orgánicas							
PBO	200-360	3,5-5,7	1,58	0,2		1,0	1 - 2
Kevlar 29	65	2,8	1,44	0,4		1,9	4,0
Kevlar 49	125	3,5	1,44	0,4		1,4	2,3
Kevlar 149	185	3,4	1,47	0,4		1,1	
Nomex	10	0,5	1,38				22
Spectra 900	117	2,6	0,97				
Spectra 1000	170	3,0	0,97	0,17		0,8	2
Vectran HS	65	2,8	1,41			0,6	3,3
Vectran M	53	1,1	1,4				2,0
PBI	55-100	3,0	1,4				30
Fibras inorgánicas							
Vidrio E	75	3,5	2,58	>0,8	10 ³	28	4
Vidrio S	90	4,5	2,46	>1,1			
Boro	415	3,5	2,5-2,6	5,9	8,3	139	
Nicalon	200	2,8	2,8	3,1	10 ⁷		
Nextel 440 (Al ₂ O ₃ , B ₂ O ₃ , SiO ₂)	186	2,1	3,05				
SiC (CVD)	400	3,45	3,0				
Al ₂ O ₃ (FP)	350-380	1,7	3,7	6,9		122	
Asbesto	169	3,1	2,5	2,5			
Fibras de carbono a partir de alquitrán							
Amoco P-25	160	1,4	1,9	1,15	13,0		0,9
Amoco P-100	725	2,2	2,15	0,48	3,0	4,7	0,32
Nippon NT-20	200	2,8					
Nippon NT-60	595	3,0					
Fibras de carbono a partir de PAN							
T-300	235	3,2	1,76	2,88	15	15	1,4
T-1000	295	7,1	1,82	2,76	14		2,4
GY - 70	520	1,8	1,96	1,06	6,5		0,36
AS4	235	3,6	1,80	2,69	15	17	1,6
M 60J	585	3,8	1,90	1,67	8		0,7
Alambres metálicos							
Acero Inox. (diam. 50-250 μm)	198	1,0-1,4	8				
Tungsteno (diam. <25 μm)	360	5,5	19,3				
Berilio	300	1,8	1,85				
Fibras textiles							
Poliéster (PET)	3-10	0,4-0,8	1,39				
Nylon 66	1-5	0,3-0,8	1,14				

Figura 2.8. Propiedades de varias fibras de reforzamiento. Fuente: Miravete 2012.

2.2 CARACTERIZACIÓN MECÁNICA

2.2.1 FRACTURA

Cuando se estudia la fractura de un material en ingeniería, se hace referencia a las fallas que pueden tener estos, bajo cierta carga progresiva. Se hace importante al momento de querer lograr que un material no propague alguna grieta producida en él evitando el fallo de este.

La resistencia a la fractura se refiere a la resistencia de un material a la propagación de una grieta. Cuando la grieta no afecta en el comportamiento del material, se puede decir que este es resistente y en condiciones de carga absorbe o cede energía, evitando la propagación. Al contrario, cuando el material no resiste, la grieta se propaga y logra la fractura de este incluso con cargas mucho menor al límite elástico. (Coussy 2015)

Según la aplicación de la carga en el material, se pueden diferenciar 3 tipos de fractura, como lo muestra la figura 2.9.

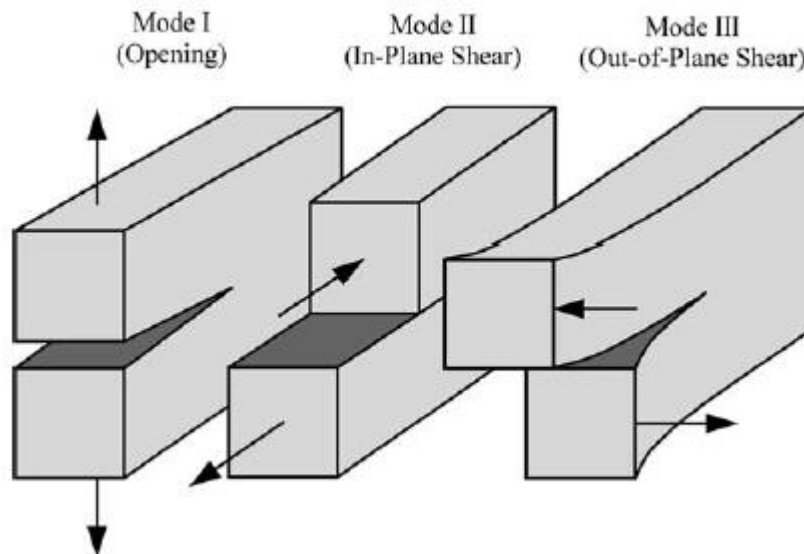


Figura 2.9. Modos de carga aplicados en una grieta. Fuente: Anderson, Ted. 2020.

Capítulo 2. Marco teórico

Modo I: Carga de tracción en el material, perpendicular a la grieta.

Modo II: Carga cortante en el material, paralelo al plano de la grieta y perpendicular al frente de la grieta.

Modo III: Carga cortante en el material, paralelo al plano de la grieta y paralelo al frente de la grieta.

En el presente estudio solo se consideran los modos I y II. Las pruebas de fractura se realizan con el objetivo de encontrar el esfuerzo donde se produce una grieta con una determinada longitud de propagación.

En general, el esfuerzo local en una grieta como la que se ve en la figura 2.10, se puede expresar de la siguiente manera:

$$\sigma_l = Y \frac{\sigma \sqrt{\pi c}}{\sqrt{2\pi r}} \quad (4)$$

Donde la grieta tiene una longitud c y está sometida a una carga de tracción σ , mientras que Y es una constante relacionada con la geometría cercana a la unidad. De esta forma, entre más cerca se encuentre de la esquina de la grieta, se focaliza un esfuerzo mayor y se considera infinito.

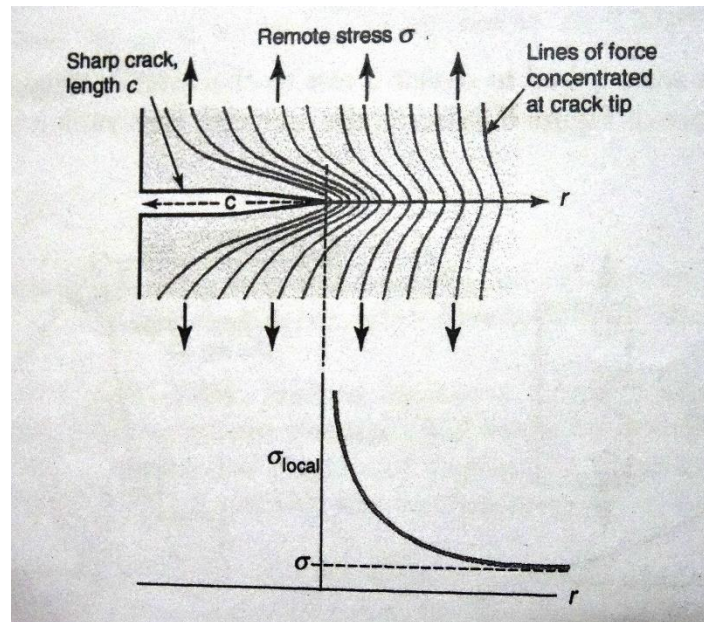


Figura 2.10. Líneas de fuerzas alrededor de una grieta bajo carga.
Fuente: Coussy 2015.

Luego, se encuentra el factor de intensidad de esfuerzo en el modo I que viene dado por la ecuación 5.

$$K_I = Y\sigma\sqrt{\pi c} \quad (5)$$

Cuando este factor excede el valor crítico de resistencia a la fractura K_{IC} es cuando existe propagación de la grieta, la que en la mayoría de los casos es conveniente evitar.

2.2.1.1 Fractura en modo I

Con el fin de obtener nuestro K_{IC} , y según los materiales que se ocuparán al respecto, se sigue el procedimiento de la norma ASTM D5045-14 “Standard Test Methods for Plane-Strain Fracture Toughness and Strain Energy Release Rate of Plastic Materials”.

En primer lugar, se muestra en la figura 2.11. la geometría de las probetas a utilizar, las cuales deben tener una ranura que simula una grieta en su mitad.

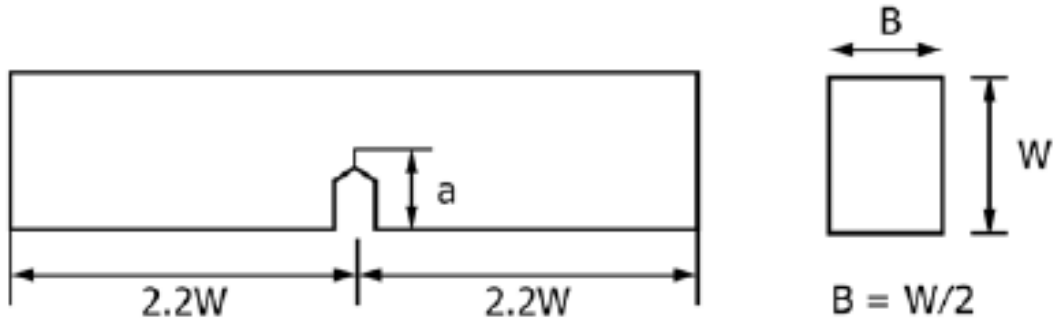


Figura 2.11. Geometría de probetas para ensayos. Fuente: ASTM D5045-14.

$$0,45 < \frac{a}{W} < 0,55 \quad (6)$$

Luego, se aprecian las condiciones de la prueba a ejecutar. Esta es llamada SENB y se trata de una prueba de flexión que se realiza operando una máquina de tracción que se adapta a la carga en flexión.

En la prueba, la máquina contiene dos soportes cilíndricos donde se apoya la probeta, como lo muestra la figura 2.12, mientras que la carga se registra según el desplazamiento del cabezal superior.

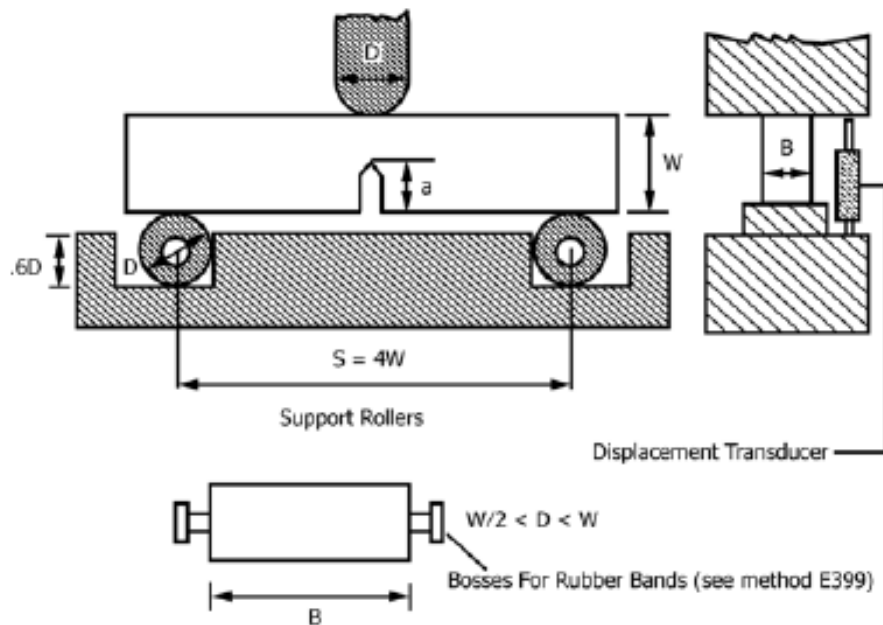


Figura 2.12. Prueba SENB para modo I de fractura. Fuente: ASTM D5045-14.

Luego se puede obtener la resistencia a la fractura siguiendo la ecuación 7.

$$K_{IC} = \frac{P_Q}{BW^{\frac{1}{2}}} f(x) \quad (7)$$

Donde la función $f(x)$ viene dada por:

$$f(x) = 6x^{\frac{1}{2}} \frac{1,99 - x(1-x)(2,15 - 3,93x + 2,7x^2)}{(1+2x)(1-x)^{\frac{3}{2}}} \quad (8)$$

Con:

$$x = \frac{a}{W} \quad (9)$$

Y finalmente, también se puede obtener la tasa de liberación de energía de deformación con la ecuación 10.

$$G_{IC} = \frac{(1 - \nu^2)K_{IC}^2}{E} \quad (10)$$

2.2.1.2 *Fractura modo II*

Para este modo de fractura, se sigue una prueba experimental realizada en un estudio (Ayatollahi, Shadlou y Shokrieh 2011) que trata de una carga antisimétrica, donde la probeta se apoya en 4 puntos (ASFPB) como se aprecia en la figura 2.13. La cantidad de momento de flexión a lo largo del plano de la grieta desaparece y solo hay una fuerza de corte.

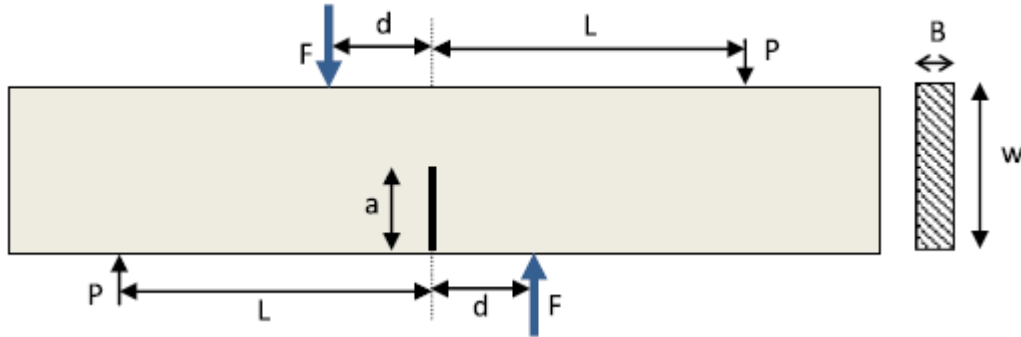


Figura 2.13. Muestra de prueba de cuatro apoyos con carga antisimétrica (ASFPB). Fuente: Ayatollahi, Shadlou y Shokrieh, 2011.

La geometría de las probetas es la misma vista para la fractura modo I, y lo que cambia es la disposición de las cargas y soportes para efectuar la prueba. Algunas consideraciones importantes realizadas por investigadores dicen que las cargas F no deben estar muy cerca del plano de la grieta, ya que podría afectar en los resultados experimentales; las distancias $L + d$ entre F y P deben ser lo suficientemente largas, ya que, en caso contrario, podría producirse una fractura dentro de este rango en la probeta y no en la punta de la grieta.

