



# MATERIALES COMPUESTOS

CLASIFICACIÓN, PROCESAMIENTO Y APLICACIONES

*“Soluciones para los sectores Aeronáutico, Aeroespacial y Defensa”*



# **MATERIALES COMPUESTOS**

## Clasificación, procesamiento y aplicaciones

Soluciones para los sectores aeronáutico, aeroespacial y defensa

---





# **MATERIALES COMPUESTOS**

## Clasificación, procesamiento y aplicaciones

Soluciones para los sectores aeronáutico, aeroespacial y defensa

---

### AUTORES

Rafael Andrés Robayo Salazar

Fernando Delgado Gómez

Julián Portocarrero Hermann

José Luis Trisancho Reyes

Diego Pérez Muñoz

María Paulina Holguín Patiño





**Catalogación en la publicación - Escuela Militar de Aviación “Marco Fidel Suárez”**

Materiales compuestos. Clasificación, procesamiento y aplicaciones : soluciones para los sectores aeronáutico, aeroespacial y defensa / Rafael Andrés Robayo Salazar... [y otros 6]. -- Santiago de Cali : Escuela Militar de Aviación “Marco Fidel Suárez”, 2021.

216 páginas : ilustraciones en color, gráficos y fotografías ; 17 cm.

Incluye bibliografía al final de cada capítulo

ISBN 978-958-53159-4-5

1.Materiales compuestos 2.Matriz Metálica 3.Matriz Polimerica 4.Matriz Cerámica 5.Materiales Ablativos 6.Brindajes 7.Espumas Metálicas i.Robaño Salazar, Rafael Andrés (autor) ii.Delgado Gómez, Fernando (autor) iii.Portocarrero, Hermann Julián (autor) iv.Tristancho Reyes, José Luis (autor) v.Pérez Muñoz, Diego Fernando, Capitán (autor) vi.Holguín Patiño, María Paula (autor) vii.Colombia. Fuerza Aérea Colombiana. Escuela Militar de Aviación “Marco Fidel Suárez” (EMAVI)

TA418.9.C6.M38 2021  
620.118 -- 23

Registro Catálogo SIBFA 116228



Archivo descargable en formato MARC en: <https://tinyurl.com/emavi116228>

**MATERIALES COMPUESTOS. Clasificación, procesamiento y aplicaciones  
Soluciones para los sectores aeronáutico, aeroespacial y defensa**

© **Autores:** Rafael Andrés Robayo Salazar, Fernando Delgado Gómez, Julián Portocarrero Hermann, José Luis Tristancho Reyes, Diego Pérez Muñoz, María Paulina Holguín Patiño

**Primera edición, febrero 2021**

**ISBN Impreso:** 978-958-53159-4-5

**ISBN PDF:** 978-958-53159-5-2

© **Escuela Militar de Aviación “Marco Fidel Suárez”**  
(EMAVI)

**Dirección**

BG. Alfonso Lozano Ariza

**Subdirección**

CR. Ned Yasno Roncancio

**Comando Grupo Académico**

TC. Yadira Cárdenas Posso

**Jefatura Sección Investigación**

TE. Andrea Carolina Gómez Ruge

**Gestión Publicaciones Científicas**

PS. Jennifer J. García Saldarriaga

**Sección Investigación EMAVI**

Carrera 8 # 58 – 67 (La Base)

Cali – Colombia

Teléfono: +57 (2) 488 1000 Ext. 1871

Email: [gestion.investigacion@emavi.edu.co](mailto:gestion.investigacion@emavi.edu.co)

**Corrección de estilo, diseño e impresión**

Artes Gráficas del Valle S.A.S.

Tel: 333 2742

Cali – Valle del Cauca

Impreso en Colombia – Printed in Colombia

© **Universidad Tecnológica de Pereira**  
**Rector**

Luis Fernando Gaviria Trujillo

**Vicerrectoría de Investigaciones,  
Innovación y Extensión**

Marta Leonor Marulanda Ángel

**Coordinador Editorial**

Luis Miguel Vargas Valencia

**Editorial Universidad Tecnológica de Pereira**

Cra. 27 No. 10 – 02 (Los Álamos)

Edificio 9, Biblioteca Central “Jorge Roa Martínez”

Email: [luismvargas@utp.edu.co](mailto:luismvargas@utp.edu.co)

<https://www.utp.edu.co>

**Fotografía de portada tomada de:** <https://www.freepik.es/fotos/tecnologia/> Foto de Tecnología creado por wirestock - [www.freepik.es](http://www.freepik.es)

La publicación de este libro se aprobó luego de superar un proceso de evaluación doble ciego por dos pares expertos.

La institución editora de esta obra no se hace responsable de las ideas expuestas bajo su nombre, las ideas publicadas, los modelos teóricos expuestos o los nombres aludidos por el(los) autor(es). El contenido publicado es responsabilidad exclusiva del(los) autor(es), no refleja la opinión de las directivas, el pensamiento institucional, ni genera responsabilidad frente a terceros en caso de omisiones o errores.

El material de esta publicación puede ser reproducido sin autorización, siempre y cuando se cite el título, el autor y la fuente institucional.

# Contenido

INTRODUCCIÓN .....	19
<b>CAPÍTULO 1.</b>	
<b>INTRODUCCIÓN A LOS MATERIALES COMPUESTOS .....</b>	<b>25</b>
1.1 Introducción .....	25
1.2 Diseño y selección de materiales .....	27
1.3 Definición de materiales compuestos .....	31
1.4 Historia de los compuestos .....	32
1.5 Clasificación de los materiales compuestos .....	49
1.6 Referencias .....	49
<b>CAPÍTULO 2.</b>	
<b>MATERIALES COMPUESTOS DE MATRIZ POLIMÉRICA .....</b>	<b>57</b>
2.1 Introducción .....	57
2.2 Materiales compuestos de matriz polimérica .....	59
2.2.1 <i>Tipos de matrices poliméricas</i> .....	59
2.2.1.1 <i>Matrices termoplásticas</i> .....	60
2.2.1.2 <i>Matrices termoestables</i> .....	61
2.2.1.3 <i>Propiedades de las matrices poliméricas</i> .....	61
2.2.2 <i>Tipos de refuerzos y fibras</i> .....	64
2.2.3 <i>Mecanismos de reforzamiento: particulados y fibro-reforzados</i> ..	68
2.3 Métodos de fabricación y manufactura de los compuestos de matriz polimérica .....	79

2.4 Aplicaciones avanzadas de los materiales compuestos de matriz polimérica .....	89
2.5 Comentarios finales: retos y oportunidades .....	97
2.6 Referencias .....	100

### **CAPÍTULO 3.**

<b>MATERIALES COMPUESTOS ABLATIVOS Y SISTEMAS DE PROTECCIÓN TÉRMICA .....</b>	<b>103</b>
3.1 Introducción .....	104
3.2 Comportamiento térmico de los materiales .....	105
3.3 Sistemas de protección térmica y materiales compuestos ablativos .....	113
3.3.1 <i>Definición y clasificación de los sistemas de protección térmica (TPS)</i> .....	113
3.3.2 <i>Compuestos ablativos de matriz polimérica (PACM)</i> .....	115
3.4 Técnicas de ensayo para la caracterización de compuestos ablativos .....	118
3.5 Aplicaciones de los compuestos ablativos .....	120
3.5.1 <i>Aplicación de los compuestos ablativos en el sector aeroespacial</i> ..	120
3.5.2 <i>Experiencias en el ámbito nacional</i> .....	122
3.6 Comentarios finales: retos y oportunidades .....	128
3.7 Referencias .....	128

### **CAPÍTULO 4.**

<b>MATERIALES COMPUESTOS DE MATRIZ CERÁMICA .....</b>	<b>131</b>
4.1 Introducción .....	132
4.2 Procesamiento de CMC.....	132
4.2.1 <i>Prensado y sinterizado en frío</i> .....	132
4.2.2 <i>Prensado en caliente</i> .....	133
4.2.3 <i>Procesos de unión por reacción</i> .....	136
4.2.4 <i>Infiltración</i> .....	138
4.2.4.1 <i>Infiltración líquida</i> .....	138
4.2.5 <i>Técnicas de reacción química in situ</i> .....	141

4.2.5.1 <i>Deposición química de vapor e impregnación química de vapor</i> .....	141
4.2.5.2 <i>Consolidación reactiva o sinterización en fase líquida</i> ...	144
4.2.5.3 <i>Proceso sol-gel</i> .....	145
4.2.5.4 <i>Infiltración y pirólisis de polímeros</i> .....	146
4.2.6 <i>Deposición electroforética</i> .....	151
4.3 <i>Interfaz en CMC</i> .....	153
4.4. <i>Propiedades de los CMC</i> .....	154
4.5. <i>Aplicaciones de los materiales compuestos de matriz cerámica (CMC)</i> .....	156
4.6. <i>Conclusiones y comentarios finales</i> .....	157
4.7 <i>Referencias</i> .....	157

## **CAPÍTULO 5.**

<b>MATERIALES COMPUESTOS DE MATRIZ METÁLICA</b> .....	<b>161</b>
5.1. <i>Introducción</i> .....	162
5.2 <i>Componentes de los materiales compuestos de matriz metálica (MMC)</i> .....	163
5.2.1 <i>Metales utilizados como matriz</i> .....	163
5.2.2 <i>Materiales utilizados como refuerzos</i> .....	163
5.3 <i>Propiedades físicas y mecánicas de los materiales compuestos de matriz metálica (MMC)</i> .....	164
5.4 <i>Interfase matriz metálica - refuerzo</i> .....	165
5.5 <i>Procesos de manufactura</i> .....	165
5.5.1 <i>Técnicas de laminado sucesivo</i> .....	168
5.5.2 <i>Aplicación de material por plasma inducido</i> .....	168
5.5.3 <i>Aplicación física de material por vapor</i> .....	169
5.5.4 <i>Fundición sobre cinta</i> .....	170
5.5.5 <i>Metalurgia de polvos</i> .....	171
5.5.6 <i>Manufactura aditiva</i> .....	171
5.6 <i>Aplicaciones de los materiales compuestos de matriz metálica</i> ..	172
5.6.1 <i>Escudos contra rayos gamma</i> .....	172
5.6.2 <i>Sistemas de protección balística</i> .....	178

5.6.3	<i>Sistemas de protección contra onda explosiva</i>	180
5.6.4	<i>Sistemas de protección contra munición explosiva</i>	184
5.6.5	<i>Conductores eléctricos</i>	188
5.6.6	<i>Aplicaciones aeroespaciales</i>	190
5.6.7	<i>Aplicaciones en transporte terrestre</i>	192
5.7	Consideraciones acerca de la aplicabilidad de los materiales compuestos de matriz metálica	195
5.8	Comentarios finales	196
5.9	Referencias	197
<b>CONCLUSIONES</b>		<b>201</b>



## Índice de figuras

<b>FIGURA 1.</b> Clasificación de los materiales compuestos .....	20
<b>FIGURA 2.</b> Factores y características que influyen en la selección y utilización de materiales utilizados en el diseño en ingeniería actual .....	28
<b>FIGURA 3.</b> Resistencia específica de diversos materiales .....	30
<b>FIGURA 4.</b> Módulo de elasticidad específico de diversos materiales .....	30
<b>FIGURA 5.</b> Ruinas de una antigua vivienda egipcia (izquierda). Equipo de obreros egipcios haciendo adobes (derecha) .....	34
<b>FIGURA 6.</b> Uso del arco mongol en batalla (izquierda y centro). Un arquero mongol con su vestimenta, arco y flechas (derecha) .....	35
<b>FIGURA 7.</b> <i>Hevea brasiliensis</i> , árbol de caucho productor natural de látex “cautchouc”, que quiere decir, para los nativos de Brasil, “árbol que llora” ..	36
<b>FIGURA 8.</b> Opus caementicium en los muros del teatro romano de Mérida (Badajoz), construido hacia el año 16-15 a. C. y donado por el emperador Marco Agripa (yerno del emperador Augusto), data de casi la misma época de la fundación de Emerita Augusta. Tuvo algunas remodelaciones en siglo I y II d. C. ....	40
<b>FIGURA 9.</b> Coliseo Romano empezado por el emperador Vespasiano, en torno al año 71 d.C., y terminado por el emperador Domiciano, quien añadió un último piso en el año 82 .....	40

<b>FIGURA 10.</b> Primer bote del mundo en hormigón reforzado desarrollado por Jean Louis Lambot .....	41
<b>FIGURA 11.</b> Casa de François Coignet (izquierda), primera casa construida con concreto reforzado en 1853. Representación del sistema de reforzamiento del concreto de Francois Coignet (derecha) .....	42
<b>FIGURA 12.</b> Fotografía tomada en 1937 al Fairchild F-46A (izquierda). Fuselaje del Fairchild F-46A en el Western Antique Aeroplane and Automobile Museum (derecha) .....	44
<b>FIGURA 13.</b> Refuerzos para la resina sintética .....	45
<b>FIGURA 14.</b> Clasificación de los polímeros según su estructura (lineales o ramificados). a) Polímero lineal no ramificado, b) polímero lineal ramificado, c) polímero entrecruzado y d) polímero con cadenas interconectadas .....	60
<b>FIGURA 15.</b> Fibras de uso común en la fabricación de PMC: a) fibra de carbono, b) fibra de aramida (Kevlar) y c) fibra de vidrio .....	66
<b>FIGURA 16.</b> Algunos tipos de fibras naturales utilizadas en el reforzamiento de matrices poliméricas para la obtención de PMC .....	68
<b>FIGURA 17.</b> Resumen esquemático de los tipos de reforzamiento en materiales compuestos .....	69
<b>FIGURA 18.</b> Efecto de algunos modificadores (rellenos, partículas y fibras) sobre la resistencia y la tenacidad a la fractura del polipropileno .....	70
<b>FIGURA 19.</b> Relación entre el módulo de elasticidad (E) (GPa) y la densidad para una matriz (m) reforzada con un refuerzo (r). Aquí la matriz es un polímero y el refuerzo de cerámica, pero el mismo argumento es válido para cualquier combinación .....	72
<b>FIGURA 20.</b> Diagrama esquemático de la curva tensión-deformación de un material compuesto reforzado con fibras continuas y alineadas sometido a una carga longitudinal. También se muestran las curvas de tensión-deformación para una fibra quebradiza y una matriz dúctil .....	73

<b>FIGURA 21.</b> Resistencia ( $\sigma_y/\rho$ ) (MPa·m <sup>3</sup> /kg) y módulos (GPa·m <sup>3</sup> /kg) específicos de los materiales. Los polímeros a granel se endurecen y fortalecen mediante su alargamiento, compitiendo con fibras naturales, de carbono y de vidrio .....	73
<b>FIGURA 22.</b> Efecto de endurecimiento por reforzamiento. La fuerza de extracción de cada fibra se opone a la apertura de la grieta .....	74
<b>FIGURA 23.</b> Variación del módulo de elasticidad (E) (GPa) en función de la densidad ( $\rho$ ) (Mg/m <sup>3</sup> ) de diferentes tipos de materiales .....	76
<b>FIGURA 24.</b> Principales técnicas de fabricación de los PMC .....	81
<b>FIGURA 25.</b> Proceso de colocación manual de los PMC .....	82
<b>FIGURA 26.</b> Proceso de colocación por rociado o pulverización de los PMC .....	82
<b>FIGURA 27.</b> Proceso de enrollado de filamentos para la fabricación de componentes de PMC .....	83
<b>FIGURA 28.</b> Métodos de moldeo cerrado por bolsa de PMC: a) método de vacío y b) método de alta presión .....	84
<b>FIGURA 29.</b> Esquema del método de moldeo por infusión de resina para la obtención de PMC .....	85
<b>FIGURA 30.</b> Proceso de moldeo por compresión de PMC .....	86
<b>FIGURA 31.</b> Procesos de moldeo por transferencia de resina (a) y moldeo por inyección de polímeros reforzados (b) .....	87
<b>FIGURA 32.</b> Método de pultrusión o extrusión estirada para la fabricación de PMC .....	87
<b>FIGURA 33.</b> Esquema del proceso de laminación continua de PMC .....	88
<b>FIGURA 34.</b> a) Configuración para la impresión 3D de PMC reforzados con fibra continua, b) microestructura de la interfase obtenida y c) patrón de fractura de la sección transversal de PMC basados en una matriz de PLA reforzados con fibra continua de carbono .....	89

<b>FIGURA 35.</b> Algunas aplicaciones especiales de los PMC. a) elementos lineales estructurales de alta resistencia, b) tuberías de alta presión y resistencia (diámetro 2 m), c) sistemas de protección balística, d) componentes aeronáuticos, e) componentes de propulsión, f) alabes o palas de motor, g) construcción de torres eólicas, h) reparación de estructuras de concreto, i) livianos artículos deportivos de alto desempeño .....	91
<b>FIGURA 36.</b> Algunas aplicaciones avanzadas obtenidas a partir de la manufactura aditiva de PMC imprimibles. Incluyen instrumentos deportivos, piezas personalizadas, piezas estructurales, autopartes, prótesis livianas de alto desempeño, implantes dentales, entre otras .....	92
<b>FIGURA 37.</b> a) Impresión 3D de un compuesto en forma de panel triangular e b) ilustración esquemática de la orientación progresiva de las microfibras dentro de la boquilla durante la deposición de un PMC .....	93
<b>FIGURA 38.</b> Modelos 3D utilizados para demostrar la imprimibilidad de algunas formulaciones de PMC reforzados con fibra de vidrio y fibra de carbono en la fabricación de componentes aeroespaciales (perfil aerodinámico [a] y hélice de motor [b]): PMC reforzados con fibra de vidrio (c, d, g, h) y PMC reforzados con fibra de carbono (e, f, i, j) .....	94
<b>FIGURA 39.</b> Esquema representativo de un proceso de impresión 3D de PMC basados en una matriz termoplástica (PLA) reforzada con nanoplaquetas de grafeno .....	96
<b>FIGURA 40.</b> Puntos de fusión (°C) de diferentes metales, cerámicos y polímeros .....	106
<b>FIGURA 41.</b> Relación entre la resistencia ( $\sigma_y$ ) (MPa) y la temperatura máxima de servicio ( $T_{max}$ ) (°C) de los materiales .....	107
<b>FIGURA 42.</b> Relación entre la expansión térmica ( $\alpha$ ) (micro ( $\mu$ )-deformación/K) y conductividad térmica ( $\lambda$ ) (W/m.K) de los materiales .	109
<b>FIGURA 43.</b> Materiales utilizados en función de la aplicación y temperatura de servicio .....	112

<b>FIGURA 44.</b> Clasificación de los sistemas de protección térmica (TPS) ..	113
<b>FIGURA 45.</b> Mecanismos de protección de los materiales TPS no-ablativos (a) y ablativos (b) .....	114
<b>FIGURA 46.</b> Clasificación de los materiales poliméricos ablativos .....	115
<b>FIGURA 47.</b> Representación gráfica de las zonas formadas durante la exposición a altas temperaturas de un material ablativo .....	117
<b>FIGURA 48.</b> Montaje experimental típico para el ensayo de llama directa de oxiacetileno (ASTM E285) .....	120
<b>FIGURA 49.</b> Montaje experimental de la prueba de llama directa realizada en Emavi .....	123
<b>FIGURA 50.</b> Comparación del comportamiento ablativo de diferentes PACM producidos y caracterizados en Emavi: gráfico de temperatura de la cara opuesta a la llama vs. tiempo de incidencia de la llama directa .	124
<b>FIGURA 51.</b> Análisis microestructural (SEM) de la zona afectada por el calor de los PACM desarrollados en Emavi posterior al ensayo ablativo .....	125
<b>FIGURA 52.</b> Componentes de propulsión tipo tobera (motor-cohete) elaborados en Emavi a partir de los PACM: a) diseño y planos del componente, b) molde o preforma de la zona ablativa, c) zona ablativa y d) tejido de fibra de carbono (zona estructural) aplicado sobre la superficie de la zona ablativa .....	126
<b>FIGURA 53.</b> Prueba estática de combustión real y medición del perfil térmico de las toberas desarrolladas .....	126
<b>FIGURA 54.</b> Inspección del perfil térmico de las aplicaciones tipo toberas de motor cohete desarrolladas en Emavi a partir de PACM .....	127
<b>FIGURA 55.</b> Esquema del proceso de impregnación de lodos .....	134
<b>FIGURA 56.</b> (a) Micrografía óptica de la sección transversal de un material compuesto de matriz de vidrio/fibra de vidrio unidireccional y (b) gráfico de presión y temperatura utilizado durante el prensado en caliente de un CMC .....	136



<b>FIGURA 57.</b> Esquema del proceso de infiltración de la masa fundida ....	140
<b>FIGURA 58.</b> Esquema de un proceso isotérmico de infiltración de vapor .	142
<b>FIGURA 59.</b> Ejemplo de la microestructura de un compuesto SiC/SiC obtenido por CVI .....	143
<b>FIGURA 60.</b> Esquema de un proceso de infiltración de vapor con gradientes de presión y temperatura .....	144
<b>FIGURA 61.</b> El papel de los rellenos (o fillers) en la reducción de la porosidad y el agrietamiento de los CMC obtenidos a partir de precursores poliméricos .....	150
<b>FIGURA 62.</b> (a) Esquema de la celda de deposición electroforética básica (EPD). (b) Microestructura del compuesto de matriz de mullita reforzada con fibra cerámica Nextel 720 obtenido por deposición electroforética ...	153
<b>FIGURA 63.</b> (a) Situación original previo a la aparición de fisuras. (b) Caso representativo a MMC y PMC. (c) Falla de la fibra y matriz en un CMC con interfaz de alta adherencia. (d) Tipo de falla de un CMC con interfaz de adherencia moderada .....	156
<b>FIGURA 64.</b> Geometrías de refuerzos para materiales compuestos de matriz metálica. a) Fibras continuas. b) Fibras cortas (whiskers). c) Partículas .....	162
<b>FIGURA 65.</b> Esquema explicativo de la producción de materiales compuestos de matriz metálica por apilamiento sucesivo de capas metálicas y fibras de refuerzo .....	169
<b>FIGURA 66.</b> Esquema explicativo para el proceso de producción de materiales compuestos de matriz metálica con base en impregnación de cintas .....	170
<b>FIGURA 67.</b> Flujograma de proceso de pulvimetalurgia para producción de materiales compuestos de matriz metálica .....	172
<b>FIGURA 68.</b> Corte seccionado de espuma de poros cerrados. La mayoría de poros se encuentran separados entre sí .....	174

<b>FIGURA 69.</b> Cajas metálicas utilizadas para contener los líquidos infiltrados dentro de las espumas metálicas de poro abierto .....	176
<b>FIGURA 70.</b> Espumas de poro cerrado y placas de aleación de aluminio macizo probadas. Se aprecia tres espesores distintos para cada material .....	176
<b>FIGURA 71.</b> Espumas de poro abierto infiltradas con distintas sustancias. Cada una se produjo en tres distintos espesores .....	177
<b>FIGURA 72.</b> Disposición de capas de blindaje utilizadas para evaluar su resistencia al impacto de proyectiles .....	179
<b>FIGURA 73.</b> Descripción gráfica de las etapas del impacto del proyectil contra el sistema de blindaje .....	180
<b>FIGURA 74.</b> Curva esfuerzo-deformación obtenida para una espuma metálica de aluminio sometida a compresión. La carga se aplica lentamente .....	182
<b>FIGURA 75.</b> Presiones vs. tiempo durante una explosión. La presión sobre la viga permanece un poco más en el tiempo debido al efecto de retardo de la espuma, pero con valores mucho menores que la presión inicial .	183
<b>FIGURA 76.</b> Impulso vs. presión en la superficie de las vigas. Comparativo entre viga sin protección (negro) y viga con protección (gris) .....	184
<b>FIGURA 77.</b> Esquema del montaje general utilizado por Marx para realizar las pruebas .....	186
<b>FIGURA 78.</b> Microestructura de material compuesto de matriz metálica. 1) Partículas de carburo de silicio. 2) Matriz de aluminio .....	189
<b>FIGURA 79.</b> Elementos de circuitos electrónicos que incluyen materiales de matriz de aluminio y refuerzos en carburo de silicio .....	190
<b>FIGURA 80.</b> Riostras del compartimiento de carga del transbordador espacial fabricadas en matriz de aleación de aluminio con refuerzo en fibras de boro .....	191

<b>FIGURA 81.</b> Mástil de la antena del telescopio espacial Hubble de 3,6 metros de longitud, fabricado en matriz de aluminio 6061 y reforzada con fibras de carbono .....	192
<b>FIGURA 82.</b> Esfera de ceniza volante fracturada .....	193
<b>FIGURA 83.</b> Poros presentes en las esferas (se señalan con las flechas negras) .....	193
<b>FIGURA 84.</b> Esferas de carburo de silicio con formas esféricas pero irregulares .....	195
<b>FIGURA 85.</b> Esferas de carburo de silicio fracturadas. Se observa irregularidad en espesores .....	195

## Índice de tablas

<b>TABLA 1.</b> Propiedades representativas de algunas matrices poliméricas. TP: termoplásticos y TE: termoestable .....	63
<b>TABLA 2.</b> Propiedades de materiales de refuerzo seleccionados .....	65
<b>TABLA 3.</b> Principales propiedades y comparación entre PMC reforzados con fibras de vidrio (GFRP), carbono (CFRP) y aramida (Kevlar) .....	79
<b>TABLA 4.</b> Propiedades físicas y mecánicas de metales comunes utilizados como matriz en materiales compuestos .....	165
<b>TABLA 5.</b> Propiedades físicas de matrices y de refuerzos cerámicos utilizados .....	166
<b>TABLA 6.</b> Propiedades físicas y mecánicas de los materiales compuestos de matriz metálica reforzados con partículas .....	166
<b>TABLA 7.</b> Propiedades mecánicas y físicas relevantes para materiales compuestos de matriz metálica reforzados con fibras continuas .....	167
<b>TABLA 8.</b> Espesores de las placas, densidades y diámetros de las esferas de refuerzo .....	186





# Introducción

---

## **Rafael Andrés Robayo-Salazar, Ph. D.**

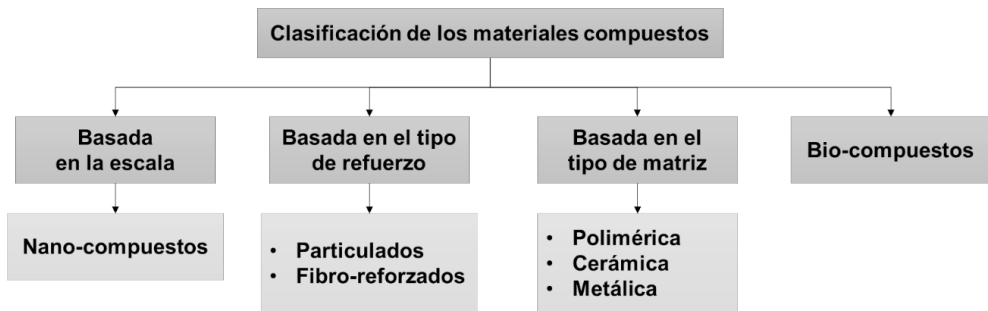
Doctor en Ingeniería. Investigador del Programa de Ingeniería Mecánica (Pimec) - Grupo de Investigación en Estudios Aeroespaciales (GIEA). Escuela Militar de Aviación “Marco Fidel Suárez” - Fuerza Aérea Colombiana. *Correo-e:* rafael.robayo@emavi.edu.co

Los materiales compuestos son reconocidos como los materiales del futuro, siendo uno de los temas de investigación más importantes en la ingeniería y tecnología moderna. Sus características y propiedades especiales, así como su elevada relación resistencia/peso, los hacen adecuados para múltiples aplicaciones en los campos industrial, aeronáutico, aeroespacial, defensa, automotriz, construcción, deportes, biomedicina, energía y muchos otros. Este libro presenta una visión general de los materiales compuestos, su clasificación, procesamiento y principales aplicaciones, en función de una investigación y recopilación de estudios recientes sobre el tema.

La razón del rápido crecimiento en el uso de los materiales compuestos a nivel industrial y la popularidad que estos han ganado en diversos campos

de la ingeniería y ciencias de los materiales se debe a la posibilidad de obtener una combinación muy atractiva de rigidez y tenacidad, con un peso ligero y propiedades de resistencia química elevadas. En efecto, un material compuesto, como su mismo nombre lo indica, se define como un material formado por dos o más materiales constituyentes (matriz y refuerzos), que tienen propiedades físicas o químicas significativamente diferentes y que una vez son combinados producen un material que posee características únicas, diferentes de los elementos constituyentes. Esta mejora u optimización hace que el material compuesto resultante tenga un desempeño superior en comparación con las propiedades que poseen los materiales individuales.

Dado que los constituyentes de un material compuesto influyen en sus propiedades, es necesario estudiar su clasificación, métodos o técnicas de procesamiento y fabricación, y sus distintas propiedades y/o posibilidades de aplicación con mayor valor agregado en la industria. Es por esta razón que este libro de investigación hace especial énfasis en estos aspectos, abordándolos en función de la clasificación de los materiales compuestos, con base en la naturaleza de la matriz, es decir, polimérica, cerámica y metálica (ver clasificación basada en el tipo de matriz, Figura 1).



**Figura 1. Clasificación de los materiales compuestos. Fuente: el autor.**

Dentro de las industrias que resultan más interesadas en los avances de los materiales compuestos se destacan la aeronáutica, aeroespacial y defensa. Debido a lo anterior el documento se enfocará, particularmente, en aquellas aplicaciones relacionadas con esos campos. Este creciente interés ha repercutido en los enfoques de la investigación de los principales centros de

innovación y desarrollo del país relacionados con las Ciencias Básicas e Ingenierías, así como también en los grupos de investigación de las diferentes universidades e instituciones de educación superior.

Actualmente la Política de Ciencia Tecnología e Innovación (CTeI) en Colombia, a través del Ministerio de Ciencia, Tecnología e Innovación (Minciencias), ha trazado una hoja de ruta en el marco de ocho focos principales, que incluyen: 1) tecnologías convergentes e industria 4.0; 2) industrias creativas y culturales; 3) energía sostenible; 4) bioeconomía, biotecnología y medio ambiente; 5) océanos y recursos hidrobiológicos, 6) Ciencias Sociales, desarrollo humano y equidad; 7) Ciencias de la Vida y de la Salud y 8) Ciencias Básicas y del Espacio. En cada uno de estos ocho focos, la *ciencia e ingeniería de los materiales* podría contribuir y generar un aporte en pro de alcanzar las metas propuestas, siendo esta un área de conocimiento disruptiva y transversal en todos los campos de investigación. Sin embargo, Minciencias hace énfasis en la línea 8.2., denominada *Materiales: obtención, síntesis, caracterización y procesamiento*, que incluye en su descripción lo siguiente: “Estudios a nivel atómico y molecular de la estructura, propiedades físicas, químicas, biológicas y mineralógicas de nuevos materiales de interés tecnológico, así como de los métodos para su obtención, síntesis, caracterización y procesamiento”. Esto incluye, sin lugar a duda, a los materiales compuestos o *composites*, convirtiéndose en una de las líneas de investigación más fuertes en los grupos de investigación de las facultades de Ciencias Básicas e Ingenierías del país. Al respecto, una búsqueda en la base de datos de Minciencias con las palabras claves “materiales compuestos”, arroja cerca de 115 grupos de investigación relacionados, directa o indirectamente, con esta línea de investigación, lo cual refleja el creciente interés sobre la ciencia e ingeniería de los materiales y, en particular, respecto a la investigación de los *composites*. Cabe anotar que estos grupos de investigación se encuentran, a su vez, relacionados con diversos programas de formación a nivel técnico, tecnológico, pregrado (profesional) y postgrado (maestrías y doctorado). En este sentido, este libro puede ser considerado como un texto guía para estudiantes, docentes e investigadores relacionados con este campo, que podría despertar un interés particular sobre algunos de los desarrollos y temas que son abordados en su contenido.

A propósito, el texto se enfoca en los materiales compuestos, haciendo énfasis en su clasificación, procesamiento y aplicaciones, bajo el eslogan “Soluciones para los sectores aeronáutico, aeroespacial y defensa”, e incluye como hilo conductor la estructura que se describe a continuación.

El capítulo uno, *Introducción a los materiales compuestos*, inicia con la descripción de algunos conceptos generales para tener en cuenta y la definición propia de los materiales compuestos. Igualmente, identifica las principales razones por las cuales los materiales compuestos se han consolidado como una solución para diversas industrias, pero sobre todo para la aeronáutica, aeroespacial y de defensa. Recalca, además, la importancia que han ganado estos materiales en el diseño de máquinas y/o elementos estructurales, así como en la manufactura de piezas y/o componentes de aplicación en diversas aéreas de la industria e ingeniería, gracias a sus propiedades y características únicas entre toda la gama de materiales disponibles. Así mismo, este capítulo describe la historia y principales acontecimientos relacionados con la evolución de los materiales y su impacto en nuestra sociedad, haciendo especial énfasis en los materiales compuestos. Sin embargo, este análisis se detiene en la línea del tiempo hacia los años 70, dejando los avances más recientes y posibles desarrollos en el futuro cercano para ser abordados en los capítulos siguientes, relacionados con cada uno de los tipos de materiales compuestos, clasificados según la naturaleza de su matriz (polimérica, cerámica o metálica).

El capítulo dos, denominado *Materiales compuestos de matriz polimérica*, inicia con una definición de los PMC (por sus siglas en inglés, *polymer matrix composites*), haciendo énfasis en las múltiples ventajas que logra la industria con su uso y/o aplicación en la fabricación de piezas o componentes. Posteriormente, aborda las materias primas comúnmente utilizadas para su obtención, incluyendo la descripción de sus principales propiedades y características. Dentro de los tipos de matrices se describen las termoplásticas y las termoestables. En cuanto a los tipos de refuerzo, se incluyen los particulados y las fibras más importantes. Los mecanismos de reforzamiento que gobiernan el desempeño mecánico y propiedades de los PMC (particulados y fibro-reforzados) también se incluyen en el contenido de este capítulo. Así

mismo, se abordan los métodos de fabricación y manufactura de componentes y aplicaciones basadas en PMC, para, finalmente, presentar las aplicaciones avanzadas que han despertado el interés de la industria en los últimos años y que proyectan un futuro promisorio para este tipo de materiales.

El capítulo tres, *Materiales compuestos ablativos y sistemas de protección térmica*, hace énfasis en una aplicación especial de los PMC, relacionada con la protección de componentes que en servicio son sometidos a entornos hipertérmicos, incluyendo el uso de estos materiales en la manufactura de componentes de propulsión; campos relacionados con las industrias aeroespaciales y del espacio, que han sido tema de investigación e interés para la Escuela Militar de Aviación “Marco Fidel Suárez” (Emavi) (Cali, Colombia). Para abordar este tema en particular, los autores inician con el análisis del comportamiento térmico de los materiales y el efecto que tiene el calor o las altas temperaturas sobre el desempeño físico-mecánico de los materiales. Posteriormente se definen y clasifican los sistemas de protección térmica, incluyendo los materiales ablativos de matriz polimérica, enfatizando en la descripción de su mecanismo de protección térmica (ablación) y en las ventajas operacionales de este tipo de materiales. Las técnicas experimentales más importantes de caracterización de materiales ablativos también se incluyen en el contenido de este capítulo. Finalmente se presentan las principales aplicaciones que tienen estos materiales, haciendo énfasis en las industrias aeroespaciales y del espacio. En este sentido, los avances y desarrollos obtenidos por la Emavi en el ámbito nacional son presentados como una forma de validar el potencial e impacto de su aplicación en este campo de la industria.

El capítulo cuatro, llamado *Materiales compuestos de matriz cerámica*, inicia con la descripción de la importancia que tiene el reforzamiento de matrices cerámicas en la obtención de materiales de mayor desempeño, aptos para ser utilizados en diversos campos de la industria e ingeniería. Este capítulo hace énfasis en los diversos métodos de procesamiento de los CMC (por sus siglas en inglés, *ceramic matrix composites*), incluyendo el prensado y sinterizado en frío, el prensado en caliente, procesos de unión por reacción, infiltración, oxidación dirigida, técnicas de reacción química *in situ*, deposición electroforética y síntesis auto-propagable a alta temperatura. Finalmente, aborda el

estudio de la zona de interfaz entre la matriz cerámica y el reforzamiento, así como las principales propiedades de los CMC.

El capítulo cinco, *Materiales compuestos de matriz metálica*, comienza con la descripción de los MMC (por sus siglas en inglés, *metal matrix composites*) y sus principales componentes, es decir, tanto los materiales utilizados comúnmente como matriz, así como los tipos de refuerzos (particulados y fibras). Posteriormente se describen las principales propiedades físicas y mecánicas de los MMC, incluyendo un análisis de la zona de interfaz entre la matriz y los refuerzos. Este capítulo hace principal énfasis en las aplicaciones más comunes de los MMC, destacando aquellas relacionadas con las industrias aeronáutica, aeroespacial y defensa, incluyendo escudos de protección contra rayos gama, sistemas de protección balística y contra ondas y munición explosiva, conductores eléctricos y aplicaciones aeroespaciales. En último lugar, recalca algunas consideraciones generales para garantizar la aplicación de los MMC en estos campos de la industria.

Por último, las conclusiones recopilan los comentarios finales y perspectivas de investigación identificadas por los autores en cada uno de los capítulos y/o temas abordados en el libro.

## Capítulo 1.

# **INTRODUCCIÓN A LOS MATERIALES COMPUESTOS**

---

### **Julián Portocarrero Hermann**

Ingeniero Mecánico. Docente del Programa de Ingeniería Mecánica (Pimec) - Grupo de Investigación en Estudios Aeroespaciales (GIEA). Escuela Militar de Aviación (Emavi) - Fuerza Aérea Colombiana.  
*Correo-e:* julian.portocarrero@emavi.edu.co

### **1.1 INTRODUCCIÓN**

El constante crecimiento industrial ha elevado los niveles de producción, y como consecuencia se han incrementado los factores de servicio requeridos para maquinaria, componentes mecánicos, estructuras, etc. Adicionalmente, en los diversos sectores de la industria se presenta una transición al uso de energías renovables y una alta demanda por componentes cada vez de menor peso (livianos). Este último factor ha exigido a la ciencia e ingeniería de los materiales en la búsqueda de soluciones (materiales) con elevadas propiedades específicas (mecánicas/densidad), las cuales no solo incrementen la vida útil de los equipos y/o aplicaciones, sino que también disminuyan los

consumos de potencia, ventaja operativa muy importante para la industria dado los altos costos de las fuentes de energía, especialmente las ocasionadas por cargas muertas (peso de los elementos o piezas). Adicionalmente, la industria requiere la fabricación de componentes y/o piezas de forma ágil y adecuada para cada aplicación en particular, lo que es una ventaja fundamental de los materiales compuestos o *composites*.

Los materiales compuestos se constituyen por dos fases o componentes; 1) la matriz y 2) el refuerzo, los cuales presentan una sinergia que permite obtener propiedades en conjunto, que son inalcanzables por sí solas. Cuando los materiales se unen entre sí, gran parte de la capacidad de soporte de carga del compuesto formado es asumida por el material de refuerzo. El resultado es un material compuesto optimizado, el cual presenta una alta resistencia y rigidez en relación con su peso. Generalmente los refuerzos suelen ser en forma de partículas o de fibras. Es importante aclarar que, en algunos casos, el material en forma de partículas se añade como relleno, a fin de reducir el precio final del material y no como material de refuerzo en sí. En el caso de las fibras, estas se añaden principalmente como materiales de refuerzo y son las responsables de las propiedades estructurales del material cuando la matriz le transfiere los esfuerzos físico-mecánicos a través de una adecuada interfaz. Los modernos procedimientos de diseño tienden a incrementar la eficiencia estructural a través de reducciones en el peso o de incrementos en la relación resistencia/peso, conocida como resistencia específica. Es aquí donde los materiales compuestos juegan un papel predominante en diversas industrias, destacándose los sectores aeronáuticos, aeroespaciales y defensa.

Los materiales compuestos han sido dominantes entre todos los materiales emergentes debido a sus mayores propiedades mecánicas específicas y versatilidad, permitiendo que estos puedan ser diseñados para cada aplicación particular; pero es importante tener presente que las aplicaciones de materiales compuestos han jugado un papel importante a lo largo de la historia de la humanidad, desde albergar civilizaciones tempranas hasta permitir innovaciones futuras. La utilización de materiales compuestos cada vez más conquista nuevos mercados [1]. Ahora, en el caso de, por ejemplo, los materiales poliméricos, las propiedades mecánicas presentan deficiencias



en el cumplimiento de muchas funciones estructurales, sin embargo, tales limitaciones pueden superarse ampliamente mediante el uso refuerzos de fibras de alto desempeño, como es el caso de los materiales compuestos de matriz polimérica reforzados con fibras de vidrio o de carbono, los cuales son utilizados ampliamente en la industria actual. Como mencionan Gholizadeh [2] y Gdoutos [3], entre otros autores, los materiales compuestos reforzados con fibras han ganado popularidad en las últimas décadas y son considerados materiales esenciales en la industria aeronáutica, aeroespacial y automotriz, dadas sus excelentes características y capacidad de absorber energía (tenacidad), peso ligero, resistencia a la corrosión, flexibilidad para obtener las propiedades mecánicas y físicas deseadas, en especial en el desarrollo de formas complejas que, además, requieren relaciones de alta resistencia y rigidez/peso.

## **1.2 DISEÑO Y SELECCIÓN DE MATERIALES**

Actualmente, en el diseño en ingeniería se requiere la selección y utilización de materiales de forma optimizada, empleando modernos y novedosos métodos de producción, teniendo presente las solicitaciones a las que van a estar expuestos los equipos, máquinas y maquinaria, así como las propiedades específicas de los materiales a ser utilizados, su comportamiento en servicio, la geometría requerida y su factibilidad de procesamiento, enmarcados en un adecuado diseño de ingeniería (con seguridad y responsabilidad legal), para lo cual se deben tener en cuenta variables, como son la relación costo/beneficio y la disponibilidad de materias primas y elementos químicos, las propiedades mecánicas, superficiales y físicas, las características de fabricación, la función estética del producto final y sus propiedades ecológicas (ver Figura 2).

Como se mencionó anteriormente, dentro del proceso de diseño, la selección de un material para construir un componente o parte de una máquina o elemento estructural es una de las decisiones más importantes y trascendentales que debe tomar el diseñador. La selección de un material para alguna aplicación particular, dependiendo de las condiciones, puede ser un proceso sencillo (cuando existen aplicaciones previas) o muy complejo

(nuevas condiciones de servicio o aplicación con muchos parámetros físicos, tecnológicos, económicos y de procesamiento del material). Hoy por hoy los ingenieros se encuentran familiarizados con materiales tradicionales, como el acero y las aleaciones de aluminio, contando con herramientas de diseño y bases de datos bien detalladas para este tipo de materias primas (especialmente en los libros de cálculo y diseño mecánico, estructural, civil, etc.). Sin embargo, actualmente se enfrentan al desafío de trabajar con materiales compuestos, los cuales no solo tienen un comportamiento mecánico y características físicas diferentes a los materiales tradicionales, sino que también se procesan de manera diferente [4]. Estas diferencias han llevado al desarrollo de prácticas de diseño, métodos de prueba y técnicas de fabricación que son nuevas y únicas, las cuales difieren a los utilizados en los sistemas de procesamiento de los materiales tradicionales, además que cada vez surgen nuevos y novedosos materiales compuestos y aplicaciones.



Figura 2. Factores y características que influyen en la selección y utilización de materiales utilizados en el diseño en ingeniería actual. Fuente: el autor.

El óptimo diseño de una máquina, equipo o componente (pieza), demanda un conjunto de propiedades y características de desempeño. La selección de materiales juega un papel importante, resaltando que el tipo de

material influye sobre el desempeño y durabilidad, pero también sobre el peso de los componentes y, por ende, sobre los gastos energéticos que implica el mover grandes masas. En este sentido, una de las propiedades de diseño de mayor importancia es la *resistencia específica* [5], la cual es el resultado de dividir la resistencia mecánica sobre la *densidad* ( $\sigma_f/\rho$ ). Sobre un gráfico *resistencia vs. densidad* (ver Figura 3) es posible trazar algunas líneas de diseño o líneas guías para la selección de materiales en función de un valor de *resistencia específica*. Al respecto, cuando la prioridad en el diseño es la densidad, se toma la línea de diseño representativa a  $\sigma_f^{1/2}\rho$ , que implica una gran prioridad sobre el peso del material. De igual forma, dependiendo de la aplicación se debe tener en cuenta la *rigidez específica* [5], la cual es la relación entre el *Módulo de elasticidad* (*Módulo de Young*) y la *densidad*  $E/\rho$  (ver Figura 4). De forma similar, si la prioridad es la densidad, se debe tomar como referencia la línea  $E^{1/3}/\rho$ .

En general, las Figuras 3 y 4 demuestran que los materiales compuestos cobran gran importancia en aplicaciones en donde se pretenda reducir el peso. En ambas figuras se puede observar que los materiales compuestos presentan alta resistencia y alto módulo de elasticidad con un peso relativamente bajo.

Con base en lo anterior, y en los grandes avances respecto al desarrollo de nuevos materiales y tecnologías de fabricación, se han desarrollado nuevos materiales compuestos de ingeniería. Un ejemplo de aplicación de los desarrollos en materiales compuestos se encuentra en el diseño de aviones militares, los cuales requieren de altas prestaciones mecánicas con un bajo peso para garantizar una alta velocidad y maniobrabilidad, asegurando una gran estabilidad estructural y una elevada seguridad de operación. Como el ejemplo anterior, existen desarrollos y aplicaciones de materiales compuestos para aplicaciones específicas, es decir, materiales diseñados para cada aplicación particular. Este es el caso, por ejemplo, de la industria aeroespacial, en donde el desarrollo de los materiales compuestos carbono/carbono, o materiales compuestos ablativos, usados en el desarrollo de aeronaves espaciales y componentes de propulsión, ha jugado un rol importante en la evolución de esta industria. Al respecto, se hará énfasis en estas aplicaciones en el capítulo 3.

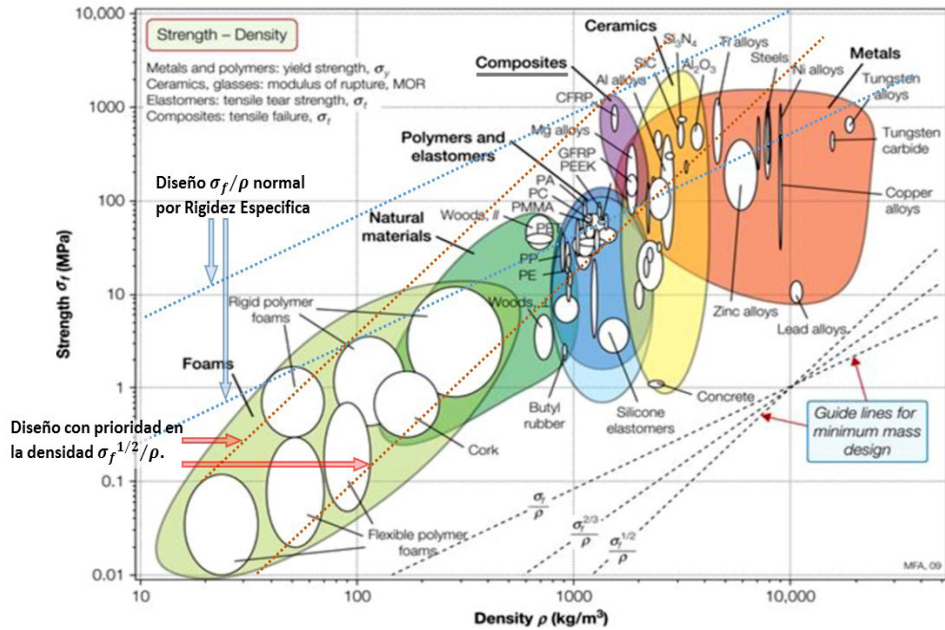


Figura 3. Resistencia específica de diversos materiales. Fuente: adaptada de [5].

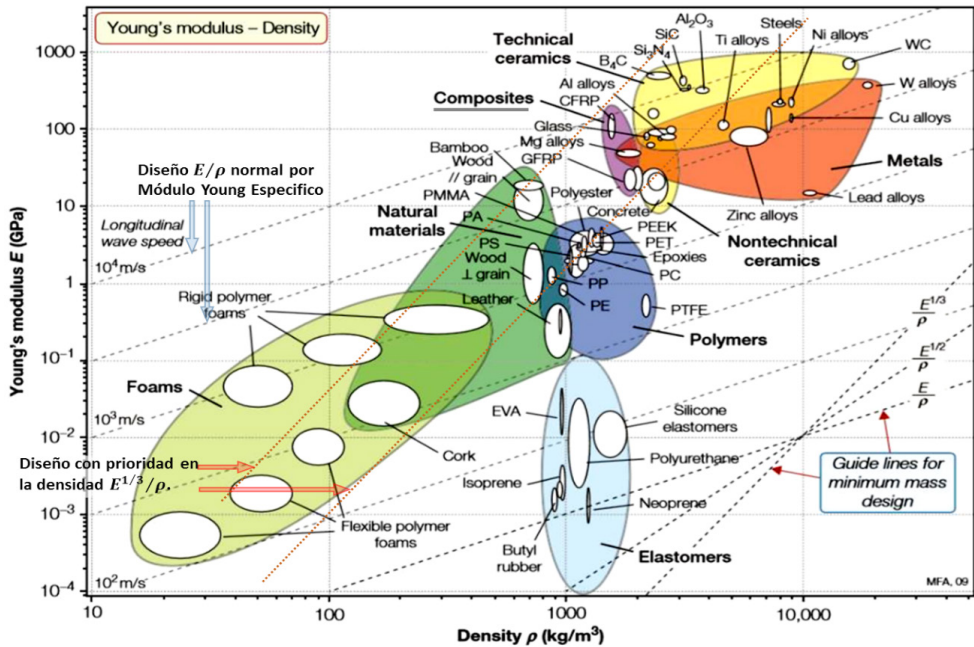


Figura 4. Módulo de elasticidad específico de diversos materiales. Fuente: adaptada de [5].

A continuación, se abordará la definición de los materiales compuestos y algunas consideraciones importantes.

### 1.3 DEFINICIÓN DE MATERIALES COMPUESTOS

Como se ha mencionado anteriormente, los materiales compuestos están formados por combinaciones macroscópicas de dos o más materiales distintos (propiedades químicas y físicas marcadamente diferentes), que no son solubles entre sí y mantienen sus identidades separadas (al menos microscópicamente) al interior del compuesto, los cuales poseen una interfase discreta y reconocible que los separa. Pero estos materiales actúan en conjunto, otorgando al producto obtenido propiedades y características que son diferentes de aquellas de los constituyentes, y en general superiores, cuando se analiza su desempeño en servicio. Debido a su constitución, la mayoría de los materiales compuestos son heterogéneos (propiedades diferentes en su volumen) [4], [6], [7]. Por lo anterior, se puede decir que un compuesto es una combinación de dos o más materiales con propiedades que los componentes no tienen por sí mismos y que están hechos para comportarse como un solo material [8]. En estos materiales, a uno de los constituyentes principales, normalmente presente en forma de fase continua, se le llama matriz; el otro componente principal es el reforzante, el cual puede tratarse de fibras o partículas, las cuales, en general, se le agregan a la matriz para modificar sus propiedades (aumentar su rigidez, resistencia mecánica, conductividad, etc.). El refuerzo forma una fase discontinua que se dispersa normalmente de forma uniforme en toda la matriz [4], [9], [10]. Es importante recalcar que la matriz y el refuerzo no reaccionan químicamente, sino que permanecen físicamente como unidades interdependientes dentro del compuesto. La matriz es la responsable de mantener el refuerzo en su lugar, además de transferir los choques mecánicos y las ondas de energía de un material de refuerzo a otro a través de la unión interfacial [11]. Para intervenir o mejorar la unión interfacial entre el refuerzo y la matriz, la cual es la región crítica, la superficie de refuerzo puede adaptarse mediante un tratamiento químico o recubrirse con una capa muy delgada de algún aditivo químico, para mejorar la humectación del refuerzo por parte de la matriz y de esta forma optimizar el desempeño en conjunto de estas fases

[4], [12], [13]. Si la interfaz no se adapta adecuadamente, se puede ocasionar la degradación de las propiedades del material compuesto [13]. El tratamiento de la superficie también puede servir para proteger la superficie de refuerzo de la reacción química interfacial, de la degradación por un ataque ambiental, como de la humedad y los productos químicos, de una reacción química adversa con la matriz a altas temperaturas, de la falta de humectabilidad con la matriz, entre otras [4], [13].

Las altas propiedades mecánicas de los materiales compuestos en relación a su densidad (propiedades específicas), su resistencia química y a fatiga, buena estabilidad dimensional, excelentes propiedades como aislantes térmicos, fónicos y eléctricos, y su versatilidad en la obtención de formas complejas, los hacen muy atractivos para las industrias aeroespaciales, automotrices, electrónicas, deportivas y muchas otras aplicaciones industriales, donde un factor clave importante es el consumo de energía y la capacidad de aumentar la capacidad de transporte de carga [4], [9], [14]. En este sentido, el uso de materiales ligeros, como materiales compuestos, disminuye el peso, obteniendo ahorros de energía y haciendo posible el aumento de la carga útil [4], [12]. Adicionalmente, los materiales compuestos permiten la posibilidad de diseñar y fabricar un producto específicamente adaptado a las condiciones de servicio requeridas, además que permite optimizar la relación costo/beneficio [14].

De acuerdo con lo expresado por Miravete y Castejón [15], se deben ajustar el término de material compuesto o *composite* sobre aquellos materiales fabricados o desarrollados por la mano del hombre, dejando por fuera de la definición a una gran variedad de materiales compuestos naturales, como los huesos, las maderas, etc.

En el siguiente ítem se describe el componente histórico de los materiales compuestos y su impacto en la evolución tecnológica.

#### **1.4 HISTORIA DE LOS COMPUESTOS**

Al contrario de lo que se pudiera pensar, el concepto de material compuesto es tan antiguo como la naturaleza misma. Un buen ejemplo de ello se puede observar en la madera, la cual combina fibras de celulosa de estructura

tubular unidas con una matriz de lignina<sup>1</sup> [16], [8], también la mayoría de las rocas sedimentarias, las cuales son compuestos de partículas unidas por cemento natural; y muchas aleaciones metálicas son compuestos de varios constituyentes bastante diferentes [8]. Los materiales compuestos han jugado un papel importante a lo largo de la historia humana, desde albergar civilizaciones tempranas hasta permitir innovaciones actuales y futuras. Los compuestos hacen parte de la vida cotidiana actual; se usan en construcciones, aplicaciones médicas, la industria minero-energética, transporte, implementos deportivos, la industria aeronáutica y aeroespacial, entre muchos otros campos de aplicación [1], [9].

