

Estado del arte de materiales para estructuras CubeSat

MAURICIO TORRES ARELLANO¹, Saul Ledesma-Ledesma¹, Nayeli Camacho¹, Perla Alcántara-Llanas¹, and Pedro González-García¹

¹Affiliation not available

February 22, 2024

Proyecto AEM-CONACYT 275783: Diseño y caracterización de materiales compuestos para estructuras de nanosatélites tipo CubeSat.

Generalidades de los materiales compuestos

Objetivo

El objetivo de la Etapa 1: *Selección, diseño y caracterización de materiales compuestos (2017)*, es seleccionar, desarrollar y caracterizar materiales compuestos poliméricos reforzados con fibra de carbono y nanopartículas inorgánicas que puedan ser candidatos viables para construir estructuras de nanosatélites tipo CubeSat®.

Para alcanzar este objetivo se realizó una investigación bibliográfica con la cual se encontraron y documentaron los posibles materiales de refuerzo compatibles con fibra de carbono que podrían permitir la explotación de las propiedades mecánicas inherentes del material compuesto para aplicaciones estructuras de nanosatélites tipo CubeSat® (ver Figura 1).

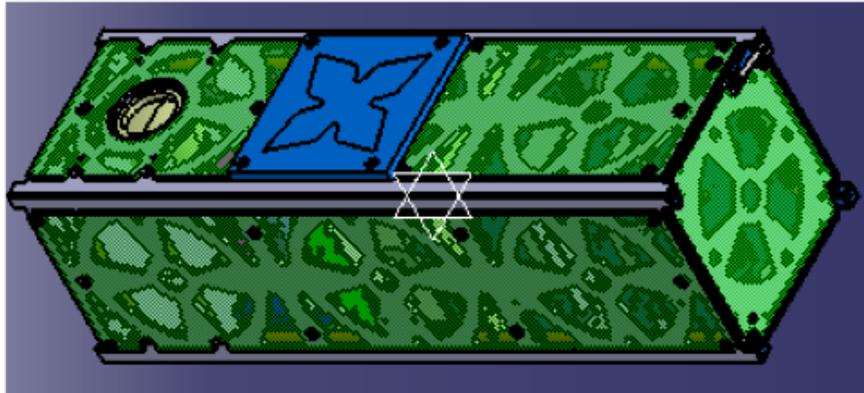


Figura 1. Diseño conceptual de un nanosatélite tipo CubeSat (IPNCubeSat) [3].

Materiales compuestos

Un material compuesto es el resultado de la combinación de dos o más materiales con el fin de obtener una combinación única de las propiedades originales de cada uno de los componentes del compuesto. Los materiales compuestos poliméricos reforzados con fibras largas son los más recurrentes en aplicaciones estructurales,

tal es el caso de los plásticos reforzados con fibra de vidrio (GFRP por sus siglas en inglés) y los plásticos reforzados con fibra de carbono (CFRP por sus siglas en inglés).

En el material compuesto, la fibra ofrece resistencia y rigidez mientras que la matriz permite la transmisión de cargas, la cohesión entre fibras y, en mayor medida, las propiedades térmicas y eléctricas del material. Las propiedades del material compuesto están determinadas principalmente por:

1. Las propiedades de la fibra.
2. Las propiedades de la matriz.
3. La adhesión entre la fibra y la matriz.
4. La geometría y orientación de las fibras en el material compuesto.
5. La proporción de la fibra/resina existente en el material compuesto.

Matrices poliméricas

En este caso de estudio, las matrices termoestables son las que corresponden a la investigación en curso y como puede observarse en el esquema (Figura 2), en el que se muestran los principales tipos de matrices, son el producto de dos componentes líquidos: resina-catalizador y/o resina-endurecedor (ver Figura 2). La mezcla de los dos componentes hace que los líquidos se solidifiquen mediante un proceso de polimerización o curado, reacción química irreversible que permite obtener un material insoluble e infusible.