Luego, se puede determinar K_{IIc} con la siguiente ecuación.

$$K_{II} = \frac{F}{B \cdot w^{\frac{1}{2}}} \left(1 - \frac{d}{l}\right) f(x) \quad (11)$$

Donde $f(x)$ es un factor de geometría no dimensional, que se ajusta a un polinomio de cuarto orden.

$$f(x) = 9,763x^4 - 15,036x^3 + 8,667x^2 + 1,695x - 0,037 \quad (12)$$

Con:

$$0,1 < x = \frac{a}{w} < 0,7 \quad (13)$$

También se llega a obtener la tasa de liberación de energía de deformación, igualmente que con el caso de fractura en modo I.

$$G_{IIC} = \frac{(1 - \nu^2)K_{IIC}^2}{E} \quad (14)$$

2.2.2 DELAMINACIÓN

La delaminación es un tipo de fallo que ocurre en materiales compuestos, que trata en la separación de las capas que componen dicho material. El estudio de esta propiedad ayuda a establecer valores permisibles de diseño, ya que esta conlleva una pérdida significativa de la resistencia mecánica. Muchos autores que han estudiado el problema coinciden en la caracterización de la delaminación mediante dos fenómenos: el inicio de la rotura entre capas y la propagación de la misma grieta a lo largo del compuesto. (Martinez, Oller y Barbero 2011)

La ASTM proporciona las normas necesarias para llevar a cabo ensayos de delaminación, obteniendo como resultado la tenacidad a la fractura interlaminar de apertura en modo I y modo II; sin embargo, el último no se encuentra dentro de los alcances de esta memoria. De este modo, se sigue el procedimiento de la norma ASTM D5528 “Standard test method for Mode I interlaminar fracture toughness of unidirectional fiber-reinforced polymer matrix composites”.

La prueba nombrada DCB, por sus siglas en inglés “*Double Cantilever Beam*”, consiste en aplicar una carga contrapuesta en el extremo de delaminación de una probeta, utilizando un inserto intermedio en el plano del laminado. Se puede utilizar una bisagra o un bloque para el agarre de la probeta, como se observa en la figura 2.14, considerando un adhesivo adecuado.

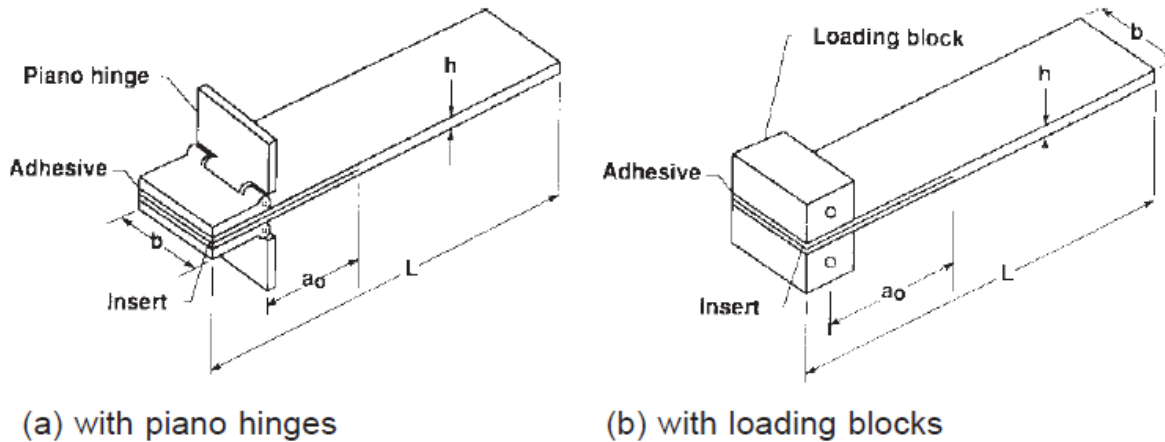


Figura 2.14. Probeta de doble viga en voladizo (DCB). Fuente: ASTM D 5528.

Bajo las condiciones del laboratorio, se trabaja con la opción de bloques de carga, y ante esto se deben considerar ciertos puntos.

- El espesor del laminado debe estar entre 3 y 5 mm.
- La longitud de delaminación inicial (a_0 en figura 2.14) deberá ser de 50 mm.
- La distancia desde el pasador del bloque, hasta la mitad de la viga superior, vista como “t” en la figura 2.15, debe ser lo más pequeña posible para minimizar errores. Ceteramente cumpliendo la ecuación 15 para la distancia “t”, se reducirán estos efectos.

$$t \leq \frac{h}{4} + 0,01 \sqrt{\frac{0,0434h^3 E_{11}}{G_{Ic}} + a^2} \quad (15)$$

- Las superficies de unión entre los bloques de carga y las probetas se lijarán suavemente y limpiarán con un solvente volátil para eliminar cualquier contaminación
- Se recomienda un adhesivo de curado a temperatura ambiente.

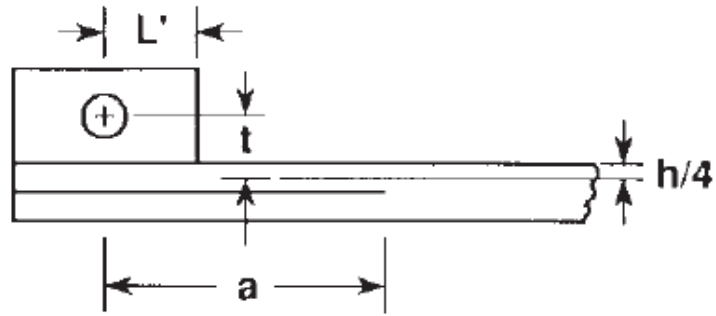


Figura 2.15. Distancias a considerar en la instalación de los bloques de carga. Fuente: ASTM D 5528.

Según el método de la teoría de la viga modificada (MBT), se obtiene la tasa de liberación de energía de deformación con la ecuación 16.

$$G_I = \frac{3P\delta}{2b(a + |\Delta|)} \quad (16)$$

Donde:

P = Carga.

δ = Longitud de apertura.

b = Ancho de la muestra.

a = Longitud de delaminación.

Δ se puede determinar experimentalmente extrapolando la gráfica de $C^{\frac{1}{3}}$, vista en la figura 2.16, donde C es la relación entre los puntos de desplazamiento de la delaminación y la carga aplicada, respectivamente.

$$C = \frac{\delta}{P} \quad (17)$$

Capítulo 2. Marco teórico

Este parámetro supone una mayor longitud de delaminación, corrigiendo una posible rotación en el frente de la probeta.

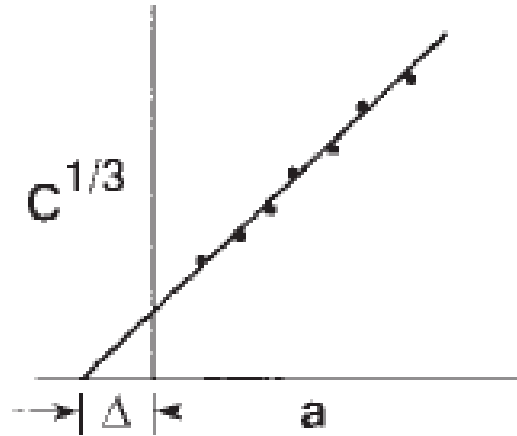


Figura 2.16. Extrapolación en gráfico $C^{1/3}$ vs a . Fuente: ASTM D 5528.

**CAPITULO 3. ANÁLISIS BIBLIOGRÁFICO DE RESULTADOS
EXPERIMENTALES**

3.1 ESTRATEGIA

En este capítulo se aborda un análisis literario de diferentes estudios experimentales que llevaron a cabo resultados interesantes para el desarrollo de materiales compuestos. Estos datos nos entregan variables importantes a la hora de realizar un estudio certero de las propiedades mecánicas para la implementación en nuevos diseños de ingeniería. Existen diferentes casos de investigación donde los resultados varían de alguna forma, por lo que aún se encuentra en un profundo estudio las posibles variables que afecten en el comportamiento mecánico.

Las principales propiedades mecánicas de estos materiales dependen en gran medida de la disposición entre fibra-matriz y de la fracción en volumen de los componentes (Montero Garcia 2010).

3.2 FRACTURA

A la hora de realizar pruebas de fractura en materiales compuestos, son diversas las variables que podrán definir resultados válidos de acuerdo con la norma que se utilice para llevarla a cabo. Según la norma ASTM, obtendremos valores para la resistencia a la fractura de un material y su tasa de liberación de energía de deformación, como se mencionó en el capítulo 2; sin embargo, en muchas ocasiones, se llegaron a resultados poco confiables respecto lo que representaría la teoría de la fractura, deduciendo y profundizando en los inconvenientes.

3.2.1 CANTIDAD DE REFORZAMIENTO

Dentro de las variables que se han mostrado relevantes al momento de caracterizar materiales compuestos, se encuentra la fracción peso de refuerzo utilizados en la fabricación, condición que afecta estrictamente la mejora de la resistencia a la fractura. En el estudio realizado por (Shokrieh y Zeinedini 2016), donde se trabaja con resina epóxica con CNT como refuerzos, queda en evidencia la mejora en la tenacidad del material a medida que aumenta el porcentaje en peso de los CNT, ampliando las características mecánicas.

En la figura 3.1 se puede observar los resultados de ensayos de fractura correspondientes a compuestos con porcentajes de 0,2; 0,4; 0,6; 0,8 y 1 de fracción en peso.

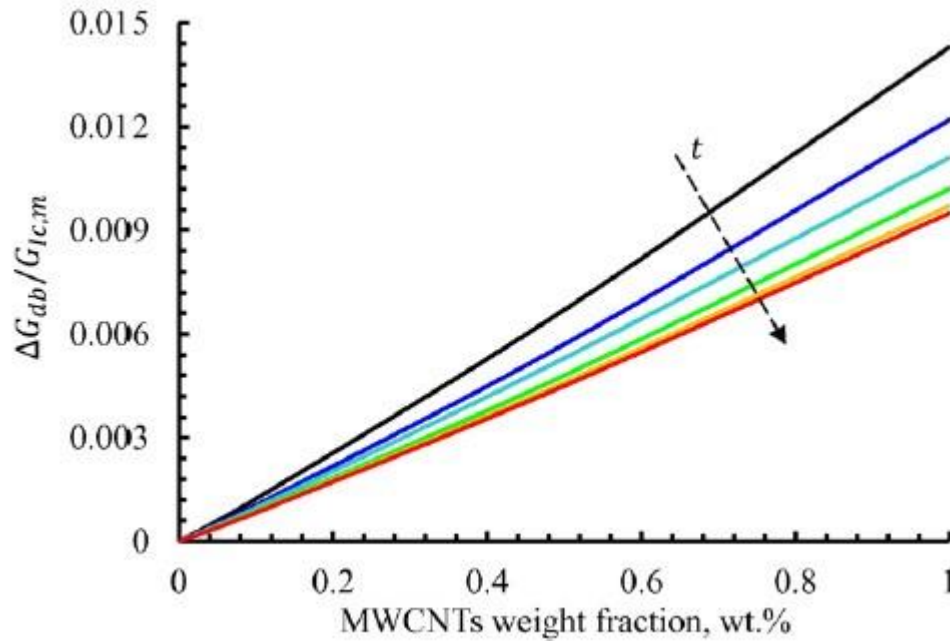


Figura 3.1 Gráfico de fracción de peso vs energía de deformación en resina epoxi con MWCNTs, con t correspondiendo a diferentes espesores de interfases. Fuente: Shokrieh y Zeinedini, 2016.

Se puede identificar el aumento en la tenacidad del compuesto a medida que el porcentaje de refuerzos es mayor, siendo relevante de igual forma, el espesor de la zona interfase, que varió según los diferentes parámetros de estudio y fue más crucial al momento de obtener diferencias.

Esto da por entender que un bajo espesor de la zona de interfase entrega un mayor porcentaje en la tasa de liberación de energía de deformación, por ende, llegar a ser un parámetro interesante para obtener resultados acordes a lo requerido, en este caso, alcanzar una máxima resistencia a la fractura. Cuando más grande sea la zona de interfase, más difícil será dispersar eficazmente los refuerzos (Gojny et al 2005).

Por otro lado, la investigación realizada por (Oseli et al. 2020), propone dos matrices de polietileno para estudiar el efecto de refuerzos de SWCNT, donde la viscosidad de esta tuvo gran influencia en los resultados.

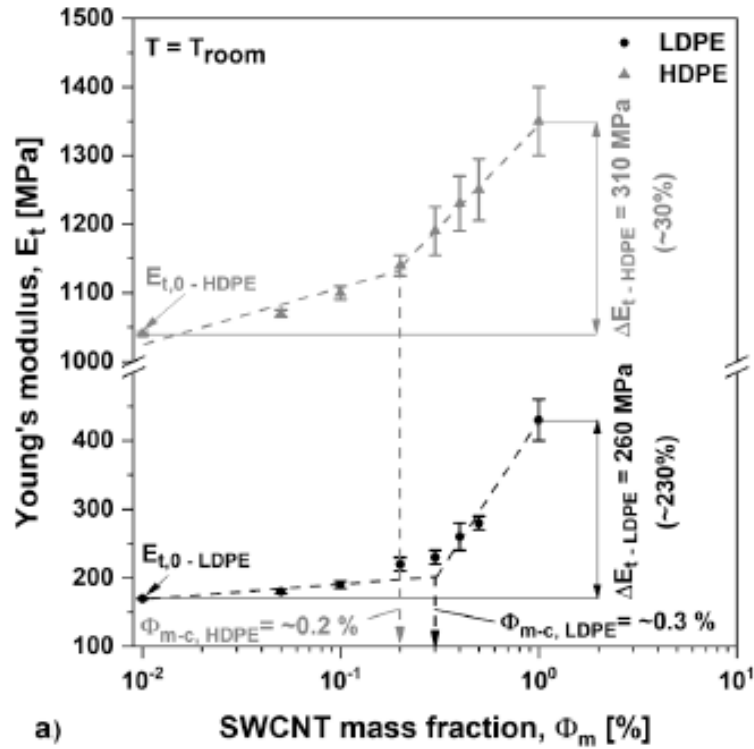


Figura 3.2. Gráfico del módulo de Young vs la fracción másica de SWCNT en dos diferentes matrices (LDPE y HDPE). Fuente: Oseli et al 2020.

Analizando el gráfico de la figura 3.2. obtenido en el estudio mencionado, correspondiente al comportamiento del módulo de Young según la fracción de masa de los SWCNT, se puede mencionar en primer lugar que ambos compuestos mejoraron su módulo a medida que se aumentó la fracción másica del refuerzo, sin embargo, este cambio tuvo más repercusión en la matriz de baja densidad donde el aumento alcanzó el 230%, mientras que para la matriz de alta densidad varió solo en 30% por lo que la efectividad del reforzamiento tiende a disminuir.

