

10
24



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA
DE MEXICO**

**ESCUELA NACIONAL DE ESTUDIOS PROFESIONALES
"CAMPUS-ARAGON"**

**"MATERIALES COMPUESTOS EN LA
INDUSTRIA AUTOMOTRIZ"**

T E S I S

**QUE PARA OBTENER EL TITULO DE
INGENIERO MECANICO ELECTRICO
P R E S E N T A N
GUILLERMO BARCEINAS PEDROTE
JUAN CARLOS RODRIGUEZ RIVERA**

ASESCR: ING. UBALDO MARQUEZ AMADOR

MEXICO.

1997

**TESIS CON
FALLA DE ORIGEN**



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



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.



ESCUELA NACIONAL DE ESTUDIOS PROFESIONALES ARAGON-UNAM
JEFATURA DE CARRERA DE INGENIERIA MECANICA ELECTRICA

Secretaría Técnica

UNIVERSIDAD NACIONAL
AVENIDA DE
MEXICO

- ING. UBALDO MARQUEZ AMADOR (ASESOR)
- ING. JUAN DE DIOS GONZALEZ ROMERO
- M. en C. DANIEL ALDAMA AVALOS
- ING. JUAN JOSE MARTINEZ COSGALLA
- ING. JOSE GPE. SANCHEZ BARRALES

ASUNTO: Revisión previa de Tesis, antes de autorizar su impresión.

En forma anexa le hago entrega de un ejemplar del proyecto de Tesis titulado: "MATERIALES COMPUESTOS EN LA INDUSTRIA AUTOMOTRIZ", de los alumnos : BARCEÑAS PEDROTE GUILLERMO y RODRIGUEZ RIVERA JUAN CARLOS, con numero de cuenta: 8841922-4 y 8735484-3, respectivamente.

Esto con el fin de que sea revisada por Usted, y que nos de su evaluacion y comentarios por escrito, mismo que le pido me haga llegar a la brevedad posible.

Agradezco de antemano su colaboracion y aprovecho la oportunidad para enviarle un cordial saludo.

ATENTAMENTE
"POR MI RAZA HABLARA EL ESPIRITU"
San Juan de Aragón, Edo. de México, 11 de septiembre de 1996.

EL SECRETARIO TECNICO

ING. MIGUEL ANGEL MALDONADO MUÑOZ

c.e.p. Expediente

**EN MEMORIA DE LAS PERSONAS MÁS QUERIDAS
QUE NO ESTÁN CON NOSOTROS**

† RAQUEL CORTES de RIVERA.

Y

† RODOLFO LUNA GARCÍA.

A Mi Esposa.

Ma. de los Angeles Luna de R.

*Por su apoyo y sus consejos
que me dio en los momentos
que más los necesitaba
y que se que me servirán
en un futuro próximo.*

*A Mis Padres y hermana.
Esperanza Rivera Cortes
Asrelio Rodríguez Pineda
Ma. Guadalupe Rodríguez R.*

*Por ser una familia sumamente
importante para mí y por haberme
su apoyo en todo momento.*

*A Mi Asesor
Ing. Ubaldo Márquez A.*

*Por su paciencia y conocimientos
proporcionados para poder
realizar este trabajo de tesis.*

"GRACIAS"

Juan Carlos Rodríguez Rivera

A Dios.

*Por haberme dado la oportunidad
de realizar una importante fase
más en mi vida*

*† A Mi Abuela,
Raquel Cortes de Rivera*

*Por haberme orientado, formado
y dado todo su cariño, soy lo que
hubiera querido, un Profesionalista,
y aunque no está en vida siempre
estará conmigo, gracias también
por haber sido como una
"MADRE".*

*A Mi Abuelo,
Maximino Rivera Chavez*

*Por sus consejos, enseñanzas,
orientación y apoyo por haber
estado siempre conmigo en
las buenas y en las malas,
además de enseñarme el camino
del ENTUSIASMO.*

Agradecimientos

A mi Padre

*Agradezco que siempre me apoyaras
en la buenas y en las malas, con
tus consejos he logrado una meta
más.*

"Gracias Papá"

A mi Madre

*Quiero que sepas que
eres la más grande
inspiración, porque me di
cuenta que cualquiera
se puede levantar.*

"Te quiero Mamá"

A mis Hermanos

*Beto y Diana que siempre
han compartido todos los
buenos momentos de la vida
"Vamos siempre hacia delante".*

A Dios

*Qué pesar de mi
poca fé nunca me
dejo ir por el mal
camino.*

A mi Asesor

*Por la aportación de
sus conocimientos con
los que se elaboró
esta tesis.*

*A todas la personas
que nos ayudaron directa
ó indirectamente con su
apoyo. Se los agradezco
desde dentro de mi.*

" Gracias A.V. "

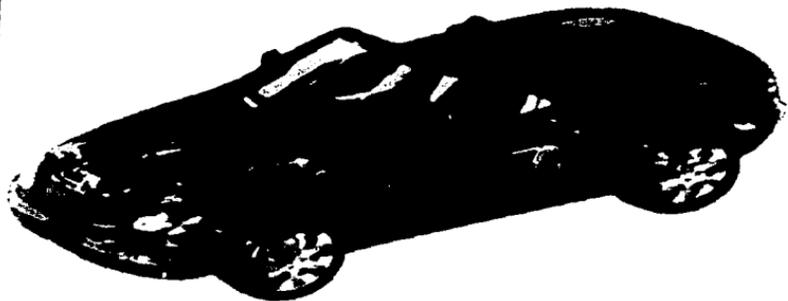
Gracias por todo

Guillermo Barceinas Pedrote

TRABAJO DE TESIS ELABORADO POR:
BARCEINAS PEDROTE GUILLERMO
RODRIGUEZ RIVERA JUAN CARLOS

ASESORADOS POR:
ING. UBALDO MARQUEZ AMADOR

MATERIALES
COMPUESTOS
EN
LA
INDUSTRIA
AUTOMOTRIZ



CONTENIDO

	<i>Página</i>
CAPÍTULO I INTRODUCCIÓN	
1.1 <i>Introducción</i> _____	1
CAPÍTULO II LA INDUSTRIA AUTOMOTRIZ Y SUS TENDENCIAS	
2.1 <i>Historia del automóvil</i> _____	4
2.2 <i>Situación actual</i> _____	8
2.3 <i>Tendencias de la industria automotriz</i> _____	14
CAPÍTULO III ANÁLISIS DE LOS MATERIALES COMPUESTOS	
3.1 <i>Definición de Material Compuesto</i> _____	17
3.2 <i>Clasificación de Materiales Compuestos</i> _____	18
3.3 <i>Materiales Compuestos reforzados con partículas</i> _____	19
3.3.1 <i>Compuestos endurecidos por dispersión</i> _____	19
3.3.2 <i>Consideraciones en la selección de materiales</i> _____	20
3.3.3 <i>Compuestos particulados verdaderos</i> _____	21
3.4 <i>Materiales Compuestos reforzados con fibras</i> _____	22
3.4.1 <i>Predicción de las propiedades de los compuestos reforzados con fibras</i> _____	24
3.4.2 <i>Resistencia mecánica</i> _____	24
3.4.3 <i>Fibras discontinuas</i> _____	24
3.4.4 <i>Características de los compuestos reforzados con fibras</i> _____	25

3.4.5	<i>Fracción volumétrica de las fibras</i>	26
3.4.6	<i>Orientación de las fibras</i>	27
3.4.7	<i>Fabricación de fibras y de compuestos</i>	30
3.5	Materiales Compuestos Laminares	35
3.5.1	<i>Laminares</i>	35
3.5.2	<i>Recubrimientos duros</i>	36
3.5.3	<i>Metales de revestimiento</i>	36
3.5.4	<i>Bimetales</i>	36
3.5.5	<i>Ventajas de los Materiales Compuestos sobre las otras familias de materiales</i>	39
3.6	Metallurgia de polvos	41
3.6.1	<i>Polvos de metal</i>	43
3.6.2	<i>Procesos de fabricación</i>	45
3.6.3	<i>Compresión</i>	46
3.6.4	<i>Otros métodos de compactación</i>	49
3.6.5	<i>Sinterizado</i>	51
3.6.6	<i>Operaciones de acabado</i>	55
3.6.7	<i>Metales Compuestos</i>	56
3.6.8	<i>Diseño de partes de metal en polvo</i>	57

CAPÍTULO IV MATERIALES COMPUESTOS DE MATRIZ METÁLICA (MMC)

4.1	<i>Generalidades</i>	58
4.2	<i>Materiales Compuestos de Matriz Metálica (MMC) reforzados con partículas</i>	59
4.2.1	<i>Endurecidos por dispersión</i>	59