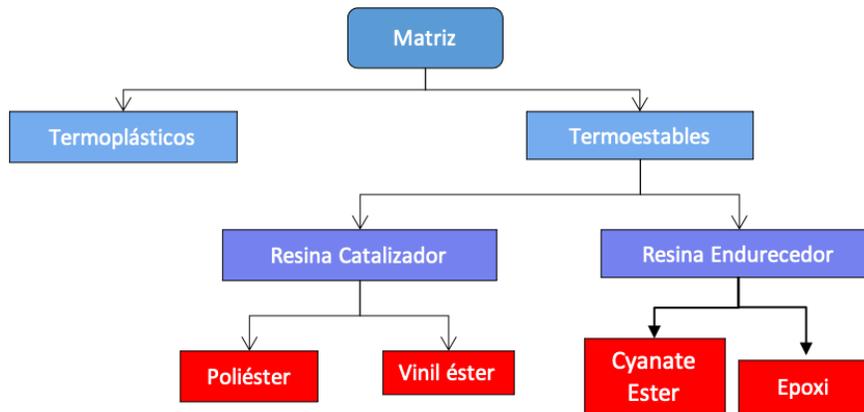


Figura 2. Clasificación de las matrices poliméricas utilizadas en plásticos reforzados.

a) Poliéster: Estas son las resinas más económicas que proveen al material compuesto de una interfaz débil, motivo por el cual son poco recomendadas para aplicaciones estructurales y no deben ser combinadas con fibras de aramida, fibras de carbono estructural o de alto módulo. Por lo general funcionan bien con fibra de vidrio para aplicaciones no estructurales.

b) Viniléster: Estas resinas tienen típicamente un tercio de resistencia de las resinas epoxi. Tienen pobre adherencia a las fibras de carbono y de aramida, por lo que tampoco es recomendable para aplicaciones estructurales. Sin embargo, han tenido auge en aplicaciones estéticas y contra desgaste o abrasión.

c) Epóxicas: Las resinas epoxi tienen mucho mejores propiedades adhesivas que las del poliéster y las viniléster. Su adhesión superior se debe a dos razones principales:

La presencia de grupos hidróxilo polares y grupos éter mejora la adhesión a nivel molecular.

A nivel macroscópico, las resinas epoxi se curan con una baja contracción. Los diversos contactos establecidos entre la superficie de la resina líquida y el refuerzo no se ven afectados significativamente durante el curado.

El resultado es una interfaz más homogénea entre las fibras y resina y una mejor transferencia de carga entre los diferentes componentes de la matriz. Una alta adhesión entre la matriz y la fibra es especialmente importante en la resistencia a la formación de microgrietas.

d) Cianatoéster: Las resinas cianatoéster tienen como ventaja principal una elevada temperatura de transición vítrea ($T_g = 400^\circ\text{C}$), baja constante dieléctrica, estabilidad térmica y baja flamabilidad, lo que la hace excelente candidata para aplicaciones electrónicas y espaciales. La Tabla 1 muestra un comparativo cualitativo entre la resina epóxi y la resina cianatoéster.

Tabla 1. Comparación cualitativa de las propiedades de resinas epóxi y cianatoéster.

Propiedad	Epoxi	Cianatoéster
Tg ($^\circ\text{F}/^\circ\text{C}$)	Media (250/120)	Alta (390/195)
Cure (min@ $^\circ\text{C}$)	Medio (120@120)	Alto (120@180)
TML (%)	Alta (0.7)	Bajo (0.2)
CVCM (%)	Similar (0.01)	Similar (0.01)
CTE ($\mu\text{m}/\text{m}\cdot^\circ\text{C}@68^\circ\text{F}$)	Similar (50)	Similar (40)
E (GPa)	Similar (3)	Similar (3.7)
Absorción de humedad	Medio	Baja
Absorción rayos UV	Medio	Baja
Precio	Medio (400 USD/gal)	Alto (2000 USD/gal)

Fibras de refuerzo

Las fibras continuas y con larga relación de aspecto longitud-diámetro son preferibles para aplicaciones estructurales gracias a sus propiedades mecánicas intrínsecas. Las fibras continuas más utilizadas para aplicaciones estructurales son: la fibra de vidrio, fibra de carbono y fibras de aramida, las cuales se describen brevemente a continuación.

a) Fibra de vidrio: Su estructura a base de silicatos y cal presenta propiedades de resistencia y rigidez de bajas a moderadas. La fibra de vidrio E es la más bajo en la clasificación, seguido del por la S, la cual tiene una relación de propiedades/precio intermedio entre la fibra de carbono y la fibra de vidrio E.

b) Fibra de carbono: Obtenida a partir de la carbonización del poliacrilonitrilo (PAN), la fibra de carbono presenta excelentes propiedades específicas (relación propiedades/peso), aunque presenta fragilidad y baja resistencia a la fatiga. El precio es alto, 25 dólares/ m^2 , y su disponibilidad en el mercado es variable.

c) Fibra de aramida: La fibra de aramida, es la que presenta las mejores propiedades específicas, sobretodo en cuanto a tenacidad y resistencia al impacto y la abrasión. Sin embargo, su alta dificultad de procesado, manufactura y costo, hace que no sea viable en aplicaciones industriales de gran volumen.

