

40
2ej



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA
DE MEXICO**

FACULTAD DE INGENIERIA

División de Ingeniería Mecánica e Industrial

**"MATERIAL COMPUESTO: ALUMINIO REFORZADO
CON PARTICULAS DE CARBURO DE SILICIO."**

Tesis Profesional
que para obtener el título de
INGENIERO MECANICO ELECTRICISTA,
AREA MECANICA

Presenta
AYAX GERARDO GONZALEZ LOPEZ



DIRECTOR DE TESIS: M. EN I. UBALDO E. MARQUEZ AMADOR

CIUDAD UNIVERSITARIA, D.F.

JUNIO DE 1999

**TESIS CON
FALLA DE ORIGEN**

274738



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

Dedicatoria.

Esta obra se la dedico enteramente a mi adorada madre, a quien le debo todo lo que soy y todo lo que he logrado en el transcurso de mi vida. Amá querida, te agradezco infinitamente tu amor, tus consejos, tu apoyo y respaldo incondicional que me has brindado siempre. Gracias...

A la memoria de mi padre.

Toda nuestra ciencia,
comparada con la realidad,
es primitiva e infantil...
y sin embargo es lo máspreciado
que tenemos.

Albert Einstein

En Egipto, a las bibliotecas se les denominaba “tesoro de los remedios del alma”. En efecto, curábase en ellas la ignorancia, la más peligrosa de las enfermedades y origen de todas las demás.

Jacques Bénigne Bossuet

INDICE.

Introducción 1

Capítulo 1. Los Materiales de Ingeniería 4

- 1.1 Introducción 4
- 1.2 Ciencia e Ingeniería de los Materiales 7
- 1.3 Clasificación de los materiales 10
- 1.4 Necesidades Modernas de los Materiales 17

Capítulo 2. Materiales Compuestos 22

- 2.1 Introducción 22
- 2.2 Constituyentes de los Compuestos 25
 - 2.2.1 Interfases e intercaras 27
 - 2.2.2 Distribución de los constituyentes 28
- 2.3 Desempeño de los Materiales Compuestos 29
 - 2.3.1 Combinación de efectos en los compuestos 30
- 2.4 Factores de Diseño en los Materiales Compuestos 32
- 2.5 Clasificación en Base al Refuerzo 33
- 2.6 Clasificación en Base a la Matriz 38

Capítulo 3. Materiales Compuestos Reforzados con Partículas 40

- 3.1 Introducción 40
- 3.2 Tipos y Propiedades de los Compuestos Reforzados con Partículas 42
- 3.3 Los Compuestos de Partícula Larga 45
 - 3.3.1 Cermets: propiedades y características 47
 - 3.3.2 Concreto: propiedades y características 49
- 3.4 Compuestos Particulados Endurecidos por Dispersión 50
- 3.5 Partículas de Carburo de Silicio en una Matriz de Aluminio 52
- 3.6 Futuro Potencial de los Materiales Compuestos Particulados 57

Capítulo 4. Fabricación de Materiales Compuestos 59

- 4.1 Introducción 59
- 4.2 Procesamiento de Compuestos de Matriz Metálica 61
 - 4.2.1 Procesamiento para compuestos con reforzamiento discontinuo 62
 - 4.2.1.1 Procesos primarios 63
 - 4.2.1.2 Procesos secundarios 66
 - 4.2.1.3 Métodos de producción de compuestos particulados endurecidos por dispersión 67
 - 4.2.2 Procesos para compuestos con reforzamiento continuo 69

Capítulo 5. Experimentación, Pruebas y Resultados	79
5.1 Introducción	79
5.2 Procedimiento Experimental	80
5.2.1 Materiales	80
5.2.2 Fabricación del material compuesto	81
5.2.3 Proceso de laminación y tratamiento térmico	81
5.2.4 Propiedades mecánicas	82
5.2.5 Análisis Microestructural	84
5.3 Resultados	86
5.3.1 El material compuesto	86
5.3.2 Proceso de laminación y tratamiento térmico	87
5.3.3 Medición de microdureza y macrodureza	88
5.3.4 Ensayo de tracción	90
5.3.5 Análisis Microestructural	93
5.4 Discusión	96
5.4.1 El material compuesto	96
5.4.2 Microdureza	97
5.4.3 Macrodureza	97
5.4.4 El ensayo de tracción	99
5.4.5 Análisis Microestructural	100
5.5 Conclusiones de la Fase Experimental	101

Conclusiones Generales 102

Bibliografía 106

INTRODUCCIÓN.

La tecnología se ha encontrado en nuestra línea ancestral desde antes del primer humano, puesto que somos una especie tecnológica. Esto, aunado a nuestra insaciable curiosidad y a la imperante necesidad de facilitarnos la existencia en este mundo hostil, ha llevado a la humanidad a tratar de tener un cierto dominio sobre la naturaleza, incluso más allá de las fronteras de nuestro mundo. Esto, a través de los tiempos, se ha demostrado que sólo puede conseguirse por medio del desarrollo de la tecnología, que a su vez está sustentada en el conocimiento científico, y es que vivimos en una era compleja en la que muchos de los problemas a que nos enfrentamos, sean cuales sean sus orígenes, sólo pueden tener soluciones que implican una comprensión profunda de la ciencia y la tecnología.

Una de las muchas actividades de los ingenieros es el desarrollo de la tecnología, puesto que ésta es su principal instrumento de trabajo. Tal vez ésta sea la razón por la que a través de la historia la ingeniería y la ciencia en general se han ido dividiendo en áreas cada vez más especializadas. Así es como surgen las disciplinas de ciencia e ingeniería de materiales, que son las áreas centrales de esta investigación. Es cierto, que en la mayoría de los casos los ingenieros solamente aplican la tecnología sin importar de donde provenga, lo cual también es muy importante en el ejercicio de la ingeniería. Como en cualquier investigación en la que se utilice la ciencia con la finalidad de desarrollar tecnología siempre se encuentran retos y dificultades durante el transcurso, y este trabajo no fue la excepción, por lo que es necesario tener cierta disciplina y perseverancia, que a la larga nos brindará grandes beneficios, enseñanzas y satisfacciones, todo lo cual quedará plasmado a lo largo de este trabajo.

El propósito de este trabajo de tesis, más allá de ser un requisito y un instrumento que permita la obtención de un título de licenciatura, es el de presentar los esfuerzos realizados para tratar de crear tecnología, que existe en otras partes del mundo, pero que aquí en nuestro país por diferentes motivos solamente se obtiene importándola, por lo que con este trabajo se demuestra que a pesar de la limitación de los recursos y con un gran esfuerzo y perseverancia es posible iniciar un cierto tipo de tecnología. Además, se trató de conocer las principales características de interés en ingeniería del material compuesto que se fabricó y encontrar las propiedades mecánicas obtenidas de éste, con las que se justificaría todo este esfuerzo. Es necesario comentar que esto sólo es el inicio y la base que requerirán trabajos futuros para alcanzar un nivel importante en este tipo de tecnologías, y quizá sea necesario conseguir recursos a través de patrocinios y algunos otros medios, así como personas que ofrezcan su respaldo y apoyo incondicional como hasta la fecha lo ha hecho el respetable director de este trabajo de tesis.

En este estudio se trató de ir de lo general a lo particular con la intención de dar un panorama general de esta especialidad; de tal modo, en el capítulo 1 se presenta, a manera de introducción, lo que son los materiales de ingeniería, su clasificación y sus aplicaciones; como consecuencia, se desprende el tema del capítulo 2, que hace referencia a los materiales compuestos en general, se describen sus diferentes tipos y se explica de una manera razonable qué son y para qué sirven estos materiales que están causando gran impacto en el desarrollo de la tecnología actual. En el capítulo 3 se toca el tema central de esta investigación de tesis, por lo menos en su marco teórico, ya que se analizan los materiales compuestos reforzados con partículas, sobre todo los denominados compuestos de matriz metálica y especialmente aquellos cuyo elemento de refuerzo es el carburo de silicio, ya que este último, junto con una matriz de aluminio, fueron los materiales utilizados

durante la fase experimental de este trabajo. Debido a que se fabricó un material compuesto fue necesario investigar los tipos de fabricación y conformado de esta clase única de materiales, lo que fue la base de estudio del capítulo 4. Durante la realización de este trabajo de tesis, como ya se mencionó, se fabricó un material compuesto base metal y reforzado con un cerámico, se le aplicaron diferentes pruebas o ensayos y se analizaron los resultados obtenidos de éstos; todas las vicisitudes, logros y análisis se describen en el capítulo 5. Por último, se incluye un capítulo en el que exclusivamente se comentan las conclusiones globales obtenidas durante la elaboración de todo el trabajo de tesis.

Capítulo 1.

Los Materiales de Ingeniería.

1.1 Introducción.

Los materiales son sustancias de las que cualquier cosa o producto está compuesto. Desde el comienzo de la civilización, los materiales así como la energía han sido utilizados por el hombre para mejorar su nivel de vida. Como los productos están fabricados a partir de materiales, éstos se encuentran en todas partes alrededor nuestro por lo que se puede concluir que existen muchos tipos de materiales, y uno sólo tiene que mirar a su alrededor para darse cuenta de ello.

Los materiales son, probablemente, una de las cosas más profundamente arraigadas en nuestra cultura, más de lo que quizá nos damos cuenta; virtualmente cada segmento de nuestra vida diaria es influenciado, en un grado u otro, por los materiales. Históricamente, el desarrollo y progreso de la sociedad ha sido íntimamente ligado a la habilidad de sus miembros para producir y manipular los materiales para, de este modo, satisfacer sus necesidades; de hecho, las civilizaciones antiguas han sido designadas por el nivel de desarrollo en materiales (por ejemplo, la edad de piedra, la era del bronce, etc.).

Los primeros humanos sólo tenían acceso a un número muy limitado de materiales, aquellos que la naturaleza les podía proporcionar: madera, piedra, barro, pieles y otros. Con el tiempo descubrieron técnicas para producir materiales que tenían propiedades superiores a las de los naturales; en estos nuevos materiales se incluye a la arcilla y a varios metales. Además, se fue descubriendo que las propiedades de un material podían ser alteradas mediante tratamientos térmicos y por la adición de otras sustancias. En este punto, la utilización de materiales era

totalmente un proceso de selección, es decir, escoger a partir de un limitado conjunto de materiales aquel que se ajustaba mejor para una aplicación en virtud de sus características. Fue hasta hace poco tiempo (aproximadamente los últimos 50 años) que los científicos e ingenieros pudieron entender la relación que existe entre los elementos estructurales del material y sus propiedades, además, debido al progreso de los programas de investigación y desarrollo, se están creando continuamente nuevos materiales. De este modo, decenas de miles de diferentes materiales han evolucionado para mejorar y tener características especializadas que cubren las necesidades de nuestra moderna y compleja sociedad. Así, el desarrollo de muchas tecnologías que hacen que nuestra existencia sea más comfortable ha sido íntimamente asociado con la accesibilidad de materiales convenientes. Un avance en el entendimiento de un tipo de material es a veces el precursor del progreso de una tecnología, por ejemplo, no habría sido posible tener automóviles sin la disponibilidad de acero a bajo costo o de algún otro sustituto comparable; en la era contemporánea, los sofisticados aparatos electrónicos se basan en componentes que son fabricados con los llamados materiales semiconductores; entre muchos otros casos que se pueden mencionar.

La producción de nuevos materiales y el procesado de éstos, hasta convertirlos en productos acabados, constituyen una parte importante de nuestra economía actual. Los ingenieros diseñan la mayoría de los productos acabados y los procesos necesarios para su fabricación y, puesto que la sociedad necesita materiales, los ingenieros deben conocer de la estructura y las propiedades de los materiales, de modo que sean capaces de desarrollar o seleccionar el adecuado para cada aplicación y también implementar los métodos de procesado. Los ingenieros especializados en investigación y desarrollo trabajan para crear nuevos materiales o para modificar las propiedades de los ya existentes. Los ingenieros de diseño usan los materiales existentes, los modificados o los nuevos para diseñar o crear nuevos

productos y sistemas. La búsqueda de nuevos materiales progresa continuamente, por ejemplo, los ingenieros mecánicos buscan materiales que resistan altas temperaturas, de modo que los motores de reacción puedan funcionar más eficientemente; los ingenieros eléctricos procuran encontrar nuevos materiales para conseguir que los dispositivos electrónicos puedan operar a mayores velocidades y temperaturas; los ingenieros aeroespaciales tratan de descubrir materiales con mayores relaciones resistencia-peso para aviones y vehículos espaciales; los ingenieros químicos se afanan en descubrir materiales más resistentes a la corrosión. Estos son sólo unos pocos ejemplos de la búsqueda de nuevos y óptimos materiales de utilidad práctica y en muchos casos lo que ayer era imposible es hoy una realidad.



Figura 1.1 Proceso de fabricación de acero.

De todo lo anterior se puede concluir que los ingenieros, sea cual fuere su especialidad, deben tener conocimientos básicos y aplicados sobre los materiales de uso habitual en ingeniería, a efectos de poder realizar su trabajo más eficazmente cuando vayan a utilizar dichos materiales.

1.2 Ciencia e Ingeniería de los Materiales.

Como ya se mencionó los materiales han desempeñado un papel central en el crecimiento, prosperidad, seguridad y calidad de vida de la humanidad desde el comienzo de la historia. Sólo en los últimos 50 años, y especialmente en las últimas dos décadas, ha empezado a tomar forma y ganar reconocimiento la base intelectual del campo de la ciencia que se conoce como ciencia e ingeniería de materiales; esto ha ocurrido debido a que se ha expandido fuertemente y ha contribuido significativamente a la sociedad. El fruto de los esfuerzos de los científicos e ingenieros de materiales a lo largo de años y décadas puede ilustrarse literalmente con cientos de ejemplos, ya que sin los nuevos materiales y su eficiente producción, nuestro mundo de modernos aparatos, máquinas, automóviles, aviación, equipos de comunicación y productos estructurales no podría existir.

La disciplina de la ciencia de materiales investiga las relaciones que existen entre la estructura interna y las propiedades de los materiales, así como su procesado. En contraste, la ingeniería de materiales está relacionada con el uso de los conocimientos fundamentales y aplicados sobre los materiales, sobre todo en las correlaciones estructura-propiedad, para diseñar o manejar la estructura de un material para producir un predeterminado conjunto de propiedades, de modo que los materiales puedan ser convertidos en productos necesarios o requeridos por la sociedad. La ciencia de materiales tiene como fin básico el conocimiento del conjunto de materiales existentes, y la ingeniería de materiales tiene como objetivo el conjunto de los conocimientos aplicados, sin que exista una frontera clara entre ambas disciplinas.

Hasta este punto “estructura” es un término nebuloso que merece cierta explicación: la estructura de un material usualmente se relaciona con el arreglo de sus componentes internos; la estructura subatómica involucra a los electrones dentro de los átomos individuales y las interacciones con su núcleo. A un nivel atómico, la estructura se refiere a la organización de los átomos o moléculas con respecto a otros. El siguiente gran conjunto estructural, el cual contiene grupos grandes de átomos que son normalmente aglomerados juntos, es denominado “microscópico”, lo cual significa que para su observación se necesita de aparatos especializados. Finalmente, los elementos estructurales que pueden ser observados a simple vista son denominados “macroscópicos”.

La noción de “propiedad” es algo elaborada. Mientras se encuentran en servicio, todos los materiales son expuestos a estímulos externos que evocan algún tipo de respuesta; por ejemplo, un espécimen sometido a la acción de fuerzas experimentará deformación o la superficie de un metal pulido reflejará la luz. Una propiedad es un rasgo del material en términos de la naturaleza y magnitud de la respuesta que proporciona bajo un estímulo específico impuesto. Generalmente, la definición de las propiedades es independiente de la forma y tamaño del material.

Virtualmente todas las propiedades importantes de los materiales sólidos pueden ser agrupadas en seis diferentes categorías: mecánicas, eléctricas, térmicas, magnéticas, ópticas y de resistencia al medio ambiente. Para cada una existe un tipo característico de estímulo capaz de provocar diferentes respuestas. Las propiedades mecánicas relacionan la deformación a una cierta carga o fuerza aplicada; como ejemplos se puede incluir el módulo de elasticidad y la resistencia. Para las propiedades eléctricas, tales como la conductividad y la constante dieléctrica, el estímulo es un campo eléctrico. El comportamiento térmico de los sólidos puede ser

representado en términos de la capacidad térmica específica y la conductividad. Las propiedades magnéticas demuestran la respuesta de un material bajo la aplicación de un campo magnético. Para las propiedades ópticas, el estímulo es una radiación electromagnética o luminosa; el índice de refracción y la reflectividad son propiedades ópticas representativas. Finalmente, las características de resistencia al medio ambiente indican el grado de reacción química de los materiales y como un ejemplo representativo se puede citar el índice de corrosión. Por último, es conveniente mencionar que todas estas propiedades pueden ser modificadas o mejoradas al aplicar ciertos tipos de procesamiento sobre los materiales según sea necesario. y como ejemplo se pueden citar a los tratamientos térmicos, el endurecimiento por trabajo mecánico, la orientación de la estructura, entre otros.

Cabe preguntarse el porqué se estudia los materiales. Muchos ingenieros y científicos, cualquiera que sea su especialidad: mecánica, civil, química o eléctrica, se enfrentarán alguna vez a un problema de diseño que involucre a los materiales. Como ejemplos se pueden incluir un engrane de transmisión, la superestructura de un edificio, un componente de una refinería o un microprocesador. Por supuesto, los científicos e ingenieros de materiales son especialistas que están totalmente avocados a la investigación y diseño de materiales.

Muchas veces, un problema de materiales es el de realizar la correcta selección de un material de entre los miles que se encuentran disponibles. Existen varios criterios en los cuales se basa normalmente la decisión final; el primero de todos es el de caracterizar las condiciones de servicio bajo las que se encontrará el material en cuestión, lo cual dictará las propiedades que se requieren. Solamente en raras ocasiones un material posee la combinación máxima o ideal de propiedades, lo cual hace necesario que se sustituyan unas características por otras. El ejemplo clásico es el que involucra dureza y ductilidad; normalmente, el material que tiene

una alta dureza tendrá una limitada ductilidad. En tales casos es necesario establecer un compromiso razonable entre dos o más propiedades.

Una segunda consideración para la selección es cualquier deterioro de las propiedades del material que pudieran ocurrir durante su servicio y operación; por ejemplo una reducción significativa en la resistencia mecánica debida a la exposición del material a elevadas temperaturas o a ambientes corrosivos.

Por último, probablemente la consideración más determinante es la económica: ¿cuál será el costo del producto terminado? Se puede encontrar que un material tiene el conjunto ideal de propiedades pero es prohibitivamente caro. Aquí otra vez, alguna clase de compromiso es inevitable. No hay que olvidar que el costo final de una pieza incluye los gastos hechos para producir la forma deseada.

Los ingenieros y los científicos deben estar familiarizados con las diferentes características y las relaciones estructura-propiedad, así como las técnicas de procesamiento de los materiales para seleccionar los más confiables y avanzados en base a los criterios antes mencionados.

1.3 Clasificación de los materiales.

Los materiales sólidos han sido convenientemente clasificados en tres grupos básicos: metales, cerámicos y polímeros. Este esquema está basado primordialmente en las características químicas y en la estructura atómica. Es importante mencionar que existen materiales que no caen dentro de alguno de estos grupos, por lo que además de estos tres grupos de materiales se deben considerar dos tipos más, los

materiales compuestos y los semiconductores, que son de gran importancia en ingeniería. Los compuestos consisten de una combinación de dos o más materiales diferentes, mientras que los semiconductores son utilizados debido a sus inusuales características eléctricas. A continuación se presenta una breve explicación de los tipos de materiales y sus características representativas.

- **Metales.** Estos materiales son sustancias inorgánicas que están compuestas de uno o más elementos metálicos, pudiendo contener también algunos elementos no metálicos. Ejemplos de elementos metálicos son hierro, cobre, aluminio, níquel y titanio; elementos no metálicos, como carbono, nitrógeno y oxígeno, pueden también estar contenidos en los materiales metálicos. Los metales tienen un gran número de electrones no localizados, esto es, que no se encuentran ligados a un átomo en particular, además tienen una estructura cristalina en la que los átomos están dispuestos de manera ordenada. Muchas de las propiedades de los metales son atribuidas directamente a estos electrones y a su estructura. Los materiales metálicos son, en general, muy buenos conductores eléctricos y térmicos, no son transparentes y la superficie pulida de un metal puede tener una apariencia de espejo. Además, presentan una alta resistencia mecánica y son poco deformables, por lo cual encuentran un uso extensivo en las aplicaciones estructurales.

Los metales y aleaciones (combinación de dos o más metales, o un metal y un no metal) se dividen normalmente en dos clases: metales y aleaciones ferrosas, que contienen un alto porcentaje de hierro, como el acero y los hierros fundidos, y metales y aleaciones no ferrosas, que carecen de hierro o sólo contienen cantidades relativamente pequeñas; ejemplos de metales no ferrosos son aluminio, cobre, zinc, titanio y níquel.



Figura 1.2 Vista seccionada del monoblock del motor de un automóvil de 4 cilindros fabricado con hierro gris.

- **Cerámicos.** Los materiales cerámicos son materiales inorgánicos constituidos por elementos metálicos y no metálicos unidos químicamente; la mayoría son frecuentemente óxidos, nitruros y carburos. Pueden ser de estructura cristalina, no cristalina o la mezcla de ambos. El amplio rango de materiales que caen dentro de esta clasificación incluye cerámicos que están compuestos de minerales de arcilla, el cemento y el vidrio. La mayoría de los materiales cerámicos tienen alta dureza y son aislantes al paso de la electricidad y el calor, son muy resistentes a las altas temperaturas, a los ambientes corrosivos y al desgaste, además de presentar poco peso con respecto a otros materiales, pero tienden a la fragilidad mecánica (tendencia a la fractura). Una importante aplicación de estos materiales son las placas cerámicas del transbordador espacial que protegen térmicamente la estructura interna de aluminio del transbordador durante el lanzamiento y la reentrada a la atmósfera terrestre. Los procesos químicos actuales operan bajo condiciones de servicio más agresivas, incluyendo mayores temperaturas y presiones, así como una mayor presencia de impurezas. Para manejar estas condiciones, lo antiguo se ha convertido en lo actual, ya que los materiales cerámicos fueron las primeras herramientas con las

que el hombre enfrentó a la naturaleza y ahora sirven a las necesidades de la industria moderna, ofreciendo soluciones a problemas difíciles de materiales. Para aplicaciones que combinan corrosión, abrasión y temperaturas entre 2500° y más de 1650 °C, los productos cerámicos son frecuentemente el único material efectivo de construcción.