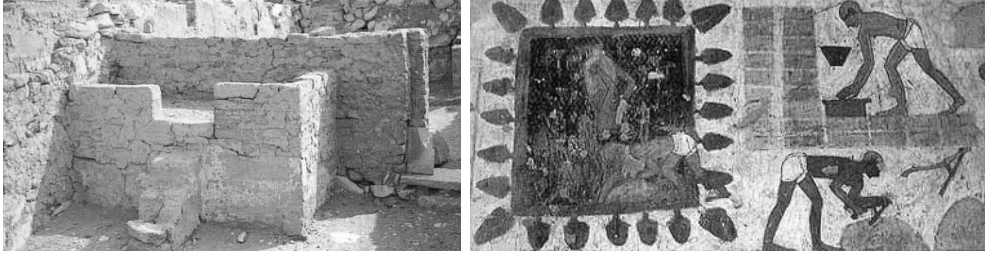
Cuando se combinan dos o más materiales diferentes, el resultado es un compuesto. Los primeros usos de los compuestos se remontan a los inicios de la civilización, alrededor de 3400 a. C., cuando los mesopotámicos pegaron tiras de madera en diferentes ángulos para crear madera contrachapada [17], [18]. Sin embargo, se cree que en 7000 a. C. los seres humanos ya fabricaban ladrillos secados al aire (Figura 5), para lo cual usaban un compuesto de arcilla y barro (barro pegajoso) con estiércol o fibras. Entre 2181 y 2055 a. C. los egipcios usaban cartonaje y capas de lino o papiro empapados en yeso para hacer máscaras mortuorias [17], [18]. En los alrededores de 1500 a. C. los primeros colonos egipcios y mesopotámicos usaban una mezcla de adobe (barro) y paja para crear edificaciones fuertes y duraderas, lo que sentó las bases de las construcciones actuales [16], [17], [19], [20], [21], [22]. Este proceso de refuerzo se usó en los antiguos productos compuestos, incluidos la cerámica y se utilizó, incluso, en los barcos [16], [17], [21].

El libro *The ten books on architecture* describe que alrededor del 25 a. C. se usaba una mezcla de hormigón o concreto, en la cual se usaban varios tipos de cal y morteros. Según la investigación, el cemento usado es similar y, de alguna manera, superior al cemento Portland que se usa actualmente.

---

1 La lignina es el constituyente intercelular incrustante o cementante de las células fibrosas de los vegetales. Se concentra en la lámela media y funciona prácticamente como relleno para impartir rigidez al tallo de la planta. El segundo elemento en importancia de la composición vegetal.

Este hallazgo fue documentado por el ingeniero romano antiguo Vitruvio, quien además creó varias versiones del compuesto [17], [18].



**Figura 5. Ruinas de una antigua vivienda egipcia (izquierda).**

**Equipo de obreros egipcios haciendo adobes (derecha).**

**Fuente imagen izquierda: [18]. Fuente imagen derecha: [19].**

Durante la dinastía Han (206 a. C. hasta el 220 d. C.) los chinos obtuvieron pulpa de papel y adhesivo para hacer las primeras estructuras de papel maché<sup>2</sup> mediante una técnica artesanal [18].

Alrededor de 1200 d. C. los mongoles inventaron el primer arco en materiales compuestos (Figura 6), para lo cual usaron una combinación de hueso, madera, tendones y un pegamento de origen animal; este material era presionado y envuelto en una corteza de abedul. Estos arcos se caracterizaban por ser muy poderosos y precisos, siendo las armas más temidas en la tierra hasta la invención en el siglo XIV de armas de fuego efectivas [17]. En efecto, estos arcos ayudaron a conseguir el dominio militar de Genghis Khan [17], [21], [22], [23], [24].

Siguiendo con la línea del tiempo y evolución de los materiales compuestos, a continuación se hace una breve introducción al desarrollo de algunas matrices utilizadas en los materiales compuestos y que dieron origen al desarrollo de estos, empezando por los polímeros y haciendo una pequeña reseña del desarrollo del concreto. Posteriormente se mencionarán las fibras, y a partir de allí se abordarán los materiales compuestos actuales.

---

2 Papel maché: papel mascado o machacado, usado para hacer elementos decorativos y máscaras, sus ingredientes son: papel, agua y pegamento.





**Figura 6. Uso del arco mongol en batalla (izquierda y centro). Un arquero mongol con su vestimenta, arco y flechas (derecha). Fuente: [23].**

En el año 1786 se dieron los primeros pasos hacia el desarrollo del estireno<sup>3</sup> (del cual se deriva el poliestireno) [25], [26], mediante la destilación del estorax, bálsamo obtenido del árbol *Liquambar Orientalis*. Ahora, es importante tener presente que no fue sino hasta 1839 que Edward Simon (químico alemán) separó por primera vez al estireno del estorax y de la sangre de dragón<sup>4</sup>, y que casi un siglo después, en la década de 1930, se pudo fabricar a escala comercial el poliestireno por un proceso de polimerización por adición o “poliadición” [27].

Alrededor de 1850 Alexander Parkes desarrolló la parkesine (sustancia transparente, dura pero flexible), precursora del celuloide, el cual fue desarrollado John Wesley Hyatt, quien adquirió la patente británica de Parkes en el año 1868, introduciéndola en el mercado sobre la década de 1870, siendo el inicio de los polímeros sintéticos [27], [28], [29], [30]. No obstante, a lo largo del siglo XIX se separó la celulosa y se transformó químicamente como un sustituto del mármol y de la seda [31].

3 Estireno: compuesto aromático denominado químicamente vinilbenceno. Es uno de los compuestos de vinilo más antiguos conocidos en el mundo. El estireno se usa en la producción de poliestireno, caucho de estireno-butadieno (SBR), copolímero de estireno-acrilonitrilo y acrilonitrilo-butadieno-estireno (ABS). Además, es disolvente usado en las resinas poliéster y viniléster.

4 Resina obtenida del fruto de la palma de ratán malaya.

El avance real en relación con la producción industrial de polímeros naturales modificados se produjo 1839 con la vulcanización del caucho natural por Charles Goodyear, quien transformó la resina polimérica obtenida del árbol de caucho (*Hevea brasiliensis*, árbol de caucho productor natural de látex, ver Figura 7) calentándola con azufre [31], [32], [33]. Después el escocés John Boyd Dunlop, a fines de los 1880, inventó el neumático [32].

Al respecto, el 21 de noviembre de 1843 Thomas Hancock obtuvo una patente en Inglaterra para la vulcanización del hule usando azufre, ocho semanas antes de que lo hiciera Charles Goodyear en los EE. UU. (30 de enero de 1844), dado que se mencionaba que en 1842 William Brockendon (amigo de Hancock y quien inventó la palabra vulcanización en honor al dios Vulcano de la mitología romana) le había mostrado algunas muestras de caucho americanas que habían sido tratadas con azufre [34].



**Figura 7.** *Hevea brasiliensis*, árbol de caucho productor natural de látex “cautchouc”, que quiere decir, para los nativos de Brasil, “árbol que llora”. Fuente: [32].

Hacia el año 1872 Johann Friedrich Wilhelm Adolf von Baeyer (Adolf von Baeyer) estuvo a punto de descubrir la resina fenólica, al lograr una reacción de condensación entre fenoles y aldehídos, lo que producía unas sustancias resinosas [35] [36]. En 1899 Arthur Smith patentó la primera resina fenol-formaldehído para uso como un sustituto de la ebonita en los aislamientos eléctricos, pero esta presentaba algunos problemas, debido a que el

producto requería de varios días para su solidificación, y además, durante este tiempo se deformaba [36].

Sin embargo, fue el trabajo del químico belga Leo Hendrik Baekeland, quien en 1906 obtuvo una patente de la baquelita (resinas termo-resistentes de formaldehído), lo que posibilitó, en 1907, la producción de resinas fenólicas a nivel industrial [31], [33], [37]. Se puede decir que la baquelita de Baekeland fue el primer compuesto de matriz polimérica sintética desarrollado por el hombre, dado que esta es una combinación de un polímero (matriz) con harina de madera o fibras de asbesto (refuerzo), la cual es resistente al calor y no conductora. Por esta razón, la baquelita era perfecta para la fabricación de artículos, como utensilios de cocina, carcasas eléctricas, juguetes y discos [18]. Baekeland, con sus aplicaciones y patentes, fue reconocido en 1908 como el pionero de la industria de los polímeros completamente sintéticos [35], [36], [37], [38]. Como menciona Amato, “Leo Baekeland, decidido a hacer un aislante, pero terminó inventando el primer plástico verdadero y transformó el mundo” [37].

En 1835 el monómero del cloruro de vinilo fue descubierto por el alemán Justus von Liebig, pero no le vio utilidades claras, por lo cual le permitió al estudiante Henri Victor Regnault que experimentase con él, logrando Regnault en 1838, mediante la polimerización, la primera transformación del cloruro de vinilo en PVC; sin embargo, Regnault no advirtió la importancia de sus descubrimientos [39], [40], [41]. En 1872 Eugene Baumann logró polimerizar varios haluros de vinilo, sin conocer los trabajos de Regnault. Aunque tampoco fue capaz de ver su potencial [39], [40], [41]. En 1912 Ostrominlensky estableció los entornos para la polimerización del cloruro de vinilo (PVC), desarrollando las técnicas adecuadas a escala de laboratorio [39].

Posteriormente, en 1913 Fritz Klatt de Grieskein desarrolló un método patentado para la polimerización del PVC con luz solar [40] (la patente expiró al no encontrarle utilidad alguna). En 1918 adelantó los procesos para la producción del PVC, los cuales aún se emplean en la actualidad, mediante la reacción, en estado gaseoso, del cloruro de hidrógeno y el acetileno en presencia de catalizadores [39], [41].

Waldo Lonsbury Semon fue contratado por la empresa B. F. Goodrich en 1926 para realizar investigaciones con el propósito de sustituir el caucho natural por sintético. Sin embargo, en 1929 Semon logró transformar el PVC en un material con buenas propiedades mecánicas, que no era conductor de calor, y además era resistente al agua, consiguiendo una aplicación para el PVC en paraguas, abrigos impermeables y cortinas de baño [40]. Semon patentó su descubrimiento en 1933 [41].

La resina de melamina o melamina formaldehído es un polímero sintético, duro y termoendurecible, descubierto por William Fletcher Talbot y patentado en 1936 [42]. Se obtiene al combinar melamina (compuesto orgánico) con el formaldehído y exhibe una gran resistencia química y al calor. Esta resina melamina formaldehído es de amplia aplicación en recubrimientos automotrices, epoxi y de poliéster para electrodomésticos; así mismo, los laminados de melamina formaldehído se utilizan para revestir paredes, armarios, mostradores, etc. [43].

El poliéster es un material conocido desde el siglo XIX, pero su nombre actual procede de los años 30 del siglo XX. Por su parte, el PET tiene sus orígenes en escritos de 1929 de Wallace Carothers, año en que las empresas DuPont e Imperial Chemical Industries (ICI) acordaron compartir información sobre patentes e investigaciones [44], [45]. Sin embargo, DuPont eligió concentrarse en la investigación del Nylon, que era más prometedora. John Rex Whinfield y James Tennant Dickson observaron que Carothers no había investigado el poliéster formado a partir de etilenglicol y ácido tereftálico. Whinfield y Dickson, junto con los inventores W. K. Birtwhistle y C. G. Ritchie, crearon la primera fibra de poliéster, llamada Terylene, en 1941, fabricada por primera vez por Imperial Chemical Industries o ICI. La segunda fibra de poliéster fue el Dacron de DuPont, en 1945 [44], [45], [46]. El poli-etilentereftalato es la base de fibras sintéticas, como poliéster Dacron y Terylene, las cuales son de amplio uso en la actualidad.

Es importante destacar que los nuevos materiales poliméricos sintéticos superaron a las resinas individuales derivadas de la naturaleza, y en la década del 30 del siglo XX se consiguió el desarrollo industrial de los polímeros más importantes usados actualmente, como el policloruro de vinilo

(PVC), el poliestireno (PS), las poliolefinas y el polimetacrilato de metilo (PMMA) [25].

En 1936 se presenta un hecho muy importante en el desarrollo de las resinas de poliéster, y fue el descubrimiento de Carleton Ellis (padre de los poliésteres insaturados), el cual logró reducir considerablemente el tiempo de reticulación y polimerización durante la adición de monómeros insaturados a poliésteres insaturados [25], [47], [48], [49]. Las resinas poliéster insaturadas fueron patentadas ese mismo año [49]. Estos nuevos materiales sintéticos superaron a las resinas individuales obtenidas de la naturaleza [21].

Un material compuesto importante, que puede decirse se desarrolló en forma paralela a los polímeros, es el hormigón armado<sup>5</sup>, al cual históricamente se le atribuye su invención a William Wilkinson (1854), de Newcastle, Inglaterra [50], [51], dado que él, en su patente de 1854, plantea el uso de elementos metálicos embebidos en hormigón, donde estos últimos cumplen con una función resistente [52]. Sin embargo, es importante tener presente que civilizaciones antiguas ya habían usado hormigón; ellos tuvieron la idea de juntar piedras usando un amalgamador o conglomerante (matriz) [52], [53].

En efecto, los egipcios (2500 a. C.) emplearon un mortero de cal y yeso en la construcción de las pirámides de Giza [53]. Sin embargo, fueron los romanos los que emplearon el hormigón (*Opus caementicium*<sup>6</sup>, material de construcción muy utilizado por los romanos, que aprendieron posiblemente de sus antecesores etruscos [54], ver Figura 8) a gran escala, en obras como el Coliseo (en su cimientado y paredes internas, ver Figura 9) y el Panteón, construidos en los años 80 y 120 d. C. en Roma, o bien en el puente de Alcántara, en Hispania, del 104 al 106 d. C. [53].

---

5 Hormigón armado: es un material de construcción formado por una mezcla de piedras pequeñas y un tipo de argamasa (cal, cemento, arena y agua), reforzado interiormente por una armadura de barras de hierro o acero, para que una vez fraguado, el hierro o acero absorba los esfuerzos de tracción.

6 Material de construcción que consistente en una mezcla de arena, cal, agua, guijarros o cascajo (preferentemente toba o tufo volcánico), cuya resistencia y solidez, una vez fraguado, era comparable y hasta superior, en algunos casos, a las de algunos materiales utilizados en la época.



**Figura 8. Opus caementicium en los muros del teatro romano de Mérida (Badajoz), construido hacia el año 16-15 a. C. y donado por el emperador Marco Agripa (yerno del emperador Augusto), data de casi la misma época de la fundación de Emerita Augusta. Tuvo algunas remodelaciones en siglo I y II d. C. Fuente imagen de la derecha: [54]. Fuente imagen de la izquierda: [54].**



**Figura 9. Coliseo Romano empezado por el emperador Vespasiano, en torno al año 71 d. C., y terminado por el emperador Domiciano, quien añadió un último piso en el año 82. Fuente imagen izquierda: [56]. Fuente imagen derecha: [57].**

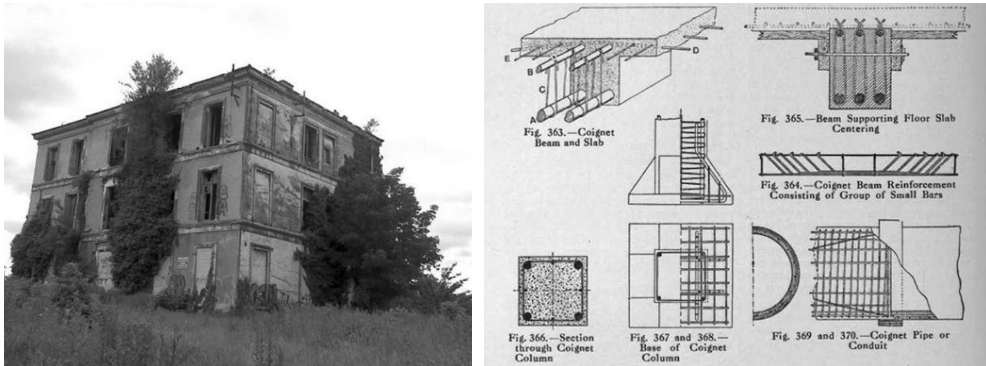
En 1830 aparecen algunas referencias del uso del hormigón armado antes de Wilkinson, en una publicación titulada *Enciclopedia de la arquitectura de casas de campo, granjas y aldeas*, la cual se reconoce como la primera referencia bibliográfica del uso de hormigón armado. En esta publicación sugieren el empleo de una malla de varillas de hierro embebidas en hormigón, para conformar un techo [50], [51], [52].

Existen muchos inventores que ya habían experimentado con el hormigón armado, como el abogado francés Jean Louis Lambot, en 1848, quien desarrolló el primer bote del mundo (imputrescible) en hormigón reforzado, empleando una malla de varillas de hierro y recubiertas con una mezcla de concreto u hormigón (ver Figura 10), la cual fue exhibida en una exposición en 1855 en París [50], [51], [52]. También está el caso de Joseph Monier, quien en 1849 experimentó con el desarrollo de macetas de cemento armadas con una malla de alambre [50], [51]. Después, Francois Coignet marcó el comienzo del uso del hormigón armado con la construcción de la primera casa de hormigón armado con hierro en 1853 (ver Figura 11) [18].



**Figura 10. Primer bote del mundo en hormigón reforzado desarrollado por Jean Louis Lambot. Fuente: [60].**

Antes de que Coignet descubriera el uso del concreto armado, el hormigón en sí era muy limitado como material de construcción, debido a su baja resistencia a la tracción y ductilidad. El problema del hormigón era el agrietamiento que podría ocasionar una falla estructural. Sin embargo, con la adición de fibras y barras de refuerzo de acero, el cual presenta alta resistencia a la tracción y ductilidad, se otorgó la resistencia necesaria a las regiones sujetas a esfuerzos de tracción. Esta innovación condujo al uso generalizado del hormigón en los edificios [58], [59].



**Figura 11. Casa de François Coignet (izquierda), primera construida con concreto reforzado en 1853. Representación del sistema de reforzamiento del concreto de Francois Coignet (derecha). Fuente: [59].**

A principios de la década de 1900 la arquitecta estadounidense Julia Morgan creó un campanario de 72 pies, llamado *El Campanil*, en Oakland, California, de hormigón armado. Esta impresionante estructura sobrevivió al terremoto de San Francisco de 1906 sin daños, y el concreto reforzado se volvió ampliamente utilizado por su desempeño sísmico y resistencia al fuego [18]. El hormigón armado ha sido y sigue siendo uno de los materiales más utilizados en estructuras.

Tomando ahora el desarrollo y uso de fibras, es necesario aclarar que la utilización de fibras es muy antigua, por ejemplo, en el caso de las fibras naturales, se podría afirmar que han existido entre los humanos desde el principio de su evolución. Los humanos recolectaban materias primas de la naturaleza para usarlas como cuerdas o textiles. Después empezaron a cultivar diversas variedades, las cuales se han mejorado mediante la selección, de acuerdo con las necesidades y valores sociales [61].

La historia de las fibras creadas por el hombre es muy antigua. Un caso especial es la fibra de vidrio, la cual se remonta a los antiguos fenicios y egipcios (1500 a 1200 a. C.), quienes descubrieron cómo producir fibras de vidrio, que eran empleadas como elementos de decoración y refuerzo en artículos de cerámica [4], [11], [16], [21], [62], [63], [64]. En el año de 1713 la fibra de vidrio se usaba con finalidades estilísticas. Es así como el diseñador



René Reanmur expuso muestras de sus tejidos en la Academia de Ciencia de París (Francia) [65].

Edward Libbey en 1893 en la Exposición Universal de Chicago (Estados Unidos) expone un vestido realizado en fibra de vidrio [65]. Durante la Primera Guerra Mundial (1914-1918) los alemanes produjeron fibras de vidrio como sustituto del asbesto, pero esta tecnología no se desarrolló [66]. La producción en masa de hebras de vidrio se descubrió alrededor del año 1932, cuando Games Slayter, un investigador de Owens, Illinois, dirigió accidentalmente un chorro de aire comprimido a una corriente de vidrio fundido y produjo fibras. Estas eran unas lanas de vidrio, las cuales atrapaban una gran cantidad de aire o gas, lo que las hacía ser un buen material aislante, especialmente a altas temperaturas [67]. Las empresas Corning Glass y Owens-Illinois la patentaron con el nombre Fiberglass (fibra de vidrio) en 1936 y se empezó a usar como aislante en forma de lana de vidrio, la cual se sigue usando actualmente [64], [65].

El desarrollo de plástico reforzado con fibra de uso comercial se estaba investigando ampliamente en la década de 1930. En el Reino Unido pioneros como Norman de Bruyne (catedrático de la Universidad de Cambridge) llevaron a cabo una investigación considerable [67]. Este científico descubrió, mientras investigaba el uso de madera contrachapada en aviones, que las estructuras hechas de pieles de madera contrachapada se podían hacer más ligeras, sin pérdida sustancial de resistencia, mediante la orientación cuidadosa de la dirección de la fibra de capas muy delgadas de madera contrachapada. Esto proporcionó un refuerzo de tensión eficiente, por lo que pudo reducir el número y la sección transversal de los refuerzos al mínimo indispensable [68]; estas investigaciones fueron de especial interés para la industria de la aviación [67]. Bruyne, en 1936, prestó sus servicios de consultoría e investigación sobre plásticos reforzados para hélices de aviones en la empresa Havilland Aircraft Company en Hatfield [67]. En 1937 Bruyne sugirió, en un artículo para la Royal Aeronautical Society, el uso de materiales plásticos para la construcción de aviones [66].

En 1936, Bruyne notó, al igual que Meyer y Lotmar, las propiedades excepcionales de algunas fibras celulósicas, en términos de su alta rigidez

y/o resistencia, junto con una gravedad específica baja, y se dedicó a tratar de potenciar y optimizar su uso, pegando madejas o capas unidireccionales de las fibras. Por un golpe de buena suerte, uno de sus estudiantes llamado Gordon tenía una conexión con una fábrica de lino de Belfast y sugirió el uso de lino como refuerzo [66].

En el año de 1936 DuPont lanzó una resina adecuada para combinar las fibras de vidrio “fiberglass”, desarrollando un material compuesto, al combinar fibras de vidrio con la matriz polimérica, ofreciendo un material con una alta relación resistencia-peso, que podría reemplazar la madera y, en algunas aplicaciones, a las aleaciones metálicas [18], [66]. Este material compuesto reforzado con fibra de vidrio se volvió crítico durante la Segunda Guerra Mundial y se produjo en masa para barcos y fuselajes, lo que finalmente llevó a la producción de automóviles en la década de 1950 [18].

El primer avión construido con el proceso de madera contrachapada moldeada “Duramold”, que tuvo éxito, fue el Fairchild F-46A, el cual fue diseñado por Virginius E. Clark en 1936, y desarrollado conjuntamente por Fairchild Aircraft y Haskelite Manufacturing en 1937 (Figura 12) [69], [70].



**Figura 12. Fotografía tomada en 1937 al Fairchild F-46A (izquierda). Fuselaje del Fairchild F-46A en el Western Antique Aeroplane and Automobile Museum (derecha).**

**Fuente imagen izquierda: [70]. Fuente imagen derecha: [69].**

En el año de 1937 J. E. Gordon, un arquitecto naval, quien trabajo en el Departamento de Materiales (dirigido en ese entonces por W.D. Douglas) como Asistente Técnico III en el Royal Aircraft Establishment (RAE), en

Farnborough (Reino Unido), tenía la función de evaluar nuevos materiales no metálicos y entre ellos estaba Gordon-Aerolite (resina fenólica reforzada con fibra de lino). De ahí surgió la idea de usar estos nuevos materiales para moldear a baja presión grandes monocascos de una pieza, como alas y fuselajes [66].

Es importante resaltar que en el *Technical Memorandums National Advisory Committee for Aeronautics No. 841*, de 1937 [69], se incluyen el uso de resinas sintéticas con rellenos (“fillers”), dando formas de aplicación (ver Figura 13) y propiedades mecánicas de interés para la industria aeronáutica.

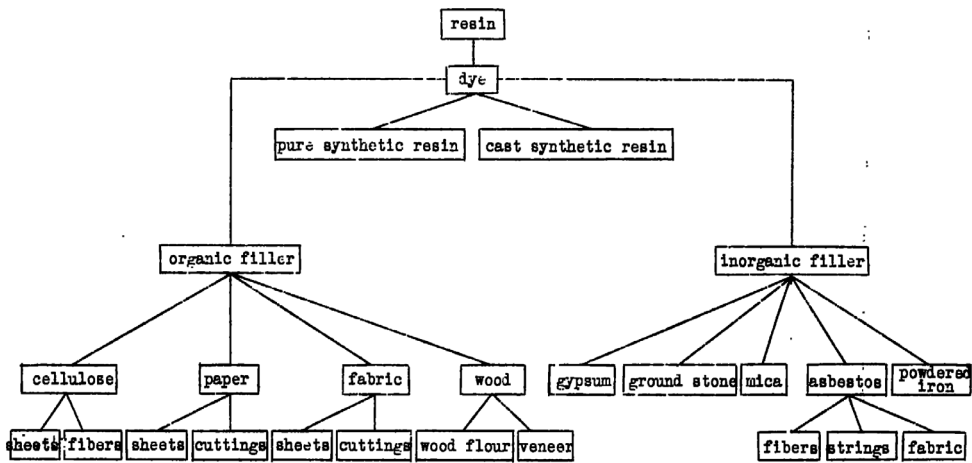


Figura 13. Refuerzos para la resina sintética. Fuente: [69].

Uno de primeros reportes de uso de materiales compuestos para estructuras primarias de aeronaves data del 1940, cuando se construyó un larguero principal Blenheim de Gordon Aerolite, un material desarrollado por la empresa del Dr. Bruyne, Aero Research Limited de Duxford (actualmente parte del Grupo Ciba-Geigy). Esta se componía de una madeja de hilo de lino sin blanquear, conformada con resina fenólica en una prensa calentada, para dar lugar a lo que probablemente fue el primer material compuesto avanzado del mundo [72].

Los materiales compuestos cobraron gran importancia e impulso durante la Segunda Guerra Mundial, entre los años 1939 y 1945, donde se requería

un gran despliegue de armamentos, el más grande a lo largo de la historia, lo que motivó un gran desarrollo en la aviación. En esta época la construcción de aeronaves se realizaba de forma apresurada y en gran parte improvisada, por la urgencia imperante del momento, presentando grandes inconvenientes en la instalación de los sistemas a bordo, que eran los últimos elementos en el montaje de la aeronave, donde por ejemplo los conductos de refrigeración que había que instalar eran muy complejos y los espacios excesivamente estrechos, por lo cual se usaron materiales compuestos, encontrando ventajas en su facilidad de fabricación y conformado de piezas [72], [73]. Las diversas aplicaciones militares, sumadas a la facilidad de producción, facilitaron y proyectaron el uso de los polímeros reforzados, formados en su mayoría por poliésteres insaturados [25], [49]. Como menciona Greelane, “la Segunda Guerra Mundial trajo la industria de los plásticos reforzado con fibra (FRP) del laboratorio a la producción real” [74]. Se requería de materiales alternativos para aplicaciones de bajo peso en aviones militares, por lo cual los ingenieros se enteraron que, además del bajo peso y alta resistencia, los materiales compuestos presentaban otros beneficios, por ejemplo, que los materiales compuestos poliméricos con reforzamiento en fibra de vidrio eran transparentes a las frecuencias de radio, lo que permitió desarrollar cubiertas para protección de equipos de radar electrónico [73].

La aeronave BT-13 fue la primera aeronave en usar materiales compuestos reforzados con fibras en el calado [8]. Un evento histórico ocurrió durante 1944 en la U.S. Air Force, cuando se llevó a cabo el primer vuelo exitoso de la aeronave BT-15, cuyas estructuras primarias y secundarias estaban construidas en plástico reforzado [8], [75]. La aeronave BT-15 fue diseñada, fabricada y probada en vuelo en los laboratorios de WPAFB, utilizando plástico reforzado (revestimiento manual de pieles superficiales de fibra de vidrio impregnadas con poliéster termoestable [resina poliéster]), que incluía el uso del proceso de cera perdida para la obtención de estructuras tipo “sándwich” utilizadas en la fabricación del fuselaje monocasco, alas, estabilizador vertical, etc. [8].

Es importante resaltar que el término compuesto se empezó a utilizar en la industria de los plásticos reforzados durante la década de 1940 [8]. Los

años 50 vieron un crecimiento en la producción materiales compuestos reforzados con fibra de vidrio, en diversos artículos, como, por ejemplo, palas de helicópteros, placas de circuitos impresos y componentes de armas de fuego, como receptores inferiores [18]. Entre los años 1951 y 1952 la tecnología de bobinado de filamentos desarrollada por RAE en conjunto con Bristol Aerojet Ltd. e Imperial Metal Industries Ltd. condujo a pruebas de vuelo de cohetes y pruebas de misiles exitosas [66]. Otro elemento que generó el crecimiento del uso de los materiales compuestos en 1952 fue la optimización y producción masiva de las resinas de poliéster y epoxi [66].

Gordon, en 1949, sugirió la posibilidad de usar monocristales como refuerzos para plásticos estructurales. Después de 1954, con su grupo en Tube Investments Ltd. (Hinxton Hall, Cambridge), obtuvieron finos whiskers<sup>7</sup>. Un tiempo después Shyne y Shaver realizaron un trabajo similar en los Estados Unidos [66]. En 1958 Gordon y Marsh encontraron que los whiskers grandes eran más débiles que los más finos, porque tenían fallas geométricas superficiales o ‘escalones (*steps*)’ creados por el proceso de crecimiento, determinando que la resistencia de la fibra depende, no del tamaño, sino del cuidado de la preparación y la ausencia de defectos superficiales, ampliando el trabajo de Griffith, quien en 1920 había demostrado que las fibras de vidrio delgadas eran inmensamente fuertes [66].

En 1958 Bacon [32], en EE. UU., experimentó con whiskers de carbono hechos en un arco de carbono a alta presión. Posteriormente, Koflensky usó grafito pirolítico estirado en caliente a 2 750 °C, con lo cual logró aumentar el módulo de elasticidad. Estas investigaciones indicaron el camino para el posterior desarrollo de las fibras de carbono para refuerzos estructurales para los materiales plásticos [66]. En 1960 Akio Shindo desarrolló fibras de carbono de alta resistencia, utilizando como precursor el poliacrionitrilo (PAN), sustituyendo a otros precursores antes empleados [75], [76].

---

7 Los whiskers son fibras cortas monocristalinas con una estructura cristalina casi perfecta. De naturaleza químicamente pura, pueden ser metálicos y no metálicos, los cuales poseen una altísima resistencia y modulo. De diámetros micrométricos (1 a 25µm), su longitud varía entre 0,1 y varios mm. Su extrema alta resistencia se atribuye a tener unos finísimos diámetros, lo que minimiza la aparición de defectos [78].

Aunque la obtención de fibra de boro por deposición de vapor fue reportada por primera vez por E.J. Weintraub en 1911, los trabajadores de Texaco, en 1959, lograron por primera vez fabricar por deposición de vapor químico una fibra continua de alta resistencia y alto módulo elástico [77].

La carrera espacial de la década de 1960 exigió un material que fuera aún más liviano, fuerte y resistente al calor, y así nació el compuesto de matriz metálica (MMC). Los MMC son compuestos de una matriz basada en aleaciones metálicas ligeras (Al, Ti o Mg) reforzada con partículas o fibras de naturaleza cerámica o, en algunos casos, también metálica. La fibra de carbono, patentada en 1959, y los whiskers de materiales cerámicos, hicieron que los materiales compuestos fueran más duraderos y adaptados a las temperaturas [18].

En 1965 Stephanie Kwolek en la empresa DuPont comenzó el proceso de desarrollar un nuevo material para neumáticos, descubriendo que el poli-p-fenileno-tereftalato y la polibenzamida formaba una fibra de aramida asombrosa. En 1971 la fibra se había refinado y probado más y se presentó al mundo como Kevlar [75], [78], [79].

En la década de 1960 el desarrollo en materiales compuestos y nuevas fibras fue impulsado por las demandas de la industria aeronáutica y del espacio; en la década de 1970, cuando disminuyeron las demandas espaciales y militares, los compuestos fabricados con fibras de alto costo tuvieron que encontrar aplicaciones civiles, convirtiéndose las industrias del deporte y automotriz en los mercados más importantes [75].

En efecto, en las últimas décadas los desarrollos en materiales compuestos han sido impulsados por mercados de consumo como la industria del automóvil, aeronáutica, aeroespacial y del deporte, entre otras, donde los compuestos comenzaron a reemplazar los materiales convencionales [18]. Estos desarrollos están relacionados con las aplicaciones consideradas como avanzadas, por tal razón serán abordadas en los capítulos siguientes, en función del tipo de matriz que conforma el *composite*.

## 1.5 CLASIFICACIÓN DE LOS MATERIALES COMPUESTOS

Los materiales compuestos más comunes se constituyen de una matriz polimérica tipo resina termoestable (poliéster, fenólica, epoxi o viniléster), reforzada con un material de tipo particulado o fibra. Sin embargo, la matriz puede ser, además de polimérica, de naturaleza metálica o cerámica, con diferentes opciones de materiales particulados o fibras disponibles para su reforzamiento, en función del desempeño o propiedad de interés [3], [4], [9], [12], [80], [81], [82]. En este sentido, dependiendo del tipo de matriz utilizada, los materiales compuestos se clasifican en: compuestos de matriz polimérica (PMC, por sus siglas en inglés *polymer matrix composite*), compuestos de matriz cerámica (CMC, *ceramic matrix composite*) o compuestos de matriz metálica (MMC, por sus siglas en inglés *metal matrix composite*).

En este sentido, este libro abordará cada uno de estos tipos de *composites*, haciendo énfasis en sus características, ventajas, aplicaciones y métodos de fabricación, incluyendo las materias primas comúnmente utilizadas para su manufactura.

## 1.6 REFERENCIAS

- [1] T. Ngo, "Introduction to Composite Materials", *Composite and Nanocomposite Materials - From Knowledge to Industrial Applications*, pp. 1-27, 2020. Available: 10.5772/intechopen.91285
- [2] S. Gholizadeh, "A Review of Impact Behaviour in Composite Materials", *International Journal of Mechanical and Production Engineering*, vol. 3, no. 3, pp. 35-46, Marzo 2019.
- [3] E. E. Gdoutos, "Composite Materials", in *Fracture Mechanics An Introduction*, 3rd ed., Switzerland: Springer, 2020, pp. 333-352.
- [4] P. K. Mallick, *Composites Engineering Handbook*. New York: Marcel Dekker Inc., 1997.
- [5] M. Ashby, *Materials selection in mechanical design*, 4th ed. Reino Unido: Butterworth-Heinemann, 2011, pp. 57-96.
- [6] E. Montes Sánchez, "Desarrollo de un ensayo de flexión para la caracterización a fatiga en tracción-compresión de materiales compuestos", Escuela Técnica Superior de Ingeniería - Universidad de Sevilla, Sevilla, España, 2013.

- [7] D. D. L. Chung, "Vol. 35. Composite Materials", in *Kirk-Othmer Encyclopedia of Chemical Technology*, New York: John Wiley & Sons Inc., 2010.
- [8] D. V. Rosato and D. V. Rosato, *Reinforced Plastics Handbook*, 3rd ed. New York: Elsevier Inc., 2004.
- [9] A. Miravete et al., *Materiales compuestos Tomo 1*. Barcelona: Editorial Reverté S. A, 2007.
- [10] R. F. Gibson, *Principles of Composite Material Mechanics*. New York: McGraw-Hill Inc., 1994.
- [11] F. C. Campbell, "Introduction to Composite Materials", in *Structural Composite Materials*. Ohio: ASM International, 2010, pp. 1-10.
- [12] M. Ordoñez, M. Valor, M. Seco, A. Alvaredo-Atienza, E. de la Guerra and R. Guzmán de Villoria, "New composite materials for railway applications", 22nd International Conference on Composites Materials (ICCM22), Melbourne, VIC; Engineers Australia, 2019.
- [13] T. Rajan, R. M. Pillai and P. Chandrasekhar, "Reinforcement coatings and interfaces in aluminium metal matrix composites", *Journal of Materials Science*, vol. 33, no. 14, pp. 3491-3503, January 1998.
- [14] S. Osuna Esteban, "Estudio de la Energía Superficial de Matrices Orgánicas por Cromatografía de Gases Inversa para su Aplicación en el Desarrollo de Materiales Compuestos", Universidad de Alcalá, Escuela de Doctorado, Madrid, España, 2010.
- [15] A. Miravete and L. Castejón, "Materiales Compuestos", *Temes de Disseny; Edició Català-Castellà-Anglès.*, no. 20, pp. 123-139, 2002.
- [16] A. Besednjak Dietrich, *Materiales Compuestos*. Cataluña: Ediciones de la Universidad Politécnica de Cataluña, 2009.
- [17] MBI MAR\_BAL Incorporated. (2013, Aug. 1). History of Composite Materials, About Us [Online]. Available: <https://www.mar-bal.com/applications/history-of-composites/> [Accesed 11 July 2020].
- [18] Autodesk Redshift. (2020, Mar. 10). The History of Composite Materials. From Brick to Bakelite to Biomimetic Hybrids. [Online]. Available: <https://www.autodesk.com/redshift/history-of-composite-materials/> [Accesed 18 August 2020].



- [19] F. Conde Torren. (2005, Apr. 10). La vida en el antiguo Egipto Casas. Escuela virtual de Sabiduría de Pamplona [Online]. Available: <http://www.sofiaoriginals.com/la-vida-en-el-antiguo-egipto-casas/> [Accesed 8 July 2020].
- [20] V. J. Jiménez Jáimez. (2020, Jun. 15). Materiales de construcción en el Antiguo Egipto. Amigos de la Egiptología [Online]. Available: <https://egiptologia.com/materiales-de-construccion-en-el-antiguo-egipto/> [Accesed 8 July 2020].
- [21] T. Johnson. (2018, Aug. 1). ThoughtcoCo, Dotdash Science, Tech, Math [online]. Available: <https://www.thoughtco.com/history-of-composites-820404> [Accesed 10 July 2020].
- [22] R. Reddy Nagavally, “Composite Materials - History, Types, Fabrication”, *International Journal of Mechanical And Production Engineering*, vol. 5, no. 9, pp. 82-87, 2017.
- [23] D. Folch, “Genghis Khan: cómo se hizo su imperio”, *National Geographic*, vol. January 2003, no. 1, pp. 100-110, 2003.
- [24] Lograrco. (2019). Mongolia. Gengis Khan y los mongoles [Online]. Available: <http://www.lograrco.es/mongolia/2/> [Accesed 11 July 2020].
- [25] S. García, “Referencias Históricas y Evolución de los Plásticos”, *Revista Iberoamericana de Polímeros*, vol. 10, no. 1, pp. 71-80, 2009.
- [26] E. E. Castillo Valero and I. C. Quintero Rodríguez, *Guía Ambiental para el Proceso de Transformación del Polipropileno Mediante la Técnica de Inyección*. Bogotá: Universidad Distrital Francisco José de Caldas, 2018.
- [27] bccrwp.org. (2020, Feb. 20). Diferencia entre estireno y poliestireno [Online]. Available: <https://es.bccrwp.org/compare/difference-between-styrene-and-polystyrene/> [Accesed 10 July 2020].
- [28] Tecnología de los Plásticos. (2011, Jul. 27). Parkesina [Online]. Available: <https://tecnologiadelosplasticos.blogspot.com/2011/07/parkesina.html> [Accesed 10 July 2020].
- [29] Plastics Historical Society. (2015). What are Plastics? [Online]. Available: [http://plastiquarian.com/?page\\_id=14296](http://plastiquarian.com/?page_id=14296) [Accesed 10 July 2020].
- [30] W. E. Driver, “Introducción”, in *Química y Tecnología de los Plásticos*, México: C.E.C.S.A., 1989, pp. 11-13.

- [31] J. M. García. "El Despertar de Una Ciencia", in *La Edad de los Polímeros. Un mundo de plástico*, Burgos: Universidad de Burgos, 2014, pp. 12-17.
- [32] Redacción BBC News Mundo. (2019, Jul. 27). La controversial (y sangrienta) historia del caucho [Online]. Available: <https://www.bbc.com/mundo/noticias-49082866> [Accesed 17 July 2020].
- [33] A. Neira Carrillo, "El mundo de los polímeros y biomateriales poliméricos y su aplicación medica", *TecnoVet*, vol. 1, no. 3, pp. 10-14, Diciembre 2005.
- [34] Todo En Polímeros. (2019, May 8). Thomas Hancock y la Vulcanización [Online]. Available: <https://todoenpolimeros.com/2019/05/08/thomas-hancock-y-la-vulcanizacion/> [Accesed 17 July 2020].
- [35] M. V. Alonso Rubio. "Formulación y curado de resinas fenol-formaldehído tipo 'resol' con sustitución parcial del fenol por lignosulfonatos modificados", Proyecto doctoral, Universidad Complutense de Madrid, Facultad de Ciencias Químicas, Madrid, España, 2002.
- [36] Historias de Empaques. (2013, Dec. 30). La Baquelita, el material que destruía los equipos de laboratorio, pero abrió la puerta a la era de los Plásticos [Online]. Available: <https://historiasdeempaques.wordpress.com/tag/arthur-smith/> [Accesed 17 July 2020].
- [37] I. Amato, "Leo Baekeland, plastics pioneer", *Time 100*, vol. 153, no. 1, March 1999. Available: <https://web.archive.org/web/20070104122711/http://www.time.com/time/time100/scientist/profile/baekeland02.html>
- [38] A. Miravete, Los nuevos materiales en la construcción, 2da ed. Barcelona: Editorial Reverte S.A., 1995.
- [39] EcuRed. (2019, Aug. 30). Policloruro de vinilo [Online]. Available: [https://www.ecured.cu/Policloruro\\_de\\_vinilo](https://www.ecured.cu/Policloruro_de_vinilo) [Accesed 17 July 2020].
- [40] Historias de Empaques. (2014, Feb. 9). Policloruro de Vinilo [Online]. Available: <https://historiasdeempaques.wordpress.com/tag/henri-victor-regnault/> [Accesed 18 July 2020].
- [41] Soluvent. (2017, Nov. 30). Breve historia del PVC [Online]. Available: <https://soluvent.com/breve-historia-del-pvc/> [Accesed 17 July 2020].

- [42] Todo en Polimeros. (2018, Mar. 5). Resina de Melamina [Online]. Available: <https://todoenpolimeros.com/2018/03/05/resina-de-melamina/> [Accesed 12 July 2020].
- [43] Xinxiang Jieshen Purification Co. (2019, Jul. 2). ¿Qué es el formaldehído de melamina? [Online]. Available: <http://www.jieshen-chemical.com/info/what-is-melamine-formaldehyde-36870030.html> [Accesed 18 July 2020].
- [44] C. Alarcón Palacios, Y. Rodríguez Pino and Y. L. Lorenzo Sarmiento. (2019, Aug. 30). Poliéster [Online]. Available: <https://www.ecured.cu/Poli%C3%A9ster>. [Accesed 20 July 2020].
- [45] L. Romero. (2013, May 20). Poliéster [Online]. Available: <https://larisa-romero.blogspot.com/2013/05/poliester.html?view=magazine> [Accesed: 16 August 2020].
- [46] Todopolyester. (2013, Feb. 22). Polyester [Online]. Available: <http://todopolyester.blogspot.com/2013/02/historia.html> [Accesed 16 August 2020].
- [47] D. D´Arsie, *Los plásticos reforzados con fibras de vidrio PFRV*. Buenos Aires: Editorial Américalee, 1970.
- [48] E. Lokensgard and T. Richardson, *Industria del plástico, plástico industrial*. Madrid: Paraninfo, 2006.
- [49] A. B. Strong. (2006). History of Composite Materials-Opportunities and Necessities [Online]. Available: <http://strong.groups.et.byu.net/pages/articles/articles/history.pdf> [Accesed 14 August 2020].
- [50] A. Garrido Hernández, M. Ortega Ortega and M. Lazón Torres, *Materiales de Construcción II, Tema 2. Hormigón, Historia del hormigón*. Cartagena: Universidad Politécnica de Cartagena. Available <https://ocw.bib.upct.es/course/view.php?id=95&topic=3>, 2007
- [51] J. Matheib, *Hormigón. Armado, armado aligerado, pretensado, auxiliar para el diseño*. Barcelona: Reverté, 1980.
- [52] I. Marcos, J. T. San José, J. Cuadrado and P. Larrinaga, “Las patentes en la introducción del hormigón armado en España: caso de estudio de la Alhóndiga de Bilbao”, *Informes de la Construcción*, vol. 66, no. 534, p. e024. doi: <http://dx.doi.org/10.3989/ic.13.032>, 2014.

- [53] V. Yepes Piqueras. (2017, May 1). Breve introducción a los orígenes del hormigón armado [Online]. Available: <https://www.interempresas.net/Construccion/Articulos/167016-Breve-introduccion-a-los-origenes-del-hormigon-armado.html> [Accesed 16 August 2020].
- [54] Glosario Ilustrado de Arte Arquitectónico. (2020). Sillares y mampuestos. Opus caementicium [Online]. Available: <https://www.glosarioarquitectonico.com/glossary/opus-caementicium/> [Accesed 16 August 2020].
- [55] InSpain. (2019, Sep. 30). Teatro Romano. [Online]. Available: <https://www.in-spain.org/es/badajoz/merida/teatro-romano/> [Accesed 16 August 2020].
- [56] National Geographic. (2018, Mar. 1). El Coliseo de Roma [Online]. Available: [https://historia.nationalgeographic.com.es/a/coliseo-roma\\_6685](https://historia.nationalgeographic.com.es/a/coliseo-roma_6685) [Accesed 16 August 2020].
- [57] J. T. Franco. (2013, Oct. 28). El concreto Romano sería más sustentable que el concreto que fabricamos hoy [Online]. Available: <https://www.archdaily.co/co/02-304525/el-concreto-romano-seria-mucho-mas-sustentable-que-el-concreto-que-fabricamos-hoy> [Accesed 16 August 2020].
- [58] N. L. Sánchez. (2019, Oct. 5). 1853: First Reinforced Concrete [Online]. Available: <https://aehistory.wordpress.com/?s=1853%3A+First+Reinforced+Concrete> [Accesed 19 August 2020].
- [59] Engineer's Outlook. (2011, Oct. 11). History of Reinforced Concrete and Structural Design [Online]. Available: <https://engineersoutlook.wordpress.com/2011/10/11/structural-concrete-design/> [Accesed 19 August 2020].
- [60] F. Huijben, J. Feenstra and A. Deetman, "Vacuumatic Concrete: From Boats to Architecture", Proceedings of the International Society Of Flexible Formwork (ISOFF) Symposium, Amsterdam, Netherlands, 2015.
- [61] H. Akil, M. Omar, A. Mazuki, S. Safiee, Z. Ishak and A. Abu Bakar, "Kenaf fiber reinforced composites: A review", *Materials & Design*, vol. 32, no. 8-9, pp. 4107-4121, 2011. Available: 10.1016/j.matdes.2011.04.008.
- [62] J. L. Esperon. (2016, Mar. 1). GLASSPAR G2 primer auto deportivo con carrocería de fibra de vidrio [Online]. Available: <http://historia-disenio-industrial.blogspot.com/2016/03/glasspar-g2.html> [Accesed 13 August 2020].

- [63] A. Carballo Cabrera, C. Alarcón Palacios, S. Hernández Claro and A. Vallés Pazos. (2019, Aug. 19). Fibra de vidrio [Online]. Available: [https://www.ecured.cu/index.php?title=Fibra\\_de\\_vidrio&action=edit](https://www.ecured.cu/index.php?title=Fibra_de_vidrio&action=edit) [Accesed 12 August 2020].
- [64] R. Sarabia. (2019, Dec. 15). Historia de la fibra de vidrio [Online]. Available: <https://blog.laminasyaceros.com/blog/historia-de-la-fibra-de-vidrio> [Accesed 17 July 2020].
- [65] Arkiplus. (2014). Historia de la fibra de vidrio [Online]. Available: <https://www.arkiplus.com/historia-de-la-fibra-de-vidrio/> [Accesed 14 August 2020].
- [66] A. Lobo. (2020, Apr. 5). History on the invention of Composites and how it helped the British to win WW-2 [Online]. Available: <https://medium.com/@ashleylobo98/a-history-on-the-invention-of-composites-and-how-it-helped-the-british-to-win-ww-2-e04dea6d3d51> [Accesed 17 August 2020].
- [67] C. Chandrasekaran, “12. Technoeconomic Aspects of Nonrubber Linings—Glass, FRP, and Lead”, in *Anticorrosive Rubber Lining*, Chennai: William Andrew, 2017, pp. 115-127.
- [68] A. J. Kinloch, “Norman Adrian de Bruyne, 8 November 1904 – 7 March 1997”, *Biographical Memoirs of Fellows of the Royal Society*, vol. 46, pp. 125-143, 2000.
- [69] Western Antique Aeroplane and Automobile Museum. Fairchild F-46 [Online]. Available: <https://www.waaamuseum.org/collections/airplanes/649-fairchild-f-46> [Accesed 19 August 2020].
- [70] 1000 AircraftPhotos. (2006, Jan. 15). Ron Dupas Collection No. 4856. Duramold F-46 (N19131 c/n 5000) [Online]. Available: <https://1000aircraftphotos.com/Fairchild/4856.htm> [Accesed 19 August 2020].
- [71] K. Riechers, “Synthetic Resins in Aircraft Construction –Their Composition, Properties, Present State of Development and Application to Light Structures”, *Technical Memorandums National Advisory Committee for Aeronautics No. 841*, vol. 4, no. 8, pp. 1- 22, 1937.
- [72] D. H. Middleton, “Composite Developments in Aircraft Structures — Part 1”, *Aircraft Engineering and Aerospace Technology*, vol. 64, no. 5, pp. 2-8, 1992. <https://doi.org/10.1108/eb037234>.

- [73] D. Donald, *American warplanes of World War II. Combat Aircraft of the U.S. Army Air Force, U.S. Navy, U.S. Marine Corps*. New York, Airtime Publishingks, 1995, pp. 251-252.
- [74] Greelane. (2018, Aug. 1). La fascinante historia de materiales compuestos de plástico [Online]. Available: <https://www.greelane.com/es/ciencia-tecnolog%C3%ADa-matem%C3%A1ticas/ciencia/history-of-composites-820404/> [Accesed 17 August 2020].
- [75] T. Palucka and B. Bensaude-Vincent. (2002, Oct. 19). Composites Overview [Online]. Available: [https://authors.library.caltech.edu/5456/1/hrst.mit.edu/hrs/materials/public/composites/Composites\\_Overview.htm](https://authors.library.caltech.edu/5456/1/hrst.mit.edu/hrs/materials/public/composites/Composites_Overview.htm) [Accesed 19 August 2020].
- [76] O. Nakamura, T. Ohana, M. Tazawa, S. Yokota and J. Itoh, «Study on the PAN carbon-fiber-innovation for modeling a successful R&D management,» *Synthesiology English edition*, vol. 2, n° 2, pp. 154-164, 2009.
- [77] T. Foltz. (2020, Jun. 24). Boron fiber: The original high-performance fiber. History and future developments for high-performance boron fiber [Online]. Available: <https://www.compositesworld.com/articles/boron-fiber-the-original-high-performance-fiber> [Accesed 20 August 2020].
- [78] Safeguard Clothing. The History of Kevlar [Online]. Available: <https://www.safeguardclothing.com/articles/the-history-of-kevlar/> [Accesed 20 August 2020].
- [79] J. Quinn, “Kevlar. Stephanie Kwolek invented one of the world’s most versatile materials, and a new branch of polymer chemistry”, *Invention & Technology*, vol. 25, no. 3, 2010. Available: <https://www.inventionandtech.com/content/kevlar>, 2010.
- [80] S. W. Stai and A. Miravete, *Diseño y Análisis de Materiales Compuestos*. Barcelona: Edictorial Reverté, S. A., 1988.
- [81] G. Tripathi, “Application and Future of Composite Materials: A Review”, *International Journal of Composite and Constituent Materials*, vol. 3, no. 2, pp. 1-4, 2017.
- [82] Centro Español de Plásticos. (2013). Fibra corta monocristal-Whisker; Vibrissae-Trichite,» Centro Español de Plásticos [Online]. Available: <https://cep-plasticos.com/es/contenido/fibra-corta-monocristal-whisker-vibrissae-trichite> [Accesed 20 August 2020].

## Capítulo 2.

# **MATERIALES COMPUESTOS DE MATRIZ POLIMÉRICA**

---

**Rafael Andrés Robayo-Salazar, Ph. D.**

Doctor en Ingeniería. Investigador del Programa de Ingeniería Mecánica (Pimec) - Grupo de Investigación en Estudios Aeroespaciales (GIEA). Escuela Militar de Aviación “Marco Fidel Suárez” - Fuerza Aérea Colombiana. *Correo-e:* rafael.robayo@emavi.edu.co

*Palabras clave:*

materiales compuestos, polímeros, matriz polimérica, particulados, fibras, refuerzos.

### **2.1 INTRODUCCIÓN**

Los materiales compuestos se forman cuando dos o más materiales o fases se utilizan juntas para dar una combinación de propiedades que no se puede lograr de otra manera. Es decir, los materiales compuestos ponen de manifiesto la forma en que materiales distintos pueden trabajar sinérgicamente. Los materiales compuestos de matriz polimérica (PMC, *polymer*

*matrix composites*), como su nombre lo indica, se basan en una matriz (fase continua) de naturaleza polimérica, reforzada con partículas y/o fibras (fase dispersa), las cuales se pueden seleccionar para obtener combinaciones no usuales de rigidez, resistencia, tenacidad, desempeño térmico, dureza, entre otras propiedades de ingeniería [1]. Los PMC se pueden clasificar, según la escala de integración de los refuerzos (partículas y/o fibras), en macro, micro y nanoescala.

Los PMC son ampliamente utilizados como materiales estructurales en aplicaciones con temperaturas de servicio relativamente bajas ( $\ll 300$  °C). Posiblemente, los PMC se utilizan en más áreas tecnológicas que cualquier otra clase de materiales compuestos, por muchas razones. Presentan gran variedad de propiedades, alguna de las cuales son inalcanzables para otros materiales, y en la mayoría de los casos son relativamente de bajo precio. En general, los polímeros (matriz) tienen menor resistencia y módulo de rigidez que los metales o las cerámicas, pero son más resistentes a la corrosión y al ataque químico, que los metales, ventaja de durabilidad que, sumada al bajo rango de densidad que estos presentan, le abren paso a los PMC en diversas aplicaciones de ingeniería, compitiendo con muchas aleaciones metálicas por su nivel de resistencia específica [2]. Sin embargo, la exposición prolongada a la luz ultravioleta y a algunos solventes pueden causar degradación de la matriz polimérica y afectar la integridad de los PMC [3].

El uso de los PMC para diseños en ingeniería mecánica ofrece muchas ventajas, incluyendo la posibilidad de eliminación de piezas en ingeniería mediante el diseño con polímeros y de muchas operaciones de acabado, simplificación del montaje, eliminación de peso, reducción del ruido y, en algunos casos, eliminación de la necesidad de lubricación de algunas piezas. Otras ventajas relacionadas con sus excelentes propiedades aislantes también son de interés para los diseños de ingeniería eléctrica y electrónica. La cantidad de PMC utilizados en la industria ha aumentado notablemente en los últimos años. Un buen ejemplo del incremento industrial de los compuestos de matriz polimérica es en la manufactura de componentes aeronáuticos y para automotores [4], sin embargo, otras industrias se interesan cada vez más en este tipo de materiales.