La Tabla 2 muestra un comparativo de las propiedades mecánicas entre las principales fibras usadas en la manufactura de plásticos reforzados.

Tabla 2. Comparativo entre diferentes fibras utilizadas en materiales compuestos espaciales [2].

Fibra	Densidad (g/cc)	Diámetro de fibra (μm)	Módulo de Elasticidad E (GPa)	Resistencia última σ_u (MPa)	Expansión Térmica TE ($*10^{-6} \epsilon/^\circ\text{C}$)
Vidrio E	2.5-2.6	5-20	70-80	3000-3500	5.0
Vidrio S	2.6	8-14	80-90	3500-4600	5.6
Carbono	1.7-1.9	5-8	230-580	2500-5900	-0.4 – -1.2
Aramida	1.4-1.5	10-12	80-185	2300-2900	16.9-17.3

La información previamente citada pretende mostrar la familia de constituyentes para fabricar materiales compuestos poliméricos reforzados con fibras para aplicaciones en estructuras de nanosatélites. Es natural llegar a la conclusión de que esta familia de materiales debe contemplar fibra de carbono con resinas epoxi o cianatoéster. Las razones abarcan desde las propiedades mecánicas, físicas, costo y aplicación en el mercado.

Establecido lo anterior, se realizó un estudio técnico y de mercado de los constituyentes disponibles en el continente, en lo referente a los potenciales materiales compuestos que pudieran ser utilizados en estructuras nanosatelitales.

Estudio técnico y de mercado de materiales compuestos para estructuras de nanosatélites

Los materiales del CubeSat deberán cumplir los siguientes criterios [1]:

1. Desgasificación baja (low outgassing) para evitar contaminación del resto de la nave durante la integración, pruebas y puesta en marcha.
2. Los materiales deberán tener una pérdida de masa total (Total Mass Loss - TML) <1.0 %.
3. Las aleaciones base aluminio Al7075, Al6061, Al5005 y/o Al5052 se sugieren tanto para la estructura principal del CubeSat como para los rieles. Si otro material es utilizado, la expansión térmica (CTE) debe ser similar al Al7075-T3 (23.6 $\mu\text{m}/\text{m}\cdot^\circ\text{C}@68^\circ\text{F}$).
4. Se recomienda que los materiales volátiles (Collected Volatile Condensable Materials -CVCM) sean menores al 1.0 %.

Si se utilizan otros materiales, se deben realizar las pruebas pertinentes y presentar un Reporte de Especificaciones y Pruebas de Aceptación ante el personal de CalPoly/Stanford para ser aprobado [1]. Por estas razones, se propone desarrollar y evaluar una familia de materiales compuestos, la cual se divide en pre-impregnados (sistema fibra-resina lista a curar mediante autoclave conocida como prepreg) y de resinas para mezclar con fibra de carbono por vía húmeda (infusión o moldeo por transferencia de resina – RTM).

En la tabla 3, se describen las características de los pre-impregnados espaciales encontrados en el mercado.

Tabla 3. Comparativo entre diferentes preimpregnados de aplicación espacial.

Prepreg	Fibra-Resina	T _g (°F/°C)	Cure (min@°C)	TML (%)	CVCM (%)	TE (μμ/μ- ^{oa} @68°F)	E ₁ (GPa)
RS3/T300-3K (Tencate®)	Carbono-Cianatoéster	490/254	120@177	0.22	0.01	43	75
RS36/T300-3K (Tencate®)	Carbono-epóxi	374/190	90@177	0.4	0.01	TBD	70
Ex1522/IM7 (Tencate®)	Carbono-epóxi	396/202	120@177	0.28	0.01	88	172
954/IM7 (Hexcel®)	Carbono-epóxi	376/191	120@180	TBD	TBD	28*	160
M18/G947 (Hexcel®)	Carbono-Epóxi	388/198	120@180	TBD	TBD	55	127
M21/T700GC	Carbono-Epóxi	397/203	240@180	TBD	TBD	50	135

Los materiales de TenCate® y Hexcel® se han utilizado en casi todos los programas de satélites en el mundo occidental. La tecnología de TenCate® destaca en pre-impregnados dimensionalmente estables, de baja emisión y baja humedad, permite un rendimiento excelente con una alta fiabilidad en estructuras de satélites compuestos que debe soportar ambientes y ciclos térmicos muy extremos. Por otra parte, los preimpregnados Hexcel® han sido concebidos para aplicaciones estructurales como el fuselaje de las aeronaves Boeing B787 y del Airbus A380.