4.2.2	MMC reforzados con partículas propiamente dichas _____	61
4.3	Materiales Compuestos de Matriz Metálica (MMC) reforzados con fibras _____	62
4.3.1	Fibras continuas _____	63
4.3.2	Propiedades de los MMC reforzados con fibras continuas _____	63
4.3.3	Fibras discontinuas _____	76
4.3.3.1	MMC reforzados con fibras discontinuas cortas _____	76
4.3.3.2	MMC reforzados con fibras discontinuas tipo partículas _____	78
4.3.3.3	MMC reforzados con fibras discontinuas tipo whiskers _____	80
4.4	Fabricación de las fibras _____	82
4.5	Materiales Compuestos de Matriz Metálica (MMC) Laminados _____	87
4.6	Fabricación de los MMC _____	93
4.7	Aplicaciones de los Materiales Compuestos de Matriz Metálica (MMC) _____	104

CAPÍTULO V MATERIALES COMPUESTOS DE MATRIZ METÁLICA (MMC) EN LA INDUSTRIA AUTOMOTRIZ

5.1	Introducción _____	106
5.2	MMC reforzados con fibras de Boro _____	109
5.2.1	Elaboración del compuesto con fibras de Boro _____	109
5.2.2	Propiedades del compuesto _____	110
5.2.3	Aplicaciones _____	112
5.3	MMC reforzados con fibras de Carburo de Silicio _____	112
5.3.1	Las variaciones de la fibra _____	113
5.3.2	Propiedades del compuesto _____	115
5.3.3	Aplicaciones _____	120

5.4	MMC reforzados con fibras de Grafito	121
5.4.1	Fibras continuas contra discontinuas	121
5.4.2	La superficie de la fibra de Carbono	122
5.4.3	Fundición	122
5.5	MMC reforzados con fibras de Oxido de Aluminio	123
5.5.1	Los materiales constituyentes	124
5.5.2	La fabricación	125
5.5.3	Propiedades del compuesto	126
5.5.4	Aplicaciones	127
5.6	MMC reforzados con fibras de Tungsteno	127
5.6.1	Compatibilidad de la fibra con la matriz	129
5.6.2	Resistencia a la falla	131
5.6.3	Resistencia de fluencia	133
5.6.4	Oxidación y corrosión en caliente	134
5.7	MMC reforzados con fibras discontinuas tipo Particulas	135
5.8	MMC reforzados con fibras discontinuas tipo Whiskers	140
5.8.1	La matriz de metal	141
5.8.2	Propiedades del compuesto	141
5.8.3	Aplicaciones	144
5.9	MMC reforzados con fibras discontinuas de Cerámica	146
5.9.1	Las fibras	146
5.9.2	La elección con la matriz	148
5.9.3	Propiedades del compuesto	148
5.9.4	Aplicaciones	151

CAPÍTULO VI CASOS PRÁCTICOS

6.1	Introducción	153
6.2	Caso No. 1	154
6.3	Caso No. 2	159
6.4	Caso No. 3	164
6.5	Caso No. 4	172
6.6	Caso No. 5	178
CONCLUSIONES		183
GLOSARIO		186
BIBLIOGRAFÍA		189

OBJETIVO.- *Análisis del desarrollo, diseño y aplicación de los Materiales Compuestos aplicados a la Industria Automotriz.*

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

CAPÍTULO I

1.1 INTRODUCCIÓN

Con el paso de los años, los materiales han sido una de las bases del desarrollo tecnológico del hombre, siendo motivo constante de cambios culturales y de satisfactorias fácilmente industrializados y con características físicas y mecánicas superiores que satisfagan las exigencias, cada vez más severas, a las que son sometidos.

Una de las industrias que se considera como uno de los satisfactores populares, da la pauta para el desarrollo tecnológico en varias áreas, y en particular en la de los materiales, es la de la industria automotriz, en la que constantemente se deben satisfacer las exigencias de diseño que se van presentando. Una de las familias de los materiales que cumplen con las propiedades requeridas es llamada "Nuevos Materiales" como los compuestos o composites. Estos materiales en otras áreas como la industria Aeronáutica y Aeroespacial, se han empleado con mucho éxito durante más de 40 años.

La tecnología de los materiales compuestos no es nueva, existe desde principios de los años de 1920 cuando se empezaron a utilizar distintos materiales reforzantes en los plásticos, tales como aserrín, asbesto, y fibras de vidrio. En los 70's cuando se plantea la necesidad de materiales compuestos más resistentes para aplicarlos en áreas como la industria Aeronáutica, y últimamente en la industria Automotriz, con el fin de conseguir las tendencias actuales de diseño, como son; menor peso, ahorro energético y mayores velocidades.

El mayor uso de estos materiales viene siendo la respuesta a la necesidad de cumplir con valores, cada vez más altos, de la relación eficiencia / costo.

Uno de los tipos de materiales compuestos que cumple con las propiedades atractivas es el constituido por los materiales de matriz metálica, los cuales al ser

reforzados con materiales cerámicos proporcionan excelentes propiedades mecánicas y térmicas, convenientes para las aplicaciones automotrices.

El presente trabajo analizara las principales propiedades mecánicas en las que se destacan a este grupo de materiales compuestos, así como los procesos de fabricación, con los que se manufacturan, aplicaciones actuales y potenciales.

Con todo lo anterior se pretende, que con los elementos básicos para el diseño y fabricación de más materiales compuestos para la industria automotriz se aprovechan las grandes ventajas de estos con respecto a los materiales tradicionales.

En los capítulos posteriores se describirá a detalle, el desarrollo, aplicación y ventajas de la implementación de los materiales Compuesto de Matriz Metálica (MMC) en la industria Automotriz.

A continuación se proporcionara una breve descripción de los capítulos de este trabajo, para abordar mas fácilmente cada uno de ellos.

En el primer capítulo se dara una breve introducción de como con el paso del tiempo se a empleado los materiales compuestos en distintas industrias como son Aeronáutica, Aeroespacial y donde empieza a tener un auge muy importante en la industria Automotriz.

En el segundo capítulo se basa principalmente en los antecedentes del automóvil, su historia, en la cual se observaran los avances de la industria desde la máquina de vapor hasta los modernos prototipos construidos íntegramente en Aluminio y diversos materiales. También se observaran las tendencias hacia el fin de siglo según las necesidades del fabricante.

En el tercer capítulo se definirá a los materiales compuestos, en forma general, con lo que se demostrara su gran diversidad de aplicaciones, y propiedades en general, de las diferentes familias que conforman a los materiales compuestos, los puntos que se trataran en el capítulo nos mencionaran las tres grandes familias

de los materiales compuestos, algunas propiedades específicas y sus principales procesos de fabricación.

En el cuarto capítulo nos explica el tema del trabajo a detalle de los materiales compuestos de matriz metálica en general, los reforzados con partículas, con fibras y los laminados, cada uno de los temas explica a detalle cada material y sus diferentes variaciones con sus propiedades, procesos de fabricación y posibles aplicaciones.

En el capítulo quinto se ve a los materiales compuestos de matriz metálica en la industria automotriz, en este capítulo se ven a dos grupos de reforzamiento como son los reforzados con fibras continuas y discontinuas, los diferentes materiales de refuerzo, propiedades, y aplicaciones, como un ejemplo las fibras de Boro y Carburo de Silicio.

Así como las ventajas de las fibras continuas y discontinuas en las aplicaciones y usos dentro de la industria automotriz. Por último dentro del capítulo se describen las aleaciones diversas que se pueden conseguir con estos materiales.

En el sexto capítulo se demostraran las aplicaciones prácticas de los materiales Compuestos de Matriz Metálica en la industria automotriz con cinco ejemplos de prototipos de diferentes compañías que tienen la vanguardia en este tipo de materiales, en elementos mecánicos como son, pistones, engranes, chasis, etc.

CAPÍTULO II

LA INDUSTRIA AUTOMOTRIZ Y SUS TENDENCIAS

CAPÍTULO II

LA INDUSTRIA AUTOMOTRIZ Y SUS TENDENCIAS

2.1 HISTORIA DEL AUTOMÓVIL

Uno de los fenómenos que ha revolucionado a la historia de la humanidad en este siglo por completo es el automóvil, la principal característica de este invento, fue el medio que liberó al hombre de la tracción animal y que por lo tanto, proporcionó al hombre una movilidad elevada y al alcance de todas las personas.