En los PMC son importantes las propiedades y las fracciones de cada fase individual, así como su acoplamiento (zona de interfaz) y el método de manufactura y/o procesamiento. En este capítulo nos enfocaremos en los tipos de matrices, refuerzos particulados y fibras comúnmente utilizados en la obtención de PMC. Por otra parte, se abordarán los principios o mecanismos de reforzamiento que gobiernan el desempeño mecánico de los PMC, sus métodos de manufactura y las aplicaciones comunes y avanzadas en donde los PMC han atraído interés particular desde el punto de vista ingenieril.

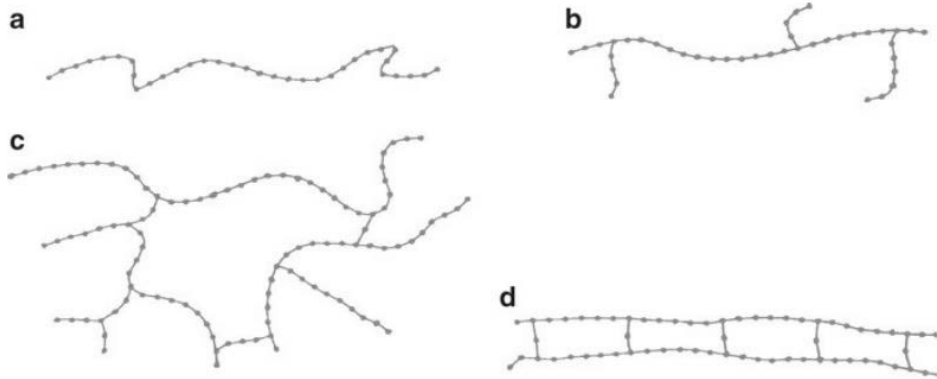
## **2.2 MATERIALES COMPUESTOS DE MATRIZ POLIMÉRICA**

### *2.2.1 Tipos de matrices poliméricas*

En los PMC la matriz es la fase que soporta las fibras y las mantiene en posición. Igualmente, transfiere la carga a las fibras de refuerzo, protege las fibras contra daños durante su manufactura y uso del material compuesto y evita la propagación de las grietas en las fibras hacia todo el material compuesto. En este sentido, la matriz de los PMC, por lo general, es la fase que aporta el control y comportamiento químico, es decir, gobierna también la durabilidad del compuesto [1]. En general, la matriz polimérica corresponde a compuestos orgánicos, moléculas gigantes con átomos de carbono unidos fuertemente mediante enlaces covalentes, como la columna vertebral de las cadenas, y se clasifican según la síntesis de sus moléculas, su estructura molecular o de acuerdo con la familia química a la que pertenecen. Las moléculas orgánicas (monómeros) de bajo peso molecular se unen mediante el proceso de polimerización (por adición o por condensación), que convierte los monómeros en polímeros [3]. Una manera muy general de clasificar los polímeros es establecer si se trata de un polímero lineal o uno ramificado (Figura 14), sin embargo, más adelante veremos que la manera más adecuada de describir a los polímeros es en función de su comportamiento mecánico y térmico (termoplásticos y termoestables) [5].

Las matrices poliméricas son particularmente comunes en el mundo de los materiales compuestos (*composites*); la mayoría de los materiales poliméricos, tanto los termoplásticos como los termoestables, están disponibles en aplicaciones reforzadas con fibras y particulados, y sus procesos de

manufactura corresponden o están gobernados por las propiedades mismas del tipo de matriz polimérica. En general, los termoplásticos corresponden a cadenas flexibles (sin o con ramificaciones) y los termoestables a una red tridimensional rígida (lineales o ramificadas) [1]. Algunas generalidades sobre los tipos de matrices más representativas se describen a continuación.



**Figura 14. Clasificación de los polímeros según su estructura (lineales o ramificados).**  
**a) Polímero lineal no ramificado, b) polímero lineal ramificado, c) polímero entrecruzado y d) polímero con cadenas interconectadas. Fuente: adaptada de [5].**

### 2.2.1.1 Matrices termoplásticas

Los termoplásticos están formados por largas cadenas constituidas por la unión de los monómeros; comúnmente se comportan de una manera plástica y dúctil (de allí su nombre) y pueden encontrarse con estructuras lineales o ramificadas. Las cadenas individuales están entrelazadas y entre los átomos que las conforman se crean enlaces secundarios (débiles) de “van der Waals”. En los termoplásticos las cadenas pueden deslizarse y moverse entre sí con la aplicación de un esfuerzo, preferiblemente de tensión. Los termoplásticos pueden ser cristalinos, amorfos o cristal-líquido, en función del grado de ordenamiento de su estructura. Estos materiales se funden y ablandan al calentarse, propiedad que les permite ser conformados a partir de diversos procesos de transformación, tales como extrusión; moldeo por

soplado, inyección, vaciado, transferencia e inyección por reacción; termoformado; calandrado; hilado y procesos de espumado. Adicionalmente, el hecho de reblandecerse con la aplicación de temperatura permite ser nuevamente moldeados, haciéndolos “fácilmente” reciclables [1]. Dentro de los termoplásticos más comunes se destacan el polietileno (PE), cloruro de polivinilo (PVC), polipropileno (PP), poliestireno (PS), polioximetileno (ecetal, POM), poliamida (nylon, PA), poliéster (PET), policarbonato (PC), poliimida (PI), polietereterketona (PEEK), sulfuro de polifenileno (PPS), sulfona de poliéter (PES) y poliamidaimida (PAI), entre otros.

### 2.2.1.2 Matrices termoestables

Los polímeros termoestables (termofijos) están constituidos por largas cadenas (lineales o ramificadas) de moléculas, que están fuertemente unidas por una gran cantidad de enlaces cruzados (entrelazados) para formar estructuras de redes tridimensionales. En vista de que las cadenas no pueden ni girar ni deslizarse, estos polímeros poseen buena resistencia, rigidez y dureza; sin embargo, los termoestables también tienen malas propiedades de ductilidad e impacto. En efecto, las matrices termoestables son por lo general más resistentes, aunque más frágiles que los termoplásticos. Estas matrices se someten a un proceso de curado durante la fabricación de los PMC, después de lo cual no se pueden reformar. Los termoestables no se funden al calentarse (a diferencia de los termoplásticos), sino que empiezan a desintegrarse. Debido a lo anterior no son fáciles de reprocesar y, por lo tanto, su reciclaje es difícil [1]. Los polímeros termoestables más comunes incluyen los fenólicos, aminoresinas, poliésteres, epoxis y poliimidas.

### 2.2.1.3 Propiedades de las matrices poliméricas

La Tabla 1 presenta propiedades representativas de los polímeros (termoplásticos y termoestables) de más amplio uso en el diseño y fabricación de PMC. En general, las matrices poliméricas termoplásticas son materiales viscoelásticos relativamente débiles y poseen baja rigidez ( $E < 5$  GPa). En este sentido, la resistencia y módulo de elasticidad ( $E$ ) de los PMC provienen, principalmente, de la fase de refuerzo (particulados y fibras). Una de las propiedades claves en la selección de matrices poliméricas es la temperatura

máxima de servicio ( $T_{\max}$ ), ya que las propiedades de los polímeros, en general, disminuyen con el aumento de la temperatura. Una medida ampliamente utilizada en términos comparativos es la temperatura de transición vítrea ( $T_g$ ), que es la temperatura aproximada a la que un polímero pasa de ser un material relativamente rígido a uno "flexible" [6]. Es decir, los polímeros típicamente sufren una importante caída de su rigidez a temperaturas de servicio por encima de  $T_g$ . Este aspecto es importante, debido a que, como se discutirá en el capítulo 3, *Materiales compuestos ablativos y sistemas de protección térmica*, continuamente se desarrollan PMC capaces de brindar desempeños especiales en condiciones de servicio extremos, como las altas temperaturas. Por ejemplo, el reemplazo de las aleaciones de titanio en algunas piezas de los motores y/o componentes de propulsión (aplicaciones aeronáuticas y aeroespaciales) por PMC (en este caso, poliimidas reforzadas con fibras de carbono).

En la fabricación de PMC son comúnmente utilizadas como matrices las resinas termoestables, dentro de las cuales se destacan la epóxicas, poliésteres y fenólicas (sus principales propiedades se pueden observar en la Tabla 1). Las resinas epoxi son polímeros termoestables con excelentes propiedades mecánicas (resistencia a la tracción ( $\sigma$ )= 45-89.5 MPa) y adhesivas. Además, presentan una relativa resistencia a altas temperaturas y compuestos químicos con relación a los polímeros termoplásticos. Su uso más común es como matriz de PMC, siendo estos los materiales más versátiles en el campo aeroespacial. Los epóxicos producen compuestos con excelentes propiedades estructurales; por su naturaleza tienden a ser frágiles, pero hay formulaciones (adicionadas con elastómeros [hules] y polioéteres) con una resistencia al impacto muy mejorada. Su máxima temperatura de servicio es de aproximadamente 118 °C-142 °C. Los poliésteres pueden ser termoestables, termoplásticos o elastómeros. Las resinas de poliéster insaturado son termoestables. En su versión termoestable la mayoría de los poliésteres se refuerzan con fibra de vidrio para obtener PMC, los cuales, a su vez, son menos rígidos y resistentes que los epoxis, pero considerablemente más económicos. Los PMC fenólicos son fáciles de moldear, baratos, rígidos, químicamente estables, tienen buenas propiedades eléctricas, resistencia a altas

temperaturas ( $T_{\max} \leq 162 \text{ }^\circ\text{C}$ ) y producen menos humo y productos tóxicos cuando se queman, que la mayoría de las resinas. Se utilizan en aplicaciones como interiores de aeronaves, para las cuales la resistencia al fuego es un requisito de diseño clave [6], [7].

**Tabla 1. Propiedades representativas de algunas matrices poliméricas. <sup>TP</sup>: termoplásticos y <sup>TE</sup>: termoestable. Fuente: adaptada de [7].**

Material	$\sigma$ (MPa)	E (GPa)	Elongación (%)	$\rho$ (g/cm <sup>3</sup> )	$T_{\max}$ (°C)	$\lambda$ (W/m·°C)	$\alpha$ ( $\mu\text{strain}/^\circ\text{C}$ )
PE <sup>TP</sup>	20.7-44.8	0.6-0.9	200-800	0.9-1.0	90-110	0.40-0.44	126-198
PVC <sup>TP</sup>	37.7-43.9	2.2-3.1	40-80	1.3-1.5	49-88	0.14-0.21	64.8-81.3
PP <sup>TP</sup>	27.6-41.4	0.9-1.5	100-600	0.8-0.9	100-115	0.11-0.17	122-180
PS <sup>TP</sup>	35.9-51.7	2.3-3.3	1.2-2.5	1.04	75-90	0.12-0.14	89.9-150
POM <sup>TP</sup>	60-89.6	2.6-3.2	15-75	1.3-1.4	76-97	0.21-0.25	110-198
PA <sup>TP</sup>	42-72	0.9-2.0	40-60	1.1-1.2	90-130	0.21-0.28	110-150
PET <sup>TP</sup>	51.8-63.8	2.8-3.0	270-330	1.2-1.4	49-70	0.13-0.16	109-125
PC <sup>TP</sup>	60.7-74.8	2.2-2.5	110-150	1.1-1.2	96-120	0.19-0.22	114-131
PEEK <sup>TP</sup>	70-103	3.7-3.9	30-150	1.3	239-260	0.24-0.26	72-194
Epoxis <sup>TE</sup>	45-89.5	2.3-2.5	3-6	1.1-1.4	118-142	0.17-0.20	81.1-117
Poliésteres <sup>TE</sup>	41.4-89.5	2.1-4.4	2.0-2.6	1.0-1.4	109-132	0.29	99-180
Fenólicos <sup>TE</sup>	34.5-62	2.8-4.8	1.5-2	1.2-1.3	137-162	0.14-0.16	120-125

Densidad=  $\rho$ ; Resistencia a la tensión=  $\sigma$ ; Modulo de elasticidad=  $E$ ; Temperatura máxima de servicio=  $T_{\max}$ ; Conductividad térmica=  $\lambda$ ; Coeficiente de expansión térmica=  $\alpha$ . Conversión: 1 MPa = 145.04 psi (lb/pulg<sup>2</sup>).

Por su parte, las matrices termoplásticas también son ampliamente utilizadas en la producción de PMC. Por ejemplo, el PVC reforzado con fibra de vidrio da un material lo suficientemente rígido, fuerte y resistente para ser utilizado en techos, suelos y paneles de construcción. El PA es reforzado con fibra de vidrio para fabricar engranajes, rodamientos y otras piezas de elevada solicitud mecánica. De otro lado, el POM, similar al PA, pero más rígido y resistente a la fatiga, normalmente se refuerza con fibra de vidrio

para mejorar sus prestaciones mecánicas y ductilidad. El PC es un polímero de elevada dureza y rigidez, sin embargo, para llevar sus propiedades más allá es posible reforzarlo con fibras de vidrio, lo que resulta en mejores propiedades mecánicas a altas temperaturas. Dentro de las matrices poliméricas de alto desempeño se destaca el PEEK, presentando una rigidez, resistencia y capacidad de soportar el calor excepcional, sin embargo, su alto precio limita su aplicación en algunos campos [7].

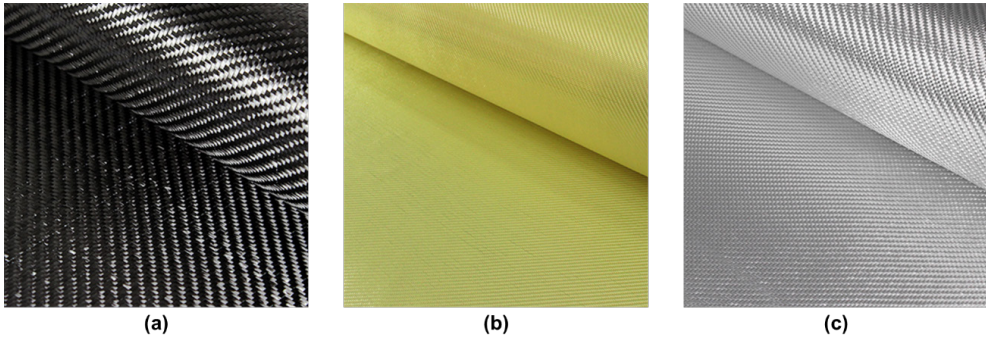
### 2.2.2 Tipos de refuerzos y fibras

El segundo componente de un PMC es el refuerzo (partícula y/o fibra); esta fase puede suponer hasta un 80 % del volumen total del material compuesto, por lo tanto, define la mayor parte de las características físico-mecánicas del material, tales como la resistencia y la rigidez. Las propiedades de los refuerzos más comunes se presentan en la Tabla 2. Obsérvese que, por lo general, el módulo de elasticidad ( $E$ ) específico más alto se presenta en materiales de bajo número atómico y enlaces covalentes, como es el caso de la fibra de carbono, altamente utilizada para la fabricación de PMC, denominados en este caso como CFRP (*carbon fiber reinforcing polymer*). Algunas ventajas adicionales de la fibra de carbono son su alta resistencia y una elevada temperatura de trabajo, propiedades que son aprovechadas en industrias como la automovilística, aeronáutica y/o aeroespacial, tal y como se discute en el capítulo 3. Otras fibras que se destacan como refuerzo de PMC son las fibras de aramidas, de las cuales el ejemplo más conocido son las fibras de Kevlar, con excelente resistencia y rigidez, pero temperatura de trabajo limitada. Las fibras de vidrio son otro ejemplo conocido en la obtención de PMC, presentando una adecuada resistencia y rigidez para algunas aplicaciones, con la ventaja de que pueden ser utilizadas a temperaturas mucho más elevadas que las poliméricas. La Figura 15 muestra las fibras carbono, Kevlar y vidrio, comúnmente utilizadas en la fabricación de los PMC.

**Tabla 2. Propiedades de materiales de refuerzo seleccionados. Fuente: adaptada de [1].**

Material	$\rho$ (g/cm <sup>3</sup> )	$\sigma$ (ksi)	E (x 10 <sup>6</sup> psi)	T (°C)	E especifico (x10 <sup>7</sup> pulg)	$\sigma$ especifica (x10 <sup>6</sup> pulg)
<i>Polímeros:</i>						
Kevlar	1,44	650	18	500	34,7	12,5
Nylon	1,14	120	0,4	249	1	2,9
Polietileno	0,97	480	25	147	7,1	13,7
<i>Metales:</i>						
Be	1,83	185	44	1277	77,5	2,8
Boro	2,36	500	55	2030	64,7	4,7
W	19,40	580	59	3410	8,5	0,8
<i>Vidrios:</i>						
Tipo E	2,55	500	10,5	<1725	11,4	5,6
Tipo S	2,50	650	12,6	<1725	14,0	7,2
<i>Carbono:</i>						
Tipo HS	1,75	820	40	3700	63,5	13
Tipo HM	1,90	270	77	3700	112	3,9
<i>Cerámicos:</i>						
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3,95	300	55	2015	38,8	2,1
B <sub>4</sub> C	2,36	330	70	2450	82,4	3,9
SiC	3,00	570	70	2700	47,3	5,3
ZrO <sub>2</sub>	4,84	300	50	2677	28,6	1,7
<i>Filamentos:</i>						
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3,96	3000	62	1982	43,4	21
Cr	7,20	1290	35	1890	13,4	4,9
Grafito	1,66	3000	102	3700	170	50,2
SiC	3,18	3000	70	2700	60,8	26,2
Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub>	3,18	2000	55	-	47,8	17,5

Densidad=  $\rho$ ; Resistencia a la tensión=  $\sigma$ ; Modulo de elasticidad=  $E$ ; Temperatura de fusión=  $T$ . Conversión: 1 g/cm<sup>3</sup> = 0,0361 lb/pulg<sup>3</sup>.



**Figura 15. Fibras de uso común en la fabricación de PMC: a) fibra de carbono, b) fibra de aramida (Kevlar) y c) fibra de vidrio. Fuente: [8].**

Particularmente en los PMC, se debe tener en cuenta la perfecta unión entre la fase de refuerzo (partícula y/o fibra) y la matriz de naturaleza polimérica que está siendo reforzada. Existen diferentes tipos de unión en la zona de interfase: a) mecánica, b) electrostática, c) química y d) mediante interdifusión. En el caso de los PMC reforzados con fibras, para que la carga aplicada se transmita correctamente de la matriz a la fibra, estas deben estar firmemente unidas (acopladas y ancladas). Con este propósito, algunas fibras naturales (como, por ejemplo, las fibras de fique) han sido tratadas químicamente, con el fin de mejorar su adherencia a la matriz [9]. Por su parte, las fibras de vidrio son tratadas superficialmente (recubiertas) con agentes de acople tipo silano y tratamientos superficiales, con el objetivo de mejorar su unión y resistencia en los PMC [10]. De igual manera, las fibras de carbono se recubren con un material orgánico para mejorar su unión, así como también son sometidas a procesos secos (recubrimiento de Ni, tratamiento con plasma e irradiación de alta energía), húmedos (encolados poliméricos, modificaciones ácidas y electroquímicas), oxidativos (oxidación líquida, en fase gaseosa y por plasma) y no-oxidantes (whiskerización y recubrimiento de carbón pirolítico) [11].

Por otro lado, para algunas aplicaciones es importante tener en cuenta propiedades como los coeficientes de expansión térmica, y la razón está asociada a que una diferencia marcada de esta propiedad entre las fases que



componen el compuesto puede significar la falla prematura de la unión y/o el desprendimiento del refuerzo por expansión y contracción diferenciales en el compuesto bajo ciertas condiciones de servicio. Fenómenos similares pueden presentarse en los PMC laminados, es decir, la delaminación o separación prematura de las capas bajo carga puede causar la falla del compuesto, para lo cual se pueden utilizar tejidos tridimensionales [1].

Actualmente, la tendencia de incorporar fibras naturales (produce un efecto en la matriz similar al de la fibra de vidrio) para la producción de PMC recobra importancia en muchos campos de aplicación industrial, buscando obtener un producto amigable con el medio ambiente, haciendo uso de material de desecho de industrias de cada región [12]. En este sentido, la abundante disponibilidad de fibras naturales muestra un gran abanico de posibilidades para ser explotadas de forma inteligente en varios sectores industriales. Adicionalmente, las fibras naturales se reconocen como soluciones económicamente factibles y, desde el punto de vista medioambiental, su naturaleza biodegradable impulsa su utilización hacia el futuro de los PCM [13], [14]. Las fibras naturales más empleadas para este tipo de materiales compuestos son: yute, kenaf, sisal, henequén, fibra de agave, cáscara de coco, fibras celulósicas o lignocelulósicas, fibra de caña, tallo de maíz, corteza de árbol (pino, álamo, abedul, entre otros), borra de algodón, cascarrilla de arroz, bagazo de guayule, harina o aserrín de madera seca, bagazos, celulosa, entre otras. Entre los materiales poliméricos reforzados con fibras naturales más reportados en la literatura se encuentran el PP, PE, PVC, polietileno de alta densidad (HDPE), poliéster, por mencionar algunos. En la Figura 16 se muestran algunos tipos de fibras naturales utilizadas en el reforzamiento de matrices poliméricas [15].

En el caso de los compuestos particulados, estos son menos eficientes en la forma en que el relleno contribuye a la resistencia. Normalmente se presenta una pequeña ganancia en rigidez, y a veces, en resistencia y tenacidad, pero es mucho menor que en un compuesto fibrorreforzado. Su atractivo radica más en su bajo costo (rellenos), la mejoría de la estabilidad dimensional del compuesto y la buena resistencia al desgaste que puede otorgar el *filler*, así como su influencia sobre propiedades físicas especiales,

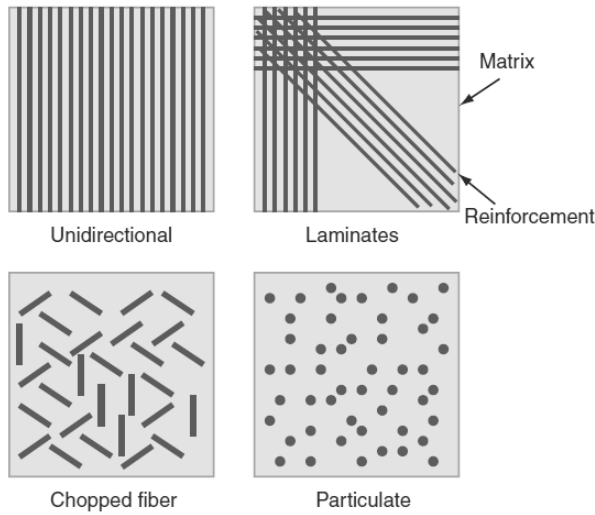
tales como la conductividad térmica y/o eléctrica [16]. Como se discutirá a continuación, algunos de los extensores, particulados o *fillers* comúnmente incorporados en los PCM son el carbonato de calcio ( $\text{CaCO}_3$ ), "talcos", esferas sólidas de vidrio,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , negro de humo y diversas arcillas, entre otros [17].



**Figura 16.** Algunos tipos de fibras naturales utilizadas en el reforzamiento de matrices poliméricas para la obtención de PMC. Fuente: [15].

### 2.2.3 Mecanismos de reforzamiento: particulados y fibro-reforzados

En general, los materiales compuestos se pueden organizar en tres clases: particulados, con fibras (orientadas o al azar) y laminados, con base en las formas de los materiales (Figura 17). Si las partículas de refuerzo se encuentran uniformemente distribuidas, los materiales compuestos particulados tienen propiedades isotrópicas (sus propiedades físicas son idénticas en todas las direcciones); los materiales compuestos fibro-reforzados pueden ser isotrópicos o anisotrópicos, en función del direccionamiento de las fibras, y, por último, los laminados siempre tienen un comportamiento anisotrópico [1].



**Figura 17. Resumen esquemático de los tipos de reforzamiento en materiales compuestos. Fuente: [18].**

En el caso de los compuestos particulados, estos por lo general están diseñados para producir combinaciones poco usuales de propiedades y no para mejorar la resistencia mecánica [17]. Un ejemplo de ello, los compuestos ablativos de matriz polimérica (PACM, *polymer ablative composite materials*), que serán abordados en el capítulo 3. Ciertas propiedades de un material compuesto particulado dependen solo de las cantidades y propiedades relativas de las fases (matriz y refuerzo). En este sentido, la *regla de las mezclas* puede predecir estas propiedades con exactitud [1]. Por ejemplo, la densidad de un material compuesto particulado estaría dada por la Ecuación 1:

$$\rho_c = \sum(f_i \cdot \rho_i) = f_1 \cdot \rho_1 + f_2 \cdot \rho_2 + \dots + f_n \cdot \rho_n$$

(Ecuación 1)

Donde  $\rho_c$  es la densidad del compuesto,  $\rho_1, \rho_2, \dots, \rho_n$  son las densidades de cada uno de los constituyentes del compuesto, y  $f_1, f_2, \dots, f_n$  son las fracciones volumétricas de cada uno de los constituyentes. Cabe aclarar que también es muy importante la conectividad y/o acoplamiento entre la fase continua (matriz) y la fase dispersa (partículas).

Así mismo, a fin de lograr que se requiera una cantidad más reducida de polímero, más costoso, se agregan extensores o *fillers*, como el carbonato de calcio ( $\text{CaCO}_3$ ), talcos, esferas sólidas de vidrio y diversas arcillas. Por lo general, los extensores pueden hacer más o menos rígidos y tenaces a los polímeros, tal y como se muestra en la Figura 18. Así mismo, con la incorporación de particulados y nanopartículas es posible incrementar, además de su dureza y la resistencia al desgaste, la conductividad térmica, o bien mejorar la resistencia a la termofluencia; sin embargo, normalmente se reduce la resistencia y ductilidad de los PMC [1].

En efecto, el nylon podría reemplazar a los metales no ferrosos en ciertas aplicaciones (incluyendo engranes, ruedas y otras partes móviles), pero, comparado con los metales, este polímero tiene reducida resistencia y rigidez. Añadiendo 0.3 % en peso de partículas de hidróxido de itrio modificadas con ácido esteárico en la polimerización del nylon se logra un incremento en la resistencia al impacto [15].

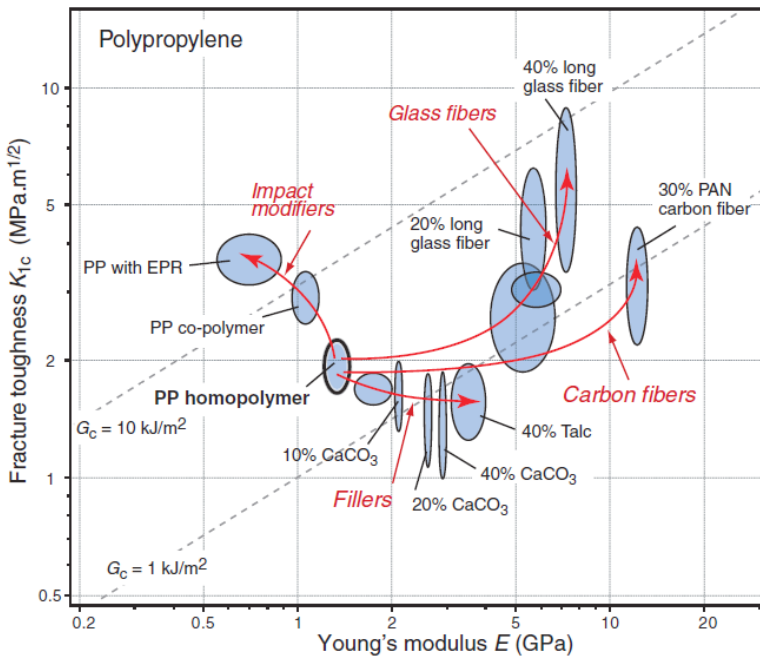
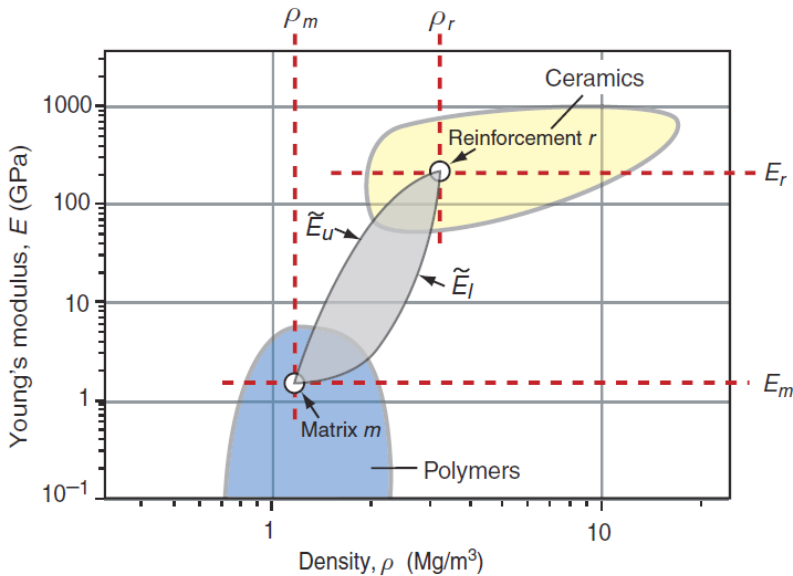


Figura 18. Efecto de algunos modificadores (rellenos, partículas y fibras) sobre la resistencia y la tenacidad a la fractura del polipropileno. Fuente: [18].

•

El  $\text{CaCO}_3$  es el aditivo o carga más utilizado en plásticos; se usa en una variedad de polímeros, como PVC, PP, PE, resina epóxica, poliéster, poliuretano, etileno propileno dieno, hasta estireno y poliamidas. Este material finamente molido le otorga a la matriz polimérica altas propiedades físicas al menor costo posible. El uso de arcillas para la modificación de plásticos es un método que ha arrojado buenos resultados. La adición del 0.5 % en peso de polygorskita, modificada superficialmente con 3-aminopropiltrimetoxisilano en una matriz de PP, mostró una mejora en las propiedades del material final, comparado con polipropileno sin polygorskita [15].

La Figura 19 muestra la relación directa y proporcional entre el módulo de elasticidad ( $E$ ) y la fracción de volumen del refuerzo. En este caso, la matriz es un polímero y el refuerzo un particulado cerámico, pero el mismo argumento es válido para cualquier combinación. Sin embargo, como se mencionó anteriormente, la rigidez no es la única propiedad susceptible de optimización a partir de la incorporación de *fillers*. Para algunas aplicaciones se agregan partículas cerámicas, como alúmina, nitruro de aluminio, nitruro de boro, e incluso diamante, para obtener un material eléctricamente aislante con mayor conductividad térmica que el material base monolítico (matriz). Se agregan partículas metálicas como la plata y el aluminio para crear PMC que son conductores eléctricos y térmicos. También hay PCM magnéticos, fabricados mediante la incorporación de partículas ferrosas en algunos polímeros [6]. Sin embargo, el foco principal o de mayor demanda en la industria son los PCM fibrorreforzados.



**Figura 19.** Relación entre el módulo de elasticidad ( $E$ ) (GPa) y la densidad para una matriz ( $m$ ) reforzada con un refuerzo ( $r$ ). Aquí la matriz es un polímero y el refuerzo de cerámica, pero el mismo argumento es válido para cualquier combinación. Fuente: [18].

En general, tal y como lo muestra la Figura 20, los PMC reforzados con fibras (fibro-reforzados) obtienen una mayor resistencia mecánica al incorporar fibras resistentes y rígidas, aunque frágiles, en una matriz más blanda y más dúctil, como, por ejemplo, las poliméricas [1]. Es decir, los PMC se sitúan en la curva esfuerzo-deformación en un punto intermedio entre las propiedades originales de la matriz y las fibras. Este mismo efecto sucede con la resistencia a la fatiga, Módulo de Young y relación resistencia a peso. En efecto, tal y como lo demuestra la Figura 21, la ventaja más importante en el caso de los PMC es la posibilidad de obtener una mayor resistencia específica (relación desempeño/peso); y es por esta razón que son ampliamente utilizados en aplicaciones automovilísticas y aeronáuticas, desplazando algunas aleaciones metálicas (Al, Mg, Zn, Cu, entre otras), las cuales hace algunas décadas gobernaban esta industrias. Esta ventaja ha traído ahorros importantes en el consumo energético (combustibles) del sector transporte, tanto terrestre como aéreo.

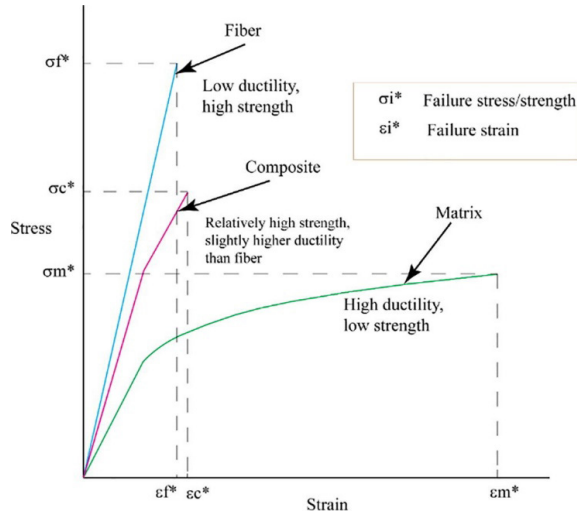


Figura 20. Diagrama esquemático de la curva tensión-deformación de un material compuesto reforzado con fibras continuas y alineadas sometido a una carga longitudinal. También se muestran las curvas de tensión-deformación para una fibra quebradiza y una matriz dúctil. Fuente: [19]

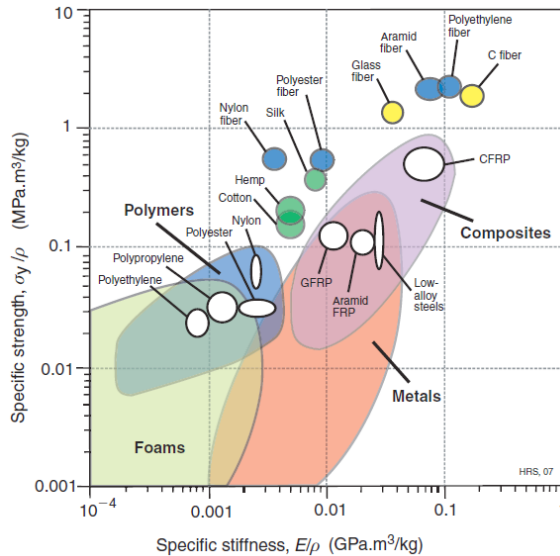
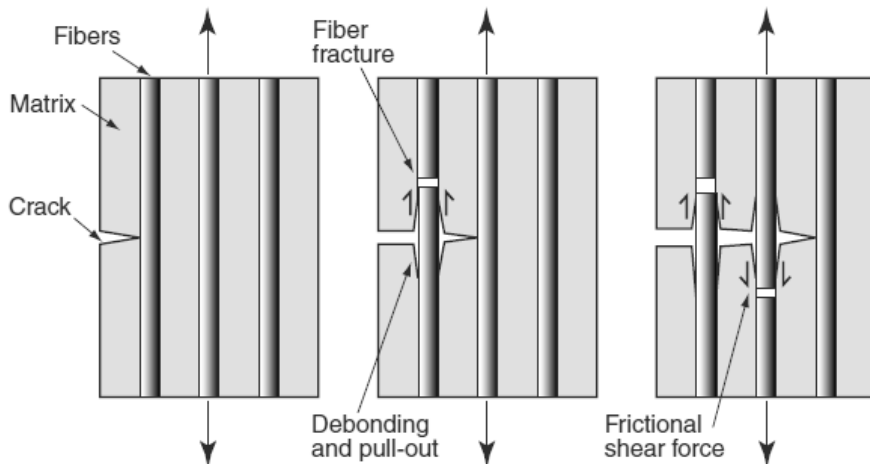


Figura 21. Resistencia ( $\sigma/\rho$ ) ( $\text{MPa}\cdot\text{m}^3/\text{kg}$ ) y módulos ( $\text{GPa}\cdot\text{m}^3/\text{kg}$ ) específicos de los materiales. Los polímeros a granel se endurecen y fortalecen mediante su alargamiento, compitiendo con fibras naturales, de carbono y de vidrio. Fuente: [18].

En este caso (PCM fibrorreforzados) la matriz polimérica transmite la fuerza a las fibras de refuerzo, mismas que soportan la mayor parte de la fuerza aplicada. Como se mencionó anteriormente, se utilizan diversos tipos de fibras (sintéticas y naturales), sin embargo, en aplicaciones avanzadas se destacan las fibras hechas de vidrio, carbono y aramidas. Cuando el compuesto es sometido a una carga, la fuerza se transmite al refuerzo a través de la matriz y se logra una redistribución efectiva de las cargas (esfuerzos). Tan pronto el material compuesto alcanza la máxima resistencia de la matriz (límite elástico), esta falla, a partir de este momento el comportamiento post-fractura del compuesto estaría gobernado por el arrancamiento (*pull-out*) progresivo de las fibras en ambas caras de las grietas, tal y como se representa en la Figura 22, lo que genera un incremento en su tenacidad. Cabe destacar que, el arrancamiento progreso de las fibras depende de su tensión de adherencia y la longitud de las mismas, que para efectos de promover una falla por *pull-out* deberá ser menor o igual a la longitud crítica (por encima de este valor se generaría su falla por rotura). Durante el arrancamiento de las fibras se originan fuerzas de corte, las cuales, a su vez, dependen de la tensión de adherencia entre el refuerzo y la matriz, por tanto, recobra importancia el anclaje y/o acoplamiento de las fibras a la matriz (zona de interfaz).



**Figura 22.** Efecto de endurecimiento por reforzamiento. La fuerza de extracción de cada fibra se opone a la apertura de la grieta. Fuente: [18].



Para el caso de los PMC reforzados con fibras, y al igual que para los particulados, la regla de las mezclas permite predecir con exactitud propiedades tales como la densidad (ecuación 1). En el caso de compuestos fibroreforzados es posible determinar propiedades como las conductividades térmicas y eléctricas a lo largo de la dirección de las fibras. Sin embargo, dicho calculo, basado en la regla de las mezclas, solo es posible en los casos en donde las fibras sean continuas y unidireccionales. Cabe anotar que, en el caso de un PMC que contenga fibras metálicas, la energía sería transferida a través de las fibras. Cuando las fibras no son continuas o unidireccionales, la sola regla de las mezclas quizás no sea aplicable. En el caso de propiedades como el módulo de elasticidad ( $E$ ), es posible utilizar la regla de mezclas, siempre que las fibras sean continuas y unidireccionales, de acuerdo a la Ecuación 2 [1]:

$$E_C = f_m \cdot E_m + f_f \cdot E_f$$

(Ecuación 2)

Donde  $f$  representa la fracción de cada material y los subíndices  $c$ ,  $m$  y  $f$  se refieren al compuesto, la matriz y las fibras, respectivamente.

En efecto, la Figura 23 muestra la variación del módulo de elasticidad ( $E$ ) (GPa) en función de la densidad ( $\rho$ ) ( $\text{Mg}/\text{m}^3$ ) de diferentes tipos de materiales, en donde se puede observar como los PMC tipo GFRP (*glass fiber reinforcing polymer*) y CFRP (*carbon fiber reinforcing polymer*) se ubican muy por encima del desempeño mostrado por los materiales poliméricos en general, igualando incluso algunas aleaciones metálicas (Al, Mg, Zn, Cu, entre otras), con la ventaja tecnológica de poseer densidades inferiores a los  $1\,200\text{ kg}/\text{m}^3$ .

Así mismo, la resistencia a la tensión de un PMC reforzado con fibras ( $TS_c$ ) depende de la unión (acoplamiento y anclaje) entre fibras y matriz (zona de interfaz). Sin embargo, es posible utilizar la regla de las mezclas para tener una aproximación de la resistencia a la tensión del compuesto que contenga fibras continuas y paralelas, así (Ecuación 3):

$$TS_C = f_f \cdot TS_f + f_m \cdot \sigma_m$$

(Ecuación 3)

Donde  $TS_f$  es la resistencia a la tensión de la fibra y  $\sigma_m$  es el esfuerzo que actúa sobre la matriz cuando el material compuesto esta deformado hasta el punto en que las fibras se fracturan. Por lo tanto,  $\sigma_m$  no es la resistencia a la tensión real de la matriz. Otras propiedades, como la ductilidad, impacto, fatiga y termofluencia son difíciles de predecir, incluso en el caso de fibras alineadas unidireccionalmente [1].

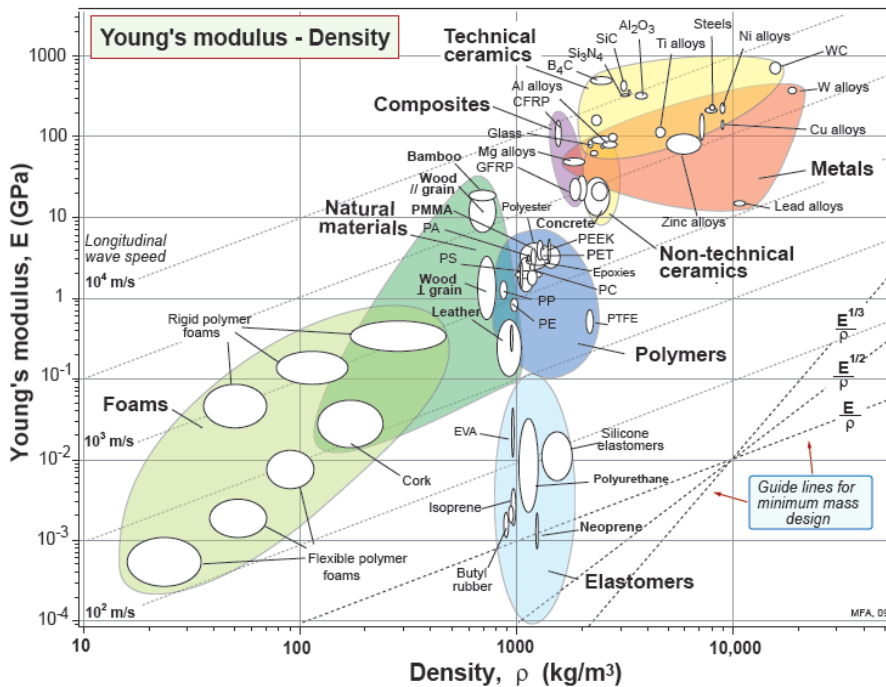


Figura 23. Variación del módulo de elasticidad (E) (GPa) en función de la densidad (ρ) (Mg/m<sup>3</sup>) de diferentes tipos de materiales. Fuente: [18].

Por último, al diseñar un PMC reforzado con fibras deben tomarse en consideración muchos factores, incluyendo la longitud de las fibras, diámetro, orientación, cantidad (volumen de refuerzo crítico), y propiedades de

las mismas, así como las propiedades de la matriz y la unión entre ambas (zona de interfaz).

En cuanto a la longitud y diámetro de las fibras, estas pueden ser cortas, largas o incluso continuas. Estas dimensiones se caracterizan en función de la relación de aspecto o de forma  $l/d$ , donde  $l$  es la longitud y  $d$  es el diámetro de las fibras. Normalmente las fibras varían en su diámetro desde  $10 \mu\text{m}$  hasta  $150 \mu\text{m}$ . En general, la resistencia de los PMC mejora cuando la relación de aspecto de las fibras es mayor. Así mismo, en la medida que el diámetro de la fibra es menor, la probabilidad de encontrar defectos que puedan propagarse durante el proceso de manufactura o carga disminuye. Así entonces, existe una longitud crítica ( $l_c$ ) para llegar a una efectividad de refuerzo en los PMC y está dada por la Ecuación 4:

$$l_c = \frac{TS_f \cdot d}{2\tau_i}$$

(Ecuación 4)

Donde  $TS_f$  es la resistencia de la fibra y  $\tau_i$  está relacionado con la resistencia (adherencia) de la unión entre la fibra y la matriz, o con el esfuerzo con el cual la matriz empieza a deformarse. Si la longitud de la fibra  $l$  es inferior a  $l_c$ , se observará poco efecto de refuerzo; si  $l$  es más larga que aproximadamente  $15l_c$ , la fibra se comportara casi como si fuera continua. De este modo, la resistencia del PMC se puede estimar a partir de la Ecuación 5, donde  $\sigma_m$  es el esfuerzo que se ejerce sobre la matriz cuando las fibras se rompen.

$$\sigma_c = f_f \cdot TS_f \left(1 - \frac{l_c}{2l}\right) + f_m \cdot \sigma_m$$

(Ecuación 5)

En cuanto a la cantidad de fibras, una mayor fracción volumétrica incrementa la resistencia y rigidez del PMC, como se podría esperar aplicando la regla de las mezclas. Con relación a la orientación de las fibras, estas pueden introducirse en la matriz con diversas orientaciones. Las fibras cortas de

orientación aleatoria y con una pequeña relación de aspecto (por ejemplo, la fibra de vidrio) son fáciles de introducir en la matriz y le dan al PMC un comportamiento relativamente isotrópico. Por su parte, los arreglos de fibras largas, o incluso continuas y unidireccionales, producen propiedades anisotrópicas, con una resistencia y rigidez particularmente buena en dirección paralela a las fibras (capas  $0^\circ$ ). Sin embargo, si la carga es perpendicular a la orientación de las fibras, el desempeño de los PMC es pobre. Por esta razón, los PMC laminados son comúnmente producidos a partir de la unión de diversas capas orientadas de manera paralela y perpendicular a una dirección dada, es decir, arreglos de capas orientados, por ejemplo, a  $0^\circ$ ,  $45^\circ$  y  $90^\circ$  entre sí. También pueden introducirse capas que cubran diferentes tipos de condiciones o direcciones de cargas, de acuerdo con las especificaciones de diseño y/o necesidades de servicio. Las fibras también pueden orientarse en patrones tridimensionales dependiendo el espesor del elemento [1].

Como se ha mencionado anteriormente, los casos más comunes de PMC son los CFRP (*carbon fiber reinforcing polymer*) y GFRP (*glass fiber reinforcing polymer*). Los CFRP ofrecen mayor rigidez y resistencia que cualquier otra alternativa, pero son considerablemente más costosos que los GFRP. Las fibras continuas de carbono en una matriz de poliéster o epoxi ofrecen el mayor rendimiento. Por su parte, los GFRP son los más baratos y, con mucha diferencia, utilizados. Las matrices van desde el PP termoformado, hasta las resinas termoestables (poliéster, epoxis o fenólicas). Estas últimas sobresalen a temperaturas de servicio más altas. Sin embargo, el PEEK permite una mayor temperatura de trabajo y resistencia al impacto. El GFRP de alto rendimiento utiliza fibras continuas. Los GFRP con fibras de vidrio cortas son más baratos y se utilizan más comúnmente. Los productos de GFRP van desde pequeñas placas de circuitos electrónicos a cascos de barcos grandes, carrocerías y paneles interiores de automóvil, electrodomésticos, muebles y accesorios. Un análisis comparativo de las principales propiedades de los PMC más comunes es presentado en la Tabla 3. La composición de los PMC corresponde a una matriz de resina epóxica (50 %-55 % en peso) reforzadas con fibras continuas ( $0^\circ$  /  $\pm 45^\circ$  /  $90^\circ$ ) de vidrio (GFRP), carbono (CFRP) o Kevlar en disposición cuasi-isotrópica.

**Tabla 3. Principales propiedades y comparación entre PMC reforzados con fibras de vidrio (GFRP), carbono (CFRP) y aramida (Kevlar). Fuente: base de datos CES EduPack 2019 Versión 19.2.0 (Granta Design Limited).**

Propiedad	Tipo de PMC		
	GFRP	CFRP	Kevlar
Densidad (g/cm <sup>3</sup> )	1,7-2,0	1,5-1,6	1,38
Precio (COP/kg)	6,47-9,16 x10 <sup>4</sup>	9,96x10 <sup>4</sup> -1,11x10 <sup>5</sup>	1,35-2,26x10 <sup>5</sup>
Módulo de Young (GPa)	15-28	69-150	23,5-30,9
Limite elástico (MPa)	110-192	550-1,05x10 <sup>3</sup>	355-392
Resistencia a la tracción (MPa)	138-241		
Resistencia a la compresión (MPa)	138-207	440-840	119-139
Elongación (% strain)	0,85-0,95	0,32-0,35	0,37-0,42
Dureza Vickers (HV)	10,8-21,5		10,8-21,5
Resistencia a la fatiga (10 <sup>7</sup> ciclos) (MPa)	55-96	150-300	70,7-98,5
Tenacidad a la fractura (MPa·m <sup>0,5</sup> )	7-23	6,12-20	4,4-5,4
Máxima temperatura de servicio (°C)	140-220		
Conductividad térmica (W/m·°C)	0,4-0,55	1,28-2,6	0,19-0,26
Coef. de expansión térmica (μstrain/°C)	8,64-33	1-4	9,41-12,9

### **2.3 MÉTODOS DE FABRICACIÓN Y MANUFACTURA DE LOS COMPUESTOS DE MATRIZ POLIMÉRICA**

La producción de un PMC reforzado con fibras puede implicar varios procesos y/o etapas; que irían desde la producción y/o tratamiento de las fibras, su organización en tejidos o paquetes, así como la introducción misma de las fibras en la matriz. Los PMC son típicamente moldeados en láminas (SMC, *sheet molding compounds*) y en volumen (BMC, *bulk molding compounds*). Frecuentemente, las fibras cortas se cortan en hilachos de un centímetro o

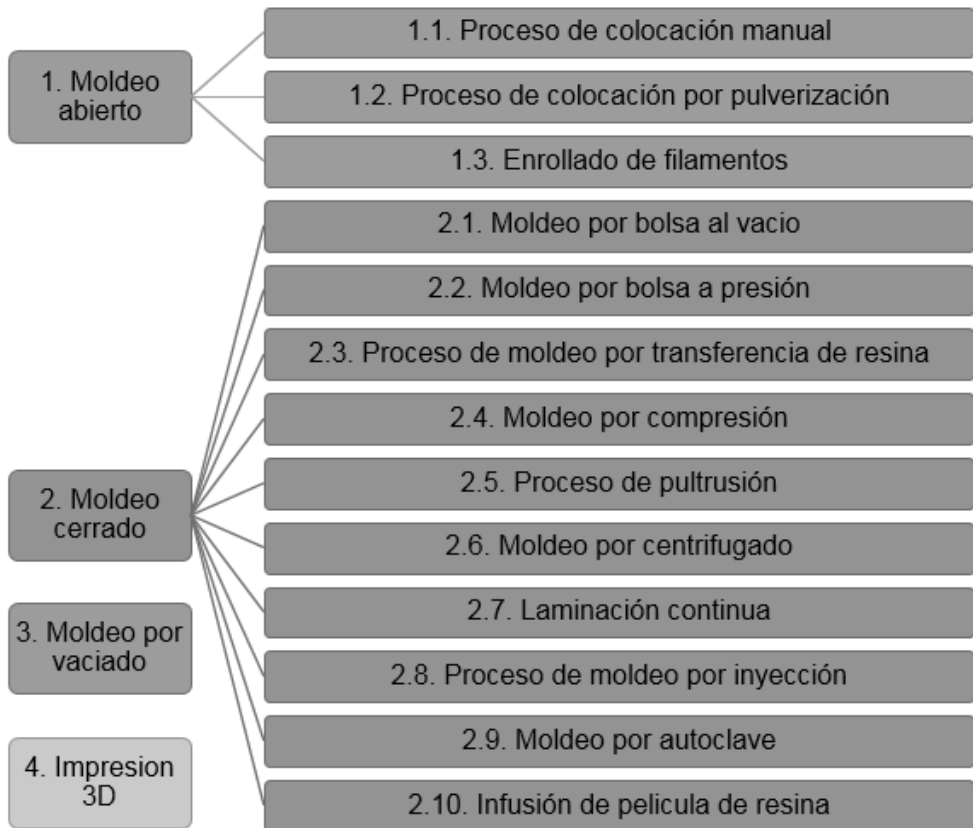
menos, son fáciles de incorporar en la matriz y usuales en los SMC y BCM. Frecuentemente las fibras cortas se encuentran dentro del material, dispersas al azar u orientadas de forma aleatoria. Para el caso de los PMC, las fibras también se pueden procesar como fibras largas o en forma de tejidos o telas. Algunas de estas, conocidas como *prepregs*, consisten en esteras de fibras (tejidas [bidimensionales o tridimensionales], no tejidas, entramadas o trenzadas) impregnadas por una resina polimérica, las cuales todavía no se han polimerizado completamente [1].

En función del tipo de aplicación y materias primas, las piezas de PMC pueden ser obtenidas a partir de diversos métodos o procesos. Los PMC (particulados y fibrorreforzados) normalmente se producen a partir de la incorporación del refuerzo en la matriz polimérica en estado líquido o plástico, y utilizando después técnicas convencionales de procesamiento, tales como el moldeo por inyección o el método de rociado sobre una preforma. Sin embargo, existen métodos de fabricación especiales, sobre todo si se trata de PMC reforzados con arreglos de fibras continuas, ya sea en forma alineada unidireccionalmente, bidireccionales, en esteras o tejidos. En la Figura 24 se resumen y clasifican los diversos tipos de procesos o métodos de obtención de PMC, teniendo en cuenta que a veces es posible la combinación de dos o más procesos.

A continuación, se describen los métodos de fabricación y procesamiento de PMC más comunes.

Las técnicas de elaboración manuales son las más comunes y ampliamente utilizadas (moldeo abierto), en las cuales las fibras se extienden en capas sucesivas sobre una preforma saturada de resina polimérica, y se presionan con un rodillo giratorio para asegurar un buen contacto y completa eliminación de la porosidad (burbujas de aire atrapadas) (Figura 25); finalmente se curan y pulen (lijan) hasta lograr la apariencia adecuada. Este método es generalmente utilizado para fabricar piezas basadas en resina poliéster y fibra de vidrio. En ocasiones no hay necesidad de calor para el proceso de curado y las piezas se dejan secar hasta que se rigidizan naturalmente a temperatura ambiente. De esta manera (manual o convencional) se pueden fabricar diversas piezas, que van desde carrocerías de automóviles

y piezas de aeronaves, hasta cascos de embarcaciones. Por lo común, esta es una operación lenta y requiere de mucha mano de obra y experiencia por parte del personal [1]. Por esta razón, el proceso de pulverización o rociado es una alternativa que proporciona mayor eficiencia de aplicación y adaptabilidad a geometrías más complejas, difíciles de fabricar por el método convencional o manual. En este método (rociado), las fibras cortas y la resina son proyectadas a través de una pistola manual y simultáneamente se usa un rodillo para fusionar la resina y el refuerzo, tal y como se ilustra en la Figura 26. En el proceso de pulverización, el operador manipula el grosor y la consistencia de cada capa, permitiendo un mayor control de calidad de la pieza [3], [5], [20], [21].