Las estructuras a base de preimpregnados requieren infraestructura específica para su manufactura, que contempla cuarto gris y autoclave con presión mayor a 5 atm y temperatura de operación de 200°C. El consorcio CENTA cuenta con un laboratorio de manufactura de materiales compuestos con dichas características, por lo que resulta viable proponer alguno de estos materiales compuestos.

Debido a las políticas de consumo energético responsable, los materiales compuestos “out-of-autoclave (OOA)” están siendo considerados para aplicaciones estructurales. Es por ello que las técnicas de manufactura de materiales compuestos por vía húmeda, como infusión o RTM, están teniendo avances significativos para aplicaciones aeroespaciales. En el proyecto se decidió realizar igualmente el estudio de mercado de resinas termoestables que cumplieran los requerimientos para la construcción de un CubeSat® con las técnicas de manufactura previamente mencionadas. En la tabla 4, se describen las características de las resinas termoestables espaciales encontrados en el mercado para la manufactura de materiales compuestos por vía húmeda.

Tabla 4. Resinas termoestables existentes en el mercado internacional para aplicaciones espaciales.

Resina	Tipo	T _g (°F/°C)	Cure (min@°C)	TML (%)	CVCM (%)	TE (μμ/μ-° @68°F)	E (GPa)
RS 17B (Tencate®)	Epóxi	314/172	120@135	0.71	0	61	3.0
RS 36 (Tencate®)	Epóxi	379/193	90@177	0.63	0	70	3.0
RS 50 (Tencate®)	Epóxi	397/203	120@177	TBD	TBD	70	3.7
TC 380 (Tencate®)	Epóxi	394/201	120@180	0.83	0.01	70	4.0
Ex1510 (Tencate®)	Cianoéster	379/193	90@177	0.82	0.01	64	3.0
RS 16 (Tencate®)	Cianoéster	450/230	120@135	0.7*	0.01*	43	4.1
9543 (Hexcel®)	Cianoéster	450/232	80@180	0.2	0.01	30.6	2.8
9546 (Hexcel®)	Cianoéster	300/149	120@120	0.07	0	TBD	3.7
996 (Hexcel®)	Cianoéster	330/165	80@140	0.17	0.01	31	3.0
M18 (Hexcel®)	Epóxi	388/198	120@180	TBD	TBD	TBD	3.5
EPOLAM 2015 (Axson®)	Epóxi	180/90	150@80	TBD	TBD	TBD	2.9
EPOLAM 2019 (Axson®)	Epóxi	180/110	240@100	TBD	TBD	62	3.5

Resina	Tipo	T _g (°F/°C)	Cure (min@°C)	TML (%)	CVCM (%)	TE (μm/μ-°) @68°F	E (GPa)
EPOLAM 2500 (Axson®)	Epóxi	212/100	120@100	TBD	TBD	50	3.9

De los materiales citados el preimpregnado M21T700 GC Hexcel® y las resinas epóxicas EPOLAM 2015, 2019 y 2500 Axson®, destacan por su relación costo-propiedades y disponibilidad en el mercado mexicano.

El empleo de materiales compuestos en nanosatélites CubeSat se ha incrementado en los últimos años, sin embargo las iniciativas mundiales siguen siendo escasas (ver Figura 3). Dentro de los proyectos más destacados se puede citar el SwissCube (Suiza) que considera una estructura interna de compuesto carbono-epoxi M18 Hexcel – M55J Toray [4, 5]. La Universidad de Patras (Grecia) está desarrollando estructuras satelitales con preimpregnado Hexcel T300-5208 [5]. Por otra parte, la Universidad de Tehran ha propuesto fibra de carbono Thornel P140 con resina epóxica para sus desarrollos espaciales [6, 7]. Finalmente la Universidad Tecnológica de Noruega reporta un preimpregnado comercial, en sus estructuras de pico-nanosatélites [8].

Es por ello que ante el auge que los materiales compuestos están teniendo para estructuras nanosatelitales por su relación propiedades-costo, se prevén desarrollos tecnológicos en aumentar las propiedades térmicas y de radiación de materiales compuestos carbono-epoxi o carbono-cianatoéster comerciales. Además existen actualmente iniciativas latinoamericanas para hacer accesible la tecnología espacial a través de los nanosatélites, como el proyecto SUCHAI [9].