Ahora refiriéndonos a la máxima deformación según la fracción en masa del refuerzo, podemos observar en la figura 3.3 que en la matriz de baja densidad ocurrió una disminución de esta variable mientras se aumenta la cantidad de refuerzo, sin embargo, para la matriz de alta densidad el comportamiento fue creciente levemente, concluyendo en un alza de la fragilidad en el primer compuesto.

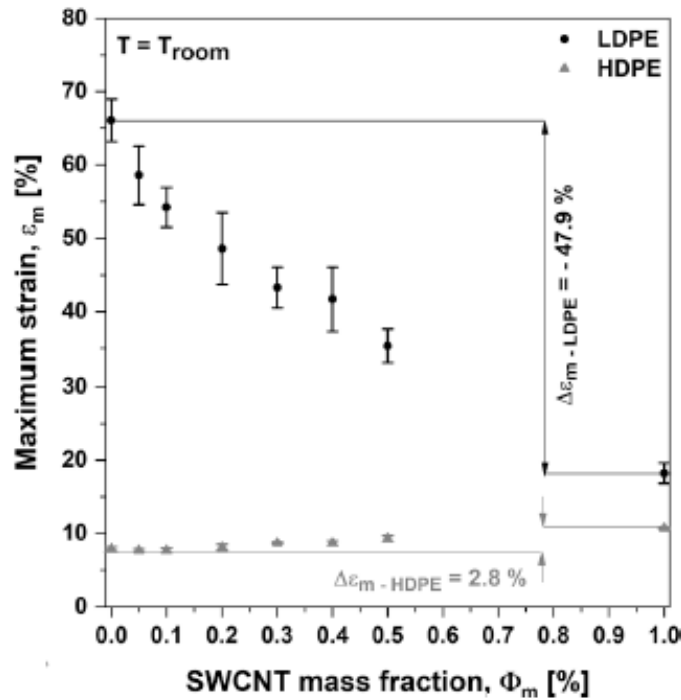


Figura 3.3. Gráfico de deformación máxima vs fracción másica de SWCNT en dos matrices diferentes (LDPE y HDPE). Fuente: Oseli et al 2020.

Sin embargo, el estudio realizado por (Coussy 2015) revela que un alza en la fracción másica de refuerzo no significa necesariamente un incremento en las propiedades de fractura, siendo de gran importancia el tipo de matriz a utilizar. Si analizamos sus resultados para ensayos mecánicos de fractura en resinas epóxicas con diferentes densidades, se puede observar que, en la resina dúctil, la adición de CNT condujo a un aumento de la resistencia a la fractura en modo I y modo II, mientras que, en la resina más densa, hubo una caída de este parámetro.

Tabla 3.1. Tabla comparativa de resultados de prueba de fractura en modo I y modo II, con diferentes porcentajes de CNT como refuerzo, respecto a dos diferentes matrices. Fuente: Coussy 2015.

Fracción de refuerzos	Resina dúctil		Resina frágil	
	$K_{IC}(MPa\sqrt{m})$	$K_{IIC}(MPa\sqrt{m})$	$K_{IC}(MPa\sqrt{m})$	$K_{IIC}(MPa\sqrt{m})$
0%	0,908	1,383	1,243	2,806
1%	1,141	1,442	1,19	2,572
1,5%	1,071	1,071	-	-

Capítulo 3. Análisis bibliográfico de resultados experimentales.

A pesar del aumento de la resistencia a la fractura de modo I en 25,7% al tener un 1% de fracción másica de refuerzo, esta decae, respecto al anterior, al momento de cambiar el material por un compuesto con 1,5% en fracción másica de refuerzo. Lo mismo ocurre con la resistencia a la fractura en modo II, aun más, la resistencia baja un 22,6% respecto a la resina sin nanorefuerzos.

Tabla 3.2. Tabla comparativa de resultados de diferentes autores para la tasa de energía de deformación de compuestos reforzados con nanotubos, según el porcentaje en masa del refuerzo. Fuente: Elaboración propia.

Porcentaje de refuerzo	Tipo de refuerzo	G_{IC} (J/m ²)	Fuente
0	CNT	370	Gapstur. C.
0,1	CNT	449	Gapstur. C.
0,25	CNT	446	Gapstur. C.
0,5	CNT	383	Gapstur. C.
0	MWCNT	742,4	Ayatollahi. M.R.
0,1	MWCNT	951,5	Ayatollahi. M.R.
0,5	MWCNT	1056,5	Ayatollahi. M.R.
1	MWCNT	899,5	Ayatollahi. M.R.
0	DWCNT	144,2	Gojny. F.H.
0,1	DWCNT	184,8	Gojny. F.H.
0,3	DWCNT	223,2	Gojny. F.H.
0,5	DWCNT	230,7	Gojny. F.H.
0	CNT	231,8	Coussy. J.
1	CNT	388,2	Coussy. J.
1,5	CNT	357,4	Coussy. J.

Se han seleccionado algunos autores para mencionar sus resultados experimentales en pruebas de fractura sobre la tasa de liberación de energía de deformación respecto a porcentajes en masa, de cargas de refuerzos; mostrados en la tabla 3.2. Bajo estos datos se logra obtener un gráfico comparativo entre estudios.

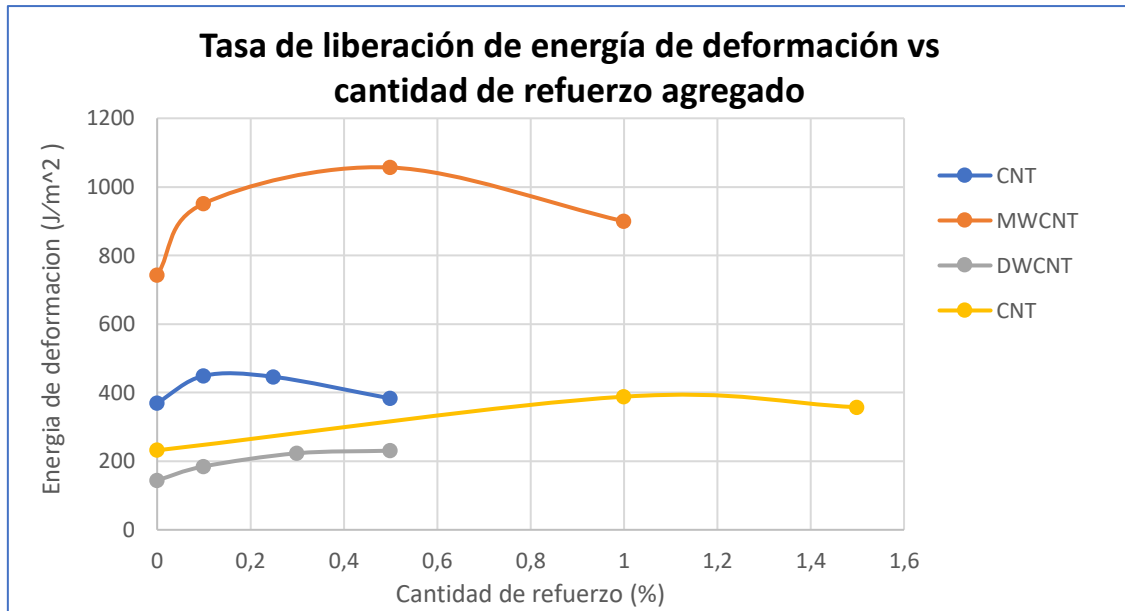


Figura 3.4. Gráfico representativo del comportamiento de 4 investigaciones, referente a la tasa de liberación de energía de deformación vs la cantidad de refuerzo agregado. Fuente: Elaboración propia.

En el gráfico de la figura 3.4 se puede observar en forma general resultados de cuatro estudios, con diferentes tipos de nanotubos de carbono. Si bien los resultados no se asemejan en la igualdad de energía de deformación, lo interesante es el comportamiento que conllevan estos parámetros. La mayoría alcanza un alza de la energía de deformación en alrededor de la mitad de los contenidos de refuerzos incorporados, teniendo una caída de este parámetro al aumentarlos. Ahora, comparando las dos curvas referentes a refuerzos de CNT, se nota claramente su diferente comportamiento frente al porcentaje de refuerzo agregado; y esta situación se debe a las características de la matriz utilizada, donde una matriz más viscosa se comportará de manera más frágil ante el aumento de refuerzos.

Por otro lado, en la investigación realizada por (Sun et al. 2021) se estudia el comportamiento de una matriz PEI frente a la incorporación de fibras cortas de carbono (SCF) y grafito (EG). Se espera un aumento en las características mecánicas del material frente a las diferentes combinaciones ensayadas, obteniendo resultados de resistencia a la fractura que se pueden apreciar en el gráfico de la figura 3.5.

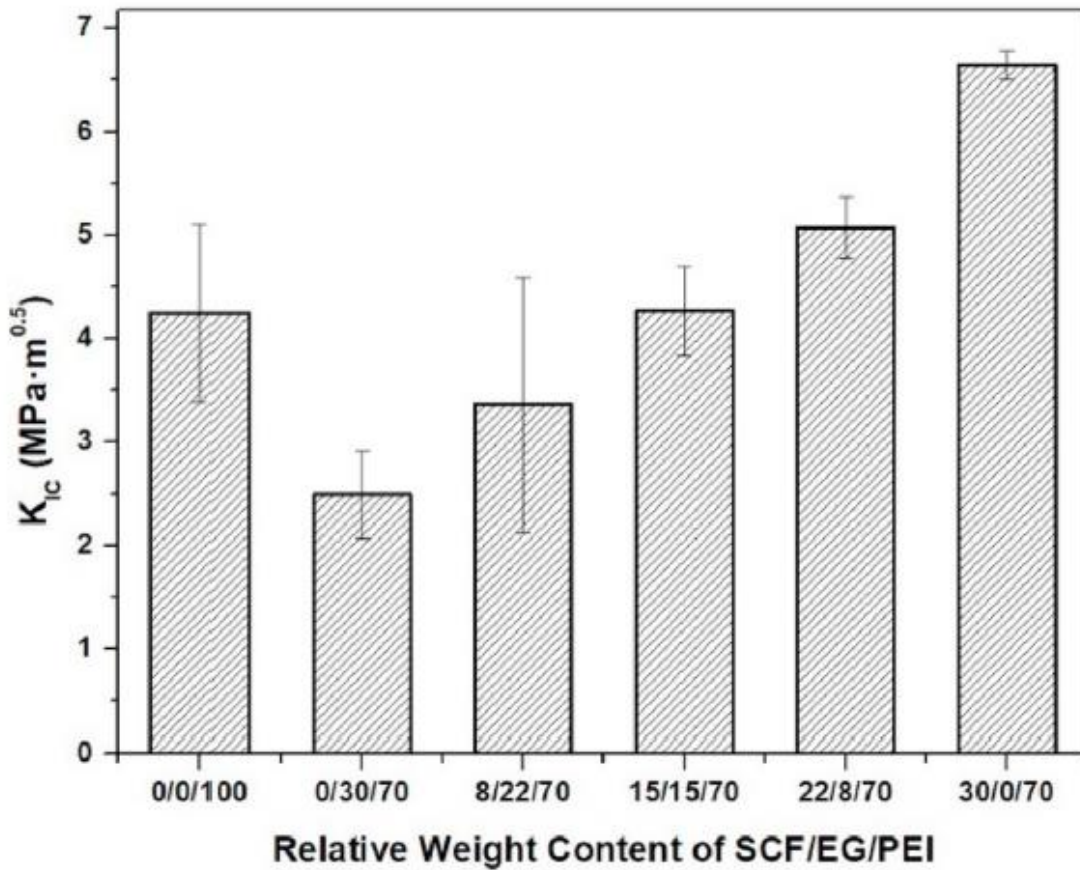


Figura 3.5. Gráfico de resistencia a la fractura para diferentes configuraciones de SCF/EG/PEI, respectivamente. Fuente: Sun et al. 2021.

La resistencia del compuesto con 30% y 70% de EG y PEI respectivamente, muestra una baja considerable en relación al PEI puro, cayendo en un 40% aproximadamente, asemejando este comportamiento a una débil unión interfacial entre estos dos componentes (Sun et al. 2021). A medida que se aumentan los SCF y se disminuye el EG, el material obtiene un comportamiento ascendente, superando al PEI puro en un 55.8% y demostrando que los SCF entregan mejores propiedades ante la fractura, relacionándolo con su mayor superficie de contacto y la creación de puentes evitando la propagación de grietas.

El grafito de tamaño nanométrico (en comparación a micrométrico) se puede dispersar de manera más uniforme y reforzar la matriz de manera más efectiva, conduciendo a laminas más delgadas con mayor adherencia de la interfaz grafito-caucho (Wang, Zhang y Tian 2012). Sin

Capítulo 3. Análisis bibliográfico de resultados experimentales.

embargo, el estudio de Wang consideró propiedades mecánicas de resistencia a la tensión y dureza del compuesto, por lo que se llega a deducir que el grafito puede mejorar la resistencia obteniendo un material más frágil y aumentando su módulo de Young, pero, esta misma fragilidad es la que conduce a una menor resistencia frente a la fractura y la propagación de grietas.

La incorporación de óxido de grafeno (GO) también ha demostrado sus ventajas al ser incorporado como refuerzo de matrices poliméricas, resultado de sus propiedades físicas retenidas del grafeno (Yin et al. 2016). El estudio realizado por (Wen et al. 2017) entrega resultados del impacto de los grados de oxidación en la estructura de GO incorporados en una matriz de caucho. El material compuesto se vio favorecido en sus propiedades de resistencia mecánica por la fuerte interacción de la zona interfacial, a medida que aumentaban los grados de oxidación.