**Figura 24. Principales técnicas de fabricación de los PMC. Fuente: el autor.**

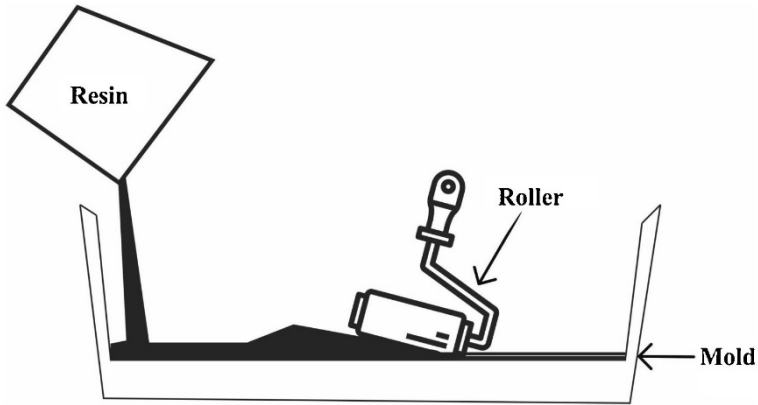


Figura 25. Proceso de colocación manual de los PMC. Fuente: [20].

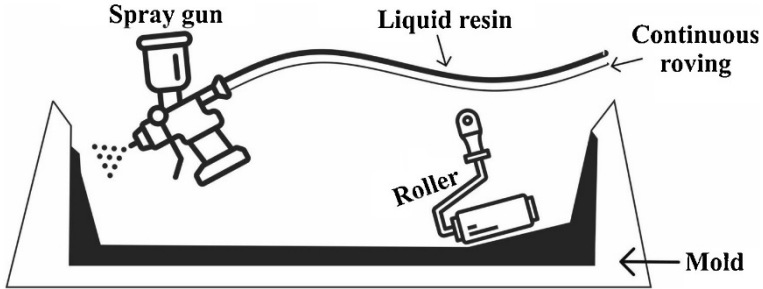
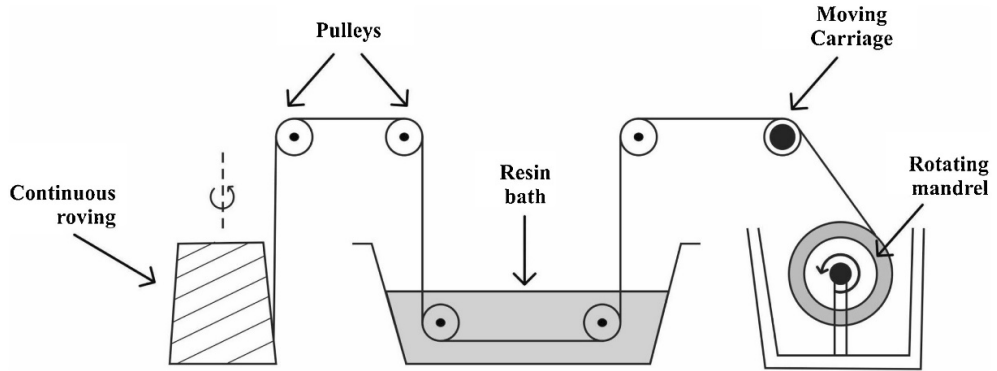


Figura 26. Proceso de colocación por rociado o pulverización de los PMC. Fuente: [20].

El proceso de enrollado de filamentos es también un método de moldeado abierto, pero automatizado, en el que las fibras se enrollan alrededor de un mandril para formar gradualmente una figura sólida, que incluso puede llegar a tener un elevado espesor. En este proceso el filamento puede estar sumergido en la resina de la matriz polimérica (baño caliente) antes de su enrollado, o esta resina se puede impregnar alrededor del filamento durante o después del enrollado. Al igual que en otros métodos, el curado completa la producción de la pieza. Este proceso es continuo para la fabricación del producto de materiales compuestos que tienen un área de sección transversal definida, tales como recipientes a presión y piezas fundidas para motores de reacción. En este proceso el producto obtenido es de un área de sección transversal uniforme debido a la distribución adecuada de la fibra, alineación de



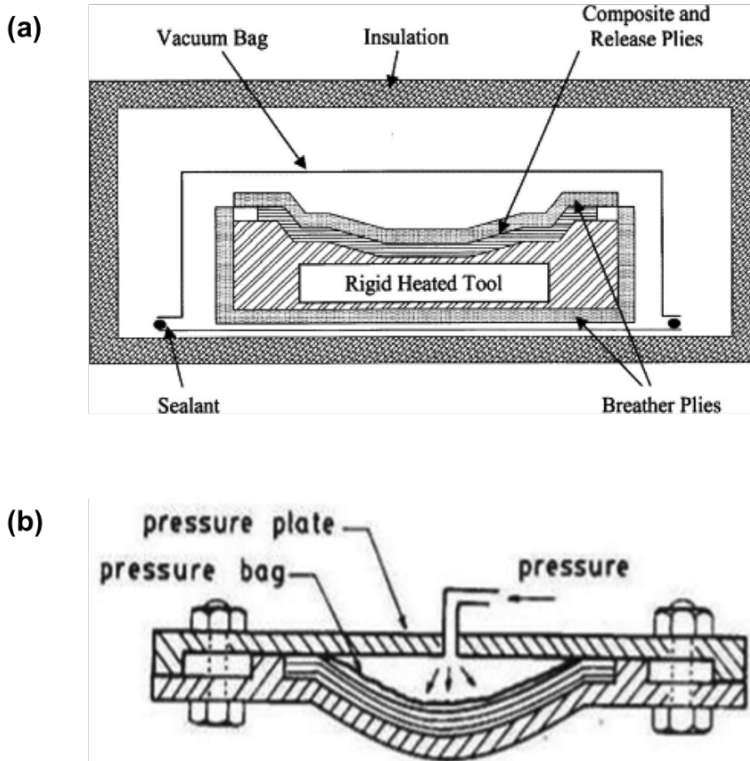
los materiales fibrosos y muy buena impregnación de resina [1], [3], [5]. El esquema del proceso se resume en la Figura 27.



**Figura 27. Proceso de enrollado de filamentos para la fabricación de componentes de PMC. Fuente: [20].**

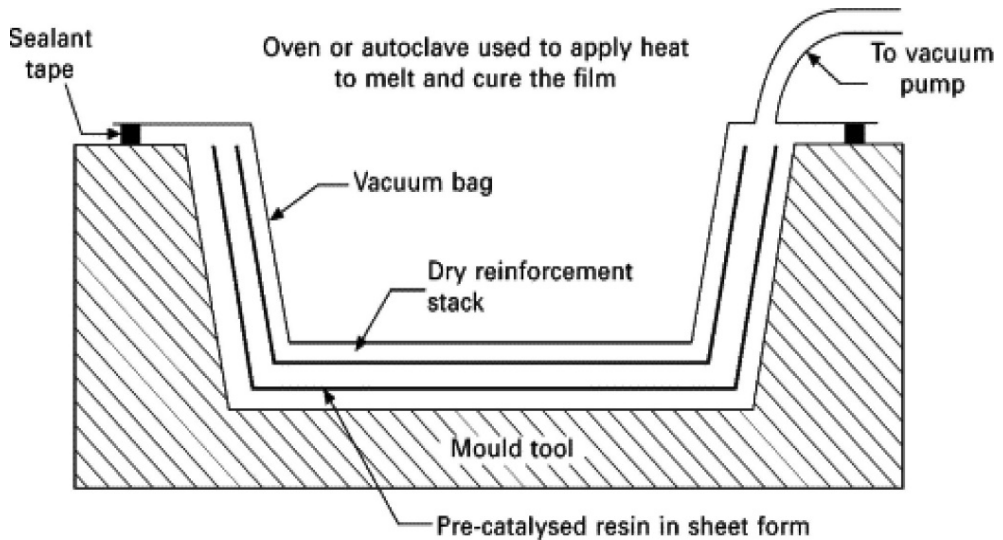
Los PMC también pueden ser moldeados por bolsa (métodos de moldeo cerrados), introduciendo gases a alta presión (Figura 28a) o provocando vacío (Figura 28b), para obligar a que las capas individuales (laminados) se junten, de tal manera que durante el curado se obtenga un compuesto de alto desempeño y mínimo nivel de porosidad. Utilizando estas técnicas se han fabricado grandes componentes de matriz polimérica para los fuselajes de las aeronaves militares [1]. En el caso del método de vacío, el principal objetivo es la eliminación del aire que queda atrapado entre las capas de laminados (oquedades), resultando en un aumento de la resistencia, de la capacidad de carga y la disminución de los defectos superficiales de los componentes. Durante el proceso se utiliza la presión atmosférica para reducir la presión de aire de la bolsa de vacío. Luego, la presión atmosférica externa ejerce fuerza sobre la bolsa de vacío para consolidar el laminado, eliminando el aire atrapado y el exceso de resina, dando como resultado un mayor porcentaje de refuerzo de fibra en el PMC. Por otro lado, el método de alta presión es casi similar al proceso de moldeo de bolsas al vacío, pero la única diferencia es que se aplica una presión de aire de aproximadamente 200 a 350 kPa en una bolsa de goma o lámina de goma que cubre los materiales y expulsa el aire

atrapado y el exceso del material. Este proceso es muy útil para la fabricación de grandes carcasas, carenados de aviones, tanques, grandes contenedores, etc. [3], [20], [21].



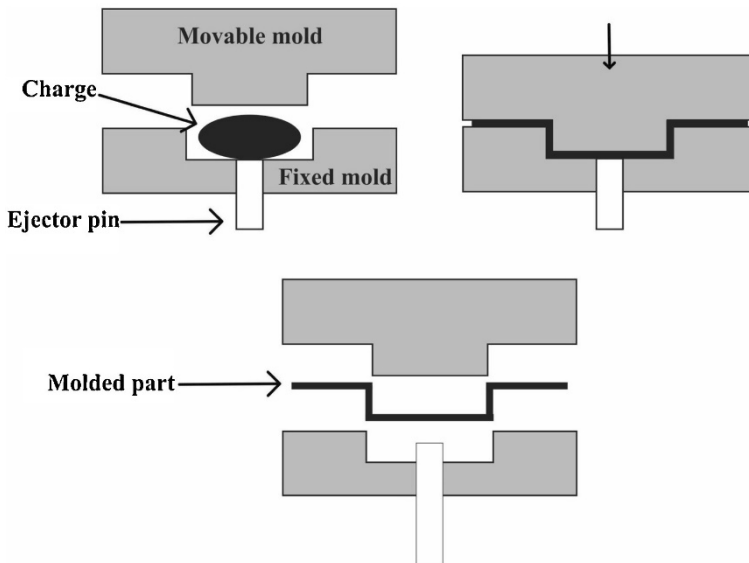
**Figura 28. Métodos de moldeo cerrado por bolsa de PMC: a) método de vacío y b) método de alta presión. Fuente: [21].**

El proceso de moldeo por infusión de resina es ligeramente diferente del moldeo con bolsa de vacío, ya que en este caso se aplica vacío antes de introducir la resina. La bolsa de vacío se coloca y se sella en el perímetro del molde y se pone un tubo perforado entre la bolsa de vacío y el recipiente de resina. Luego, se aplica presión de vacío para succionar la resina y consolidar los laminados de fibra. El laminado se compacta cuando la resina se introduce en el molde, sin dejar espacio para el exceso de resina [20]. Un esquema de este proceso se presenta en la Figura 29.



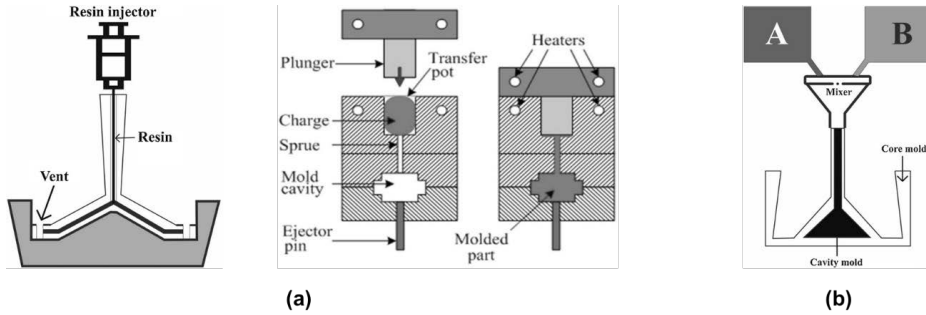
**Figura 29. Esquema del método de moldeado por infusión de resina para la obtención de PMC. Fuente: [21].**

Por su parte, en el moldeado por compresión se colocan las fibras en un dado hecho con dos piezas (macho y hembra); al cerrarse este, se inyecta la matriz polimérica y se obtiene la forma deseada [1]. El moldeado por compresión es principalmente útil para piezas complejas de polímero reforzado con fibra de vidrio, ya que es un método de gran volumen y alta presión que funciona en un tiempo de ciclo rápido. Este utiliza moldes de metal precalentados de 120 °C a 200 °C montados en grandes prensas de moldeado hidráulicas o mecánicas. El molde base es estacionario, mientras que el molde superior es móvil. La materia prima agregada se calienta dentro del molde hasta que se vuelve flexible y maleable y el molde se cierra por un período de tiempo específico. La naturaleza y propiedades del producto obtenido depende principalmente del tipo de materia prima utilizada, la forma del molde, la presión aplicada, la temperatura mantenida y el tiempo de curado. La Figura 30 muestra el esquema de este proceso. Esta técnica de moldeado se aplica para la fabricación de artículos de cocina, piezas de automóviles, juguetes, equipos eléctricos, piezas de aviones y contenedores grandes [20], [21].



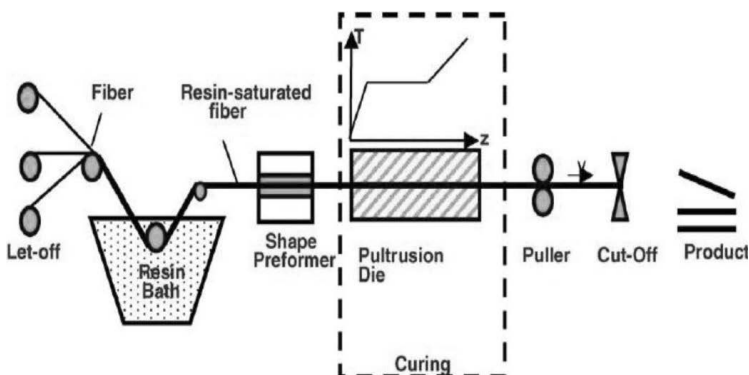
**Figura 30. Proceso de moldeo por compresión de PMC. Fuente: [20].**

Los procesos de moldeo por transferencia de resina y moldeo por inyección de polímeros reforzados combinan los principios de transferencia y compresión de la matriz fundida hacia un molde sellado, en donde se lleva a cabo el proceso de moldeo. La fase de refuerzo podría estar dentro del molde (Figura 31a) o ser mezclada directamente con la matriz polimérica (de manera previa o durante el proceso de inyección) (Figura 31b). En esta técnica la cantidad apropiada de material polimérico se calienta. En el caso de los polímeros termoplásticos, por ejemplo, se calienta encima de su temperatura de fusión y el molde es llenado por la matriz líquida que pasa a través del bebedero hasta la cavidad del molde, bien sea por acción de la gravedad, inyección o compresión (acción de un pistón-cilindro). Luego, la cavidad del molde se cierra hasta que el PMC esté completamente curado. Posteriormente, la cavidad del molde se abre con cuidado, y a veces, cuando el producto desarrollado se endurece, se retira y somete a un procesamiento adicional para darle el acabado deseado [21]. En el caso de las resinas, el calentamiento puede omitirse y la inyección del PMC puede hacerse a temperatura ambiente, controlando una baja viscosidad en la matriz líquida (resina) y los niveles de presión de inyección (aproximadamente 50 psi) [20].



**Figura 31. Procesos de moldeo por transferencia de resina (a) y moldeo por inyección de polímeros reforzados (b). Fuente: [20], [21].**

El método de pultrusión o extrusión estirada se utiliza para producir productos de forma simple con secciones transversales uniformes, con formas redondas, rectangulares, tuberías, placas o laminas. Durante este proceso (Figura 32) las fibras pasan a través de un baño de resina polimérica para su impregnación, y son unidas para generar una forma específica antes de entrar en un dado caliente para su curado y consolidación. En este caso, el endurecimiento o curado de la pieza se produce casi de inmediato, por lo que se fabrica un producto de forma continua. Es posible utilizar este método en la manufactura de piezas un tanto más complejas, como los palos de golf, cañas de pescar y bastones para esquíes, entre otros, con volúmenes de refuerzo superiores al 60 % [1], [3], [5].



**Figura 32. Método de pultrusión o extrusión estirada para la fabricación de PMC. Fuente: [21].**

Otro método de producción continua es el proceso de laminación continua (Figura 33). Este combina el refuerzo y la resina en forma de película o lámina, con la ayuda de rodillos compactadores que aplican presión y eliminan el aire atrapado entre capas. Después de completarse el proceso de compactación, la lámina completa se cura dentro de un horno, y finalmente el compuesto puede ser enrollado sobre un rodillo, formando una hoja laminada que luego se puede recortar a un ancho y largo determinado, según el tipo de aplicación y/o elemento a fabricar. A través de este método también pueden ser aplicados tratamientos de superficie, como efectos de relieve, por ejemplo.

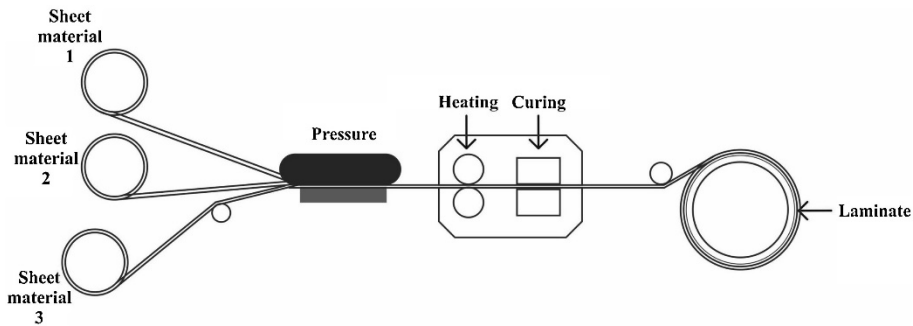
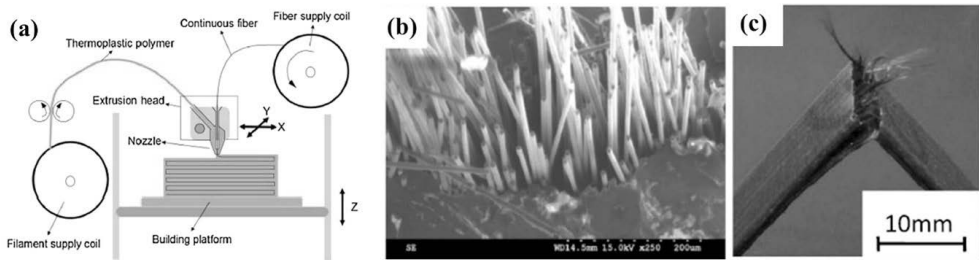


Figura 33. Esquema del proceso de laminación continua de PMC. Fuente: [20].

Por último, los procesos de manufactura aditiva para la obtención de componentes a partir de PMC imprimibles ha tenido avances significativos en los últimos años. En este caso, el uso de nanocompuestos para mejorar el rendimiento y funcionalidad de las piezas es el foco de la investigación. Estos procesos incluyen la fabricación por a) filamentos fundidos, b) la sinterización selectiva por láser, c) la fusión por chorro múltiple y d) la estéreo litografía. Uno de los procesos más versátiles y adaptables es el de filamentos fundidos, que permite, además del reforzamiento de los PMC imprimibles con nanopartículas y microfibras, la incorporación de fibras continuas, tal y como se puede observar en la Figura 34. La selección del tipo de proceso depende del tipo de aplicación y materias primas [22]. En la próxima sección se amplía la utilización de esta técnica de manufactura aditiva de acuerdo con las aplicaciones avanzadas que surgen de la mano de esta tecnología y de la ciencia e ingeniería de los materiales.



**Figura 34. a) Configuración para la impresión 3D de PMC reforzados con fibra continua, b) microestructura de la interfase obtenida y c) patrón de fractura de la sección transversal de PMC basados en una matriz de PLA reforzados con fibra continua de carbono. Fuente: [23].**

## **2.4 APLICACIONES AVANZADAS DE LOS MATERIALES COMPUESTOS DE MATRIZ POLIMÉRICA**

Frecuentemente, el término *materiales compuestos avanzados* se utiliza cuando se pretende que el material compuesto resista condiciones de servicio críticas en aplicaciones especiales, como sería la industria aeroespacial, por ejemplo. En efecto, los materiales compuestos avanzados corresponden, por lo general, a PMC de alta resistencia. Donde se requiera de una elevada rigidez, se acostumbra a utilizar fibra de carbono. Por su parte, las fibras de aramidas y polietileno son más adecuadas para aplicaciones de alta resistencia, donde son más importantes la tenacidad y la resistencia al daño, sin embargo su uso está limitado para aplicaciones de “bajas” temperaturas, en donde se destacan por sobre todas las fibras de vidrio [1].

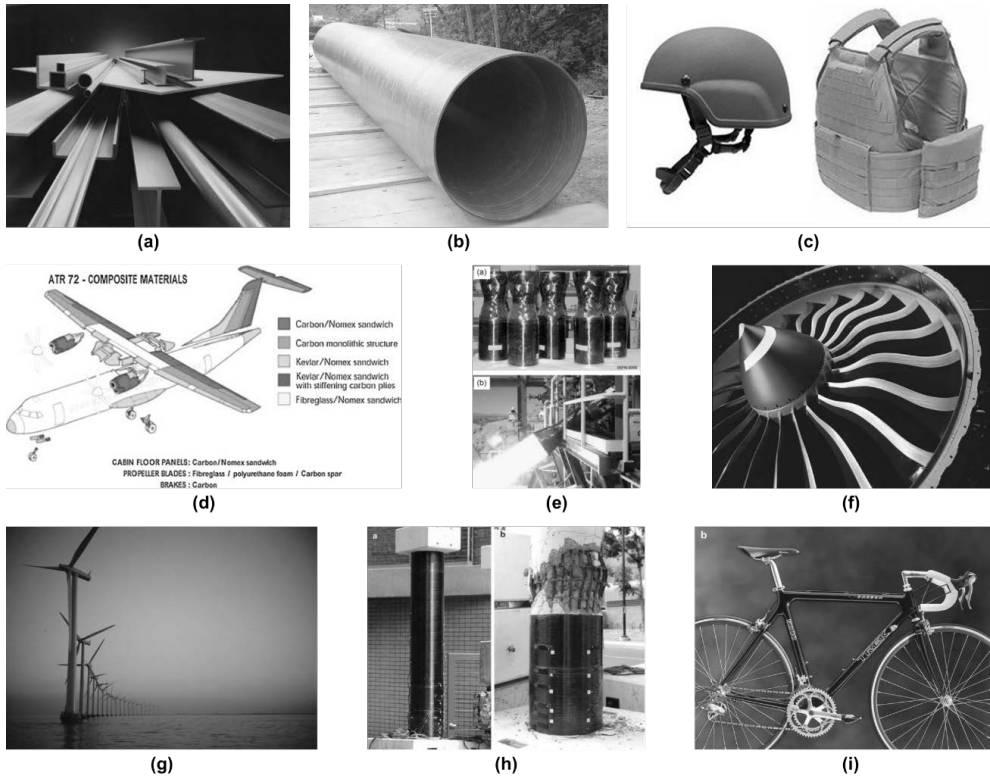
Los PMC de alto desempeño se utilizan en una amplia variedad de industrias, desde artículos deportivos y elementos de construcción civil, hasta la industria aeroespacial. En la Figura 35a se muestran una amplia variedad de formas estructurales de matriz de resina reforzada con fibra de vidrio obtenidas a partir de procesos de pultrusión. Tanques y recipientes (presión y sin presión) en la industria de procesos químicos y grandes tuberías (Figura 35b) se fabrican habitualmente con resina poliéster reforzada con fibra de vidrio, por medio de procesos de enrollado de filamentos [5]. Por su parte, elementos de protección balística (Figura 35c) de alto desempeño incorporan

PMC, basados principalmente en Kevlar, material con una alta capacidad de absorción de energía (tenacidad). Los PMC también son utilizados en diversos componentes aeronáuticos, tales como pisos (honeycomb), carenados y domos (Figura 35d), representando cerca del 50 % del total de materiales utilizados en una aeronave [24]. Las aplicaciones pueden ir incluso hasta la fabricación de componentes de propulsión tipo motores cohete (Figura 35e) y turbinas o palas de motor (Figura 35f) [25]. Por su parte, los PMC se han ganado un importante lugar en la construcción de aerogeneradores (Figura 35g), en donde los alabes de las turbinas son construidos principalmente por PMC de alto desempeño y bajo peso, basados principalmente en resinas epóxicas reforzadas con fibra de carbono y/o vidrio.

Por su parte, en la reparación y reforzamiento de estructuras averiadas de concreto u hormigón se utilizan PMC basados en resinas epoxis reforzadas con fibras de carbono (Figura 35h). Sin duda, una de las más grandes ventajas de los PMC sobre otros materiales es, como se discutió anteriormente, la capacidad de fabricar componentes más livianos, desplazando, en algunas aplicaciones, a las ya conocidas aleaciones metálicas. Tal es el caso de las bicicletas de fibras de carbono (Figura 35i), reconocidas por ser mucho más livianas que aquellas con marcos de acero y aluminio. Los anteriormente descritos son simplemente ejemplos de las diversas aplicaciones especiales que permiten desarrollar los PMC, siendo reconocidos, sin duda, como los materiales del futuro a nivel industrial.

Por su parte, la llegada de las tecnologías de manufactura aditiva (impresión 3D) y su progresiva introducción al mercado mundial, con la adaptación de la industria 4.0, está suponiendo una gran revolución en el desarrollo de nuevas técnicas y materiales que permitan imprimir una gran variedad de piezas y componentes, cada vez de mayor desempeño en función de sus aplicaciones (Figura 36). Actualmente, uno de los grandes retos se concentra en mejorar las propiedades de las piezas impresas capa a capa a partir de polímeros, tanto termoplásticos como termoestables. Es allí donde los materiales compuestos recobran importancia, considerándose como la solución más práctica y factible a esta problemática ingenieril que restringe la amplia aplicación industrial de los polímeros impresos en 3D [26], [27].





**Figura 35. Algunas aplicaciones especiales de los PMC: a) elementos lineales estructurales de alta resistencia, b) tuberías de alta presión y resistencia (diámetro 2 m), c) sistemas de protección balística, d) componentes aeronáuticos, e) componentes de propulsión, f) alabes o palas de motor, g) construcción de torres eólicas, h) reparación de estructuras de concreto, i) livianos artículos deportivos de alto desempeño.**

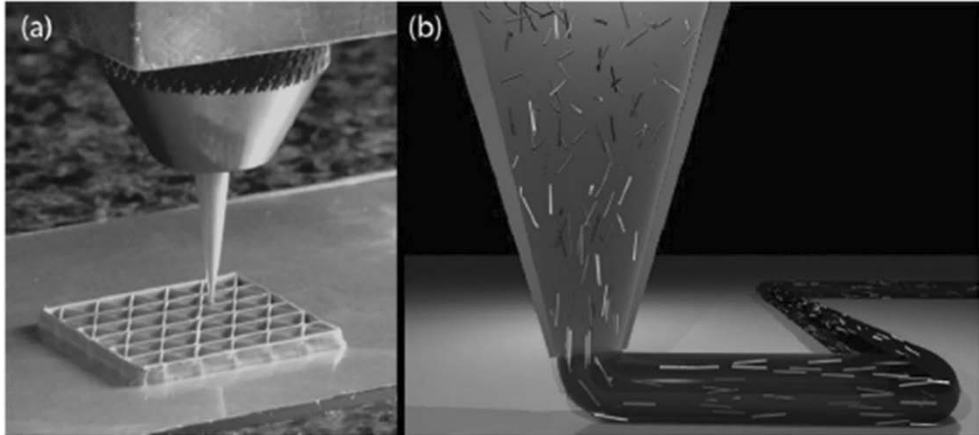
**Fuente: adaptado de [5], [24], [25].**



**Figura 36. Algunas aplicaciones avanzadas, obtenidas a partir de la manufactura aditiva de PMC imprimibles. Incluyen instrumentos deportivos, piezas personalizadas, piezas estructurales, autopartes, prótesis livianas de alto desempeño, implantes dentales, entre otras. Fuente: [22].**

La adición de nanomateriales y/o micropartículas ( $\text{TiO}_2$ ,  $\text{BaTiO}_3$ ,  $\text{ZnO}$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{SiO}_2$ , montmorillonita, grafeno, entre otras) para el refuerzo de las matrices poliméricas consigue una mejora significativa de las propiedades físico-mecánicas de los PMC imprimibles, incluyendo las propiedades de conductividad (térmica o eléctrica), la bioactividad, el incremento de la resistencia al desgaste y el control de los fenómenos de contracción de las piezas impresas. Así mismo, la incorporación de microfibras (por ejemplo, vidrio y/o carbono) ha logrado incrementar las propiedades mecánicas de las piezas. Sin embargo, tal y como se puede observar en la Figura 37, la orientación de las fibras es fundamental durante la impresión 3D de las piezas, lo que influye en la técnica que se debe emplear para su impresión. Un ejemplo exitoso de esta práctica es la impresión 3D de compuestos formados por polímero ABS y microfibras de carbono, logrando un incremento del 150 % de la resistencia a la tracción del PMC con relación al ABS sin reforzar (matriz). Adicionalmente, se estudia la introducción de nanomateriales, con el fin de

mejorar las propiedades mecánicas, eléctricas o térmicas de los 3D-PMC, en donde garantizar la óptima distribución de las nanopartículas, al igual que sucede con las fibras. Este es el foco de las investigaciones [23].

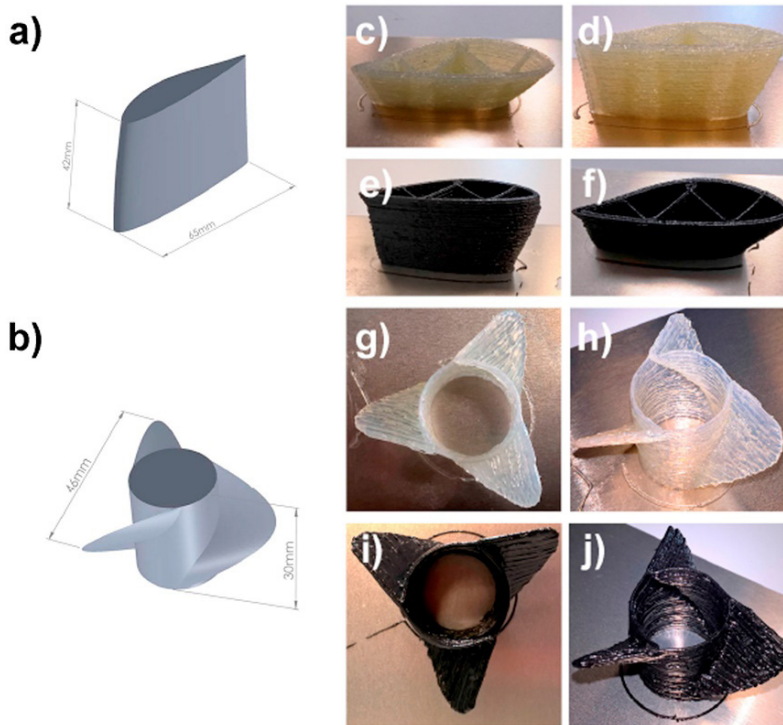


**Figura 37. a) Impresión 3D de un compuesto en forma de panal triangular y b) ilustración esquemática de la orientación progresiva de las microfibras dentro de la boquilla durante la deposición de un PMC. Fuente: [23].**

Las aplicaciones de los PMC de impresión 3D son muy diversas, e incluyen, entre otras, las industrias biomédicas, electrónica y aeroespacial, y abren posibilidades que anteriormente no se contemplaban, por ejemplo, en biomedicina con la impresión de modelos anatómicamente exactos de prótesis, andamios para crecimiento óseo o, incluso, la creación de meniscos artificiales [19]. La posibilidad de manufactura de diseños complejos (de alta precisión) de acuerdo con diseños asistidos por computadora (CAD), sumado a la no dependencia de procesos adicionales de mecanizado, abre la posibilidad de disminuir el peso aún más, sin comprometer el desempeño estructural o mecánico de las piezas [23].

La mayoría de los componentes aeroespaciales tienen geometrías complejas que requieren mucho tiempo de procesamiento y son costosas de fabricar. Por lo tanto, el uso de PMC imprimibles y procesos de manufactura aditiva es muy adecuado para el desarrollo de estos componentes. Hasta ahora, la mayoría de los componentes aeroespaciales, como las boquillas y/o

toberas de escape y los alabes de las turbinas (palas de motor), están impresos en 3D con materiales metálicos, ya que normalmente los metales son más resistentes y presentan temperaturas de fusión superiores a los materiales poliméricos. Sin embargo, recientemente, varios institutos de investigación están explorando la posibilidad de aplicar la impresión 3D de PMC, basados en resinas termoestables y PEEK reforzados con fibras de carbono y vidrio, en aplicaciones aeroespaciales (Figura 38). Como se ha mencionado anteriormente, el uso de PMC es de interés para esta industria debido a la eficiencia en consumo de combustible que genera la disminución del peso ( $\geq 50\%$ ) de dichos componentes [23], [27].

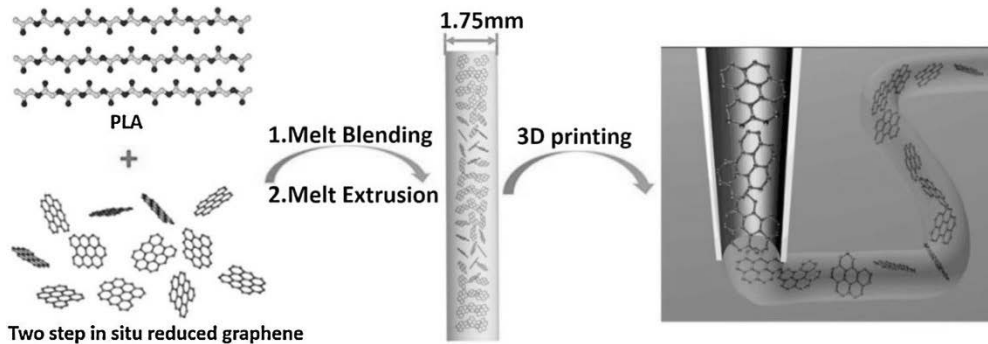


**Figura 38.** Modelos 3D utilizados para demostrar la imprimibilidad de algunas formulaciones de PMC reforzados con fibra de vidrio y de carbono en la fabricación de componentes aeroespaciales (perfil aerodinámico [a] y hélice de motor [b]). PMC reforzados con fibra de vidrio (c, d, g, h) y PMC reforzados con fibra de carbono (e, f, i, j). Fuente: [23].

De la mano con las tecnologías de manufactura aditiva (impresión 3D), la síntesis de PCM y su aplicación en la industria biomédica es cada vez más interesante. Muchos polímeros son de naturaleza bioactiva (polimetil metacrilato [PMMA], poli-caprolactona [PCL], polivinil alcohol [PVA], ácido poliláctico, entre otros) y, debido a esta particularidad, están siendo utilizados recientemente en aplicaciones biomédicas, como la sustitución de tejidos, prótesis (huesos), aplicaciones de odontología, cicatrización de heridas (ventajas inteligentes y andamios), cirugía ortopédica, reemplazo de articulaciones y de cadera. Igualmente, en la investigación médica avanzada se estudia la fabricación de muchos órganos artificiales del cuerpo humano. Cabe destacar que estas aplicaciones también han sido posible gracias a la síntesis de PMC basados en las matrices bioactivas. Aunque estos materiales tienen una serie de propiedades avanzadas, tales como biodegradabilidad, baja inflamabilidad, biocompatibilidad y mayor propiedad de adhesión celular, los PCM también poseen una serie de inconvenientes, como la liberación de subproductos de naturaleza ácida, propiedad de escasa afinidad celular. Para la comercialización de PCM bioactivos, estos inconvenientes deben eliminarse y realizarse más investigaciones sobre su diseño y desarrollo [21].

Sin duda, el camino para revolucionar la industria a través de la ciencia e ingeniería de los materiales es a través de la nanotecnología. Los nanocompuestos poliméricos son PMC reforzados con nanorrellenos dispersos en la matriz polimérica. Estos nanorrellenos se utilizan como refuerzos o aditivos funcionales en la matriz polimérica. Los nanocompuestos poliméricos han atraído un considerable interés de investigación, debido al llamado “nanoeffecto”. Es bien sabido que la mejora de propiedades, tales como las mecánicas, térmicas, eléctricas o químicas, se logra mediante pequeñas cargas de nanorrellenos. Un caso avanzado de este tipo de nanocompuestos son los PMC reforzados con nanotubos de carbono y/o grafeno. Debido a la alta conductividad eléctrica de estos nanorrellenos, el desarrollo de componentes imprimibles basados en esta combinación (Figura 39) ha atraído un enorme interés de investigación en aplicaciones electrónicas (circuitos flexibles). En efecto, las nanoplaquetas de grafeno (GnP) son partículas ultrafinas que consisten en pequeñas pilas de láminas de grafeno. Este tipo de nanorrelleno se ha utilizado como refuerzo multifuncional, porque posee estructuras

apiladas de grafeno 2D que dan como resultado propiedades mecánicas, eléctricas y térmicas muy superiores y especiales. Por lo tanto, para nanocompuestos termoplásticos (matriz de ABS o PLA) rellenos con nanoplaquetas de grafeno, se reporta una mejora significativa de las propiedades mecánicas, estabilidad térmica y conductividad eléctrica [22].



**Figura 39.** Esquema representativo de un proceso de impresión 3D de PMC basados en una matriz termoplástica (PLA) reforzada con nanoplaquetas de grafeno. Fuente: [22].

Por otro lado, múltiples investigaciones han optado por el uso de materiales poliméricos reciclados, con el fin de darles un segundo uso y reducir su impacto en el medio ambiente. No obstante, es claro que el reciclaje de los PMC, posterior a su uso, es una limitante, debido principalmente a la dificultad de separar las fases que lo componen (matriz y refuerzos (partículas y/o fibras)). Esto compromete la aplicación del concepto de “economía circular” (cero residuos), la cual se basa en la reutilización, una y otra vez, de los materiales. Sin embargo, la producción de PMC a partir de residuos si es posible y sostenible. En efecto, se han obtenido resultados favorables al utilizar residuos derivados de los procesos de la industria del papel en la producción de compuestos poliméricos, los cuales, al mezclarlos con un 40 % en peso de fibra de caña de azúcar, dan como resultado un PMC que es resistente a más de 250 °C, presenta un incremento en su absorción de agua y su rigidez se ha incrementado en comparación con la matriz sin refuerzo [15].

En este sentido, la utilización de fibras naturales para el reforzamiento de matrices poliméricas se considera el futuro de los PMC reciclables,

•

ambientalmente sostenibles y biodegradables, no obstante, el reto de la ciencia e ingeniería de los materiales se concentra en no sacrificar las propiedades mecánicas de los PMC con el uso de este tipo de fibras. Las fibras naturales son relativamente débiles, tienen una alta tasa de absorción de agua, baja resistencia al impacto, entre otras desventajas, que pueden superarse mediante el uso de tratamientos fisicoquímicos aplicados a las fibras, mejorando, entre otras cosas, el acople o adherencia entre la fase de refuerzo y la matriz en la zona de interfaz [9], [12].

Como se mencionó anteriormente, una de las aplicaciones avanzadas de los PMC de mayor interés es, sin duda, la industria aeroespacial. Esta industria demanda permanentemente materiales de bajo peso y altísimas prestaciones, no solo mecánicas, sino también térmicas. Los materiales compuestos, en general, desempeñan un papel de gran importancia y se consolidan como la alternativa más eficiente y, dentro de estos, los PMC han jugado un rol clave en el desarrollo de esta industria. Algunas de las aplicaciones de los PMC incluyen el desarrollo de componentes que minimicen la transferencia de calor y la expansión térmica, pero aún más novedoso es su uso en la fabricación de componentes de propulsión sometidos a ambientes ablativos severos, tal y como es el caso de los motores cohete. Dado el interesante uso de los PMC en este campo y los desarrollos propios obtenidos por el Grupo de Investigación en Estudios Aeroespaciales (GIEA) de la Escuela Militar de Aviación (Emavi), en el próximo capítulo abordaremos más en detalle esta novedosa aplicación.

## **2.5 COMENTARIOS FINALES: RETOS Y OPORTUNIDADES**

Los materiales compuestos se reconocen como una única oportunidad para conseguir propiedades especiales a partir de la sinergia y combinación entre dos o más materiales. El diseño de un compuesto de matriz polimérica (PMC) abarca el diseño mismo del material y su estructura, relacionándose esta última con su procesamiento y desempeño final. Las ventajas de los PMC incluyen la posibilidad de adaptarse a diversos diseños y comportamientos, así como de generar propiedades anisotrópicas con un sin número de posibilidades de reforzamiento y múltiples métodos de procesamiento.

En el caso de los PMC, su excelente comportamiento frente a la corrosión (durabilidad), alta resistencia, buena relación resistencia/peso y gran versatilidad, ha permitido su introducción en diversos campos de la industria y la ingeniería mecánica, adaptándose a diseños y geometrías especiales que son muy complejas de lograr a partir de otro tipo de materiales. Pero como se ha destacado reiteradamente en este capítulo, la posibilidad de ahorro en cuanto al peso de los componentes y piezas es concretamente su mayor ventaja, logrando desplazar en algunas aplicaciones a las aleaciones metálicas. Especialmente, la industria aeroespacial se hace cada vez más eficiente de la mano de los PMC, logrando aumentar la carga paga de las aeronaves con un notable ahorro de combustible. Es por esta razón que la industria aeronáutica ha sido, hasta la fecha, el sector abanderado de los materiales compuestos, específicamente los de matriz polimérica (PMC).

Los beneficios de los PMC han abarcado otros sectores como el de las energías renovables (eólica), impulsando la construcción de los aerogeneradores. Igualmente, han impactado otras industrias de transporte terrestre (automoción y ferroviario), así como a la industria deportiva, e incluso el sector de la construcción. Esto significa que los beneficios de los PMC, que marcaron su aceptación en la industria aeroespacial, se trasladan cada vez más a otros campos productivos, en lo que se considera una progresiva y eficiente transferencia tecnológica y científica.

Desde el punto de vista de materias primas, las matrices termoestables han gobernado la producción de PMC, sin embargo, los termoplásticos se perfilan como una alternativa a estos, sobre todo por la posibilidad de reprocesamiento o reciclaje, hacia una industria “cero residuos” (economía circular). Hoy en día los polímeros atraviesan por una era de rechazo social, debido al impacto medioambiental que se deriva de su inadecuado uso e incapacidad de adaptar una estrategia mundial entorno al adecuado manejo y gestión de los residuos (posconsumo), impactando, sobre todo, a nuestros océanos (generación de islas de plástico). Es por esta razón que el desarrollo de PMC a partir del reciclaje de diversas materias primas, tanto matrices como refuerzos (particulados y fibras), se reconoce como una retribución al impacto medioambiental ya generado y una solución a esta problemática. En



este sentido, el estudio de matrices biodegradables y el uso de fibras naturales en el reforzamiento de PMC surgen como una alternativa.

La nanotecnología aplicada a los PMC ha demostrado la mejora de propiedades físicas importantes para algunas industrias en el desarrollo de aplicaciones de gran valor agregado, tal y como es el caso de la ingeniería biomédica (biocompuestos) y la electrónica (compuestos conductores flexibles). En este sentido, la incorporación de nanomateriales, como el grafeno y/o los nanotubos de carbono a los PMC, es una de las tecnologías emergentes de mayor impacto científico en los últimos tiempos.

De la mano de la nanotecnología aplicada a los PMC surgen nuevos métodos de procesamiento inmersos en la denominada industria 4.0; este es el caso de la manufactura aditiva o impresión 3D de compuestos de matriz polimérica. Los procesos cada vez más automatizados y adaptables a las necesidades de la industria moderna, especialmente a los ya complejos diseños mecánicos que demanda la industria, han consolidado a esta alternativa de procesamiento como la línea de manufactura de los próximos años. La manufactura aditiva ha sido uno de los desarrollos más recientes y de mayor crecimiento (exponencial), permitiendo un fácil y rápido procesamiento a bajo costo de los PMC. Algunos retos fueron identificados en este capítulo, en lo que respecta a la optimización de las propiedades y/o desempeños de estos PMC, pero sin duda los avances ya obtenidos son promisorios y se consideran como un precursor de múltiples investigaciones y desarrollos científicos alrededor del mundo, utilizando diversas fuentes y tipos de materias primas, incluyendo las matrices termoplásticas y termoestables y los micro-refuerzos, tanto nano-partículas como microfibras, sobre todo las de origen natural tratadas fisicoquímicamente.

Uno de los campos de aplicación que demanda propiedades de alto desempeño es el aeroespacial. En general, los materiales poliméricos, y por ende los PMC ordinarios, presentan una limitada temperatura máxima de servicio ( $\ll 300$  °C) que impide su aplicación directa en esta industria. En efecto, uno de los campos de aplicación más novedosos es la posibilidad de fabricación de componentes de propulsión a partir de PMC, sometidos a un ambiente ablativo severo que demanda de propiedades termo-mecánicas muy

especiales. Condiciones de servicio de hasta 1 600-2 000 °C eran impensables hasta hace un tiempo para este tipo de materiales, sin embargo, el desarrollo de PMC de naturaleza ablativa rompe este paradigma, perfilándose como una de las aplicaciones avanzadas de mayor nivel de desarrollo.

Sin duda, el constante desarrollo de la ciencia e ingeniería de los materiales impulsa los diferentes sectores productivos, pero como se ha reconocido en este capítulo, en la actualidad, el papel de los PMC ha sido fundamental, impactando directa o indirectamente a la sociedad en general, y enmarcándose como los materiales del futuro, siendo imperativo garantizar la sostenibilidad medioambiental de estos desde la ciencia e investigación y la transferencia de estos resultados hacia la producción industrial.

## 2.6 REFERENCIAS

- [1] D. R. Askeland and P. P. Phulé, *Ciencia e ingeniería de los materiales*, 4ta ed. México, D.F.: Thomson Learning, 2005.
- [2] A. K. Sharma, R. Bhandari, A. Aherwar and R. Rimašauskienė, "Matrix materials used in composites: A comprehensive study," *Mater. Today Proc.*, vol. 21, pp. 1559–1562, 2020.
- [3] R. Asthana, A. Kumar and N. Dahotre, *Materials processing and manufacturing*. Elsevier, 2005.
- [4] N. Zimmermann and P. H. Wang, "A review of failure modes and fracture analysis of aircraft composite materials," *Eng. Fail. Anal.*, vol. 115, p. 104692, 2020.
- [5] K. Chawla, *Composite Materials*, 3rd ed. Birmingham: Springer, 2012.
- [6] M. Kutz, *Handbook of materials selection*. Hoboken: John Wiley & Sons INC., 2002.
- [7] Ansys Granta, "Granta EduPack". Cambridge, UK, 2020.
- [8] Fibre Glast Developments Corp. (2020). About Reinforcements [Online]. Available: [https://www.fibreglast.com/product/about-reinforcements/Learning\\_Center](https://www.fibreglast.com/product/about-reinforcements/Learning_Center) [Accessed 12 August 2020].
- [9] N. Karthi, K. Kumaresan, S. Sathish, S. Gokulkumar, L. Prabhu and N. Vigneshkumar, "An overview: Natural fiber reinforced hybrid composites,

- chemical treatments and application areas”, *Mater. Today Proc.*, vol. 27, pp. 2828–2834, 2020.
- [10] A. C. Cadore-Rodrigues, L. F. Guilardi, V. F. Wandscher, G. K. R. Pereira, L. F. Valandro and M. P. Rippe, “Surface treatments of a glass-fiber reinforced composite: Effect on the adhesion to a composite resin”, *J. Prosthodont. Res.*, vol. 64, no. 3, pp. 301–306, 2020.
- [11] S. P. Sharma and S. C. Lakkad, “Comparative study of the effect of fiber surface treatments on the flexural and interlaminar shear strength of carbon fiber-reinforced composites”, *Mater. Today Commun.*, vol. 24, p. 101016, 2020.
- [12] A. Raju and M. Shanmugaraja, “Recent researches in fiber reinforced composite materials: A review,” *Mater. Today Proc.*, 2020.
- [13] S. Sharma, P. Sudhakara, S. K. Misra and J. Singh, “A comprehensive review of current developments on the waste-reinforced polymer-matrix composites for automotive, sports goods and construction applications: Materials, processes and properties”, *Mater. Today Proc.*, 2020.
- [14] U. V Saindane, S. Soni and J. V Menghani, “Recent research status on synthesis and characterization of natural fibers reinforced polymer composites and modern friction materials – An overview”, *Mater. Today Proc.*, vol. 26, pp. 1616–1620, 2020.
- [15] E. Flores, A. Sáenz, R. Narro and A. Castañeda, “Compuestos poliméricos y sus aplicaciones - Polymeric compounds and their applications”, *CienciAcierta*, vol. 59, no. 59, pp. 1–13, 2019.
- [16] M. Ashby and D. Jones, *Engineering Materials 2*, 2nd ed. Butterworth-Heinemann, 1998.
- [17] G. R. Chavhan and L. N. Wankhade, “Improvement of the mechanical properties of hybrid composites prepared by fibers, fiber-metals, and nano-filler particles – A review”, *Mater. Today Proc.*, vol. 27, pp. 72–82, 2020.
- [18] M. Ashby, H. Shercliff, and D. Cebon, *Materials: engineering, science, processing and design*, 1st edit. Elsevier, 2007.
- [19] M. K. Egbo, “A fundamental review on composite materials and some of their applications in biomedical engineering”. *J. King Saud Univ. - Eng. Sci.*, 2020.

- [20] D. K. Rajak, D. D. Pagar, R. Kumar and C. I. Pruncu, "Recent progress of reinforcement materials: a comprehensive overview of composite materials", *J. Mater. Res. Technol.*, vol. 8, no. 6, pp. 6354–6374, 2019.
- [21] T. Biswal, S. K. BadJena and D. Pradhan, "Synthesis of polymer composite materials and their biomedical applications", *Mater. Today Proc.*, 2020.
- [22] H. Wu et al., "Recent developments in polymers/polymer nanocomposites for additive manufacturing", *Prog. Mater. Sci.*, vol. 111, p. 100638, 2020.
- [23] X. Wang, M. Jiang, Z. Zhou, J. Gou and D. Hui, "3D printing of polymer matrix composites: A review and prospective", *Compos. Part B Eng.*, vol. 110, pp. 442–458, 2017.
- [24] B. Castanie, C. Bouvet and M. Ginot, "Review of composite sandwich structure in aeronautic applications", *Compos. Part C Open Access*, vol. 1, p. 100004, 2020.
- [25] M. Natali, J. M. Kenny and L. Torre, "Science and technology of polymeric ablative materials for thermal protection systems and propulsion devices : A review," *Prog. Mater. Sci.*, vol. 84, pp. 192–275, 2016.
- [26] B. Singh, R. Kumar and J. Singh Chohan, "Polymer matrix composites in 3D printing: A state of art review", *Mater. Today Proc.*, 2020.
- [27] A. D. Valino, J. R. C. Dizon, A. H. Espera, Q. Chen, J. Messman and R. C. Advincula, "Advances in 3D printing of thermoplastic polymer composites and nanocomposites", *Prog. Polym. Sci.*, vol. 98, p. 101162, 2019.

## Capítulo 3.

# **MATERIALES COMPUESTOS ABLATIVOS Y SISTEMAS DE PROTECCIÓN TÉRMICA**

---

### **Rafael Andrés Robayo-Salazar, Ph. D.**

Doctor en Ingeniería. Investigador del Programa de Ingeniería Mecánica (Pimec) - Grupo de Investigación en Estudios Aeroespaciales (GIEA). Escuela Militar de Aviación (Emavi) - Fuerza Aérea Colombiana.  
*Correo-e:* rafael.robayo@emavi.edu.co

### **Julián Portocarrero Hermann**

Ingeniero Mecánico. Docente Programa de Ingeniería Mecánica (Pimec) - Grupo de Investigación en Estudios Aeroespaciales (GIEA). Escuela Militar de Aviación (Emavi) - Fuerza Aérea Colombiana.  
*Correo-e:* julian.portocarrero@emavi.edu.co

#### ***Palabras clave:***

materiales compuestos, compuestos ablativos,  
propiedades térmicas, sistemas de protección térmica.

### 3.1 INTRODUCCIÓN

Los materiales ablativos se reconocen como materiales fungibles (de sacrificio), cuyas propiedades permiten catalogarlos como sistemas de protección térmica (TPS, *thermal protection systems*) en elementos recuperables que en servicio son expuestos a elevadas temperaturas ( $\geq 1500$  °C) [1]. Las funciones de un material ablativo se resumen en el hecho de ser refractario, aislante térmico, resistente al desgaste, autoconsumible y resistente en cuanto a los esfuerzos térmicos [2] compuesto de dos zonas de matriz polimérica (termófixas y elastoplásticas. Los campos de aplicación más relevantes para los TPS son las industrias automovilística, aeronáutica y aeroespacial. En relación con esta última, se destacan aplicaciones como la protección de naves espaciales y satélites durante el vuelo hipersónico a través de la atmósfera planetaria y la fabricación de elementos de propulsión como las toberas de motor, entre otras [3]. Generalmente, los TPS se reconocen por su elevado costo y difícil adquisición, en gran parte debido a los materiales ablativos comúnmente utilizados y la tecnología involucrada en sus procesos de fabricación, lo cual es considerado como una de las principales limitantes para el desarrollo de estas industrias a nivel regional.

Dentro de los materiales actualmente utilizados para la fabricación de TPS se destacan los materiales compuestos ablativos de matriz polimérica (PACM, *polymer ablative composite materials*), en gran parte debido a su versatilidad y posibilidad de reducir el peso ( $\approx 90$  %) de los componentes sin sacrificar las propiedades ablativas de interés [4]. De hecho, en comparación con los materiales ablativos no-poliméricos, tales como los metales de alto punto de fusión (tungsteno, renio y molibdeno), compuestos cerámicos refractarios (carburos de silicio [SiC], circonio [ZrC], boro [B<sub>4</sub>C] o hafnio [HfC]) y polímeros inorgánicos (geopolímeros), los PACM tienen algunas ventajas intrínsecas, como su densidad ajustable (relativamente baja), bajo costo, menor conductividad térmica, elevada resistencia a la corrosión, mayor resistencia al choque térmico y la posibilidad de descomponerse térmicamente en productos volátiles de bajo peso molecular, entre otras [5], [6]

Para el sector aeroespacial y aeronáutico colombiano es una necesidad fabricar TPS con materiales de fácil adquisición y disponibilidad local, que

le permitan su desarrollo con poca dependencia tecnológica externa. Este capítulo describe inicialmente el comportamiento térmico de los materiales en general. A continuación se abordan los sistemas de protección térmica, tipos y clasificación de los materiales ablativos. Posteriormente se describen las principales técnicas de ensayo para su caracterización y la aplicación de este tipo de materiales, especialmente en el campo aeroespacial. Finalmente, los antecedentes en el desarrollo, caracterización y aplicación de este tipo de materiales en el ámbito nacional también se incluyen, destacándose los avances y desarrollos obtenidos en la Escuela Militar de Aviación (Emavi) – Fuerza Aérea Colombiana.

