

# Contenido

Prólogo . . . . .	ix
Introducción . . . . .	x
Objetivos . . . . .	xi
<b>1 Antecedentes</b>	<b>1</b>
1.1 Materiales y compuestos poliméricos . . . . .	1
1.1.1 Materiales poliméricos . . . . .	1
1.1.2 Materiales compuestos de matriz polimérica . . . . .	2
1.2 Nanocompuestos . . . . .	3
1.2.1 Definición y clasificación . . . . .	4
1.2.2 Propiedades, aplicaciones y potencialidades . . . . .	4
1.2.3 Refuerzos nanométricos . . . . .	5
1.2.4 Nanocompuestos poliméricos . . . . .	6
1.3 Nanotubos de carbón . . . . .	7
1.3.1 Definición y clasificación . . . . .	8
1.3.2 Propiedades . . . . .	9
1.3.3 Aplicaciones y retos . . . . .	10
1.4 Modelado numérico . . . . .	11
1.4.1 Modelado de Elemento Finito . . . . .	13
1.4.2 Alcances y limitaciones . . . . .	14
1.5 Estado del arte . . . . .	15
<b>2 Metodología experimental</b>	<b>17</b>

2.1	Materiales . . . . .	17
2.2	Silanización de nanotubos . . . . .	19
2.3	Fabricación de nanocompuestos . . . . .	20
2.4	Microscopía Electrónica de Barrido (SEM) . . . . .	21
2.5	Análisis de Energía Dispersa por rayos X (EDAX) . . . . .	22
2.6	Espectroscopía de Fotoelectrones por rayos X (XPS) . . . . .	23
2.7	Ensayo de Tensión . . . . .	23
2.8	Ensayo de Impacto . . . . .	24
2.9	Ensayo de Fractura . . . . .	24
2.10	Rugosidad superficial por Microscopía de Fuerza Atómica . . . . .	25
2.11	Análisis Mecánico-Dinámico (DMA) . . . . .	26
2.12	Medición de Conductividad Eléctrica . . . . .	27
<b>3</b>	<b>Modelado de Elemento Finito</b>	<b>29</b>
3.1	Geometría y volúmenes representativos . . . . .	29
3.2	Obtención de propiedades efectivas mediante teoría de elasticidad . . . . .	32
3.3	Casos de carga . . . . .	33
3.3.1	Caso 1: Carga axial . . . . .	34
3.3.2	Caso 2: Compresión radial uniforme . . . . .	36
3.3.3	Caso 3: Torsión . . . . .	38
3.4	Modelos de Elemento Finito . . . . .	39
3.4.1	Análisis . . . . .	40
3.4.2	Elementos y mallado . . . . .	40
3.4.3	Propiedades materiales . . . . .	42
3.4.4	Condiciones de frontera y cargas . . . . .	44
3.4.5	Validación . . . . .	45
<b>4</b>	<b>Resultados experimentales</b>	<b>47</b>
4.1	Caracterización de nanotubos de carbón . . . . .	47
4.1.1	Composición química . . . . .	47

4.1.2	Micrograffas . . . . .	49
4.2	Caracterización de nanocompuestos . . . . .	50
4.2.1	Composición química . . . . .	50
4.2.2	Dispersión de nanotubos en la matriz . . . . .	51
4.2.3	Ensayo de Tensión . . . . .	52
4.2.4	Resistencia al Impacto . . . . .	54
4.2.5	Tenacidad a la Fractura . . . . .	55
4.2.6	Análisis de superficies de fractura . . . . .	56
4.2.7	Rugosidad de superficies de fractura . . . . .	58
4.2.8	Análisis Mecánico-Dinámico . . . . .	60
4.2.9	Conductividad eléctrica . . . . .	62
<b>5</b>	<b>Predicciones numéricas</b>	<b>64</b>
5.1	Validación de modelos . . . . .	64
5.2	Distribución de esfuerzos . . . . .	66
5.2.1	Esfuerzos longitudinales . . . . .	66
5.2.2	Esfuerzos radiales y tangenciales . . . . .	73
5.3	Propiedades elásticas del nanocompuesto . . . . .	81
	<b>Conclusiones y recomendaciones</b>	<b>88</b>
	<b>Apéndice A Propiedades efectivas de volúmenes representativos</b>	<b>90</b>
	<b>Bibliografía</b>	<b>95</b>

# Resumen

En este trabajo se investigaron experimentalmente las propiedades mecánicas de una resina epóxica modificada con 1 % en peso de nanotubos de carbón de pared múltiple, utilizando CNTs puros y tratados superficialmente con un agente de acoplamiento tipo silano (5 % respecto al peso de CNTs). En las micrografías se observó una tendencia a la aglomeración de los CNTs y moderada dispersión de ellos en la resina. Los ensayos mecánicos indican que los compuestos con CNTs, respecto a la resina, presentan mejoras muy marginales en las propiedades a tensión e impacto, e incrementos substanciales en la tenacidad a la fractura, así como una mejora en sus propiedades mecánico-dinámicas. La conductividad eléctrica de los nanocompuestos no aumentó con la inclusión de este tipo de CNTs. La funcionalización de CNTs probablemente fue incompleta pues no se observó efecto aparente. Se encontró evidencia de los mecanismos “pull-out” y “desviación de grieta” como responsables del incremento en la tenacidad a la fractura. También se modeló el comportamiento mecánico de un compuesto CNT/polímero/interfase por medio del método de elemento finito, obteniendo perfiles de esfuerzos y propiedades elásticas efectivas de dicho compuesto variando el espesor de interfase y usando un gradiente lineal y exponencial en el módulo elástico de la interfase. Los modelados demuestran que el espesor de interfase y el tipo de gradiente interfacial influyen en las propiedades elásticas del compuesto, en especial cuando las diferencias de módulos entre CNT y matriz es alta. En base a estas simulaciones, se cree que el espesor de interfase es al menos del orden del espesor del CNT y que el gradiente de propiedades elásticas en la interfase es tipo exponencial.