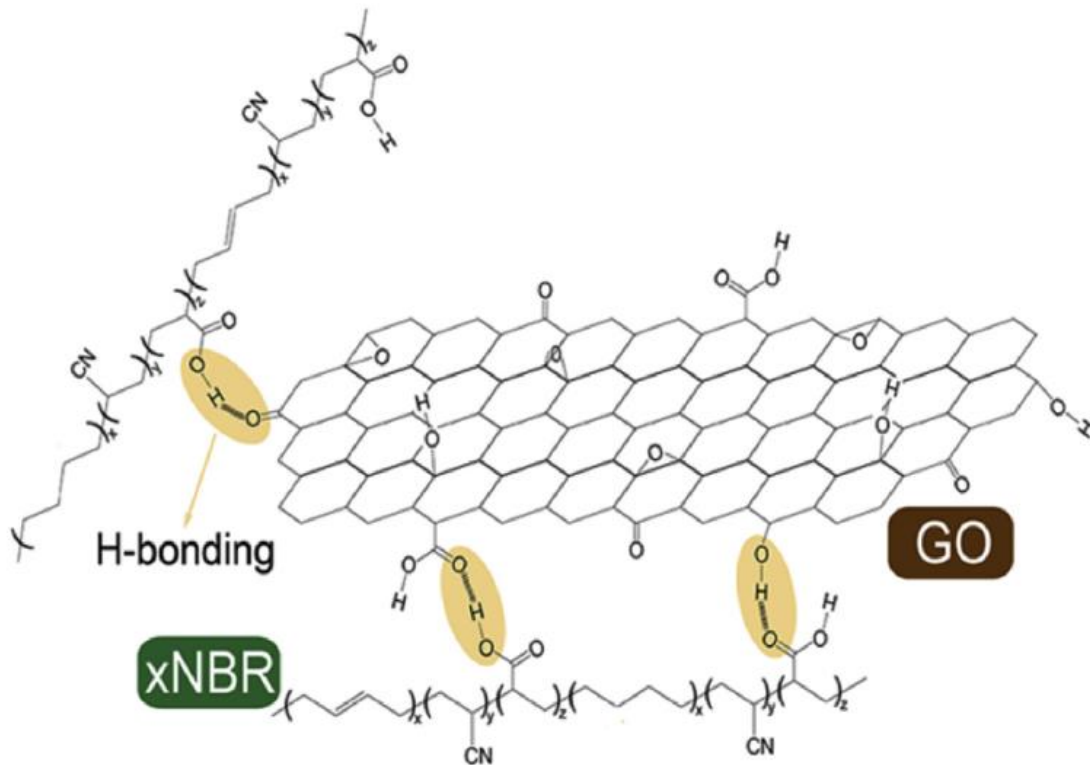


Figura 3.6. Representación de los enlaces de hidrógeno entre GO y caucho. Fuente: Wen et al. 2017.

Capítulo 3. Análisis bibliográfico de resultados experimentales.

Este comportamiento se debe a que al aumentar los grados de oxidación del GO, se incrementa la formación de grupos que contienen oxígeno y así mismo, aumenta y fortalece la formación de enlaces de hidrogeno que colaboran en una mejor dispersión de la carga en la matriz. En la figura 3.6 se representa esta interacción molecular.

Respecto a la concentración en peso de un compuesto reforzado con grafeno, se puede decir que nuevamente se cumple con la idea de que un aumento en la concentración no se relaciona directamente con una mejora constante en el material. La investigación de (Nosrati et al. 2020), donde se evaluaron tres concentraciones de grafeno (0,5%; 1,5% y 2,5%), entrega resultados donde los tres materiales obtuvieron mejoras mecánicas, sin embargo, la más alta se obtuvo con 1,5% en concentración de peso.

Esto no se trata solamente de refuerzos derivados del carbono, como los casos anteriores en los cuales el material compuesto se encontraba reforzado con nanotubos de carbono; sino que, por lo investigado en la literatura, algunos refuerzos naturales también ven disminuidas sus propiedades al ser utilizados como refuerzos, sin conocer estrictamente la cifra ideal de porcentaje másico de estos para alcanzar su máximo rendimiento.

En la figura 3.7, se puede apreciar el comportamiento de resina epóxica reforzada con hojas de piña bajo pruebas de fractura, realizado en la investigación de (Kumar et al. 2020).

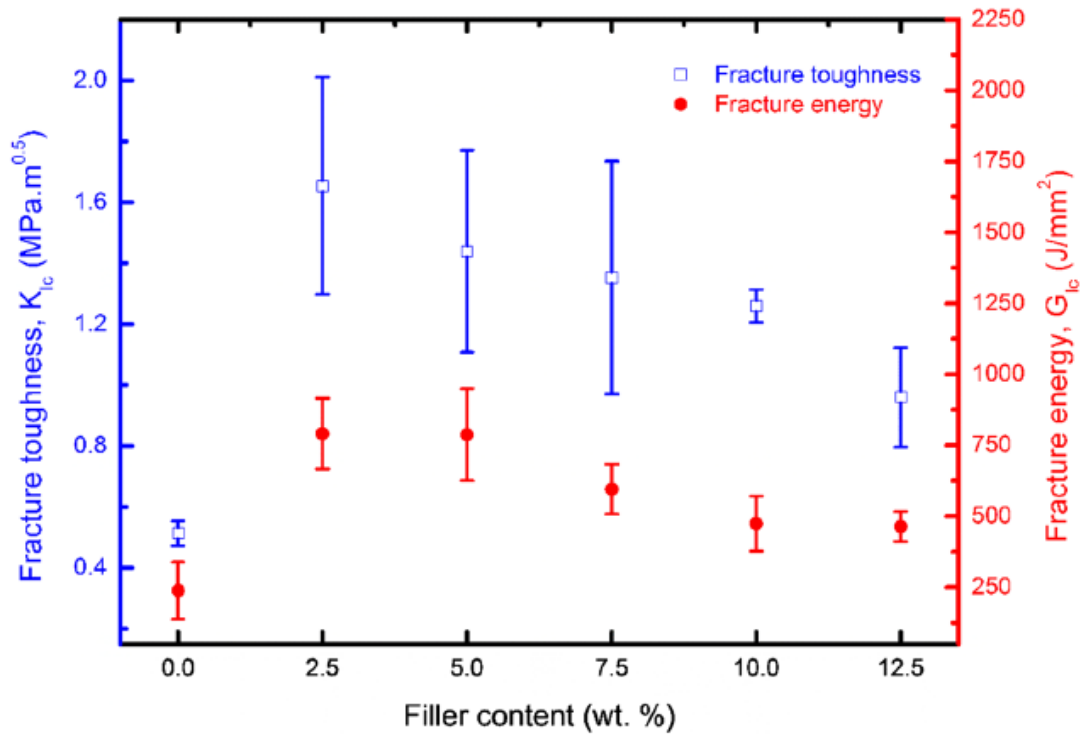


Figura 3.7. Resultados experimentales de resistencia y energía liberada en fractura vs porcentaje de masa de refuerzo, Fuente: Kumar et al. 2020.

De igual forma, se puede observar que la resistencia a la fractura se ve incrementada gracias al refuerzo, aumentando en un 222% desde $0,51 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ hasta alcanzar $1,65 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ con una fracción de peso de 2,5%, respectivamente. A medida que el contenido de refuerzo va aumentando, se puede notar una constante baja en esta propiedad, hasta alcanzar los $0,96 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ con 12,5% de fracción de peso.

La energía liberada en la prueba de fractura se comporta de similar forma, entendiéndose que es dependiente de la resistencia a la fractura, por lo que encuentra su máximo valor con un contenido de refuerzo de 2,5% y disminuye constantemente hasta alcanzar el menor valor; aun así, más alto que el de la resina; a los 12,5% en contenido de fracción de peso.

3.2.2 AGLOMERADOS

Una explicación válida que se puede considerar para el comportamiento en decadencia de la resistencia, al aumentar la fracción de refuerzos, es la aglomeración que producen el conjunto de nanorefuerzos.

Específicamente, los CNTs tienden a acumularse por la fuerza de van der Waals entre sus uniones moleculares (Du, Bai y Cheng 2007) y por defectos físicos que pueden surgir en la producción de estos, como por ejemplo, tubos curvos y entrelazados, lo que dificulta la separación entre sí ya dentro de la matriz. Uno de los inconvenientes de estas aglomeraciones es que producen concentraciones de esfuerzos, actuando similar a burbujas o impurezas en el material.

Básicamente, se pueden considerar dos fases de acumulación de nanorefuerzos; los aglomerados iniciales y aglomerados secundarios. Los primeros se refieren a la aglomeración que traen las cargas de refuerzo desde su producción, y que deben estar bien dispersos en la matriz del polímero a la hora de su mezcla. Los aglomerados secundarios se producen luego del procesamiento de conformado del material y son relevantes para caracterizar las propiedades finales (Alig et al. 2012).

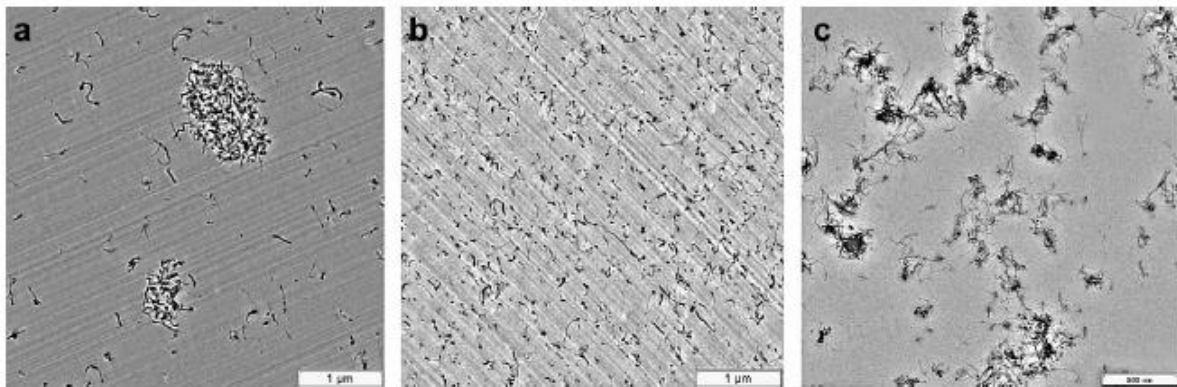


Figura 3.8. Imágenes TEM de diferentes disposiciones de MWCNT en matriz de policarbonato: a) aglomerado inicial, b) MWCNT bien dispersos, c) aglomerados secundarios. Fuente: Pegel, Pötschke y Petzol 2008.

Capítulo 3. Análisis bibliográfico de resultados experimentales.

En la figura 3.8 se aprecia de mejor manera las diferentes disposiciones que adoptan los MWCNT, en la imagen (a) se observan aglomeraciones iniciales de los nanorefuerzos, correspondiendo a MWCNT, mientras que en (c) se visualizan aglomeraciones secundarias, las cuales son condicionantes para obtener características eficientes en el material, sobre todo, evitando propagaciones de grietas en fractura.

Este problema se hace general para las cargas de refuerzo provenientes de configuraciones de carbono, dando alusión de igual forma a la fuerza de van der Waals. Se puede ejemplificar otro caso de aglomeración de refuerzos, referente al estudio realizado por (Gapstur 2018), donde refuerza una matriz de éster de vinilo con nanotubos de carbono y nanoplaquetas de grafeno para mejorar las propiedades a la fractura.

Luego de la realización de los ensayos de fractura, se analiza con microscopio SEM la superficie de fracturas, y en la figura 3.9 se puede apreciar una pequeña aglomeración de GNP muy cerca de una grieta hecha en el material, la cual puede relacionarse con una concentración de esfuerzo en esa zona y producir la propagación de la grieta.

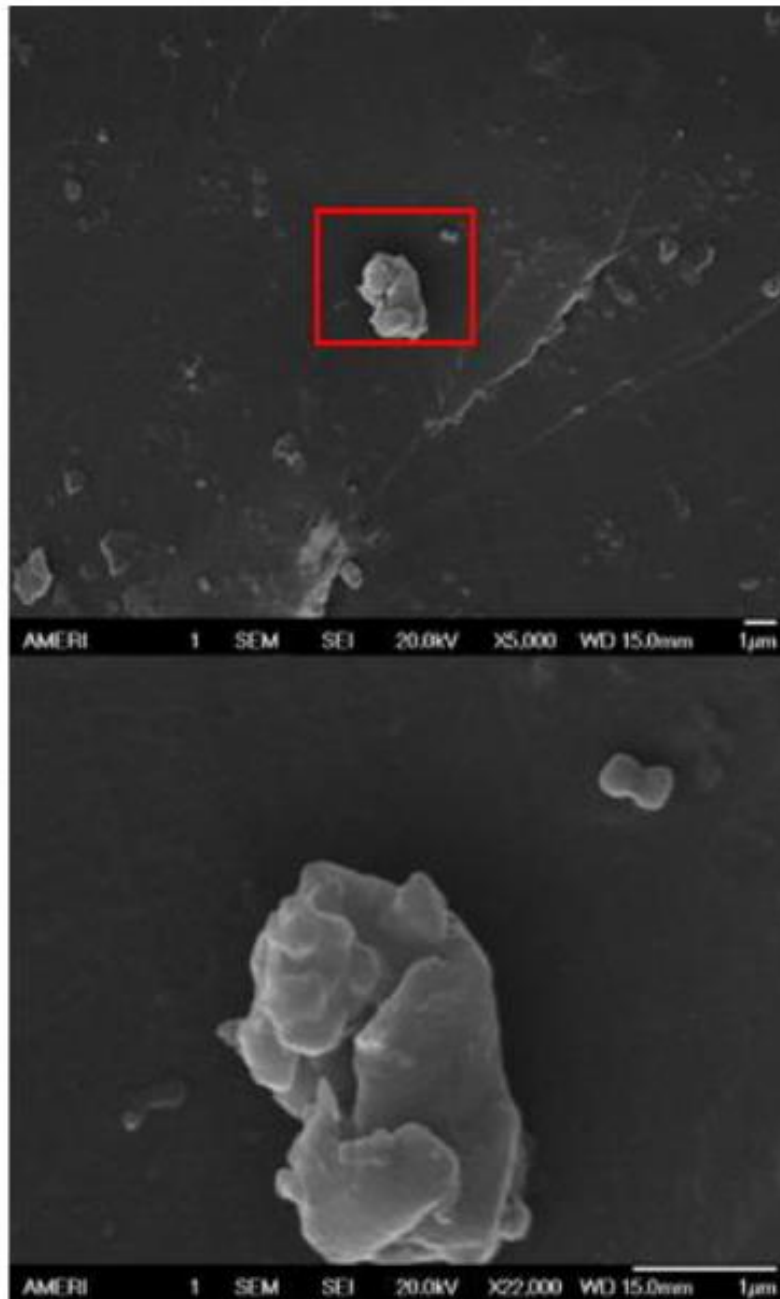


Figura 3.9. Imágenes SEM de una aglomeración de GNP, 5000X y 22000X respectivamente de ampliación. Fuente: Gapstur 2018.

3.3 DELAMINACIÓN

La caracterización de la delaminación en materiales compuestos ha sido un punto crucial en la investigación de estos, ya que se trata de afrontar una nueva forma de fallo en comparación a materiales tradicionales. Este problema conduce a una reducción de la rigidez y la capacidad resistente del compuesto, lo que puede llegar a terminar en el fallo de este (Martinez, Oller y Barbero 2011).

Muchos autores han desarrollado diferentes métodos y teorías para llevar a cabo la caracterización, desde pruebas en la fabricación del material, hasta simulaciones computacionales que coinciden con comportamientos experimentales. En esta sección se analizarán los principales puntos que logran una mejora en las características mecánicas y que pueden variar los resultados mecánicos y el comportamiento que toma el material compuesto bajo este requerimiento.