### 3.2 COMPORTAMIENTO TÉRMICO DE LOS MATERIALES

Las propiedades térmicas de los materiales desempeñan un papel de gran importancia en muchas tecnologías. Desde los materiales refractarios que se utilizan en la producción de metales, hasta los recubrimientos para barreras térmicas (TBC, *thermal barrier coatings*) o TPS. En general, el calor afecta las propiedades físicas y mecánicas de los materiales. En primera instancia, el desempeño de un material, que en servicio debe ser sometido a elevadas temperaturas, depende directamente de su punto de fusión o, en su defecto, de su límite de degradación térmica. Estas propiedades, entre otras, terminan limitando la *temperatura máxima de servicio* ( $T_{\max}$ ) de los materiales. Para el caso del punto de fusión, esta es considerada una propiedad intensiva que depende de la naturaleza y tipo de material.

En efecto, la Figura 40 muestra las diferencias en el punto de fusión que presentan distintos tipos de materiales cerámicos, metales y polímeros. En general, los cerámicos presentan mayores puntos de fusión que los polímeros y que la mayoría de los metales. Sin embargo, es el tungsteno el elemento con el punto de fusión más alto, alcanzando valores de hasta 3 414 °C; propiedad que hace que el tungsteno sea el material por excelencia utilizado en muchas aplicaciones de alta temperatura, como, por ejemplo, los filamentos de las bombillas. Un material como el carbón no se funde a la presión ambiental, sino que se sublima a unos 3 726 °C y solo existe una fase líquida por encima de presiones de 10 MPa y se estima en 4 030 °C-4 430 °C. Así mismo, compuestos refractarios avanzados,

como el carburo de tantalio hafnio ( $Ta_4HfC_3$ ), presentan un punto de fusión muy alto de 3 942 °C. En general, materiales con temperaturas de fusión por encima de los 1 800 °C son considerados refractarios, por ejemplo: platino, tungsteno, tantalio, algunos carburos y nitruros, etc. En el caso de los materiales poliméricos, la mayoría presentan bajos puntos de fusión, entre los 150 °C-200 °C. Sin embargo, su temperatura de degradación térmica se ubica por debajo de su punto de fusión (50 °C-150 °C en polímeros amorfos) [7].

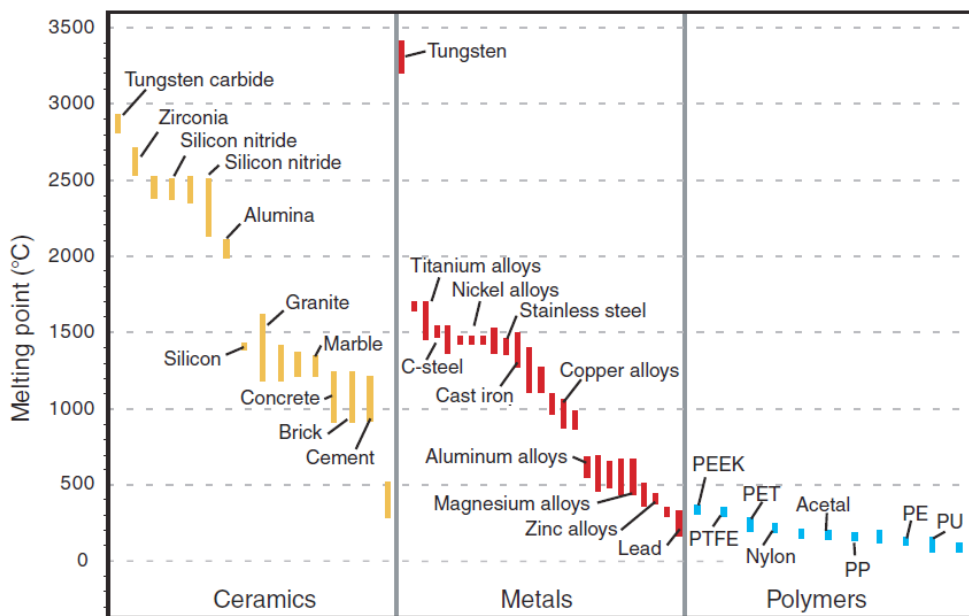


Figura 40. Puntos de fusión (°C) de diferentes metales, cerámicos y polímeros.

Fuente: [7].

Las propiedades de un material pueden cambiar en función de su temperatura. En muchos casos encontramos que las propiedades mecánicas y físicas de un material dependen de la temperatura a la cual funciona o, inclusive, a la cual será sometido durante su procesamiento. Por estas razones es necesario conocer los límites de temperatura que pueden alcanzar los materiales sin ocasionar la pérdida irreversible de sus propiedades (mecánicas,



físicas o químicas). La Figura 41 muestra la  $T_{max}$  de los materiales con relación a su resistencia a temperatura ambiente. Es posible analizar como los materiales poliméricos y algunos metales de bajo punto de fusión, tales como las aleaciones de zinc, magnesio y aluminio, ofrecen resistencias útiles a temperatura ambiente, pero por encima de los 300 °C dejan de ser útiles; inclusive, pocos polímeros pueden ser utilizados a temperaturas de servicio por encima de los 135 °C. Así mismo, aleaciones de titanio y los aceros de baja aleación tienen resistencias útiles hasta los 600 °C, y por encima de esta temperatura se ubican los aceros inoxidables de alta aleación y aleaciones especiales a base de níquel, hierro y cobalto. Las temperaturas más altas requieren de metales refractarios como el tungsteno, o cerámicas técnicas, como el carburo de silicio (SiC) o alúmina ( $Al_2O_3$ ) [7].

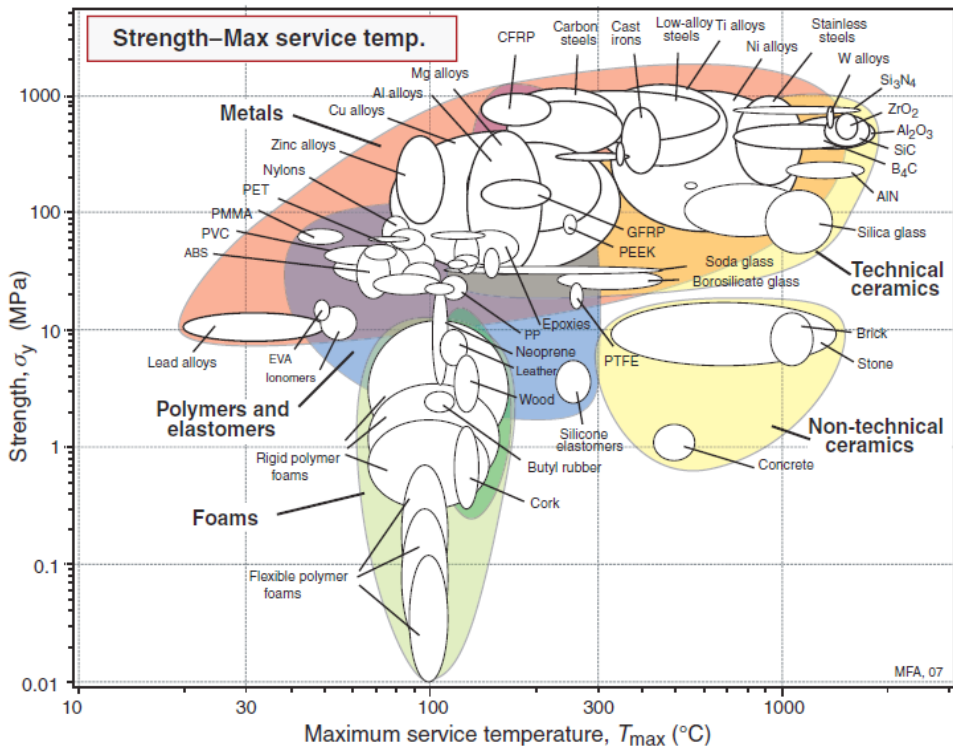


Figura 41. Relación entre la resistencia ( $\sigma_y$ ) (MPa) y la temperatura máxima de servicio ( $T_{max}$ ) (°C) de los materiales. Fuente: [7].

Una adecuada comprensión de las propiedades térmicas de los materiales es de utilidad para la comprensión y análisis del desempeño en servicio de aplicaciones como los TBC, TPS o materiales ablativos. En efecto, muchas aplicaciones requieren de materiales que minimicen la transferencia de calor. En este sentido, recobran importancia propiedades como la conductividad térmica. En aplicaciones como los TBC, TPS o materiales ablativos, lo que se desea es minimizar la transferencia de calor a través del material. También la expansión térmica, pues en muchas condiciones de servicio, esta expansión puede conducir al desarrollo de esfuerzos que lleven a la falla del material [8].

La conductividad térmica depende tanto de los fonones, como de los electrones que transfieren el calor por los materiales, la estructura atómica y la temperatura. En los materiales metálicos, los electrones transfieren el calor, mientras que en los materiales cerámicos, semiconductores y polímeros, la conducción del calor comprende a los fonones y a la vibración de la red cristalina. En este sentido, materiales con estructuras estrechamente empaquetadas producen fonones de alta energía, que generan conductividades térmicas elevadas (AlN, SiC, BeO, BP, GaN, Si, AlP). Las estructuras desorganizadas, como la de los vidrios cerámicos o los polímeros amorfos, dispersan los fonones y causan baja conductividad. En los polímeros, la conductividad térmica está influenciada por la vibración y el movimiento de las cadenas, dependiendo así del grado de polimerización y cristalinidad. En efecto, los polímeros cristalinos y cerámicos cristalinos tienen conductividades más elevadas que los vítreos o amorfos de su misma naturaleza [8].

La velocidad con la cual se transfiere el calor a través de cualquier material es conocida como *conductividad térmica* ( $\lambda$ ). Por su parte, la *expansión térmica* ( $\alpha$ ) se conoce como el cambio dimensional del material, producto del aumento de la energía térmica y la mayor vibración atómica al interior de su estructura. A través de la Figura 42 es posible analizar la relación que existe entre las propiedades de  $\alpha$  y la  $\lambda$  de los materiales. Los contornos de la Figura 42 permiten identificar que los metales y cerámicas técnicas tienen altas conductividades térmicas y moderados coeficientes de expansión

(esquina inferior derecha). Por su parte, los polímeros y elastómeros se encuentran en la esquina superior izquierda, presentando valores de conductividad 100 veces menores y coeficientes de expansión 10 veces mayores que el de los metales [7].

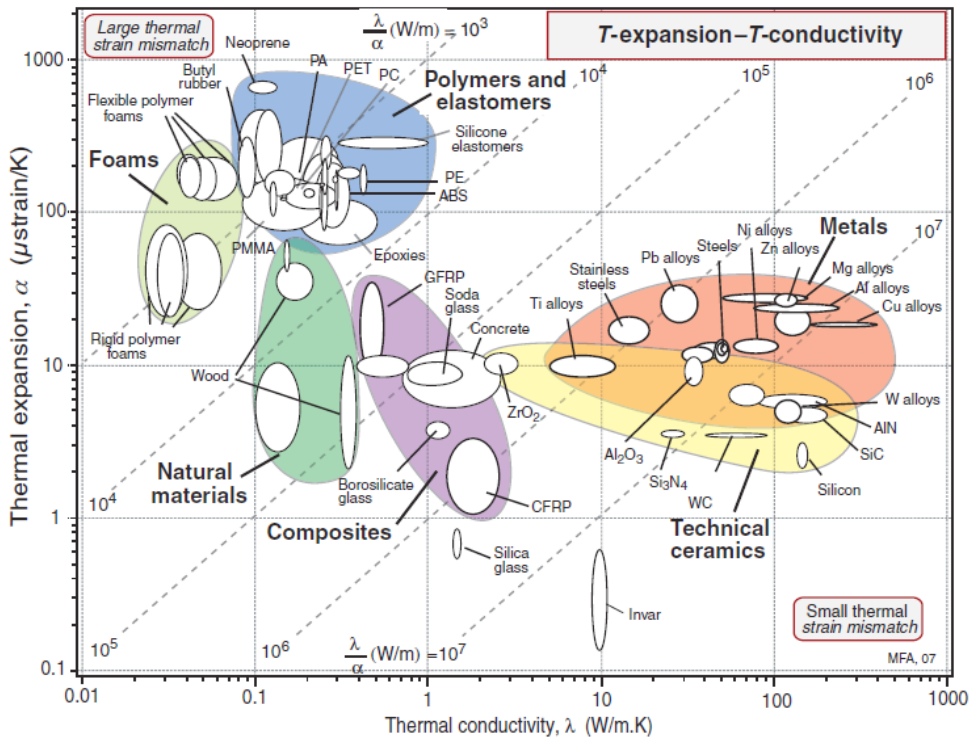


Figura 42. Relación entre la expansión térmica ( $\alpha$ ) (micro ( $\mu$ )-deformación/K) y conductividad térmica ( $\lambda$ ) (W/m.K) de los materiales. Fuente: [7].

La expansión térmica de un material está relacionada con la resistencia de los enlaces atómicos. En general, los materiales con alto punto de fusión, debido a fuertes atracciones atómicas, tienen bajos valores de  $\alpha$ . La mayoría de los materiales cerámicos, que tienen fuertes enlaces iónicos y covalentes, poseen  $\alpha$  menores en comparación a los metales. Aunque los enlaces dentro de las cadenas de los polímeros son covalentes, los enlaces secundarios que unen las cadenas entre sí son débiles, lo que conduce a  $\alpha$  altos. Cabe

destacar que los polímeros que tienen entrelazamientos cruzados fuertes, comúnmente tienen valores de  $\alpha$  más bajos que los polímeros lineales [8]; esto es importante a la hora de utilizar materiales ablativos de matriz polimérica.

Cuando se unen materiales distintos, por ejemplo, los materiales compuestos o revestimientos, los cambios de temperatura causan cantidades diferentes de contracción o de expansión térmica en los componentes. Estas diferencias conllevan la aparición de esfuerzos térmicos, los cuales, además de depender de  $\alpha$ , están relacionados con el módulo de elasticidad de los materiales y los gradientes de temperatura. Los esfuerzos térmicos pueden generar el agrietamiento, desprendimiento o separación de los materiales que componen la aplicación, afectando su desempeño térmico. El desprendimiento de las fases también podría presentarse en algunos materiales compuestos particulados. Este fenómeno también afecta a los materiales compuestos fibroreforzados. En efecto, al incrementarse la temperatura del material compuesto, las fibras frágiles con un  $\alpha$  menor que el de la matriz pueden ser sometidas a esfuerzos de tensión que podrían superar su límite de ruptura [8].

Con relación a lo anteriormente mencionado, el diseño y/o selección de los materiales adecuados para aplicaciones de alta temperatura parte de la comprensión y modificación de sus propiedades térmicas. Por tanto, algunos materiales de ingeniería son diseñados de tal forma que estén compuestos de dos fases (multifases), de modo que, al calentarse, una fase pueda mostrar expansión térmica, en tanto que la otra pueda mostrar una contracción térmica. Entonces, el material compuesto puede mostrar una  $\alpha$  cercana a cero. La cerámica vítrea Zerodur<sup>TM</sup> y el material cerámico NZP son ejemplos de este tipo de materiales. Así mismo, el control de las porosidades del material permite controlar la conductividad y expansión térmica. Un ejemplo de ello son los materiales espumados y algunos cerámicos refractarios [8].

En conclusión, se requiere de cuidado en el diseño, el procesamiento o la selección de los materiales, para evitar la falla de alguna aplicación a causa de la degradación térmica o la aparición de esfuerzos térmicos por encima de su resistencia. La Figura 43 relaciona materiales comúnmente utilizados en algunas aplicaciones con el rango de temperaturas bajo

condiciones reales de servicio. En primera instancia existe un régimen a temperatura ambiente (20 °C-150 °C), asociado con la ingeniería mecánica y civil convencional. Algunos ejemplos son electrodomésticos, artículos deportivos, estructuras de automóviles y aeronaves y viviendas. En este rango de temperaturas sobresalen la mayoría de los polímeros ( $T_{\max}$  entre 60 °C-150 °C), así como aleaciones de magnesio ( $T_{\max} \leq 150$  °C), aluminio ( $T_{\max} \leq 150$  °C) y níquel, y aceros. Por encima de este rango se sitúan aplicaciones asociadas con motores de automóviles y algunos procesos industriales, como el procesamiento de alimentos con temperaturas de entre 150 °C-400 °C. En este rango se destacan los polímeros resistentes al calor, como el PEEK (polieteretercetona), PI (poliimida), PPD (p-fenilendiamina), PTFE (teflón) y PES (poliétersulfonas) ( $T_{\max} \leq 250$  °C), el níquel y las aleaciones de níquel-plata, las aleaciones de cobre ( $T_{\max} \leq 400$  °C) y los compuestos poliméricos que compiten con aleaciones de magnesio, aluminio y aceros mucho más pesados, tradicionalmente utilizados en estos rangos de temperatura. A regímenes de temperatura más altos sobresalen aplicaciones como las turbinas de vapor y sobrecalentadores (típicamente 400 °C-650 °C), las cuales requieren aleaciones especiales resistentes a la fluencia (creep), destacándose los aceros ferríticos, aleaciones de titanio y ciertos aceros inoxidables. Las turbinas de gas y reactores químicos (650 °C-1 000 °C) requieren, en general, superaleaciones a base de níquel o cobalto. Por encima de los 1 000 °C los metales (aleaciones de Nb, Mo, W, Ta) y cerámicos (SiC, Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, MgO) refractarios se convierten en los únicos candidatos. Las aplicaciones especiales (filamentos de lámparas, hornos, turbinas o toberas de cohetes) requieren materiales que resistan temperaturas aún más altas, que se extienden hasta los 2 800 °C [7].

T °C	Materials	Applications	T K
1200	Refractory metals: Mo, W, Ta Alloys of Nb, Mo, W, Ta Ceramics: Oxides Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , MgO, etc. Nitrides, Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub> , Carbides, SiC	Rocket nozzles Special furnaces Experimental turbines	1400
1000	Austenitic stainless steels Nichromes, nimonics Nickel based super-alloys Cobalt based super-alloys Iron based super-alloys	Gas turbines Chemical engineering Petrochemical reactors Furnace components Nuclear construction	1200
800	Iron-based super-alloys Ferritic stainless steels Austenitic stainless steels Inconels and nimonics	Steam turbines Superheaters Heat exchangers	1000
600	Low-alloy steels Titanium alloys (up to 450°C) Inconels and nimonics	Heat exchangers Steam turbines Gas turbine compressors	800
400	Fiber-reinforced polymers Copper alloys (up to 400°C) Nickel, monels and nickel-silvers PEEK, PEK, PI, PPD, PTFE and PES (up to 250°C)	Food processing Automotive (engine)	600
200	Most polymers (max temp: 60 to 150°C) Magnesium alloys (up to 150°C) Aluminum alloys (up to 150°C) Monels and steels	Civil construction Household appliances Automotive Aerospace	400
0			

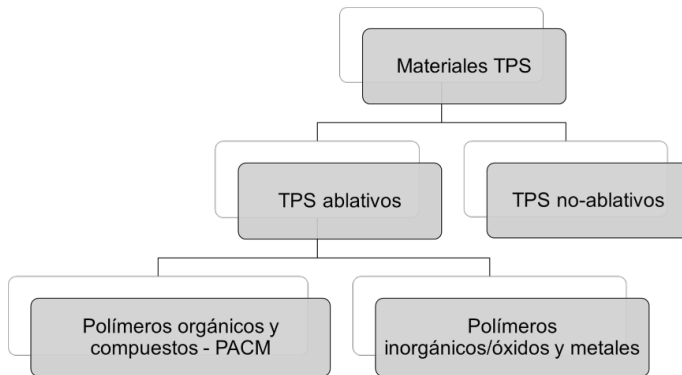
Figura 43. Materiales utilizados en función de la aplicación y temperatura de servicio.

Fuente: [7].

### 3.3 SISTEMAS DE PROTECCIÓN TÉRMICA Y MATERIALES COMPUESTOS ABLATIVOS

#### 3.3.1 Definición y clasificación de los sistemas de protección térmica (TPS)

Los materiales ablativos se reconocen como materiales fungibles (de sacrificio), cuyas propiedades permiten catalogarlos como TPS en elementos recuperables, que en servicio son expuestos a elevadas temperaturas ( $\geq 1500^{\circ}\text{C}$ ) [1]. Las funciones de un material ablativo se resumen en el hecho de ser refractario, aislante térmico, autoconsumible y resistente al desgaste y en cuanto a los esfuerzos térmicos [2] compuesto de dos zonas de matriz polimérica (termofijas y elastoplásticas. Como se ha mencionado anteriormente, los TPS juegan un papel fundamental para toda la industria aeroespacial. Dependiendo del entorno hipertérmico en el que deben trabajar estos materiales, se han desarrollado muchos tipos de formulaciones. Así, la Figura 44 resume las diferentes clases de materiales TPS basados en estos dos principios: materiales TPS no-ablativos y TPS ablativos, respectivamente.



**Figura 44. Clasificación de los sistemas de protección térmica (TPS).**

**Fuente:** adaptada de [5].

Cuando se utilizan TPS no-ablativos para fabricar escudos térmicos, la re-radiación es el fenómeno principal en el que se basa el aislamiento del sustrato (Figura 45a). En este caso, los TPS no-ablativos se producen utilizando cerámicos refractarios o metales de alto punto de fusión (como el tungsteno, renio o molibdeno). La ablación es el segundo fenómeno relacionado con

la subdivisión de los materiales TPS (Figura 45b). A pesar de que algunos materiales no-poliméricos (como polímeros inorgánicos/cerámicas o metales) se han utilizado con éxito como TPS, los ablativos basados en matrices poliméricas (PACM) representan la clase más amplia y versátil de este tipo de materiales.

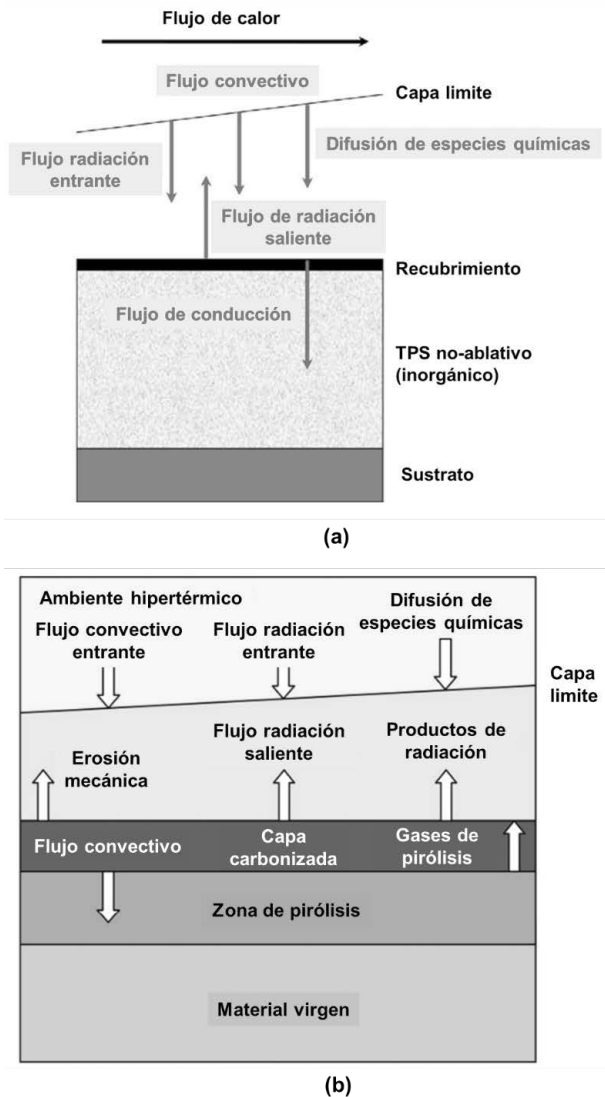


Figura 45. Mecanismos de protección de los materiales TPS no-ablativos (a) y ablativos (b). Fuente: adaptada de [5].



Los PACM poseen la capacidad de ajustarse a una amplia variedad de entornos hipotérmicos diferentes. En efecto, los ablativos a base de polímeros representan la clase más grande y versátil de materiales TPS. La Figura 46 representa una clasificación más detallada de los materiales poliméricos ablativos. Las características y mecanismos de ablación de este tipo de materiales se abordan en el siguiente subcapítulo.



Figura 46. Clasificación de los materiales poliméricos ablativos. Fuente: adaptada de [5].

### 3.3.2 Compuestos ablativos de matriz polimérica (PACM)

Dentro de los materiales actualmente utilizados para la fabricación de TPS se destacan los PACM, en gran parte debido a su versatilidad y posibilidad de reducir el peso ( $\approx 90\%$ ) de los componentes sin sacrificar las propiedades ablativas de interés [4]. De hecho, en comparación con los materiales ablativos no-poliméricos, tales como los metales de alto punto de fusión (tungsteno, renio y molibdeno), compuestos cerámicos refractarios (carburos de silicio [SiC], circonio [ZrC], boro [B<sub>4</sub>C] o hafnio [HfC]) y polímeros inorgánicos, los PACM tienen algunas ventajas intrínsecas, como su densidad ajustable, bajo costo, menor conductividad térmica, elevada resistencia a la corrosión, mayor resistencia al choque térmico y la posibilidad de descomponerse térmicamente en productos volátiles de bajo peso molecular, entre otras [5], [6].

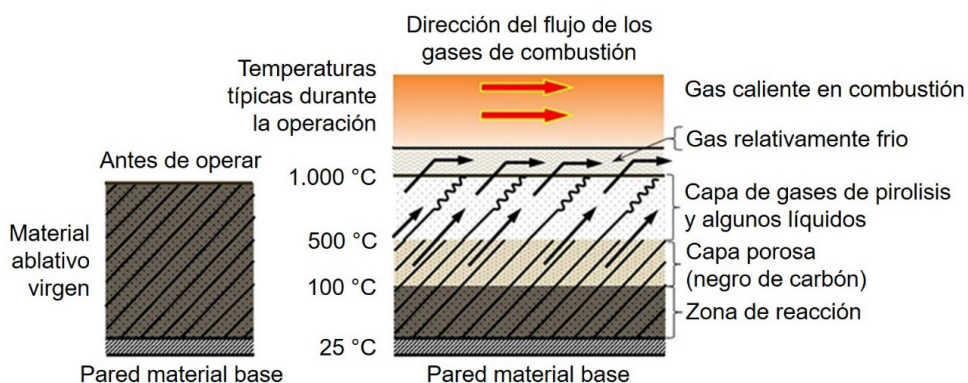
Por lo general, las resinas poliméricas (fenólicas, epoxi, poliéster y viniléster), utilizadas como aglomerante en los PACM, son termoestables y su

desempeño a elevadas temperaturas es limitado [9]; por tal razón, son modificadas con la incorporación de refuerzos particulados (reellenos) de tipo cerámico u óxidos refractarios (hafnio [ $\text{HfO}_2$ ], circonio [ $\text{ZrO}_2$ ], tántalo [ $\text{Ta}_2\text{O}_5$ ], itrio [ $\text{Y}_2\text{O}_3$ ] o alúmina [ $\text{Al}_2\text{O}_3$ ]), y al mismo tiempo reforzadas con fibras cortas de tipo carbono, asbestos o vidrio [10], [13]. Al respecto, estas resinas han demostrado una adecuada adhesión con un amplio rango de materiales, tales como vidrio, cerámicos, metales y plásticos (excepto polietileno [PE] y polipropileno [PP]). En consecuencia, la incorporación de fillers tipo perlita expandida o vermiculita (8 %-32 % en volumen) [10] (3 %-10 % en peso) [13], mesoporous silica particles (5 %-20 % en peso) [11], óxido de circonio (2 %-5 % en peso) [14] y carbon black (5 %-20 % en peso) [15], entre otras, han demostrado un efecto positivo sobre el desempeño ablativo de los PACM.

En resumen, cuando los PACM son expuestos a temperaturas por encima del límite de degradación térmica de la matriz (resina), su estructura experimenta descomposición (pirólisis) (Figura 47) y se produce una capa carbonizada o un residuo debido al carbono presente en la estructura orgánica de la resina; al respecto, el carbono es considerado un material ablativo de alto rendimiento. Esta capa carbonizada promueve la retención parcial (aglomeración) de los reellenos incorporados y el proceso de ablación se puede llevar a cabo de manera efectiva, ya que el material puede continuar absorbiendo calor endotérmicamente [14]. Aun considerando las propiedades ablativas de esta capa, el residuo carbonizado y los reellenos pueden erosionarse mecánicamente (delaminación) o eliminarse por fricción, afectando el desempeño y rendimiento del TPS. Para este propósito las fibras cortas de carbono, vidrio y/o asbesto se han incorporado con éxito, logrando mantener la integridad del compuesto ablativo, aumentando su resistencia a la erosión y a los esfuerzos térmicos [5], [16].

Cuando los PACM son expuestos a llama directa o gases de propulsión, el calor se transfiere al material ablativo por fenómenos de conducción, convección y radiación. Al principio, la temperatura del material aumenta a una velocidad que depende del flujo de calor impuesto y de la energía absorbida por el material. En la superficie la temperatura aumenta y cuando el PACM alcanza una temperatura suficientemente alta (generalmente por encima de

los 200 °C), se producen reacciones químicas inducidas térmicamente y la matriz orgánica (resina) sufre el proceso de “pirólisis intensiva”, generando productos volátiles y la capa carbonizada [13]. Como resultado de estas reacciones de degradación, una cantidad sustancial de energía es absorbida por los PACM.



**Figura 47. Representación gráfica de las zonas formadas durante la exposición a altas temperaturas de un material ablATIVO. Fuente: adaptada de [17].**

Como se muestra en la Figura 47, los gases producidos durante la pirólisis de la matriz polimérica quedan atrapados en el material, debido a la baja porosidad y la permeabilidad del medio, por lo tanto, la presión interna puede llegar a ser muy alta, lo que lleva a una gran expansión termomecánica de la matriz sólida. Cuando la presión llega a ser suficientemente alta, los gases se difunden a través de la capa carbonizada; en virtud de su presión, los productos de pirólisis forman una capa protectora, que actúa como una barrera contra el flujo de calor que impacta directamente al PACM. Esta película de gas también funciona como una barrera de difusión y controla la velocidad de reacción química entre las especies de combustión y la matriz polimérica. Adicionalmente, a medida que la fase gaseosa se filtra a través de la capa porosa del residuo carbonizado, esta absorbe una gran cantidad de calor. Una vez que la región carbonizada transfiere calor a la resina virgen, avanza la pirólisis y la porosidad y permeabilidad de la capa carbonizada aumentan. Estos fenómenos producen una expansión dimensional en los

PACM, seguido de una fuerte contracción debido al escape de los gases y la reducción gradual de la presión interna, lo cual puede generar fenómenos de erosión o delaminación [5].

### **3.4 TÉCNICAS DE ENSAYO PARA LA CARACTERIZACIÓN DE COMPUESTOS ABLATIVOS**

En cuanto a la caracterización y evaluación del comportamiento ablativo de los materiales TPS, Natali et al. [5] recopila las principales técnicas de ensayo aplicadas y sus fundamentos experimentales. Se destacan, entre todos los ensayos, el uso de llama directa (antorchas de gas) y plasma de arco, como instrumentos experimentales de simulación de entornos hipotérmicos. Al respecto, la selección de las técnicas de ensayo depende de la identificación del entorno hipotérmico simulado que más se aproxime a las condiciones reales de servicio a las cuales se someterán los elementos y/o aplicaciones. Lo anteriormente mencionado es importante, debido a que el comportamiento ablativo de un material está influenciado por las variables de ensayo previamente fijadas. En cualquier caso, las propiedades térmicas deben ser correlacionadas con las propiedades fisicoquímicas y mecánicas.

Técnicas avanzadas de caracterización de materiales, como la termogravimetría (TGA), que corresponde a un ensayo de análisis térmico por medio del cual la masa de un material se mide a medida que cambia la temperatura, han sido utilizadas con éxito como un complemento de análisis desde el punto de vista microestructural. No obstante, en un ensayo de TGA avanzado tan solo se pueden alcanzar temperaturas por debajo de los 1 800 °C, un valor inferior a la temperatura real de funcionamiento de componentes de propulsión, como la cámara de combustión y la tobera de un motor cohete, que pueden alcanzar valores superiores a los 3 000 °C. Así mismo, las velocidades de calentamiento (°C/min) entre el ensayo de TGA y las condiciones reales de servicio no son comparables, dado que durante el ensayo se logran velocidades de hasta 500 °C, mientras que bajo condiciones de trabajo de un motor cohete estas razones de cambio de temperatura pueden alcanzar los  $\approx 100\,000$  °C/min [5]. Esta condición es más crítica para la boquilla del motor cohete en comparación a la cámara de combustión o revestimiento colocado

entre el grano propelente y el fuselaje del cohete. Así mismo, un ensayo de TGA no puede reproducir un esfuerzo cortante causado por los gases de combustión o por el vuelo de reingreso a la atmósfera terrestre, y, por lo tanto, no se puede evaluar la erosión mecánica del TPS.

Es por esta razón que la forma más común, económica y confiable de realizar una prueba que simule parcialmente el ambiente hipertérmico severo de un motor cohete, se basa en el uso de una antorcha de gas (por ejemplo, oxiacetilénica o propano/propileno). Dado que este método de ensayo se asemeja más al entorno generado en los motores cohete, es más aplicable a los materiales sometidos a erosión termo-mecánica, como los utilizados en la manufactura de toberas y revestimientos para el control del calentamiento aerodinámico de superficies de vehículos espaciales y cargas útiles; sin embargo, esta prueba también se ha utilizado para evaluar ablativos destinados a TPS. El método se utiliza tanto para la selección y optimización de TPS ablativos, como para llevar a cabo procesos de control de calidad en la producción de materiales para TBC [5].

Respecto al ensayo de llama directa, es posible precisar que la antorcha de oxiacetileno generalmente puede producir una llama de temperaturas cercanas a los 3 000 °C y un flujo de calor de hasta  $\approx 900\text{W}/\text{cm}^2$ . La norma ASTM E285, *Standard test method for oxyacetylene ablation testing of thermal insulation materials*, [18] establece el procedimiento para llevar a cabo este ensayo. La Figura 48 representa un diseño típico de un banco de pruebas basado en antorcha de oxiacetileno (*oxi-acetylene torch* [OAT]), la cual consiste esencialmente en dos tanques o reservorios de acetileno y oxígeno, los medidores de presión, controladores de presión y flujo, y la antorcha (boquilla soplete), que compone la fuente de calor. Las variables de ensayo se fijan en función de las necesidades experimentales. Las muestras para probar pueden representar diferentes geometrías y dimensiones. Una serie de termopares integrados en la muestra a profundidades definidas desde la superficie, expuesta a la llama directa (cara caliente), integrados con un sistema de adquisición de datos en tiempo real, permiten registrar los perfiles de temperatura en función de la profundidad, de tal manera que se puede evaluar la capacidad de aislamiento del material probado.

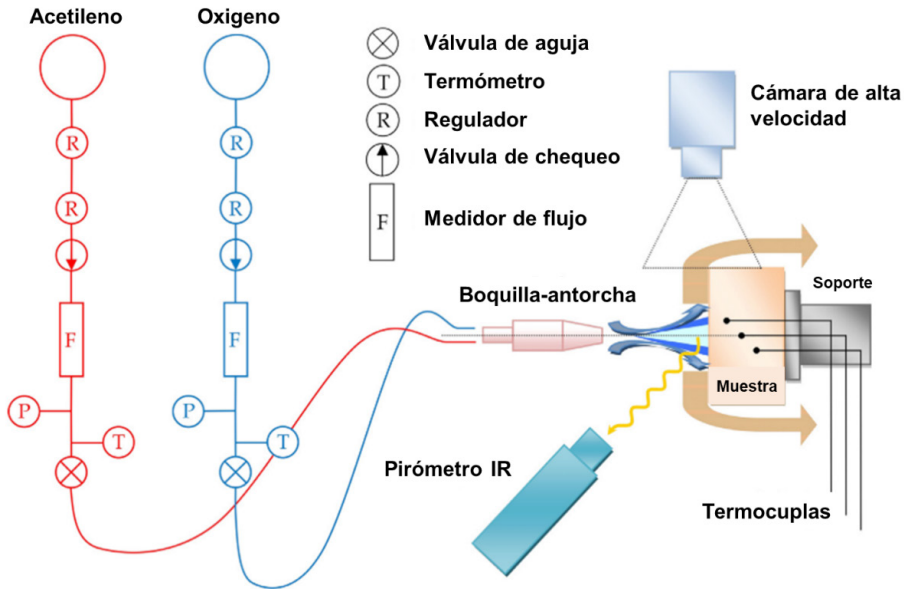


Figura 48. Montaje experimental típico para el ensayo de llama directa de oxiacetileno (ASTM E285). Fuente: adaptada de [5].

A partir del montaje estándar sugerido por la ASTM E285 [18] es posible realizar modificaciones en el laboratorio y/o adaptaciones con el fin de llevar a cabo una prueba de ablación, inclusive, utilizando otra fuente calórica, como por ejemplo gases de propano/propileno de menor capacidad hipertérmica. Complementario al ensayo de llama directa, también se puede evaluar la tasa de erosión, pérdida de masa y morfología posterior del material a la quema; así, los resultados obtenidos con este método también pueden ser utilizados para modelar los procesos de ablación de diferentes materiales y TPS.

### 3.5 APLICACIONES DE LOS COMPUESTOS ABLATIVOS

#### 3.5.1 Aplicación de los compuestos ablativos en el sector aeroespacial

Los campos de aplicación más relevantes para los TPS son las industrias automovilística, aeronáutica y aeroespacial; en relación con esta última, se destacan aplicaciones como la protección (escudos térmicos) de naves

espaciales, satélites, superficies aerodinámicas y cargas útiles, y la fabricación de elementos de propulsión, entre otras [3]. Según la NASA, los vehículos espaciales requieren del uso de TPS para protegerlos del calentamiento aerodinámico originado durante su reingreso a la atmósfera planetaria (y/o tierra), así como también para la manufactura y/o revestimiento de algunos componentes de propulsión, como las boquillas o toberas de los motores cohete [1]. Además, estos materiales ablativos garantizan el aislamiento térmico necesario para evitar la conducción de calor hacia el interior del vehículo espacial. Los TPS seleccionados para estas aplicaciones abarcan una variedad de materiales, la mayoría compuestos. Propiedades como el punto de fusión, estabilidad dimensional en ambientes de alta temperatura ( $\alpha$ ), resistencia a los choques térmicos, módulo de elasticidad, durabilidad y peso, entre otras, determinan el uso y su aplicación en el vehículo espacial. Al respecto, la optimización de estos materiales de tipo ablativo ha sido el tema de varias investigaciones alrededor del mundo, incluso en la NASA, concentrándose en materiales del grupo de las cerámicas de ultra alta temperatura (UHTC, *ultra high-temperature ceramics*) y los PACM.

El desarrollo de materiales para la fabricación de componentes de propulsión juega un papel importante en el desarrollo de la industria aeroespacial, especialmente en el campo de la cohetaría. La cámara de combustión del cohete, propulsores y/o boquillas deben diseñarse para soportar temperaturas de operación superiores a los 1 600 °C-2 000 °C en un ambiente ablativo severo [19]. Normalmente el motor-cohete es fabricado por mecanizado de aleaciones de acero, aluminio o titanio (zona estructural) y recubierto internamente con sistemas de protección térmica (zona ablativa) [16]. Generalmente los TPS ablativos, comúnmente utilizados, son de difícil adquisición y alto costo, lo que dificulta su aplicación en países como Colombia. Adicionalmente, la elevada densidad de estos materiales (sobre todo la zona estructural) no deja de ser una desventaja, siendo la búsqueda de materiales alternativos con mayor relación desempeño/densidad una de las prioridades para este sector.

Es por esta razón que, dentro de las alternativas, se destacan los materiales compuestos [4], específicamente los PACM, en gran parte debido a su

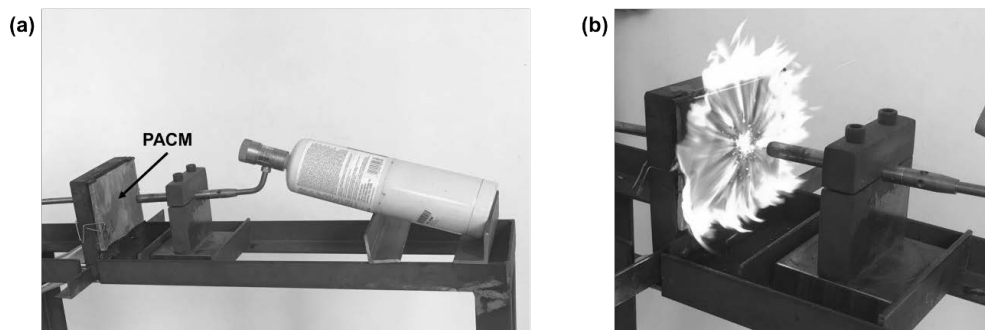
versatilidad y la posibilidad de reducir ( $\approx 90\%$ ) el peso de estos componentes [6], [14]. A continuación se presentarán algunos avances en el diseño, caracterización y aplicación de PACM en el ámbito nacional.

### 3.5.2 Experiencias en el ámbito nacional

De acuerdo con Cubides [20], en el contexto del sector aeroespacial colombiano surge la necesidad de fabricar componentes de propulsión con materiales de disponibilidad local, que permitan desarrollar el campo de la cohetería con poca dependencia tecnológica externa. En este sentido, el Grupo de Investigación en Estudios Aeroespaciales (GIEA) y el Programa de Ingeniería Mecánica (Pimec) de la Escuela Militar de Aviación (Emavi) – Fuerza Aérea Colombiana (FAC) han acumulado una experiencia importante relacionada con el desarrollo y aplicación de PACM. Estos desarrollos se enmarcan en la línea de investigación de *Sistemas de carga espacial* y surgen de la necesidad de producir componentes de propulsión con materiales de fácil adquisición, bajo peso y que, al mismo tiempo, sean resistentes a los entornos hipotérmicos generados durante el vuelo de cohetes experimentales, como los cohetes de sondeo.

Al respecto, la investigación en Emavi ha incluido la obtención y caracterización de PACM basados en matrices de resinas de tipo poliéster, epoxi y viniléster, altamente reforzadas con materiales particulados (*fillers*) y fibras cortas de vidrio discontinuas orientadas al azar; destacando que los *fillers* corresponden a residuos o subproductos industriales (residuos cerámicos, escorias de aluminio, fundición y siderúrgica, entre otros). Los PACM obtenidos han sido caracterizados físico-mecánicamente y sometidos a ensayos ablativos de llama directa (Figura 49a), mediante la adaptación del procedimiento descrito en la ASTM E285 [18]. En efecto, el rango de temperaturas de la llama incidente durante este ensayo simula la condición térmica de operación al interior del motor de propulsión de un cohete de sondeo. Sin embargo, el procedimiento llevado a cabo en Emavi se considera más severo, dado que la incidencia de la llama durante el ensayo ablativo es frontal o perpendicular a la placa (Figura 49b), a diferencia de la incidencia tangencial que ocurre durante la combustión de un motor cohete.

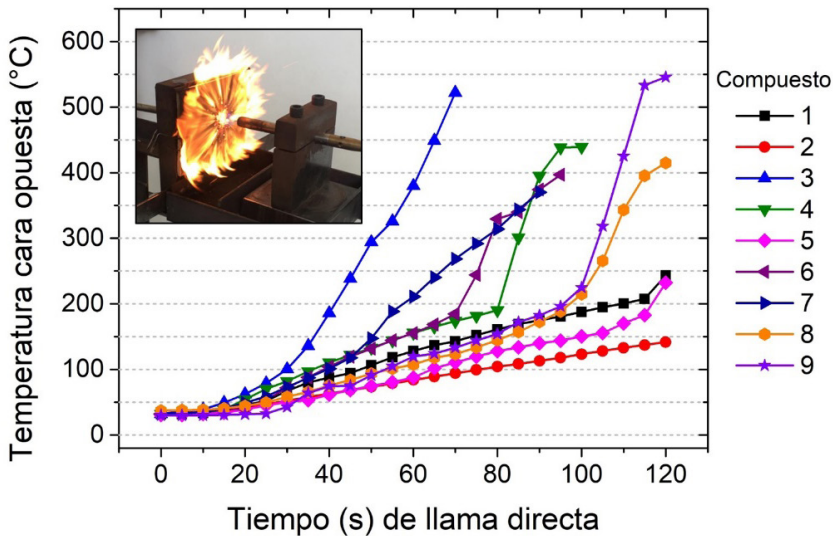




**Figura 49. Montaje experimental de la prueba de llama directa realizada en Emavi.**

**Fuente: los autores.**

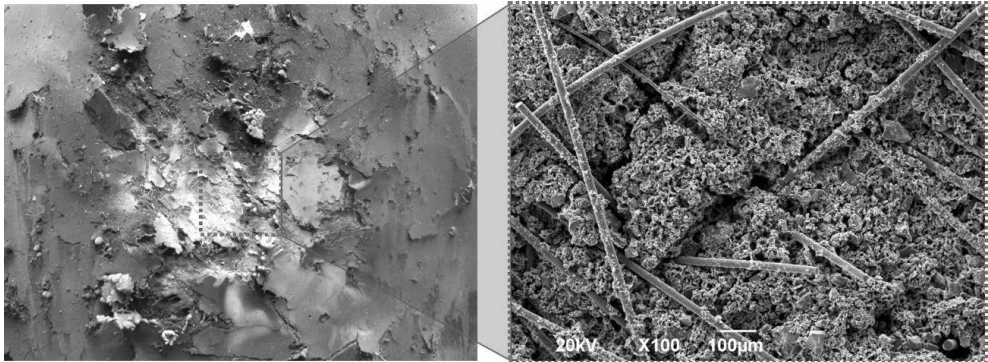
A partir de este tipo de ensayos experimentales se han logrado obtener resultados muy promisorios, los cuales, a su vez, han impulsado toda una línea de investigación en materiales compuestos ablativos y TPS en la Emavi. De acuerdo con lo anterior, la Figura 50 muestra la temperatura registrada en la cara opuesta a la incidencia de la llama durante el ensayo de ablación térmica de diferentes materiales compuestos ablativos. Al respecto, y teniendo en cuenta que la temperatura de la llama es de  $1\,600\text{ }^{\circ}\text{C}$ - $2\,000\text{ }^{\circ}\text{C}$ , los PACM presentaron un nivel de aislamiento térmico superior al 65 %. Entre estos se destaca que algunos compuestos han reportado temperaturas, en la cara opuesta, inferiores a los  $150\text{ }^{\circ}\text{C}$  durante los 120 segundos de ensayo, considerándose este como un comportamiento aislante óptimo. La diferencia entre cada uno de los PACM reportados en la Figura 50 es el tipo de residuo (residuo cerámico, escoria de aluminio, escoria de fundición y/o escoria siderúrgica) y su fracción (0 %-67 % en peso) dentro del compuesto. Una descripción más detallada de estos resultados, incluyendo la composición de los PACM caracterizados, puede ser consultada en el artículo de acceso abierto titulado *Polymeric ablative composite materials and their application in the manufacture of aerospace propulsion components*, [21] publicado recientemente por investigadores del GIEA.



**Figura 50.** Comparación del comportamiento ablativo de diferentes PACM producidos y caracterizados en Emavi: gráfico de temperatura de la cara opuesta a la llama vs. tiempo de incidencia de la llama directa. Fuente: los autores.

Así mismo, en la Emavi se han realizado ensayos de caracterización avanzada que han permitido correlacionar el adecuado desempeño ablativo reportado por los PACM. La Figura 51 presenta la observación microscópica realizada a la zona afectada por el calor de los compuestos, en donde se resalta la formación de la capa carbonizada en la superficie y la importancia de las fibras (discontinuas y orientadas al azar) en el control de agrietamiento del compuesto. En efecto, se corrobora que cuando los PACM son expuestos a temperaturas por encima del límite de degradación térmica de la matriz (resina), su estructura experimenta un fenómeno de pirolisis y se carboniza la superficie del TPS. Al respecto, el carbón se considera un material de alto desempeño ablativo [5], [22]. En conjunto con la acción reforzante de la fibra, esta capa carbonizada retiene los *fillers* incorporados y el proceso de ablación se lleva a cabo de manera efectiva, ya que el sistema continua absorbiendo calor endotérmicamente [14]. Aun considerando las propiedades ablativas de esta capa, el residuo carbonizado puede erosionarse o sufrir delaminación a tiempos de exposición prolongados, afectando el desempeño

y rendimiento ablativo del material. Por esta razón se ha demostrado que es indispensable reforzar el compuesto con fibras cortas, cuyo efecto ha sido reportado previamente por investigadores de la Emavi [23].



**Figura 51. Análisis microestructural (SEM) de la zona afectada por el calor de los PACM desarrollados en Emavi posterior al ensayo ablativo. Fuente: los autores.**

Con base en los desempeños de los PACM reportados durante los ensayos de llama directa, ha sido posible la fabricación de aplicaciones tipo cámaras de combustión y toberas (boquillas) de motor cohete hasta siete veces más livianas que las convencionales. La obtención de estas aplicaciones ha sido posible, logrando reforzar la zona ablativa (PACM) mediante la aplicación superficial de un tejido unidireccional de fibra de carbono preimpregnado (zona estructural) (Figura 52). Las toberas fabricadas han sido sometidas a pruebas estáticas de combustión utilizando propelentes sólidos tipo Candy KNSu, también sintetizados en la Emavi (Figura 53).

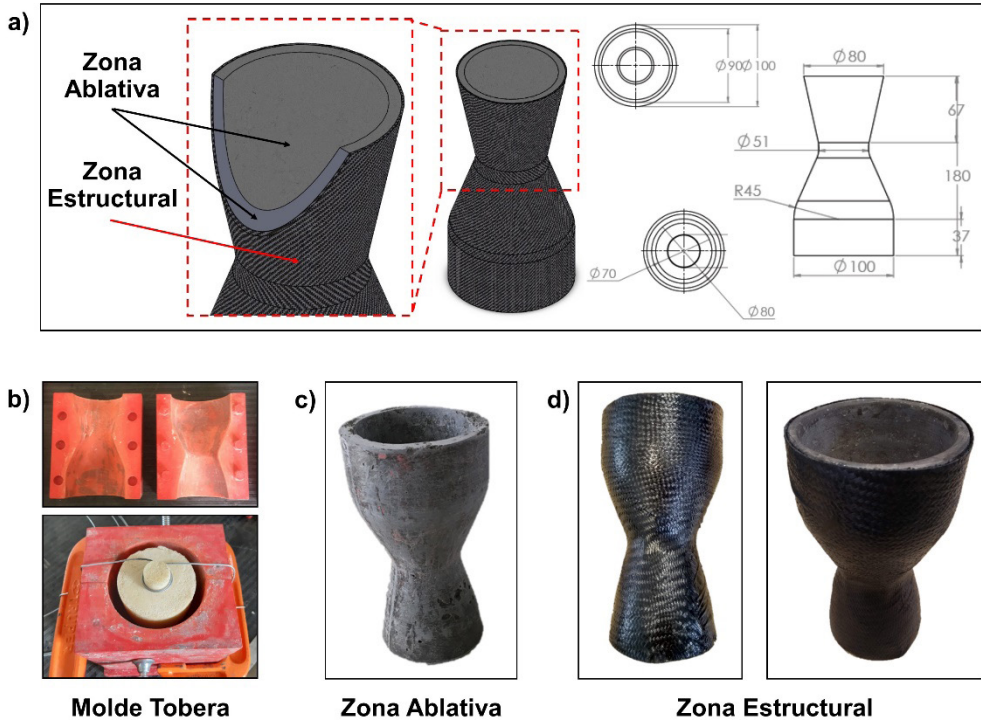


Figura 52. Componentes de propulsión tipo tobera (motor-cohete) elaborados en Emavi a partir de los PACM: a) diseño y planos del componente, b) molde o preforma de la zona ablativa, c) zona ablativa y d) tejido de fibra de carbono (zona estructural) aplicado sobre la superficie de la zona ablativa. Fuente: los autores.

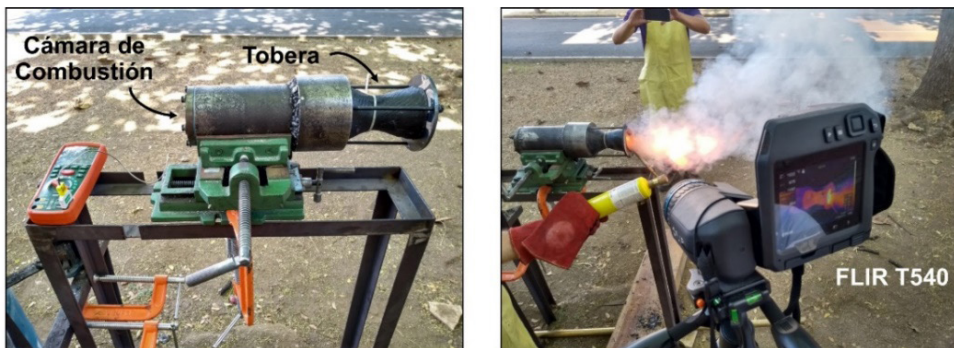


Figura 53. Prueba estática de combustión real y medición del perfil térmico de las toberas desarrolladas. Fuente: los autores.

La Figura 54 muestra el perfil térmico alcanzado por un motor cohete elaborado a partir de PACM bajo condiciones reales de servicio, en donde se puede apreciar que, para este caso, la temperatura registrada en la superficie de la tobera no superó los 150 °C hasta los 90 segundos de prueba. Estos resultados han demostrado concordancia con los niveles de aislamiento térmico y desempeño ablativo reportados durante las pruebas de llama directa llevadas a cabo en Emavi, validando, por tanto, el potencial de aplicación que tienen los PACM en el campo aeroespacial, en donde la búsqueda de materiales de elevados desempeños y baja densidad es constante. Al respecto, al comparar la densidad de los PACM sintetizados en Emavi ( $1.69 \text{ g/cm}^3$ - $1.99 \text{ g/cm}^3$ ), con la de otros materiales comúnmente utilizados en la fabricación de motores cohetes, tales como las aleaciones de acero ( $7.84 \text{ g/cm}^3$ ), aluminio ( $2.79 \text{ g/cm}^3$ ) o titanio ( $4.60 \text{ g/cm}^3$ ) [17], se puede resaltar la importancia de este desarrollo y la posibilidad de reducir el peso de la aplicación final. A lo anterior se le puede sumar el hecho de que los PACM desarrollados en Emavi se componen en un 67 % de residuos o sub-productos industriales y materiales de fácil adquisición (bajo costo), como resina poliéster y fibra de vidrio.