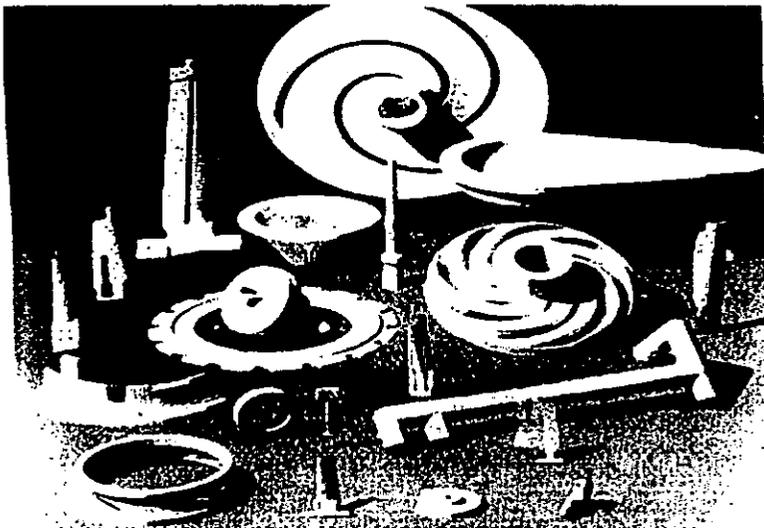


Figura 1.3 Una variedad de complejos componentes cerámicos incluye impulsores y alabes, los cuales permiten a las turbinas operar eficientemente a más altas temperaturas.

- **Polímeros.** La mayoría de los materiales poliméricos están formados por largas cadenas de moléculas orgánicas o redes que son químicamente basadas en el carbono, el hidrógeno y algunos elementos no metálicos. Estructuralmente, la mayoría de los polímeros no son cristalinos, pero algunos constan de mezclas de regiones cristalinas y no cristalinas. Su rigidez y ductilidad varía considerablemente y típicamente presentan baja densidad. Debido a la naturaleza de su estructura interna, la mayoría son malos conductores de la electricidad, por lo que son buenos aislantes. En general, los materiales poliméricos tienen temperaturas de fluencia (ablandamiento) o degradación relativamente bajas. Los

polímeros encontrados en la naturaleza (aquéllos derivados de plantas y animales) han sido utilizados por muchos siglos, de los que se pueden mencionar: madera, caucho, algodón, lana, piel y seda. Otros polímeros naturales, tales como las proteínas, las enzimas, los almidones y la celulosa, son importantes en los procesos biológicos y fisiológicos de plantas y animales. Desde principios de 1900 se han desarrollado numerosos polímeros que fueron sintetizados a partir de pequeñas moléculas orgánicas; así muchos de los plásticos, gomas y fibras más útiles son polímeros sintéticos. De hecho, desde el fin de la Segunda Guerra Mundial, el campo de los materiales ha sido virtualmente revolucionado por el advenimiento de este tipo de materiales, que pueden ser producidos a bajos costos y se pueden manejar sus propiedades hasta el grado que muchos son superiores a sus contrapartes naturales. En algunas aplicaciones las partes de metal y de madera han sido reemplazadas por plásticos.

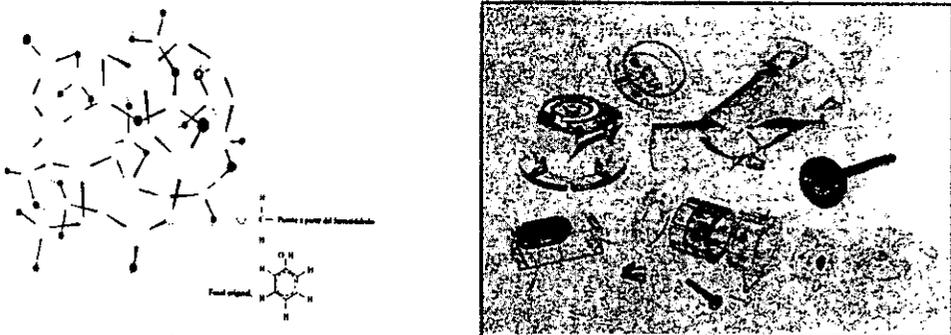


Figura 1.4 Muestra de una cadena de polímeros (izquierda) y de varios componentes fabricados de polímeros.

- **Compuestos.** Un material compuesto es un complejo material sólido que está formado por dos o más materiales que en una escala macroscópica conforman un material útil. Los materiales compuestos son diseñados para exhibir las mejores propiedades o cualidades de cada uno de los constituyentes, o alguna propiedad

que no posee ninguno de los elementos por separado. La combinación de estos dos o más materiales es hecha por medios físicos, lo que es opuesto al enlace químico que toma lugar en el caso de aleaciones de materiales monolíticos. En un verdadero compuesto se pueden diferenciar los elementos constituyentes ya que uno (llamado matriz) rodea y contiene totalmente al que se le denomina material de refuerzo, de modo que las dos fases actúan de manera conjunta para producir características que no pueden ser obtenidas en los constituyentes por separado. Normalmente, los componentes no se disuelven recíprocamente y pueden ser identificados físicamente y no perder su identidad gracias a la interfase entre los componentes. Estas características no se encuentran en los sólidos tales como las aleaciones metálicas o los copolímeros, en los que las fases no se pueden reconocer a simple vista. Los materiales compuestos pueden ser de muchos tipos; algunos de los tipos predominantes son los reforzados con fibras y los compuestos particulados (partículas de un elemento contenidas en una matriz). Existen muchas combinaciones diferentes de refuerzos y matrices que se pueden usar para producirlos. Dos destacados ejemplos de materiales compuestos modernos son la fibra de carbono en una matriz epóxica que se utiliza para alas y motores en aviones y el sulfuro de polifenileno (PPS) reforzado con fibra de vidrio para instalaciones en campos petrolíferos por su excelente resistencia a la corrosión de este material. En general, muchos de los recientes desarrollos en el campo de los materiales han involucrado a los materiales compuestos. Así, el uso de este tipo de materiales provee algunos beneficios clave que pueden conducir a mejoras significativas en el desempeño y la productividad, por ejemplo los compuestos incrementan la libertad de diseño; además la habilidad para controlar sus propiedades hace de los compuestos el único material capaz de trasladar a los revolucionarios y modernos conceptos de diseño a la realidad.

innovaciones son los satélites de comunicaciones, ordenadores avanzados, calculadoras, relojes digitales y robots, por mencionar solo algunos.

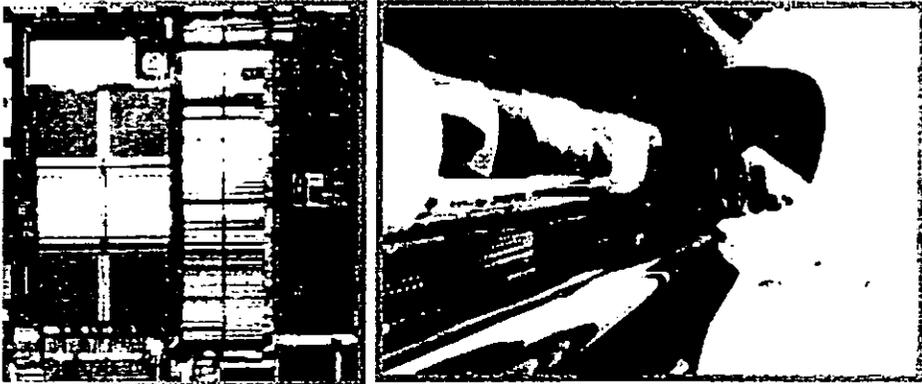


Figura 1.6 Muestra de un circuito impreso (izq) y proceso de fabricación del silicio para un procesador (der).

1.4 Necesidades Modernas de los Materiales.

La ciencia e ingeniería de materiales influyen en nuestras vidas cada vez que compramos o usamos un nuevo aparato, máquina o estructura. Algunos ejemplos de los nuevos desarrollos que están saliendo de los laboratorios son lo siguientes: circuitos integrados que contendrán billones de componentes por chip lo que provocará una revolución en las tecnologías de información; aparatos que pueden manipular y almacenar datos ópticamente; materiales que pueden sensar, de nuevas maneras, la temperatura, presión y química del medio ambiente que los rodea para controlar procesos y máquinas; materiales poliméricos activos cuyas propiedades, como color o rigidez, dependen de la aplicación de campos eléctricos o fónicos; biomateriales que pueden servir como base para la regeneración de partes del cuerpo humano. tales como tejido vivo u órganos; solo por citar algunos ejemplos.

Los materiales compiten unos con otros por su existencia y los nuevos mercados, y en consecuencia, es lógico que se produzca el reemplazamiento de un material por otro para ciertas aplicaciones. La disponibilidad de materiales brutos, el costo de la manufactura y el desarrollo de nuevos materiales y procesos para productos, son los factores prioritarios que dan lugar a los cambios en el uso de los materiales. A pesar del tremendo progreso que se ha tenido en el conocimiento y desarrollo de los materiales en los últimos años, aún quedan retos tecnológicos que requieren de materiales todavía más sofisticados y especializados para ser resueltos, por lo que resulta apropiado tener algunas consideraciones para visualizar la perspectiva de los materiales.

La energía es un tema de interés actual, ya que se ha reconocido la necesidad de encontrar nuevas y económicas fuentes de energía y además la de utilizar los recursos actuales más eficientemente. Indudablemente los materiales jugarán un papel significativo en todo este tipo de desarrollos, por ejemplo, se puede mencionar la conversión directa de la energía solar en energía eléctrica para demostrar este punto. Las celdas solares emplean materiales complejos y caros y para asegurar que este tipo de tecnología sea viable se deben de abaratar los costos de los materiales que son altamente eficientes en este proceso de conversión y que se cuenta con ellos actualmente pero que no están al alcance de todos.

La energía nuclear es bastante prometedora, pero las posibles soluciones a los problemas que aún restan necesariamente involucrarán a los materiales de ingeniería, desde combustibles hasta estructuras contenedoras, hasta lugares especiales para la disposición y almacenamiento de los desechos radiactivos.

Adicionalmente, es necesario considerar que la calidad del medio ambiente depende de nuestra habilidad para controlar la contaminación del aire y del

agua principalmente. Las técnicas de control de la contaminación emplean una gran variedad de materiales, además, los métodos de procesamiento y refinamiento de los materiales deben ser mejorados de modo que produzcan una menor degradación ambiental, esto es, menos contaminantes y un menor despojo a la naturaleza por la explotación de los recursos naturales, y en especial de los materiales que podemos encontrar en el medio.

Por otro lado, significativas cantidades de energía se verán involucradas en la transportación, y sólo reduciendo el peso de los vehículos de transporte (automóviles, aviones, trenes, etc.), así como incrementando las temperaturas de operación de los motores, se incrementará la eficiencia en el uso de los combustibles. Cabe mencionar que la relación resistencia-densidad de los materiales estructurales se ha incrementado dramáticamente a lo largo de la era industrial, así los modernos materiales son aproximadamente 50 veces mejores que el hierro usado hace dos siglos y, actualmente, las superaleaciones pueden operar a temperaturas por encima de los 1100^o C y los cerámicos avanzados llevan estas temperaturas de operación a los 1350^o C. El resultado final es una producción de energía más eficiente de la forma en que la sociedad lo necesita, es decir, con una significativa reducción en los costos, los requerimientos de combustible y la contaminación. Nuevos materiales estructurales con alta resistencia y baja densidad quedan aún por desarrollar e investigar, así como materiales que tengan una mayor capacidad de soportar altas temperaturas, para que sean utilizados en los componentes de los nuevos motores.

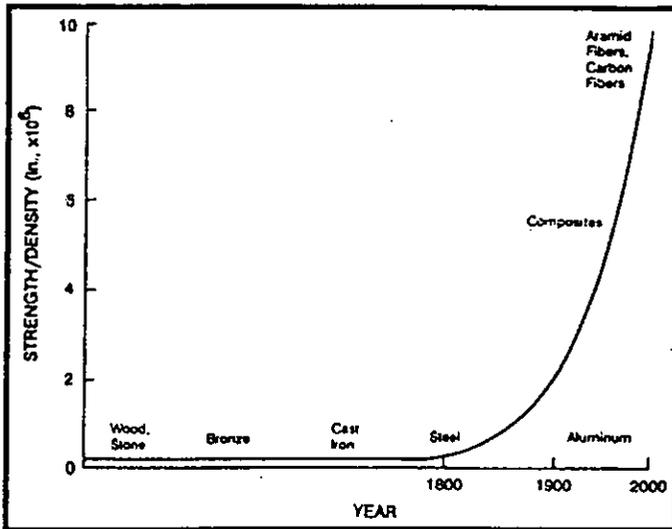


Figura 1.7 Gráfica que muestra el progreso de los materiales en su relación resistencia/densidad como una función del tiempo¹.

Muchos materiales que actualmente utilizamos son derivados de recursos que no son renovables, es decir, que no tienen la posibilidad de ser regenerados, esto incluye principalmente a los polímeros (cuya materia prima es el petróleo) y algunos metales. Estos recursos no renovables están siendo gradualmente agotados, por lo que se necesita que se descubran nuevas reservas o se desarrollen nuevos materiales que tengan propiedades similares o mejores y que su impacto en el medio ambiente sea menor. Por último, es necesario resaltar que todas las alternativas antes mencionadas representan un gran reto para los científicos, pero sobre todo para los ingenieros en materiales.

¹ Committee of Science and Technology of U.S. Materials Science and Engineering for the 1990s. E.U. 1995

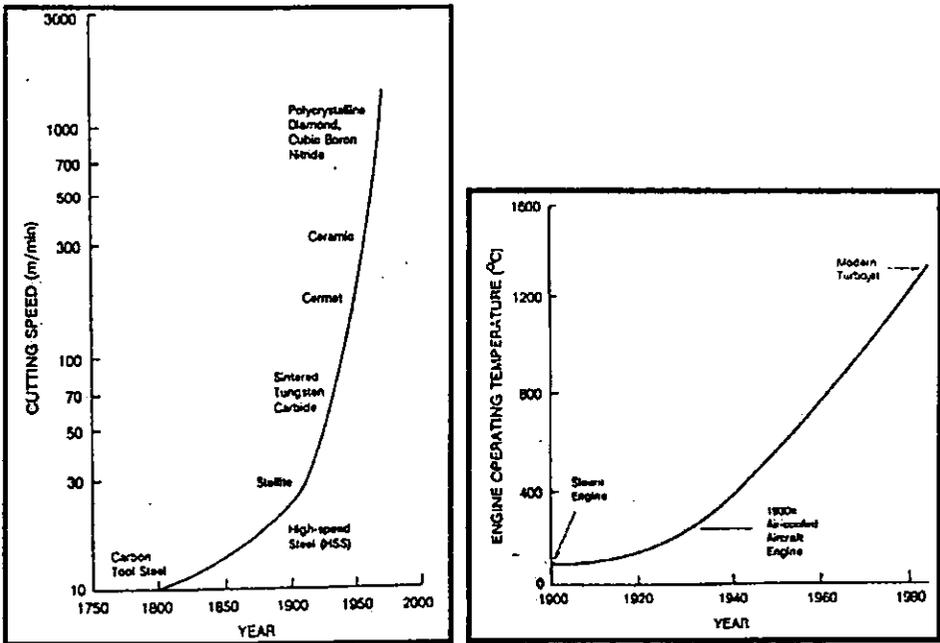


Figura 1.8 En la gráfica de la izquierda, se muestra el incremento en la velocidad de las herramientas de corte de acuerdo al progreso de los materiales. En la gráfica de la derecha, se muestra como el aumento en las temperaturas de operación de los motores ha sido posible gracias a los materiales modernos².

² Committee of Science and Technology of U.S. Materials Science and Engineering for the 1990s. E.U. 1995

Capítulo 2. Materiales Compuestos.

2.1 Introducción.

Muchas de nuestras tecnologías modernas requieren de materiales con combinaciones inusuales de propiedades que no pueden ser encontradas en los materiales convencionales como las aleaciones metálicas, las cerámicas o los polímeros. Esto es especialmente cierto para materiales que se necesitan en la industria aeroespacial y en las aplicaciones submarinas o de transporte. Por ejemplo, los ingenieros aeronáuticos están incrementando la búsqueda de materiales estructurales que tengan baja densidad, sean resistentes a la abrasión y al impacto, presenten buenas propiedades mecánicas y se dificulte su corrosión, por lo que ésta es una rara y formidable combinación de características. Frecuentemente, los materiales resistentes son relativamente densos, y cuando se incrementa la dureza o la resistencia generalmente da como resultado un incremento en la fragilidad. Las combinaciones y rangos de propiedades en los materiales ha sido, y sigue siendo, creciente debido al desarrollo de los materiales compuestos.



Figura 2.1 En la industria aeroespacial es donde se ha hecho necesario el incremento en el uso de los materiales compuestos de alto desempeño.

No existe una definición universal de lo que es un material compuesto, ya que las definiciones en la literatura difieren ampliamente. El problema es el nivel de la definición; en el diccionario común y corriente el término “compuesto” se refiere a algo hecho de varias partes o elementos. Cuando se piensa en una definición para materiales compuestos que vaya de acuerdo con esta idea, rápidamente se puede encontrar que varias acepciones son posibles según la base o nivel de definición. A un nivel básico o elemental todos los materiales que están formados de dos o más átomos diferentes pueden ser clasificados como compuestos, por lo que se puede incluir a las aleaciones, los polímeros y las cerámicas, y sólo los elementos puros serían excluidos. A nivel microestructural, los materiales formados de dos o más diferentes estructuras moleculares o fases podrían ser definidos como un material compuesto, tal como el acero que es una aleación de fases de hierro y carbono. En el nivel macroestructural, se puede definir un material compuesto como un sistema formado de diferentes macroconstituyentes. Esta última definición se parece mucho a lo que actualmente se considera un material compuesto (o solamente llamado compuesto), pero para ser más exacto se debe ir más allá de la forma de los constituyentes e incluir dos características más: (1) los elementos individuales que conforman a un compuesto son, casi siempre, químicamente diferentes, y (2) son esencialmente insolubles uno del otro. Así, una definición de ingeniería para un material compuesto que tome en cuenta tanto la forma estructural como la composición de los constituyentes sería la siguiente:

“Un material compuesto es la combinación macroscópica de dos o más materiales distintos, que se crea con el propósito de obtener características y propiedades específicas que no pueden ser obtenidas en los materiales originales”.

Los constituyentes conservan su identidad de tal modo que pueden ser físicamente identificados y exhiben una interfase entre cada uno de ellos. Además, un material compuesto es fabricado artificialmente por lo que las aleaciones metálicas y la mayoría de las cerámicas no entran en esta definición porque sus múltiples fases son formadas como consecuencia de un fenómeno natural. De cualquier manera, como los compuestos son usualmente utilizados por sus propiedades estructurales, esta definición puede ser restringida para sólo incluir aquellos materiales que contienen un material de refuerzo (tales como partículas o fibras) contenido en un material de soporte (llamado matriz). En el diseño de compuestos, los científicos e ingenieros han combinado ingeniosamente varios metales, cerámicos y polímeros para producir una nueva generación de extraordinarios materiales que pueden seleccionarse para proporcionar combinaciones poco usuales de rigidez, resistencia, peso, rendimiento a altas temperaturas, resistencia a la corrosión, dureza o conductividad.

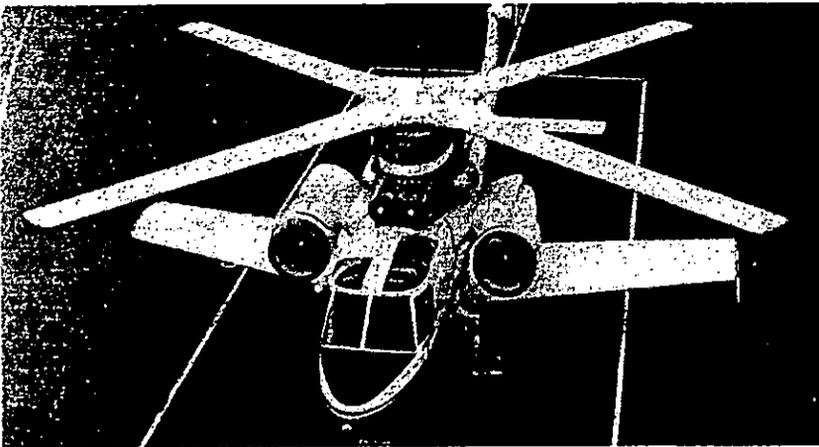


Figura 2.2 Este tipo de alas para helicópteros avanzados es fabricado con un material compuesto.

2.2 Constituyentes de los Compuestos.

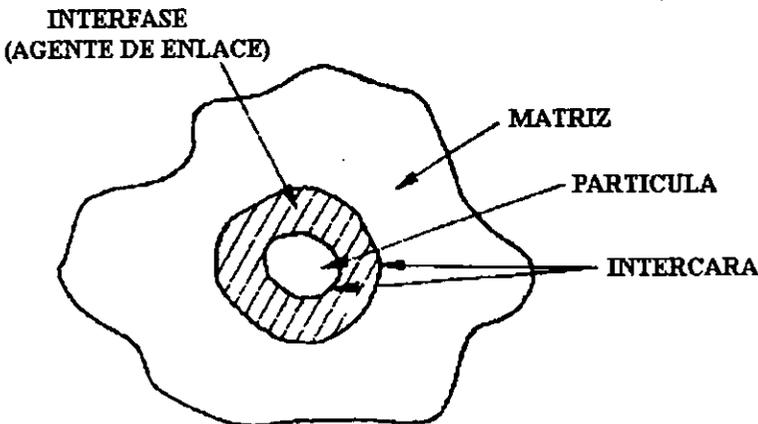
En principio, los compuestos pueden ser conformados por cualquier combinación de dos o más materiales, ya sean metálicos, orgánicos o inorgánicos. Así, las posibles combinaciones de materiales en un compuesto son virtualmente ilimitadas. Pero la forma de los constituyentes es más restringida y las más comúnmente usadas en materiales compuestos son: partículas, fibras, láminas o capas, hojuelas y matrices. Se puede decir que la mayoría de los compuestos están formados por solo dos fases; una es denominada la matriz o cuerpo, la cual es continua y rodea y contiene a la otra fase, comúnmente llamada la fase dispersa o constituyente estructural.



Figura 2.3 Posibles geometrías de la fase de refuerzo.