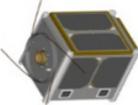
MISSION		SRT. MAT.	SRT. MASS	MASS RATIO*	MFG PROCESS
AAU		Al 7075	400 g	40%	The frame consists of 4 rails with connecting pieces between them. On the outside the solar cells are mounted
HERMES		Al 7075 & 6061	300 g	30%	External solid frame and solar panels attached to it (with bolts)
DTUsat		Al 6061	300 g	30%	Built on a monolithic “wire-frame” cube, milled out of a solid piece of aluminum. The faces are screw mounted for serviceability
SwissCube		Al 7022-651 & Carbon	300 g	30%	Monobloc frame, spacers and faceplates screwed together
SEEDS		Al 7075 & 6061	350 g	35%	Compose of two boards and trusses. All of the six faces compose the skin of two boards and trusses maintaining an internal system
STR.: Structure		MAT.: Material		MFG: Manufacturing	Ref.: Reference

Figura 3. Comparación de los materiales utilizados para diferentes Nanosatélites (CubeSat) en el mundo [5].

Ante los requerimientos ingenieriles de las estructuras nanosatelitales, la incorporación de partículas inorgánicas u orgánicas en el material compuestos se vislumbra como una de las alternativas tecnológicas para solventarlos. En la siguiente sección se desglosan las tendencias de dicha solución para incrementar las propiedades térmicas y de radiación de materiales compuestos.

Empleo de nanopartículas para materiales ingenieriles

Generalidades de las nanopartículas

Las nanopartículas son denominadas así por su tamaño que oscila entre 1×10^{-9} y 1×10^{-7} m. La nanotecnología es el estudio, diseño, creación, síntesis, manipulación y aplicación de materiales, aparatos y sistemas funcionales a través del control de la materia, la explotación de fenómenos y propiedades en la nanoescala. Cuando se manipula la materia a esta escala tan minúscula se presentan fenómenos y propiedades totalmente nuevas. Por lo tanto la comunidad científica ha estado utilizando esta tecnología desde hace algunas décadas para crear materiales, aparatos y sistemas novedosos con propiedades únicas.

Las nanopartículas generalmente son clasificadas en cuatro clases:

1. Base de carbono: Partículas compuestas mayoritariamente por carbono y suelen adoptar formas esféricas, elipsoidales o tubulares. Sus características principales son su reducido peso y mayor dureza, elasticidad, estabilidad térmica y conductividad eléctrica [10].
2. Base metálica: Estas partículas pueden ser puntos cuánticos o nanopartículas de oro, plata o de metales reactivos como el dióxido de titanio, entre otras [10].
3. Dendrímeros: Estos nanomateriales son polímeros nanométricos construidos a modo de árbol en el que las ramas crecen a partir de otras y así sucesivamente. Las terminaciones de cada cadena de ramas pueden diseñarse para ejecutar funciones químicas específicas (una propiedad útil para los procesos catalíticos). Además, debido a que los dendrímeros tridimensionales contienen cavidades interiores en las que se pueden introducir otras moléculas, pueden ser útiles para la administración de fármacos [10].
4. Nanocompuestos: Los compuestos combinan ciertas nanopartículas con otras o con materiales de mayor escala; el caso de arcillas nanoestructuradas es un ejemplo de uso extendido [10].

Síntesis de nanopartículas

Hay diversos métodos para crear nanopartículas, incluyendo la atrición, pirólisis y síntesis por plasma termal [10, 11]. En el proceso de atrición, partículas a macro y/o micro-escala son molidas en un molino de bola, un molino de bola planetario, u otro mecanismo reductor de tallas. Las partículas resultantes son clasificadas por aire en un elutriador para recuperar las nanopartículas [10].

En el método de pirólisis, un vapor precursor a alta presión es forzado a pasar a través de un orificio y posteriormente quemado. El sólido resultante es clasificado para recuperar partículas del óxido de los gases del producto. La pirólisis tradicional crea agregados y aglomerados más que partículas primarias individuales; sin embargo, en los últimos años se ha desarrollado la pirólisis por boquilla ultrasónica la cual mitiga la formación de aglomerados.

En la síntesis por plasma, la formación de este es capaz de liberar la energía necesaria para causar la vaporización de partículas micrométricas. Las temperaturas del plasma termal se encuentran alrededor de 10,000 K, lo que hace que el polvo sólido se evapore fácilmente. Las nanopartículas se forman al enfriarse el sistema mientras salen de la región del plasma. Los principales tipos de antorcha de plasma usados para producir nanopartículas son DC plasma jet, plasma por arco (arc plasma) y plasmas de inducción de radio frecuencia (RF). En los reactores de “jet-arc plasma” la energía necesaria para la evaporación y reacción viene de un arco eléctrico formado por el ánodo y el cátodo. Por ejemplo, la arena de sílice puede ser vaporizada con el plasma por arco a presión atmosférica, o delgados alambre de aluminio pueden ser vaporizados el

método de explosión de alambre. La mezcla resultante de gas plasma y vapor de sílice puede ser rápidamente enfriado con oxígeno, para asegurar la calidad de la sílice producida.