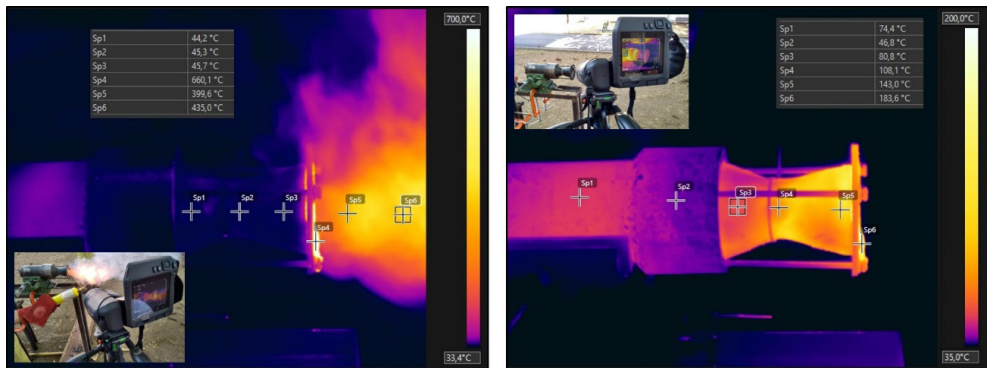


Figura 54. Inspección del perfil térmico de las aplicaciones tipo toberas de motor cohete desarrolladas en Emavi a partir de PACM. Fuente: los autores.

### 3.6 COMENTARIOS FINALES: RETOS Y OPORTUNIDADES

El desarrollo de materiales compuestos ablativos podría ser considerado de suma importancia para las industrias de la región relacionadas con los sectores automovilístico, aeronáutico y aeroespacial, así como aquellas industrias que sistemas de protección térmica para los equipos que operan a elevadas temperaturas, pero especialmente para la Fuerza Aérea Colombiana, cuyo propósito de fabricar componentes de propulsión (como los cohetes tipo sonda) con poca dependencia tecnológica externa se convierte, así, en una posibilidad tangible dados los desarrollos alcanzados.

Este capítulo de libro promueve el desarrollo de una línea de investigación enfocada en la síntesis, caracterización y optimización de materiales compuestos ablativos tipo PACM, con la validación de otros tipos de modificadores y/o refuerzos (particulados y fibras) y su aplicación directa en la manufactura de componentes de propulsión, como las toberas de los cohetes tipo sonda o de órbita baja, en respuesta a una necesidad específica de la industria aeroespacial nacional y en especial de la Fuerza Aérea Colombiana.

### 3.7 REFERENCIAS

- [1] NASA. (2008). Sistema y Materiales de Protección Térmica (TPS) [Online]. Available: <https://www.nasa.gov/centers/ames/spanish/research/humaninspace/humansinspace-thermalprotec.html>.
- [2] J. Maldonado Villa, J. Portocarrero Hermann, C. Rodríguez Adaime, J. J. Valbuena Cocunubo and M. E. Acuña Lizarazo, "Evaluación del comportamiento térmico de materiales compuestos de matriz polimérica en prototipos de toberas para cohetes de órbita baja", *Rev. Científica Gen. José María Córdova*, vol. 12, no. 13, pp. 275–290, 2014.
- [3] Maldonado Villa, J. Portocarrero Hermann, E. Quitian Barrios, J. Alarcón Ordu and W. David Boad, "Desarrollo de toberas de cohete en material ablativo de matriz polimérica reforzada estructuralmente con fibras de vidrio y carbono", 71 Congreso Anual da ABM – Internacional e ao 16o ENEMET - Encontro Nacional de Estudantes de Engenharia Metalúrgica, de Materiais e de Minas, pp. 984–995, 2016.

- [4] P. J. Astola, M. A. Rodríguez, F. J. Botana and L. González-Rovira, “Caracterización de elementos de protección térmica de materiales compuestos mediante análisis térmicos”, *Rev. la Asoc. Española Mater. Compuestos*, vol. 2, no. 4, pp. 34–41, 2017.
- [5] M. Natali, J. M. Kenny and L. Torre, “Science and technology of polymeric ablative materials for thermal protection systems and propulsion devices: A review”, *Prog. Mater. Sci.*, vol. 84, pp. 192–275, 2016.
- [6] E. S. Rodríguez, “Desarrollo de materiales compuestos avanzados basados en fibras de carbono para la industria aeroespacial”, *An. la Acad. Nac. Ciencias Exactas, Fis. y Nat.*, vol. 64, pp. 1–6, 2012.
- [7] M. Ashby, H. Shercliff and D. Cebon, *Materials: engineering, science, processing and design*, 1st ed. Elsevier, 2007.
- [8] D. R. Askeland and P. P. Phulé, *Ciencia e ingeniería de los materiales*, 4ta ed. México, D.F.: Thomson Learning, 2005.
- [9] M. L. Aranzazu Rios, V. P. Muñoz Cárdenas, M. J. Giraldo Cárdenas, G. H. Gaviria and F. A. González Rojas, “Modelos cinéticos de degradación térmica de polímeros: una revision”, *Rev. Ing. Univ. Medellin*, vol. 12, no. 23, pp. 113–130, 2013.
- [10] A. Krzyzak, W. Kucharczyk, J. Gaska and R. Szczepaniak, “Ablative test of composites with epoxy resin and expanded perlite”, *Compos. Struct.*, vol. 202, no. January, pp. 978–987, 2018.
- [11] L. Asaro, L. B. Manfredi, S. Pellice, R. Procaccini, and E. S. Rodriguez, “Innovative ablative fire resistant composites based on phenolic resins modified with mesoporous silica particles,” *Polym. Degrad. Stab.*, vol. 144, pp. 7–16, 2017.
- [12] D. Quiñonez, Y. Lizcano, C. Vaquez, J. Maldonado and J. Portocarrero, “Construcción y evaluación de una tobera a escala menor basada en material compuesto para cohetes de órbita baja”, *Rev. inge@UAN*, vol. 2, no. 4, pp. 13–21, 2012.
- [13] W. Kucharczyk, D. Dusiński, W. Żurowski and R. Gumiński, “Effect of composition on ablative properties of epoxy composites modified with expanded perlite”, *Compos. Struct.*, vol. 183, pp. 654–662, 2018.

- [14] G. Pulci, L. Paglia, V. Genova, C. Bartuli, T. Valente and F. Marra, "Low density ablative materials modified by nanoparticles addition: Manufacturing and characterization", *Compos. Part A Appl. Sci. Manuf.*, vol. 109, pp. 330–337, 2018.
- [15] J. H. Koo, L. A. Pilato and G. E. Wissler, "Polymer nanostructured materials for propulsion systems", *J. Spacecr. Rockets*, vol. 44, no. 6, pp. 1250–1262, 2007.
- [16] L. Mohan Kumar, K. M. Usha, E. N. Anandapadmanabhan and P. Chakravarthy, "Effect of fibre orientation on the properties and functional performance of ablative materials for solid rocket motors", *Trans. Indian Inst. Met.*, vol. 70, no. 9, pp. 2407–2413, 2017.
- [17] G. P. Sutton and O. Biblarz, *Rocket Propulsion Elements*, 8th ed. New Jersey: John Wiley & Sons INC., 2010.
- [18] ASTM International, "ASTM E285, Standard test method for oxyacetylene ablation testing of thermal insulation materials", West Conshohocken, PA, 2015.
- [19] S. Tang and C. Hu, "Design, Preparation and Properties of Carbon Fiber Reinforced Ultra-High Temperature Ceramic Composites for Aerospace Applications: A Review," *J. Mater. Sci. Technol.*, vol. 33, no. 2, pp. 117–130, February 2017.
- [20] C. Cubides, "Propelentes solidos: Una experimentacion para el futuro", *Rev. Cienc. y Tecnol. del Ejercito*, vol. 6, no. 12, pp. 11–19, 2015.
- [21] R. Robayo-salazar, J. Portocarrero-Hermann, U. Díaz-Padrón and O. Patiño-Castrillón, "Polymeric Ablative Composite Materials and their Application in the Manufacture of Aerospace Propulsion Components", *Rev. Fac. Ing.*, vol. 29, no. 54, p. e10662, 2020.
- [22] M. Rallini, M. Natali, and L. Torre, "Chapter 14 - An Introduction to Ablative Materials and High-Temperature Testing Protocols", in *Nanomaterials in Rocket Propulsion Systems*, Elsevier, 2019, pp. 529–549.
- [23] R. Robayo-Salazar, J. Portocarrero-Hermann, U. Díaz-Padrón and O. Patiño-Castrillón, "Comportamiento ablativo de compuestos de matriz polimérica y su aplicación en el campo aeroespacial", *Rev. Inf. Técnico*, vol. 83, no. 2 (suplemento I), pp. 7–27, 2019.



## Capítulo 4.

# **MATERIALES COMPUESTOS DE MATRIZ CERÁMICA**

---

### **José Luis Tristancho Reyes, Ph. D.**

Doctor en Materiales. Grupo de Investigación en Materiales Avanzados (Gimav – UTP), Facultad de Ingeniería Mecánica, Universidad Tecnológica de Pereira (UTP). *Correo-e:* josetris@utp.edu.co

### **Diego Pérez Muñoz, M. Sc.**

Magíster en Ingeniería Mecánica enfocado al Área de Materiales Avanzados. Grupo de Investigación en Materiales Avanzados (Gimav – UTP), Facultad de Ingeniería Mecánica, Universidad Tecnológica de Pereira (UTP). *Correo-e:* dperez@utp.edu.co

### **María Paulina Holguín Patiño, Ing.**

Ingeniera Mecánica. Candidata a Magíster en Ingeniería Mecánica - Área de Materiales Avanzados. Grupo de Investigación en Materiales Avanzados (Gimav – UTP), Facultad de Ingeniería Mecánica, Universidad Tecnológica de Pereira (UTP). *Correo-e:* mpholguin@utp.edu.co

**Palabras clave:**

materiales compuestos, cerámicos, matriz cerámica, fibras, particulados.

**4.1 INTRODUCCIÓN**

En términos generales, los materiales cerámicos ofrecen elevados puntos de fusión, rigidez y dureza, bajas densidades y elevada resistencia a la corrosión. No obstante, se caracterizan por una elevada fragilidad y una baja resistencia a la propagación de las grietas. Estos inconvenientes son precisamente el fundamento de la fabricación de materiales compuestos de matriz cerámica (CMC, *ceramic matrix composites*). De esta manera se podría plantear como objetivo principal de la producción de los materiales compuestos de matriz cerámica (CMC), lograr un notorio aumento en su tenacidad [1].

Básicamente, los materiales compuestos de matriz cerámica (CMC) constan de una matriz cerámica reforzada con fibras. Estas le aportan resistencia mecánica, rigidez y dureza, además de actuar como determinantes de las propiedades mecánicas finales obtenidas por el material compuesto. Por lo tanto, una adecuada combinación de la matriz y las fibras dan origen a materiales compuestos con propiedades superiores a las que tendrán sus componentes por separado [2].

**4.2 PROCESAMIENTO DE CMC**

Los compuestos de matriz cerámica (CMC) se pueden procesar mediante técnicas convencionales de procesamiento de polvo que se utilizan para fabricar cerámicas policristalinas, o mediante algunas nuevas técnicas desarrolladas específicamente para fabricar CMC. A continuación, se describen algunas técnicas de procesamiento, importantes para CMC.

**4.2.1 Prensado y sinterizado en frío**

El prensado en frío de una matriz de polvo reforzada con fibras. Complementado con el proceso de sinterización, es un derivado del procesamiento convencional de fabricación cerámica. Generalmente, en la etapa de sinterización la matriz se contrae considerablemente y el material compuesto resultante presenta muchas fisuras y grietas. Además del fenómeno

de contracción, asociado con la sinterización de cualquier cerámica, surgen otros problemas de fabricación (defectos) cuando se usan altas relaciones de aspecto (longitud/diámetro) en piezas de matriz de vidrio o cerámica. Dependiendo de la diferencia en los coeficientes de expansión térmica del refuerzo y la matriz, puede desarrollarse una tensión de tracción hidrostática en la matriz durante el enfriamiento, que contrarrestará la fuerza impulsora (minimización de la energía superficial) para la sinterización [3] [4]. Por lo tanto, la tasa de densificación de la matriz, en general, se retrasará en presencia de refuerzos [5] [4]. Las fibras también pueden dar lugar al fenómeno de formación de puentes, los cuales están gobernados por la orientación y la relación de aspecto del refuerzo.

#### 4.2.2 *Prensado en caliente*

Con frecuencia se recurre a alguna forma de prensado en caliente en la etapa de consolidación de los CMC. Esto se debe a que una aplicación simultánea de presión y alta temperatura puede acelerar la velocidad de densificación y puede obtenerse un CMC compacto, sin poros y de grano fino. Una variante común, denominada proceso de infiltración de lechada, es una de las técnicas más importantes utilizadas para producir compuestos continuos de vidrio y vitrocerámica reforzados con fibra [6] [7]. El proceso consta de dos etapas: 1. incorporación de una fase de refuerzo en una matriz no consolidada y 2. consolidación de la matriz mediante prensado en caliente. La Figura 55 muestra un esquema de este proceso. Además de la incorporación de la fase de refuerzo, la primera etapa implica algún tipo de alineación de las fibras. Un arreglo de fibra o una preforma de fibra se impregna con una suspensión en donde la matriz está contenida, haciéndola pasar a través de un tanque de suspensión. El arreglo de fibra impregnada es similar a la pre-impregnación utilizada en los compuestos de matriz polimérica. La suspensión se compone de la matriz en polvo, un vehículo líquido (agua o alcohol) y un aglutinante orgánico. Este último se quema antes de la consolidación. Pueden añadirse agentes humectantes para facilitar la infiltración del arreglo de fibras. La fibra pre-impregnada se enrolla en un tambor y se seca. A esto le sigue el corte y apilado de los pre-impregnados y la consolidación en una prensa caliente. El proceso tiene la ventaja de que, como en

los compuestos de matriz polimérica (PMC, *polymer matrix composites*), los pre-impregnados pueden disponerse en una variedad de secuencias de apilamiento, por ejemplo, unidireccional, entrecruzado o ubicados en ángulos. La Figura 56a muestra una micrografía óptica de una sección transversal de un compuesto de matriz de vidrio/fibra de vidrio unidireccional. En general, tales compuestos de matriz de vidrio están bien consolidados, es decir, apenas hay porosidad, la cual puede ser un problema con las cerámicas cristalinas. La Figura 56b muestra las condiciones de presión y temperatura utilizadas durante el prensado en caliente de un CMC.

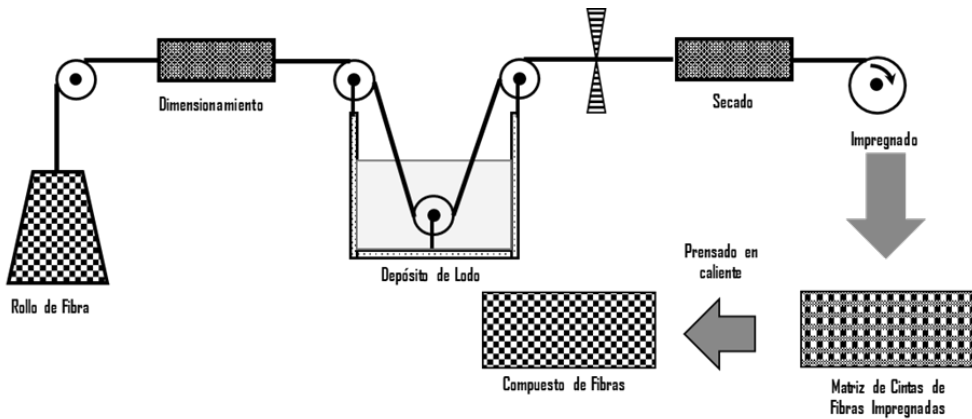
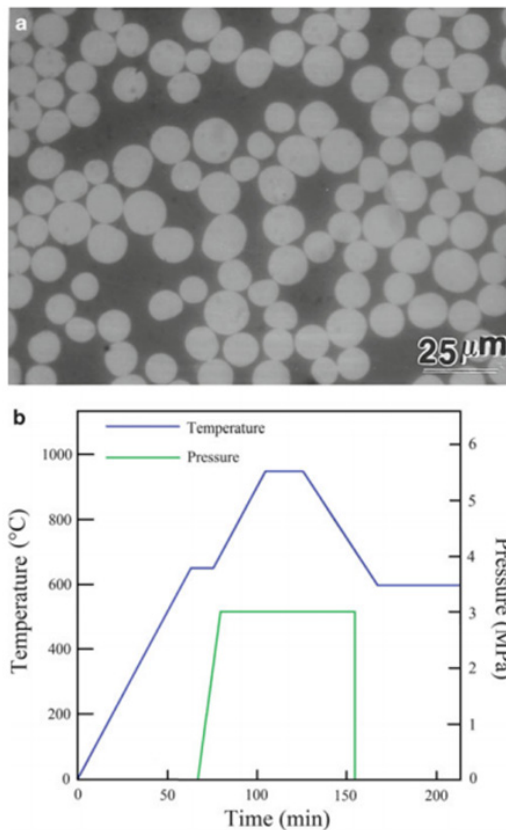


Figura 55. Esquema del proceso de impregnación de lodos. Fuente: [7].

El proceso de infiltración en suspensión es adecuado para compuestos de matriz de vidrio o vitrocerámica, principalmente porque las temperaturas de procesamiento de estos materiales son más bajas que las utilizadas para materiales de matriz cristalina y la fase vítrea tiene buenas propiedades de flujo. Cualquier proceso de prensado en caliente tiene ciertas limitaciones para producir formas complejas. Las fibras deben sufrir poco o ningún daño durante la manipulación. La aplicación de una presión muy alta puede dañar fácilmente las fibras. Las partículas refractarias de una cerámica cristalina pueden dañar las fibras por contacto mecánico. El refuerzo también puede sufrir daños por reacción con la matriz a temperaturas de procesamiento muy altas. La matriz debe tener la menor porosidad posible en el producto final,

debido a que la porosidad en un material cerámico estructural es altamente indeseable. Para ello, es importante utilizar una partícula de polvo de matriz más pequeña que el diámetro de la fibra. Los parámetros operativos de prensado en caliente también son importantes. El control preciso dentro de un rango estrecho de temperatura de trabajo, la minimización del tiempo de procesamiento y la utilización de una presión lo suficientemente baja para evitar daños en las fibras son factores importantes en esta parte de consolidación final del proceso. El daño de la fibra y cualquier reacción en las inter-caras fibra/matriz, con su efecto perjudicial sobre la fuerza de unión, son fenómenos que deben evitarse durante la operación del prensado en caliente.



**Figura 56. (a) Micrografía óptica de la sección transversal de un material compuesto de matriz de vidrio/fibra de vidrio unidireccional y (b) gráfico de presión y temperatura utilizado durante el prensado en caliente de un CMC. Fuente: [7].**

En resumen, el proceso de infiltración de la suspensión generalmente da como resultado una distribución de fibras bastante uniforme; se pueden obtener valores de porosidad baja y alta resistencia. La principal desventaja de este proceso es que se limita a materiales de matriz de punto de fusión o reblandecimiento relativamente bajo. Los CMC reforzados con fibras generalmente se fabrican mezclando las fibras con una suspensión de polvo de cerámica, seguido de secado y prensado en caliente. A veces se utiliza prensado isostático en caliente (PIC), en lugar de prensado en caliente uniaxial. La aglomeración de fibras en un cuerpo verde es un problema importante. La agitación mecánica y el ajuste del nivel de pH de la suspensión (polvo de matriz + fibras en agua) pueden ser de ayuda a este respecto. La adición de fibras a la "lechada" puede resultar en una viscosidad muy alta. Además, las fibras con grandes proporciones (> 50 %) tienden a formar grumos [8]. La obtención de fibras bien separadas y dispersas es de gran importancia para los compuestos de densidad razonablemente alta. El uso de dispersantes orgánicos [9], técnicas de mezclado como la agitación asistida por una sonda ultrasónica y la des-floculación mediante un control adecuado del pH, pueden emplearse de manera útil [10]. La mayoría de los compuestos reforzados con fibras se fabrican a temperaturas en el rango de 1 500 ° C a 1 900 ° C y presiones en el rango de 20 MPa a 40 MPa [11].

#### 4.2.3 Procesos de unión por reacción

Los procesos de unión por reacción, similares a los que se utilizan para las cerámicas monolíticas, se pueden usar para fabricar compuestos de matriz cerámica. El proceso de unión por reacción tiene las siguientes ventajas:

- Se pueden evitar los problemas de contracción de la matriz durante la densificación.
- Se pueden utilizar elevadas fracciones de refuerzo (fibra).
- Se pueden utilizar arreglos de fibras continuas y multidireccionales.

Las temperaturas de unión por reacción para la mayoría de los sistemas son generalmente más bajas que las temperaturas de sinterización para evitar la degradación de la fibra. Una gran desventaja de este proceso es que

es difícil evitar una alta porosidad. También se puede utilizar un proceso híbrido, que implica una combinación de prensado en caliente y técnica de unión por reacción [12], [13]. Un ejemplo de ello es la obtención del nitruro de silicio ( $\text{Si}_3\text{N}_4$ ) mediante una reacción de silicio en polvo con gas nitrógeno a temperaturas controladas (1 100 °C-1 400 °C). El producto obtenido se prensa en caliente y es dopado con un 1 %-5 % de MgO. Normalmente, la matriz de nitruro de silicio tiene aproximadamente un 30 % de porosidad, lo que no es inesperado en el nitruro de silicio unido por reacción. Sin embargo, el prensado en caliente permite llegar a tener hasta un 100 % de la densidad teórica. Al respecto, el proceso de obtención de nitruro de silicio mediante unión por reacción es relativamente económico, si se compara con el prensado en caliente. El nitruro de silicio se destaca como una de las cerámicas avanzadas que presenta una de las mejores combinaciones de propiedades (elevada resistencia, buena estabilidad térmica, baja expansión térmica, elevada dureza y rigidez, elevada resistencia al desgaste, alta estabilidad química) con aplicaciones que se concentran en aquellas que incluyen ambientes hipertérmicos.

El proceso de unión por reacción también se puede utilizar para hacer fibras y compuestos a partir de óxidos o matrices de alúmina [14], [15] y mullita (porcelanita) [14], que son muy atractivos para aplicaciones de alta temperatura. La mullita es una cerámica tecnológica importante que se forma como una fase intermedia en el sistema  $\text{SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$ . La composición química de la mullita se denota comúnmente como  $3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$  (que corresponde a 60 % en moles de  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), la cual, en realidad, se refiere a una solución sólida en el rango de 60 %-63 % en moles de  $\text{Al}_2\text{O}_3$  por debajo de 1 600 °C [16]. En el caso de producir una matriz de mullita, el proceso de unión por reacción implica la oxidación directa de los polvos de partida para crear la matriz. El proceso tiene un tiempo de procesamiento más corto que la formación de la matriz mediante técnicas de infiltración. Para el caso de la alúmina, un polvo de partida que consiste en Al- $\text{Al}_2\text{O}_3$ , o un compacto infiltrado en suspensión, se trata térmicamente en una atmósfera oxidante. El polvo de aluminio se oxida a  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , pero el punto clave es que, en este proceso de oxidación, se produce una expansión de volumen del 28 %, que compensa parcialmente

la contracción de sinterización. La oxidación suele completarse por debajo de los 1 100 °C, donde no se produce la sinterización. La matriz de mullita se puede obtener agregando SiC al polvo de partida, que luego se oxida durante el procesamiento para formar el componente de SiO<sub>2</sub>. Una técnica alternativa para producir mullita implica el uso de un aluminosilicato como material de partida. Debido a que se evitan los problemas de contracción durante la densificación, la unión por reacción es un atractivo y rápido método de fabricar fibras y obtener CMC.

#### 4.2.4 Infiltración

La infiltración de una preforma hecha a partir de un refuerzo, se puede realizar con una matriz en forma sólida, líquida o gaseosa.

##### 4.2.4.1 Infiltración líquida

Esta técnica es muy similar a la infiltración de polímeros líquidos o de metales líquidos (Figura 57). El control adecuado de la fluidez de la matriz líquida es, sin lugar a duda, la clave de esta técnica, pues se produce una matriz de alta densidad, es decir, sin poros. Se puede utilizar casi cualquier geometría de refuerzo para producir un compuesto virtualmente libre de defectos. Las temperaturas involucradas, sin embargo, son mucho más altas que las encontradas en el procesamiento de polímeros o metales. El procesamiento a temperaturas tan altas puede provocar reacciones químicas perjudiciales entre el refuerzo y la matriz. El desajuste de la expansión térmica entre el refuerzo y la matriz, las elevadas temperaturas de procesamiento y la baja tenacidad a la fractura que poseen las cerámicas pueden significar un conjunto de problemas a la hora de producir un CMC sin grietas. Las viscosidades de las masas fundidas de cerámica son generalmente altas, lo que dificulta la infiltración de las preformas o arreglos de refuerzos. La mojabilidad del refuerzo por la cerámica fundida es otro elemento para considerar. Hull [17] analizó el proceso de infiltración por fusión de compuestos de matriz cerámica con respecto a la reactividad química, la viscosidad de la matriz fundida y la humectación del refuerzo. Una preforma o arreglo de partículas y/o fibras (fase de refuerzo) que entre si tenga



una red de poros interconectados, permitirá la infiltración capilar de una masa fundida de cerámica utilizando presión. La aplicación de presión o el procesamiento en vacío pueden ayudar en el proceso de infiltración. Suponiendo que la preforma consiste en un arreglo de poros interconectados, espaciados regularmente, se puede usar la Ecuación 1 de Poiseuilles para obtener la altura de infiltración:

$$h = \sqrt{\frac{\gamma r t \cos \theta}{2\eta}}$$

(Ecuación 1)

Donde  $r$  es el radio del canal cilíndrico,  $t$  es el tiempo,  $\gamma$  es la energía superficial del líquido infiltrante,  $\theta$  es el ángulo de contacto de humectación y  $\eta$  es la viscosidad. La altura de penetración es proporcional a la raíz cuadrada del tiempo y el tiempo necesario para penetrar una altura determinada es inversamente proporcional a la viscosidad de la masa fundida. La penetración también será más fácil si el ángulo de contacto es bajo (es decir, mejor humectabilidad) y la energía superficial,  $\gamma$ , y el radio de los poros,  $r$ , son grandes. Si el radio,  $r$ , del canal se hace demasiado grande, se perderá el efecto de infiltración por capilaridad.

La infiltración bajo presión de una preforma fibrosa por un material de matriz intermetálica fundido ha demostrado resultados satisfactorios [18]. Los compuestos de matriz intermetálica reforzados con fibra de alúmina (por ejemplo, materiales de matriz de TiAl, Ni<sub>3</sub>Al y Fe<sub>3</sub>Al) se han obtenido mediante colada a presión, también llamada colada por compresión [18]. La aleación de la matriz se funde en un crisol al vacío mientras que la preforma fibrosa se calienta por separado. El material de matriz fundido (a aproximadamente 100 °C por encima de la temperatura de fusión,  $T_m$ ) se vierte sobre el arreglo de las fibras y se introduce gas argón simultáneamente. La presión del gas obliga a la masa fundida a infiltrarse en la preforma. La masa fundida generalmente contiene aditivos para ayudar a humedecer las fibras.

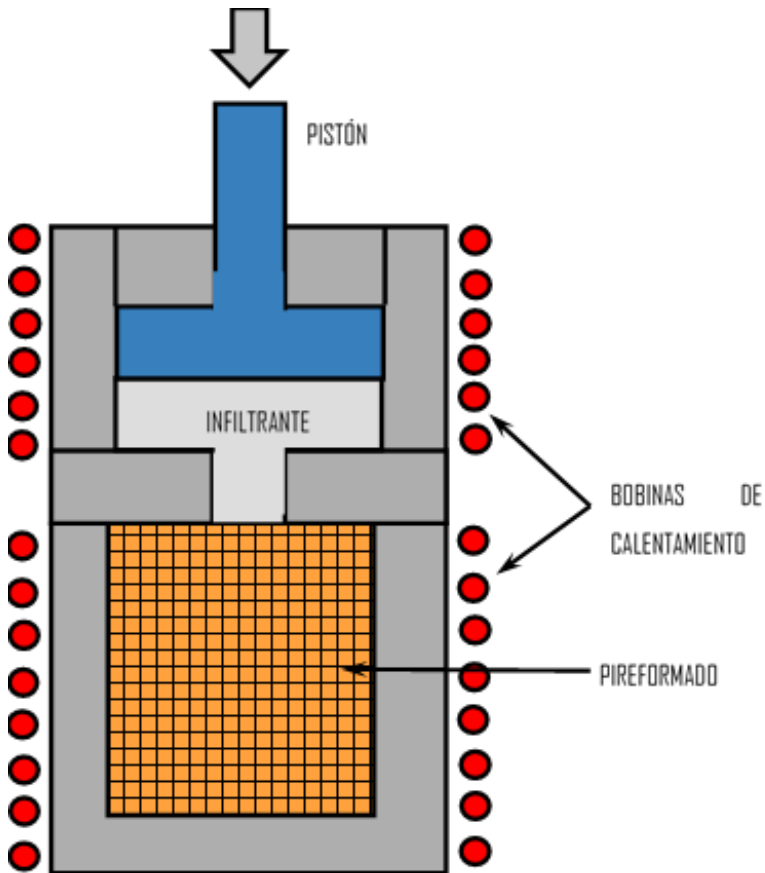


Figura 57. Esquema del proceso de infiltración de la masa fundida. Fuente: [18].

A continuación se resumen las ventajas y desventajas de las diferentes técnicas de infiltración por fusión.

Las ventajas son las siguientes:

- La matriz se forma en un solo paso de procesamiento.
- Se puede obtener una matriz homogénea.

Las desventajas de las técnicas de infiltración son las siguientes:

- Los altos puntos de fusión de las cerámicas significan una mayor probabilidad de reacción entre la masa fundida y el refuerzo.

- Las cerámicas tienen viscosidades de fusión más altas que los metales, por tanto, la infiltración de preformas es relativamente difícil.
- Es probable que la matriz se agriete debido a la contracción diferencial entre la matriz y el refuerzo al solidificarse. Esto se puede minimizar eligiendo componentes con coeficientes de expansión térmica casi iguales.

#### 4.2.5 Técnicas de reacción química *in situ*

Las técnicas de reacción química *in situ* para producir CMC son extensiones de las que se utilizan para producir cuerpos cerámicos monolíticos. A continuación se describen algunas de las técnicas más importantes, incluyendo la deposición química de vapor (CVD, por sus siglas en inglés), la infiltración química de vapor (CVI, por sus siglas en inglés) y diferentes tipos de técnicas de unión por reacción.

##### 4.2.5.1 Deposición química de vapor e impregnación química de vapor

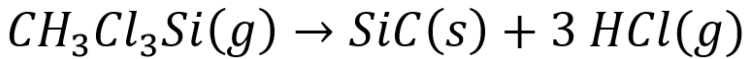
Cuando se utiliza la técnica de deposición química por vapor (CVD) para impregnar arreglos de fibras con matrices de naturaleza cerámica, se denomina impregnación química por vapor (CVI). Los materiales de matriz cerámica comúnmente utilizados son SiC, Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> y HfC. Varios investigadores han utilizado con éxito el método CVI para impregnar preformas o arreglos de fibras [19] [20]. Las preformas pueden consistir en hilos, tejidos o arreglos tridimensionales de fibras.

Un proceso típico de CVD o CVI requeriría un reactor con las siguientes partes:

1. Un sistema de alimentación de vapor.
2. Un reactor CVD en el que se calienta el sustrato y se alimentan los reactivos gaseosos.
3. Un sistema de control de los gases de escape.

Mediante el método de CVD se pueden sintetizar una variedad de matrices cerámicas, como óxidos, vidrios, cerámicas e intermetálicos.

Comúnmente, el proceso implica una descomposición isotérmica de un compuesto químico en forma de vapor para producir la matriz cerámica deseada sobre y entre las preforma o arreglo de fibras. La Figura 58 muestra un esquema del proceso isotérmico asociado al método de CVD. Por ejemplo, el metiltriclorosilano ( $\text{CH}_3\text{Cl}_3\text{Si}$ ) es el material de partida para obtener  $\text{SiC}$ , siendo posible su descomposición a una temperatura entre  $927\text{ }^\circ\text{C}$  y  $1127\text{ }^\circ\text{C}$  (Ecuación 2).



(Ecuación 2)

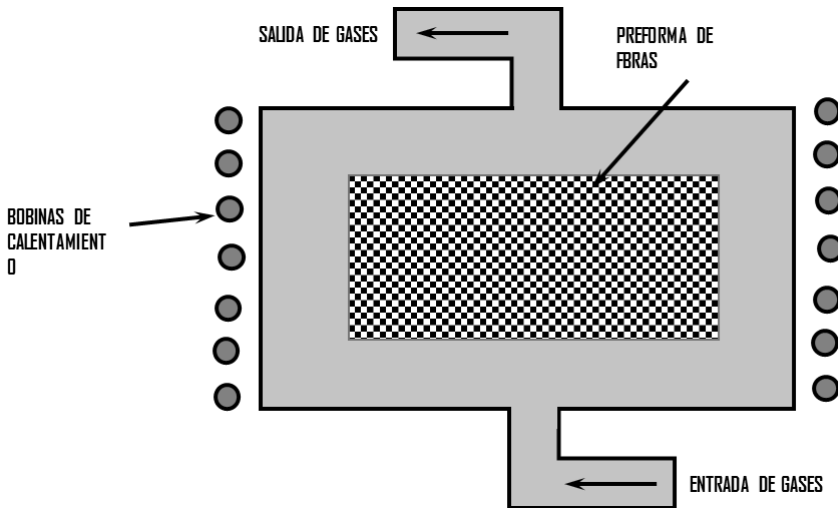
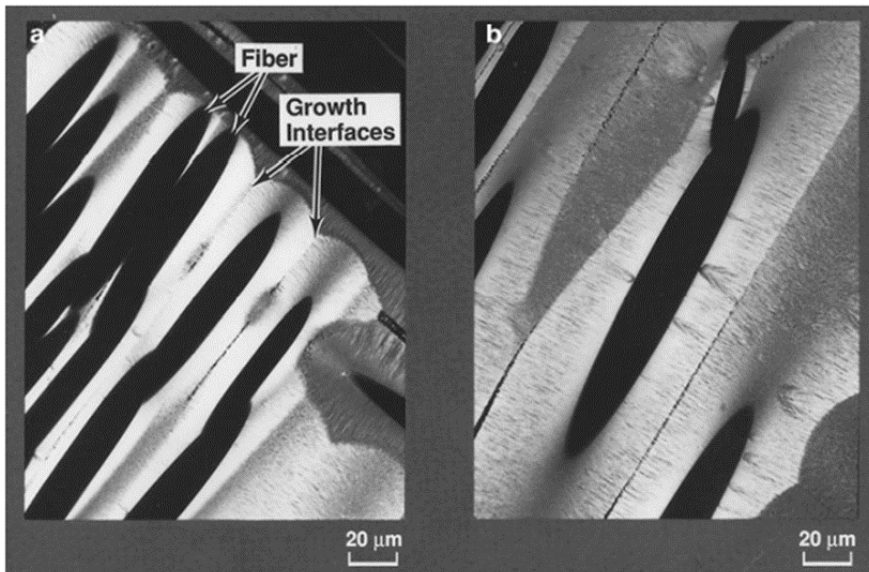


Figura 58. Esquema de un proceso isotérmico de infiltración de vapor. Fuente: [21].

Los vapores de  $\text{SiC}$  se depositan como una fase sólida sobre y entre la preforma o arreglo de fibras para formar el compuesto. En la Figura 59 se muestra un ejemplo de la microestructura de un compuesto  $\text{SiC}/\text{SiC}$  obtenido por CVI. El proceso de CVI es relativamente lento, porque implica la difusión de las especies reactivas al sustrato fibroso (preforma), seguida de la salida de los productos gaseosos. El proceso CVI para hacer una matriz cerámica es un tipo de proceso CVD de baja presión y baja temperatura, y por lo tanto evita algunos de los problemas asociados con el procesamiento

de cerámica a alta temperatura. Sin embargo, cuando el proceso CVI se lleva a cabo de manera isotérmica, los poros cercanos a la superficie tienden a cerrarse primero, restringiendo el flujo de gas al interior de la preforma o arreglo de fibras. Esto requiere múltiples ciclos de impregnación, mecanizado de superficies y reinfiltración para obtener una densidad adecuada. Se pueden evitar algunos de estos problemas utilizando un flujo de gas forzado y un gradiente de temperatura [22]. La Figura 60 es una representación esquemática de este proceso.



**Figura 59.** Ejemplo de la microestructura de un compuesto SiC/SiC obtenido por CVI.

Fuente: [7].

Esta variante de CVI, que combina flujo de gas forzado y gradiente de temperatura, evita algunos de los problemas mencionados anteriormente y reduce los tiempos de procesamiento (<24 horas) de SiC y Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>. El uso de un soporte de grafito simplifica la fabricación de la preforma, y la aplicación de una presión moderada a la preforma puede resultar en una fracción de volumen de fibra mayor de lo normal en el producto final. La densidad final del compuesto está limitada por el hecho de que la porosidad cerrada es del orden de 93 %-94 % de la densidad teórica.

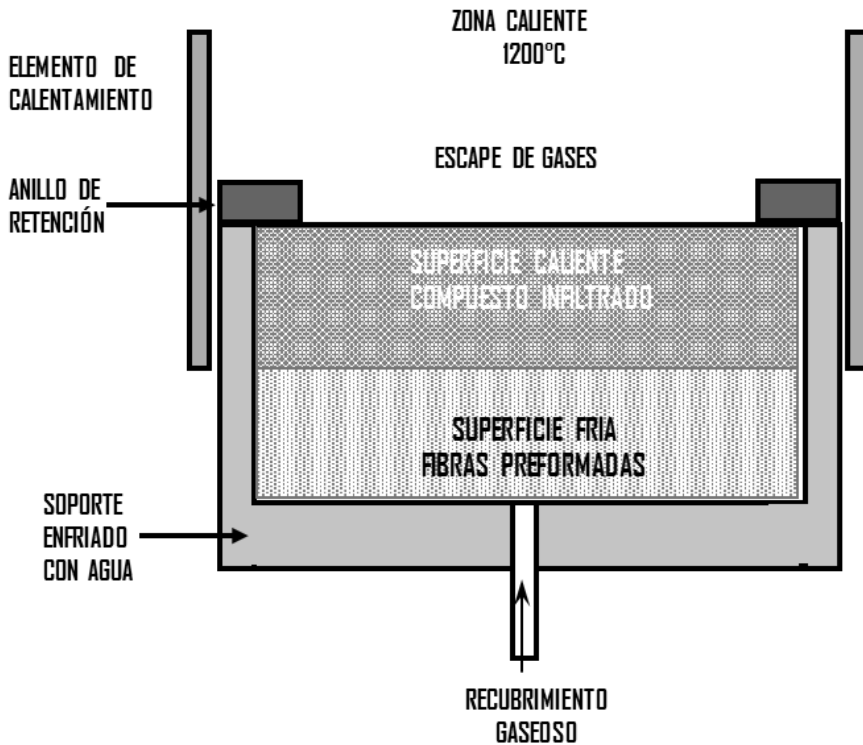


Figura 60. Esquema de un proceso de infiltración de vapor con gradientes de presión y temperatura. Fuente: [22].

Las ventajas de una técnica CVI o cualquier variante de la misma incluyen:

- Buenas propiedades mecánicas a altas temperaturas.
- Se pueden producir componentes voluminosos y de geometría compleja.
- Considerable flexibilidad en las fibras y matrices que se pueden emplear.

#### 4.2.5.2 Consolidación reactiva o sinterización en fase líquida

Este método posibilita la obtención de compuestos de SiC conseguidos a partir de la reacción de un arreglo de fibras de carbono con una matriz de sílice fundido. Las fibras de carbono pueden presentar diversas presentaciones o preformas, que incluyen las fibras cortas y dispersas, fibra “molida” y los arreglos tipo tejidos de fibras continuas. La composición típica del

compuesto resultante es una matriz de sílice (Si: 30 %–50 %) y fibra de SiC. La matriz de silicio limita la temperatura de uso del compuesto en aproximadamente 1 400 °C. Una gran ventaja de los compuestos de SiC/Si es que las fases están en equilibrio químico y tienen coeficientes de expansión térmica muy parecidos, lo cual es importante en aplicaciones que sean sometidas a entornos hipertérmicos.

#### 4.2.5.3 Proceso sol-gel

Las técnicas de sol-gel que se han utilizado para fabricar materiales cerámicos convencionales, también se pueden utilizar para fabricar materiales compuestos de matriz cerámica fibrorreforzados. El proceso implica la conversión de monómeros en una solución coloidal (sol) que actúa como precursor de una red integrada (gel) de partículas discretas o polímeros reticulados. Los precursores típicos son alcóxidos. Se hace reaccionar una solución que contiene compuestos metálicos, por ejemplo, un alcóxido, acetato o haluro metálico, para formar un sol, el cual se convierte en un gel, que a su vez se somete a un calentamiento controlado para obtener el producto final deseado: un vidrio, una vitrocerámica o una cerámica. De manera característica, la temperatura de conversión de gel a cerámica es mucho más baja que la requerida en un proceso convencional de fusión o sinterización. Algunas de las ventajas de estas técnicas para fabricar compuestos son las mismas que las de las cerámicas monolíticas, es decir, temperaturas de procesamiento más bajas, mayor homogeneidad de composición en matrices monofásicas y potencial para producir materiales de matriz multifase únicos, etc. En cuanto a la fabricación de materiales compuestos, la técnica sol-gel permite el procesamiento a través de líquidos de baja viscosidad, como los derivados de alcóxidos. Entre las desventajas de sol-gel se encuentran la alta contracción y el bajo rendimiento en comparación con las técnicas de suspensión. La red de fibras proporciona una superficie muy alta al gel de matriz. En consecuencia, la contracción durante la etapa de secado, con frecuencia, da como resultado una gran densidad de grietas en la matriz. Generalmente se requieren impregnaciones repetidas para producir una matriz sustancialmente densa [23].

En efecto, diversas técnicas de procesamiento de polímeros pueden adaptarse para procesos sol-gel. La impregnación de preformas fibrosas al vacío y el enrollado de filamentos son dos técnicas importantes. En el enrollado de filamentos, los arreglos de fibra se pasan a través de un tanque que contiene el sol, y la fibra impregnada se enrolla en un mandril con la forma y el grosor deseados. El sol se convierte en gel y la estructura se elimina del mandril. Luego, un tratamiento térmico final convierte al gel en una matriz de cerámica o vidrio. La técnica de sol-gel también se puede utilizar para preparar pre-impregnados mediante el método de infiltración en suspensión. El sol de la lechada actúa como aglutinante y recubre fibras y partículas de vidrio. La etapa de quemado del aglutinante se elimina así porque el aglutinante, al tener la misma composición que la matriz, pasa a formar parte de la matriz de vidrio. Una ventaja de este método de suspensión a base de sol-gel es que la consolidación se puede realizar a temperaturas más bajas. Entre los problemas, cabe mencionar que la capa de revestimiento de la fibra es porosa, frecuentemente rica en carbono y no uniforme [23].

#### 4.2.5.4 Infiltración y pirólisis de polímeros

Se pueden usar precursores poliméricos para fabricar fibras cerámicas, como también para formar una matriz cerámica en un compuesto. Esta técnica se denomina infiltración y pirólisis de polímeros (PIP, por sus siglas en inglés). Es una ruta de procesamiento atractiva debido a su costo relativamente bajo, pequeñas cantidades de porosidad residual y degradación mínima de las fibras. Además, este enfoque permite una tecnología de fabricación y moldeo casi en forma de red, que es capaz de producir compuestos casi completamente densos. En PIP, las fibras se infiltran con un polímero orgánico, que se calienta a temperaturas bastante altas y se piroliza para formar una matriz de naturaleza cerámica. Debido al rendimiento relativamente bajo de polímero a cerámica, se utilizan múltiples infiltraciones para densificar el material compuesto.

Los precursores poliméricos para matrices cerámicas permiten utilizar la tecnología de fabricación de compuestos poliméricos convencionales que está fácilmente disponible, y aprovechar los procesos utilizados para fabricar



compuestos de matriz polimérica. Estos incluyen la conformación y fabricación de formas complejas. Además, procesando y pirolizando a temperaturas más bajas (en comparación con la sinterización y el prensado en caliente, por ejemplo) se puede evitar la degradación de la fibra y la formación de productos de reacción no deseados en la interfaz fibra / matriz. Entre las características deseables de un polímero precerámico se encuentran:

- Alto rendimiento cerámico a partir de precursor polimérico.
- Precursor que produce una cerámica con bajo contenido de carbono libre (que se oxida a altas temperaturas).
- Peso molecular controlable, que permite la solubilidad del disolvente y el control de la viscosidad para fines de fabricación.
- Reticulación del polímero a baja temperatura, que permite que la resina se endurezca y mantenga sus dimensiones durante el proceso de pirólisis.
- Bajo costo y toxicidad.

La mayoría de los polímeros precursores cerámicos se forman a partir de compuestos del tipo poliorganosilanos, poliorganocarbosilanos, poliorganosiloxanos, poliorganosilazanos y poliorganosililcarbodiámidas. La reacción de síntesis implica la pirolisis de estos compuestos a temperaturas del orden de los 1 000 °C–1 400 °C. Los monómeros pueden controlarse adicionalmente mediante una cantidad apropiada de ramificación que controla propiedades importantes, tales como la viscosidad del precursor, así como la cantidad de rendimiento cerámico. Todos los precursores de polímeros basados en silicio conducen a una matriz cerámica amorfa, donde los átomos de silicio están dispuestos tetraédricamente. Esta disposición es similar a la que se encuentra en la sílice amorfa. Los tratamientos a alta temperatura generalmente conducen a la cristalización y una ligera densificación de la matriz, lo que resulta en una contracción [24]. A altas temperaturas, la cerámica amorfa comienza a formar pequeños dominios de fase cristalina, que son más estables termodinámicamente. Las matrices de Si-C derivadas de policarbosilano comienzan a cristalizar a 1 100 °C–1 200 °C, mientras

que Si-C-O (polisiloxanos) y Si-N-C (polisilazanos) permanecen amorfos a 1 300 °C–1 400 °C. Normalmente, el intervalo de peso molecular del polímero se adapta, seguido de la configuración del producto. Luego, el polímero se retícula y, finalmente, se piroliza en una atmósfera inerte o reactiva (por ejemplo, NH<sub>3</sub>). La etapa de pirólisis se puede subdividir en tres pasos. En el primer paso, entre 550 °C y 880 °C, se forma un compuesto hidrogenado amorfo. El segundo paso implica la nucleación de precipitados cristalinos como SiC, Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> y SiO<sub>2</sub> a temperaturas entre 1 200 °C y 1 600 °C. El engrosamiento del grano también puede resultar del consumo de cualquier fase amorfa residual y la reducción de la cantidad de oxígeno debido a la vaporización de SiO y CO. La porosidad es típicamente del orden de 5 %-20 % en volumen, con tamaños de poro del orden de 1 nm-50 nm. Cabe señalar que el tamaño de poro promedio y la fracción de volumen de los poros disminuyen con el aumento de la temperatura de pirólisis, ya que la cantidad de densificación (y contracción) se vuelve irreversible a temperaturas superiores a la temperatura máxima de pirólisis [25].

Entre las desventajas del proceso PIP, se pueden resaltar:

- El bajo rendimiento que acompaña a la transformación de polímero a cerámico.
- Gran contracción, que generalmente causa grietas en la matriz durante el proceso de obtención.
- Debido a la contracción y la pérdida de peso durante la pirólisis, la porosidad residual es del orden del 20 %-30 %.
- Para reducir la cantidad de porosidad residual, se necesitan múltiples impregnaciones y reprocesamientos.

La re-impregnación se realiza típicamente con un pre-polímero de muy baja viscosidad, para que la suspensión espesa pueda humedecer e infiltrar los pequeños microporos que existen en la preforma. Normalmente, la re-impregnación se realiza sumergiendo la pieza en el polímero líquido en una bolsa de vacío, mientras que los polímeros de mayor viscosidad requieren impregnación a presión. Normalmente, la cantidad de porosidad se reducirá del 35 % a menos del 10 % después de aproximadamente cinco impregnaciones [25].

También se produce una generación de gas significativa durante la pirólisis. Por lo tanto, es aconsejable permitir que estos gases volátiles se difundan lentamente fuera de la matriz, especialmente para componentes de gran volumen. Por lo general, los ciclos de pirólisis aumentan a entre 800 °C y 1400 °C durante períodos de 1 a 2 días, para evitar la delaminación. Se debe recordar que la pirólisis debe realizarse a una temperatura por debajo de la temperatura de cristalización de la matriz (o se producirán grandes cambios de volumen) y por debajo de la temperatura de degradación de las fibras de refuerzo. La atmósfera de pirólisis es normalmente argón o nitrógeno, aunque en el amoníaco obtenemos un nitruro de silicio amorfo puro con bajas cantidades de carbono libre. Fitzer y Gadow [19] utilizaron la infiltración repetida y la descomposición térmica *in situ* de cerámicas porosas unidas por reacción para procesar compuestos de  $\text{Si}_3\text{N}_4/\text{SiC}$ . Se toman los siguientes pasos para procesar los compuestos:

- I. Preparar una preforma fibrosa porosa de SiC o  $\text{Si}_3\text{N}_4$  con algo de fase aglutinante.
- II. La preforma fibrosa se dispone en una autoclave.
- III. Las muestras se infiltran con precursores fundidos, polisilazanos o policarbosilanos a alta temperatura (500 °C), y la presión de argón o nitrógeno se incrementa lentamente de 2 MPa a 40 MPa. La alta temperatura da como resultado una transformación del oligómero silano en policarbosilano y la polimerización simultánea a altas presiones se da lugar.
- IV. Las muestras infiltradas se enfrían y se tratan con disolventes.
- V. Las muestras se colocan en una autoclave y la matriz de polímero se descompone térmicamente (pirólisis) en una atmósfera inerte a alta presión y temperatura en el intervalo de 500 °C–1050 °C
- VI. Se repiten los pasos I a V para lograr una densidad adecuada.

Compuestos de matriz cerámica derivados de polímeros, similares al carbono/carbono, por lo general tienen una matriz agrietada debido al procesamiento, así como varios poros pequeños. La gran cantidad de contracción y agrietamiento en la matriz se puede contener, hasta cierto punto,

mediante la adición de cargas particuladas a la matriz, que, cuando se agregan al polímero, reducen la contracción y endurecen el material de la matriz en el compuesto. La Figura 61 muestra esquemáticamente el papel de los rellenos en la reducción de la porosidad y el agrietamiento en el producto final. Las partículas o fibras cerámicas que se utilizan como rellenos en la matriz polimérica pueden servir para una variedad de propósitos:

- Reducir e interrumpir la formación de grietas en la matriz que se forman durante la contracción del polímero.
- Mejorar el rendimiento de la cerámica formando productos de reacción durante la pirólisis.
- Fortalecer y endurecer la matriz amorfa débil y aumentar la resistencia mecánica del compuesto.

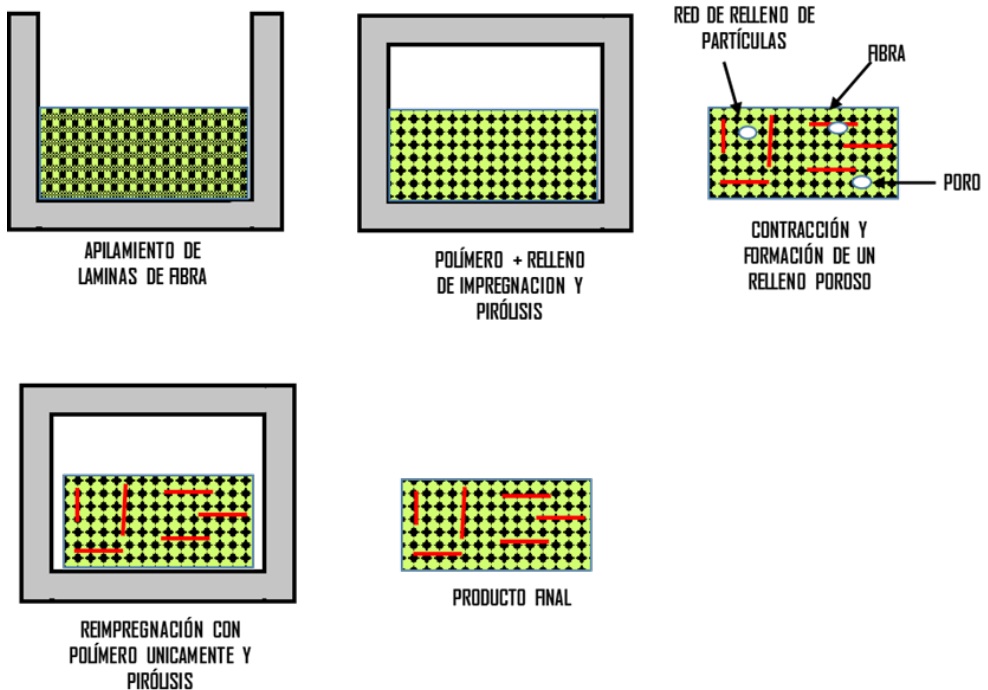


Figura 61. El papel de los rellenos (o *fillers*) en la reducción de la porosidad y el agrietamiento de los CMC obtenidos a partir de precursores poliméricos. Fuente: [25].

El relleno (o *filler*) debe tener un tamaño sub-micrométrico para fluir a través del arreglo de fibras o preforma, y su coeficiente de expansión térmica debe ser cercano a la matriz polimérica. El relleno no debe usarse en fracciones muy altas y la suspensión no debe ser forzada en las fibras de refuerzo, ya que puede tener lugar el deterioro de la fibra por abrasión. Esto es especialmente crítico con rellenos angulares, duros o fibras de cerámica.

Normalmente, la fracción de volumen de relleno es del 15 % al 25 % con respecto a la matriz. Una carga alta de relleno puede resultar en un aumento en el espaciado entre capas y una fracción de volumen menor de fibras. Cuando se agrega una fase de relleno “activa” al polímero, puede tener lugar la siguiente reacción genérica para formar una nueva fase de carburo (Ecuación 3) [26]:



(Ecuación 3)

Donde  $P$  es el polímero,  $T$  es la carga activa,  $C$  es la cerámica obtenida,  $G$  es el subproducto gaseoso y  $M$  es la fase de carburo formada. Controlando la cantidad de relleno, se puede controlar el grado de contracción. La arquitectura de la fibra puede tener un impacto con respecto a la infiltración y pirólisis de polímeros (PIP). Durante la pirólisis, el precursor se encoge alrededor de las fibras, por lo que se introducen grietas. Por ejemplo, las telas tejidas bidimensionales parecen ser menos susceptibles a desarrollar grietas interlaminares que los arreglos de capas cruzadas (2D o unidireccionales) [26].

#### 4.2.6 Deposición electroforética

El fenómeno de la electroforesis se conoce desde principios del siglo XIX, pero sus aplicaciones en el procesamiento de cerámicas y compuestos cerámicos son relativamente recientes. La deposición electroforética (EPD, por sus siglas en inglés) no debe confundirse con la galvanoplastia. En la galvanoplastia, los iones son las especies en movimiento y sufren una reducción de iones al depositarse. En EPD, por otro lado, las partículas sólidas migran sin reducción de carga durante la deposición. Además, la velocidad de

deposición en EPD es de , mientras que en la galvanoplastia es de . La deposición electroforética es una técnica relativamente simple y económica, que puede aprovecharse de manera rentable para la infiltración de preformas de fibras. EPD hace uso de partículas cerámicas a nanoescala (como en un sol o suspensión coloidal) y explota sus características de carga electrostática superficial neta mientras está en suspensión. Al aplicar un campo eléctrico, dichas partículas que portan cargas superficiales migrarán hacia un electrodo y se depositarán en él. Si el electrodo de deposición se reemplaza por una preforma o arreglo de fibras conductoras, las partículas suspendidas serán atraídas y depositadas sobre ellas, proporcionando un medio apropiado de infiltración en el caso de arreglos de alta superficie específica y densos. En la Figura 62a se muestra un esquema de la celda EPD básica, mientras que en la Figura 62b se muestra un ejemplo de la microestructura del compuesto de matriz de mullita reforzada con fibra cerámica Nextel 720. El movimiento de las partículas cerámicas en una suspensión acuosa influenciado por un campo eléctrico está gobernado por la intensidad del campo y el pH, la fuerza iónica y la viscosidad de la solución [27].