Para mejorar la resistencia en un material práctico el diseñador de un compuesto embebe los constituyentes estructurales en una matriz de otro material, la cual actúa como un adhesivo, enlazando a los reforzamientos y brindando solidez al material; además, protege a la fase dispersa del ataque del medio ambiente y de daños físicos que pudieran iniciar una grieta. Las propiedades de los compuestos están en función de las propiedades de las fases constituyentes, sus contenidos

relativos y la geometría de la fase dispersa; esto último significa la forma y tamaño de las partículas, la distribución y la orientación. La resistencia y tenacidad de un compuesto está en función, principalmente, de las características del material reforzante, pero la matriz hace su propia contribución a las propiedades; por ejemplo, la habilidad de un material compuesto para conducir el calor y la corriente eléctrica está altamente influenciada por la conductividad de la matriz, así el comportamiento mecánico está, no sólo gobernado por los reforzamientos pero si por una sinergia entre éstos y la matriz. De este modo, los compuestos más típicos son aquellos que están formados por un constituyente estructural embebido en una matriz, pero muchos compuestos no tienen matriz y son formados de uno o varios elementos constituyentes que consisten en dos o más materiales diferentes. Estructuras de tipo "sandwich" y compuestos laminados, por ejemplo, son formados enteramente de capas, las cuales al juntarse dan la forma final al compuesto.



CONSTITUYENTES EN UN COMPUESTO

Figura 2.4 Elementos constituyentes de un material compuesto.

2.2.1 Interfases e intercaras.

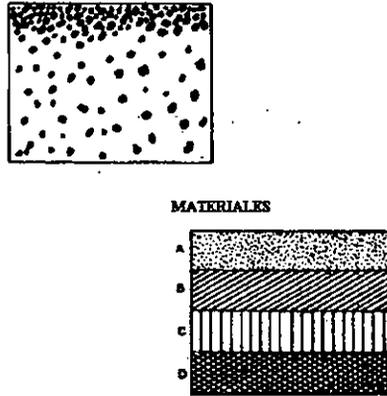
Debido a que los diferentes constituyentes son mezclados o combinados, siempre existe una región contigua, que puede ser llamada simplemente intercara, la cual es la superficie que forma la frontera común entre los constituyentes. Una intercara es, de alguna manera, análoga a los límites de grano en los materiales monolíticos. La frontera entre la matriz y el reforzamiento, la intercara, es controlada para obtener las propiedades deseadas a partir de un par de materiales dados. En el caso de materiales compuestos de matriz cerámica, la intercara es intencionalmente algo dúctil, minimizando la liga del reforzamiento y la matriz. Cuando el compuesto es deformado, se propagan grietas a través de la matriz hasta que se encuentra a un elemento de reforzamiento el cual juega el papel de bloquear el crecimiento de la grieta. Una grieta que se propaga y que encuentra un elemento de refuerzo debe ser deflectada o debe intentar separar a los dos constituyentes. Los dos procesos absorben una buena cantidad de energía, disminuyendo el crecimiento de la grieta y dando como resultado un aumento sustancial en la tenacidad del compuesto en comparación con el cerámico no reforzado. En algunos casos, de cualquier manera, la región contigua es una fase distinta que es agregada, llamada interfase o agente de enlace; como ejemplos pueden citarse el recubrimiento en las fibras de vidrio en los plásticos reforzados y el adhesivo que une las capas en un compuesto laminado. Cuando la interfase está presente existen dos intercaras, una entre cada superficie de ésta y el elemento adyacente.

La interfase en los compuestos es la región donde los esfuerzos son transmitidos entre el reforzamiento y la matriz. La interacción entre el reforzamiento y la matriz es una variable de diseño, que puede ser desde un enlace químico muy fuerte hasta fuerzas de fricción bajas. Generalmente, un enlace fuerte hace al compuesto más rígido pero frágil; un enlace débil hace decrecer la rigidez pero

aumenta la tenacidad. Si el agente de enlace no es al menos tan fuerte como la matriz ocurrirán fracturas y separaciones en la interfase bajo ciertas condiciones de carga; frecuentemente, el enlace más deseable es un intermedio entre los límites fuerte y débil. El enlace es también crítico en la estabilidad a largo plazo del compuesto, juega un papel preponderante en las propiedades de fatiga, comportamiento ambiental y resistencia bajo condiciones de calor y humedad.

2.2.2 Distribución de los constituyentes.

Los constituyentes de un compuesto pueden ser distribuidos generalmente de dos maneras, con un patrón regular o con patrón variable; de cualquier modo, la forma más común es que estén presentes bajo un patrón regular y repetitivo, con una sección transversal relativamente uniforme tanto en material como en estructura y con una densidad uniforme. Los compuestos reforzados con partículas y algunos reforzados con fibras, en los cuales el elemento estructural está distribuido a lo largo de la matriz, son denominados como del tipo homogéneos. La segunda posibilidad es un patrón variable de constituyentes que no es repetitivo ni en la forma interna ni en el material; los materiales de este tipo son denominados compuestos con gradiente, los cuales exhiben un cambio progresivo en composición, estructura y propiedades en función de la posición en el material. Los materiales laminados que están formados de diferentes capas entran en esta categoría. Es importante aclarar que tanto en los compuestos con gradiente en el reforzamiento como en los homogéneos, los constituyentes estructurales pueden llevar un arreglo orientado o desorientado.



COMPUESTOS CON GRADIENTE EN EL
REFUERZO

Figura 2.5 Imagen que muestra los tipos de reforzamiento con gradiente.

2.3 Desempeño de los Materiales Compuestos.

De la discusión previa acerca de la naturaleza y morfología de los materiales compuestos, es evidente que su comportamiento y propiedades son determinadas por:

- Los materiales de los constituyentes que lo conforman.
- La forma y el arreglo estructural de los constituyentes.
- La interacción entre los constituyentes.

Tomando primero, el más importante de estos factores, es obvio que las propiedades intrínsecas de los materiales de los elementos constituyentes son de importancia crítica, ya que en gran medida determinan el orden general o rango de propiedades que el compuesto presentará. De cualquier modo, como ya se ha visto, la interacción de los constituyentes da como resultado un nuevo grupo de

propiedades; estas propiedades combinadas en el material compuesto derivan de las propiedades individuales de cada elemento constituyente.

Las características estructurales y geométricas de los constituyentes hacen también importantes contribuciones a las propiedades de los compuestos. La forma y el tamaño de los constituyentes individuales, su arreglo estructural y distribución, y la cantidad relativa de cada uno de ellos son factores importantes que contribuyen al desempeño de los compuestos. Todas estas variables son las que dan a los materiales compuestos gran parte de su versatilidad.

De gran importancia en el desempeño y uso de los compuestos son los efectos producidos por la combinación y/o interacción de los elementos que los constituyen. Ya que los materiales compuestos son mezclas o combinaciones de elementos que difieren tanto en el material como en la forma, las propiedades resultantes en el compuesto deben ser siempre diferentes. El principio básico que rige el diseño, desarrollo y uso de los materiales compuestos es aquél en el que se usan diferentes constituyentes para obtener combinaciones de propiedades diferentes a partir de aquéllas dadas en los componentes individuales.

2.3.1 Combinación de efectos en los compuestos.

Existen generalmente tres maneras en las que el nuevo grupo de propiedades que ofrece el material compuesto puede ser diferente de las observadas en los constituyentes, las cuales se describen a continuación:

- **Adición.** Es la manera más obvia y sigue la simple regla de las mezclas y da como resultado una suma de las propiedades individuales de los constituyentes. Esto sucede cuando la contribución de cada constituyente es independiente, por ejemplo,

la densidad de un compuesto es usualmente la suma de las fracciones en volumen de cada uno de los constituyentes, multiplicadas por sus densidades. En los compuestos laminares esta simple regla de suma generalmente se aplica para la conductividad eléctrica y las propiedades de transferencia de calor.

- **Complementación.** La segunda manera es aquella en la que cada constituyente complementará al otro, contribuyendo con propiedades distintas y separadas. Por ejemplo, muchos materiales colaminados y laminados son formados de una capa que provee resistencia a la corrosión, buena apariencia o algunas otras propiedades superficiales más una capa o capas de un material más fuerte que sea capaz de proveer la resistencia estructural necesaria. Algunos metales que se usan como carga para los plásticos proveen cualidades de absorción de sonidos, tal como el plomo disperso en una hoja de vinyl.

- **Interacción.** La tercera manera ocurre cuando una propiedad o acción dada de un constituyente no es independiente de la propiedad o acción de otro y se puede decir que uno suplementa al otro. Las propiedades resultantes en el material compuesto quedan usualmente entre las de los constituyentes o por encima de éstas.

El efecto suplementario más deseable es el de un mejoramiento significativo en las propiedades; por ejemplo, la adición de aserrín a una resina plástica provee una mezcla que es más fuerte que los simples materiales por separado. Otro ejemplo clásico son los plásticos reforzados con fibra de vidrio, en el que la resistencia del compuesto es considerablemente más grande que la resistencia de alguno de los materiales por separado, ya sea la resina o la fibra de vidrio. En el compuesto de resina y aserrín, este último inhibe la deformación plástica de la resina mientras que ésta mantiene a las partículas unidas. En los plásticos reforzados con fibras, el incremento en la resistencia se da como resultado de que la deformación de cada

uno elementos constituyentes no es independiente una de la otra. El plástico, que tiene bajo módulo y baja resistencia, se deforma primero y distribuye el esfuerzo a las fibras de vidrio, que tienen una alta resistencia; además, cuando una fibra de vidrio individual falla, el esfuerzo es redistribuido a través de la resina hacia las otras fibras.

La naturaleza y el éxito de la interacción entre los constituyentes de un material compuesto dependen significativamente de las intercaras. La intercara es particularmente crítica en los compuestos estructurales. Lo que pase en la intercara depende de las reacciones entre las superficies de los elementos constituyentes o entre estas superficies y aquella que sirve como fase de enlace; tales reacciones involucran fenómenos como la compatibilidad química, las características de adsorción, mojabilidad y esfuerzos resultantes de la diferencia de expansión. Todos estos fenómenos son poco conocidos, tanto empírica como teóricamente. Es claro, que cuando una fase de enlace se agrega, la adhesión del agente enlazante y su habilidad para transferir esfuerzos son de gran importancia.

2.4 Factores de Diseño en los Materiales Compuestos.

Los más complejos factores que controlan las propiedades ingenieriles de los materiales compuestos ya han sido discutidos. Es importante decir que, muchas variables, igualmente complejas, controlan la calidad y confiabilidad de los materiales compuestos, y relacionan la calidad de los elementos individuales y, a veces más importante, la calidad involucrada cuando los constituyentes son combinados para dar como resultado un material compuesto. Por ejemplo, para obtener las propiedades de resistencia esperadas en un compuesto de hojuelas de vidrio, es esencial que las hojuelas estén libres de impurezas y no presenten planicidad en su superficie, pero es aun más importante un alto grado de paralelismo

en la distribución de las hojuelas que la uniformidad de las mismas. En muchos compuestos reforzados con fibras, la uniformidad en la orientación de las fibras, el control en el contenido de la matriz, la calidad de los enlaces interfaciales y muchas otras variables de proceso influyen directamente en el desempeño del compuesto.

En los últimos 25 años, sólo un limitado número de standards y procedimientos de prueba se han establecido para evaluar la calidad y confiabilidad de los materiales compuestos. El problema es complejo, ya que el campo de los compuestos es todavía nuevo y sólo limitados estudios han sido implantados para medir y controlar la calidad; aunque dada la historia de las formas y materiales monolíticos convencionales, tales como fundiciones, piezas moldeadas, etc., este problema no es muy peculiar para los compuestos. A través de los años las variables problemáticas de calidad como la aglomeración, rechupes, segregación, porosidad y composición química, han tenido que ser tratadas en la producción y procesamiento de formas y materiales establecidos, por lo que la dificultad en el reto de evaluar la calidad y obtener propiedades uniformes en los materiales compuestos no es tan grande como parece. A medida que el campo de estos materiales avanza, serán desarrollados métodos suficientemente precisos para medir los cambios en la composición y la estructura de los compuestos que son los responsables de cambios significativos en las propiedades totales. Estos métodos serán, probablemente, no destructivos y capaces de determinar el grado de confiabilidad de una producción entera de materiales compuestos.

2.5 Clasificación en Base al Refuerzo.

Un esquema simple para la clasificación de los materiales compuestos es separarlos de acuerdo a la forma que tiene el elemento de refuerzo y se pueden distinguir tres grandes divisiones, esto es, reforzamiento con partículas,

estos compuestos no son considerados dentro de esta clasificación; de cualquier modo hay ocasiones en que el material de carga si refuerza a la matriz. Lo mismo puede decirse para las partículas que son agregadas con propósitos no estructurales, tales como resistencia al fuego, control dimensional o incremento en la conductividad térmica.

Para la mayoría de estos compuestos la fase particulada es más dura y resistente que la matriz y cada partícula tiende a restringir el movimiento de ésta. En esencia, la matriz transfiere a las partículas parte del esfuerzo aplicado y se queda con una fracción de la carga; así, el grado de reforzamiento o mejoramiento del comportamiento mecánico depende de un enlace fuerte en la interfase matriz-partícula. Para los compuestos de partícula dispersa las partículas son normalmente mucho más pequeñas, teniendo diámetros entre 0.01 a 0.1 μm (10 a 100 nm). La interacción partícula-matriz que lleva al reforzamiento ocurre a un nivel atómico o molecular y el mecanismo que se sigue es similar al de endurecimiento por precipitación. Mientras que la matriz se queda con la mayor porción de la carga aplicada las pequeñas partículas dispersas impiden el movimiento de las dislocaciones; de este modo, la deformación plástica es restringida tal que los esfuerzos a la cedencia y a la tensión, así como la dureza, mejoran.

Materiales compuestos reforzados con fibras.

Tecnológicamente, los materiales compuestos más importantes son aquéllos en los que la fase dispersa tiene forma de fibra, es decir, que contiene elementos de refuerzo que tienen longitudes mucho más grandes que las dimensiones de su sección transversal, tal que un material compuesto es considerado como de fibra discontinua o corta si sus propiedades varían con la longitud de la fibra. Por otro lado cuando la longitud de la fibra es tal, que con cualquier incremento no se observa un mejoramiento en el módulo de elasticidad, el material compuesto se

considera como de reforzamiento con fibra continua y la mayoría de éstos tienen una longitud casi igual a la del compuesto.

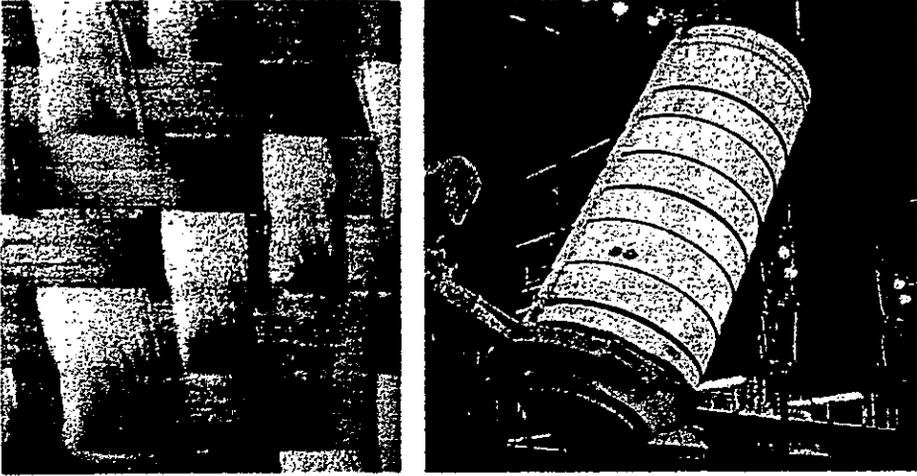


Figura 2.7 Fibras de vidrio entrelazadas en forma de tejido (izq). Este tipo de material puede ser conformado en grandes y complejas formas, como la cubierta del motor de un cohete (der).

Existen dos razones por las que los compuestos de alto desempeño son reforzados con fibras largas. Debido a que las cargas son transferidas de la matriz hacia las fibras, en términos de que las fuerzas de corte actúan en la superficie de las fibras, su área superficial debe ser más grande que su área transversal; en otras palabras, un elemento de refuerzo eficiente deberá ser mucho más grande en una dimensión que en sus otras dos. Para la mayoría de los reforzamientos la relación crítica es aquella que guarda la longitud con respecto al diámetro y debe ser aproximadamente de 100:1. La relación exacta depende de la resistencia de las fibras, el carácter de la matriz y el grado de enlace entre ellas dos. Por lo tanto, las fibras largas refuerzan más eficientemente a un compuesto que las fibras cortas o las partículas. La segunda razón por la que las fibras continuas se han vuelto la forma dominante en los elementos de refuerzo de los materiales compuestos avanzados es

que su orientación puede ser controlada precisamente y la estructura interna del compuesto puede ser diseñada para anticipar los esfuerzos a los que será sometido.

El diseño de los materiales compuestos reforzados con fibras a veces incluye altos valores de resistencia y/o rigidez en relación con el peso; estas características son expresadas como resistencia específica y módulo específico, que corresponden, respectivamente, a la relación de resistencia a la tensión con el peso específico y la relación del módulo de elasticidad con el peso específico. Los compuestos reforzados con fibras con excepcional resistencia específica y módulo han sido producidos de modo que utilizan fibras y matrices de baja densidad.

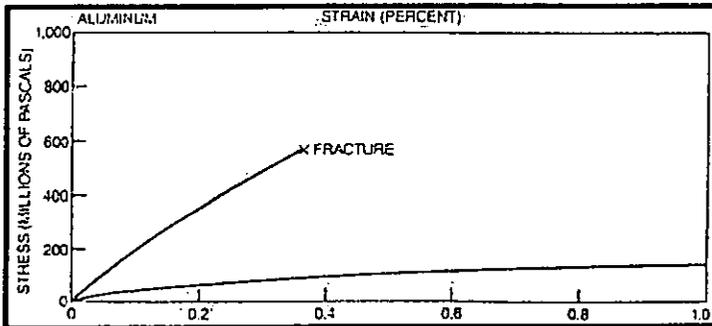


Figura 2.8 El incremento en la rigidez que se logra cuando se refuerza el aluminio es evidente, como lo muestra esta gráfica en la que se relaciona el esfuerzo contra la deformación. La curva superior corresponde al material compuesto¹.

Compuestos estructurales.

Un compuesto estructural está normalmente formado tanto de materiales homogéneos como de otros compuestos y sus propiedades dependen, no sólo de las características de los materiales constituyentes sino también del diseño o arreglo geométrico de los diferentes elementos estructurales. Los compuestos laminares y los paneles sandwich son dos de los más comunes compuestos estructurales; las propiedades de los primeros son virtualmente isotrópicas en un plano bidimensional,

¹ Advanced Materials and Processes, publicación mensual. Niskanen y Mohn; marzo 1988.

lo que se hace posible colocando varias hojas de un material compuesto altamente anisotrópico una sobre otra de modo que la dirección de alta resistencia se varia sucesivamente con cada capa. Los paneles sandwich consisten de dos resistentes y rígidas hojas que son separadas por una estructura. Este tipo de estructuras (honeycomb, por ejemplo) combina altos valores de resistencia y rigidez con bajas densidades.

2.6 Clasificación en Base a la Matriz.

Los materiales compuestos pueden ser clasificados de varias maneras. Una posible clasificación distingue entre los compuestos (1) tradicionales y los (2) sintéticos. Los primeros son aquellos que se encuentran en la naturaleza o que han sido producidos por las civilizaciones durante muchos años. La madera es un compuesto natural, mientras que el concreto (cemento Portland con arena o grava) y el asfalto son compuestos tradicionales utilizados en construcción. Los compuestos sintéticos son sistemas modernos de material normalmente asociados con la industria manufacturera, en los que primero son producidos los componentes por separado y después son combinados de una forma controlada para alcanzar la estructura, propiedades y geometría deseadas.

Pero el sistema de clasificación para los materiales compuestos que se utilizará en esta sección del estudio se basa en la matriz. Esta clasificación puede aplicarse tanto para los compuestos tradicionales como para los sintéticos, y se agrupa como sigue:

- **Compuestos de matriz metálica.** Conocidos como MMCs por sus siglas en inglés (metal matrix composites), consisten de una matriz metálica reforzada por un segundo constituyente. Las fases reforzantes más comunes incluyen (1) partículas de un cerámico y (2) fibras de diferentes materiales, incluyendo

otros metales, cerámicos, carbono y boro; como ejemplos, se pueden citar al aluminio o magnesio reforzados con fibras más resistentes y de alta rigidez. Los MMCs del primer tipo son comúnmente llamados “cermets”.

- **Compuestos de matriz cerámica (CMC).** Esta es la matriz menos común en los materiales compuestos. Los cerámicos tienen ciertas propiedades atractivas, como alta rigidez y resistencia a la compresión, gran dureza y baja densidad; pero también presentan ciertas debilidades como una baja tenacidad y poca resistencia a la tensión. Los compuestos de matriz cerámica representan un intento de retener las propiedades deseables de los cerámicos y de compensar sus debilidades, especialmente en aplicaciones de alta temperatura. A la fecha, la mayoría de los desarrollos se han enfocado en el uso de fibras como fase de refuerzo, pero se han encontrado dificultades técnicas que incluyen la compatibilidad química y térmica de los constituyentes durante el procesamiento. Los materiales cerámicos usados como matrices incluyen alúmina (Al_2O_3), carburo de boro (B_4C), carburo de silicio (SiC), nitruro de boro (BN), carburo de titanio (TiC) y varios tipos de vidrio. Los materiales de refuerzo en forma de fibra incluyen el carbono, el carburo de silicio y la alúmina.
- **Compuestos de matriz polimérica (PMC).** Estos consisten de una fase primaria de polímero en la que una fase secundaria es introducida en forma de fibras, partículas u hojuelas. A nivel comercial este tipo de compuestos son los más importantes de las tres clases de compuestos sintéticos. Las resinas termofijas son los polímeros más ampliamente utilizados en los PMC. Resinas epóxi y poliéster son comúnmente mezcladas con fibras como refuerzo, y las fenólicas son mezcladas con polvos como el aserrín. Los polímeros termoplásticos son usualmente reforzados con polvos o partículas y virtualmente todos los elastómeros son reforzados con negro de humo.

Capítulo 3. Materiales Compuestos Reforzados con Partículas.

3.1 *Introducción.*

En los compuestos con reforzamiento discontinuo, las partículas de un material duro y frágil dispersas de una manera discreta y uniforme se rodean o son contenidas en una matriz más blanda y dúctil. De hecho, la estructura hace recordar a la de muchas aleaciones metálicas de dos fases endurecidas por dispersión. Sin embargo, en los compuestos no se utiliza una transformación de fase para introducir las partículas dispersas, sino que más bien se hace mediante un proceso mecánico. Las partículas, ya sean metálicas o no metálicas, por definición, no se combinan químicamente con el material de la matriz, que también puede ser metálico o no metálico.

