

Contenido

Prólogo	ix
Introducción	x
Objetivos	xi
1 Antecedentes	1
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
2 Metodología experimental	17

2.1	Materiales	17
2.2	Silanización de nanotubos	19
2.3	Fabricación de nanocomuestos	20
2.4	Microscopía Electrónica de Barrido (SEM)	21
2.5	Ánalisis 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
3	Modelado de Elemento Finito	29
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
4	Resultados experimentales	47
4.1	Caracterización de nanotubos de carbón	47
4.1.1	Composición química	47

4.1.2 Micrografías	49
4.2 Caracterización de nanocomuestos	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
5 Predicciones numéricas	64
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 nanocomuesto	81
Conclusiones y recomendaciones	88
Apéndice A Propiedades efectivas de volúmenes representativos	90
Bibliografía	95

Resumen

En este trabajo se investigaron experimentalmente las propiedades mecánicas de una resina epoxíca 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 nanocomuestos 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.