En la inducción por RF, la energía del plasma se genera mediante el campo electromagnético de una bobina inductora. El gas plasma no entra en contacto con electrodos, eliminando posibles fuentes de contaminación y permitiendo la operación de un amplio repertorio de gases, incluyendo inertes, reductores, oxidantes y corrosivos. Los niveles de potencia utilizados en unidades de laboratorio van desde 30 hasta 50 kW, y las unidades industriales se han probado con más de 1 MW. Debido a que la alimentación es por medio de goteo, es importante que el tamaño de las gotas sean suficientemente pequeñas para llegar a una evaporación completa. El método RF ha sido usado para sintetizar diferentes nanopartículas, por ejemplo óxidos, carburos y nitratos de titanio y silicio.

Citando los métodos de baja energía, la condensación de gas es frecuentemente usada para producir nanopartículas de metales con bajos puntos de ebullición. El metal es vaporizado en una cámara vacía y después enfriado con un flujo de gas inerte. El vapor del metal enfriado se condensa en nanopartículas las cuales pueden ser arrastradas en el flujo del gas [10].

Caracterización de nanopartículas

La caracterización de las nanopartículas es necesaria para establecer el entendimiento y control de la síntesis y aplicaciones de nanopartículas. La caracterización se lleva a cabo usando diferentes técnicas, principalmente de la ciencia de materiales. Entre las técnicas más comunes está la microscopía de transmisión de electrones y microscopía de barrido (TEM y SEM), microscopía de fuerza atómica (AFM), dispersión de luz dinámica (DLS), espectroscopia de fotoelectrones de rayos X (XPS), difracción de Rayos X (XRD), espectroscopia infrarroja por transformada de Fourier (FTIR) y espectroscopia visible ultravioleta. La mayoría de las técnicas de caracterización de estas nanopartículas son basadas en luz, pero una técnica de caracterización no óptica llamada Detección de pulso sintonizable resistivo (Tunable Resistive Pulse Sensing) ha sido desarrollada con el fin de medir simultáneamente el tamaño, concentración y superficie de una gran variedad de nanopartículas. Esta técnica que aplica el Principio de Coulter, permite la cuantificación de estas tres características de cada partícula con una alta resolución.

Nanopartículas de Alúmina

La alúmina se obtiene normalmente utilizando el proceso Bayer, ella se emplea industrialmente para obtener abrasivos, aisladores eléctricos, soporte para catalizadores, refractarios, material de relleno para polímeros, entre otros usos, y sus propiedades se pueden modificar variando la temperatura de calcinación y el tamaño de partícula [14].

Nanopartículas de óxido de zinc (ZnO)

Recientemente, la degradación del polímero por la radiación ultravioleta (UV) ha sido el foco de múltiples estudios en todas las industrias de ingeniería. [12, 13] Investigaciones recientes han demostrado que la incorporación de nanopartículas de ZnO puede mejorar su resistencia a los rayos UV de los compuestos poliméricos. Se ha encontrado que el uso de la cantidad apropiada de nano-ZnO disueltas en alcohol isopropílico, en un compuesto epóxico reforzado con fibra de vidrio y/o carbono, mejoran la resistencia a los rayos UV. En compuestos base poliuretano-acrílico se encontró cualitativamente una reducción importante del daño por radiación UV, utilizando nanopartículas de ZnO [13].