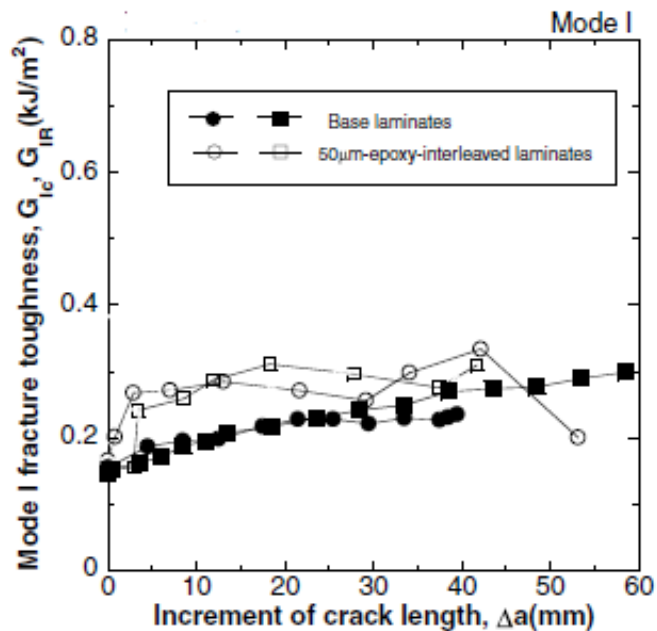


Figura 3.10. Gráfico comparativo de energía de delaminación vs longitud de grieta, para material compuesto con espesor de resina epóxica intercalada entre lamina. Fuente: Hojo et al. 2006.

La zona rica en resina es importante a la hora de afrontar nuevas pruebas mecánicas en materiales compuestos laminados y algunos autores se han dedicado a investigar

Capítulo 3. Análisis bibliográfico de resultados experimentales.

comportamientos interfiriendo en esta zona. En la investigación de (Hojo et al. 2006) se comparó un laminado de fibra de carbono con resina epóxica junto a otro igual, pero con una capa intermedia de resina epóxica de 50 μm en modo I y modo II de delaminación.

Al analizar el gráfico de la figura 3.10, se aprecia que el material base (sin intercalado de resina epóxica) mantiene un constante aumento de la energía de deformación a medida que el incremento de longitud de grieta va aumentando hasta los 60 mm, mientras que para el material con intercalado de resina epóxica se observa un pequeño aumento en un principio (hasta los 18 mm de longitud de grieta), para luego tener un decaimiento y seguir de alguna forma constante.

En la iniciación de la grieta, ambos materiales se vieron cercanos en su valor de energía de deformación; 170 J/m^2 para los laminados con resina epóxica intercalada de 50 μm , y 160 J/m^2 para laminados sin resina epóxica intermedia, reconociendo desde ya un pequeño aumento en la resistencia a la delaminación con una zona de resina más gruesa. Finalmente, el promedio de la energía de deformación en la propagación de la grieta alcanzo los 280 J/m^2 para los laminados intercalados y 230 J/m^2 para los laminados base. En este caso, el autor menciona la baja influencia que se obtuvo con la intercalación de resina epóxica, siendo leve el aumento en la tenacidad a la fractura de delaminación para estos, sin embargo, en el modo II de fractura interlaminar, bajo cargas cíclicas, los valores se vieron aumentados en 1,6 veces en la iniciación de la grieta y 3,4 veces en la propagación de esta, respectivamente.

Un punto clave en la delaminación de materiales compuestos son los puentes de fibra que se logran formar, los cuales aumentan la resistencia al crecimiento de las grietas (Blondeau, Pappas y Botsis 2021). Estos puentes no se forman de igual manera en los diferentes laminados, dependiendo en gran medida de los refuerzos y matrices a utilizar. La oxidación en fibras de carbono contribuyen a una mejora en este punto, exhibiendo propiedades estructurales mejoradas en relación con nanofibras no oxidadas (Rasheed, Dadmun y Britt 2006), atribuyendo este comportamiento a lo explicado con la figura 3.6.

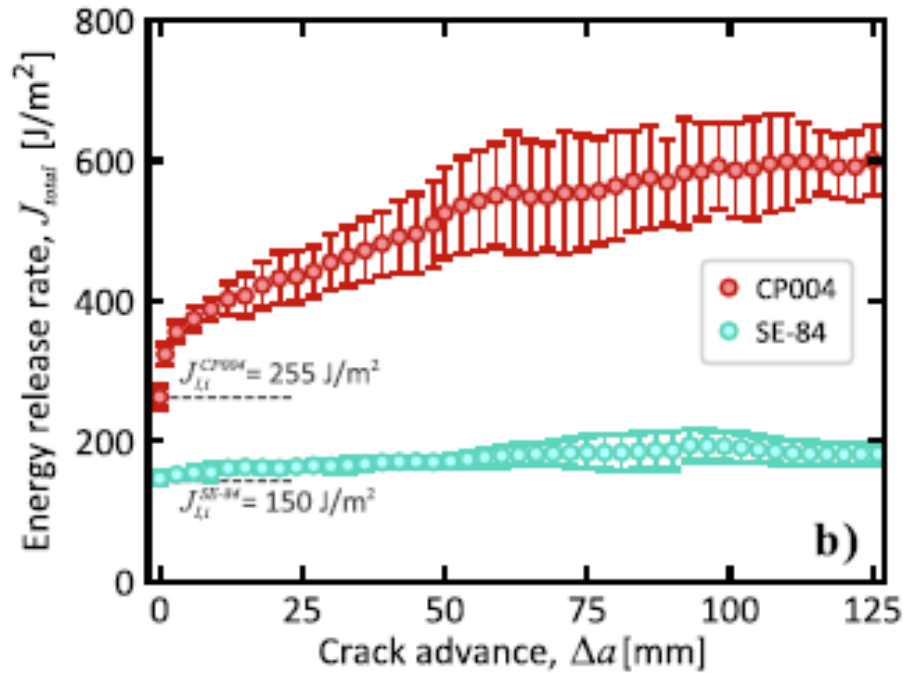


Figura 3.11. Gráfico de tasa de liberación de energía vs avance de la grieta, para dos tipos de compuestos carbono/epoxi. Fuente: Blondeau, Pappas y Botsis 2021.

En la investigación de los citados en el párrafo anterior, se logra comparar dos materiales unidireccionales de carbono/epoxi, resultando claras, en la figura 3.11, las diferencias en su comportamiento mecánico ante la delaminación. Al ponerse a prueba láminas compuestas de carbono con CP004 y SE84, la propagación de la grieta en el primero fue suave, relacionándolo con formación de puentes significativos que crean una resistencia a la grieta, empezando con $225 J/m^2$ en un inicio, hasta alcanzar los $585 J/m^2$. Por el contrario, el segundo material nombrado tuvo un comportamiento mucho más constante, desde $150 J/m^2$ hasta $185 J/m^2$; asimilándolo con una menor formación de puentes. Estas diferencias relacionadas a los puentes formados en la delaminación se pueden observar en la figura 3.12, donde en la imagen (a) se aprecia la conexión interlaminar entre las vigas de la probeta que aumentan la resistencia a la propagación de la grieta, mientras que en el caso (b) estos puentes se encuentran ausentes, provocando una delaminación constante sin mucha oposición mecánica.

Capítulo 3. Análisis bibliográfico de resultados experimentales.

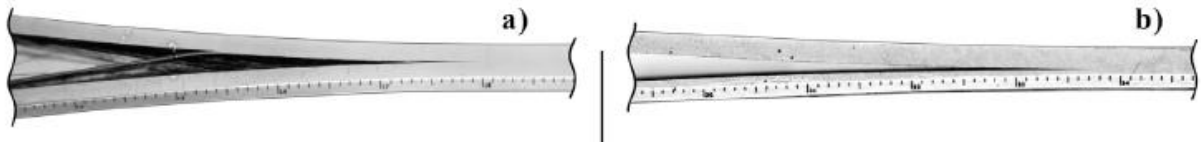


Figura 3.12. Vista lateral de muestras DCB. a) formación de puentes significativos para CP004 y b) Ausencia de puentes en SE-84. Fuente: Blondeau, Pappas y Botsis 2021.

Desde un punto de vista microestructural, considerando el ordenamiento de la fibra dentro de la matriz, comparado a los resultados obtenidos en la prueba de delaminación en modo I, se puede observar en la figura 3.13 que las dos microestructuras tuvieron un distinto ordenamiento de las fibras. Por un lado, el material CP004 se observa con un comportamiento heterogéneo al tener una disposición más desordenada de las fibras, con zonas interlaminares delgadas y con densidad de fibra no constante; mientras que para el caso del SE-84 se observa un ordenamiento organizado de las fibras, con zonas interlaminares uniformes y densidades de fibra constantes.

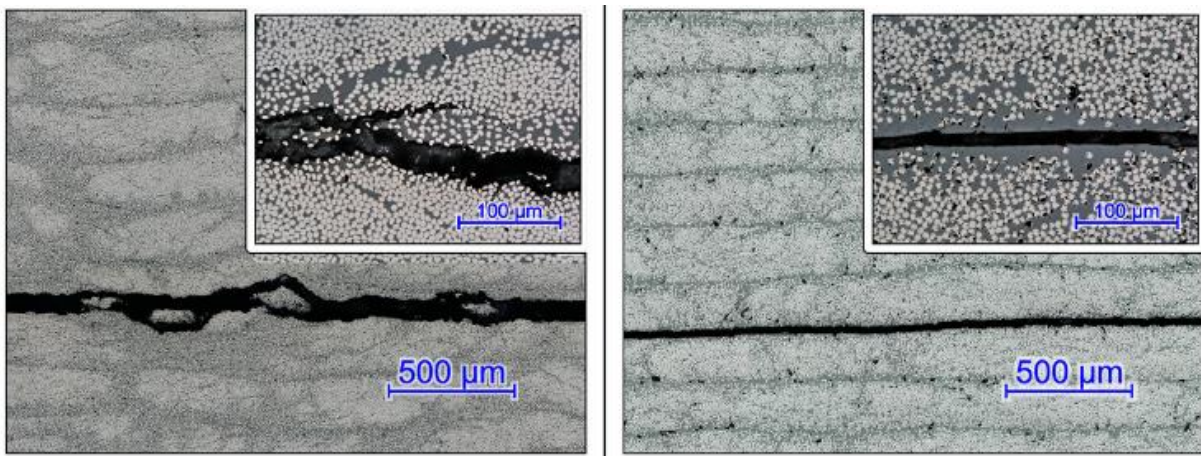


Figura 3.13. Micrografías de secciones transversales en el inicio de la grieta para compuesto CP004 y SE-84, respectivamente. Fuente: Blondeau, Pappas y Botsis 2021

Esta predisposición de las fibras en el material compuesto puede contribuir a entregar comportamientos como los descritos anteriormente, ya que se puede inferir que, al dirigirse la fractura hacia zonas de aglomeración, esta necesitará una mayor energía para continuar la

Capítulo 3. Análisis bibliográfico de resultados experimentales.

propagación por ese mismo camino, mientras que, en el segundo caso, la fractura continua en la zona rica en resina, siguiendo un camino continuo y sin mayor obstáculo de fibras, necesitando menos energía para su propagación.

Estos comportamientos podrían atribuirse a que la interfase sea mucho más débil que la matriz en sí, para el primer caso, por lo que la grieta logra ramificarse por entremedio; mientras que para el segundo caso la matriz sería mucho más débil que la interfase. Por lo general, se busca detener la propagación de una grieta, sin embargo, guiar la posible grieta por un camino específico es una buena alternativa frente a algunos casos, resaltando la importancia de la zona rica en resina.

Una de las formas de mejorar el comportamiento de estas zonas de resina, es el incorporamiento intercalado de cargas nanométricas de refuerzo entre láminas. Frente a esto se han podido ver mejoras en el comportamiento del material, por ejemplo, en el estudio de (Nasser, Zhang y Sodano 2021) incorporando nanopartículas de grafeno en la zona interlaminar de una matriz polimérica reforzada con fibra de carbono, se alcanzaron mejoras de un 41% y un 69% respectivamente para la resistencia en el inicio y la propagación de la grieta. La investigación llevada a cabo por (Zhou et al. 2017) estudia el comportamiento de laminados compuestos de resina epóxica con fibra de carbono, insertando de forma interlaminar fibras de carbono cortas y entrelazados de fibras de carbono cortas y nanotubos de carbono.

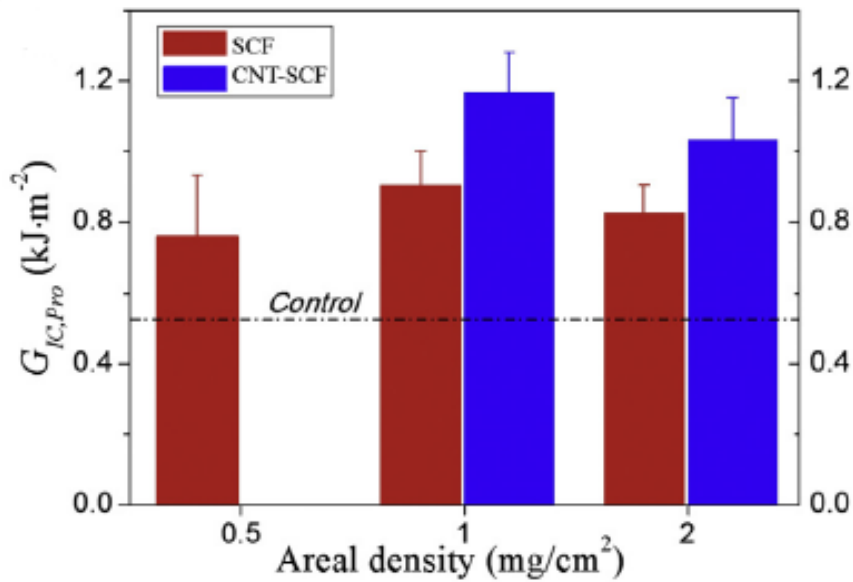


Figura 3.14. Gráfico de energía de deformación vs la densidad de área de refuerzos intercalados de SCF y CNT-SCF en compuesto de resina epóxica con fibras de carbono. Fuente: Zhou et al. 2017.

Analizando el gráfico obtenido con el ensayo de delaminación, en la figura 3.14, se puede decir que existe un incremento en la energía de deformación al integrar los refuerzos interlaminares, respecto al compuesto de control (resina epóxica con fibra de carbono). Solo con el refuerzo de fibras cortas de carbono, se alcanzó un máximo de $0,90 \text{ kJ/m}^2$ con una densidad de área de 1 mg/cm^2 ; aumentando en un 73% respecto a la probeta de control. Así mismo, con el refuerzo entrelazado de fibras de carbono cortas junto a nanotubos de carbono, la energía aumentó aún más hasta alcanzar $1,17 \text{ kJ/m}^2$ con la misma densidad de área que la anterior. Para las pruebas con materiales de 2 mg/cm^2 de densidad en la resina epóxica entre laminas, ocurre una disminución del G_{IC} en comparación con el máximo alcanzado, esto puede deberse a la imperfecta distribución de las cargas en la resina, al aumentar la densidad de área, lo que puede dejar defectos como se mencionaron en el punto 3.2.2.