La movilidad electroforética de partículas cargadas en una suspensión viene dada por la Ecuación 4, llamada ecuación de Smoluchowski.

$$\text{Movilidad Electroforética} = \frac{U}{E} = \frac{\varepsilon\zeta}{4\pi\eta}$$

(Ecuación 4)

Donde  $U$  es la velocidad,  $E$  es la intensidad de campo,  $\varepsilon$  es la constante dieléctrica,  $\eta$  es el potencial zeta y  $\zeta$  es la viscosidad. El potencial zeta es un parámetro que caracteriza una suspensión. Puede determinarse midiendo la velocidad de las partículas en un campo eléctrico. De acuerdo con la ecuación anterior, una suspensión adecuada para EPD debe tener las siguientes características: carga superficial de partículas alta, constante dieléctrica alta de la fase líquida y viscosidad baja. Además, sería deseable una baja conductividad del medio de suspensión para minimizar el transporte de disolvente [28].

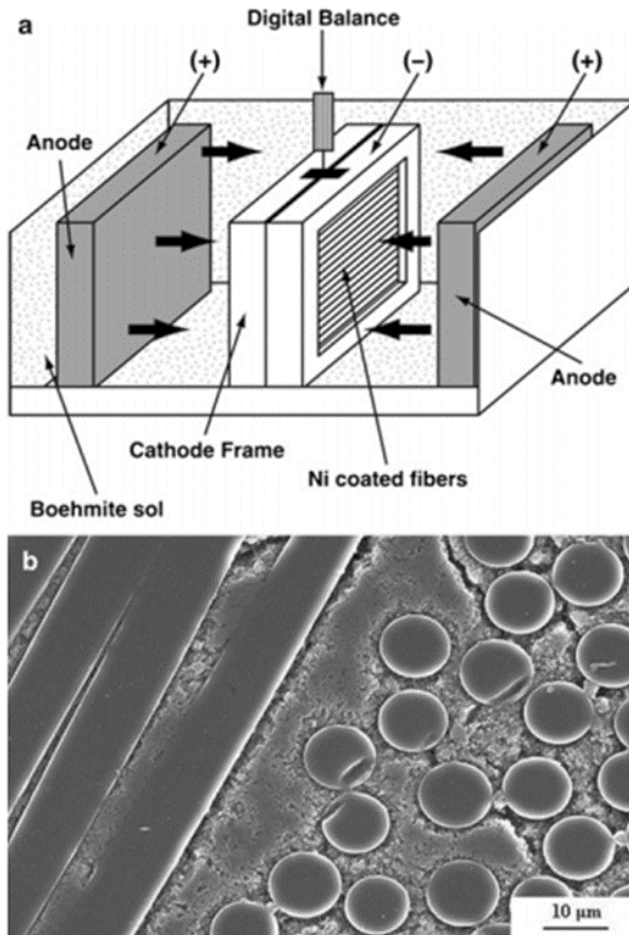


Figura 62. (a) Esquema de la celda de deposición electroforética básica (EPD). (b) Microestructura del compuesto de matriz de mullita reforzada con fibra cerámica Nextel 720 obtenido por deposición electroforética. Fuente: [28].

### 4.3 INTERFAZ EN CMC

En general, la selección de la matriz cerámica y el tipo o naturaleza de refuerzos (fibras y partículas) a usar en la obtención de los CMC debe realizarse teniendo en cuenta los siguientes requisitos: compatibilidad con relación a los coeficientes de expansión térmica y compatibilidad fisicoquímica. Las cerámicas tienen una ductilidad limitada y en la fabricación de CMC se

utilizan altas temperaturas. Por lo tanto, el desajuste térmico en el enfriamiento por altas temperaturas puede causar grietas en la matriz (o fibra). La deformación térmica en los compuestos es proporcional a  $\Delta \propto \Delta T$ , donde  $\Delta \propto = \alpha_f - \alpha_m$ , donde  $\alpha_f$  y  $\alpha_m$  son los coeficientes de expansión lineal de la fibra y la matriz, respectivamente, y  $\Delta T$  es el intervalo de temperatura [29]. Por supuesto, existe otra complicación, relacionada a que los coeficientes de expansión de las fibras no necesariamente son iguales en las direcciones axial y radial. La fibra de carbono en particular tiene los siguientes coeficientes axiales y radiales:

$$\alpha_a \approx 0$$

$$\alpha_r \approx 8 \times 10^{-6} K^{-1}$$

(Ecuación 4)

Si  $\alpha_a$  es positivo, es decir,  $\alpha_f > \alpha_m$ , la matriz se comprime al enfriarse, lo cual es beneficioso, porque conduce a un aumento de la tensión de tracción a la que se producirá el agrietamiento de la matriz. Por el contrario, si  $\alpha_a$  es negativo, es decir,  $\alpha_f < \alpha_m$ , la matriz experimenta una tensión que, si  $\Delta T$  es suficientemente grande, puede provocar el agrietamiento de la matriz. En la dirección radial, si  $\alpha_a$  es positivo, las fibras tienden a alejarse de la matriz al enfriarse, lo que da como resultado una fuerza de unión reducida en la zona de interfaz. Sin embargo, si  $\alpha_a$  es negativo, la fuerza de unión de la matriz de fibras puede incluso mejorarse [29].

#### 4.4. PROPIEDADES DE LOS CMC

Una característica importante de los CMC es la micro-fisuración matricial, que no tiene paralelo en las MMC o PMC. En este sentido, los valores relativos del módulo de elasticidad de la fibra,  $E_f$  y la matriz,  $E_m$  son muy importantes en los CMC. La relación  $E_f / E_m$  determina el grado de micro-fisuración de la matriz. Normalmente, el valor de deformación a fractura



de una matriz cerámica es muy bajo. Por tanto, en las MMC y en las PMC termoplásticas, la deformación por falla de la matriz ( $\varepsilon_m$ ) es considerablemente mayor que la de las fibras. La mayoría de los metales no reforzados muestran una deformación a fractura  $\varepsilon_m > 10\%$ , mientras que la mayoría de los polímeros fallan entre un 3% y un 5% de deformación. Así que, tanto en MMC como en PMC, la deformación por falla de la fibra controla la deformación por falla del material compuesto. Por lo general, las fibras de boro, carbono y carburo de silicio muestran valores de deformación por falla de entre  $\sim 1-2\%$ . Con relación a este rango de deformación, la falla de la mayoría de matrices cerámicas se presenta a deformaciones muy por debajo, reportando valores de tan solo el 0.05%. La situación con respecto a la falla de la fibra y/o matriz se muestra de manera simplificada en la Figura 63. La situación original del compuesto previo a la aparición de fisuras se muestra en la Figura 63a. En el caso de las MMC y las PMC, las fibras fallan primero en varios puntos débiles distribuidos a lo largo de sus longitudes; observe la Figura 63b. La falla final del material compuesto ocurrirá a lo largo de una sección que tenga la mayor cantidad de fracturas de fibra. En una CMC con una interfaz de alta adherencia (fibra fuertemente unida a la matriz), la fibra y la matriz fallarían simultáneamente. En este caso, la rotura del compuesto estaría controlada por el límite de deformación a la rotura de la matriz y prevalecería una situación similar a la que se muestra en la Figura 63c. Por su parte, en un CMC con interfaz de moderada-baja adherencia fibra-matriz, la matriz comenzaría a agrietarse primero y las fibras formarían un puente entre los fragmentos de la matriz, tal y como se puede observar en la Figura 63d [12]. Por lo tanto, desde el punto de vista de la tenacidad del material compuesto, no es beneficioso obtener una unión (adherencia) demasiado fuerte en un CMC, porque se promovería una rotura "frágil" o súbita del componente, contrario a la falla promovida por el agrietamiento controlado que se garantiza con el desprendimiento (*pull-out*) progresivo de las fibras de refuerzo a cada lado de la grieta en un material de mayor tenacidad. Cabe destacar que, además de la unión fibra-matriz, la longitud y morfología de la fibra puede gobernar el mecanismo de rotura o desprendimiento (*pull-out*) del material compuesto.

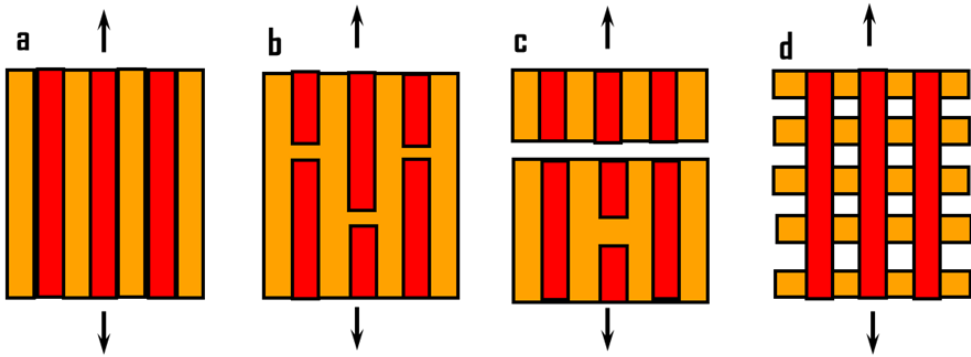


Figura 63. (a) Situación original previo a la aparición de fisuras. (b) Caso representativo a MMC y PMC. (c) Falla de la fibra y matriz en un CMC con interfaz de alta adherencia. (d) Tipo de falla de un CMC con interfaz de adherencia moderada.

Fuente: [26].

#### 4.5. APLICACIONES DE LOS MATERIALES COMPUESTOS DE MATRIZ CERÁMICA (CMC)

La aplicación por excelencia de los materiales compuestos de matriz cerámica (CMC) se ubica en la industria aeronáutica y aeroespacial. Es así como los fabricantes de motores para este sector industrial han dirigido sus investigaciones y desarrollos sobre los materiales compuestos de matriz cerámica (CMC) reforzados con fibras, debido a que estos son los únicos capaces de proporcionar, simultáneamente, ligereza, resistencia al choque térmico y el excelente desempeño a las altas temperaturas que se alcanzan bajo condiciones de operación. Entre estos materiales se incluyen los CMC reforzados con fibras de carbono, cerámicas y aglomerados de fibras, como lo son los compuestos basados en carburo de silicio reforzados con fibras de carbono (C/SiC), carburo de silicio reforzado con fibras de carburo de silicio (SiC/SiC), nitruro de silicio reforzado con fibras de carbono (C/Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>), alúmina reforzada con fibras de carbono (C/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), alúmina reforzada con fibras de carburo de silicio (SiC/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), entre otros [30], [31].

En el sector automotriz se ha presentado la posibilidad de fabricación de discos para el sistema de frenado de monoplazas de alta competición

usando materiales CMC de carburo de silicio reforzados con fibras de carbono (C/SiC), debido a que el desgaste de estos elementos se reduce notablemente, además, de evidenciarse una disminución en su peso, cercana al 40 %, comparándolos con discos fabricados en materiales metálicos. Por otra parte, se han realizado estudios de la aplicación de los CMC reforzados con residuos de oro (Au) y plata (Ag), mediante la técnica de abrasión laser, sobre la superficie superior de la cabeza de un pistón de un motor de combustión interna GP-15/9011, lográndose obtener una capa de CMC con espesor promedio de  $0,51\mu\text{m}$ , además de incrementar la eficiencia térmica en un 15,48 % y la dureza de la superficie en un 9,05 % [31], [32].

#### 4.6. CONCLUSIONES Y COMENTARIOS FINALES

La ciencia ha encontrado en los materiales su herramienta de progreso, superando con creces los retos propuestos por la naturaleza misma. En la actualidad, los desafíos que hemos rebasado como humanidad en el ámbito tecnológico, han tenido como actor principal, en muchos episodios, a los materiales compuestos de matriz cerámica, en donde su desempeño ha sido encomiable. Su diversidad estructural, asociada a sus magníficas propiedades físicas y mecánicas, renuevan constantemente el interés por investigar e implementarlos en aplicaciones térmicas y aeroespaciales.

Partiendo de la premisa esencial de los materiales compuestos, y siendo un poco frugales, su principal razón de ser es tener un material final con mejores propiedades que las ofrecidas por cada de sus componentes de manera individual, objetivo cumplido con creces por los CMC.

Para culminar, el reciente capítulo busca promover con ímpetu la investigación y aplicación de materiales CMC en múltiples campos de la ingeniería, en donde los retos, inicialmente dantescos, a futuro resultan ser un logro más para el basto palmarés de la humanidad en el ámbito ingenieril.

#### 4.7 REFERENCIAS

- [1] J. F. Valera Jiménez, *Materiales Compuestos de Matriz Cerámica*. Barcelona: Universitat Politecnica de Catalunya, 2016.

- [2] N. Gomzález Gascón, *Procesado de Materiales Compuestos Cerámicos de matriz de Sílice y fibras Cerámicas*. Zaragoza: Universidad de Zaragoza, 2012.
- [3] B. J. Kellett and F. F. Lange, "Thermodynamics of densification, Part. I: Sintering of simple particle arrays, equilibrium configurations, pore stability, and shrinkage", *Journal of the American Ceramic Society*, vol. 72, pp. 725-734, 1989.
- [4] R. Bordia and R. Raj, "Sintering of TiO<sub>2</sub> - Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> composites: a model experimental investigation", *Journal of the American Ceramic Society*, vol. 71, pp. 302-310, 1988.
- [5] G. K. Layden and K. M. Prewo, "Study of SiC whisker reinforced glass and glass - ceramic", 1985.
- [6] K. Prewo and J. Brennan, "High strength silicon carbide fibre reinforced glass matrix composites", *Journal of Materials Science*, vol. 15, pp. 463-470, 1980.
- [7] K. K. Chawla, *Composite Materials. Science and Engineering*, New York: Springer, 2012.
- [8] H. Y. Liu, N. Claussen, M. J. Hoffman and G. Petzow, "Fracture sources and processing improvements in SiC whisker - reinforced mullite - zirconia composites", *Journal of the European Ceramic Society*, vol. 7, pp. 41-46, 1991.
- [9] R. W. Davidge, *Mechanical Behaviour of Ceramics*. New York: Cambridge University Press, 1979.
- [10] F. Abbe, J. Vincens and J. L. Chermant, "Creep behaviour and microstructural characterization of ceramic matrix composites", *Journal of Materials Science*, vol. 8, pp. 1026-1028, 1989.
- [11] P. D. Shalek, J. J. Petrovic, G. F. Hurley and F. D. Gac, "Hot pressed SiC whisker / Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> matrix composites", *American Ceramic Society Bulletin*, pp. 351-356, 1986.
- [12] D. J. Green, *An introduction to the mechanical properties of ceramics*. Cambridge: Cambridge University Press, 1998.
- [13] H. Bhatt, K. Y. Donaldson, D. P. Hasselman and R. T. Bhatt, "Role of interfacial thermal barrier in the effective thermal diffusivity/conductivity of SiC fiber reinforced RBSN", *Journal of the American Ceramic Society*, vol. 73, pp. 312-316, 1990.
- [14] S. Wu y N. Clausen, "Fabrication and properties of low-shrinkage reaction bonded mullite", *Journal of the European Ceramic Society*, vol. 74, pp. 2460-2463, 1994.

- [15] A. Kristofferson, A. Warren, J. Brandt and R. Lindberg, *Proc. Int. Conf. HTC-MC-1*, Cambridge: Woodhead Pu. Naislain et al (eds) Proc., 1993.
- [16] T. Kodama et al., "Crystal - size control and characterization of Na-4 mica prepared from Kaolinite, *Journal of Materials Chemistry*, vol. 11, pp. 1222-1227, 2001.
- [17] D. Hull, *Fractography*. Cambridge: Cambridge University Press, 1999.
- [18] S. Nourbakhsh and H. Margolin, "Fabrication of continuous ZFA fiber reinforced titanium aluminide intermetallic composite materials", in *Coating solidification of metal matrix composites*, P. Rohatgs, Ed. TMS, 1990, pp. 103-114.
- [19] E. Fitzer and R. Gadow, "Fiber Reinforced silicon carbide", *American Ceramic Society Bulletin*, vol. 65, no. 2, pp. 326-335, 1986.
- [20] E. Fitzer and D. Hegen, "Gasphasenabsecheidung von siliciumcarbid und siliciumnitrid", *Angewandte Chemie International*, vol. 91, pp. 316-325, 1979.
- [21] B. Lawn, *Fracture of brittle solid*. Cambridge: Cambridge University Press, 1993.
- [22] T. M. Besman, B. W. Sheldon, R. A. Lowden and D. P. Stinton, "Vapor - phase fabrication and properties of continuous filament ceramic composites", *Science*, vol. 253, pp. 1104-1109, 1991.
- [23] D. Tabor, *The hardness of metals*. Oxford: Oxford University Press, 2000.
- [24] J. B. Wachtman, *Mechanical Properties of Ceramics*. Oxford: Wiley-Interscience, 1996.
- [25] J. E. French, *Handbook of continuous fiber ceramic composites*. Westerville: American Ceramic Society, 1996.
- [26] P. Greil, "Polymer derived engineering ceramics", *Advanced Engineering Materials*, vol. 339, pp. 52-55, 2000.
- [27] P. Domone y J. Illston, *Construction Materials. Their nature and behaviour*. New York: Spon Press, 2010.
- [28] B. Kaya, X. Gu, L. A. Al - Dawery and E. G. Butler, "Microstructural development of woven mullite fibre - reinforced mullite ceramic matrix composites by infiltration processing", *Science and Technology of Advanced Materials*, vol. 3, pp. 35-44, 2002.

- [29] L. C. de Jonghe and M. N. Rahaman, "Sintering stress of homogeneous an heterogeneous poer compacts", *Acta Metallurgica*, vol. 36, pp. 223-228, 1988.
- [30] L. Longbiao, *Durability of ceramic-matrix composites*. Duxford: Springer, 2020.
- [31] J. F. Varela Jiménez, *Estructura, procesamiento y propiedades de materiales cerámicos*. Barcelona: Universitat Politècnica de Catalunya, 2016.
- [32] Soto and J. Pimentel, "Aplicación de compuestos de matriz cerámica reforzados con residuos", Twelfth LACCEI Latin American and Caribbean Conference for Engineering and Tecnology, Guayaquil, 2014.

## Capítulo 5.

# **MATERIALES COMPUESTOS DE MATRIZ METÁLICA**

---

### **Fernando Delgado Gómez, MSc.**

Magister en Ingeniería. Docente del Programa de Ingeniería Mecánica (Pimec) - Grupo de Investigación en Estudios Aeroespaciales (GIEA). Escuela Militar de Aviación (Emavi) - Fuerza Aérea Colombiana.  
*Correo-e:* fernando.delgado@emavi.edu.co

### **Julián Portocarrero Hermann**

Ingeniero Mecánico. Docente del Programa de Ingeniería Mecánica (Pimec) - Grupo de Investigación en Estudios Aeroespaciales (GIEA). Escuela Militar de Aviación (Emavi) - Fuerza Aérea Colombiana.  
*Correo-e:* julian.portocarrero@emavi.edu.co

#### ***Palabras clave:***

metales, partículas, fibras, espumas metálicas, absorción de energía, propiedades físicas, propiedades mecánicas.

## 5.1. INTRODUCCIÓN

El término MMC (por sus siglas en inglés, *metal matrix composites*), en español CMM (materiales compuestos de matriz metálica), se refiere a los materiales compuestos cuya matriz es de elementos químicos metálicos o compuestos químicos metálicos. Sus refuerzos pueden ser cerámicos, óxidos, o también materiales metálicos. Los refuerzos tienen distintas geometrías, que se pueden observar en la Figura 64.

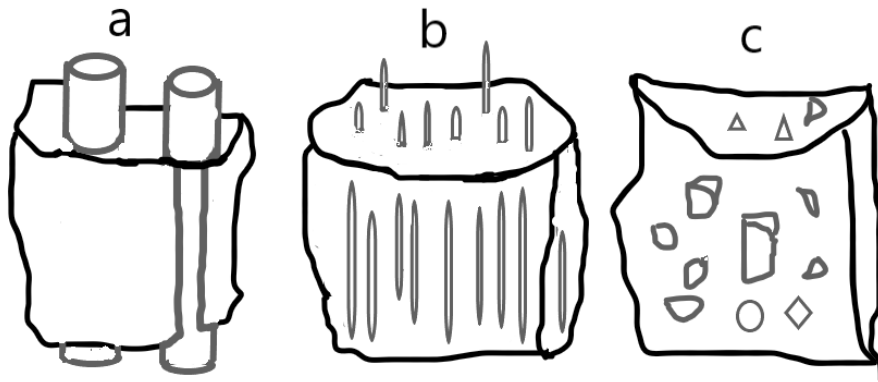


Figura 64. Geometrías de refuerzos para materiales compuestos de matriz metálica.

a) Fibras continuas. b) Fibras cortas (whiskers). c) Partículas. Fuente: adaptada de [1].

Los materiales metálicos se caracterizan por tener valores relativamente altos de módulo de elasticidad y al mismo tiempo tener una buena tenacidad de fractura, límite de fluencia y resistencia mecánica [2]. Sin embargo, presentan temperaturas de trabajo relativamente bajas (especialmente aquellos metales de mayor uso y menor costo) en comparación con los materiales cerámicos. Para determinadas aplicaciones en las que el uso de matrices metálicas conlleva ciertas ventajas, la incorporación de refuerzos de naturaleza cerámica (tales como partículas o fibras cerámicas) mejora notablemente el comportamiento a alta temperatura de los metales, posibilitando su uso en aplicaciones donde la exigencia térmica sea mayor [2].

Los procesos usados para su fabricación dependen del estado inicial del metal que constituye la matriz metálica. Cuando se parte de un metal en



estado líquido se aplican los procesos como la fundición y la infiltración. Los metales que se encuentran en estado sólido (polvos) se someten a procesos de sinterizado, o prensado en caliente, y para el caso de estado semisólido, se utiliza el compo-casting. Los metales en estado gaseoso se depositan por medio de deposición de vapor, atomización y electrodeposición [3].

## **5.2 COMPONENTES DE LOS MATERIALES COMPUESTOS DE MATRIZ METÁLICA (MMC)**

### *5.2.1 Metales utilizados como matriz*

Algunos de los metales más utilizados en las matrices son las aleaciones de aluminio (Al), de magnesio (Mg) y de titanio (Ti), aunque el uso de hierro, acero y otros metales se ha vuelto frecuente. El aluminio es el metal más utilizado, debido a que es ligero y más barato que el magnesio y titanio. Su comportamiento frente a la oxidación es mejor que el del magnesio, ya que se oxida la superficie y el óxido es tan compacto que impide que progrese la oxidación (pasivado). El titanio tiene una densidad superior a la del magnesio y el aluminio, pero tiene una alta temperatura de fusión que permite utilizarlo en entornos hipertérmicos. Su principal desventaja es el precio. El magnesio destaca por ser el de menor densidad y sus propiedades mecánicas son buenas, pero es necesario protegerlo frente a la oxidación [4].

### *5.2.2 Materiales utilizados como refuerzos*

Las matrices metálicas se refuerzan con frecuencia mediante fibras continuas. Las fibras de materiales metálicos son poco utilizadas por su tendencia a sufrir un ataque químico desde la matriz metálica, por variar su microestructura a alta temperatura, y por su tendencia a la oxidación. Esto hace que metales refractarios (muy estables en temperaturas altas), como el W, Nb o el Mo, no sean utilizados. En cambio, se usan con mucha frecuencia fibras continuas fabricadas en materiales cerámicos, como el carburo de silicio (SiC), y la alúmina ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ). También se utiliza el Boro (B), que es un material metaloide. Los tres materiales tienen propiedades muy sobresalientes: no se disuelven en las matrices, tienen baja densidad, alto módulo de rigidez que conservan en altas temperaturas, y no se oxidan [3]. Las fibras continuas

se fabrican en diámetros de 6  $\mu\text{m}$  a 150  $\mu\text{m}$  y sus longitudes pueden alcanzar varios metros (no hay límite establecido). Estas fibras ocupan fracciones de 40 % a 70 % del volumen total del compuesto [5].

El refuerzo en forma de partículas también se utiliza en las matrices metálicas. Esta geometría ofrece una ventaja frente a las fibras, y es que permite obtener compuestos de comportamiento isotrópico (iguales propiedades mecánicas en todas las direcciones). Los materiales empleados en ellas son óxidos y cerámicos, como el carburo de titanio  $\text{TiC}$  y el carburo de boro  $\text{B}_4\text{C}$ . Otros óxidos utilizados son la sílice ( $\text{SiO}_2$ ), dióxido de titanio ( $\text{TiO}_2$ ), dióxido de circonio ( $\text{ZrO}_2$ , con sobresaliente resistencia a la propagación de fracturas), óxido de magnesio ( $\text{MgO}$ , refractario) y nitruro de silicio [3]. También se utilizan compuestos intermetálicos para reforzar matrices Al-Ni (aluminio-níquel) y Fe-Ni (hierro-níquel). Su porcentaje parcial del volumen es del 5 % al 75 % [5].

La utilización de partículas como refuerzo requiere una cuidadosa selección y control de diámetros y morfología para poder obtener materiales de propiedades satisfactorias.

Los refuerzos con fibras discontinuas (whiskers) también se utilizan en materiales compuestos de matriz metálica. Se comercializan en diámetros de 1  $\mu\text{m}$  a 6  $\mu\text{m}$  y pueden tener una longitud de 10  $\mu\text{m}$  a 500  $\mu\text{m}$ , lo que permite clasificarlos como discontinuos. Ocupan una fracción de volumen total de 10 % al 30 % [5]. Materiales usados en estos refuerzos son el carburo de silicio y nitruro de silicio. Es importante tener en cuenta que estos tipos de refuerzos han sido objeto de restricción por sus efectos adversos en la salud humana [3].

### **5.3 Propiedades físicas y mecánicas de los materiales compuestos de matriz metálica (MMC)**

La razón de ser de los materiales compuestos es la obtención de propiedades mecánicas y físicas que combinen, tanto las buenas características del material de la matriz, como las de los materiales de los refuerzos. Los compuestos de matriz metálica han tenido también éxito en aplicaciones tecnológicas e industriales, porque han logrado combinar propiedades sobresalientes de sus materiales constitutivos.

En la Tabla 4 se resumen las propiedades físicas y mecánicas relevantes de los metales más utilizados como matrices en materiales compuestos.

**Tabla 4. Propiedades físicas y mecánicas de metales comunes utilizados como matriz en materiales compuestos. Fuente: [3].**

Propiedades	Materiales		
	Aluminio	Magnesio	Titanio
Punto de fusión (°C)	660	650	1 660
Densidad (g/cm <sup>3</sup> )	2,7	1,7	4,5
Conductividad eléctrica (%IACS)	64	38	4
Resistividad eléctrica (μΩ*cm)	2,67	4,2	42
Conductividad térmica (0-100 °C) W/m*°K	237	156	21,9
Coefficiente de expansión lineal	23,5	26	8,9
Dureza (HV)	21-48	30-45	Recocido =60
Coefficiente de Poisson	0,345	0,291	0,361
Resistencia a la tracción (MPa)	50-195	185-132	230-460
Limite elástico (MPa)	10-170	69-100	Recocido =145-250
Modulo elástico (GPa)	70,6	44,7	120,2

En la Tabla 5 se exponen algunas propiedades físicas y mecánicas generales de algunos materiales de matriz metálica y de los refuerzos cerámicos utilizados.

La forma del refuerzo influye en la propiedades físicas y mecánicas. La Tabla 6 muestra valores típicos de propiedades físicas y mecánicas de matrices metálicas reforzadas con partículas. Se destaca su comportamiento isotrópico.

La Tabla 7 muestra valores típicos de propiedades físicas y mecánicas de matrices metálicas reforzadas con fibras continuas. Se destaca su comportamiento anisotrópico.

**Tabla 5. Propiedades físicas de matrices y de refuerzos cerámicos utilizados.**

Fuente: adaptada de [5].

Matrices		Propiedades sobresalientes	
Metales	Buena tenacidad		
Aluminio	Buena conductividad eléctrica.	Buena conductividad térmica.	
Magnesio	Baja densidad.	Resistencia al calor.	
Titanio	Alto punto de fusión.	Fácil de procesar.	
Refuerzos		Propiedades sobresalientes	
Cerámicos	Alto módulo de rigidez.	Buena dureza y buena resistencia al desgaste.	
SiC	Alta dureza, resistencia al choque térmico.		
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Bajo coeficiente de expansión térmica.		
C, B <sub>4</sub> C	Fácil de producir en diversas geometrías (fibras, partículas).		

**Tabla 6. Propiedades físicas y mecánicas de los materiales compuestos de matriz metálica reforzados con partículas. Fuente: adaptada de [5].**

Propiedad	Comportamiento / Valor
Comportamiento mecánico.	Isotrópico.
Resistencia al desgaste.	Alta.
Densidad (baja).	2,6 g/cm <sup>3</sup> -3,1 g/cm <sup>3</sup>
Módulo de elasticidad.	90 GPa -300 GPa.
Resistencia a la tracción.	300 MPa-1000 MPa.
Buena conductividad térmica.	120 W/(m *K°)-200 W/(m *K°).
Coeficiente de expansión térmica.	7 -20 *10 <sup>-6</sup> /K.

**Tabla 7. Propiedades mecánicas y físicas relevantes para materiales compuestos de matriz metálica reforzados con fibras continuas. Fuente: adaptada de [5].**

Propiedad	Comportamiento / Valor
Comportamiento mecánico.	Anisotrópico.
Densidad (baja).	1,8 g/cm <sup>3</sup> -3,1 g/cm <sup>3</sup> .
Módulo de elasticidad.	120 GPa-300 GPa.
Resistencia a la tracción.	500 MPa-2000 MPa.
Buena conductividad térmica.	120 W/(m *K <sup>o</sup> )-200 W/(m *K <sup>o</sup> ).
Coefficiente de expansión térmica.	0 -10 *10 <sup>-6</sup> /K.

#### 5.4 Interfase Matriz metálica-refuerzo

Un factor fundamental en la obtención de las propiedades mecánicas y físicas necesarias es la interacción entre los refuerzos y la matriz. En el proceso de fabricación se debe asegurar una buena mojabilidad de los materiales de refuerzo para que toda su área externa esté en contacto con la matriz y durante su servicio los esfuerzos se transmitan desde la matriz a los refuerzos [3]. Igualmente, debe existir una reacción química entre los refuerzos y la matriz, que asegure una interfaz de cohesión. Sin embargo, esta reacción debe ser moderada y ocurrir solo durante el proceso de fabricación, sin continuar durante la vida en servicio del material compuesto. Una excesiva reactividad entre refuerzo y matriz generará degradación y pérdida de propiedades en el material. La alta temperatura no debe promover reacciones entre la matriz y el refuerzo. En aplicaciones electrónicas no debe existir una excesiva diferencia entre el coeficiente de expansión térmica de la matriz y el correspondiente del refuerzo cuando las temperaturas van a ser excesivamente altas [3].

#### 5.5 PROCESOS DE MANUFACTURA

Los métodos de fabricación de materiales compuestos de matriz metálica utilizados en la actualidad son sorprendentemente variados, a pesar de

la complejidad inherente a estos materiales. Como ejemplo se hará un breve recorrido por los métodos de producción de los compuestos de matriz metálica basados en titanio (Ti) realizado por Hayat et al [6]. Algunos elementos de máquinas pertenecientes a aviones de combate y de transporte y vehículos espaciales basados en titanio reforzado por fibras continuas, fibras discontinuas, nano fibras y nanopartículas, son cada vez más comunes (alabes de turbina, componentes de trenes de aterrizaje), como se puede constatar en las aeronaves de combate F-22 “Raptor” y F-35 “Lightning II”. A continuación, se explicarán brevemente algunos de los métodos de producción utilizados frecuentemente en materiales compuestos de matriz de titanio con refuerzos de fibras continuas largas y con refuerzos discontinuos (partículas o fibras cortas).

### 5.5.1 Técnicas de laminado sucesivo

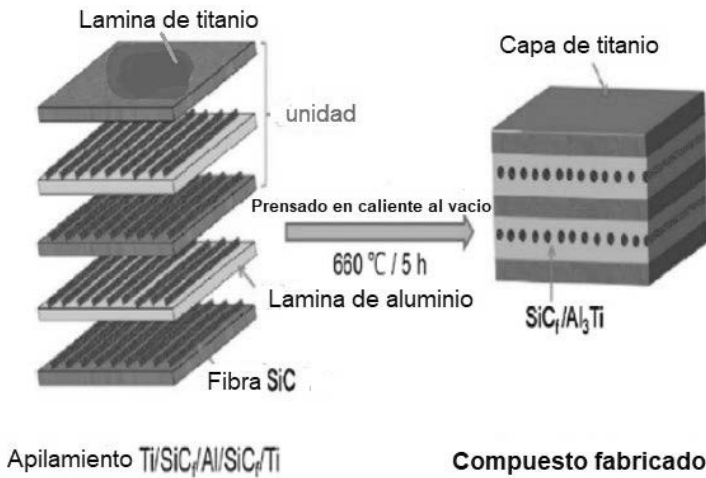
Este proceso, que hace uso de folios (hojas) y telas colocadas sucesivamente una sobre otra, fue de los primeros métodos en aplicarse. Las hojas utilizadas son de titanio (material de matriz) y se alternan con telas tejidas de material de refuerzo con espesores típicos de 0,1- 0,15 mm. Estas capas sucesivas se conforman por prensado isostático al calor o prensado en caliente al vacío, para consolidar un material compuesto [6]. Tienen el inconveniente relacionado con el alto costo de producción de los folios de titanio y de las telas de refuerzo, además de no ser apto para producir elementos de formas variadas y complejas, factores que limitan bastante su aplicación en la actualidad [6]. Se utiliza en compuestos con refuerzo de fibras continuas.

Un esquema de proceso de laminado sucesivo se muestra en la Figura 65, en el cual se apilan láminas de aluminio y de titanio y capas con fibras cerámicas, prensadas en caliente al vacío, para configurar compuestos de matriz metálica [6].

### 5.5.2 Aplicación de material por plasma inducido

En este método se esparce material metálico en partículas fundidas y dispersadas (*spray*) por acción de un generador de plasma de radio frecuencias [6]. Entiéndase la palabra plasma como un gas ionizado, pudiendo ser desde parcialmente ionizado hasta totalmente ionizado [7]. Este plasma

contiene al material que conformará la matriz, y se deposita sobre formas cilíndricas (tambores) de fibra previamente conformados, generándose así el recubrimiento de las fibras (refuerzo) por la matriz (partículas metálicas). Se puede utilizar para cualquier matriz metálica (aleaciones o metales puros), pero requiere un muy buen control de la composición del metal que conformará la matriz. Es una técnica muy útil para producir mono cintas de material compuesto de matriz metálica [6]. Se utiliza en compuestos con refuerzo de fibras continuas.



**Figura 65.** Esquema explicativo de la producción de materiales compuestos de matriz metálica por apilamiento sucesivo de capas metálicas y fibras de refuerzo.

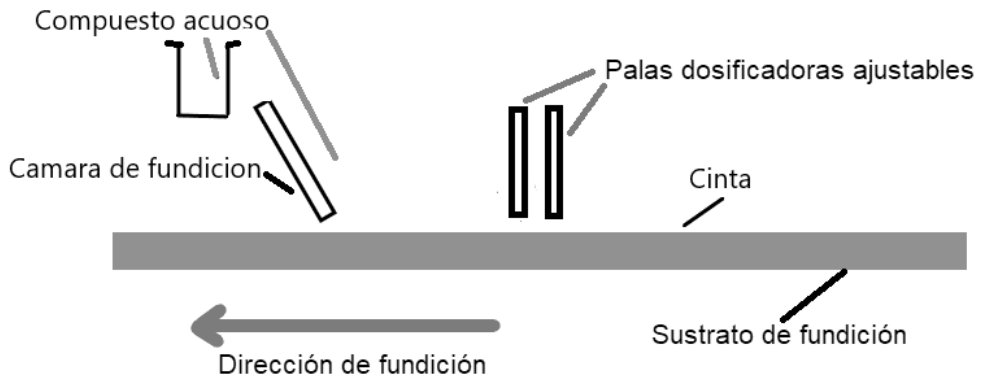
**Fuente:** adaptada de [6].

### 5.5.3 Aplicación física de material por vapor

En este método se utiliza un haz de electrones o campos magnéticos para vaporizar materiales metálicos y depositarlos sobre fibras [6]. En ambos casos se obtienen monocintas compuestas con excelente distribución de la fibra. El espesor de la película depositada determina la fracción de volumen de refuerzo, que puede llegar al 80 %. Este método permite también obtener componentes de geometrías complejas [6]. Se utiliza en compuestos con refuerzo de fibras continuas.

#### 5.5.4 Fundición sobre cinta

Un compuesto acuoso (lodo) es preparado incorporando el material que va a funcionar como matriz (polvo metálico), y añadiendo aditivos de tipo polímero en un solvente orgánico [6]. Este lodo se dosifica sobre un sustrato (material de refuerzo, cinta de refuerzo), cubriéndolo e impregnándolo con el futuro material de matriz. El proceso se controla por medio de una banda transportadora plana, que le proporciona el avance a la cinta de refuerzo, mientras es impregnada por el lodo en su superficie. El espesor y cantidad de lodo aplicado se controla por medio de hojas metálicas dosificadoras ajustables, las cuales distribuyen el lodo sobre la cinta [6]. La Figura 66 ilustra las generalidades de este proceso. Los tramos de cintas sin acabado final se cortan en tamaños y formas adecuados para, posteriormente, pasar a un proceso de pre-quemado que busca eliminar los aditivos de las cintas. Finalmente, se someten las cintas a presión y alta temperatura para obtener un material homogéneo. Este proceso requiere de adecuado control al ingreso de contaminantes que puedan reaccionar con la matriz metálica, especialmente si esta se compone de titanio [6]. Se utiliza en compuestos con refuerzo de fibras continuas.



**Figura 66.** Esquema explicativo para el proceso de producción de materiales compuestos de matriz metálica con base en impregnación de cintas.

Fuente: adaptada de [6].



### 5.5.5 Metalurgia de polvos

La metalurgia de polvos se utiliza en fabricación de compuestos de titanio reforzados con partículas o fibras discontinuas. El polvo metálico y los refuerzos (partículas o fibras cortas) se mezclan, buscando la mayor dispersión del refuerzo y buena homogeneidad de la mezcla. La selección intencional de refuerzos con forma y tamaños específicos y su buena dispersión dentro de la matriz determinarán en buena medida el óptimo desempeño del material compuesto obtenido. La metalurgia de polvos se divide en procesos *ex situ*, que implican la adición de reforzantes cerámicos (de buena estabilidad termodinámica, que no reaccionarán con la matriz en la fase de sinterizado) como SiC, TiC, TiB, ZrC, y por lo tanto conservarán la geometría de las partículas de refuerzo, o el proceso *in situ* en el cual se produce una reacción química entre las partículas y la matriz, generando cambios en su tamaño y nuevos compuestos. La pulvimetalurgia *in situ* ofrece una mejor adherencia entre las partículas y la matriz, mayor isotropía, mejor desempeño tribológico y mayor módulo de resistencia específica que la pulvimetalurgia *ex situ*. Sin embargo, el proceso *in situ* requiere de mayor control de variables de proceso (temperaturas y tiempos) que eviten reacciones químicas que generaran defectos interfaciales. La Figura 67 ilustra las generalidades de este proceso.

### 5.5.6 Manufactura aditiva

Recientemente la manufactura aditiva (impresión 3D) se ha consolidado como un proceso de fabricación de componentes sólidos de geometrías complejas, muy versátil, dada su eficiente interacción con programas de modelamiento mecánico y software especializado en diseño y manufactura. Este proceso, inicialmente muy ligado al desarrollo de materiales poliméricos, ha evolucionado hasta el punto de poder realizar fabricación de elementos por aplicación sucesiva de delgadas capas metálicas obtenidas de la fusión de polvos metálicos, o también aplicación de materiales cerámicos como el óxido de zirconio ( $ZrO_2$ ), la alúmina ( $Al_2O_3$ ) en forma de capas [8]. En este sentido, la manufactura aditiva de materiales compuestos de matriz metálica es un método de manufactura muy prometedor hacia el futuro.

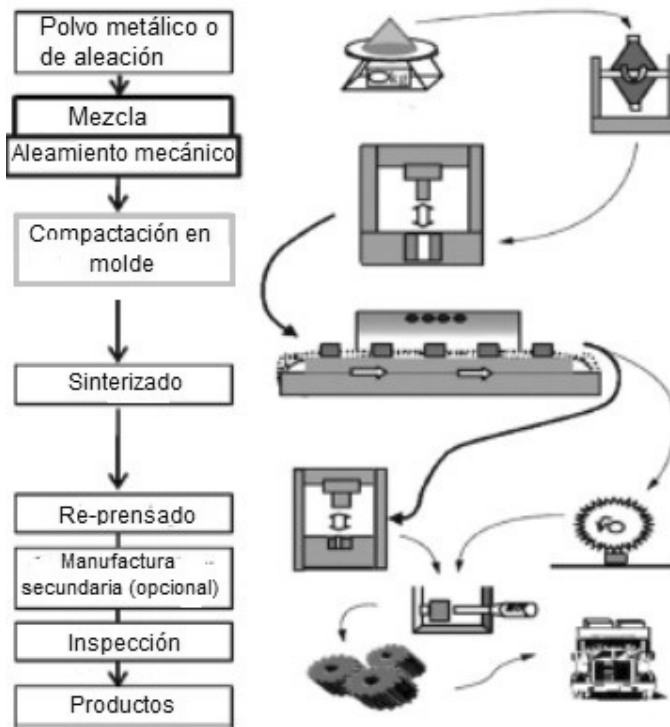


Figura 67. Flujograma de proceso de pulvimetalurgia para producción de materiales compuestos de matriz metálica. Fuente: adaptada de [6].

## 5.6 APLICACIONES DE LOS MATERIALES COMPUESTOS DE MATRIZ METÁLICA

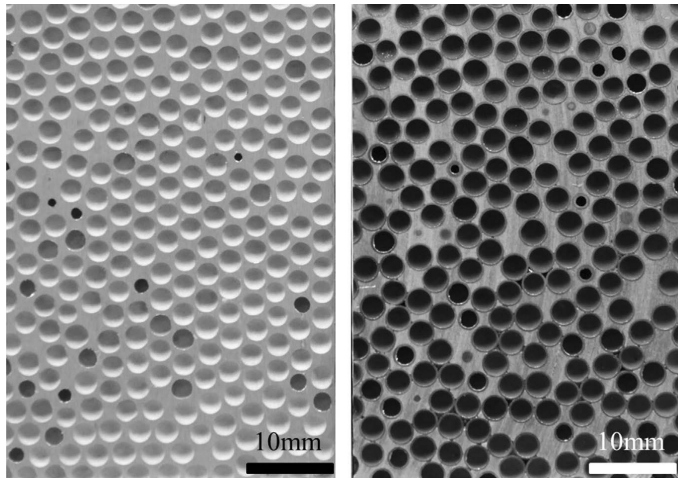
### 5.6.1 Escudos contra rayos gamma

Los rayos gamma hacen parte de la llamada radiación electromagnética, producida por la desintegración radioactiva de los núcleos atómicos [9]. Se ha detectado este tipo de radiación en el espacio interestelar, y también en la atmósfera terrestre, por medio de satélites y telescopios espaciales. Su origen en el espacio interestelar no se ha definido completamente. Se cree que la radiación gamma puede originarse en el nacimiento de una estrella o cuando una estrella tipo supernova explota. También se le asocia a actividad en los agujeros negros. Esta radiación no llega a la tierra constantemente y ha

sido detectada por el telescopio espacial Fermi [10]. Lo relevante en los rayos gamma es la gran cantidad de energía que transmiten. La frecuencia de estas radiaciones puede alcanzar  $10^{20}$  Hz y sus energías son del orden de 100 kilo electronvoltios. Tienen una longitud de onda inferior a  $3 \times 10^{-13}$  m que es muy inferior al diámetro de un átomo [9]. En la Tierra podemos observar fuentes naturales de rayos gamma en las interacciones de los rayos cósmicos con la atmósfera o más raramente en las tormentas eléctricas [9]. También estas radiaciones son producidas artificialmente por el ser humano con algunos desarrollos de tecnología (aplicaciones médicas). Los rayos gamma representan un gran peligro para el ser humano y los seres vivos, ya que afectan gravemente a las células, produciendo mutaciones genéticas o la muerte [9]. Los rayos gamma pueden afectar al ser humano o a los equipos (sondas espaciales) en futuros viajes o misiones interplanetarias. Incluso, se plantea que una de las extinciones masivas de seres vivos hace 443 millones de años fue causada por una emisión de rayos gamma desde nuestra propia galaxia (vía láctea). Esa emisión de altísima energía generó reacciones químicas en los gases de la atmósfera terrestre, que disminuyeron el contenido de ozono, causaron aumento de radiación ultravioleta y, a la vez, enfriamiento de la tierra, llevando a muchos seres vivos a la extinción [11].

Los rayos gamma se utilizan en aplicaciones médicas especiales, como lo es el tratamiento del cáncer. Por medio de tecnología médica especializada se utiliza la capacidad de los rayos gamma para afectar y degradar células, exponiendo tumores malignos a la radiación gamma, para eliminar, de forma muy controlada, las células cancerígenas. También se utilizan en la desinfección de superficies, por su capacidad para matar microorganismos. Al usar estas tecnologías, se requiere que el personal médico y otros pacientes no queden expuestos innecesariamente a los rayos gamma, porque se afectarían sus células sanas y su salud. Por esta razón, se requieren barreras protectoras instaladas en los equipos o en cercanías de los espacios en donde los equipos funcionan. Estas barreras se pueden fabricar en hormigón o en metales como el plomo. Las barreras se caracterizan, principalmente, por el espesor que deben tener para detener mínimo el 50 % de la radiación. Las barreras fabricadas en plomo tienen 1 cm de espesor, y las de hormigón 6 cm [9].

Un campo de aplicación de los materiales compuestos de matriz metálica es su utilización como escudos aisladores frente a rayos gamma, aprovechando la ventaja de su bajo peso con relación a los altos espesores que normalmente se requieren en esta aplicación. Se han desarrollado investigaciones para conocer la efectividad de los MMC espumados, como escudos de protección frente a radiación gamma. La geometría interna de las espumas se clasifica en dos tipos: de poros abiertos y de poros cerrados. Los poros abiertos no están completamente encapsulados y quedan intercomunicados entre sí. Un material fluido puede ser inyectado, penetrando por un poro exterior y distribuyéndose en cavidades interiores (poros). Las espumas de poros cerrados están hechas de cavidades completamente cerradas. Cada poro está rodeado por el material de la matriz, entonces un fluido como el agua o aire húmedo no pueden circular por dentro del material espumado [12]. Una imagen de matrices metálicas espumadas de poros cerrados se muestra en la Figura 68.



**Figura 68.** Corte seccionado de espuma de poros cerrados. La mayoría de poros se encuentran separados entre sí. Fuente: [13].

En investigaciones realizadas por Shen, Bourham y Rabiei, de la facultad de Ingeniería Aeroespacial y del Laboratorio de Energía Nuclear de la Universidad de Carolina del Norte, se utilizaron metales espumados para

estudiar su efectividad como escudos contra rayos gamma [13]. A continuación se explica el procedimiento y resultados más relevantes de esta investigación. Matrices de aleación de aluminio y de acero, con distintos tipos materiales de relleno para los poros, fueron examinadas. Las cavidades, en el caso de espumas de poros cerrados, se producen cuando en el proceso de fabricación por pulvimetalurgia/sinterizado, o por fundición, se incluyen esferas huecas, que quedan inmersas en la matriz metálica. En la investigación citada, polvo de acero inoxidable 316L como material de la matriz, se introdujo en un molde junto con las esferas huecas de acero. El material de la matriz (polvo de acero 316L) y las esferas fueron sometidas a vibración (20 Hz) por un periodo de 50 minutos para obtener un buen grado de contacto entre las esferas y la matriz de polvo. Posteriormente se sinterizó a 1 200 °C en una prensa de vacío. Las matrices espumadas de Al 356 con esferas de acero se obtuvieron por medio de fundición por gravedad. Las esferas huecas fueron puestas dentro de un molde y calentadas a 700 °C dentro de un horno [13]. A continuación se vació la colada de aluminio también a 700 °C, permitiendo que se enfriara a temperatura del recinto. Estas muestras se produjeron en tres espesores: 2 g/cm<sup>2</sup>, 5 g/cm<sup>2</sup> y 10 g/cm<sup>2</sup>, para cada tipo de espuma, y su desempeño fue comparado con placas de aluminio 356 macizas de iguales espesores. Las muestras de material compuesto espumado de poros abiertos se empaquetaron dentro de cajas metálicas de bajo espesor, fabricadas en aluminio 6061. Las matrices de poro abierto fueron previamente fabricadas por la empresa EG Aerospace Corporation, en aluminio 6061T6, con una cantidad promedio de cinco poros por pulgada lineal. Los tres materiales de relleno para los poros fueron cera de parafina, polietileno y agua [13]. Las cajas metálicas usadas se muestran en la Figura 69.

Las espumas se introdujeron dentro de las cajas, ensamblando primero la tapa de fondo. Luego se precalentó el conjunto espuma-caja para introducir en cada caso polietileno líquido a 120 °C y cera de parafina a 100 °C. Estas muestras se obtuvieron también para los tres espesores 2 g/cm<sup>2</sup>, 5 g/cm<sup>2</sup> y 10 g/cm<sup>2</sup> [13]. En la Figura 70 se observan las muestras de espumas de poro cerrado utilizadas y la muestra de aluminio macizo usada como referencia para comparar su capacidad como escudos de protección.

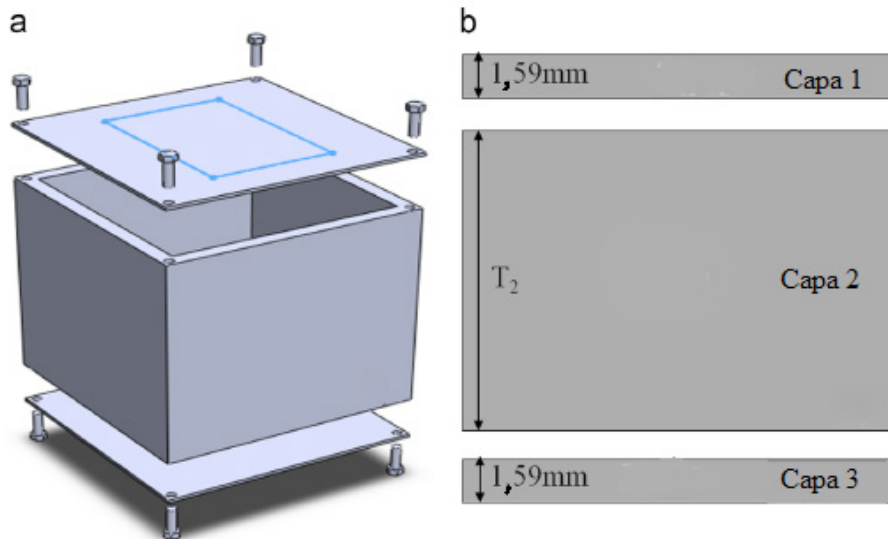


Figura 69. Cajas metálicas utilizadas para contener los líquidos infiltrados dentro de las espumas metálicas de poro abierto. Fuente: adaptada de [13].

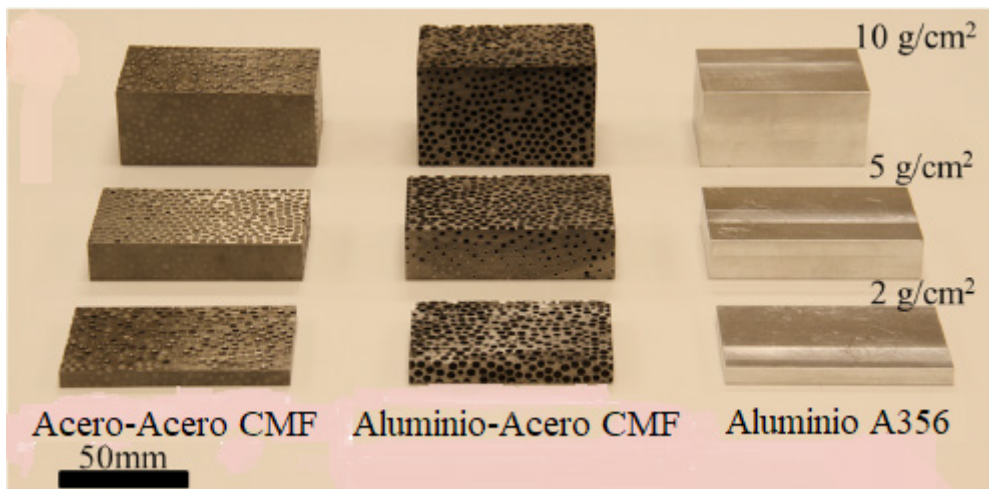
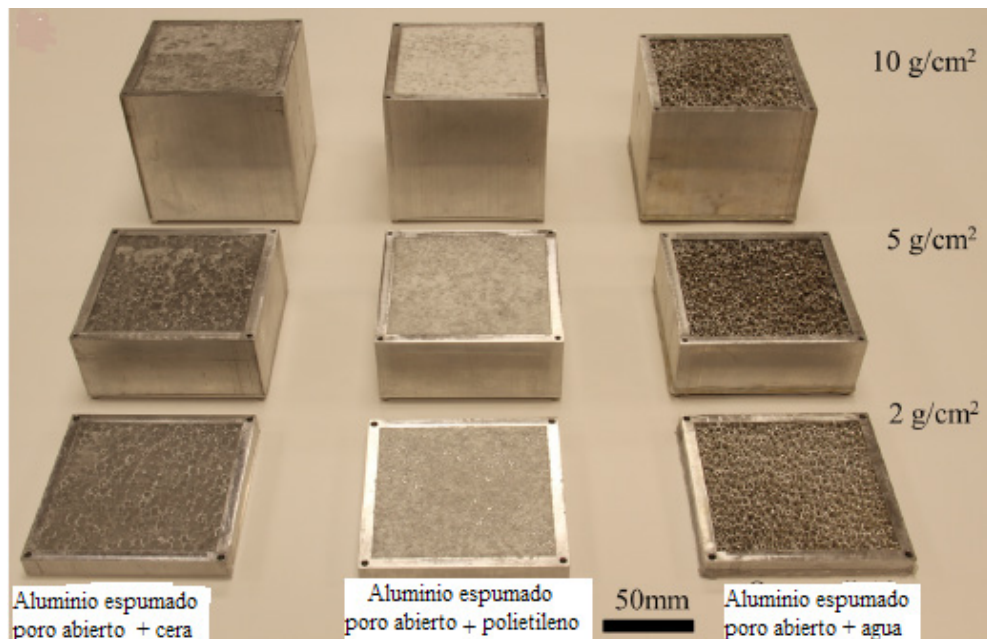


Figura 70. Espumas de poro cerrado y placas de aleación de aluminio macizo probadas. Se aprecia tres espesores distintos para cada material. Fuente: adaptada de [13].