Henry Ford (1863 - 1947) nos dice: un automóvil consta, antes que nada, de un motor que proporciona la energía necesaria para moverlo. Esta energía llega a las ruedas a través de un sistema mecánico de transmisión. Las ruedas giran por medio de la dirección, que se detiene gracias a los frenos que amortiguan su sacudida mediante un sistema de suspensión. Todos estos elementos mecánicos van montados sobre un bastidor o chasis, sobre el que también se asienta la carrocería.

La mecánica y el aspecto externo de los automóviles cambia constantemente siendo muchos de ellos símbolo de determinada época. Como menciona Henry Ford el automóvil es un elemento mecánico, que cubre la necesidad de transporte y carga de nuestro tiempo por lo que se le considera uno de los grandes inventos de la humanidad, a continuación se hará una breve síntesis de la historia.

A finales del siglo XVII, se puede tomar como la fecha en que se construyó el primer motor propiamente dicho, a partir de 1680 se empiezan a experimentar en algunos vehículos que se mueven con calderas de vapor de las que normalmente sobresalía un estrecho tubo del que a su vez salía vapor que movía al coche por la reacción, en 1690 aparecen los primeros coches de vapor con pistón motriz, si bien su movimiento es apenas experimental.

Hasta casi cien años más tarde el Ingeniero francés, Cugnot aplica la máquina de vapor a su famoso carro, en el que no puede decirse que se progresó mucho.

No es sino hasta el año de 1801, que en un pueblo Británico de Cornwalles, que apareció lo que podría considerarse como el primer automóvil con un motor de vapor, el cual fue construido por Richard Trevick y Andrew Vivian, que consiguieron subir una cuesta del pueblo, después se incendió el automóvil, pero fue el primer precedente en forma.

De una máquina con autolocución propia, a partir del año de 1820 la caldera de vapor se utiliza comúnmente en Inglaterra en máquinas que circulan en la carretera. En el año de 1829, Goldworthy Gurney logra construir un carruaje de vapor capaz de llevar a 18 personas en el tramo de Londres a Bath.

Para el año de 1831 ya existe la primera línea de autobuses de vapor, fundada por Sir Charles Dance. En Londres con los carruajes de vapor se logró transportar en menos de dos meses a casi 4,000 personas a una velocidad promedio de casi 20 km./hr de Londres a Moorgate. Walter Hancock desarrolló el vehículo llamado Automotion, con el cubrió 1,600 metros a un promedio de 34 km./hr con 30 personas en su interior, el progreso del automóvil se vio detenido por los numerosos accidentes debido a su excesivo peso, ya que por el hecho de ser máquinas de vapor, los frenos eran solamente simbólicos, de tal manera que como se convirtieron en competencia para el ferrocarril, los intereses del mismo influyeron de tal forma que, pusieron barreras de impuestos y la velocidad que fue impuesta para los vehículos automotores fue de 6.5 km./hr en carretera abierta.

La ley fue suprimida a principios del siglo XX gracias a la aparición de los vehículos de motor a gasolina, que revolucionó de manera decisiva hacia el auge de los automóviles, y le da el impulso definitivo para su aceptación a gran escala.

El motor de gasolina o de combustión interna permite el desarrollo verdadero del automóvil. Lenoir logró en 1858 un motor monocilíndrico de dos tiempos que utilizaba gas como combustible. El 16 de junio de 1860, el inventor Belga diseñó un

vehículo que funcionaba con un motor de 1.5 C. V., enfriado por agua y moviendo las ruedas traseras por una cadena, tenía encendido eléctrico por una bobina. Consiguió interesar al zar Alejandro II de Rusia, quien le compro el vehículo pero los resultados poco prácticos de su máquina le hicieron vender la patente y despreocuparse del asunto.

Un Austriaco, Marcus lograria en 1864 mover un coche de cuatro ruedas con un motor de Bencina. Más tarde, en 1875, Marcus recorrió con un vehículo más avanzado, los 25 kilómetros que separan a Viena de Klosterneuberg, en un viaje de ida y vuelta, a una velocidad promedio de 6.5 km /hr

El perfeccionamiento del motor de explosión de cuatro tiempos fue patentado por Nikolaus Otto, esto viene de la mano de dos entusiastas aficionados Alemanes; Gottlieb Daimler y Wilhen Maybach. A partir del año de 1863 sus vidas irán unidas, aun cuando a veces se separen bruscamente y cada cual investigue por su cuenta. En 1882 ambos dan un paso gigante: logrando construir un motor que no utilizaba un pistón libre, sino de gas comprimido capaz de realizar el ciclo de cuatro tiempos con un sistema de ignición propia. La primera y rudimentana bujía no era sino un tubo metálico que sobresalía del motor y que se mantenía incandescente mediante un quemador de gasolina. Con aquel monocilindro se lograron alcanzar rotaciones de 700 y 800 revoluciones por minuto, algo increíble para la época. (hoy es el régimen normal en el ralentí de cualquier motor normal de cuatro tiempos), pero el avance original estaba dado; en 1885 construyen una motocicleta y un automóvil, en 1890 fundan la casa Daimler Motoren, Maybach abandona a Daimler poco después, este lanza su sene Phonix. Sin embargo, en 1897 Maybach vuelve a trabajar con Daimler y producen verdaderos automóviles. Gottlieb Daimler muere en 1900, y Wilhen Maybach continua al frente de la empresa, hasta que una vez consolidada, y tras ciertas discrepancias con sus herederos se retira un tiempo

Otro joven Alemán de Kartsruche se uniría mas adelante a estos hombres; se trata de Karl Benz, tras dedicar sus primeros años a las máquinas de vapor, se pasa a investigar el motor de combustión interna en 1877 y 1879, logra un motor de dos tiempos que funcionaba satisfactoriamente (no se centro en el motor de cuatro

tiempos, la patente la poseía Daimler), y en 1883 consigue el apoyo económico decisivo para su invento. Cuando empieza la demanda de motores Benz, Karl lo perfecciona y aprovecha la nulificación declarada de la patente de Otto, en 1886 lanza un motor de gas de este ciclo, que monta en un coche de tres ruedas, el triciclo Benz cobra fama, y entre 1886 y 1893 le vale a su inventor la paternidad de su automóvil, al tiempo y después de muchos contratiempos se fusionaron en el año de 1926 convirtiéndose en la empresa Daimler-Benz AG. Siendo hasta nuestros días una de las compañías que más avances en el campo tecnológico a tenido

Otro de los personajes que es el más famoso de todos, es el norteamericano Henry Ford, que trabajó en el taller de Edison Company, entre los años de 1892 y 1893 construyó su primer automóvil, de cuatro ruedas con un motor de cuatro caballos de potencia, enfriado por agua y sin marcha atrás. Para el año de 1903 se crea la compañía Ford Motor Company. El gran auge de Ford se debió principalmente al descubrimiento de la producción en serie con la cual se logró una reducción de los precios de los automóviles de 800 Dls. en el año de 1908 a 230 Dls. al año de 1909 con el modelo Ford T, de aquí se lograron construir en las fábricas de Ford Motor Company más de 15 millones de automóviles de ese modelo.

De aquel tiempo hasta nuestros días se han fabricado las más diversas variedades de modelos y marcas de automóviles alrededor del mundo, todos estos adelantos partieron de una necesidad que se convirtió en un elemento indispensable en nuestros días.

La creación del automóvil cubrió las necesidades de carga y transporte de sus inicios, pero después se observó una mejora de los servicios y se hizo un elemento casi indispensable para el transporte humano. Conforme surgieron nuevos modelos surgieron nuevas necesidades cada una de las cuales, debían de ser cubiertas.

Por su gran aceptación e incorporación al mercado, la demanda de los automóviles se vio incrementada notoriamente, así como los problemas con los materiales que se usaban para su construcción, por ejemplo el combustible que superaba la demanda en el parque vehicular, por lo que los ingenieros se vieron en

la necesidad de inventar materiales para el ahorro de combustible. Como las necesidades primarias cambiaron a partir de los años 60's, se determino que se debía ahorrar combustible por medio de la reducción de peso y la optimización de los elementos aplicados a cada componente del automóvil. Los primeros materiales compuestos aplicados a la industria automotriz fueron aplicados en el taller de los franceses Panhard y Levesor (Fundadores de Peugeot) aplicado en el sistema de frenos en las balatas, utilizaban maderas tropicales y pino comprimido a manera de sandwich, se puede decir que es la primera aplicación de un material compuesto en la industria automotriz.

La industria automotriz tomo un nuevo giro a partir de los años 40's, ya que por el avance conseguido por la guerra se aplicaron nuevos materiales con diversas prestaciones para el automóvil como son, el nylon, hule y aleaciones de metales. Estos avances hicieron que los diseñadores se fijaran metas diferentes lo que impulso de manera definitiva a la industria.