Como con casi todos los materiales, la estructura determina las propiedades, y este tipo de compuestos no es la excepción. El tamaño, la forma, el espaciado entre las partículas, su fracción en volumen y su distribución contribuyen a las propiedades finales del compuesto. Los materiales compuestos reforzados con partículas se pueden subdividir en dos categorías generales basadas en el tamaño y la sustancia de las partículas (que influyen en las propiedades del compuesto); estas dos categorías incluyen a: 1) los compuestos endurecidos por dispersión y 2) los compuestos propiamente particulados, también llamados de partícula grande. Cabe aclarar que, en esta clase de compuestos no se incluye a los que tienen partículas con forma aplanada, los cuales poseen suficientes propiedades diferentes como para entrar en una clasificación especial; con lo que se puede establecer que los materiales compuestos particulados difieren de los que tienen como elemento de refuerzo a las fibras y a las hojuelas, en los que la distribución del constituyente

aditivo es usualmente aleatoria más que controlada, por lo que sus propiedades son generalmente isotrópicas. Los compuestos de matriz metálica (metal matrix composites o MMCs) con reforzamiento de partículas dan como resultado un incremento en la resistencia con un muy bajo costo adicional, a diferencia de aquellos con reforzamientos continuos (fibras, hojuelas, etc.) y encuentran gran aplicación donde se requieran propiedades isotrópicas, por lo que pueden superar a los compuestos reforzados con fibras.



Figura 3.1 Tipos de compuestos reforzados con partículas.

Hablando en términos de fabricación, se tiene que una ventaja muy importante que se encuentra en las aplicaciones de los MMCs, es que las partículas ofrecen diversas propiedades deseables, entre las que destacan: el carburo de boro (BC) y el carburo de silicio (SiC), que son abrasivos comerciales baratos que pueden presentar buena resistencia al desgaste así como una alta rigidez específica; el carburo de titanio (TiC) tiene un alto punto de fusión y es inerte químicamente, lo cual es excelente para el procesamiento y la estabilidad durante su uso; el carburo de tungsteno (WC) tiene una alta resistencia y dureza aún a altas temperaturas. Así, en años recientes los materiales cerámicos han sido ampliamente considerados como elementos de reforzamiento y se puede mencionar a la mica, zirconia y carburo de silicio (SiC).

La manufactura de un material compuesto óptimo involucra una cuidadosa selección de un número de variables tales como el tamaño del reforzamiento, la fracción en peso y su distribución, así como la composición del material matriz. Se han hecho varios intentos para relacionar estos parámetros con las propiedades mecánicas como la resistencia y la rigidez logrando excelentes resultados. La facilidad de fabricación de los MMCs está parcialmente influenciada por la naturaleza de la intercara entre la matriz y la fase de refuerzo. Una manera de asegurar el comportamiento deseado en la intercara sin sacrificar el desempeño de los compuestos es aplicar una delgada película de recubrimiento a los elementos de reforzamiento, la cual es compatible tanto con la matriz como con el propio reforzamiento. Desde inicios de los años 60's se han hecho varias investigaciones de la intercara en el reforzamiento para encontrar los factores que dictan el comportamiento del agente de enlace (interfase) y de la intercara, algunos de éstos son los productos de reacción interfacial, la mojabilidad entre el reforzamiento y la matriz y la estructura atómica de la intercara.

3.2 Tipos y Propiedades de los Compuestos Reforzados con Partículas.

El tamaño, naturaleza y función de las partículas varía ampliamente, desde el control del comportamiento mecánico a nivel atómico hasta propiedades menos sofisticadas, como la densidad. En los materiales compuestos, una regla general es que las propiedades mecánicas, tales como la resistencia y la rigidez, tienden a incrementarse cuando se aumenta la longitud del reforzamiento, por lo que las partículas pueden considerarse como el límite de las "fibras cortas". Además, es indispensable mencionar que todos los materiales compuestos reforzados con partículas son isotrópicos, es decir, que tienen las mismas propiedades mecánicas en todas direcciones. De tal forma, los compuestos particulados poseen algunos de los

obstáculos más engañosos para desarrollar una teoría unificada acerca de los materiales compuestos, pero tienen una gran amplitud de aplicación que los hace estar en un campo excitante para la investigación y la experimentación. En términos de aplicaciones en la industria para resolver problemas actuales, el rango de los compuestos particulados abarca desde los materiales más ampliamente usados hasta una larga lista de materiales de laboratorio.

Las partículas o constituyente aditivo de los compuestos particulados son esencialmente uni o bidimensionales y macroscópicos; sin embargo, en algunos de estos compuestos este constituyente es macroscópicamente adimensional, lo que puede definirse conceptualmente como un punto (tan fino como un polvo, que para visualizarlo se necesita de un dispositivo especial), a diferencia de una línea o un área. Sólo a escala microscópica una partícula se puede volver dimensional y así el concepto de los materiales compuestos debe llegar a nivel microscópico si se quiere abarcar a todos los compuestos de interés para los ingenieros.

La resistencia de los compuestos endurecidos por dispersión es directamente proporcional a la dureza de las partículas dispersas (especialmente a elevadas temperaturas) debido a que éstas deben resistir los esfuerzos ocasionados por la dirección de las dislocaciones que van en su contra, por lo que es un importante parámetro a considerar. De esta manera, la coherencia entre la fase particulada y la matriz también afecta la resistencia; así que una baja energía en la intercara partícula-matriz implica un buen acoplamiento, lo cual es necesario si las partículas van a actuar como barreras al flujo de la dislocación. Por otra parte, una alta energía en la intercara es equivalente a un hueco que rodea a la partícula, esto no sólo representa una débil barrera al movimiento de la dislocación (con una pobre resistencia como resultado) sino que también actúa como una microgrieta en la estructura.

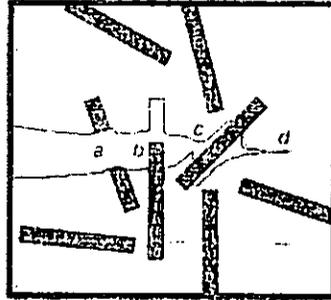


Figura 3.2 Esquema en el que se muestra cómo el elemento de reforzamiento (en este caso fibras) detiene la propagación de grietas y evita la falla del material.

Los cermets son mezclas de cerámicos y metales que ofrecen al ingeniero una oportunidad de combinar las propiedades y de tomar ventaja de las características inherentes de cada uno de estos materiales. Por ejemplo, las cerámicos no se degradan a altas temperaturas pero carecen de ductilidad. La combinación de partículas cerámicas en una matriz metálica da como resultado un compuesto que tiene mejor ductilidad que los cerámicos por sí mismos con una buena resistencia a las altas temperaturas.



Figura 3.3 Cermet de carburo de tungsteno en proceso de corte.

De los compuestos particulados, los compuestos metal-plástico son uno de los grupos más extensamente usados y tienen muchas características interesantes. Los plásticos transparentes que son cargados con una gran cantidad de polvo metálico,

por ejemplo, toman el color del polvo. Las combinaciones plástico-metal también pueden soportar la resistividad eléctrica de los plásticos; las resistencias y los capacitores pueden ser fabricados para producir una gama infinita de resistividad, a través de combinaciones de polvos metálicos y bloques de carbón conductivo.

Debido al amplio rango de variables de las partículas al ser combinadas en una matriz, se pueden producir materiales compuestos con muchas propiedades inusuales; por lo que es de fundamental importancia, para hacer una correcta selección de los mismos, determinar exactamente el tipo de aplicación y las propiedades deseadas. Las dispersiones en los metales pueden extender ampliamente su rango de temperatura, así como hacer más resistente la matriz; como ejemplo se puede citar las aleaciones de polvo de aluminio sinterizado en las que se incrementa el rango de temperatura de uso hasta los 538° C, es decir, que está 204° C por encima de las aleaciones de aluminio tratadas térmicamente.

3.3 Los Compuestos de Partícula Grande.

Algunos materiales poliméricos a los que se han agregado materiales de relleno son realmente compuestos de partícula grande. Nuevamente, este material de relleno modifica o mejora las propiedades de la matriz y/o reemplaza algo del volumen del polímero con un material más barato (el relleno). Otro compuesto de partícula grande muy conocido es el concreto, que está conformado por cemento (la matriz) arena y grava (las partículas).

Las partículas pueden tener una gran variedad de geometrías, pero deben tener aproximadamente las mismas dimensiones en todas las direcciones (equiaxial). Para un refuerzo efectivo, las partículas deben ser pequeñas y con una distribución uniforme a todo lo largo de la matriz. Además, la fracción en volumen de las dos

fases influyen en el comportamiento del material; las propiedades mecánicas se incrementan cuando se aumenta el contenido de las partículas. Dos expresiones matemáticas se han formulado para determinar la dependencia que existe entre el módulo de elasticidad y la fracción en volumen de las fases constituyentes para un material compuesto de dos fases. Esta ecuación, llamada regla de las mezclas, predice que el módulo de elasticidad se debe encontrar entre un límite superior representado por:

$$E_c = E_m V_m + E_p V_p \quad (3.1)$$

y un límite inferior,

$$E_c = \frac{E_m E_p}{V_m E_p + V_p E_m} \quad (3.2)$$

En estas expresiones, E y V denotan el módulo de elasticidad y la fracción en volumen, respectivamente, y los subíndices c, m, p representan compuesto, matriz y fases particuladas.

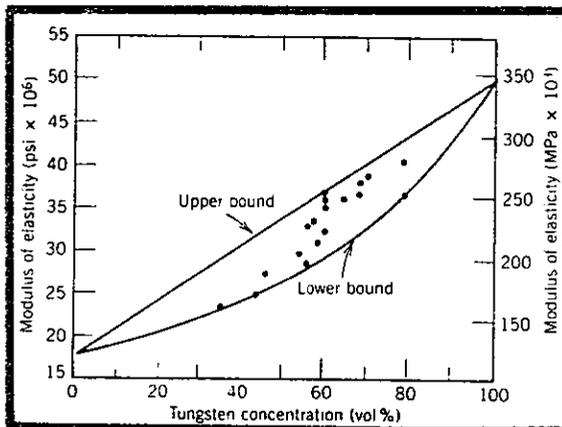


Figura 3.4 Gráfica que relaciona el módulo de elasticidad contra el porcentaje en volumen de partículas de carburo de tungsteno en una matriz de cobre. Los límites superior e inferior están de acuerdo a las ecuaciones anteriores¹.

¹ William D. Callister. *Materials Science and Engineering*; 1991, John Wiley and Sons, Inc.

3.3.1 Cermets: propiedades y características.

Los compuestos de partícula grande son utilizados con los tres tipos de materiales (metales, polímeros y cerámicos). Tanto elastómeros como plásticos son frecuentemente reforzados con varios materiales particulados, como el negro de humo y el silicio. Los cermets son ejemplos de compuestos metal-cerámico; los cermets más comunes son los carburos cementados, los cuales están formados de partículas extremadamente duras de un carburo cerámico refractario, tal como el carburo de tungsteno (WC) o carburo de titanio (TiC), embebidas en una matriz metálica como el cobalto o el níquel. Este tipo de compuestos es utilizado ampliamente como herramientas de corte para aceros endurecidos. Las partículas duras de carburo proveen la superficie de corte, pero como son extremadamente frágiles no son capaces de soportar los esfuerzos cortantes. La tenacidad es proporcionada por la ductilidad de la matriz metálica, la cual aísla a las partículas unas de otras y previene la propagación de grietas de partícula a partícula. Tanto la matriz como la fase particulada son lo suficientemente refractarias para soportar las altas temperaturas generadas durante la acción de corte en los materiales que son extremadamente duros. No existe un sólo material que pueda proveer la combinación de propiedades que poseen los cermets. Pueden ser utilizadas fracciones en volumen relativamente grandes de la fase particulada, algunas veces excediendo el 90% en volumen de modo que la acción abrasiva del compuesto se maximice.

Bajo el microscopio, un cermet tiene una estructura formada de granos de cerámico envueltas en una matriz metálica; la matriz ocupa hasta un 30% del volumen total. En los cermets que presentan el mayor desempeño el enlace entre los constituyentes resulta de una pequeña cantidad de solubilidad mutua o parcial. Por otro lado, algunos cermets, como los óxidos metálicos, generalmente exhiben un

débil enlace entre los constituyentes y se requiere agregar componentes que son parcialmente solubles tanto en el metal como en el óxido, por ejemplo, es necesaria la adición de nitruro de titanio a un cermet de níquel-óxido de magnesio para reforzar el enlace. Los cermets son conformados por medio de las técnicas de la metalurgia de polvos y pueden alcanzar una amplia gama de propiedades, dependiendo de la composición y de la fracción en volumen de los constituyentes (metal y cerámico).

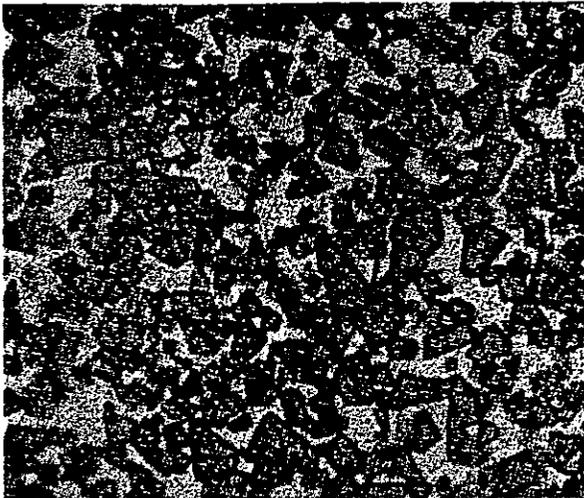


Figura 3.5 Microestructura de un cermet de carburo de tungsteno-20% cobalto. 1300X

Este tipo de materiales compuestos, ampliamente utilizados en ingeniería, se pueden clasificar en dos categorías: los cermets base óxido y los cermets base carburo. La característica sobresaliente de los primeros es que tanto el metal como el cerámico pueden funcionar como fase particulada o como matriz, por lo que se tiene disponible un amplio rango en los valores de las propiedades y la composición puede manejarse de acuerdo a las necesidades de servicio, además son los más simples de fabricar. Son extensamente utilizados para fabricar herramientas de corte de alta velocidad para materiales que son difíciles de maquinar; otras aplicaciones incluyen el control de flujo, tubos de protección para termopares, sellos mecánicos y quemadores (pilotos) de turbinas de gas. Los cermets base carburo son representados

por los carburos de tungsteno, los carburos de cromo y los carburos de titanio, ampliamente conocidos por su resistencia a altas temperaturas, a la oxidación, a la corrosión, a la abrasión y al desgaste; el número de composiciones disponible en cada una de estas familias es extenso.

3.3.2 Concreto: propiedades y características.

El concreto de uso común es un material compuesto de partícula grande en el que tanto la matriz como la fase dispersa son cerámicos. Debido a que los términos “concreto” y “cemento” frecuentemente son intercambiados de manera incorrecta, tal vez es apropiado hacer una distinción entre ellos. En un sentido amplio, el concreto implica un material compuesto que consiste de un agregado de partículas que son rodeadas por un cuerpo sólido a través de un agente de enlace, o sea el cemento. Los dos tipos de concreto más conocidos son los fabricados con los cementos portland y asfáltico, donde los agregados son la grava y la arena. El concreto asfáltico es ampliamente usado como material de pavimentación, mientras que el de cemento portland se utiliza masivamente como un material de construcción estructural. Como cualquier otro material estructural existen algunas limitaciones y desventajas: como la mayoría de los cerámicos, el cemento portland es relativamente débil y extremadamente frágil; su resistencia a la tracción es aproximadamente de 10 a 15 veces menor que su resistencia a la compresión, además de que presenta severas contracciones y expansiones térmicas con las fluctuaciones de temperatura. Es por esto que debe ser reforzado, con alambres, varillas y armados de acero embebidos en el cemento fresco, con lo que la estructura final es capaz de soportar grandes esfuerzos a la tracción, a la compresión y cortantes; aun cuando se desarrollen grietas en el concreto gran parte de la resistencia se conserva.

3.4 Compuestos Particulados Endurecidos por Dispersión.

Los metales y las aleaciones metálicas pueden ser reforzados y endurecidos por una dispersión uniforme de un pequeño porcentaje en volumen de finas partículas de un material duro e inerte. La fase dispersa puede ser metálica o no metálica; los óxidos y los carburos son frecuentemente utilizados. Como se ha mencionado en líneas anteriores, el mecanismo de reforzamiento involucra la interacción entre las partículas y las dislocaciones dentro de la matriz, como con el endurecimiento por precipitación. El efecto del reforzamiento por dispersión no es tan pronunciado como el de este último, no obstante el reforzamiento se conserva a elevadas temperaturas y por periodos prolongados debido a que las partículas dispersas se seleccionan de modo que no tengan ningún tipo de reacción con la matriz; en cambio, para las aleaciones endurecidas por precipitación el incremento en la resistencia puede desaparecer si se aplica un tratamiento térmico como consecuencia del crecimiento o disolución de la fase precipitada.

Como con los cermetes, los compuestos endurecidos por dispersión generalmente consisten de un constituyente de partícula dura en una matriz metálica más suave. Este tipo de compuestos difieren de los de partícula grande en que el constituyente de partícula dispersa se encuentra sólo en una pequeña proporción del total, rara vez exceden el 3% en volumen y las partículas mismas son considerablemente más reducidas, encontrándose dentro del rango de los micrómetros. Los materiales compuestos particulados endurecidos por dispersión difieren de las aleaciones endurecidas por precipitación, como ya se mencionó, en que las partículas son agregadas a la matriz por medios mecánicos y no por reacciones químicas. Este tipo de aleaciones deriva sus propiedades de compuestos que son precipitados desde la matriz y no agregadas separadamente.

Como con los compuestos de partícula grande, las características del elemento de reforzamiento controlan en gran medida las propiedades de los materiales compuestos endurecidos por dispersión; esto se aplica especialmente para la resistencia. Entre más pequeño sea el espacio entre las partículas para un material dado se mejorará la ductilidad y se elevarán las conductividades térmica y eléctrica. Un espaciamiento de 0.2 a 0.3 μm provee las mejores características. El tamaño de partícula también es importante; el mismo espaciamiento entre partículas puede ser desarrollado con un amplio rango de diámetros de partícula. Cuando se incrementa el tamaño de partícula se necesita menos material para lograr el espaciamiento deseado. La dispersión más deseable es aquella que sea menos soluble y más refractaria; los óxidos refractarios ofrecen el mejor potencial, aunque los compuestos intermetálicos como el AlFe_3 son los más usados. Se requiere de trabajo en frío para alcanzar altos niveles de resistencia. Trabajando en frío la matriz y combinándola con la dispersión de finas partículas impide los movimientos de dislocación y refuerza el metal endurecido por dispersión.

Los materiales compuestos metal-metal, conformados de partículas metálicas en una matriz de alguno de éstos, ocupan un importante lugar como materiales industriales, también constituyen un medio de producir materiales dúctiles combinando esencialmente metales frágiles con otros más dúctiles. Aleaciones base acero o cobre que contienen partículas de plomo son características de este grupo.

Los compuestos que consisten de partículas metálicas en una matriz cerámica han sido utilizados en la industria por muchos años, los materiales cobre-grafito usados en el distribuidor de los motores son un ejemplo. Otro tipo de compuestos incluye los de partículas no metálicas en una matriz no metálica, como los grafitos resistentes a la oxidación que contienen diboro de zirconia, boro y silicio. Los

refractarios resistentes a los choques térmicos pueden tener varias combinaciones de este tipo: grafito y carburo de zirconia, carburo de silicio y grafito u óxido de aluminio y óxido de zirconia.

La resistencia a la alta temperatura de las aleaciones de níquel puede acrecentarse significativamente con la adición de cerca del 3% en volumen de óxido de torio (ThO_2) en forma de finísimas partículas dispersas. El mismo efecto es producido en el sistema aluminio-óxido de aluminio, este material es denominado polvo de aluminio sinterizado (SAP) el cual es normalmente preparado por oxidación superficial; otro grupo de este tipo de sistema es el llamado polvo de metal atomizado (APM) que es producido atomizando el aluminio líquido y formando compuestos intermetálicos insolubles. Estas dos mantienen su resistencia útil hasta los 538°C , a diferencia del aluminio 2219-T6² de alta resistencia que al llegar a esta temperatura disminuyen sus propiedades.

3.5 Partículas de Carburo de Silicio en una Matriz de Aluminio.

Compuestos de matriz metálica (MMCs) como el de aluminio reforzado con carburo de silicio (SiC) son tan ligeros como el aluminio pero con una mucho mayor resistencia y rigidez específica. Algunos son isotrópicos y tienen mejor resistencia a la compresión y presentan menos microgrietas que el berilio. Además, pueden ser manejados para igualar el coeficiente de expansión térmica de otros materiales que incluyen el berilio, el acero inoxidable y el níquel. Esta clase única de avanzados materiales de ingeniería, que pueden ser fácilmente forjados, conformados superplásticamente y maquinados con precisión en complejas formas, han sido calificados recientemente para su uso en estructuras aeroespaciales, sistemas de guía inercial y ensamblajes ópticos. Las partes y componentes de aluminio reforzado con

² Al-6.3% Cu-0.3% Mn-0.06% Ti-0.1% V-0.18% Zr. Con Tratamiento térmico y envejecido.

SiC se pueden producir por las técnicas de fundición y moldeo en caliente con un bajo costo, de modo que varias partes del fuselaje de un avión pueden ser moldeadas directamente en su forma final sin necesidad de un maquinado posterior.

Una dispersión uniforme de polvo de carburo de silicio en una matriz de aluminio generalmente produce un material compuesto con una alta resistencia y rigidez, así como una mejor resistencia a la formación de grietas en comparación con las aleaciones no reforzadas. Las propiedades características de los constituyentes en la microestructura del compuesto se relacionan directamente a las propiedades resultantes. Se han desarrollado matrices con composiciones especiales para optimizar las propiedades del compuesto así como sus características, y se obtienen las mejores propiedades cuando el reforzamiento de carburo de silicio y la matriz tienen la mayor afinidad física y química posibles.

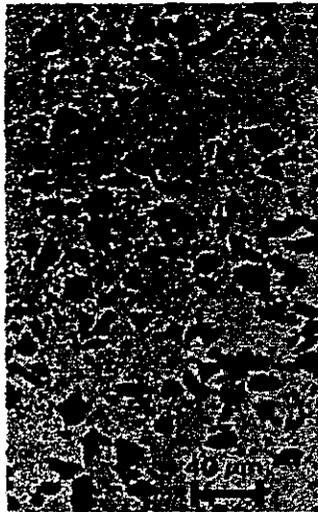


Figura 3.6 Microestructura de partículas de SiC en una matriz suave y dúctil.

Para una aplicación en especial, es necesario un conocimiento completo de los constituyentes del MMC para obtener el mejor material. Los rasgos específicos

del reforzamiento de SiC son especialmente importantes: morfología de la partícula, distribución y tamaño de las partículas, química superficial, contenido en volumen y uniformidad de la dispersión. Los materiales compuestos base aluminio usualmente contienen de 15 a 45% en volumen de reforzamiento de SiC, y recubrimientos especiales para las partículas se han desarrollado para mejorar la afinidad química del reforzamiento con la matriz, dando como consecuencia una mejoría en el desempeño del material compuesto. Aquellas condiciones que afecten la intercara partícula-matriz y el control de la transferencia de carga de la matriz a la partícula influyen significativamente en el comportamiento mecánico (y micromecánico) del material compuesto.