Siguiendo la constante mejora en las propiedades de delaminación, la investigación realizada por (Zhao et al. 2020) propone un agente de endurecimiento interlaminar de poliamida con óxido de grafeno, probando diferentes porcentajes de contenido en peso, en una matriz epóxica.

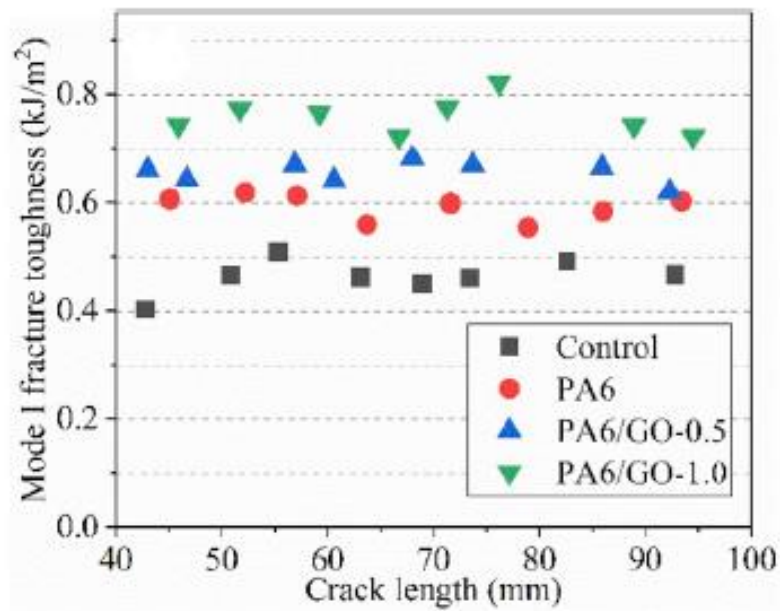


Figura 3.15. Gráfico de resistencia a la fractura vs longitud de grieta de resina epóxica con intercalación de poliamida con nanocargas de óxido de grafeno. Fuente: Zhao et al, 2020.

Como resultado, el material aumentó su resistencia a la fractura en todas las modificaciones probadas respecto al material de control, considerando un 5% en peso de poliamida. Aún sin las cargas de GO, se obtiene una resistencia inicial que aumenta desde $0,417 \text{ kJ}/\text{m}^2$ hasta $0,619 \text{ kJ}/\text{m}^2$ como se observa en la figura 3.15 y la máxima resistencia es alcanzada con un contenido de 1% en peso de óxido de grafeno, manteniendo su comportamiento constante a medida que aumenta la longitud de la grieta.

También existen estudios que revelan el comportamiento que adquiere el material al incorporar en la matriz refuerzos con grupos funcionalizados, los cuales entregan la propiedad de mayores características de adherencia molecular (similar al caso del óxido de grafeno de la figura 3.6). De este modo la investigación de (Ahmadi-Moghadam y Taheri 2015) busca reforzar una resina epóxica con nanoplaquetas de grafeno con y sin modificaciones de funcionalidad química.

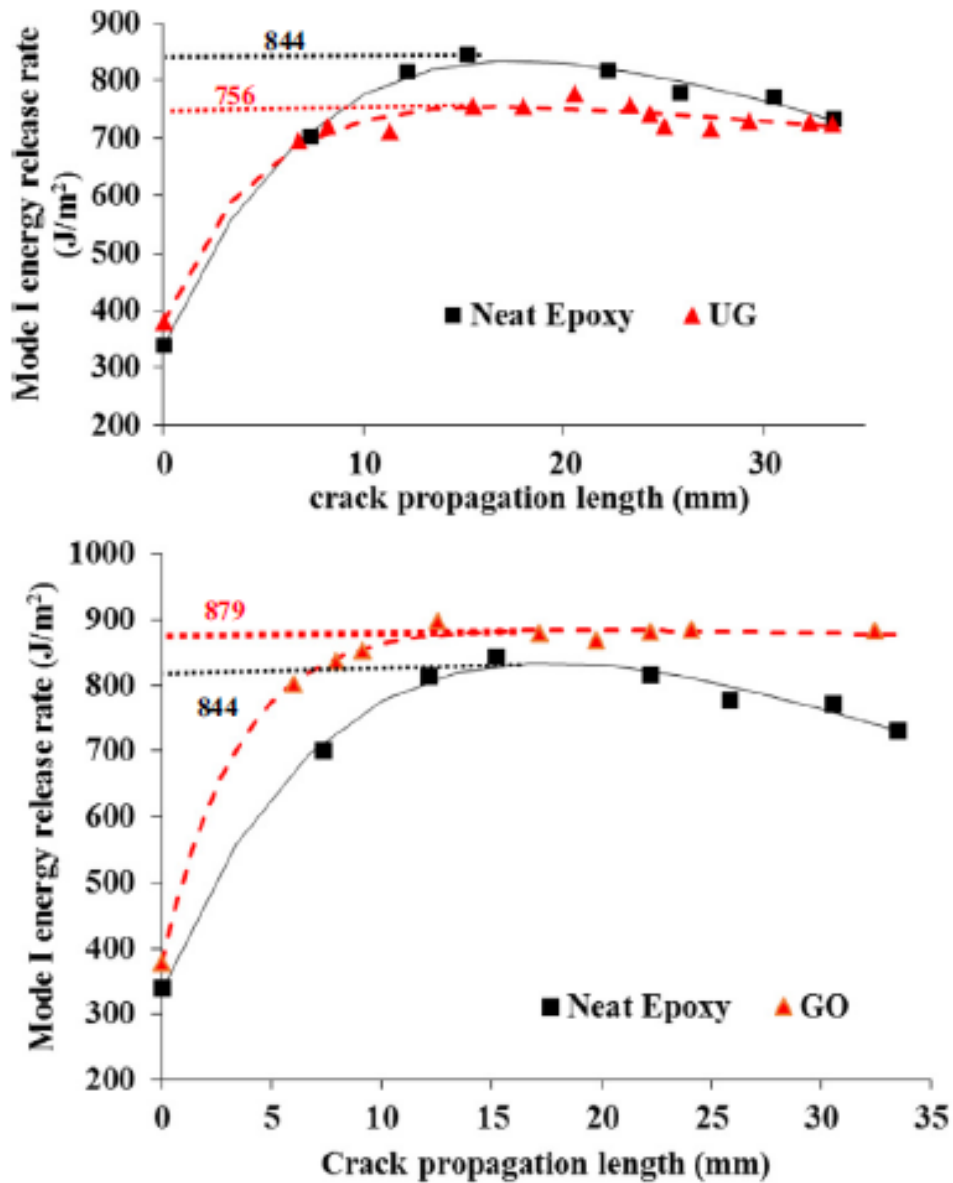


Figura 3.16. Gráficos de tasa de liberación de energía vs longitud de propagación de la grieta para matriz epóxica reforzada con nanoplaquetas de grafeno (UG) y óxido de grafeno (GO), respectivamente. Fuente: Ahmadi-Moghadam y Taheri, 2015.

Dentro de los resultados se observa, en la figura 3.16, una mejora en la tasa de energía para el inicio de la grieta, al menos hasta los primeros 10 mm de propagación. Para el refuerzo solo de nanoplaquetas de grafeno la resistencia en la propagación de la grieta alcanza una meseta, desde los 10 mm, menor a la que alcanza la resina epóxica de control, volviendo a igualarse cerca de

los 30 mm de longitud de grieta. Caso contrario sucede con el refuerzo de óxido de grafeno, el cual en todo momento se mantiene superior a la curva de la probeta de control, demostrando su efectividad en la resistencia a la delaminación.

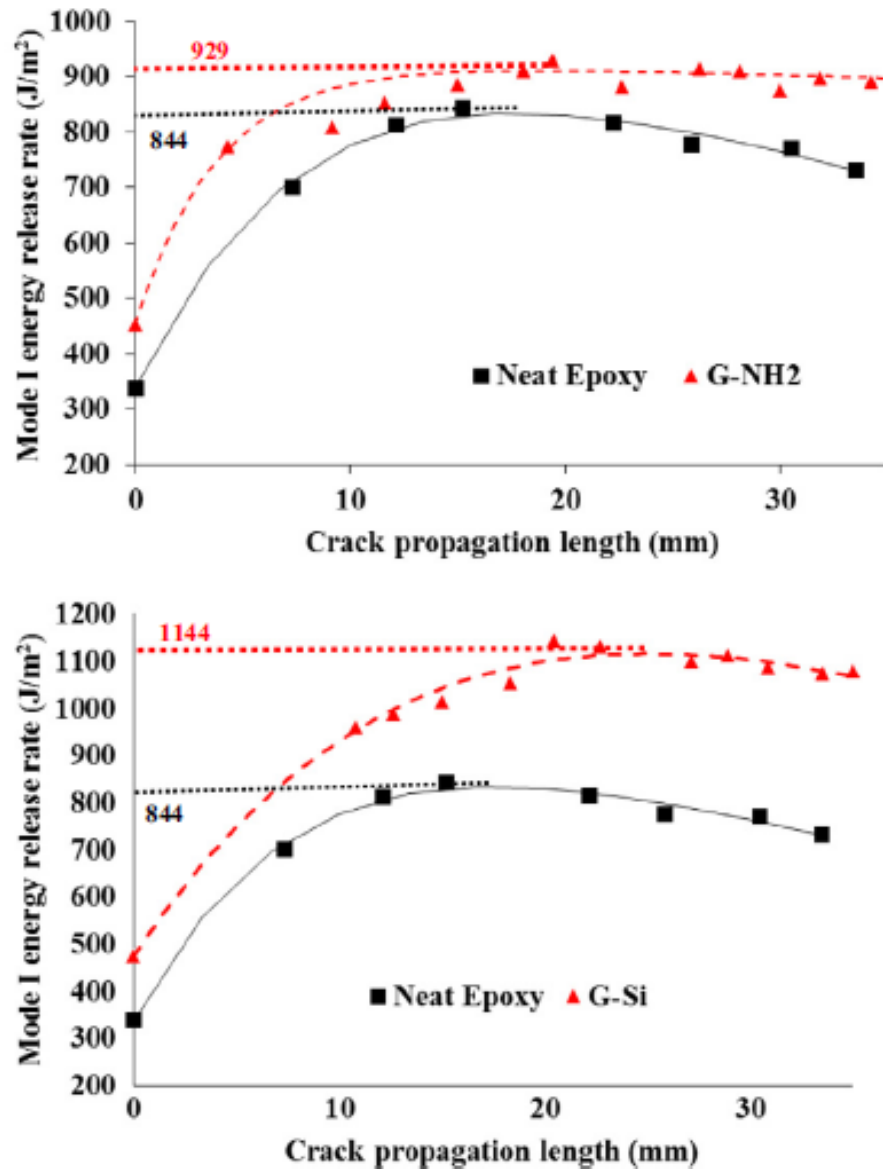


Figura 3.17. Gráficos de tasa de liberación de energía vs longitud de propagación de la grieta para matriz epóxica reforzada con nanoplaquetas de grafeno funcionalizados con grupo amino (G-NH₂) e hidruro de silicio (G-Si), respectivamente. Fuente: Ahmadi-Moghadam y Taheri, 2015.

Capítulo 3. Análisis bibliográfico de resultados experimentales.

Luego, analizando el comportamiento de las nanoplaquetas de grafeno modificadas con grupos funcionales de amino e hidruro de silicio, se aprecia en los gráficos de la figura 3.17 una bastante superioridad en la resistencia a la fractura, mucho más en la última, alcanzando los $1144 J/m^2$, teniendo mejoras de 33% y 39% respectivamente. El autor asocia estas mejoras a que la presencia de nanoplaquetas de grafeno endurecía las superficies de fractura y, por lo tanto, aumentaba la resistencia en las zonas de interfaz. Adicionalmente, la funcionalización de estos mejoró aún más la energía superficial de las nanoplaquetas por sus uniones moleculares, provocando una unión de interfaz más fuerte.

Un comportamiento similar se puede encontrar con otro tipo de cargas de refuerzo, como lo son velos termoplásticos. Algunos investigadores han estudiado el comportamiento que adquiere el material al integrar cargas de velos no tejidos, donde el peso superficial de este componente se vuelve un parámetro crucial ante su comportamiento, como lo dicen en sus estudios (Ramirez, Hogg y Sampson 2015) y (Quan et al. 2020), a medida que aumenta el peso superficial del velo, aumenta la energía de fractura interlaminar, coincidiendo en que esto se cumplirá hasta alcanzar cierto valor, ya que sobrepasando este parámetro la energía comienza a descender.

El estudio realizado por (Ínal et al. 2021) donde se introducen velos de polieterimida (PEI) y sulfuro de polifenileno (PPS) de bajo peso superficial entre laminados de fibras de carbono con resina epóxica, muestra una mejora considerable en la energía de delaminación en modo I. Al observar la figura 3.18 se puede analizar que los laminados con PEI tuvieron un ligero comportamiento a aumentar la energía, sin embargo, se mantuvieron constantes dentro del rango de los $300 J/m^2$ y $350 J/m^2$ mayoritariamente, al igual que la energía del material base, lo que indica una semejanza entre la energía necesaria para la iniciación de la grieta respecto de la energía necesaria para la propagación de la misma. Contrariamente, el material reforzado con PPS mostró un aumento significativo en el inicio de la grieta, hasta alcanzar un máximo en los 63 mm de longitud de grieta aproximadamente. Luego, comienza a descender hasta mantener constante, pero siempre superior a los materiales mencionados anteriormente.