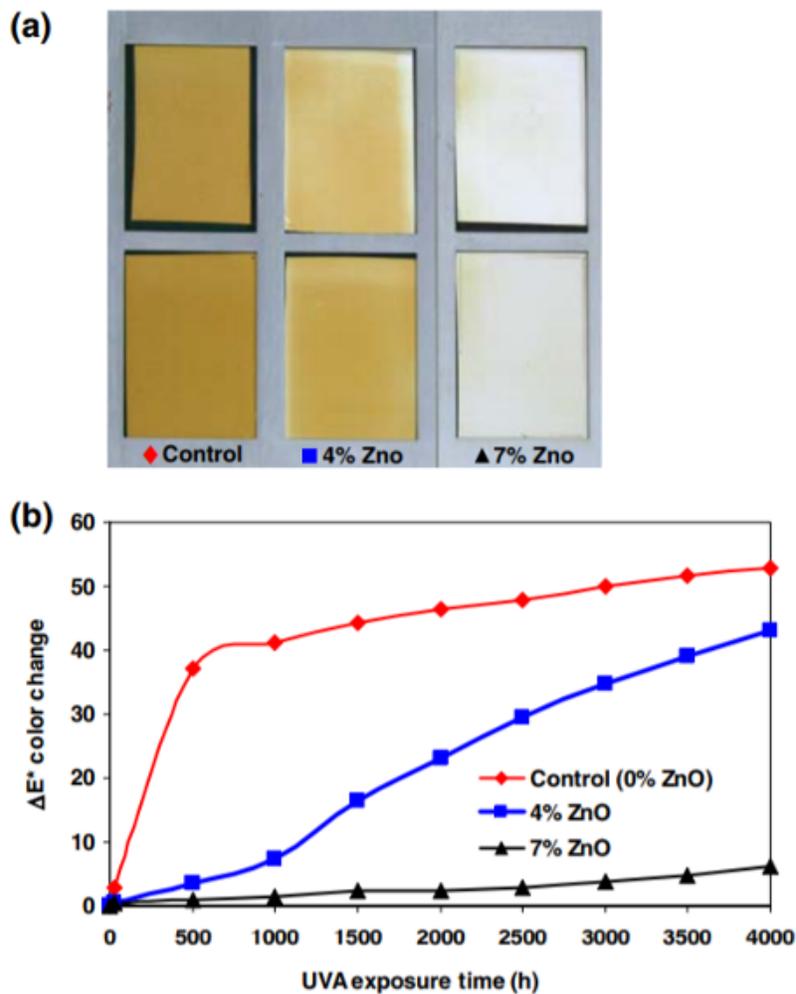


Figura 4. Poliuretano / acrílico con 4% y 7 % en peso de ZnO expuesta a radiación QUVA (320-400 nm) durante 4000 h. (a) Indicación cualitativa y (b) cuantitativa de la evolución del color de las muestras después de radiación [12].

Nanopartículas de carbono

Los nanotubos de carbono (CNT por sus siglas en inglés) y el grafeno son nanopartículas carbonosas (partículas con al menos una dimensión del orden de una millonésima de metro) con un grosor de un átomo de carbono y forma cilíndrica y plana.

Estas nanopartículas presentan las siguientes características:

1. Poseen sistemas uni- o bi-dimensionales.
2. Son semiconductores o metálicos dependiendo de su estructura.
3. Son muy buenos conductores, tanto del calor como de la electricidad.
4. Tiene una densidad baja (menor que la del aluminio).
5. Propiedades mecánicas y elásticas muy favorables.

Dentro de las aplicaciones de los CNT, se han aplicado en materiales compuestos para incrementar su

resistencia interlaminar y su conductividad térmica y eléctrica [14-17]. La interfaz de materiales compuestos epoxi-carbono se ha reforzado usando nanotubos de carbono alineados verticalmente, que actúan como freno de la propagación de grietas interlaminares previniendo la delaminación del material compuesto. Los CNT actúan como grapas para mantener juntas las capas de compuesto, fenómeno conocido como puenteo de fibras (fiber bridging) [16].

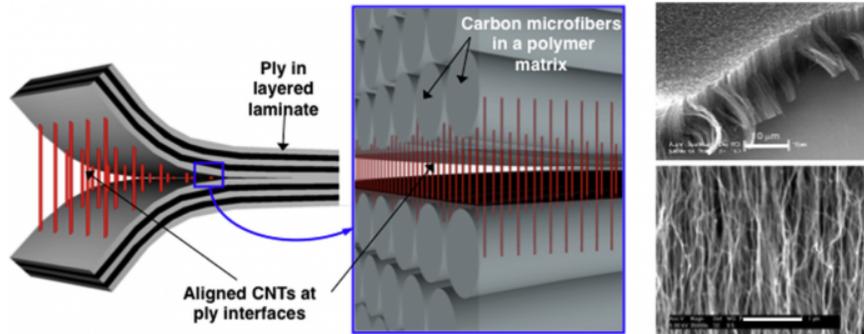


Figura 5. CNT en interfaz interlaminar de materiales compuestos para mejorar su tenacidad a la fractura [16].

A pesar de las excelentes propiedades mecánicas, térmicas y eléctricas de los nanotubos de carbono y el grafeno, sus nanocompuestos de matriz polimérica (polímero reforzado con nano-rellenos) están lejos de cumplir los requisitos estructurales de aplicaciones deseadas, especialmente en el sector aeronáutico y aeroespacial que son altamente demandantes. Hasta la fecha no se han podido transferir las características extraordinarias de estas nanopartículas a una aplicación industrial explotando de forma adecuada todas sus características debido a la dificultad que se presenta al mezclar estas nanopartículas con otros materiales. Los enlaces químicos tipo van der Waals que generan entre estas partículas crean aglomeraciones o agregados dentro de la matriz polimérica, actuando como concentradores de esfuerzo y que finalmente conducen a un bajo rendimiento de los nanocompuestos producidos. Además, las láminas de grafeno tienen tendencia a enrollarse, desplazarse, doblarse o arrugarse, lo que se opone a las condiciones óptimas para la mejora de las matrices poliméricas, incluida la alta relación de aspecto y la morfología de relleno plano.