También deben ser consideradas las características de la matriz metálica. Los mecanismos que operan dentro de la microestructura del material compuesto son controlados por una compleja interdependencia de varias variables, las cuales en conjunto incrementan la resistencia mecánica, el módulo de elasticidad, la estabilidad dimensional y la respuesta a los efectos ambientales.

Aplicaciones de precisión. La selección de materiales para su aplicación en los sistemas de guía de los misiles es muy importante ya que las partes terminadas deben ser ligeras, dimensionalmente estables y compatibles con el coeficiente de expansión térmica de las partes adyacentes en el ensamble final; los materiales también deben ser de costo razonable con respecto al maquinado y a su manejo. Los compuestos usados en instrumentos de precisión tienen una excelente combinación de propiedades físicas y micromecánicas que se requieren para ensambles estables, como en los componentes de precisión para los sistemas de guía inercial. Son isotrópicos, resistentes a las microgrietas debidas a la compresión y con un alto valor en el esfuerzo de cedencia, el cual es un importante parámetro de diseño para la estabilidad dimensional.

Como los compuestos estructurales, estos materiales son fabricados por procesos de metalurgia de polvos. Los compuestos usados en instrumentos comprenden de una matriz de aluminio reforzada con una dispersión uniforme de finas partículas (3.5 μm de diámetro) de SiC. Las diminutas partículas uniformemente distribuidas en la microestructura inhiben el crecimiento de grano impidiendo el movimiento del límite de grano. Las partículas actúan como dispersoides insolubles de segunda fase, ayudando a preservar la estructura fina del grano en la matriz de aluminio, aún a elevadas temperaturas.

La isotropía en el material es también una característica importante. La matriz de aluminio es esencialmente homogénea, presentando granos finos (1 μm de diámetro). Las limitaciones de la condición anisotrópica normalmente asociada con los metales de estructura hexagonal cerrada como el magnesio, el titanio y el berilio no se encuentran debido a que la estructura cristalográfica del aluminio es cúbica centrada en las caras.

El tamaño de las partículas de SiC tiene un efecto significativo tanto en los esfuerzos como en la movilidad de las dislocaciones en la matriz; por ejemplo, los compuestos para instrumentos fabricados de aluminio 2124-T6³ que contienen 30% en volumen de partículas de carburo de silicio de 3.5 μm de diámetro tienen una resistencia a las microgrietas superior no sólo a la del berilio sino también a la de los compuestos que contienen partículas más bastas (alrededor de 5 μm de diámetro). Además, el valor del esfuerzo de cedencia en el compuesto con las partículas más pequeñas es un 30% mayor que el que tiene el reforzamiento de 5 μm y tres veces mayor que el berilio.

³ Al-4.4% Cu-0.6% Mn-1.5% Mg. Con Tratamiento térmico y envejecido artificialmente.

La rigidez se incrementa cuando aumenta el contenido de SiC, por ejemplo, el Módulo de Young (E) llega a 145 GPa en un material compuesto de aluminio 6061-T6⁴ reforzado con 40% en volumen de SiC, lo que es más del doble que el del aluminio no reforzado. La rigidez específica (E/ρ) también es de más del doble debido a que las densidades de ambos materiales son similares. Con todo esto, se pueden usar secciones más delgadas permitiendo una reducción significativa en el peso total.

Las características de maquinado de los MMCs de aluminio reforzado con SiC son diferentes que para los aluminios no reforzados. Las muy duras partículas cerámicas de SiC en una matriz relativamente blanda son abrasivas, creando altas temperaturas entre la herramienta y la pieza; esto produce un desgaste más rápido de la herramienta. Modificando los parámetros de maquinado o usando materiales especiales en las herramientas (por ejemplo, diamante compactado o carburos) se pueden conseguir tolerancias cerradas así como intrincadas partes con un muy buen acabado e integridad superficial.

Aplicaciones en óptica. En años recientes se han hecho muchos avances en el diseño de sistemas optomecánicos; nuevos materiales y métodos analíticos proveen considerables opciones para fabricar instrumentos ópticos de precisión que cumplen con los rigurosos requerimientos militares, espaciales y comerciales.

Los compuestos de matriz metálica usados en aplicaciones ópticas son el resultado de diversos refinamientos hechos a los compuestos utilizados en instrumentos. Así, el exitoso desarrollo de los sistemas de láser y de los de detección infrarrojos dependen de espejos de alto desempeño con superficies que tengan la precisión geométrica y las características especiales requeridas. La facilidad de

⁴ Al-0.6% Si-0.25% Cu-1.0% Mg-0.25% Cr. Con Tratamiento térmico y envejecido artificialmente.

fabricación y las relativas ventajas costo/desempeño hacen de los MMCs la mejor opción para diversas aplicaciones en el campo de la óptica, incluyendo el telescopio espacial ultraligero desarrollado por el Centro de Ciencias Ópticas de la Universidad de Arizona, el cual debe funcionar bajo condiciones severas de choques térmicos y mecánicos cíclicos. Una combinación óptima de alta rigidez y resistencia a las microgrietas, así como un coeficiente de expansión térmica que empata con el de las demás partes en el ensamble se puede obtener con una matriz de aluminio reforzada con aproximadamente un 30% en volumen de partículas de SiC como reforzamiento. Además, las configuraciones más complejas pueden ser maquinadas con precisión y después barrenarse para facilitar el montaje y ensamble.

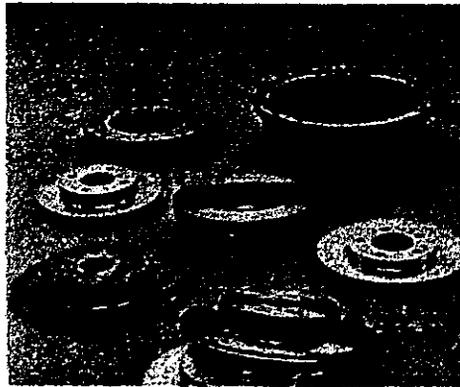


Figura 3.7 Componentes de frenos fabricados con el material compuesto formado de partículas de SiC reforzando una matriz de aluminio.

3.6 Futuro Potencial de los Materiales Compuestos Particulados.

Los compuestos particulados continuarán presentando a los diseñadores grandes oportunidades y retos; habrá a disposición del diseñador, el ingeniero, el científico, el químico, etc., un número en crecimiento de partículas, matrices, arreglos y procesos de manufactura con los que se podrán crear nuevos materiales y estructuras. Todo esto requiere un mejor entendimiento de las propiedades de los materiales involucrados, su procesamiento y el comportamiento que es necesario

cumplir para conformar el nuevo material. En vista de la complejidad de la tecnología, la gran variedad de materiales y los muchos conceptos aún desconocidos, los diseños de compuestos particulados han tendido a ser conservadores, por lo que sólo mejorando el aseguramiento de calidad en la manufactura, las pruebas no destructivas, la experiencia en el servicio y comprendiendo el comportamiento del compuesto dará al ingeniero la confianza necesaria para reducir los márgenes de seguridad.

A lo largo de este capítulo se han podido observar las diversas aplicaciones de los materiales compuestos reforzados con partículas que se utilizan en la actualidad, y a través de su desarrollo y evolución se puede concluir que el futuro apunta hacia este tipo de materiales para que se constituyan como los protagonistas principales de esta área de la ingeniería y de la ciencia, y en consecuencia como algo muy familiar e indispensable para la exigente sociedad y para su progreso sustentable.

Capítulo 4. Fabricación de Materiales Compuestos.

4.1 *Introducción.*

La selección de los materiales de refuerzo y de la matriz, ambos con un alto desempeño, es importante para las propiedades del material compuesto, pero quizá es aun más importante la manera en que estos componentes son arreglados o conformados. Mientras que ordinariamente no forma parte del estudio de los materiales, los numerosos procesos de manufactura involucrados en la producción y conformado de los materiales compuestos están íntimamente relacionados con los constituyentes debido a que el diseño afecta a la manufactura y el proceso en particular influye en las propiedades del producto terminado. Por lo tanto, la manera en que los constituyentes son arreglados en el compuesto es tan importante como las propiedades físicas de éstos. Los métodos para combinar los elementos de refuerzo con la matriz se han desarrollado rápidamente, desde que la colocación se hacia predominantemente a mano hasta los actuales procesos de alta precisión, gran capacidad de reproducción y control de calidad.

Las propiedades superiores de los materiales compuestos comparados con los materiales monolíticos, para muchas aplicaciones, son la mayor razón para su estable incremento de uso; en los últimos 10 años, los rangos de crecimiento de un 10 a un 20% anual han sido comunes para los compuestos de alto desempeño.

El uso de los compuestos para las aplicaciones más críticas no sólo depende del incremento en las propiedades; el precio de venta del producto terminado, el cual es fuertemente influenciado tanto por el costo de las materias primas como por el de la manufactura, es un factor principal en la decisión de usar un compuesto en lugar

de un material monolítico competente. Los costos de las materias primas son más bajos debido a que el costo de los elementos de refuerzo continúa a la baja como resultado de los altos volúmenes de producción y a la entrada de reforzamientos para aplicaciones comerciales y aeroespaciales. Así, el obtener un bajo costo de manufactura, que es determinado por las técnicas de procesamiento o fabricación, queda como un importante reto en el uso futuro de los materiales compuestos.

La fabricación de la estructura del material compuesto y del componente final frecuentemente se realiza en una sola operación, por lo que las propiedades deseadas así como la forma del componente se deben considerar cuando se selecciona el proceso de fabricación más adecuado. El procesamiento de los materiales compuestos es complejo debido a las muchas técnicas que se han desarrollado para manejar la gran variedad de los sistemas disponibles de refuerzo y matriz. Además, la mayoría de las técnicas han mejorado y se vuelven más sofisticadas conforme el tiempo avanza.

Las fibras y las partículas son las dos categorías más sobresalientes de los tipos de reforzamiento. Las fibras dan refuerzo continuo y las partículas están asociadas con el reforzamiento discontinuo, donde el bajo costo puede llegar a cubrir la ligera disminución en las propiedades. Vidrio, carbono, boro, carburo de silicio, aramida, alúmina y silicio-aluminio son los materiales dominantes para las fibras. Las partículas para materiales compuestos de alto grado de desempeño son usualmente de cerámicos; alúmina, carburo de silicio, nitruro de silicio y carburo de boro son los materiales típicos para las partículas.

La matriz del compuesto puede ser un polímero, un metal o un cerámico. Los sistemas de matriz polimérica o resina continúan dominando el mercado, y los materiales termofijos son aún la opción que predomina. Otros sistemas continúan

creciendo en importancia; los sistemas de matriz metálica se están colocando en las etapas de producción y los de matriz cerámica son objeto de un gran número de programas de desarrollo.

Cabe mencionar que la fabricación de cualquier material compuesto es similar ya que el objetivo es consolidar la matriz alrededor del reforzamiento y producir un componente terminado al mismo tiempo.

4.2 Procesamiento de Compuestos de Matriz Metálica.

Los materiales compuestos de matriz metálica (MMCs) son comúnmente fabricados con aleaciones de aluminio, magnesio o titanio como matriz, y el elemento de refuerzo es típicamente un cerámico en forma de partículas, whiskers o fibras. Sin embargo, otros sistemas son también de interés, como el de aluminio reforzado con grafito o de alambres de cobre y tungsteno reforzando superaleaciones. La mayoría de las veces los MMCs son clasificados como discontinuos o continuos, dependiendo de la geometría del reforzamiento: las partículas y los whiskers caen en la categoría de discontinuos, mientras que la categoría de continuos está reservada para las fibras o alambres. Es importante mencionar que, como este trabajo está orientado principalmente a los materiales compuestos particulados, se tratará primordialmente a la categoría de los discontinuos, sin olvidar mencionar brevemente las características de la otra categoría. El tipo de reforzamiento juega un papel muy importante en la selección de un MMC debido a que virtualmente determina cada aspecto del producto terminado, incluyendo las propiedades mecánicas, el costo y el tipo de procesamiento o método de fabricación. Generalmente, las propiedades mecánicas mejoran y los costos se incrementan cuando se va de las partículas a los whiskers y a las fibras; la

flexibilidad en el procesamiento se mueve en la dirección contraria debido a que los materiales compuestos reforzados con partículas son más fáciles de procesar que los compuestos de whiskers, que a su vez se procesan más fácilmente que aquellos materiales compuestos con reforzamiento continuo.

4.2.1 Procesamiento para Compuestos con Reforzamiento Discontinuo.

Como se mencionó anteriormente, las partículas y los whiskers son los tipos de reforzamiento discontinuo para los MMCs. La alúmina, el carburo de boro, el carburo de silicio, el carburo de titanio y el carburo de tungsteno son las partículas más comunes; los whiskers más comunes son de carburo de silicio, aunque se han llegado a producir de alúmina y nitruro de silicio. Los whiskers son más difíciles de producir que las partículas y generalmente son de 10 a 100 veces más caros.

Las partículas de carburo de silicio son atractivas como reforzamiento debido a que se utilizan como un abrasivo comercial, lo que representa una gran disponibilidad y un costo muy bajo. Además, ofrecen un incremento en la resistencia mecánica, la rigidez y en la resistencia al desgaste cuando se usan en un rango de 10 a 40% en volumen. Teóricamente el reforzamiento con whiskers debería dar como resultado mayores propiedades mecánicas que con el reforzamiento particulado debido a la mayor relación geométrica (de forma), pero esto no siempre es cierto.

El procesamiento de los MMCs con reforzamiento discontinuo es usualmente discutido en términos de un método primario y uno secundario. Los métodos primarios son la metalurgia de polvos, infiltración de metal líquido, fundición a presión y fundición convencional. En el presente, los métodos primarios usualmente no producen partes terminadas y la mayoría de los componentes del MMC con

reforzamiento discontinuo requieren de un procesamiento secundario para alcanzar su estado final. Los procesos secundarios incluyen operaciones de manufactura convencionales como la extrusión, el forjado y la laminación; operaciones de maquinado standard y no standard; y técnicas de unión como soldar. La mayoría de los desarrollos hechos hasta la fecha se han hecho con carburo de silicio reforzando aleaciones de aluminio, y la siguiente discusión se concentrará en este sistema.

4.2.1.1 Procesos primarios.

Metalurgia de polvos. Este proceso comienza con el mezclado del polvo de aluminio con las partículas de carburo de silicio. Las partículas se preparan triturando el carburo de silicio hasta llevarlo al tamaño deseado; el carburo de silicio se produce en un horno eléctrico por una reacción de vapor entre arena y carbón.

El reforzamiento y la matriz son perfectamente mezclados para establecer un alto grado de entremezclado; lubricantes y otros aditivos son incluidos con la matriz y el reforzamiento para promover el mezclado uniforme, pero es importante removerlos antes de la fase de consolidación. Para esta fase la temperatura se puede seleccionar tanto para consolidación en estado sólido como para parcialmente líquido; este último generalmente da como resultado un producto más consistente. La consolidación también puede ser completada por presión isostática a alta temperatura. Por lo regular el producto de la metalurgia de polvos es un billet que tiene que ser sometido a un proceso secundario para alcanzar la configuración deseada.

Infiltración de metal líquido. Este proceso se refiere a la infiltración a baja presión de una preforma del reforzamiento en un metal fundido. El sistema de whiskers de carburo de silicio reforzando aluminio ha sido exitosamente procesado con este método con dos diferentes técnicas para producir la preforma del whisker; esta última es calentada previo a la infiltración para promover que fluya más fácilmente el metal a través de la preforma. El proceso de infiltración puede hacerse en aire, pero generalmente se realiza en vacío para obtener mejores resultados. Las propiedades de los compuestos fabricados por este método generalmente han sido inferiores en comparación con las que se obtienen con aquellos producidos por el proceso de metalurgia de polvos. Los productos obtenidos usualmente requieren de procesamiento adicional por medios secundarios.

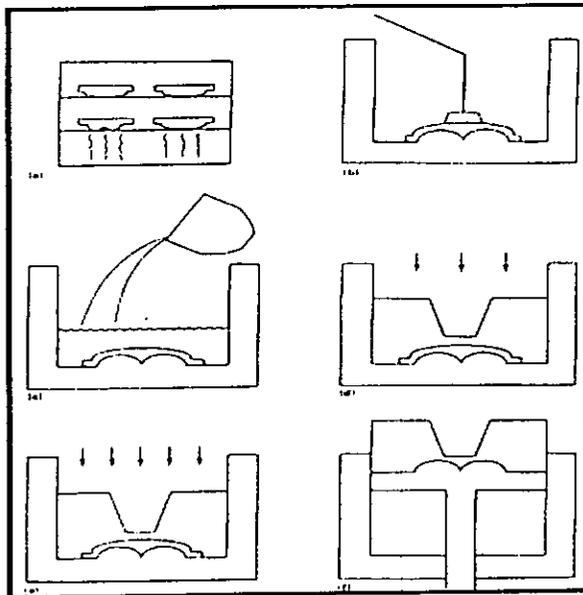


Figura 4.1 Proceso de fundición a presión.

Fundición a presión. Originalmente el proceso fue desarrollado para materiales monolíticos para promover una mejor y más fina estructura debido a la rápida solidificación y prevención de porosidades. La fundición a presión ha sido

llevada a producir selectivamente partes reforzadas como los pistones de aluminio con reforzamiento de cerámica para motores de combustión interna. Este compuesto es usado extensivamente y millones de estas partes se encuentran actualmente en servicio, además esta aplicación es la primera comercial para los MMCs. El proceso para fabricar pistones sólo requiere de un maquinado final para completar el componente, lo que es una ventaja real para este proceso. El proceso de fundición a presión también puede ser usado para fabricar billets o algunas otras formas que pueden ser conformadas por procesos secundarios.

Fundición convencional. Partículas de carburo de silicio, con un 5 a un 20% en volumen en aleaciones de aluminio (como la A356 y A357), están siendo comúnmente suministradas como lingotes de materiales para procesos convencionales de fundición como moldeado por revestimiento y de molde permanente. Se requieren de algunas modificaciones en los procedimientos standard utilizados para los aluminios no reforzados pero pueden ser implementados fácilmente en cualquier planta de fundición. Por ejemplo, se necesita de una agitación continua para prevenir la precipitación del reforzamiento; esta agitación debe ser lo suficientemente rápida para causar un movimiento visible, pero no tanto como para romper la capa superficial de óxido.

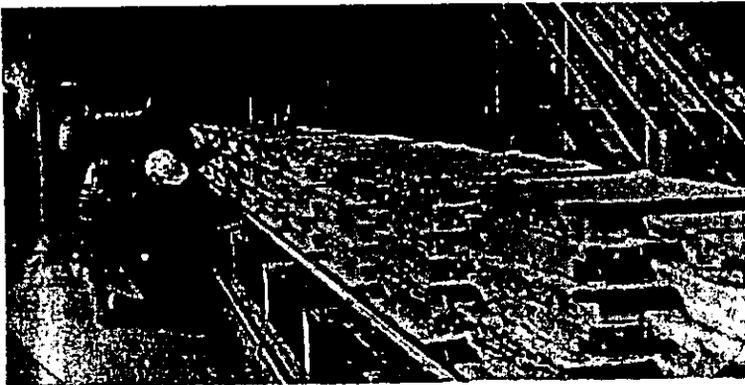


Figura 4.2 Partículas de SiC reforzando aleaciones de aluminio, como material compuesto, puede ser conformado como lingotes para posteriores procesos convencionales de fundición.

Se ha generado un amplio conocimiento para este tipo de material y muchas partes prototipo se han producido; el precio actual es de 2 a 3 veces mayor que el de los materiales monolíticos, pero como el volumen de producción se ha incrementado se espera en un futuro próximo que el precio baje y pueda ser competitivo con el de los materiales monolíticos.

4.2.1.2 Procesos secundarios.

Conformado. Una ventaja significativa de todas las aleaciones de aluminio reforzadas con partículas o con whiskers es que pueden ser sometidas a las técnicas convencionales del trabajo con metales salvo algunas modificaciones menores en el proceso. La forja, la laminación, la extrusión, el doblado y el rolado son factibles de aplicar sobre estos materiales usando equipo desarrollado para materiales monolíticos.

Maquinado. El aluminio con reforzamiento discontinuo virtualmente puede ser maquinado con todas las técnicas standard. El barrenado, el rimado, el torneado, el fresado y el cortado son posibles sin grandes dificultades. Estos materiales son abrasivos para las herramientas de corte y no son recomendables los aceros de alta velocidad para el maquinado. Los carburos pueden ser usados para corridas cortas, pero el diamante policristalino es la opción preferida. Para la mayoría de las operaciones, es esencial la utilización de un fluido de corte standard para aluminio y los mejores resultados son obtenidos usando velocidades de corte bajas o moderadas según el acabado superficial requerido.

Unión. El aluminio reforzado con elementos discontinuos puede ser soldado con las técnicas MIG o TIG. Los procedimientos requeridos son similares a aquellos usados para el aluminio monolítico. Se debe tener cuidado para evitar el sobrecalentamiento y la formación de carburos de aluminio inestables como

producto de una reacción del aluminio fundido con el carburo de silicio. Las técnicas de soldadura por ultrasonido, por resistencia y por inercia han sido usadas exitosamente en este tipo de materiales.

La soldadura con metales de baja temperatura de fusión (brazing) del aluminio con reforzamiento discontinuo requiere de más altas temperaturas y de flujos más activos que para el aluminio standard debido a la gran dificultad para mojar el carburo de silicio. Se debe tener cuidado al retirar completamente el gas del compuesto para prevenir la formación de protuberancias y de grietas durante el ciclo de brazing.

Las uniones mecánicas (remaches, tornillos, etc.) y por medio de adhesivos son también usadas para este tipo de materiales compuestos y no existe la necesidad de utilizar catalizadores ni aceleradores especiales.

4.2.1.3 Métodos de producción de compuestos particulados endurecidos por dispersión.

El método para producir compuestos endurecidos por dispersión es generalmente gobernado por los materiales involucrados; a su vez, el método tiene un considerable efecto sobre las características finales de la fase particulada. Así, las partículas pueden ser introducidas en la matriz de varias maneras.

Oxidación Superficial de Polvos Ultrafinos. Este método, usado principalmente para las aleaciones de polvo de aluminio sinterizado (SAP), consiste de una oxidación controlada del polvo de aluminio, lo que causa que cada partícula sea rodeada por una delgada capa de óxido, y simultáneamente se compactan las partículas oxidadas para atrapar en su interior estos finos óxidos. Los elementos

compactados son sinterizados y trabajados en frío para formar una fuerte estructura reforzada por dispersión. Una característica única de este tipo de compuestos es la dependencia que la resistencia tiene con la temperatura; en lugar de ablandar el material a una temperatura de cerca del valor medio de su punto de fusión, se evita la recristalización y el crecimiento de grano, y una fracción considerable de la resistencia a bajas temperaturas persiste aun cuando se alcanza un 80% de la temperatura de fusión.