2.2 SITUACIÓN ACTUAL

La situación actual de la Ciudad de México, como medio fundamental de transporte toma un punto muy importante para el desarrollo de la misma, todo esto basado en 4 puntos importantes dentro de la clasificación llamada "Distribución del Parque Vehicular", los cuales son:

- 1.- Tipo de Servicio*
- 2.- Año - Modelo*
- 3.- Marca*
- 4.- Tipo de Combustible*

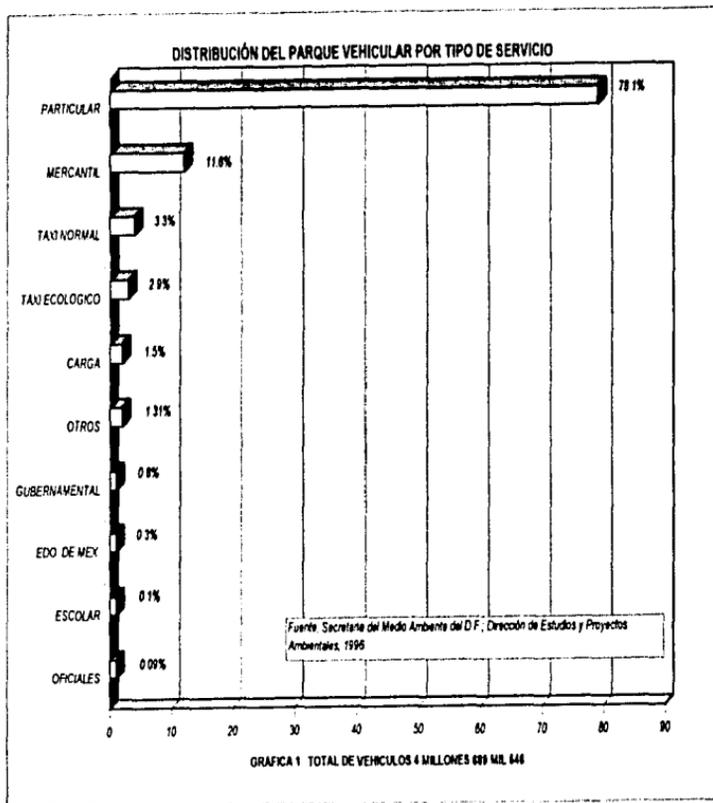
Cabe mencionar como dato actual, que en la Ciudad de México tenemos 4 millones 689 mil 546 vehículos, este conteo se hizo en el año de 1995, dando como

un punto importante que para fin de siglo esta cifra rebasara los 7 millones de Vehículos dando un rango aproximado de 1:3 con respecto al número de habitantes.

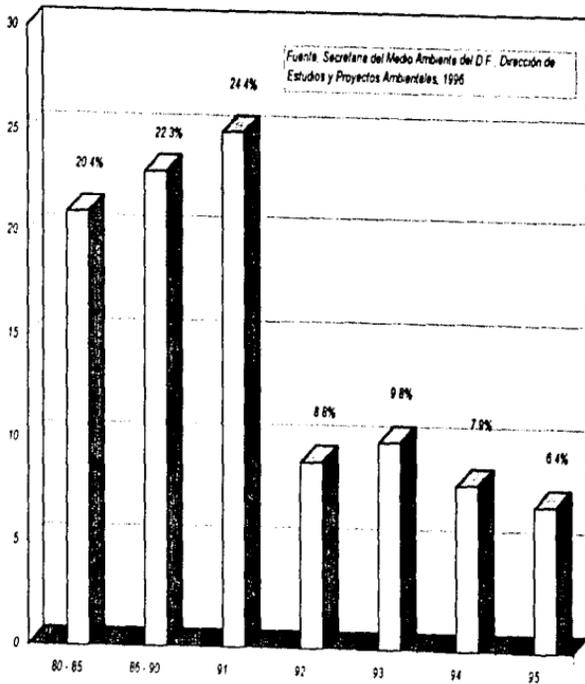
Como en toda ciudad que busca su desarrollo, la Ciudad de México tiene la necesidad de abarcar todas las actividades, tanto en el medio privado como en el público, claro que este ejemplo se observa en la Gráfica 1, la cual demuestra la distribución del parque vehicular, en su clasificación por "Tipo de Servicio", se puede observar claramente como lo que antes era un lujo ahora es una necesidad de toda persona, ejemplo de esto es en los vehículos Particulares que tienen una mayor demanda y alcanzan un porcentaje de 78.1%, seguido del sector Mercantil con 11.6%, estas clasificaciones son sumamente importante en el desarrollo de cualquier ciudad, con 6.2% a los Taxis, los cuales forman parte del sector público que prestan su servicio, en la gráfica se observa también a los vehículos de Carga con 1.5%, Otros con 1.31%, Gubernamentales con 0.8%, Edo. de Méx. con 0.3%, Escolares con 0.1%, y Oficiales con 0.09%

La Ciudad de México actualmente atraviesa una situación difícil, la cual se observa en la Gráfica 2 denominada "Año - Modelo". En el periodo comprendido entre 1980 y 1985, la situación económica era aceptable, ya que se observa que hay un 20.4% de adquisición de vehículos, tomando todos los tipos de servicios, del año de 1986 a 1990, hubo un incremento del 1.9% (22.3%) en relación con los años anteriores por lo que las agencias distribuidoras daban más facilidades de pago para la adquisición de un vehículo, la máxima adquisición fue en el año de 1991 con 4.0% (24.4%) más en la relación a la mitad de los años 80's, en la cual la situación económica era buena y podía la gente adquirir hasta dos vehículos, a partir de 1992 la situación económica del país empezó a decaer, viéndose reflejado hasta con un 8.8%, en la adquisición de vehículos, tomando en cuenta todos los tipos de servicios, se observa una pequeña alza en relación con el año de 1993, en donde se obtuvo 1% de aumento (9.8%), de 1994 a la fecha la adquisición de vehículos a ido a la baja, claro reflejo de nuestra situación económica.

En relación de los vehículos por "Marca", se observa en la Gráfica 3, la marca Volkswagen, que tiene la mayor demanda con 37.1% sobre las demás marcas, esto

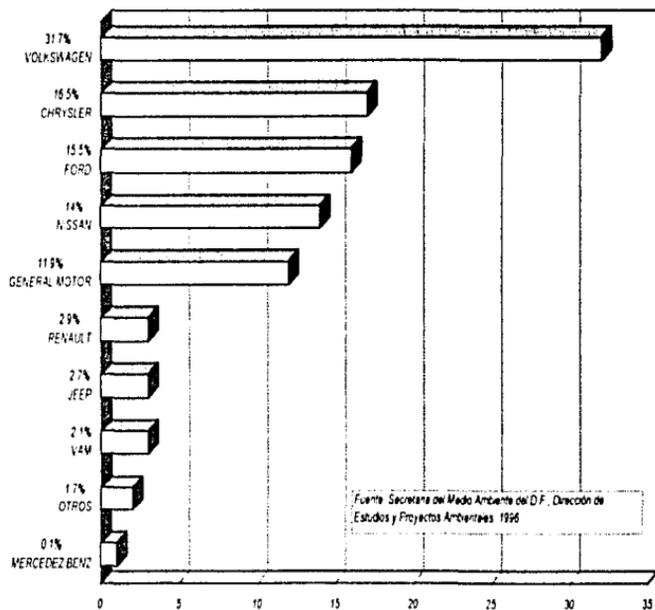


DISTRIBUCIÓN DEL PARQUE VEHICULAR POR AÑO - MODELO



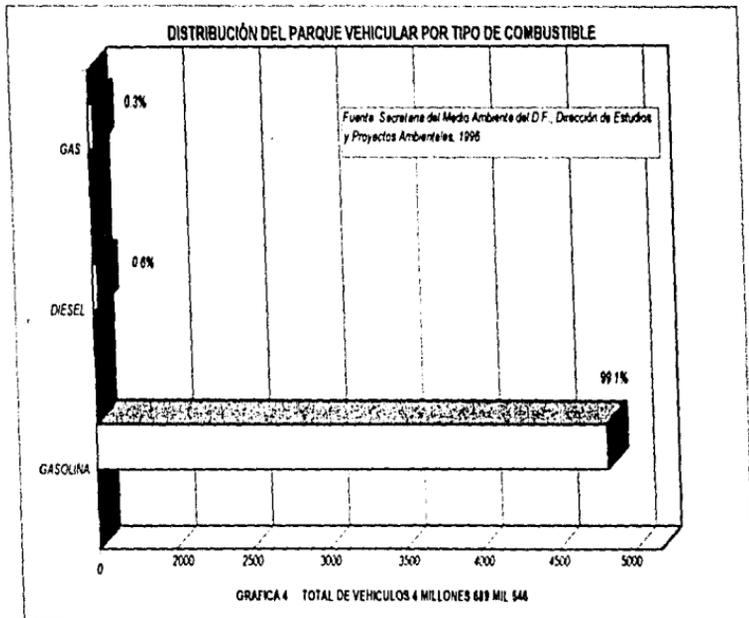
GRAFICA 2 TOTAL DE VEHICULOS 4 MILLONES 689 MIL 546