Las muestras de espumas de poro abierto infiltradas con agua, polietileno y cera de parafina se observan en la Figura 71.



**Figura 71.** Espumas de poro abierto infiltradas con distintas sustancias. Cada una se produjo en tres distintos espesores. Fuente: adaptada de [13].

Muestras con distintos espesores fueron expuestas a radiación gamma de 0,06 MeV, 0,662 MeV, 1,173 MeV y 1,3 MeV. Se observó cómo tendencia general que el desempeño de las espumas de poro cerrado fue superior al de las espumas de poro abierto, al aplicarse como escudos protectores contra la radiación gamma. Las espumas de poro cerrado ofrecieron mejor protección contra radiación gamma que el aluminio 356 macizo, para energías menores a 0,662 meV. El coeficiente de atenuación de masa fue superior en un 400 % para espuma de poro cerrado acero-acero y 300 % para espuma poro cerrado acero-acero con relación al aluminio macizo 356 [13]. Puede definirse el coeficiente de atenuación másica como la proporción de fotones que viajan en haz, que desaparecen por una unidad de longitud dividida entre la densidad del material absorbente [14]. Este estudio indicó el buen potencial que tienen las espumas metálicas compuestas como escudos contra rayos gamma, al ser un material liviano y efectivo, ofreciendo una alternativa frente a materiales pesados utilizados en esta aplicación.

### 5.6.2 Sistemas de protección balística

Una aplicación de los compuestos de matriz metálica que ha ganado mucho interés en la última década es la producción de sistemas de protección balística y sistemas de protección contra onda explosiva que incorporan barreras producidas en metales espumados. La combinación de una matriz metálica que es relativamente resistente e incorpora una gran cantidad de poros dentro de sí, hacen que sea sobresaliente en cuanto a su relación resistencia/peso y, además, tenga especiales cualidades para deformarse y absorber energía que procede de onda explosiva o de impacto de munición.

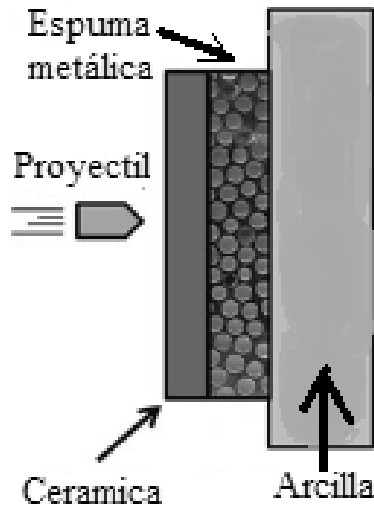
En un sistema de protección balística, con frecuencia se utiliza una primera capa de tipo cerámico, que es la encargada de desacelerar, fragmentar y deformar el proyectil. Las segundas capas están compuestas por matrices de tipo polimérico reforzadas con fibra de aramida, y son más blandas. Estas capas absorben la energía cinética restante y detienen los fragmentos de proyectil atrapándolos entre ellas [15].

García-Ávila et al. [15] probaron espumas metálicas de matriz de acero inoxidable 316L reforzadas con esferas huecas de acero de 2 mm de diámetro, frente al impacto de municiones tipo 7,62 x 51 mm M80 y 7,62x63 mm M2 AP. A continuación se explican los aspectos generales de esta investigación.

Se aplicó un proceso de pulvimetalurgia para obtener una matriz de acero reforzada, con esferas huecas, también fabricadas en acero, que después de un proceso de sinterización hacen el papel de poros, reduciendo peso en la matriz. Las placas tuvieron un área frontal de 30 cm x 30 cm y estuvieron cubiertas por una capa cerámica de carburo de boro. Los espesores totales de las placas fueron de máximo 25 mm. La configuración de capas de blindaje se aprecia en la Figura 72. Se midieron las velocidades de impacto con un cronógrafo balístico.

Se sometieron las placas a impactos tipo III y IV, especificados en la norma para blindajes personales NIJ 0101.06 [16]. Todos los impactos tipo III (velocidades de impacto entre 578,8 m/s– 853,1 m/s) y munición 7,62 mm x 51 mm con núcleo de plomo antimonio y camisa de bronce, fueron detenidos completamente por la placa [15]. Lo mismo ocurrió con los impactos tipo IV con velocidades de 861,7 m/s– 869 m/s y munición de acero endurecido.

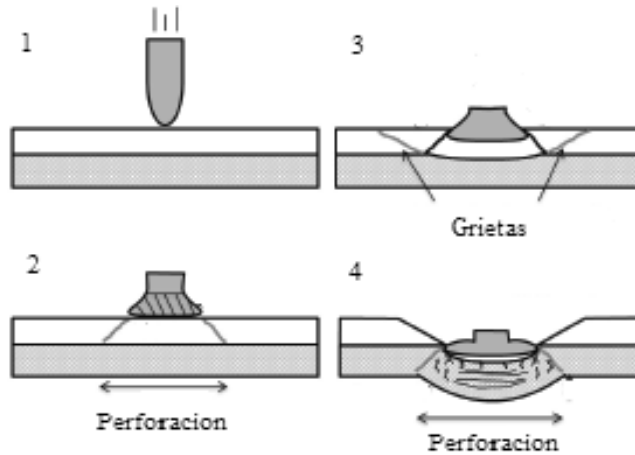




**Figura 72. Disposición de capas de blindaje utilizadas para evaluar su resistencia al impacto de proyectiles. Fuente: adaptada de [15].**

La Figura 73 muestra las fases del impacto de un proyectil y su efecto sobre cada capa de blindaje. En la imagen 1 el proyectil hace contacto con la placa cerámica. En la imagen 2 la placa cerámica aplana y deforma la punta del proyectil, disminuyendo su energía cinética y aumentando su resistencia al avance dentro del blindaje. El proyectil fractura la placa cerámica. Además, que la onda de tensión reflejada genera grietas radiales alrededor del punto de impacto (imagen 3). En la última imagen se observa que la espuma metálica sufre deformación plástica que detiene completamente al proyectil deformado y erosionado, sin que logre atravesar al blindaje.

Las pruebas demostraron la capacidad de las espumas metálicas para absorber energía de impactos balísticos. En los impactos tipo III la espuma absorbió más del 75 % de la energía cinética del proyectil, a través de deformación plástica, y la capa cerámica aplastó y erosionó la punta del proyectil. En los impactos tipo IV las espumas mostraron un aumento en su capacidad de absorción de energía cinética. Se logró también erosionar y fracturar totalmente el núcleo de acero endurecido de los proyectiles [15].



**Figura 73.** Descripción gráfica de las etapas del impacto del proyectil contra el sistema de blindaje. Fuente: adaptada de [15].

### 5.6.3 Sistemas de protección contra onda explosiva

Uribe Peláez [17] define la explosión como un fenómeno que resulta de una liberación súbita de energía. La tasa de liberación de la energía está gobernada por la velocidad de detonación, la cual, para explosivos de alto rendimiento, es del orden de  $8 \text{ mm}/\mu\text{s}$ , o de  $8 \text{ km/s}$ . La magnitud de esta velocidad es bastante alta si se compara con la velocidad del sonido en el aire, que es de  $0,33 \text{ km/s}$ . La fuente de esta energía puede provenir de explosivos como pólvora o TNT, pero también de reacciones nucleares no controladas o de recipientes que contengan fluidos a alta presión, que sean liberados a causa de una falla mecánica del material del recipiente [17]. Un explosivo es definido como un material que es capaz de producir una explosión mediante su propia energía, y todos los explosivos poseen esta característica. Además, producen calor, y en su mayoría, también gases. El gas es el principal mecanismo con el que un explosivo transfiere trabajo a sus alrededores [17].

Gutiérrez, Vasquez y Oñoro [18] refieren que las espumas de aluminio son muy porosas. La distribución de los poros dentro de la estructura es aleatoria. Los poros ocupan del 50 % al 90 % del volumen total. Sus densidades están entre  $0,4 \text{ g/cm}^3$  a  $0,8 \text{ g/cm}^3$ . Ofrecen ventajas como su facilidad

de reciclaje y su bajo impacto contaminante. Las espumas de aluminio son muy eficientes al absorber energía de impacto, ya que su velocidad de deformación es casi constante para distintas velocidades de aplicación de carga. Su comportamiento isotrópico hace que la energía mecánica recibida se disperse por igual en todas las direcciones. Durante el impacto los poros sufren compresión y colapso, amortiguándolo. De esta forma disipan la energía de choque [18].

En Colombia se conoce la presencia de minas antipersona, instaladas en los campos de muchos municipios del país, por grupos al margen de la ley. En el año 2013 se registraba a Colombia como el tercer país con mayor número de minas antipersona instaladas, después de Camboya y Afganistán [17]. Desde el año 1990 hasta el 2013 Colombia registro 10 272 víctimas de minas antipersona, de las cuales casi el 60 % fueron militares. La población civil también se vio bastante afectada, al registrarse 1 011 niños y niñas víctimas de estos artefactos explosivos [19]. Por esta razón se hace necesario que personal militar o civil especializado realice la búsqueda, detección, desactivación y extracción de estos artefactos. La vida de este personal estará en riesgo durante las labores de desactivación y extracción de estos artefactos, si se activan los explosivos manipulados. Los sistemas de protección antiexplosivos, bien sean trajes reforzados, blindajes de vehículos o de estructuras, son una estrategia fundamental para prevenir heridas y/o muertes dentro del personal que manipula y desactiva los explosivos.

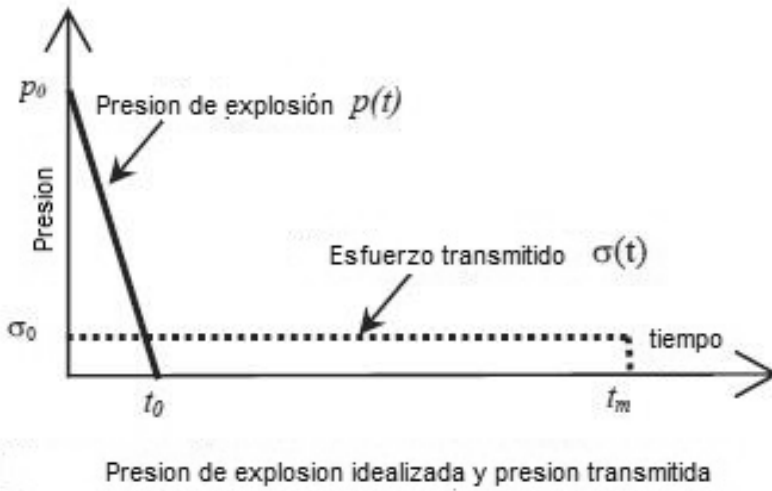
Investigadores de la Universidad de Adelaida, en Australia, han desarrollado estudios acerca de la protección de estructuras frente a cargas explosivas. Han trabajado en el análisis del comportamiento de losas de concreto reforzado, frente a cargas explosivas [20]. Dentro de estas investigaciones se han hecho pruebas utilizando una placa de aluminio espumado como refuerzo sobre la superficie de la losa. Aunque las espumas metálicas utilizadas no incorporaron ningún refuerzo (solo poros ocupados por aire) que permitan afirmar que son un material compuesto, se expondrá a continuación su comportamiento mecánico, para explicar su potencial como materiales adecuados para aplicaciones en donde se requiere absorción de cargas de impacto [20].

El comportamiento de las espumas metálicas de aluminio en pruebas de compresión uniaxial se ha establecido en términos generales, como lo muestra la Figura 74. Inicialmente el comportamiento es lineal, mostrando un esfuerzo creciente mientras aumenta la deformación. En un valor de esfuerzo determinado se comienzan a reducir los espacios en los poros (aplastamiento) y el material se compacta y densifica, mostrando un esfuerzo constante mientras se comprime, absorbiendo una gran cantidad de energía en comparación con el aluminio macizo. Aquí se presenta una meseta de esfuerzos de compresión. Cuando los poros han colapsado, el material se asemeja a un material macizo y su comportamiento esfuerzo vs. deformación vuelve a ser lineal.



**Figura 74.** Curva esfuerzo-deformación obtenida para una espuma metálica de aluminio sometida a compresión. La carga se aplica lentamente. Fuente: adaptada de [20].

Durante la explosión, la energía liberada produce un súbito aumento de presión sobre la espuma de aluminio, que se transmite a través de ella con un retardo de tiempo y magnitud de presión constante, causada por la progresiva deformación plástica de la espuma, que mantiene un esfuerzo relativamente constante en un mayor tiempo que el de la onda de presión. Este efecto se ve claramente en la Figura 75.



**Figura 75.** Presiones vs. tiempo durante una explosión. La presión sobre la viga permanece un poco más en el tiempo debido al efecto de retardo de la espuma, pero con valores mucho menores que la presión inicial. Fuente: adaptada de [20].

La Figura 76 presenta un diagrama comparativo entre la presión de la explosión y el impulso que se genera sobre una viga de concreto reforzado de 2 metros de longitud, 0,4 metros de ancho y 0,1 metros de espesor, con protección de una capa de aluminio espumado de 75 mm, frente a la misma viga sin protección. Se observa que el impulso que genera falla es superior para la viga revestida por la capa de aluminio espumado, que para la viga no protegida [20]. Cuando la presión disminuye sensiblemente, el efecto de retardo que causa el aluminio espumado genera un impulso superior sobre la viga protegida por aluminio metálico. Esto se debe a la duración mayor de la onda de presión baja, que la hace similar a una carga estática, actuando en las zonas de falla en donde la espuma se ha compactado, de tal forma que sigue transmitiendo carga a la viga, lo que no ocurre en zonas de falla de una viga sin revestimiento [20]. Esta investigación muestra que las espumas permiten que las vigas fallen, resistiendo mayores valores de impulso causado por explosiones, aunque una vez ocurrida la falla, estas espumas podrían transmitir un impulso que acelere el colapso de la viga.

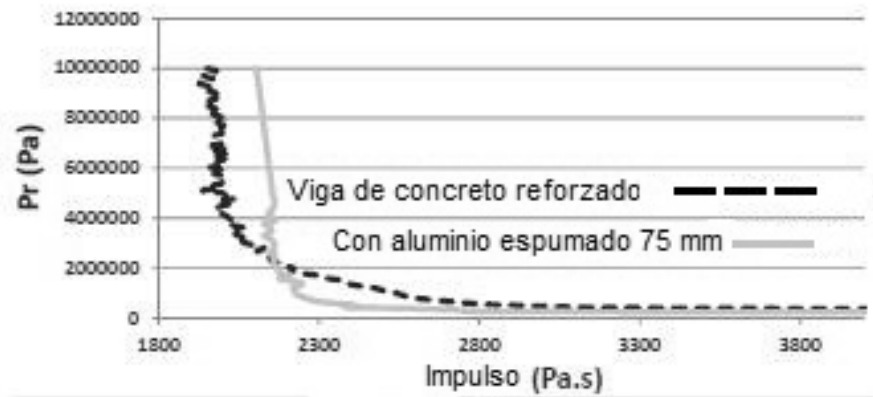


Figura 76. Impulso vs. presión en la superficie de las vigas. Comparativo entre viga sin protección (negro) y viga con protección (gris). Fuente: adaptada de [20].

#### 5.6.4 Sistemas de protección contra munición explosiva

El blindaje es parte esencial de los vehículos militares (tanques y vehículos de transporte), los cuales están permanentemente expuestos a disparos de proyectiles que pueden atravesar los blindajes sin exponerlos a ondas explosivas, como también a impactos de proyectiles explosivos, que exponen a los vehículos, simultáneamente, al impacto directo de estos y/o a los fragmentos desprendidos por la explosión, como también a la onda explosiva. Actualmente se están utilizando los blindajes metálicos homogéneos en acero rolado, pero más recientemente se han utilizado los blindajes en material compuesto, que combinan materiales cerámicos, metales y polímeros, ofreciendo bajo peso y buena protección contra impactos de munición [21]. En las pasadas décadas se ha hecho necesario mejorar el desempeño de los blindajes de vehículos militares, especialmente ante munición explosiva que desprende fragmentos impulsados por la onda generada, con una energía cinética superior a la que tiene la munición no explosiva. Las espumas metálicas se han sometido a pruebas como blindaje contra ondas explosivas, demostrando buena eficiencia al absorber la energía de la onda, pero sin rechazar efectivamente a los fragmentos que regularmente acompañan estas explosiones [21].

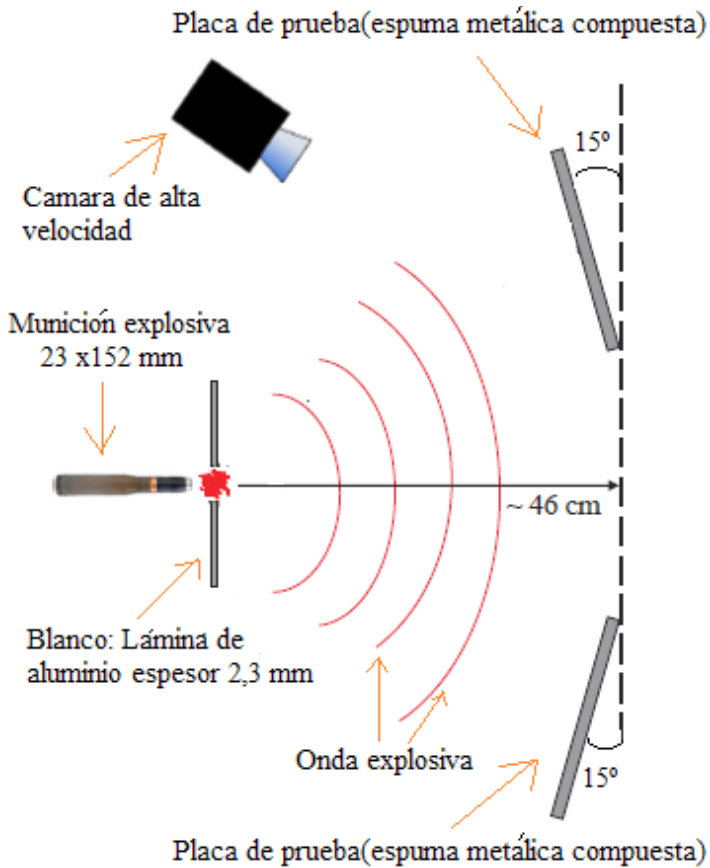
Los investigadores Marx, Portanova y Rabiei [18] realizaron pruebas con munición explosiva, disparando los cartuchos contra una placa de aluminio 2024 T3 de 2,3 mm de espesor, para evaluar y caracterizar los daños causados por fragmentos de estos proyectiles y de la onda explosiva. Estos daños se evaluaron sobre placas de metales espumados, ubicadas cerca a la placa donde se produjo el impacto inicial fabricada en aluminio 2024-T3, con espesor 2,3 mm. La munición utilizada tiene una longitud total de 152 mm y diámetro de 23 mm [21]. Al explotar se genera una onda de alta presión que impulsa los fragmentos hasta velocidades supersónicas. Los prototipos expuestos a onda explosiva y a impactos de fragmentos fueron placas cuadradas de espuma metálica compuesta, con unas dimensiones de 25 cm x 25 cm y espesores de 9,5 mm y 16,75 mm.

Por su parte, acero inoxidable 316 L en polvo se usó para conformar la matriz metálica, por medio de proceso de pulvimetalurgia, mientras que los materiales de refuerzo utilizados fueron dos tipos de esferas metálicas huecas. Las primeras, de 2 mm de diámetro y 100  $\mu\text{m}$  de espesor, fueron usadas en las placas de menor espesor, y las segundas, de 3,5 mm de diámetro y 80  $\mu\text{m}$  de espesor, fueron usadas para las placas de mayor espesor. El espesor de las esferas grandes se disminuyó para obtener espumas con densidades similares en todas las placas. Entre cuatro y cinco capas de esferas fueron acomodadas dentro de cajas de acero inoxidable, que posteriormente se rellenaron de polvo metálico. Se aplicó presión a la mezcla de polvo y esferas para eliminar los poros, y ser sinterizada finalmente en una prensa de vacío y calor [21].

La Tabla 8 resume las características principales de las cinco placas evaluadas. El montaje y equipos principales utilizados para realizar las pruebas de explosión e impacto se observan en la Figura 77. La munición impactó la lámina de aluminio, a una velocidad de 970 m/s y explotó con una potencia equivalente a 23 kg de TNT, expulsando los fragmentos del casquillo hacia las placas de espuma metálica compuesta. Las velocidades de los fragmentos se calcularon por medio de registro fotográfico de una cámara de alta velocidad.

**Tabla 8. Espesores de las placas, densidades y diámetros de las esferas de refuerzo.**  
Fuente: adaptada de [21]

Placa No.	Espesor de la placa (mm)	Densidad (g/cm <sup>3</sup> )	Diámetro de esferas (mm)	Lados impactados
1	9,4	3,4	2	Dos
2	9,5	2,9	2	Uno
3	9,7	2,9	2	Dos
4	10	3,5	2	Uno
5	16,7	3,1	3,5	Uno



**Figura 77. Esquema del montaje general utilizado por Marx para realizar las pruebas.**  
Fuente: adaptada de [21].



Por medio de mediciones directas de variables físicas, y también a través de modelos obtenidos por simulación computarizada, se caracterizaron los daños y se describió cómo el fenómeno de impacto y explosión afecta a las espumas metálicas compuestas [21].

En las pruebas experimentales se obtuvo la profundidad de penetración de las partículas dentro de cada placa de espuma metálica compuesta, y se observó que las partículas menores fueron absorbidas sin lograr atravesar las placas de menor espesor (9 mm). Sin embargo, las partículas grandes lograron atravesar casi completamente las placas delgadas, generando leve abultamiento en su superficie posterior (penetración total igual a 10 mm). En el caso de la placa de mayor espesor (16,7 mm), los fragmentos de tamaño mediano o grande penetraron hasta una profundidad menor (8 mm), que en todas las demás placas de menor espesor. Este hecho se ve relacionado con el tamaño de las esferas, más que con el espesor de las placas. En la placa de mayor espesor las esferas tienen un mayor diámetro, interponiéndose en la trayectoria de los fragmentos medianos y grandes, que, por su tamaño, chocan fácilmente con estas esferas y pierden energía sucesivamente [21].

No se presentaron descascaramientos en los orificios de entrada de los fragmentos en placa de espuma metálica compuesta.

Se realizó una modelación computarizada de las placas de acero espumado (modeladas como material homogéneo, con propiedades mecánicas homogéneas), y también de una placa de aluminio 5883H-116 de igual masa que la placa espumada, más gruesa. Esta aleación de aluminio y magnesio se utiliza en cascos de barco y estructuras navales, y también en blindajes. Igualmente, posee una densidad cercana a la medida en las espumas estudiadas. Esto resultó en una placa de 16 mm de espesor. El objetivo fue simular el mismo experimento, con los datos medidos (las presiones de la onda, los tamaños de los fragmentos y sus velocidades) pero aplicados a la placa de aluminio homogéneo (macizo) [21].

Las simulaciones dieron como resultado un mayor valor de esfuerzos mecánicos sobre la placa maciza, en comparación con las placas de espuma metálica compuesta. Estas últimas tienen mejor capacidad para distribuir y disipar la energía del impacto, presentando menor pandeo y abultamiento

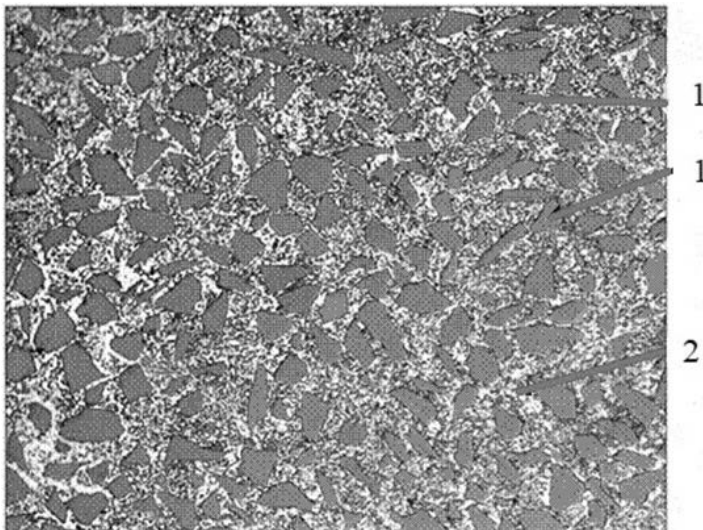
al final de la prueba, que las placas de aluminio 5883H-116. Las profundidades de penetración para fragmentos pequeños fueron 2 mm superiores en la placa de aluminio macizo 5883H-116 que en las placas espumadas de menor espesor [21]. Con los resultados de esta investigación se confirma el potencial de aplicación de las espumas metálicas y de las espumas metálicas reforzadas, como escudos protectores contra impactos directos de munición, impactos de esquirlas y onda explosiva, ya sea que se presenten de forma separada, o simultáneamente. Su excelente capacidad para absorber energía cinética y de impacto, y su baja densidad, los hace adecuados para blindaje de vehículos militares y corporal, en los cuales el control de peso es un factor crítico.

### 5.6.5 Conductores eléctricos

En las aplicaciones en las cuales se necesita transmitir corrientes eléctricas, los materiales deben tener las siguientes propiedades físicas: buena conductividad eléctrica y térmica, bajo coeficiente de dilatación térmica, y en no pocos casos, baja densidad y buena resistencia mecánica. La conductividad eléctrica permite una eficiente transmisión de potencia eléctrica que alimentará equipos, componentes electrónicos y circuitos [3]. Los elementos a través de los cuales circula corriente eléctrica sufren una elevación de la temperatura que causa dilatación (aumento del volumen) del componente y cambio en la forma del elemento. Como consecuencia se reducen las distancias frente a otros componentes eléctricos o electrónicos, disminuyendo la seguridad en el funcionamiento, como en el caso de cables de transmisión de alto voltaje que se dilatan, acortando su distancia al suelo [22]. Esta tendencia a dilatarse se define por medio del coeficiente de dilatación térmica, que debe ser bajo, para evitar cambios en dimensiones [22]. A su vez, el coeficiente de conductividad térmica debe tener un valor alto para que el calor generado pueda transmitirse y disiparse antes de que la temperatura aumente y el material se dilate o comience un proceso de fusión, combustión y deterioro de los conductores [22]. Cuando se instalan circuitos electrónicos o eléctricos en aeronaves o vehículos espaciales, o también en el caso de teléfonos celulares, el peso que aportan los materiales conductores debe minimizarse, por

lo cual otra propiedad deseada es la baja densidad [23]. Por último, se debe resaltar que la resistencia mecánica también es una propiedad de relevancia, porque los materiales conductores están sujetos a ciclos de fatiga térmica (enfriamiento-calentamiento) y los vehículos espaciales en los que viajan son sometidos a altas aceleraciones.

Un ejemplo de aplicación es el compuesto de matriz de aluminio (Al) reforzado con partículas de carburo de silicio (SiC), que combina varias propiedades deseadas en componentes electrónicos, como la buena conductividad térmica (170-200 W/(m\*K°)), el bajo coeficiente de dilatación térmica (6,5-9,5 10<sup>-6</sup> K°<sup>-1</sup>), baja densidad (2,95-3 g/cm<sup>3</sup>) y buena resistencia mecánica (350-500 MPa de resistencia ultima en flexión) [24]. La microestructura del material citado se observa en la Figura 78.



**Figura 78. Microestructura de material compuesto de matriz metálica. 1) Partículas de carburo de silicio. 2) Matriz de aluminio. Fuente: adaptada de [24].**

Este material se utiliza en placas de base de componentes electrónicos, tarjetas electrónicas y sus cajas de protección, en donde cumple funciones como sumidero de calor. Algunos de estos componentes se observan en la Figura 79.



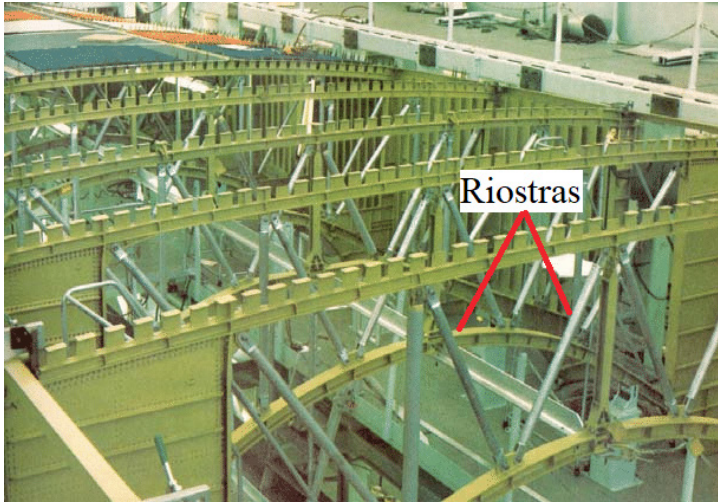
**Figura 79. Elementos de circuitos electrónicos que incluyen materiales de matriz de aluminio y refuerzos en carburo de silicio. Fuente: [24].**

Al ser buen conductor de calor, se encarga de entregar el calor generado por la corriente eléctrica hacia corrientes de aire forzado, que es suministrado por ventiladores, protegiendo al sistema de daño por recalentamiento. Este tipo de aplicaciones es común en los computadores. Su buena resistencia mecánica lo hace también adecuado para aplicaciones donde se presenta movimiento y aceleración, como el transporte terrestre, aéreo, o aeroespacial [24].

#### 5.6.6 Aplicaciones aeroespaciales

Los transbordadores espaciales (Columbia, Challenger, Atlantis y Discovery) utilizaron elementos estructurales fabricados en materiales compuestos de matriz metálica, en el compartimiento de carga, en donde riostras de aluminio fueron fabricadas en un nuevo material de matriz metálica con base aluminio 6061 (MMC 6061/B/50f), que es un compuesto con un 50 % de volumen ocupado por monofilamentos de fibra de boro [5,25]. Este material permitió una disminución de peso de 145 kg en este tipo de riostras, equivalente a un 44 % del peso de estos componentes originales de aluminio

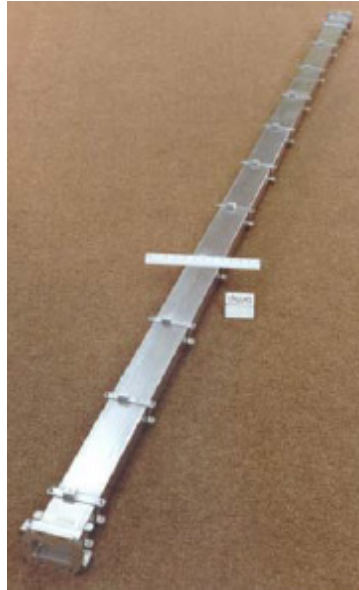
macizo, sumado a una disminución de costo en más de 1 000 dólares/kg de material [5]. La estructura de un transbordador espacial se observa en la Figura 80.



**Figura 80. Riostras del compartimento de carga del transbordador espacial, fabricadas en matriz de aleación de aluminio con refuerzo en fibras de boro.**

**Fuente: adaptada de [25].**

Otra aplicación importante de los MMC se dio en el mástil principal de la antena del telescopio espacial Hubble. En este mástil se utilizó una preforma infiltrada con 40 % de fibra de carbono tipo P-100 en la matriz de aluminio 6061. Este material se denomina MMC 6061/C/40f [5]. Este mástil tiene una buena receptividad de ondas de radio, buena estabilidad dimensional frente a cargas térmicas y mecánicas. Este comportamiento se logra gracias a su alta resistencia específica y rigidez, junto a su excelente conductividad térmica y casi nulo coeficiente de dilatación térmica. Dicho componente provee un buen soporte estructural al sistema de la antena y un buen medio de transmisión de ondas de radio entre la nave espacial y el plato de la antena [25]. El componente se puede observar en la Figura 81.

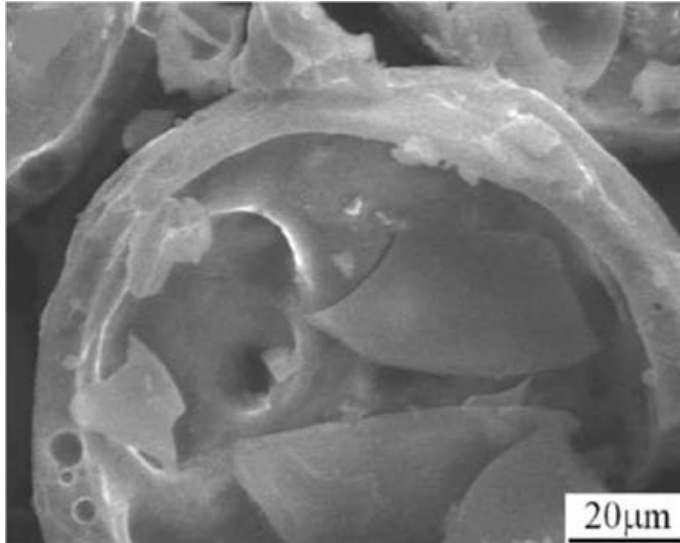


**Figura 81. Mástil de la antena del telescopio espacial Hubble de 3,6 metros de longitud, fabricado en matriz de aluminio 6061 y reforzada con fibras de carbono.**

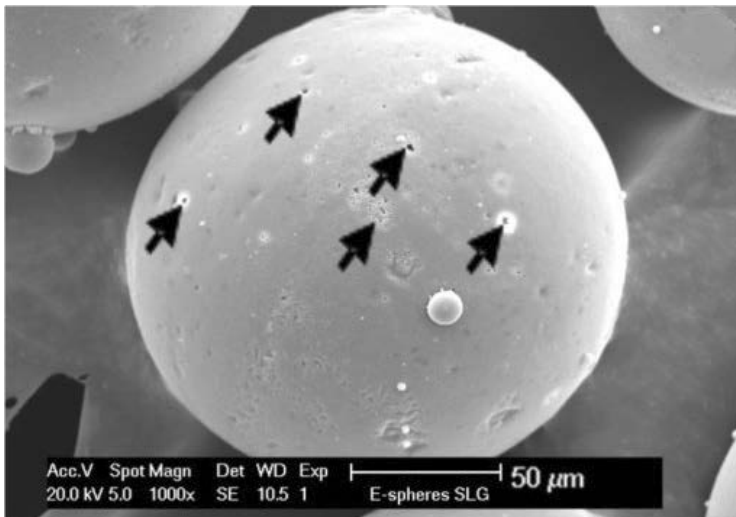
**Fuente: [25].**

### *5.6.7 Aplicaciones en transporte terrestre*

Las espumas metálicas reforzadas con materiales provenientes de cenizas volantes (subproductos de la combustión de carbón en centrales térmicas) [26], o metálicas (esferas huecas), tienen su mayor potencial de aplicación en la producción de componentes para sistemas de transporte terrestre [27]. Entre estos materiales de refuerzo están las cenosferas, fabricadas principalmente a partir de sílice ( $\text{SiO}_2$ ) y alúmina ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ); los microbalones cerámicos (36 %-40 %  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , 55 %-60 %  $\text{SiO}_2$ , 1,4 %-1,6 %  $\text{TiO}_2$ , 0.4 %-0.5 %  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) y las microsferas de carburo de silicio ( $\text{SiC}$ ) [27]. Las cenizas esféricas no tienen espesores homogéneos, no son esferas perfectas, presentan poros o no son totalmente huecas. Una imagen de las esferas de ceniza volante fracturadas se puede observar en la Figura 82.

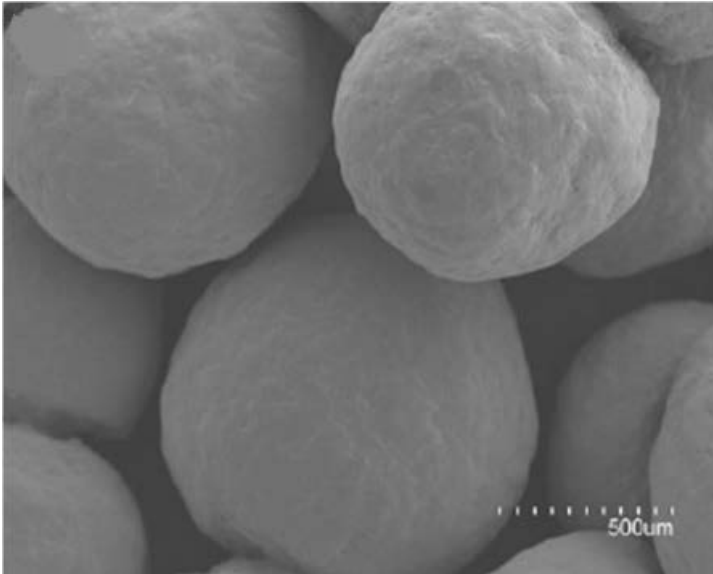


**Figura 82.** Esfera de ceniza volante fracturada. Fuente: adaptada de [27].  
Los poros que están presentes en las esferas se pueden observar en la Figura 83.



**Figura 83.** Poros presentes en las esferas (se señalan con las flechas negras).  
Fuente: adaptada de [27].

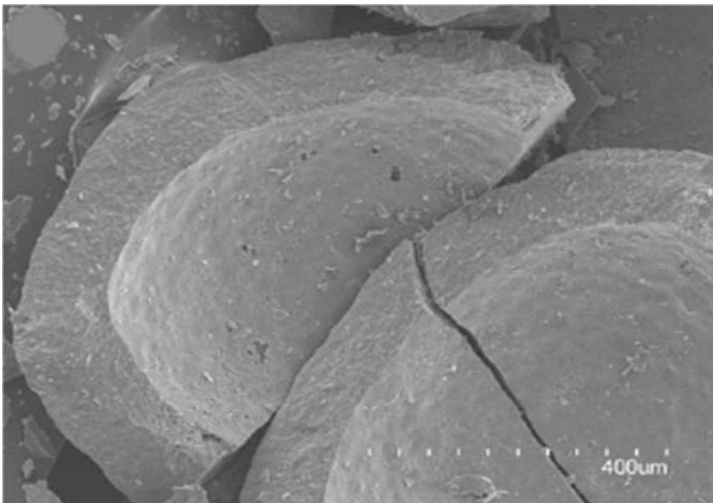
La Figura 84 ilustra esferas de carburo de silicio con irregularidades de forma (esferas irregulares).



**Figura 84.** Esferas de carburo de silicio con formas esféricas pero irregulares.

**Fuente:** adaptada de [27].

Se observan esferas fracturadas de carburo de silicio en la Figura 85. Se puede apreciar su espesor y su cavidad interior con alguna irregularidad en forma.



**Figura 85.** Esferas de carburo de silicio fracturadas. Se observa irregularidad en espesores. **Fuente:** adaptada de [27].



Las espumas metálicas reforzadas con materiales de cenizas son excelentes materiales para absorber energía, gracias a su alta capacidad de deformarse, mientras sus esfuerzos mecánicos se mantienen relativamente estables [27]. Pueden ser utilizados para absorber energía de impacto en elementos estructurales y carrocería de vehículos de transporte terrestre. También como cajas de impacto (*crashboxes*), como complemento de los *bumpers* (parachoques), o en espaldares de sillas que absorban la energía de impacto de pasajeros en caso de colisiones, protegiendo así a quien va sentado. Estos materiales tienen baja tendencia a rebotar cuando se someten a choques [27].

Desde el año 2003 se han utilizado las espumas metálicas con poros abiertos y cerrados en la industria y los sectores aeroespacial y transporte. Las propiedades físicas y mecánicas sobresalientes de estos materiales son similares a las encontradas en espumas metálicas reforzadas con esferas metálicas huecas. Estas son: alta rigidez específica y alta absorción específica de energía. Sin embargo, tienen un coeficiente de conductividad térmica más bajo que las espumas metálicas reforzadas con partículas metálicas. La aplicación de estos materiales en la fabricación de tambores, zapatas o anillos de frenos (elementos sometidos al desgaste) es de gran interés. La empresa australiana Ultalite produce metales espumados (matrices de aleación de aluminio) con refuerzos esféricos cerámicos [27]. Este material se considera liviano, resistente al desgaste y, por lo tanto, adecuado para componentes de automóviles expuestos al desgaste, como los frenos de tambor. Según reporta el fabricante, se ha logrado disminuir peso en seis kilogramos, al instalar tambores en espuma de aluminio reforzado con cerámicos en automóviles Peugeot [28]. Este material compuesto incorpora entre 15 % y 60 % del volumen en esferas cerámicas y puede representar un 60 % de disminución en peso frente a materiales como la fundición de hierro o el acero [28].

## **5.7 CONSIDERACIONES ACERCA DE LA APLICABILIDAD DE LOS MATERIALES COMPUESTOS DE MATRIZ METÁLICA**

La aplicación de materiales compuestos de matriz metálica para estructuras aeroespaciales y aeronáuticas sufrió una interrupción debido a la

cancelación de programas espaciales de defensa estratégica que impulsaban este desarrollo. En esta fase de desarrollo se evidenciaron dificultades en el proceso de fabricación, sin embargo, varios cientos de riostras y costillas en MMC se produjeron para cada uno de los transbordadores espaciales. Se evidenció durante su proceso de desarrollo, que estos materiales son difíciles de maquinar, y que no se pueden utilizar herramientas de maquinado convencionales para maquinarlos [5], lo que los restringe para una amplia aplicación efectiva. Las herramientas de maquinado deben estar fabricadas en diamante, dada la relativa dureza de los materiales usados como refuerzos ( $\text{SiC}$ ,  $\text{Si}$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) [5]. Por otro lado, al desarrollarse los elementos estructurales de materiales epóxicos y fibras continuas de grafito, en la década de 1980 se evidenció que estos materiales poseen superior rigidez específica y resistencia específica que los de matriz metálica [25]. Como se mencionó en capítulos anteriores, actualmente, muchas aeronaves comerciales utilizan un alto porcentaje de sus componentes fabricados en materiales compuestos de matriz polimérica, reforzados con fibra de vidrio y/o fibra de carbono, como es el caso del Boeing 787 Dreamliner (50 %), el Airbus A-350 (50 %) o el Airbus A-380 (20 %-25 %) [29].

Sin embargo, los materiales de matriz metálica reforzados con partículas o whiskers han sido aplicados con éxito en componentes electrónicos de vehículos espaciales y en varias aplicaciones electrónicas, así como en componentes de vehículos de transporte terrestre.

## 5.8 COMENTARIOS FINALES

Aunque los materiales compuestos de matriz metálica han demostrado buen potencial en aplicaciones especializadas, la masificación de su uso todavía no es comparable con los materiales compuestos de matriz polimérica reforzados con fibras de carbono o de vidrio.

Actualmente la industria aeronáutica utiliza masivamente los materiales compuestos en aviones, pero la gran mayoría de estos componentes son fabricados en materiales compuestos de matriz polimérica debido a su alta resistencia específica y al gran desarrollo general que han tenido los procesos de transformación de plásticos.

Se puede concluir que su mayor campo de aplicación actual está en los sectores espacial (como parte de sistemas electrónicos y de comunicación), en aviación de combate, en dispositivos electrónicos para uso en tierra y en la producción de escudos de protección balística, contra onda explosiva y contra tipos de radiación nociva.

## 5.9 REFERENCIAS

- [1] V. K. Lindroos and M. J. Talvitie, "Recent Advances in Metal Matrix Composites," *Journal of Material Processing Technology*, vol. 53, pp. 273-284, 1995
- [2] R. Chaos Moran, "Fabricación y caracterización de materiales compuestos de matriz polimérica reforzada con nanofibras de carbono". Tesis Doctoral, Universidad Rey Juan Carlos. Departamento de Ciencia e Ingeniería de Materiales, España, 2011
- [3] P. Fernandez, V. Martinez, M. Valencia, J. Cruz, "Aplicaciones de los materiales compuestos de matriz metálica en el sector eléctrico y electrónico", *Dyna*, no. 149, pp 131-140, 2006
- [4] Universidad del País Vasco/Euskal Herriko Unibertsitatea. [Online]. Available: <https://ocw.ehu.eus/pluginfile.php/7038/modresource/content/1/materia-com/tema-7materiales-compuestos-de-matriz-metalica.pdf>
- [5] O. Beffort. "Metal Matrix Composites (MMCs). Properties applications and machining. 6", Internationales IWF-Kolloqium. Egerkingen, Switzerland. EMPA. Swiss Federal Laboratories for Material Research and Testing. Dept Materials Technologies, 2002. [Online]. Available: <http://www.empathun.ch>.
- [6] M. Hayat, H. Singh, Z. He and P. Cao, "Titanium metal matrix composites: An overview", *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, vol. 121, pp. 418-438, 2019.
- [7] I. Sánchez Gómez, "Generador de plasma por radio frecuencia aplicado al tratamiento de superficies". Tesis de Maestría. Instituto Politécnico Nacional. Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica. Unidad Profesional Adolfo López Mateos, Ciudad de México, Mexico, 2008.
- [8] [Online]. Available: <https://ge.com//additive/additive-manufacturing>.

- [9] [Online]. Available: <https://energia-nuclear.net/que-es-la-energia-nuclear/radioactividad/rayos-gamma>.
- [10] L. Kruesi, "Fermi sees giant gamma-ray bubbles", *Astronomy*, Kalmbach Publishing Company, vol. 39, no. 3, p. 19, 2011.
- [11] M. Buchanan, "Gamma rays the likely cause of mass extinctions", *New Scientist*, vol. 187, no. 2510, p. 13, 2005
- [12] [Online]. Available: <https://tigerfoam.com/sprayfoaminsulation/open-cell-vs-closed-cell-foam-which-should-i-choose/>
- [13] S. Chen, M. Bourham and A. Rabiei, "Novel light-weight materials for shielding gamma ray". *Radiation Physics and Chemistry*. vol 96, pp 27-37, 2014.
- [14] A. Lleo and L. Lleo, "*Gran manual de magnitudes físicas y sus unidades*". Colombia: Ediciones Diaz de Santos S.A., 2008.
- [15] M. García-Ávila, M. Portanova and A. Rabiei, "Ballistic performance of a composite metal foam-ceramic armor system". *Procedia Material Science*, vol 4, pp. 151-156, 2014
- [16] U.S. Department of Justice. "Ballistic Resistance of body armor". *NIJ Standard-0101.06*, pp. 1-89, 2008. [Online]. Available: [www.ojp.usdoj.gov/nij](http://www.ojp.usdoj.gov/nij)
- [17] S. Uribe Peláez, "Configuración de materiales para la disipación de ondas explosivas". Trabajo de grado, Universidad Eafit. Escuela de Ciencias y Humanidades. Ingeniería Física, 2013.
- [18] J. A. Gutiérrez-Vásquez and J. Oñoro, "Espumas de aluminio fabricación propiedades y aplicaciones". *Revista de Metalurgia*, vol. 44, no. 5, pp. 457-476, 2008.
- [19] "El pueblo más minado de la tierra", *Revista Semana*, no. 1622, p. 121, 2013.
- [20] C. Wu, "Research development on protection of structures against blast loading at University of Adelaide". *Australian Journal of Structural Engineering*, vol. 13, no. 1, pp. 97-110, 2012. <http://dx.doi.org/10.7158/S11-130.2012.13.1>
- [21] J. Marx, M Portanova and A. Rabiei, "A study on blast and fragment resistance of composite metal foams through experimental and modeling approaches. *Composite Structures*, vol 194, pp. 652-661, 2018.

- [22] S. M. Téllez, “Comportamiento de conductores eléctricos usados en líneas de transmisión ante esfuerzos electromecánicos y térmicos combinados”. Trabajo final de maestría. Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Ingeniería. Departamento de Ingeniería Eléctrica y Electrónica, 2011.
- [23] [Online]. Available: [www.asmininternacional.org/news/industry//journalcontent/56/10180/35612772/NEWS](http://www.asmininternacional.org/news/industry//journalcontent/56/10180/35612772/NEWS)
- [24] [Online]. Available: <http://www.alphamaterials.com/AlSiC.htm>
- [25] S. Rawal, “Metal matrix composites for space applications”. *The Journal of the Mineral, Metal and Materials Society*, vol. 53, no. 4, pp. 14-17, 2001.
- [26] [Online]. Available: <http://www.acomet.es/index.php/pages-5/cenosferas>
- [27] G. A. Rocha Rivero, “Synthesis and compressive properties of AlA206/SiC and Mg-AZ91/SiC syntactic foams”. Ph. D. dissertation. University of Wisconsin Milwaukee. UWM Digital Commons. Theses and dissertations, 239, 2013. [Online]. Available: <https://dc.uwm.edu/etd/239>
- [28] [Online]. Available: <https://ultalite.com/products/ultalite-al-mmc/>
- [29] [Online]. Available: <http://www.cienciamx.com/index.php/tecnologia/materiales/5080-materiales-compuestos-para-la-industria-aeronautica-e-directa>



## Conclusiones

---

Los materiales compuestos (*composites*) han ganado importante interés en la ciencia e industria gracias a sus propiedades y/o características especiales, así como a diversas ventajas tecnológicas. Es así como, en función del tipo de matriz (polimérica, cerámica, metálica), se han logrado optimizar los métodos o procesos de fabricación y manufactura, de tal forma que la diversidad de aplicaciones de estos materiales no tiene límite en la actualidad. Algunas industrias han evolucionado y se han posicionado en el mercado de la mano de los materiales compuestos, por ejemplo, la aeronáutica, aeroespacial, defensa, automotriz, construcción, deportes, biomedicina, energía y muchas otras. Tal es el caso, que los materiales compuestos son el foco de estudios y desarrollos en diversos grupos y centros de investigación a nivel mundial, destacando la posibilidad de impactar en la formación (niveles técnico, tecnológico, profesional y postgrado) y transferencia de conocimiento en diversas facultades de ciencias básicas e ingenierías. Hoy por hoy, la ciencia e ingeniería de los materiales se reconoce como uno de los focos de investigación e innovación más importantes para garantizar el desarrollo y sostenibilidad del mundo, incluyendo a los materiales compuestos como una de las aéreas o campos fundamentales para lograr estos propósitos.

Este libro resaltó la importancia de esta área de conocimiento (materiales compuestos) sobre industrias como la aeronáutica, aeroespacial y defensa, haciendo énfasis en las aplicaciones más novedosas de los *composites* en estos campos, lo cual le permite considerarse como un texto guía para la identificación de líneas de investigación que podrán ser priorizadas por los grupos y centros de investigación en el país. El haber abordado los materiales compuestos en función de su clasificación, con base en el tipo o naturaleza de la matriz (polimérica, cerámica, metálica), permitió extraer algunas conclusiones específicas de cada temática, las cuales son descritas a continuación.

En el caso de los materiales compuestos de matriz polimérica (PMC), es posible concluir que su introducción en diversos campos de la industria se debe a su excelente comportamiento frente a la corrosión (durabilidad), su alta resistencia mecánica, su elevada relación resistencia/peso (materiales resistentes pero livianos) y su gran versatilidad (posibilidad de fabricación de piezas complejas, adaptándose a geometrías que son imposibles de lograr para otro tipo de materiales y/o procesos). El desplazar algunas aleaciones metálicas en aplicaciones industriales es, quizás, su mayor ventaja tecnológica, permitiendo disminuir el peso de algunos componentes, que en industrias como la aeronáutica, aeroespacial y defensa, es un factor de diseño demasiado importante, logrando, entre otras cosas, aumentar la carga paga de vehículos aeroespaciales. No obstante, se pudo identificar como los PMC han derivado beneficios significativos en otras industrias, como la de energías, automovilística, deportiva y construcción. Es decir, se puede concluir que los avances de los PMC en industrias como la aeronáutica y aeroespacial han sido trasladados cada vez más a otros campos productivos, significando una transferencia tecnológica de los PMC, que ha logrado permear, directa o indirectamente, a toda la sociedad.

Otro aspecto clave que se logró identificar, en el caso de los PMC, está relacionado con las tendencias de investigación y desarrollo dirigidas a mitigar el impacto ambiental que este tipo de materiales ha generado al medio ambiente. En este sentido, y a pesar de que las matrices termoestables han gobernado el mundo de los PMC a través de la historia, los termoplásticos han ganado importancia y se perfilan como una alternativa que garantiza su



reprocesamiento o reciclaje al final de su primer ciclo de vida; una contribución hacia la economía circular o enfoque de “cero residuos”, priorizado en el marco de los Objetivos de Desarrollo Sostenibles de las Naciones Unidas. Así mismo, en los últimos años el estudio de matrices biodegradables y el uso de fibras naturales en el reforzamiento de PMC surgen como una alternativa complementaria.

Por su parte, se logró identificar como la nanotecnología aplicada a los PMC ha permitido el desarrollo de aplicaciones de mayor valor agregado, dentro de las cuales se destacan la biomedicina (biocompuestos) y la fabricación de compuestos conductores flexibles. Así mismo, la integración de métodos de procesamiento inmersos en la denominada industria 4.0 o manufactura aditiva, en la fabricación de componentes basados en PMC, abre aún más las posibilidades de aplicación de este tipo de materiales, sobre todo aquellas que demandan de geometrías complejas, Consolidándose la impresión 3D como la línea de manufactura de los PMC en el futuro cercano.

De igual manera, se identificó a la industria aeroespacial como uno de los campos de aplicación que demanda los mayores retos en cuanto a desempeño térmico se refiere (altas temperaturas). En este sentido, los materiales compuestos ablativos, y sobre todo los de matriz polimérica, surgen como una alternativa novedosa para proteger componentes que en servicio son sometidos a entornos hipertérmicos ( $T \geq 1600$  °C), sin sacrificar desempeño y, sobre todo, sin generar aumentos de peso en los componentes o piezas. Dichas aplicaciones eran impensables hasta hace algunos años para este tipo de materiales con bajos puntos de fusión y/o degradación térmica. Este libro logró abordar estos materiales desde la comprensión del comportamiento térmico de los mismos y sus mecanismos de ablación o protección térmica, y propone el desarrollo de esta línea de investigación como un precursor, desde la ciencia e ingeniería de los materiales, para el impulso de las tecnologías aeroespaciales en el país.

En el caso de los materiales compuestos de matriz cerámica (CMC), fue posible identificar el potencial que tienen estos materiales, basado en sus características y/o propiedades físico-mecánicas, para ser utilizados en aplicaciones térmicas e industria aeroespacial. Algunos CMC también representan

una solución para algunas necesidades del sector defensa, destacándose la posibilidad de optimizar los sistemas de protección balística con materiales compuestos de naturaleza predominantemente cerámica. Al igual que los materiales compuestos de matriz metálica (MMC), los CMC han demostrado gran potencial en aplicaciones especializadas, sin embargo, su producción y aplicación masiva no se compara con la de los PMC, y las razones de este fenómeno fueron discutidas en este libro. A pesar de esta realidad, es posible concluir que el mayor campo de aplicación actual de los MMC son el campo espacial y los sistemas de protección balística o escudos de barrera ante la acción de ondas y cargas explosivas, a lo que se suma su potencial como blindaje ante radiación nociva, como la de los rayos gamma.