Oxidación Interna de Aleaciones de Soluciones Diluidas de Sólidos. Estos sistemas consisten de una matriz que contiene una cantidad relativamente grande de un metal noble y de un elemento soluble listo para ser oxidado.

Mezclado Mecánico de Finos Polvos Metálicos. Polvos metálicos, de menos de 10 μm de diámetro (y para obtener propiedades óptimas de 1-2 μm) son mezclados con polvos aun más finos de óxidos metálicos. El procedimiento normal es agregar de 0.15 a 0.5% en volumen, lo que produce una serie de materiales en los que se incrementa la resistencia pero se disminuye la ductilidad. Obviamente, el proceso de conformado es por medio de la metalurgia de polvos, y es conveniente mencionar que este procedimiento es menos eficiente que el de oxidación superficial y el de oxidación interna.

Producción Directa a partir del Metal Líquido. El metal en fase líquida es enfriado violentamente y atomizado para producir el polvo; este método requiere de un elemento aleante que sea soluble en el líquido y relativamente insoluble en el sólido. Así, como la solubilidad decrece, la estructura se vuelve más estable a elevadas temperaturas. Una ventaja de esta técnica es que produce polvos más burdos que son mucho más fáciles de manejar que los polvos finos que normalmente se producen en los primeros tres métodos.

Técnica Coloidal. Desarrollada en 1962, este método involucra una técnica patentada de codeposición que inherentemente controla el tamaño y distribución de una fase dispersa de óxido de torio (ThO_2). El proceso de codeposición consta de la encapsulación de partículas micrométricas de óxido de torio con el material que funge de matriz por medio de técnicas coloidales (es decir, de los sólidos o soluciones líquidas que contienen un cuerpo en dispersión en forma de partículas de diámetro muy pequeño). El proceso ofrece una ventaja distinta sobre las técnicas convencionales de metalurgia de polvos ya que se evita la segregación de la partícula durante el procesamiento, aunque esencialmente se siguen estas técnicas. Con este método se ha logrado producir una mezcla de óxido de níquel y de óxido de torio, la cual tiene una resistencia moderada a temperatura ambiente pero que mantiene hasta cerca de su punto de fusión; por encima de los 1090°C su resistencia es superior a muchas superaleaciones de hierro, cobalto o níquel. Esto se debe a que a que la fina dispersión inhibe el crecimiento de grano que es la causa del debilitamiento del níquel y sus aleaciones a estas temperaturas.

4.2.2 Procesos para Compuestos con Reforzamiento Continuo.

El procesamiento de MMCs con refuerzo continuo requiere que varios objetivos difíciles sean alcanzados, además de producir la geometría deseada en el componente. La fibra de refuerzo debe ser incorporada: (1) en la fracción en volumen deseada sin ocasionar rupturas, (2) con mínima degradación debida a las reacciones a altas temperaturas, y (3) con un fuerte enlace interfacial suficiente para transferir las cargas de la matriz a las fibras. El procesamiento de los MMCs con reforzamiento continuo está usualmente dirigido a formar una parte terminada con forma de red, esta situación se debe a que los MMCs son difíciles de manejar por

medios secundarios; por ejemplo, virtualmente todas las operaciones de conformado como la laminación, la forja y la extrusión no son satisfactorias debido a la posibilidad de romper las fibras. La posibilidad de maquinar los MMCs con reforzamiento continuo varía enormemente dependiendo de las propiedades del elemento de refuerzo. La mayoría de los reforzamientos requieren de herramientas de diamante, de técnicas especiales como el maquinado por electroerosión o el corte por chorro de agua a presión; además, el proceso de maquinado generalmente se limita a cortes simples a través de las fibras debido a que la exposición de grandes secciones transversales de fibras no es deseable. La unión de los MMCs continuos puede ser posible usando técnicas standard como la unión mecánica, el soldado y la soldadura con metales de baja temperatura de fusión (brazing), pero cada aplicación debe ser evaluada individualmente para determinar el efecto que se tiene en las propiedades del material compuesto. Los procesos primarios usados para MMCs con reforzamiento continuo requieren de dos pasos principales para formar el componente deseado: (1) fabricar una preforma fibra-matriz que sea conveniente y (2) la consolidación de esta preforma en el componente que se quiere.

Los principales procesos de fabricación para este tipo de materiales compuestos son los siguientes:

Fabricación manual. Es el método más simple y consiste en colocar manualmente el material de reforzamiento dentro de un molde abierto. La resina o material matriz puede ser aplicado vertiéndolo directamente, con ayuda de un cepillo o en forma de spray, así como el reforzamiento puede ser preimpregnado con resina. Aunque es un proceso laborioso, la fabricación manual ofrece la máxima flexibilidad en el diseño y la mínima inversión en equipo. Los poliésteres y los epóxidos son los materiales matriz que más comúnmente se utilizan para este proceso.

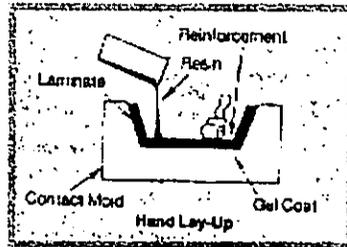


Figura 4.3 Método de fabricación manual.

Método de rociado. En este proceso el reforzamiento continuo en forma de carrete es alimentado a través de un cortador dentro del flujo de resina, entonces esta mezcla es rociada dentro de un molde abierto. Usualmente, se aumenta la densidad por medio de rodillos para remover el aire y para mojar aun más las fibras. El equipo usado en este proceso es relativamente barato y portátil, y el reforzamiento en forma de carrete es el más barato. Las formas complejas son menos laboriosas con el método de rociado que con el método de fabricación manual. Los poliésteres son las matrices más comunes.

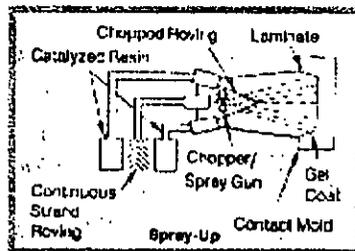


Figura 4.4 Método de rociado.

Moldeado al vacío. Este método está muy relacionado con los dos anteriores, e involucra la colocación de una capa flexible sobre la resina y las fibras en el molde. Las juntas son selladas y se hace un vacío en la parte inferior; la presión atmosférica sobre la pieza elimina huecos, aire atrapado y exceso de resina, dando como resultado una mayor concentración del reforzamiento y una mejor adhesión entre las capas.

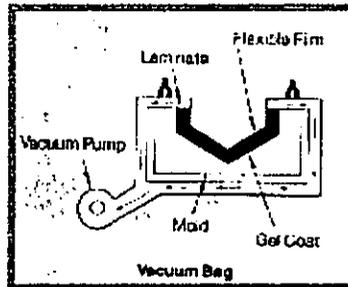


Figura 4.5 Moldeado al vacío.

Moldeado a presión. Este proceso de fabricación es análogo al de moldeado al vacío excepto que la presión del aire (arriba de 50 psi) es aplicada directamente a la pieza. Se puede utilizar vapor presurizado para así acelerar térmicamente la curación o fraguado. Se pueden utilizar insertos y es posible obtener piezas con perforaciones. Tanto el moldeado al vacío como a presión requieren de más trabajo que los dos primeros métodos.

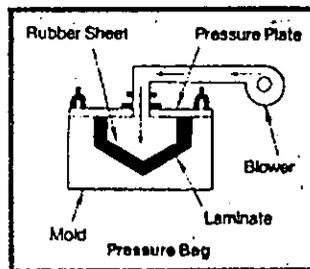


Figura 4.6 Moldeado a presión.

Moldeado en autoclave. Calor y presión (del orden de 100 psi) adicionales pueden ser aplicados con un equipo autoclave para obtener piezas libres de huecos o porosidades. Como con el moldeado a presión, se pueden obtener piezas con perforaciones y se utilizan insertos. El tamaño de la autoclave limita las dimensiones de la pieza y el equipo generalmente es costoso. Las autoclaves permiten obtener altos niveles de reforzamiento y altos grados de densificación lo que da como

resultado mejores propiedades y tiempos menores de curación, además de que se pueden usar resinas más exóticas.

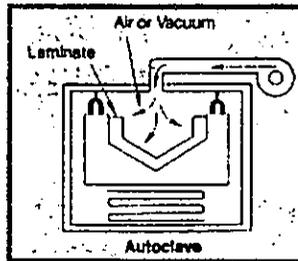


Figura 4.7 Moldeado en autoclave.

Moldeado centrífugo. Objetos de sección redonda y huecos como las tuberías y los tanques pueden ser conformados colocando el material de reforzamiento dentro de un mandril hueco el cual es calentado mientras se empieza a rotar. El material matriz es aplicado hacia el interior del mandril rotatorio y la fuerza centrífuga lo distribuye hacia las paredes exteriores. Es necesario soplar aire caliente a través del molde rotatorio para acelerar la curación. Cilindros de hasta 6 metros de longitud pueden ser fabricados con un mínimo de trabajo y de gasto de material, pero las formas están restringidas a cilindros sin tapa de espesor de pared uniforme.

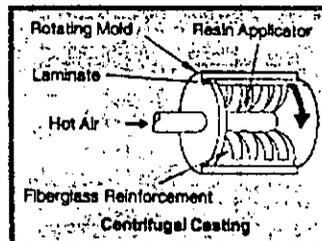


Figura 4.8 Moldeado centrífugo.

Filamento enrollado. Este método provee la más alta relación peso-resistencia y consiste en hacer pasar un filamento, que es el elemento de refuerzo, a través de una tina que contiene la resina o elemento matriz (o usar un carrete de hilo preimpregnado) y enrollarlo en un mandril. Maquinaria especialmente diseñada para

este proceso puede enrollar el filamento impregnado en patrones predeterminados, dando máxima resistencia donde se requiera. Después de que las capas apropiadas son aplicadas, el mandril es curado y la pieza moldeada es retirada de éste. El proceso provee el mayor control sobre la orientación y la uniformidad, pero frecuentemente es restringido a superficies de revolución.

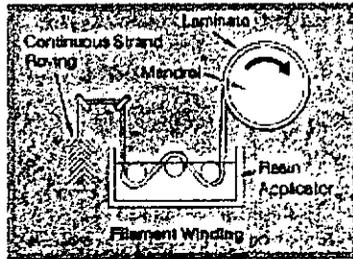


Figura 4.9 Método de filamento enrollado.

Pultrusión. Este es un método continuo para piezas con sección transversal constante (tubería, cañas de pescar, vigas, perfiles, etc.) y consiste en hacer pasar el reforzamiento continuo por un baño de resina para que después pase a través de un dado o boquilla que controla la forma y la relación resina/reforzamiento. No obstante, en vez de que la presión obligue al material a través del dado, una fuerza de tensión es usada para evitar daño y desalineamiento en las fibras. Es común que el dado sea calentado para así iniciar la curación, la cual se finaliza en un horno para después llevar el producto terminado a almacenamiento. Es posible obtener muy altas resistencias debido a la gran orientación y concentración de las fibras. Este método y el anterior se están desarrollando muy rápidamente para la fabricación de materiales compuestos.

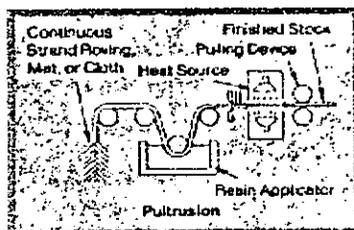


Figura 4.10 Método de Pultrusión.

Moldeo por compresión. Muchos tipos de piezas fabricadas con materiales compuestos pueden ser conformados por medio de este proceso. Una preforma (material de reforzamiento con resina) es colocada en el molde abierto, para después ser cerrado. Se aplica calor y presión (típicamente de 110 a 160° C, 1.03 a 6.9 MPa) para completar la curación cuyo tiempo varia desde 30 segundos hasta 5 minutos. Las configuraciones de partes y las secciones transversales son extremadamente flexibles, pueden ser acomodados insertos y corazones, y se pueden tener tolerancias extremadamente cerradas. Los poliesteres son las matrices predominantes, pero los fenólicos, las melaminas, los silicones y los epóxies son también utilizados en el moldeo por compresión.

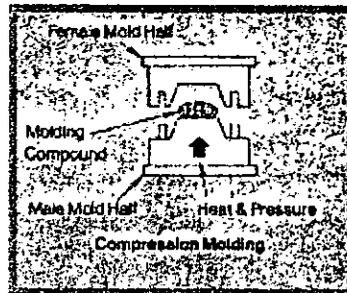


Figura 4.11 Moldeo por compresión.

Moldeo por inyección. Este es el método más rápido y que más se ha desarrollado en los últimos lustros para la fabricación de materiales compuestos, ya que se pueden producir partes complejas que sean altamente detalladas en rangos de tamaño que van desde pequeños componentes de precisión hasta piezas para automóviles. En el proceso, los pellets, concentrados de compuestos o mezclas resina-reforzamiento son calentadas hasta que alcanzan un cierto grado de fluidez para así ser inyectadas a altas presiones dentro de un molde cerrado que se encuentra a una temperatura menor. El tiempo para el ciclo completo es de menos de un minuto. Las matrices de termoplásticos son las que dominan el moldeo por inyección, pero el uso de los termofijos esta creciendo rápidamente. Para estos

últimos, el proceso usualmente involucra la inyección de reactivos dentro del molde que esta siendo calentado para curar la pieza. Ambos métodos se pueden usar fácilmente para longitudes de fibra de hasta ½ pulgada, y la tecnología de proceso actualmente está disponible para una buena retención de fibras de hasta 2 pulgadas de longitud.

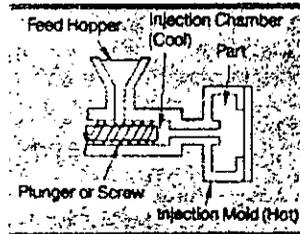


Figura 4.12 Moldeo por inyección.

Moldeo por transferencia. En este proceso, materiales en forma de fibra o preformas son colocados en la orientación deseada dentro del molde, el cual se cierra y se llena con una resina de baja viscosidad; el molde es calentado para así curar las resinas. Con este método pueden ser moldeadas partes muy grandes con altos niveles de reforzamiento y orientación sin la necesidad de utilizar altas presiones para mantener el molde cerrado. Conservar la orientación de las fibras durante la inyección de la resina puede resultar difícil, y su colocación es también laboriosa.

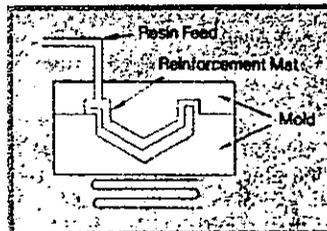


Figura 4.13 Moldeo por transferencia.

Estampado en frío. Este es otro proceso de alta velocidad de fabricación e involucra el precalentamiento de hojas o planchas de algún termoplástico que esté reforzado y estamparlas con la configuración deseada con una prensa de estampado de metales que tenga ciertas modificaciones. Es posible obtener piezas con aletas o lomos, y la longitud de las fibras sólo está limitada por el tamaño de las hojas, pero se ha probado tener dificultades con la fabricación de piezas de espesor variable. No obstante, la integración en las actuales líneas de producción y las altas propiedades mecánicas disponibles, con el rápido crecimiento de la familia de las resinas de ingeniería para matrices y los reforzamientos continuos, prometen hacer del estampado en frío un proceso clave en el área de los materiales compuestos industriales.

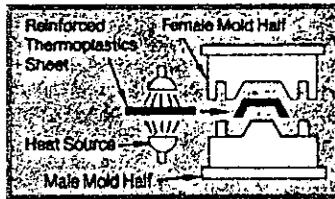


Figura 4.14 Estampado en frío.

De este modo, se ha podido observar a lo largo de este capítulo que es fundamental tomar en cuenta la gran importancia que tienen las técnicas de procesamiento y conformado de los materiales compuestos, ya que son tan determinantes para su desempeño exitoso como lo es la selección de las materias primas. Asimismo, es importante mencionar que se deben dejar atrás los equivocados prejuicios acerca de las técnicas de maquinado de este tipo de materiales, ya que utilizando las herramientas y parámetros adecuados se pueden obtener procedimientos de alta confiabilidad, reproducibles y de gran exactitud con cerradas tolerancias. Durante la discusión de este capítulo se han mencionado genéricamente las técnicas de procesamiento de los compuestos para así poder entrar

más específicamente en la técnica utilizada durante la realización de la parte experimental del presente trabajo de tesis, la cual se desarrolla en el capítulo subsecuente.

Capítulo 5.

Experimentación, Pruebas y Resultados.

5.1 *Introducción.*

El reforzamiento de aleaciones de aluminio con partículas de SiC ofrece un mejoramiento importante en la resistencia máxima y en la rigidez específica, con un incremento relativamente bajo en el costo y en el peso del material. Los compuestos de matriz metálica (MMCs) particulados tienen el beneficio adicional de poder ser conformados usando técnicas convencionales tales como la fundición y la deformación en caliente, aunque aún se requiere de un trabajo considerable para identificar las mejores condiciones de procesamiento. La fabricación de productos en hojas a partir de compuestos de matriz metálica se ha logrado con anterioridad con técnicas de laminado, pero se han presentado dificultades causadas por la baja ductilidad de los MMCs. Además, debido a los altos rangos de endurecimiento por deformación mecánica y a la acumulación de esfuerzos internos, es necesario realizar etapas de tratamiento de recocido. El uso del proceso de laminación es necesario para una mejor distribución de las partículas en la matriz.

Para optimizar la calidad del producto final es necesario entender el efecto de los parámetros de procesamiento en la microestructura y las propiedades mecánicas; tales parámetros incluyen el tiempo de fundición, la temperatura de fusión y el espaciado entre los rodillos, así como la planeación de los tratamientos de recocido, entre otros. Con el procesamiento de los MMCs se tienen que considerar factores adicionales, como el incremento en la viscosidad del material fundido con la adición de las partículas, la sedimentación o segregación de las partículas durante la solidificación y la reacción entre las partículas y la matriz. La distribución final de las

partículas juega un papel importante en la ductilidad del MMC, especialmente en secciones delgadas.

La presente sección experimental de este trabajo de tesis describe la investigación acerca de la fabricación de un material compuesto y el mejoramiento de las propiedades de una aleación de aluminio comercial reforzado con partículas de carburo de silicio (SiC).

5.2 Procedimiento Experimental.

5.2.1 Materiales.

Los materiales utilizados en el presente estudio fueron una aleación comercial de aluminio 6061-F (Al -0.6% Si -0.25% Cu -1.0% Mg -0.25% Cr. La condición F indica “como es fabricado”, es decir, sin un control especial sobre las condiciones térmicas), abrasivo comercial de partículas de carburo de silicio de malla 600 (17 μm promedio de diámetro) y de malla 220 (72 μm promedio de diámetro), y partículas de alúmina u óxido de aluminio (Al_2O_3) de malla 150 (101 μm promedio de diámetro). Las partículas fueron fabricadas por la empresa Compañía Nacional de Abrasivos (CINASA) ubicada en la ciudad de México, D.F.

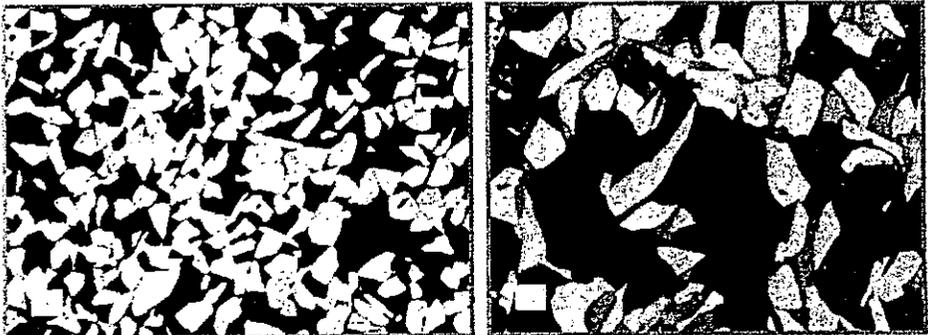


Figura 5.1 Microfotografías de partículas de carburo de silicio (izquierda) a 50X y de alúmina (derecha) a 100X.

5.2.2 Fabricación del material compuesto.

La fabricación del material compuesto se llevó a cabo en un horno de fundición de crisol de foso, con capacidad de 20 kg, de gas con soplador marca Klein de ½ HP. Así, 500 gr de la aleación de aluminio se introdujo en el crisol y ésta, a su vez, fue colocada dentro del horno hasta alcanzar la temperatura de fusión del aluminio, que es de aproximadamente 660° C. Una vez que se tuvo el aluminio fundido se procedió a vaciarlo dentro de la lingotera, mientras que al mismo tiempo se iban introduciendo manualmente las partículas, para así obtener el material compuesto al momento de la solidificación del aluminio, que sirvió de matriz conteniendo las partículas. La cantidad de partículas utilizadas para cada uno de los tres tipos de material compuesto fue del 20% en volumen aproximadamente. Es importante comentar que al momento del vaciado del aluminio fundido y de las partículas dentro de la lingotera también se agitaba manualmente el primero, para así tratar de obtener una distribución homogénea de las partículas dentro de la matriz y aumentar la mojabilidad. Se mencionan tres tipos de material compuesto de acuerdo al tipo de partícula que se utilizó para reforzar aluminio, es decir, uno con partículas de SiC de malla 600, otro con partículas de SiC de malla 220 y un último con partículas de Alúmina (Al_2O_3) de malla 150; además, se obtuvo una cuarta colada de aleación de aluminio sin reforzar para tenerla como espécimen de control.

5.2.3 Proceso de Laminación y Tratamiento Térmico.

Con el fin de obtener una mejor distribución de las partículas dentro del material matriz y para propiciar una mayor unión mecánica entre éstas y la matriz se recurrió al proceso de la laminación de los materiales compuestos. Para esto se utilizó una laminadora Hille-Sheffield England de 25 toneladas de capacidad, con rodillos para trabajo en frío y en caliente; los rodillos son de 6 pulgadas de diámetro para

trabajo con arreglo dúo o cuarto y cuya velocidad es de 1620 rpm. Adicionalmente, y para evitar el endurecimiento por deformación plástica, fue necesario hacer la laminación en caliente y además aplicar el tratamiento térmico de recocido a los materiales compuestos una vez laminados y llevados hasta el espesor requerido, teniendo especial cuidado de no sobrepasar la temperatura de fusión del aluminio, por lo que la temperatura máxima del horno se fijó en 550° C; para este tipo de tratamiento se empleó un horno eléctrico Sola Basic-Lindberg de 14 kW, 3 fases y 220V, que maneja una temperatura máxima de 1371° C controlada electrónicamente con dos reguladores; la dimensión de la mufla es de 35x35x46 cm.