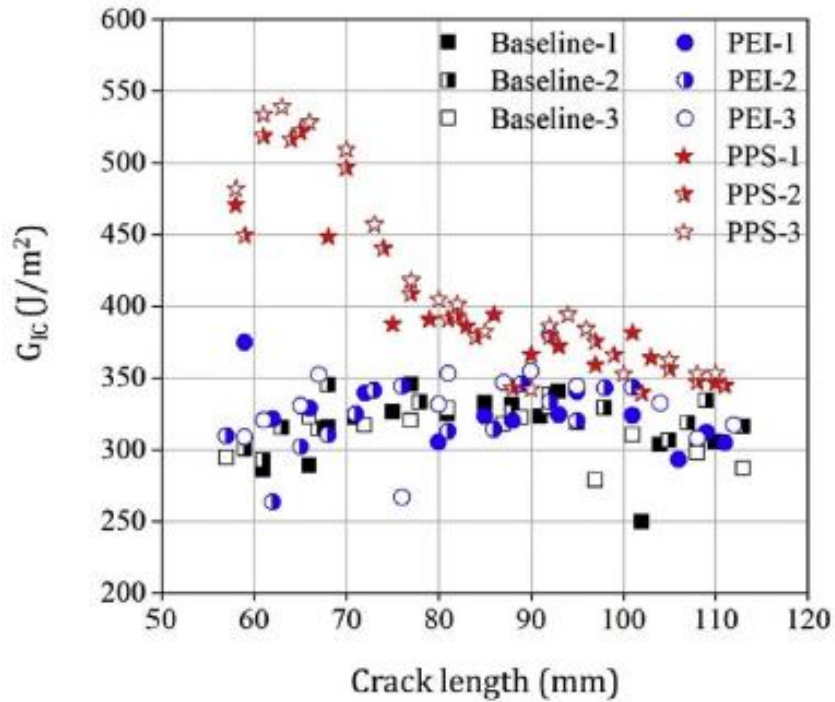


Figura 3.18. Comportamiento de la energía de delaminación vs longitud de grieta en laminado de resina epóxica con fibra de carbono con refuerzos intercalados de PEI y PPS. Fuente: İnal et al. 2021.

Ante este comportamiento, se puede indicar que el material con PPS como refuerzo mantiene una resistencia elevada a la iniciación de la grieta, en comparación al material base y el reforzado con PEI; sin embargo, se asemeja al comportamiento de estos dos al momento que la grieta comienza a propagarse, luego de los 80 mm de longitud de grieta, jugando un papel marginal en el crecimiento de la grieta. Según el autor, variables significativas para estos comportamientos se tratan de los diámetros de fibras, donde un gran diámetro significa áreas de superficies más bajas; la adhesión entre fibra y matriz y la distribución de la fibra.

En comparación con el estudio realizado por (Beylergil, Tanoğlu y Aktaş 2018), donde intercalan velos de poliamida en laminados de fibra de carbono con resina epóxica, se puede apreciar un gran porcentaje de mejora en los valores de delaminación en modo I, donde utilizando una masa superficial de 17 g/m^2 y 50 g/m^2 obtuvieron resultados para la iniciación de la grieta de 84% y 349%, respectivamente; mientras que los resultados en la propagación de

Capítulo 3. Análisis bibliográfico de resultados experimentales.

la grieta fueron de 171% y 718% respectivamente, demostrando una gran mejora en el comportamiento del material frente a la incorporación de velos termoplásticos como refuerzos.

Tabla 3.3. Resultados de diferentes autores sobre la energía de delaminación para la iniciación y propagación de la grieta, utilizando refuerzos intercalados de termoplásticos en material compuesto de resina epóxica con fibras de carbono. Fuente: Elaboración propia.

Refuerzo intercalado	G_{IC} (J/m²)	G_{PROP} (J/m²)	Fuente
sin refuerzo	294	315	Inal, O.
PEI	330	326	Inal, O.
PPS	467	368	Inal, O.
sin refuerzo	181	171	Quan, D.
PET	331	421	Quan, D.
PPS	243	368	Quan, D.
PA	337	316	Quan, D.
sin refuerzo	185	237	Beylergil, B.
PA 17	342	643	Beylergil, B.
PA 50	831	1940	Beylergil, B.
sin refuerzo	350	650	Ramirez, V.
PPS	625	980	Ramirez, V.

En la tabla 3.3 se pueden apreciar resultados para la energía de delaminación en materiales compuestos de resina epóxica con fibras de carbono, con refuerzos poliméricos intercalados entre láminas, referente a diferentes estudios.

En el gráfico comparativo de la figura 3.19 se puede apreciar que en toda ocasión (dentro de los cuatro estudios citados), el refuerzo agregado contribuye a un alza en las propiedades mecánicas en delaminación del material compuesto, demostrando que el entrelazado de velos termoplástico es una buena opción para obtener mejores propiedades. Los mayores valores de energía se obtuvieron con PPS y PA de 50 g/m²; alcanzando los 625 J/m² y 831 J/m², respectivamente.

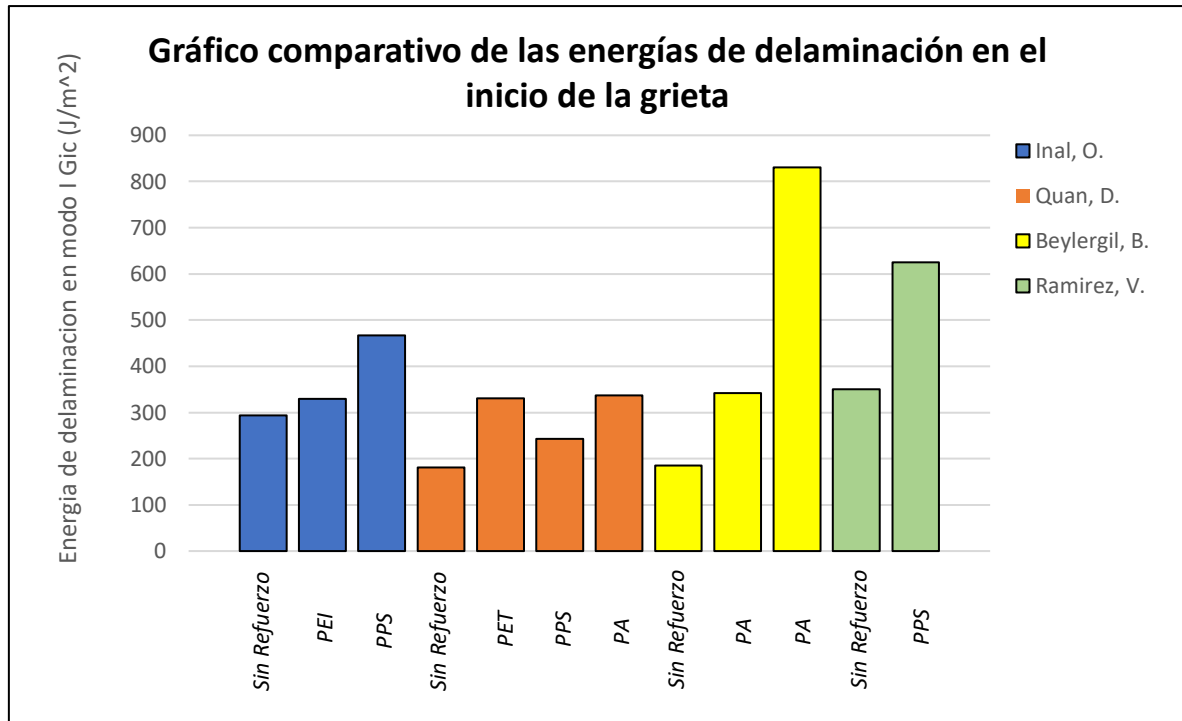


Figura 3.19. Gráfico de G_{IC} para diferentes refuerzos intercalados de velos de polímeros.
Fuente: Elaboración propia.

La mayor diferencia se encuentra en los refuerzos de PA, donde el que adquirió mayor valor de energía fue el más denso superficialmente. Varios autores citados anteriormente concuerdan en que una mayor densidad superficial, en este caso, aumenta considerablemente las propiedades mecánicas del material; sin embargo, cabe recordar que superando un límite esto podría producir efectos negativos por la mala dispersión de las cargas en la resina.

CAPITULO 4. CONCLUSIONES Y APLICACIONES

CONCLUSIONES

Ante el análisis efectuado en el presente informe de memoria, se puede decir que la investigación en materiales compuestos está totalmente vigente y con gran dedicación, ya que formalmente existen muchas variables que pueden contribuir en el comportamiento mecánico de estos, sin tener una línea estándar a seguir en el momento de su fabricación, pero obteniendo grandes propiedades mecánicas mejoradas.

Frente a esto, se encontraron puntos esenciales a tener en consideración; que variaron los resultados de los autores citados en el capítulo 3 y lograron obtener la mayor efectividad en el comportamiento frente a las propiedades mecánicas analizadas.

FRACTURA

El contenido de refuerzos en el material compuesto limita ampliamente el comportamiento mecánico de este, pese a que con contenidos entre 1% y 1,5% aproximadamente, se obtienen propiedades efectivas para la resistencia a la fractura, no ocurre lo mismo al continuar aumentándolos, causando un decaimiento en sus propiedades, por lo que los porcentajes nombrados son los ideales.

Esta variable va de la mano con el tipo de matriz que se desee utilizar, ya que en conjunto formarán el comportamiento en general del material, refiriéndonos a la alta o baja densidad que resultará de la mezcla. Como se pudo ver en la figura 3.2, una baja densidad de matriz adquiere un mayor aumento en el módulo de Young, soportando mayores cargas, pero aumentando su fragilidad a medida que aumenta el porcentaje de refuerzo. Esto puede evidenciarse de igual manera por los datos de la tabla 3.1, en la cual se indica un aumento de la resistencia a la fractura en una resina dúctil con un 1% de refuerzos integrados, sin embargo, aumentando este último parámetro a 1,5% la resistencia comienza a descender, asociándolo a un comportamiento cada vez más frágil del compuesto.

Las aglomeraciones que se puedan formar por parte de los refuerzos actúan como concentraciones de esfuerzo dentro del material, lo que facilitaría la propagación de una grieta o colaborarían en disminuir la resistencia a la fractura.

DELAMINACIÓN

En delaminación se hace fundamental la zona de resina entre laminas y la creación de puentes significativos en la zona de delaminación. Estos puentes se crean entre las fibras involucradas en el material por causa del ordenamiento que toman estas dentro de la matriz. Como se observó en la figura 3.12, al propagarse la grieta entre las fibras, estas quedan entrelazadas de alguna forma entre las dos vigas de la probeta aportando una mayor resistencia a la delaminación.

Sin embargo, no solo depende del ordenamiento de las fibras, ya que la zona de interfase junto a la matriz también son influencias para la generación de puentes. Al tener una zona interfacial más débil que la matriz, la grieta se propagará por entremedio de las fibras (siguiendo la interfase) creando una separación de esta; mientras que, en viceversa si la matriz es más débil que la zona interfacial, la grieta se propagará de mejor forma por la primera.

La incorporación de cargas de refuerzo entre los laminados ayuda considerablemente a aumentar la resistencia a la delaminación en estos materiales. La tabla 3.3 deja en evidencia este comportamiento, donde la energía de delaminación siempre se vio incrementada al agregar velos termoplásticos entre láminas, y de igual manera ocurre con refuerzos del orden nanométrico de grafeno. Sin embargo, como se mencionó anteriormente, se debe cuidar el exceso de partículas de refuerzo que puedan contribuir a un descenso en las propiedades requeridas, siendo recomendada una concentración del 1%.

Finalmente, en la tabla 4.1 se observan las principales mejoras para cada caso de comportamiento mecánico, donde el óxido de grafeno muestra grandes atribuciones ante la resistencia a la fractura; y, por otro lado, un refuerzo híbrido de nanotubos de carbono entrelazado con fibras cortas de carbono entrega la mayor resistencia frente a la delaminación, seguida del refuerzo nanométrico de velos poliméricos. Un refuerzo asociado con grupos funcionales o de manera híbrida entrega las mayores propiedades mecánicas.

Tabla 4.1. Porcentajes de mejora para los principales nanorefuerzos analizados, con 1% de concentración en peso para el modo I de fractura y delaminación. Fuente: Elaboración propia.

Fractura		Delaminación	
Refuerzo	Porcentaje de mejora	Refuerzo	Porcentaje de mejora
CNT	25,60%	G	41%
MWCNT	21,20%	SCF	73%
SCF	51,20%	CNT-SCF	125%
GO	105,90%	Velos termoplásticos	84%

APLICACIONES

Durante el transcurso de los años las personas se han dedicado a combinar materiales para obtener, en conjunto, requerimientos específicos como la rigidez. Los materiales compuestos nacen de la necesidad de adquirir propiedades que, un material por sí solo no puede entregar, por lo que la importancia que tienen en la ingeniería es el encontrar propiedades superiores en la combinación de dos componentes.

Una de las aplicaciones más importante en la actualidad es la utilización en la industria aeronáutica y espacial. Al tener una gran resistencia mecánica con una densidad muy inferior en comparación al acero, los materiales compuestos han sido utilizados para confeccionar alas de aviones, el fuselaje, zonas de los trenes de aterrizaje, hélices de helicópteros, entre otros (Anexo 2).

Su empleo es justificable ya que ayudan a reducir considerablemente el gasto de combustible. Por ejemplo, se estima que la reducción de 1 kg de peso, al sustituir un metal por un compuesto, significa un ahorro de 120 litros de combustible al año, favoreciendo un ahorro energético y de dinero (Sánchez 2011).

Capítulo 4. Conclusiones y aplicaciones

El transbordador espacial X-34 contiene una estructura fabricada en gran parte de materiales compuestos, entregando prestaciones de bajo coeficiente de expansión térmica, reducción de peso y elevada rigidez. Finalmente, en la tabla 4.2 se observan algunos ejemplos en distintas áreas.

Tabla 4.2. Ejemplos de piezas fabricadas con material compuesto. Fuente: Elaboración propia.

Área de aplicación	Ejemplos
Aeronáutica	Fuselaje, alas, tren de aterrizaje, flaps, estabilizador vertical.
Automóviles	Carrocería, parachoques, parrillas, alojamientos de las luces.
Náutica	Mástiles, cubiertas, lanchas, cascos.
Eléctrica	Cajas de interruptores, aislantes, paneles, conductores.
Deportes	Esquí, canoas, raquetas, cañas de pescar, piscinas.

