

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