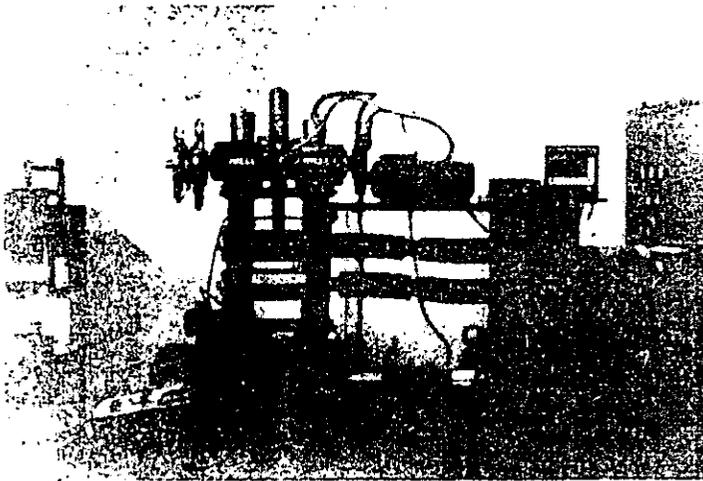


Figura 5.2 Laminadora Hille-Sheffield England de 25 tons de capacidad con rodillos para trabajo en frío y en caliente.

5.2.4 Propiedades Mecánicas.

Las probetas para el ensayo de tracción fueron preparadas de acuerdo a la norma standard ASTM E-8M. Las probetas tenían una longitud de 100 mm, un ancho de 25 mm y a través de la laminación se llevaron hasta un espesor de 3.8 mm aproximadamente. El ensayo de tracción se realizó en una máquina universal de

pruebas servohidráulica marca Instron, modelo 1331, con capacidad de carga de 10 toneladas para pruebas estáticas y dinámicas y con capacidad máxima de desplazamiento de mordazas de 50 mm. La velocidad de aplicación de carga fue de 100 kg/s para la prueba de tracción estática. En todos los casos la dirección de prueba fue paralela al sentido de la laminación de las probetas.

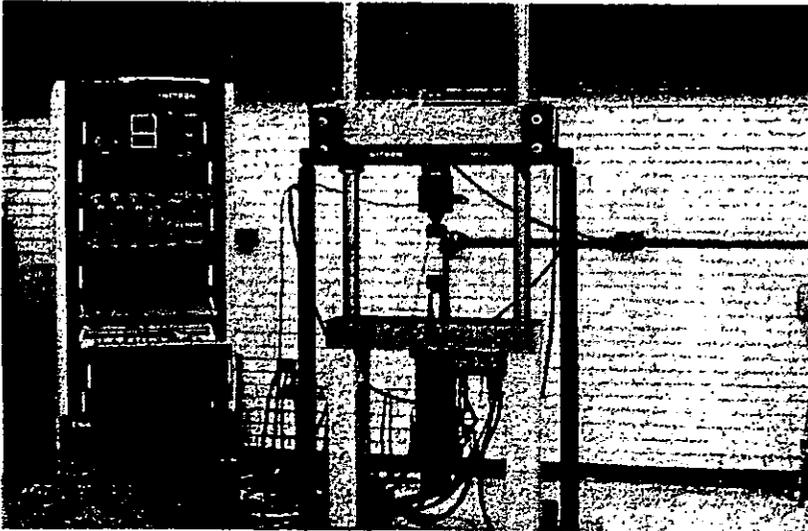


Figura 5.3 Máquina universal de pruebas servohidráulica marca Instron, modelo 1331, con capacidad de carga de 10 tons para pruebas estáticas y dinámicas.

La evaluación de la microdureza se llevó a cabo en un microscopio metalográfico marca Leitz con objetivos de 10X y 50X equivalentes a 100 y 500 aumentos, respectivamente, equipado con un microdurómetro Leitz con indentador de diamante y con capacidad de 10 a 1000 gramos para medición de microdureza Vickers y Knoop. Esta prueba se basa en el método de ensayo de la microdureza de materiales regido bajo la norma ASTM E-384. Para esta medición en particular se utilizó una carga de indentación de 200 gramos y se tomaron 5 mediciones por cada material compuesto.



Figura 5.4 Microscopio metalográfico marca Leitz equipado con un microdurómetro con indentador de diamante para medición de microdureza Vickers y Knoop.

Las mediciones de macrodureza se realizaron en un durómetro marca Mizawa Seiki Seisakusho, en la escala Rockwell B y regido bajo la norma ASTM E-18. Para este ensayo en particular se llevaron a cabo 5 mediciones para cada uno de los materiales involucrados en esta fase de experimentación.

5.2.5 Análisis Microestructural.

A las probetas para el análisis microestructural se les realizó la preparación metalográfica convencional de acuerdo a la norma ASTM E-3, aplicándoles un pulido a partir de una lija de SiC de malla 220 y llevándola sucesivamente hasta una lija de SiC de malla 600 y haciendo el pulido final con una solución coloidal de alúmina (Al_2O_3) de 3 micrones aplicada en paño. Es importante mencionar que para cada cambio de lija el pulido se realizaba ortogonalmente con respecto al anterior,

para así lograr un pulido de mayor calidad. Por ser de aluminio el material matriz se utilizó como reactivo químico para la visualización en los microscopios una solución del 20% de ácido sulfúrico (H_2SO_4) en agua destilada, aplicándola 4 minutos en las probetas.

Para la visualización de los materiales compuestos se utilizaron dos diferentes dispositivos, un microscopio óptico metalográfico marca Leitz, modelo Metalloplan, con objetivos 8x, 16x, 32x y cámara fotográfica; así como un microscopio electrónico de barrido con detector de electrones retrodispersados marca Phillips, modelo XL-20, con capacidad de ampliación de 200,000X y equipado con una microsonda para análisis químico marca Edax. Es necesario mencionar que este último microscopio también se utilizó para la visualización de las partículas utilizadas en el presente estudio experimental.



Figura 5.5 Microscopio electrónico de barrido con detector de electrones retrodispersados marca Phillips, modelo XL-20 y con capacidad de ampliación de 200,000X.

5.3 Resultados.

5.3.1 El Material Compuesto.

Al momento de que el aluminio, conteniendo las partículas reforzantes, solidificaba y llegaba a la temperatura ambiente se consideró fabricado el material compuesto. No obstante, se tuvieron algunas dificultades en su creación ya que no resultó tan sencillo el proceso de mezclado entre las partículas y el aluminio en fase líquida, sobre todo con las partículas de alúmina. Lo primero que se intentó fue la mezcla directa en el crisol, pero las partículas resultaban prácticamente insolubles en el material líquido. Se pensó que el problema consistía en un choque térmico debido a la gran diferencia de temperaturas entre los dos materiales por lo que se procedió a aplicar un precalentamiento a las partículas colocándolas en el crisol dentro del horno para después agregarles el aluminio y con una ligera agitación manual lograr la mezcla, pero el resultado fue idéntico al anterior, al momento de hacer el vaciado el aluminio literalmente expulsaba las partículas, lo cual podía observarse claramente cuando se sacaban los lingotes y casi todo el polvo que se había agregado quedaba en el piso. De este modo, se intentó un tercer método de mezclado, el cual, por fin, resultó exitoso, y consistió en que al momento del vaciado del metal líquido en las lingoteras se agregaban manualmente las partículas con una agitación constante, con lo cual se lograba que el aluminio retuviera la mayor parte de las partículas, aunque se llegó a detectar que tendían a desplazarse a la superficie si no se tenía suficiente cuidado en la agitación. Cabe mencionar que los mejores resultados se lograron con las partículas de SiC de malla 600, es decir, fueron las que tuvieron mejor solubilidad en el material matriz y presentaron mucho menos problemas que las demás partículas. Es necesario comentar que no fue posible obtener un alto grado de control en la cantidad en volumen del elemento de refuerzo debido a los problemas comentados anteriormente, y para la determinación de este parámetro tan importante

se recurrió a un método indirecto de medición como lo es el análisis metalográfico, el cual se comentará más adelante en este reporte.

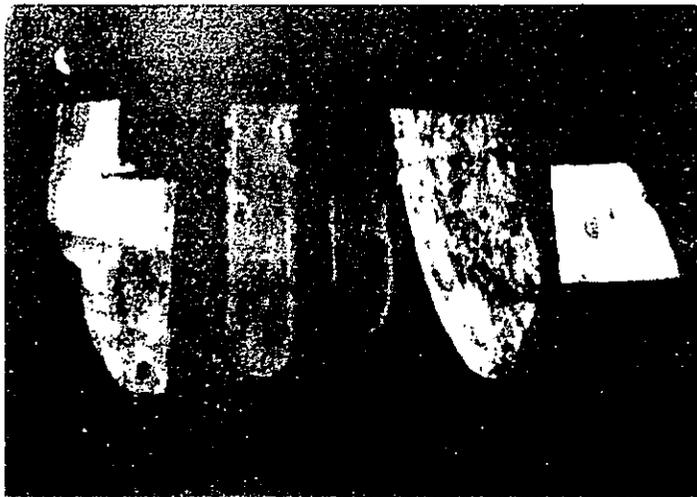


Figura 5.6 Muestras del material compuesto ya fabricado y laminado.

5.3.2 Proceso de Laminación y Tratamiento Térmico.

Desde el momento de la planeación de la fase experimental de este trabajo de tesis se consideró el uso de la laminación para el material compuesto para fomentar una mayor unión mecánica entre las partículas y la matriz, es decir, que la intercara fuera más extensa; esta idea se reforzó cuando se observó el fenómeno de segregación de las partículas al momento del mezclado, por lo que para obtener una mejor distribución de las partículas, que daría como consecuencia una muy superior homogeneidad de las propiedades en el material compuesto, se procedió con el proceso de laminación en caliente, con el cual no es tan violenta la deformación y por consiguiente el endurecimiento por deformación plástica es mucho menor. Es preciso indicar que se trató de llegar hasta un espesor de 3.8 mm aproximadamente en cada lámina, lo cual fue imposible realizarlo en una sola fase de laminación, entendiéndose como fase a varias pasadas en los rodillos mientras la temperatura del

material lo permitía sin sobrepasar la capacidad de la máquina, la cual se vigilaba y controlaba con el voltaje de armadura, por lo que fueron necesarias de dos a tres fases dependiendo del tipo de compuesto. Debido a lo anterior, se tuvo la necesidad de aplicar un tratamiento térmico a las piezas, el de recocido, entre cada una de las fases de laminación y al final del proceso sobre las piezas terminadas; ésto con el fin de disminuir la concentración de esfuerzos internos y el endurecimiento por deformación plástica. De este modo, se obtuvieron las piezas de cada material compuesto ya terminadas totalmente, es decir, en el estado en el que se les aplicaría el ensayo de tracción y el análisis metalográfico para así evaluar las propiedades y la funcionalidad del nuevo material que se había creado, lo cual se presenta a continuación en este reporte.

5.3.3 Medición de Microdureza y Macro dureza.

Con los resultados obtenidos en la medición de microdureza, los cuales se muestran más adelante, se puede observar que, tomando como referencia la microdureza de la aleación de aluminio puro, el cual es el elemento de control, no existe una variación significativa de la microdureza en los materiales compuestos. Con respecto a los compuestos reforzados con partículas de SiC de malla 600 y 220 la variación es de 8.76 y 7.57%, respectivamente. Para el compuesto reforzado con partículas de alúmina (Al_2O_3) de malla 150 prácticamente no existe variación en la microdureza del material.

Material	1	2	3	4	5	Promedio
Al sin reforz	31.8	33.6	32.4	25.8	25.8	29.88
SiC malla 600	33.3	29.5	31.8	33.6	34.3	32.5
SiC malla 220	32.4	31.7	28.9	32.9	30.8	31.3
Alúmina 150	29.6	30.4	30.1	29.3	28	29.48

Del ensayo de macrodureza aplicado a las probetas se obtuvieron los resultados que se muestran en la tabla siguiente, de los cuales se puede observar que la aleación de aluminio sin reforzamiento presentó un valor promedio de 14.17 HR_B, el cual es el valor de referencia para los compuestos que se fabricaron. Para el compuesto reforzado con partículas de SiC de malla 600 se obtuvo un valor medio prácticamente igual al del aluminio sin reforzamiento, que fue de 13.63 HR_B, es decir, no hubo una variación significativa en la dureza del material; para los otros dos compuestos reforzados con partículas de mayor diámetro si se presentaron modificaciones importantes en la macrodureza, ya que para el material reforzado con partículas de SiC de malla 220 se obtuvo un valor promedio de 31.0 HR_B, que representa un aumento del 118 %, y para el aluminio reforzado con partículas de alúmina (Al₂O₃) de malla 150 el valor de dureza decreció en un 52.7 %, presentando una medición de 6.7 HR_B , lo cual representa una seria duda en el presente estudio experimental que se discutirá más adelante en este reporte junto con los otros resultados.

Tabla 5.2 Macrodureza Rockwell B (HR _B)						
Material	1	2	3	4	5	Promedio
Al sin reforz	17.0	13.0	24.0	12.5	9.5	14.2
SiC malla 600	4.0	9.5	17.0	22.0	13.5	13.6
SiC malla 220	27.5	35.0	34.0	31.5	12.5	31.0
Alúmina 150	7.0	4.0	14.0	4.0	4.5	6.7

5.3.4 Ensayo de Tracción.

En las figuras subsecuentes se muestran las curvas características obtenidas durante el ensayo de tracción para cada uno de los materiales compuestos y para la aleación de aluminio sin reforzamiento, durante la fase experimental de este trabajo. Asimismo, se presenta la siguiente tabla de resultados para la resistencia máxima de cada uno de los materiales estudiados. Es importante mencionar que los resultados obtenidos en este ensayo mecánico fueron la prueba determinante para justificar la creación de los materiales compuestos y para prever el posible éxito en futuras aplicaciones, ya que la meta de este trabajo de tesis fue el obtener un material que conservara la ligereza del aluminio pero que tuviera una mayor resistencia mecánica.

Tabla 5.3 Resistencia Máxima (MPa)

Material	1	2	3	Promedio
Al sin reforz	74.06	72.34	75.77	74.06
SiC malla 600	92.87	100.257	90.205	94.44
SiC malla 220	66.97	70.01	-	68.49
Alúmina 150	71.67	73.33	-	72.50

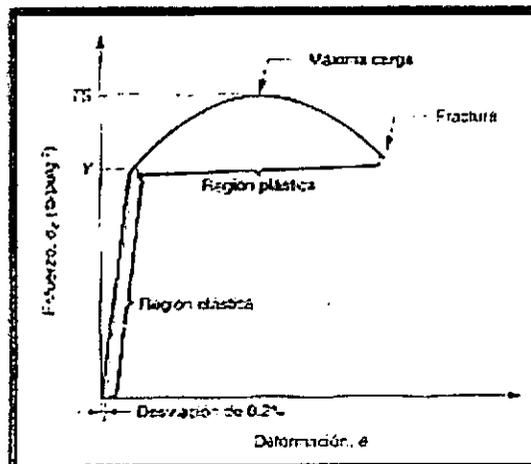


Figura 5.7 Diagrama esfuerzo contra deformación ingenieril.

Para la aleación de aluminio puro, que fue el elemento base de control, se prepararon tres probetas y se realizaron sus respectivas pruebas en la máquina universal, que arrojó como resultado que su resistencia máxima oscila alrededor de los 74 MPa, el cual es el valor de referencia para determinar el aumento pronosticado en las propiedades de los materiales compuestos. De igual modo, se prepararon tres probetas del compuesto reforzado con partículas de SiC de malla 600 y aplicándoles el ensayo de tracción se encontró que la resistencia máxima aumentó en un 27.5% con respecto a la registrada para la aleación de aluminio, dando un valor promedio de 94.44 MPa. Cabe resaltar que éste fue el único material compuesto que respondió a las expectativas, ya que los otros compuestos reforzados con partículas de mayor diámetro arrojaron resultados de resistencia máxima cuyos valores se encuentran muy cerca del obtenido para el aluminio sin reforzamiento, ya que el compuesto reforzado con partículas de SiC de malla 220 presentó una resistencia máxima promedio de 70 MPa, incluso por debajo del valor del aluminio sin reforzamiento, y para el compuesto reforzado con alúmina (Al_2O_3) de malla 150 se encontró que su resistencia máxima se encuentra alrededor de los 73 MPa, la cual es prácticamente igual a la de la aleación de aluminio, lo que puede interpretarse como que el reforzamiento no dió resultado.

A continuación se muestran sólo algunas gráficas obtenidas del ensayo de tracción aplicado a las probetas de los materiales que se utilizaron durante esta fase experimental en el siguiente orden: aluminio sin reforzamiento, aluminio reforzado con partículas de carburo de silicio de malla 600, aluminio reforzado con partículas de carburo de silicio de malla 220 y aluminio reforzado con partículas de alúmina de malla 150.

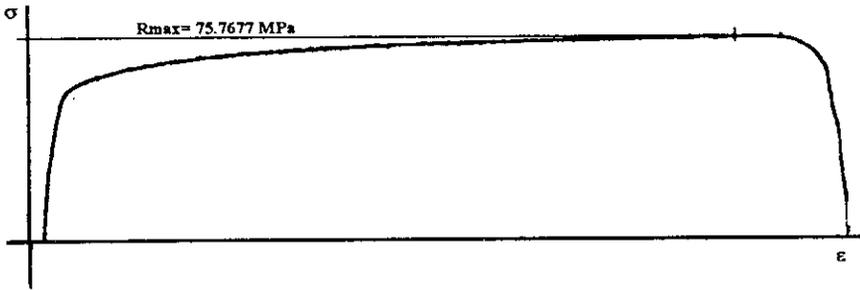


Figura 5.8 Ensayo de tracción para el aluminio sin reforzamiento.

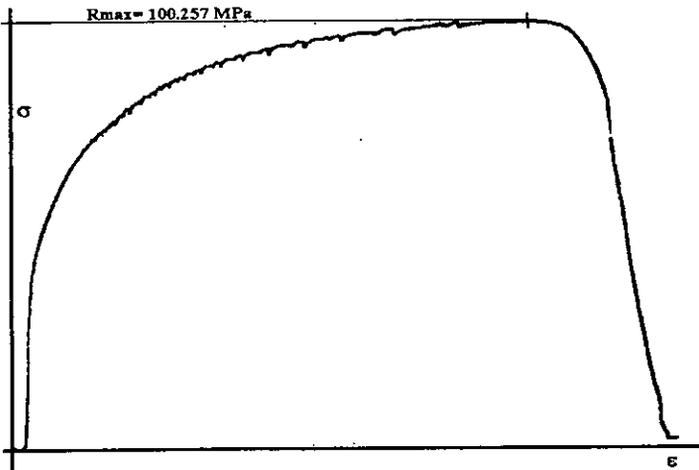


Figura 5.9 Ensayo de tracción para el aluminio reforzado con partículas de SiC de malla 600.

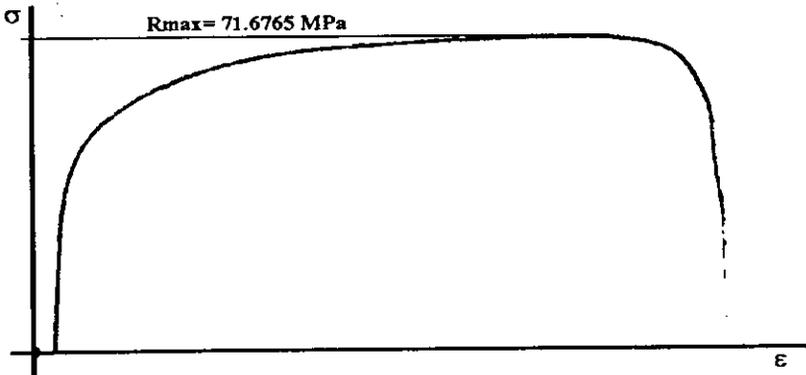


Figura 5.10 Ensayo de tracción para el aluminio reforzado con partículas de SiC de malla 220.

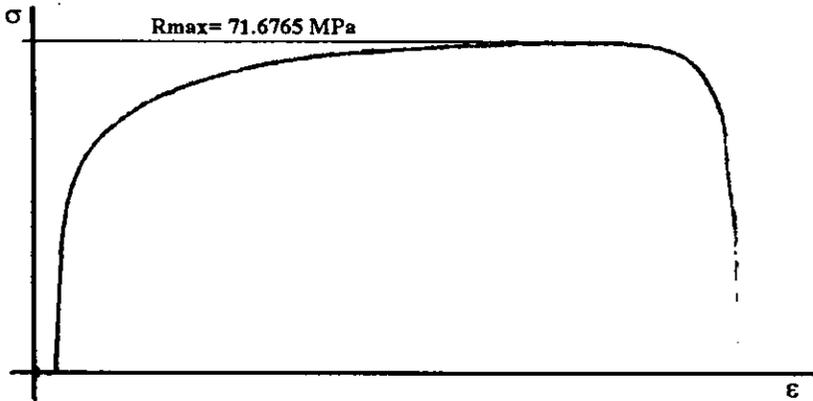


Figura 5.11 Ensayo de tracción del aluminio reforzado con partículas de Al_2O_3 de malla 150.

5.3.5 Análisis Microestructural.

A continuación se muestran las fotografías obtenidas del microscopio óptico para los materiales con los que se trabajó en esta fase experimental. Con las observaciones hechas por medio del objetivo 8x se pudo constatar aparentemente la presencia de las partículas en los materiales compuestos con una distribución satisfactoriamente homogénea en cada uno de ellos. Con el objetivo 32x se determinó de manera aproximada que para el compuesto reforzado con partículas de SiC la cantidad en volumen que representaban éstas era de cerca de un 10% y para los otros dos materiales se presumía que el porcentaje en volumen del reforzamiento era de cerca del 8% en cada uno, quizá un poco menos. Cabe mencionar, que no fue posible visualizar de manera muy clara los granos, y por consiguiente los límites de grano del material matriz, debido a que éste no era el objetivo principal en el estudio metalográfico, sino más bien observar el modo en que las partículas estaban mezcladas con la aleación de aluminio.



Figura 5.12 Aleación de aluminio reforzada con partículas de SiC malla 600 (izq.) y con partículas de alúmina malla 150 (der.). Atacadas con solución al 20% de H_2SO_4 en agua destilada. 80X.