DISTRIBUCIÓN DEL PARQUE VEHICULAR POR MARCA



Fuente: Secretaría de Medio Ambiente de D.F., Dirección de Estudios y Proyectos Ambientales 1996

GRAFICA 3 TOTAL DE VEHICULOS 4 MILLONES 688 MIL 646



porque la marca Volkswagen tiene vehículos que son económicos, siendo fabricados en serie, también porque su mantenimiento es económico y su fácil adquisición de partes, a su vez las siguientes marcas Chrysler con 16.5%, Ford con 15.5%, Nissan con 14%, General Motors con 11.9%, no tiene mucha demanda, debido a su elevado costo en lo que respecta al vehículo como a sus refacciones, Renault con 2.9% desaparece del mercado Mexicano y solo se comercializa con unas cuantas refacciones, por consiguiente la Jeep con 2.7%, Vaux con 2.1%, y Otros con 1.7%, de procedencia extranjera por lo que no toda la gente puede adquirir estos vehículos, por último la Mercedes Benz con 0.1%, estos tipos de vehículos son de elevados costos y difícil adquisición.

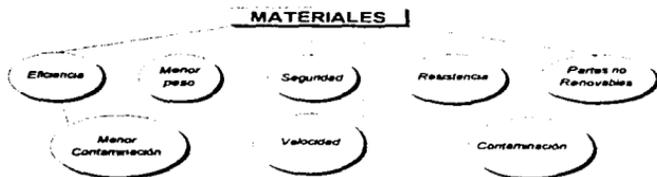
El petróleo tiene una función muy importante en sus derivaciones del combustible, en la Gráfica 4 se observan los "Tipos de Combustibles", que sirven para el funcionamiento de los vehículos, la Gasolina tiene la mayor demanda con 99.1%, seguido del Diesel con 0.6% empleado para camiones y camionetas de carga, actualmente en la prevención del medio ambiente, se está utilizando Gas para camiones de carga y camionetas, que empieza a tomar fuerza con 0.3%, se pretende que los vehículos particulares utilicen este combustible para que no contaminen, por lo que se espera que aumente con el paso del tiempo.

2.3 TENDENCIAS DE LA INDUSTRIA AUTOMOTRIZ

Las condiciones de los tiempos modernos exigen que la industria automotriz encamine sus esfuerzos principalmente para lograr vehículos que tengan las siguientes características: No contaminantes, Eficientes, Ligeros, Veloces, Seguros, Resistencia a la corrosión y que sus Partes sean desechables.

Algunas de estas características están muy relacionadas, por ejemplo para tener un vehículo que contamine menos, es necesario que sea eficiente y que sea lo menos pesado posible, así mismo la velocidad y la seguridad están plenamente ligadas o bien la resistencia a la oxidación y el uso de partes desechables están ligadas por aspectos puramente comerciales.

En el siguiente diagrama se muestran los materiales con sus diferentes tendencias:



Fuente: How to Apply Advanced Composite Technology, Engineered Society Detroit, Jack Yamaguchi

A continuación se amplía cada una de las tendencias y se muestra como para lograr avances en ellas es necesario utilizar los nuevos materiales y los materiales compuestos son una buena alternativa para los diseñadores.

1.- Menor contaminación. Para reducir los efectos nocivos producidos por el uso de combustibles para el funcionamiento de los vehículos se están haciendo grandes esfuerzos desarrollando constantemente dispositivos para este fin, así tenemos por mencionar algunos catalizadores, los dispositivos que forman el sistema de control de emisiones, etc.. Sin embargo para tener mayor avance en el combate al problema de la contaminación ambiental es necesario mejorar la eficiencia de los motores.

2.- Eficiencia Respecto a la eficiencia de los motores se han hecho varias modificaciones entre las cuales se puede mencionar, el encendido electrónico, el control por computadora, el uso de los inyectores en motores de gasolina, uso de dos o más válvulas por cilindro, doble árbol de levas, ventiladores eléctricos, el aumento de relación de compresión, etc.. Siendo esta última una modificación que incide directamente en los materiales debido a que al modificar la relación de compresión la temperatura de operación del motor aumenta por lo que se necesitan materiales resistentes al esfuerzo y temperatura.

3.- Peso. La disminución de peso en la eficiencia total del vehículo es importante debido a que el peso ocupado por pequeñas partes, puede ser ocupado con carga, y los materiales compuestos son una opción para lograr partes con la resistencia y la apariencia necesaria pero con bajo peso.

4.- Velocidad. Para conseguir aumentar la velocidad de los vehículos ha sido necesario en cuanto a motores, diseñar pistones ligeros para disminuir los esfuerzos causados por la inercia, también se han desarrollado partes de carrocería de formas diversas para mejorar la aerodinámica.

5.- Seguridad. Para lograr mayor velocidad con peso y máxima eficiencia ha sido imperativo rediseñar vanos de los sistemas o partes tales como la suspensión, cojinetes, y partes estructurales, etc.. Adicionalmente a esto cada día son más las normas exigidas por el gobierno, requiriéndose por lo tanto materiales más resistentes, por esta razón se han utilizado cada día nuevos materiales incluyendo a los materiales compuestos.

6.- Resistencia a la corrosión. A esto se la ha dado mucha importancia, todos los fabricantes de vehículos buscan con ello un liderazgo en el mercado para lograrlo han desarrollado diversos sistemas para mejorar los procesos de lavado, enjuague, preparación de superficies y aplicación de capas protectoras, utilizando para esto métodos como inmersión y electrodeposición.

7.- Partes no reparables (Deshechables). Otra de las tendencias importantes de la industria automotriz es la de ensamblar en sus vehículos, partes que no son reparables sino que hay que cambiarlas como es el caso de las defensas, baterías selladas, motores de arranque, radiadores con tanques de plástico, cilindros de los frenos, bombas de gasolina, etc.. Inclusive los vehículos completos después de un periodo razonable desde el punto de vista económico repararlos.

CAPÍTULO III

**ANÁLISIS
DE LOS
MATERIALES COMPUESTOS**

CAPÍTULO III

ANÁLISIS DE LOS MATERIALES COMPUESTOS

3.1 DEFINICIÓN DE MATERIAL COMPUESTO

En la actualidad no existe una definición universal para el término de "Material Compuesto" o simplemente "Compuesto" pero hoy en día debido a su creciente aplicación y el aumento en el interés de estos materiales existen varias definiciones, como ejemplo citaremos sólo algunas:

"Un material compuesto puede ser definido como una combinación macroscópica de dos o más materiales distintos que tienen una interfase reconocible entre ellos, es decir que se observa que son mutuamente insolubles".

"Cualquier material que contenga dos o más constituyentes identificables".

De cualquier modo, los compuestos se han utilizado hace miles de años. La historia reporta que los arqueros Mongoles hacían los arcos para flechas a partir de tendón de ganado vacuno, madera, y una unión de seda ligada, todos estos materiales se juntaban utilizando adhesivos. Otros ejemplos incluyen que en el ceremonial japonés de espadas, éstas las hacían de hierro y laminado de acero. En Damasco (Ciudad de Sina) los cañones de los rifles también eran fabricados de hierro y laminado de acero. Un ejemplo más sencillo es el adobe hecho de lodo y reforzado con paja, hasta donde se sabe éstos han sido fabricados cientos de años Antes de Cristo.

Los compuestos más recientes datan principalmente después de la segunda guerra mundial, los compuestos contemporáneos son clasificados a partir de fibras reforzantes contenidas en una matriz, como las partículas de SiC que sirven como reforzantes en el Aluminio y hoy en día se hacen piezas de peso ligero para uso

especial y también para aplicaciones militares. Por otra parte retomando estos hechos, la definición de compuestos puede resumirse de la siguiente manera:

“Cualquier material (matriz) que sea capaz de contener, uno o más constituyentes reforzantes ya sea en forma de partículas o fibras se define como compuesto”.