Hasta el día de hoy, los mejores métodos de producción para nanocompuestos de polímero de grafeno / CNT han incluido un proceso de varios pasos a partir del tratamiento superficial de nanopartículas de carbono usualmente con ácidos fuertes, dispersándolos de solventes y finalmente mezclándolos con polímeros, lo cual ha producido resultados aceptables en cuanto a la explotación de las propiedades mecánicas de estas nanopartículas. El tratamiento superficial provee a las partículas de diferentes grupos funcionales que permiten un mejor anclaje entre las partículas de carbono y las cadenas poliméricas, mejorando así la transmisión de esfuerzos mecánicos. Hasta el momento no hay estudios donde se haya definido que grupos funcionales son los más adecuados para una dispersión homogénea de nanopartículas de carbono en resina epoxi. De la misma forma, tampoco se han definido que rutas químicas deben utilizarse para grupos funcionales específicos (funcionalización controlada) por lo que es necesario explorar diferentes rutas químicas para definir los grupos funcionales obtenidos a través de estas y cuáles son los grupos más compatibles con la resina epoxi utilizada para compuestos de fibra de carbono de matriz polimérica.

Conclusiones

Los materiales compuestos susceptibles para emplearse en estructuras de nanosatélites son base fibra de carbono y resina cianatoéster.

Los materiales compuestos base fibra de carbono y resina epóxica pueden ser candidatos, si a la resina epóxica se le agregan aditivos para mejorar sus propiedades térmicas. Las resinas epóxicas se exploran como alternativa dado su relación costo-propiedades.

Las nanopartículas base carbono (NTC, grafeno) contribuye a mejorar las propiedades térmicas y eléctricas de las resinas termoestables.

Las nanopartículas cerámicas (ZnO , Al_2O_3) ayudan a mejorar las propiedades contra la degradación ambiental y la radiación de las resinas termoestables.

Referencias

-
- [1] C.P. SLO, CubeSat Design Specification Rev. 13, The CubeSat Program, vol. REV 13., 2014.
 - [2] Baker A, Dutton S, Kelly D. Composite Materials for Aircraft Structures. AIAA Education Series, 2004, USA.
 - [3] Santiago AMA. Diseño estructural de un nanosatélite CubeSat. M. en C. Ingeniería Aeronáutica y Espacial, 2016, Ins
 - [4] Arce D, Jutzeler B, Röthlisberger G. Swiss Cube Structure and Configuration-Phase A, 2006, EPFL, Switzerland.
 - [5] Kostopoulos V, et al. Qualification of composite structure for Cubesat picosatellites as a demonstration for small sate
 - [6] Poghosyan A, Golkar A. CubeSat evolution: Analyzing CubeSat capabilities for conducting science missions. Progress
 - [7] Niaki KS, Anvari A, Farhani F. Aluminum and composite materials for satellite structures A comparison of thermal p
 - [8] Nomme CE. Mechanical design of CubeSat structures using composites and polymers. Master Thesis, 2013, Norwegia
 - [9] Díaz MA, Zagal JC, et al. New opportunities offered by CubeSats for space research in Latin America: The SUCHAI
 - [10] Tian Y, Zhang H, Zhang Z. Influence of nanoparticles on the interfacial properties of fiber-reinforced-epoxy composite
 - [11] Díaz. Introducción a los nanomateriales. Lecturas de Ingeniería, UNAM, 2012.
 - [12] Lowry MS, et al. Assessment of UV-permeability in nano-ZnO filled coatings via high throughput experimentation. J
 - [13] Wong TT, et al. UV resistibility of a nano-ZnO/glass fibre reinforced epoxy composite. Materials and Design, 2014;
 - [14] Cobo J, Villaquiran CF, et al. Síntesis de nanopartículas de $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ a partir de $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 18\text{H}_2\text{O}$ estudio de los me
 - [15] Qian H, Greenhalgh E, Shaffer MSP, Bismarck A. Carbon nanotube-based hierarchical composites: a review. Journal
 - [16] García EJ, Wardle BL, Hart J. Joining prepreg composite interfaces with aligned carbon nanotubes. Composites: Par
-