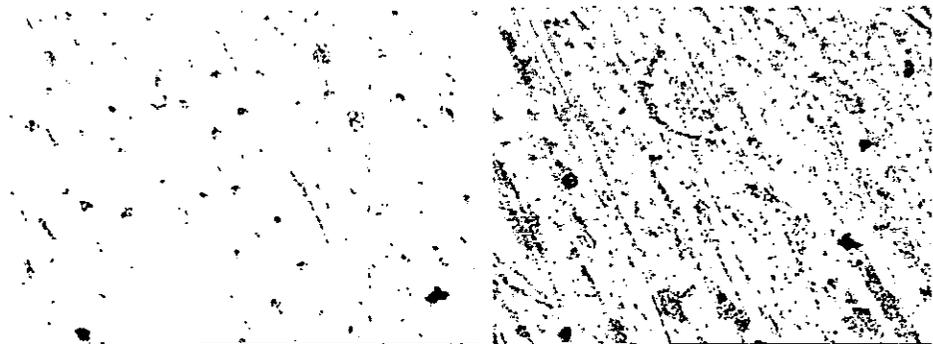


Figura 5.13 Aleación de aluminio reforzada con partículas de SiC malla 600 (izq.) y con partículas de alúmina malla 150 (der.). Atacadas con solución al 20% de H_2SO_4 en agua destilada. 320X.

El objetivo de la utilización del microscopio electrónico fue el observar la intercara entre las partículas y el material matriz, pero además se hicieron algunos otros descubrimientos que aclararon ciertas dudas que surgieron durante los demás ensayos realizados a las muestras de los materiales fabricados en la fase experimental de este trabajo de tesis. El único material en el que se pudo observar de manera adecuada la intercara, aunque no era totalmente satisfactoria, fue en el compuesto reforzado con las partículas de SiC de malla 600, debido a que en los demás compuestos no se encontró la presencia de las partículas de reforzamiento y lo que en las observaciones hechas en el microscopio óptico parecían las partículas, en realidad se descubrió con la microsonda para análisis químico que eran

precipitados de materiales ajenos o extraños al aluminio, como ferrosilicatos, que quizá sería necesario investigar de donde provienen y cómo es que llegaron ahí. Además, se pudieron observar varios huecos en todos los materiales, lo cual indica que tal vez el tipo de preparación metalográfica no fue el más adecuado debido a que al momento del pulido las partículas se arrancaban de su lugar y por consiguiente también rayaban la superficie de la matriz. En las fotografías que se muestran a continuación se puede observar todo lo descrito anteriormente.

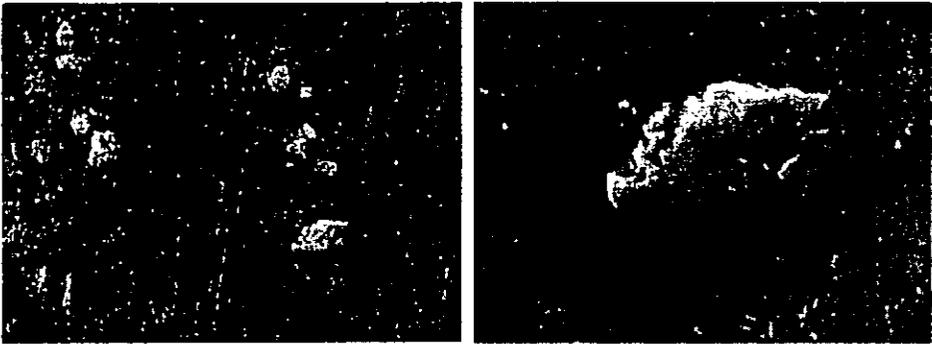


Figura 5.14 Fotografías que muestran partículas de SiC en la matriz de Aluminio a 2500X (der) y 10,000X (izq).

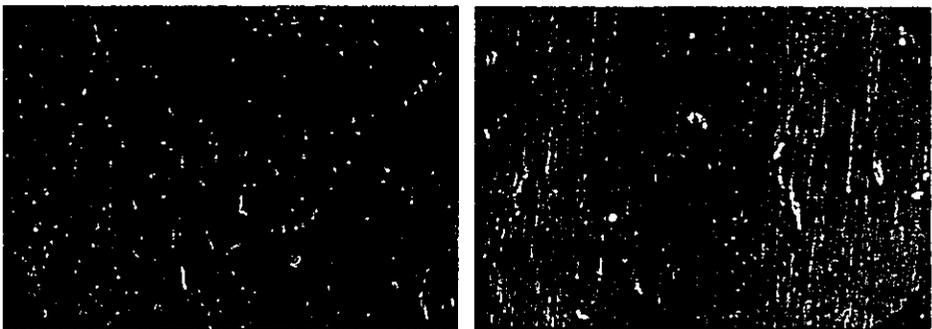


Figura 5.15 Fotografías que muestran la presencia de materiales extraños, como ferrosilicatos, y evidencia la nula presencia de partículas de alúmina en la matriz de aluminio. 200X a la izquierda y 643X a la derecha.

5.4 *Discusión.*

5.4.1 El Material Compuesto.

Es importante mencionar que en un inicio se había pensado en solamente trabajar con las partículas de SiC en la fabricación del material compuesto, pero después se pensó en tener otro compuesto de referencia, además del material de control como lo es el aluminio sin reforzamiento, para así poder comparar las características y propiedades de un material compuesto con respecto a otro del mismo tipo, es decir, de un compuesto, por lo que se optó por las partículas de alúmina (Al_2O_3), para así tener un panorama un poco más amplio en el estudio de este tipo de materiales de ingeniería. Es necesario indicar que se presentan serios problemas al momento del mezclado de los materiales durante la fabricación del material compuesto por el método empleado en este trabajo y que la solubilidad y facilidad de mezclado que se mencionan en la bibliografía deben ser cuestionados. Se propusieron y aplicaron diferentes opciones para solucionar este problema y al parecer la clave está en la agitación al momento del mezclado, por lo que se puede proponer la creación de un mecanismo de mezclado que permita una agitación constante y uniforme para así lograr resultados óptimos; como otra alternativa se puede sugerir el uso de aditivos, pero eso sería tema de otro estudio. Por otro lado, se pudo observar que el uso de partículas más finas, es decir, de diámetros menores facilita la fabricación y garantiza la mejora en las propiedades del material resultante, lo cual es el objetivo de la creación de los materiales compuestos; quizá sea necesario experimentar con más partículas de diferentes diámetros y de otros materiales, pero eso ya es tema para un trabajo posterior o de complementación de este trabajo de tesis.

5.4.2 Microdureza.

La poca o nula variación en la microdureza de los materiales compuestos con respecto a la del aluminio sin reforzamiento se puede explicar con la aplicación del tratamiento térmico de recocido a los materiales terminados y durante las fases de laminación de éstos, ya que con esto se garantizaba minimizar el efecto de endurecimiento por deformación plástica que presentan todas las piezas laminadas y además reducir los esfuerzos internos generados en el material. El objetivo de todo esto fue tratar de conservar las propiedades iniciales de la aleación de aluminio y que no variaran, para así obtener las propiedades esperadas y que fueron investigadas del compuesto, lo cual es esencial y una de las características sobresalientes de todos los materiales compuestos, en los que cada uno de los materiales que los componen mantienen sus propiedades, pero que al conjuntarlas dan como resultado características superiores a cada uno de ellos. Es decir, se trató de controlar una de las posibles variables para obtener una mayor certidumbre de los resultados pronosticados en esta fase experimental del trabajo de tesis.

5.4.3 Macro dureza.

A nivel macroscópico se presentaron serias variaciones en las mediciones de dureza, sobre todo en los materiales compuestos reforzados con las partículas de mayor diámetro. Para el material reforzado con partículas de SiC de malla 600 prácticamente no hubo una variación en la dureza con respecto a la de la aleación de aluminio sin reforzamiento, y esto se puede explicar con el tamaño, porcentaje en volumen y distribución de las partículas, ya que, como lo confirma el análisis microestructural, debido a todo esto al momento de la indentación se está penetrando casi exclusivamente al material matriz y las partículas, a pesar de la alta dureza que

presentan por sí solas debido a que son cerámicas, intervienen de manera casi nula en la aplicación de este ensayo. Para el compuesto reforzado con partículas de SiC de malla 220 se presentó un aumento bastante considerable en la dureza, de más del 100% con respecto a los 14.17 HR_B del espécimen de control, lo cual podría explicarse únicamente con el tamaño de las partículas, ya que con las observaciones metalográficas se pudo constatar que tenía una distribución y un contenido en volumen muy parecidos al del material compuesto anterior, por lo que, al tener un mayor diámetro las partículas, al momento de la indentación intervienen de manera directa y en conjunto con la matriz para oponerse a la penetración y así dar un resultado total de dureza como el que se presentó. El material compuesto que supuestamente contenía las partículas de alúmina de malla 150 dió un resultado promedio de dureza que se salía por completo del patrón y de los resultados pronosticados, ya que arrojó un valor de 6.7 HR_B, que es un 52% por debajo de la dureza del aluminio sin reforzamiento; esto tal vez podría representar un error humano en la aplicación del ensayo o un extraño fenómeno producido en la fabricación de este material, pero una vez descartadas estas dos posibles explicaciones y a la vista de los resultados observados en el análisis microestructural, se pudo concluir que debido a que el material matriz no contenía realmente ningún tipo de reforzamiento, es decir, prácticamente no se observó la presencia de partículas en el supuesto material compuesto y si la de algunos precipitados extraños como se comprobó con la microsonda para análisis químico; y con la aplicación del recocido en la pieza lo único que se logró fue alterar de cierto modo las propiedades iniciales de la aleación de aluminio a nivel macroscópico; tal vez se necesite de un estudio más particular y profundo en esta pieza para determinar de manera más acertada las posibles causas de este fenómeno, pero ese es tema de un estudio que no corresponde al que se está conduciendo en este trabajo de tesis.

5.4.4 El Ensayo de Tracción.

Es relevante comentar que aunque no fue posible alcanzar la cantidad propuesta del 20% en volumen del elemento de reforzamiento en el material compuesto que contenía las partículas de SiC de malla 600, debido a los problemas ya comentados durante la fabricación, de cualquier manera se logró alcanzar el objetivo de aumentar la resistencia máxima del aluminio hasta un 27% con tan sólo el 10% aproximadamente de contenido de partículas y con una distribución de éstas satisfactoriamente homogénea, lo cual demuestra que es muy viable la fabricación de este tipo de materiales aquí en nuestro país y que además, si se logra tener un mejor método de mezclado y de control del contenido de partículas, se podría obtener de manera precisa la resistencia máxima que se requiera de acuerdo a la aplicación. Con los otros dos tipos de compuestos, los cuales no presentaron ningún tipo de mejoría en sus propiedades mecánicas, se pudo confirmar la hipótesis de que se presentan mayores dificultades con el uso de partículas más bastas y que no se recomienda la utilización de la alúmina (Al_2O_3), por lo menos con este método de fabricación o, tal vez, sea necesaria la adición de un tercer elemento que mejore la solubilidad y la afinidad de ésta con el material matriz; todo esto se pudo concluir al momento de la visualización en el microscopio electrónico, ya que se observó la nula o poca presencia del elemento de reforzamiento en el compuesto reforzado con alúmina y en el reforzado con SiC de malla 220, respectivamente, lo que, ciertamente, explica los resultados obtenidos a partir de estos dos materiales en el ensayo de tracción.

5.4.5 Análisis Microestructural.

Fue extremadamente importante la utilización del microscopio electrónico en la visualización de los materiales compuestos, ya que cuando se observaron en el microscopio óptico parecía que las partículas se encontraban realmente contenidas en el material matriz y con una buena distribución, pero al analizar los resultados obtenidos en los ensayos aplicados se encontraron algunos resultados incongruentes y que dejaban ciertas dudas, ésto sobre todo en los materiales que se prepararon con alúmina y con SiC de malla 220. Todas estas dudas quedaron resueltas con las imágenes electrónicas obtenidas y con el uso de la microsonda para análisis químico, ya que se encontró un rastro muy pobre o nulo de partículas en estos dos materiales y en cambio si se hallaron evidencias de precipitados ajenos al material matriz.

Otra de las cosas que se pudo observar fue que en el material compuesto reforzado con partículas de SiC de malla 600 la interfase entre el elemento de reforzamiento y la matriz no era totalmente satisfactoria, ya que se detectaron ciertas grietas y huecos entre éstos lo cual puede significar falta de mojabilidad y de solubilidad que tal vez puedan ser mejoradas con un método de agitación más adecuado y controlado durante la fase de mezclado de los materiales involucrados; además, sería necesario establecer una interfase química adecuada entre estos dos materiales. De cualquier manera, es reconfortante comprobar que a pesar de las dificultades encontradas y de las ciertas deficiencias que presenta este compuesto se logró alcanzar el objetivo de mejorar las propiedades del material, por lo menos en lo que se refiere a la resistencia máxima, y así obtener un material que cumple con las especificaciones de lo que es un real compuesto para aplicaciones avanzadas de ingeniería y que fue fabricado en su totalidad en nuestro país.

5.5 Conclusiones de la Fase Experimental.

1. Para este método de fabricación la clave está en el mezclado de los materiales al momento del vaciado de aluminio fundido en las lingoteras, así como la agitación constante del mismo para permitir una mejor solubilidad y mojabilidad de las partículas.
2. Es necesario el proceso de laminación para asegurar una mejor unión mecánica entre la matriz y las partículas, así como una mejor distribución en el material compuesto debido a que éstas presentan un cierto grado de segregación hacia la superficie. Con el proceso de laminación va inherente el tratamiento térmico de recocido si es que se quieren conservar las propiedades iniciales del material matriz. Las mediciones de microdureza muestran evidencia de isotropía, que es una propiedad característica de los compuestos de matriz metálica particulados.
3. Las partículas de SiC en general son las que presentaron la mejor respuesta en la fabricación de los materiales compuestos, por lo que se pueden recomendar como la mejor opción. De igual modo se pudo concluir que con el uso de partículas más finas, es decir, de menor diámetro se facilita la fabricación y aumenta la probabilidad de obtener un real y exitoso material compuesto para aplicaciones avanzadas de ingeniería.
4. Se ha fabricado exitosamente un material compuesto a partir de una aleación de aluminio 6061 que sirvió como material matriz, reforzado con partículas de SiC de malla 600, por el método de fundición convencional y con un proceso de laminación posterior.

CONCLUSIONES GENERALES.

Durante este último capítulo se describirán las conclusiones generales a las que se llegaron después de realizar la investigación correspondiente al marco teórico así como durante la fase experimental de este trabajo, del cual fue posible obtener valiosas experiencias y conocimientos que permitirán vislumbrar un poco mejor esta interesante área de la ingeniería mecánica.

Durante la investigación teórica, se pudo descubrir que el conocimiento y la información con que se cuenta en México acerca de los materiales compuestos es hasta cierto punto limitada, no obstante el gran desarrollo y el auge que están teniendo este tipo de materiales de ingeniería en los grandes países industrializados, de los cuales es de donde proviene la gran mayoría de la información. Con este trabajo se pudo concluir que, aprovechando los conocimientos que ya se tienen en la materia, es posible el desarrollo y la fabricación de materiales compuestos que, de hecho, ya se utilizan con cierta amplitud en nuestro país y que con una inyección de recursos podría ser posible alejar la idea equivocada que se encontró, de que no es necesario el desarrollo de ese tipo de tecnologías y que con importarlas es más que suficiente para los propósitos nacionales.

Ya siendo un poco más específicos y atendiendo a los resultados obtenidos durante la fase experimental de este trabajo, que a juicio de su autor es el corazón y la parte fundamental de esta tesis, en la que se trabajó con un material compuesto que estaba fabricado con partículas de carburo de silicio reforzando una aleación de aluminio, se pudo llegar a las conclusiones que se explican en los párrafos siguientes.

Utilizando el método de fundición convencional para la fabricación del compuesto ya mencionado, se constató que la clave para obtener exitosamente el material radica en el mezclado adecuado de los constituyentes al momento que se hace el vaciado del aluminio fundido en las lingoteras; asimismo, es necesaria una agitación constante del mismo, lo que permite alcanzar una mejor solubilidad y mojabilidad de las partículas. Por tal motivo, es necesario señalar que sería bastante interesante llevar a cabo una investigación experimental, que complemente y continúe este trabajo, acerca de posibles elementos o materiales que sirvan como interfase entre las partículas y la matriz con el fin de facilitar la fabricación y aumentar el rendimiento del material compuesto.

Por el tipo de fabricación se hace indispensable aplicar un proceso de laminación para aumentar la unión mecánica entre la matriz y las partículas, es decir, aumentar la intercara en el material compuesto, lo que dió como consecuencia un mayor rendimiento de éste. Así, con el propósito de conservar las propiedades iniciales del material matriz, que se ven afectadas por el proceso de endurecimiento por deformación plástica asociado a la laminación, es necesario aplicar el tratamiento térmico de recocido. Con todo lo que se acaba de describir y analizando el proceso experimental que se llevó a cabo se puede observar que para la obtención de este material compuesto solamente se utilizaron procesos convencionales de producción y conformado, lo cual representa una gran ventaja para su posible escalabilidad y reproducción a nivel industrial, lo que sería la culminación más exitosa de este trabajo de tesis.

Basándose en los resultados obtenidos en la medición de la microdureza Vickers se encontró evidencia de isotropía en el material compuesto, es decir, que presenta las mismas propiedades físicas en cualquier dirección, la cual es una propiedad característica de los compuestos de matriz metálica reforzados con

partículas. Lo anterior no causa ninguna sorpresa, al contrario es un resultado esperado debido a que, como ya se mencionó anteriormente, se utilizó el tratamiento térmico de recocido para eliminar los efectos del proceso de laminación que se pudieran tener en el material matriz, con lo que se cuidó no obtener una variable más al momento de que se alteraran las propiedades originales de la aleación de aluminio, y así se logró el objetivo de conservar sus cualidades iniciales.

Después de analizar el material compuesto, una vez terminado, se concluye que las partículas de carburo de silicio (SiC) en general son las que presentaron la mejor respuesta para la fabricación, por lo que se pueden recomendar como la mejor opción para este tipo de materiales; de la misma manera se pudo inferir que el uso de partículas de menor diámetro facilita la fabricación por este método y aumenta la probabilidad de obtener un verdadero material compuesto de alto desempeño. Como recomendación para un futuro trabajo de investigación podría ser el experimentar con la geometría de las partículas de carburo de silicio, es decir, observar y analizar los efectos de utilizar diferentes formas y tamaños de partícula para así tratar de encontrar una manera de predecir su comportamiento al momento del mezclado y de hallar la geometría óptima para este tipo de material matriz.

Por último, y quizá lo más importante, es que al obtener un aumento considerable en la resistencia máxima se puede concluir que se fabricó exitosamente un material compuesto, cuyos constituyentes son una aleación de aluminio 6061-F, que sirvió de matriz, reforzado con partículas cerámicas de carburo de silicio (SiC) de malla 600 por el método de fundición convencional, aunado a un proceso de laminación posterior. Así, al ver que es posible crear un material compuesto de alto desempeño que nos brinda ciertas ventajas en las propiedades, las cuales no son posibles de encontrar en otro tipo de materiales, quizá el siguiente paso obligado es el de encontrar las aplicaciones potenciales en las que se aprovechen al máximo

estas características, las cuales son que el material conserva la ligereza del aluminio pero aumenta su resistencia, es decir, la resistencia específica se incrementó considerablemente por lo que puede usarse en aplicaciones estructurales que no estén sometidas a altas temperaturas, como en el telescopio espacial, las barras de dirección del automóvil, trenes de aterrizaje, perfiles, pernos, etc; en aplicaciones de precisión, como en el sistema de guía inercial de misiles; en aplicaciones de óptica y en algunas otras que ya se utilizan actualmente y las que irán surgiendo con el paso del tiempo y el desarrollo de la tecnología que se vive actualmente.

BIBLIOGRAFÍA.

Libros.

1. William D. Callister, Jr.: Materials Science and Engineering, an Introduction; 1991, John Wiley & Sons, Inc.
2. Mel M. Schwartz: Handbook of Composite Materials; 1992, McGraw-Hill.
3. William F. Smith: Fundamentos de la Ciencia e Ingeniería de Materiales; 1989, McGraw-Hill.
4. James Jacobs & Thomas Kilduff: Engineering Materials Technology; 1987, Prentice- Hall.
5. Donald R. Askeland: La Ciencia e Ingeniería de los Materiales; 1988. McGraw-Hill.
6. Mel M. Schwartz: Handbook of Structural Ceramics; 1992, McGraw-Hill.
7. Thornton, P.A. and V.J. Colangelo: Fundamentals of Engineering Materials; 1985, Prentice-Hall.
8. M. Grayson: Encyclopedia of Composite Materials and Components; 1983, John Wiley & Sons. Inc.
9. Sydney Avner: Introducción a la Metalurgia Física; 1981, McGraw-Hill.

10. E. Weidmann e Yvan Houbaert: *Metalografía Práctica*; 1979, Bufete Metal-Mecánico.
11. Kenneth G. Budinski: *Engineering Materials, Properties and Selection*; 1989, Prentice-Hall.
12. Mikell P. Groover: *Fundamentals of Modern Manufacturing: materials, processes and systems*; 1996, Prentice-Hall.
13. Carl Sagan: *El mundo y sus demonios: la ciencia como una luz en la oscuridad*; 1997, Editorial Planeta.
14. Committee of Science and Technology of U.S. Materials Science and Engineering for the 1990s. E.U. 1995.
15. The Aluminium Association: *Aluminium standards and data 1974-75*; E.U. 1974

Revistas Especializadas.

- Materials Science and Technology:

P.A. Karnezis, G. Durrant, B. Cantor and E.J. Palmiere: Mechanical properties and microstructure of twin roll cast Al-7Si/SiC_p MMCs.; agosto 1995 vol.11.

K. Ohori, H. Watanabe and Y. Takeuchi: Silicon carbide whisker reinforced aluminium composites- fabrication and properties.; enero 1987 vol. 3.

C.Y. Lin, H.B. McShane and R.D. Rawlings: Structure and properties of functionally gradient aluminium alloy 2124/SiC composites.; julio 1994 vol. 10.

H.R. Shercliff and M.F. Ashby: Design with metal matrix composites.; junio 1994 vol.10.

- Advanced Materials and Processes inc. Metal Progress:

P. Niskanen and W.R. Mohn: Versatile Metal-Matrix Composites; marzo 1988.

- Mechanical Engineering:

Lawrence K. English: Fabricating the Future With Composite Materials, Part I: The Basics; noviembre 1986.

- Materials & Design:

Butterworth-Heinemann: Metal matrix composites in the UK; volumen 14, número 2 1993.

K.H.W. Seah, A. Tucci, S.C. Sharma, B.M. Girish and R. Kamath: Mechanical properties of cast lead alloy/silicon carbide particulate composites; volumen 16, número 6 1995.

C. Srinivasa Rao and G.S. Upadhyaya: 2014 and 6061 aluminium alloy-based powder metallurgy composites containing silicon carbide particles/fibres; volumen 16, número 6 1995.

- **Chemical Engineering:**

Kevin Brooks, P.E. and Mark W. Martin: *Ceramics stand up to*; octubre 1996.

James K. Wessel: *Breaking tradition with Ceramic Composites*; octubre 1996.