3.2 CLASIFICACIÓN DE MATERIALES COMPUESTOS

Los compuestos pueden clasificarse en tres categorías en base al material reforzante, con partículas, fibras, y laminares, dependiendo de las formas de los materiales, como se muestra en la figura 3.1. El concreto, mezcla de cemento, y grava, es un compuesto particulado. La fibra de vidrio (fiberglass) que consta de fibras de vidrio en un polímero, es un compuesto reforzado con fibras, y la madera terciada o triplay, que tiene capas alternadas de madera chapada con beta, es un compuesto laminar. Si las partículas reforzantes se encuentran uniformemente distribuidas, los compuestos particulados tienen propiedades isotrópicas, los compuestos fibrados pueden ser tanto isotrópicos como anisotrópicos; los compuestos laminares siempre tienen un comportamiento anisotrópico.

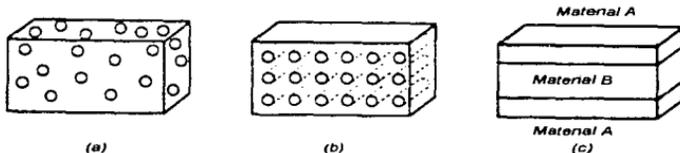


Fig. 3.1 Comparación de los tres tipos de materiales compuestos. (a) con partículas, (b) reforzado con fibras, y (c) laminar.

3.3 MATERIALES COMPUESTOS REFORZADOS CON PARTÍCULAS

En los compuestos reforzados con partículas, las partículas de un material duro y frágil dispersa de una manera discreta y uniforme se rodean por una matriz más blanda y dúctil. De hecho, la estructura hace recordar 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 un proceso mecánico.

Se pueden subdividir los materiales compuestos por partículas 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) los compuestos endurecidos por dispersión y (b) los compuestos con partículas propiamente dichos.

3.3.1 COMPUESTOS ENDURECIDOS POR DISPERSIÓN

El tamaño de la partícula en los compuestos endurecidos por dispersión es muy pequeño, con un diámetro de 100 Å a 2500 Å. Debido a que las partículas pequeñas obstaculizan el movimiento de las dislocaciones, produce un efecto pronunciado de endurecimiento. Sólo se requieren pequeñas cantidades del material disperso.

A temperaturas normales, los compuestos endurecidos por dispersión no resultan más resistentes que las aleaciones metálicas de dos fases. Sin embargo, debido a que los compuestos endurecidos por dispersión no se ablandan considerablemente debido al sobre revenido, crecimiento de grano o el engrosamiento de la fase dispersa, la resistencia del compuesto decrece gradualmente conforme se incrementa la temperatura. Sin embargo la resistencia a la termofluencia es superior a la de los metales y las aleaciones.

3.3.2 CONSIDERACIONES EN LA SELECCIÓN DE MATERIALES

Las propiedades de los compuestos endurecidos por dispersión se pueden optimizar si se consideran los siguientes aspectos:

- 1.- La fase dispersa, por lo común un óxido duro y estable, debe ser un obstáculo efectivo para el deslizamiento.*
- 2.- El material disperso debe tener un tamaño, forma, distribución y cantidad óptima.*
- 3.- El material disperso debe tener una baja solubilidad en el material de la matriz.*

Además, no debe ocurrir ninguna reacción química entre el dispersante y la matriz. La Alúmina no se disuelve fácilmente en el Aluminio; de aquí que resulte un dispersante efectivo para las aleaciones de Aluminio. Sin embargo, el Óxido de Cobre se disuelve en el Cobre a temperaturas elevadas; su sistema Cu - Cu₂O no sería efectivo.

- 4.- Se debe lograr una buena unión entre el material disperso y la matriz. Una pequeña solubilidad del dispersante en la matriz puede servir para producir una unión firme.*

Ejemplos de compuestos endurecidos por dispersión Quizá el ejemplo clásico sea el Polvo de Aluminio Sinterizado o compuesto (PAS). El material PAS tiene una matriz de Aluminio endurecida hasta con 14% de Al₂O₃. El compuesto puede ser formado a través de metalurgia de polvos; se mezclan los polvos de Aluminio y Alúmina, se compactan a elevadas presiones y se sinterizan. En una segunda técnica, el polvo de Aluminio se trata para obtener una capa continua de óxido en cada partícula. Cuando se compacta el polvo, la capa de óxido se fractura en partículas diminutas que son rodeadas por el metal de Aluminio durante la sinterización.

3.3.3 COMPUESTOS PARTICULADOS VERDADEROS

Estos compuestos contienen grandes cantidades de partículas gruesas que no obstaculizan de manera efectiva el deslizamiento. Los compuestos con partículas incluyen muchas combinaciones de metales, cerámica, y polímeros, su objeto es producir combinaciones poco frecuentes de propiedades y no para mejorar la resistencia.

Regla de las Mezclas. Ciertas propiedades de un compuesto en partículas dependen únicamente de las cantidades relativas y de las propiedades de los constituyentes individuales. La regla de las mezclas puede predecir con precisión estas propiedades. La densidad de un compuesto en partículas es, por ejemplo

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

donde ρ_c es la densidad del compuesto, ρ_1, ρ_2, \dots , son las densidades de cada constituyente en el compuesto, y f_1, f_2, \dots , son las fracciones volumétricas de cada constituyente. Desafortunadamente, las propiedades tales como la dureza y la resistencia no pueden predecirse a través de la regla de las mezclas.

Carburos Cementados. Estos carburos contienen partículas cerámicas duras distintas en una matriz metálica. Los insertos de Carburo de Tungsteno utilizados para herramientas de corte en operaciones de maquinado, son ejemplos de este grupo. El Carburo de Tungsteno, WC, es extremadamente duro y puede cortar aceros templados y revenidos. El Carburo es también muy rígido, por lo que pueden obtenerse tolerancias pequeñas durante el maquinado, y tiene una temperatura de fusión muy alta, de modo que las altas temperaturas generadas durante un maquinado rápido pueden tolerarse. Desafortunadamente, las herramientas fabricadas con Carburo de Tungsteno son extremadamente frágiles.

Para mejorar su tenacidad, las partículas de Carburo de Tungsteno se combinan con polvos de Cobalto y son comprimidas. Los compactos son calentados por encima de la temperatura de fusión del Cobalto. El Cobalto líquido rodea cada

una de las partículas sólidas de Carburo de Tungsteno, como se muestra en la figura 3.2. Después de la solidificación, el Cobalto sirve como pegamento para las partículas de Carburo de Tungsteno y proporcionan adecuada resistencia al impacto. Cuando las partículas superficiales de Carburo de Tungsteno pierden el filo, se fractura o abandonan la matriz de Cobalto y se exponen partículas nuevas y afiladas, que siguen proporcionando un buen corte. Para los maquinados de acabado, la cantidad de Cobalto aglutinante se reduce intencionalmente de modo que las partículas salgan fácilmente y la herramienta permanece afilada. Para desbaste grueso, se añade más Cobalto para mejorar la tenacidad



Fig. 3.2 Micrografía electrónica del Níquel con TD.
Las partículas de ThO_2 tienen un diámetro de 3000 Å.

3.4 MATERIALES COMPUESTOS REFORZADOS CON FIBRAS

Estos compuestos mejoran la resistencia a la aplicación del esfuerzo, resistencia a la fatiga, rigidez, y la relación resistencia - peso, a través de la introducción de fibras fuertes, rígidas y frágiles dentro de una matriz más blanda y dúctil. El material de la matriz transmite la fuerza a las fibras y proporciona ductilidad y tenacidad, mientras que las fibras soportan la mayor parte de la fuerza aplicada. A diferencia de los compuestos endurecidos por dispersión, la resistencia del compuesto se incrementa tanto a temperatura ambiente como a temperaturas elevadas.

Se emplea una enorme variedad de materiales reforzados. Durante siglos, la paja ha sido utilizada para darle resistencia a los adobes. En las estructuras de concreto se introducen como refuerzo varillas de acero. Las fibras vítreas en una matriz polimérica producen la fibra de vidrio para aplicaciones de transporte y aeroespaciales. Las fibras hechas de Boro, Grafito, y Polímeros proporcionan un esfuerzo excepcional. Aún los diminutos monocristales de materiales cerámicos llamados Whiskers (Fibras Finas) han sido desarrollados para este objeto.

Los materiales reforzantes se ordenan también en una variedad de orientaciones, como se muestra en la figura 3.3. Las fibras vítreas cortas orientadas aleatoriamente se encuentran presentes en la fibra de vidrio. Se pueden usar arreglos unidireccionales de fibras continuas para producir deliberadamente propiedades anisotrópicas. Las fibras pueden colocarse en forma de telas o ser producidas en forma de cintas. Se pueden cambiar de orientación en las capas alternadas de cintas.