REFERENCIAS

- NASSER, J., ZHANG, L. y SODANO, H., 2021. Laser induced graphene interlaminar reinforcement for tough carbon fiber/epoxy composites. *Composites Science and Technology* [en línea], vol. 201, no. October 2020, pp. 108493. ISSN 02663538. DOI 10.1016/j.compscitech.2020.108493. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2020.108493>.
- AHMADI-MOGHADAM, B. y TAHERI, F., 2015. Influence of graphene nanoplatelets on modes I, II and III interlaminar fracture toughness of fiber-reinforced polymer composites. *Engineering Fracture Mechanics* [en línea], vol. 143, pp. 97-107. ISSN 00137944. DOI 10.1016/j.engfracmech.2015.06.026. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.engfracmech.2015.06.026>.
- ZHAO, X., CHEN, W., HAN, X., ZHAO, Y. y DU, S., 2020. Enhancement of interlaminar fracture toughness in textile-reinforced epoxy composites with polyamide 6/graphene oxide interlaminar toughening tackifier. *Composites Science and Technology* [en línea], vol. 191, no. September 2019, pp. 108094. ISSN 02663538. DOI 10.1016/j.compscitech.2020.108094. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2020.108094>.
- YIN, B., WANG, J., JIA, H., HE, J., ZHANG, X. y XU, Z., 2016. Enhanced mechanical properties and thermal conductivity of styrene-butadiene rubber reinforced with polyvinylpyrrolidone-modified graphene oxide. *Journal of Materials Science*,
- WEN, Y., YIN, Q., JIA, H., YIN, B., ZHANG, X., LIU, P., WANG, J., JI, Q. y XU, Z., 2017. Tailoring rubber-filler interfacial interaction and multifunctional rubber nanocomposites by usage of graphene oxide with different oxidation degrees. *Composites Part B: Engineering* [en línea], vol. 124, pp. 250-259. ISSN 13598368. DOI 10.1016/j.compositesb.2017.05.006. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.compositesb.2017.05.006>.
- RASHEED, A., DADMUN, M.D. y BRITT, P.F., 2006. Polymer-nanofiber composites: Enhancing composite properties by nanofiber oxidation. *Journal of polymer science*,
- SUN, Z., ZHAO, Z.K., ZHANG, Y.Y., LI, Y.Q., FU, Y.Q., SUN, B.G., SHI, H.Q., HUANG, P., HU, N. y FU, S.Y., 2021. Mechanical, tribological and thermal properties of injection molded short carbon fiber/expanded graphite/polyetherimide composites. *Composites Science and Technology* [en línea], vol. 201, no. September 2020, pp. 108498. ISSN 02663538. DOI 10.1016/j.compscitech.2020.108498. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2020.108498>.
- ASHBY, M.F., 2014. Materials selection in mechanical design. *Lecture Notes in Mechanical Engineering*, vol. 16, pp. 145-153. ISSN 21954364. DOI 10.1007/978-3-319-05203-8_21.

Referencias

- WANG, L., ZHANG, L. y TIAN, M., 2012. Effect of expanded graphite (EG) dispersion on the mechanical and tribological properties of nitrile rubber/EG composites. *Wear* [en línea], vol. 276-277, pp. 85-93. ISSN 00431648. DOI 10.1016/j.wear.2011.12.009. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.wear.2011.12.009>.
- BUITRAGO, B., 2012. *Comportamiento de estructuras de material compuesto sometidas a cargas impulsivas*. S.l.: s.n.
- GÓMEZ, V., 2017. *Caracterización mecánica de materiales compuestos manufacturados fuera de autoclave*. S.l.: s.n.
- SÁNCHEZ, L., 2011. *Análisis mecánico y fisicoquímico de un material compuesto de matriz termoestable y refuerzo de fibra de carbono: comparativa de propiedades del material curado fuera y dentro de autoclave*. S.l.: s.n.
- HINRICHSEN, J., 2003. Praxis-Seminar Luftfahrt, Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg, DGLR, VDI Hamburg. . S.l.:
- İNAL, O., AKBOLAT, M.Ç., SOUTIS, C. y KATNAM, K.B., 2021. Toughening mechanisms in cost-effective carbon-epoxy laminates with thermoplastic veils: Mode-I and in-situ SEM fracture characterisation. *International Journal of Lightweight Materials and Manufacture*, vol. 4, no. 1, pp. 50-61. ISSN 25888404. DOI 10.1016/j.ijlmm.2020.07.003.
- BEYLERGIL, B., TANOĞLU, M. y AKTAŞ, E., 2018. Effect of polyamide-6,6 (PA 66) nonwoven veils on the mechanical performance of carbon fiber/epoxy composites. *Composite Structures*, vol. 194, no. July 2017, pp. 21-35. ISSN 02638223. DOI 10.1016/j.compstruct.2018.03.097.
- RAMIREZ, V.A., HOGG, P.J. y SAMPSON, W.W., 2015. The influence of the nonwoven veil architectures on interlaminar fracture toughness of interleaved composites. *Composites Science and Technology* [en línea], vol. 110, pp. 103-110. ISSN 02663538. DOI 10.1016/j.compscitech.2015.01.016. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.compscitech.2015.01.016>.
- QUAN, D., BOLOGNA, F., SCARSELLI, G., IVANKOVIC, A. y MURPHY, N., 2020. Interlaminar fracture toughness of aerospace-grade carbon fibre reinforced plastics interleaved with thermoplastic veils. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing* [en línea], vol. 128, no. June 2019, pp. 105642. ISSN 1359835X. DOI 10.1016/j.compositesa.2019.105642. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2019.105642>.
- HOJO, M., ANDO, T., TANAKA, M., ADACHI, T., OCHIAI, S. y ENDO, Y., 2006. Modes I and II interlaminar fracture toughness and fatigue delamination of CF/epoxy laminates with self-same epoxy interleaf. *International Journal of Fatigue*, vol. 28, no. 10 SPEC. ISS., pp. 1154-1165. ISSN 01421123. DOI 10.1016/j.ijfatigue.2006.02.004.

Referencias

- STUPENENGO, F., 2011. *Materiales y materias primas*. . S.l.: s.n.,
- MIRAVETE, A., 2012. *Materiales Compuestos I*. S.l.: s.n.
- MONTERO GARCIA, L., 2010. *Estudio del mecanizado de materiales compuestos*. S.l.: s.n.
- ZHOU, Helezi, DU, X., LIU, H.Y., ZHOU, Huamin, ZHANG, Y. y MAI, Y.W., 2017. Delamination toughening of carbon fiber/epoxy laminates by hierarchical carbon nanotube-short carbon fiber interleaves. *Composites Science and Technology* [en línea], vol. 140, pp. 46-53. ISSN 02663538. DOI 10.1016/j.compscitech.2016.12.018. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.compscitech.2016.12.018>.
- BLONDEAU, C., PAPPAS, G.A. y BOTSIS, J., 2021. Crack propagation in CFRP laminates under mode I monotonic and fatigue loads: A methodological study. *Composite Structures* [en línea], vol. 256, no. July 2020, pp. 113002. ISSN 02638223. DOI 10.1016/j.compstruct.2020.113002. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2020.113002>.
- MARTINEZ, X., OLLER, S. y BARBERO, E., 2011. Caracterización de la delaminación en materiales compuestos mediante la teoría de mezclas serie/paralelo. *Revista Internacional de Metodos Numericos para Calculo y Diseno en Ingenieria*, vol. 27, no. 3, pp. 189-199. ISSN 1886158X. DOI 10.1016/j.rimni.2011.07.001.
- GOJNY ET AL, F., 2005. Influence of different carbon nanotubes on the mechanical properties of epoxy matrix composites, ,
- PRINCETON, 1988. *Polymer Matrix Composites*. S.l.: s.n.
- KUMAR, R., BHOWMIK, S., KUMAR, K. y DAVIM, J.P., 2020. Perspective on the mechanical response of pineapple leaf filler/toughened epoxy composites under diverse constraints. *Polymer Bulletin* [en línea], vol. 77, no. 8, pp. 4105-4129. ISSN 14362449. DOI 10.1007/s00289-019-02952-3. Disponible en: <https://doi.org/10.1007/s00289-019-02952-3>.
- GAPSTUR, C., 2018. Enhancing fracture toughness and thermo-mechanical properties of vinyl-ester composites using a hybrid inclusion of CNT and GNP. , vol. 2, no. August, pp. 227-249.
- GASTELUM, A.N., HERNÁNDEZ, M.S., GONZALEZ, B., VEGA, Y. y MUÑOZ, I.M., 2018. Análisis comparativo de las propiedades mecánicas de un material compuesto reforzado con fibras de carbono y las de su matriz polimérica de resina epóxica. *Matéria (Rio de Janeiro)*, vol. 23, no. 2. DOI 10.1590/s1517-707620180002.0428.
- PEGEL, S., PÖTSCHKE, P. y PETZOL, G., 2008. Dispersion, agglomeration and network formation of multiwalled carbon nanotubes in polycarbonate melts. *Polymer*, vol. 49, no. 4, pp. 297-984.

Referencias

- ALIG, I., PÖTSCHKE, P., LELLINGER, D., SKIPA, T., PEGEL, S., KASALIWAL, G.R. y VILLMOW, T., 2012. Establishment, morphology and properties of carbon nanotube networks in polymer melts. *Polymer* [en línea], vol. 53, no. 1, pp. 4-28. ISSN 00323861. DOI 10.1016/j.polymer.2011.10.063. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.polymer.2011.10.063>.
- DU, J.H., BAI, J. y CHENG, H.M., 2007. The present status and key problems of carbon nanotube based polymer composites. *Express Polymer Letters*, vol. 1, no. 5, pp. 253-273. ISSN 1788618X. DOI 10.3144/expresspolymlett.2007.39.
- OSELI, A., VESEL, A., MOZETIČ, M., ŽAGAR, E., HUSKIĆ, M. y SLEMENIK PERŠE, L., 2020. Nano-mesh superstructure in single-walled carbon nanotube/polyethylene nanocomposites, and its impact on rheological, thermal and mechanical properties. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing* [en línea], vol. 136, no. September 2019, pp. 105972. ISSN 1359835X. DOI 10.1016/j.compositesa.2020.105972. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2020.105972>.
- SCHULZ, S.C., FAIELLA, G., BUSCHHORN, S.T., PRADO, L.A.S.A., GIORDANO, M., SCHULTE, K. y BAUHOFER, W., 2011. Combined electrical and rheological properties of shear induced multiwall carbon nanotube agglomerates in epoxy suspensions. *European Polymer Journal* [en línea], vol. 47, no. 11, pp. 2069-2077. ISSN 00143057. DOI 10.1016/j.eurpolymj.2011.07.022. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.eurpolymj.2011.07.022>.
- ARAVAND, M., LOMOV, S. V., VERPOEST, I. y GORBATIKH, L., 2014. Evolution of carbon nanotube dispersion in preparation of epoxy-based composites: From a masterbatch to a nanocomposite. *Express Polymer Letters*, vol. 8, no. 8, pp. 596-608. ISSN 1788618X. DOI 10.3144/expresspolymlett.2014.63.
- MARTINEZ, X., OLLER, S. y BARBERO, E., 2011. Caracterización de la delaminación en materiales compuestos mediante la teoría de mezclas serie/paralelo. *Revista Internacional de Metodos Numericos para Calculo y Diseno en Ingenieria*, vol. 27, no. 3, pp. 189-199. ISSN 1886158X. DOI 10.1016/j.rimni.2011.07.001.
- ASTM D638-14, 2016. Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics. *ASTM International* [en línea], vol. 82, no. C, pp. 1-15. ISSN 21653992. DOI 10.1520/D0638-14.1. Disponible en: <http://www.astm.org/cgi-bin/resolver.cgi?E140%0Ahttp://www.astm.org/Standards/E8.htm>.
- YU, M., LOURIE, O., DYER, M.J., MOLONI, K., KELLY, T.F. y RUOFF, R.S., 2000. Strength and Breaking Mechanism of Multiwalled Carbon Nanotubes Under Tensile Load. , vol. 287, no. January, pp. 637-641.

Referencias

- LU, Z., YAO, S., DONG, Y., WU, D., PAN, H., HUANG, X., WANG, T., SUN, Z. y CHEN, X., 2020. Earth-abundant coal-derived carbon nanotube/carbon composites as efficient bifunctional oxygen electrocatalysts for rechargeable zinc-air batteries. *Journal of Energy Chemistry* [en línea], vol. 56, pp. 87-97. ISSN 20954956. DOI 10.1016/j.jechem.2020.07.040. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.jechem.2020.07.040>.
- ASTM INTERNATIONAL, 2013. (ASTM D 5054) - Standard Test Methods for Plane-Strain Fracture Toughness and Strain Energy Release Rate of Plastic Materials. *ASTM Book of Standards*, vol. 99, no. Reapproved 2007, pp. 1-9. DOI 10.1520/D5045-14.priate.
- COUSSY, J., 2015. *Study of the effect of carbon nanotubes on the reinforcement of epoxy resins*. S.l.: Universidad de Concepción.
- VARGAS ASTUDILLO, D.R., 2016. Síntesis de óxido de grafeno reducido y aminado químicamente y su influencia en las propiedades eléctricas y mecánicas de nanocompósitos a base de caucho natural. , pp. 72.
- DOLORES, M. y GUZMÁN, V., 2016. F ACULTAD DE C IENCIAS . D EPARTAMENTO DE I NGENIERÍA Q UÍMICA . TRATAMIENTO DE SUELOS CONTAMINADOS CON SELECTIVAS Directores : ,
- CALLISTER, W.D. y RETHWISCH, D.G., 2009. *Materials science and engineering an introduction*. 8a. S.l.: s.n.
- MAY, C., 1988. *Epoxy resins: chemistry and technology*. 2nd. S.l.: s.n. ISBN 0824776909.
- CHUNG, D.D., 1994. *Carbon fiber composites. [Electronic]*. S.l.: s.n. ISBN 0750691697.
- NOSRATI, H., SARRAF-MAMOORY, R., LE, D.Q.S. y BÜNGER, C.E., 2020. Enhanced fracture toughness of three dimensional graphene- hydroxyapatite nanocomposites by employing the Taguchi method. *Composites Part B: Engineering* [en línea], vol. 190, no. June 2019, pp. 107928. ISSN 13598368. DOI 10.1016/j.compositesb.2020.107928. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2020.107928>.
- K. CHAWLA, K., 2013. *Composite Materials*. S.l.: s.n. ISBN 9780387743646.
- HARRIS, B., 1999. Engineering composite materials. *Composites*, ISSN 00104361. DOI 10.1016/0010-4361(87)90420-4.
- SHOKRIEH, M.M. y ZEINEDINI, A., 2016. Effect of CNTs debonding on mode I fracture toughness of polymeric nanocomposites. *Materials and Design* [en línea], vol. 101, pp. 56-65. ISSN 18734197. DOI 10.1016/j.matdes.2016.03.134. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.matdes.2016.03.134>.

Referencias

- AYATOLLAHI, M.R., SHADLOU, S. y SHOKRIEH, M.M., 2011. Fracture toughness of epoxy/multi-walled carbon nanotube nano-composites under bending and shear loading conditions. *Materials and Design* [en línea], vol. 32, no. 4, pp. 2115-2124. ISSN 02641275. DOI 10.1016/j.matdes.2010.11.034. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.matdes.2010.11.034>.
- ANDERSON, T.L., 2020. *Fracture mechanics: fundamentals and applications*. S.l.: s.n. ISBN 9781420058215.
- RIVAS, M.J., ROMÁN, J. y COSME, M.L., [sin fecha]. *VT Aplicaciones actuales y futuras de los nanotubos de carbono*. S.l.: s.n. ISBN 9788461215287.

ANEXOS

Anexo 1: Autoclave grande utilizado para fabricar las alas de un Boeing 787. Fuente: K.K. Chawla, 2013



Anexo 2: Partes fabricadas de material compuesto en avión comercial Airbus A-380. Fuente: Hinrichsen 2003.