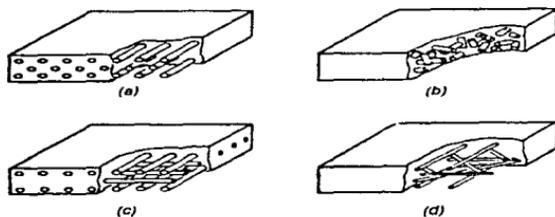


Fig. 3.3 Varias morfologías de compuestos reforzados con fibras. (a) fibras continuas unidireccionales, (b) fibras discontinuas orientadas al azar, (c) fibras ortogonales, y (d) fibras en capas múltiples.

3.4.1 PREDICCIÓN DE LAS PROPIEDADES DE LOS COMPUESTOS REFORZADOS CON FIBRAS

La regla de las mezclas predice siempre la densidad de los compuestos reforzados con fibras.

$$\rho_c = f_m \rho_m + f_f \rho_f$$

donde los subíndices m y f se refieren a la matriz y la fibra, respectivamente. Además la regla de las mezclas predice con precisión las conductividades eléctricas y térmicas de los materiales reforzados con fibras a lo largo de la dirección de las fibras si éstas son continuas y unidireccionales

$$k_c = f_m k_m + f_f k_f$$

donde k es la conductividad térmica

3.4.2 RESISTENCIA MECÁNICA

La resistencia a los esfuerzos de un compuesto depende de la unión entre las fibras y la matriz se encuentra limitada por la deformación de esta última. En consecuencia, la resistencia es casi siempre menor que la calculada por la regla de las mezclas.

Otras propiedades, como la ductilidad, tenacidad, resistencia a la fatiga, y termofluencia son más difíciles de predecir que la resistencia a la tracción.

3.4.3 FIBRAS DISCONTINUAS

Las propiedades del compuesto son más difíciles de predecir cuando las fibras son discontinuas. Debido a que los extremos de cada fibra soportan menos carga que el resto de la fibra, la resistencia del compuesto es inferior a la predicha por la regla de las mezclas. El error se reduce cuando la longitud real de las fibras l es

mayor que una longitud de fibra crítica l_c , o más precisamente, cuando la relación longitud - diámetro de las fibras l/d excede de un valor crítico.

Esta relación, llamada relación de aspecto, afecta significativamente las propiedades del compuesto. Por ejemplo, el nylon reforzado con fibras de Carbono con una relación de aspecto de 30 tiene una resistencia a la tracción de 16,000 psi, las fibras más largas con una relación de aspecto de 800 producen una resistencia de 35,000 psi.

3.4.4 CARACTERÍSTICAS DE LOS COMPUESTOS REFORZADOS CON FIBRAS

Gran diversidad de factores deben ser considerados cuando se diseña un compuesto reforzado con fibras.

RELACIÓN DE ASPECTO. Las fibras continuas que proporcionan las mayores resistencias, son a menudo difíciles de producir y de introducir en el material de la matriz. En cambio, las fibras discontinuas con una alta relación de aspecto, son:

$$\sigma_c = f_m \sigma_m + f_f \sigma_f$$

donde σ es la conductividad eléctrica.

MÓDULO DE ELASTICIDAD. Cuando se aplica una carga paralelamente a las fibras continuas unidireccionales, la regla de las mezclas predice con precisión el módulo de elasticidad.

$$E_c = f_m E_m + f_f E_f$$

Sin embargo cuando el esfuerzo aplicado es muy grande, la matriz se empieza a deformar y la curva esfuerzo - deformación ya no es lineal, ver figura 3.4. La matriz ahora contribuye poco a la rigidez del compuesto, el módulo puede ser calculado aproximadamente, de acuerdo a la figura 3.4.

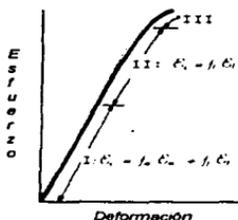


Fig. 3.4 Curva esfuerzo - deformación para un compuesto reforzado con fibras. A bajos esfuerzos, el módulo de elasticidad está dado por la regla de las mezclas. A esfuerzos mayores, la matriz se deforma y la regla de las mezclas ya no se cumple.

Cuando la carga se aplica perpendicularmente a las fibras, cada componente actúa independientemente del otro. El módulo del compuesto es ahora:

$$\frac{1}{E_c} = \frac{P_m}{f_m E_m} + \frac{f_f}{f_f E_f}$$

más fácil de introducir en una matriz produciendo una alta rigidez y resistencia, esta es la razón por la que estos materiales son los más empleados.

3.4.5 FRACCIÓN VOLUMÉTRICA DE LAS FIBRAS

Una mayor fracción volumétrica de las fibras incrementa la resistencia y la rigidez del compuesto, como se muestra en la figura 3.5. El límite superior, de aproximadamente 80%, está determinado por la posibilidad para rodear las fibras con el material de la matriz.

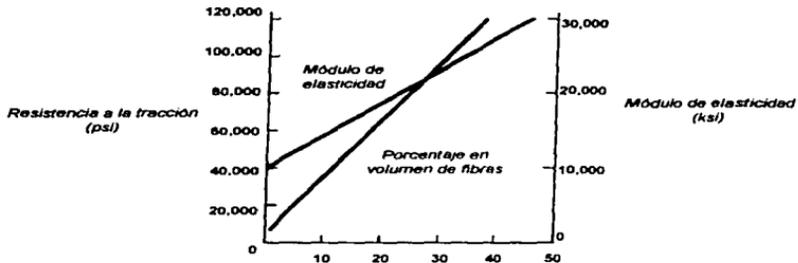


Fig. 3.5 Influencias del porcentaje en volumen de fibras borsic (Borsic) en las propiedades del Aluminio reforzado con Borsic paralelamente a las fibras.

3.4.6 ORIENTACIÓN DE LAS FIBRAS

Las fibras unidireccionales tienen rigidez y resistencia óptimas, cuando la carga aplicada es paralela a las fibras, como se muestra en la figura 3.6, sin embargo, las propiedades son muy anisotrópicas. Podemos en su lugar, usar fibras colocadas de una manera ortogonal o en capas cruzadas; sacrificando la máxima resistencia se obtienen propiedades más uniformes en el compuesto.

PROPIEDADES DE LA FIBRA. El material de la fibra debe ser fuerte, rígido y tener una temperatura elevada de fusión. La resistencia específica y el módulo específico están definidos por:

$$\text{Resistencia específica} = \frac{\sigma}{\rho}$$

$$\text{Módulo específico} = \frac{E}{\rho}$$

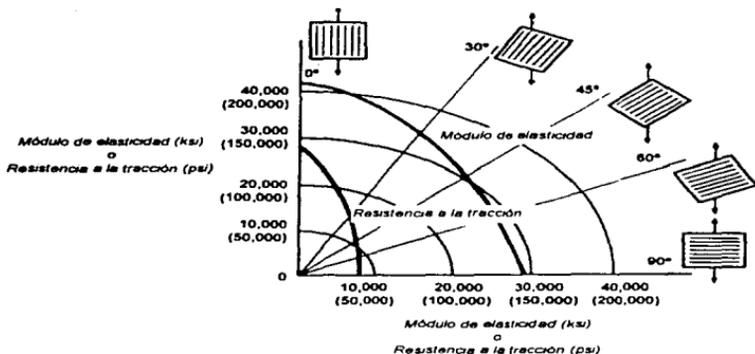


Fig. 3.6 Efecto de la orientación de las fibras con respecto al esfuerzo aplicado en un compuesto de fibras de Boro en una matriz de Titanio.

donde E es el módulo de elasticidad, σ es la resistencia a la fluencia, y p es la densidad. Los materiales con un módulo o una resistencia específica alta son preferidos para utilizarse como fibras. Algunos datos para las fibras se muestran en la tabla 3.1 y en la figura 3.7. El mayor módulo específico se encuentra en los materiales que tienen número atómico y enlace covalente bajos, como el Grafito y el Boro. Estos dos elementos tienen también una alta resistencia mecánica y temperatura elevada de fusión. Deben usarse en un material compuesto, debido a que son demasiado frágiles y reactivos como para ser usados solos.

El kevlar, nombre comercial de un polímero aromático endurecido con una estructura principal constituida por anillos de benceno, tiene excelentes propiedades mecánicas aunque su temperatura de fusión es baja.

Tabla 3.1 Propiedades de algunos materiales reforzados con fibras.

Material	Densidad (g/cm ³)	Resistencia a la tracción ksi	Módulo de elasticidad 10 ⁴ psi	Temperatura de fusión (°C)	Módulo específico 10 ⁴ in	Resistencia específica 10 ⁴ in
Vidrio E	2.55	500	10.5	<1725	11.4	5.6
Vidrio S	2.50	650	12.6	<1725	14.0	7.2
SiO ₂	2.19	850	10.5	1728	13.3	10.8
Al ₂ O ₃	3.15	300	25.0	2015	21.9	2.6
ZrO ₂	4.84	300	5.0	2677	28.6	1.7
Grafito HS	1.50	400	40	3700	74.2	7.4
Grafito HM (alta resistencia)	1.50	270	77	3700	143	5.0
BN (alto módulo)	1.90	200	13	2730	18.8	2.9
Boro	2.36	500	55	2030	64.7	4.7
B ₄ C	2.36	330	70	2450	82.4	3.9
SiC	4.09	300	70	2700	47.3	2.0
TiB ₂	4.48	15	74	2980	45.6	0.1
Be	1.83	185	44	1277	77.5	2.8
W	19.4	580	59	3410	8.5	0.8
Mo	10.2	320	52	2610	14.1	0.9
Kevlar	1.44	525	18		34.7	10.1
Whiskers						
de Al ₂ O ₃	3.95	3000	62	1982	43.4	21.0
de BeO	2.85	1900	50	2550	48.5	18.5
de B ₄ C	2.52	2000	70	2450	76.9	22.1
de SiC	3.18	3000	70	2700	60.8	26.2
de grafito	3.18	2000	55		47.8	17.5
de Cu	1.66	3000	102	3700	170	50.2
	9.92	427	18	1083	5.6	1.3

Fuente: La Ciencia e Ingeniería de los Materiales, Capítulo 13 Donald H. Askeland 1997

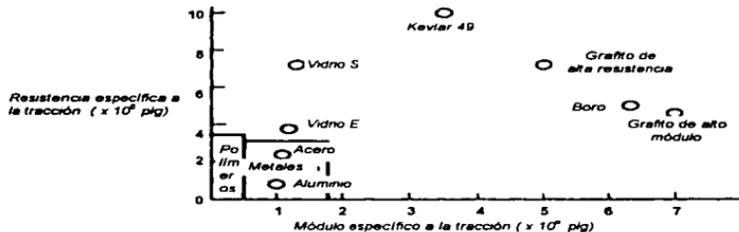


Fig. 3.7 Comparación de la resistencia específica y el módulo específico entre fibras y metales.

La Alúmina y el Vidrio también son ligeros y tienen una alta resistencia y un alto módulo específico. El Berilio y el Tungsteno aunque con enlaces metálicos, tiene un alto módulo que los hace útiles para ciertas aplicaciones. Los Whiskers tienen mayor resistencia y mayor rigidez; sin embargo, son discontinuos y su producción es complicada y costosa.

PROPIEDADES DE LAS MATRICES. *Estos materiales son por lo común tenaces y dúctiles para transmitir la carga a las fibras y evitar que las grietas causadas por fibras rotas se propaguen a todo el compuesto. La matriz debe ser resistente a fin de contribuir en la resistencia total del compuesto. Finalmente, la temperatura de fusión influye en las propiedades de la matriz. Los polímeros pueden utilizarse desde un máximo de 80 °C en poliester a 315 °C en resinas poliamídicas. Las matrices metálicas permiten mayores temperaturas de operación.*

3.4.7 FABRICACIÓN DE FIBRAS Y DE COMPUESTOS

FIBRAS. *Las fibras gruesas, como las varillas de acero, son producidas por laminación. Las fibras más finas, como el alambre, se fabrican mediante trefilado cuando los materiales poseen las características de suficiente ductilidad y endurecimiento por deformación. Materiales como el Tungsteno, Berilio, Acero inoxidable y Nylon pueden ser trefilados en diámetros pequeños.*

El Boro y el Grafito son demasiado frágiles y reactivos para elaborarse mediante procesos convencionales de trefilado. El Boro es producido por descomposición en fase vapor, como se muestra en la figura 3.8 (a). Un filamento de Tungsteno muy fino de 0.0005 plg es usado como sustrato, pasado a través de una cámara caliente. Los compuestos de Boro vaporizado, como el BCl_3 , son introducidos en la cámara, se descomponen, y permiten que el Boro se precipite sobre el filamento de Tungsteno. La fibra puede tener un diámetro de 0.001 plg a 0.008 plg.

Las fibras de Grafito de aproximadamente 0.0003 μg de diámetro se hacen por carbonización o pirólisis de un filamento orgánico, el cual es más fácilmente treflado en forma delgada y continua, como se muestra en la figura 3.8 (b).

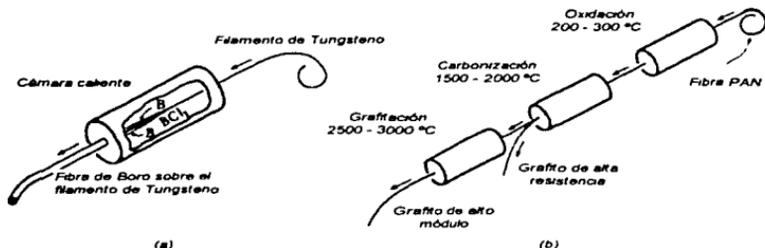


Fig. 3.8 Métodos para la producción de las fibras de (a) Boro y de (b) Grafito.

El filamento orgánico, conocido como precursor es a menudo nylon, poliacrilonitrilo (PAN) o resina. Las temperaturas elevadas descomponen al polímero orgánico, eliminando todos los elementos excepto al Carbono. Cuando la temperatura de carbonización se incrementa de 100 °C a 300 °C, la resistencia a la tracción disminuye mientras el módulo de elasticidad se incrementa. El treflado de los filamentos de Carbono a tiempos críticos durante la carbonización puede producir orientaciones preferenciales deseables en el filamento final del Grafito. Los filamentos pueden hilarse flojamente en forma de una madeja o cuerda, que puede contener cientos o miles de filamentos, como se muestra en la figura 3.9.

Los Whiskers ó fibras finas son monocristales de extremada finura, son discontinuos con relación de aspecto de 20 a 100. Debido a que los Whiskers carecen de dislocaciones móviles, el deslizamiento no puede ocurrir y representan resistencias excepcionalmente altas.

COMPUESTOS. Las fibras deben ser colocadas en la matriz con el espaciamiento y el alineamiento adecuado para conferir propiedades óptimas. Las fibras discontinuas pueden mezclarse con el material de la matriz para producir una orientación aleatoria o una preferencial. Las fibras continuas están normalmente alineadas en forma unidireccional como cintas, entre tejidas en un arreglo ortogonal o colocadas alrededor de un mandril. Hay varias técnicas para rodear las fibras con la matriz.



Fig. 3.9 Micrografía electrónica de barrido de una cuerda de Grafito que contiene numerosos filamentos de Grafito.

1.- COLADO. El proceso de colado o moldeo, fuerza al líquido a ubicarse alrededor de las fibras. El colado de concreto alrededor de las varillas de acero es un ejemplo aproximado. En los compuestos reforzados con fibras, el líquido es introducido a las fibras a través de una acción capilar, de una infiltración por vacío o por colada a presión, como se muestra en la figura 3.10. Pueden requerirse recubrimientos especiales en las fibras para asegurarse del adecuado mojado de las fibras en la matriz líquida.

2.- PREFORMAS. Cuando las fibras son hiladas en forma de tela, una matriz polimérica se infiltra dentro de cada capa de la tela. La infiltración se realiza en condiciones tales que la resina se polimeriza. Posteriormente, estas preformas son colocadas en capas y calentadas bajo presión, de modo que la resina se funde y se

polimeriza para formar el compuesto sólido. La orientación de las capas del tejido pueden ordenarse para producir varias capas cruzadas de fibras.

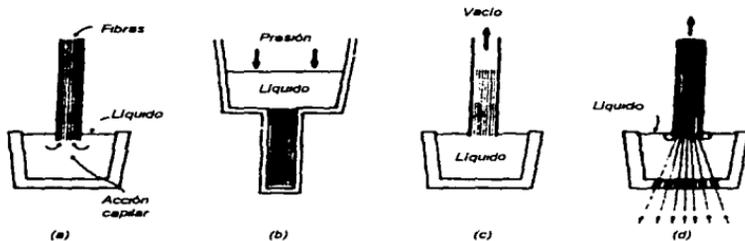


Fig. 3.10 Técnicas de moldeo para la producción de materiales compuestos. (a) por capilaridad, (b) por presión, (c) por infiltración al vacío, y (d) por colada continua.

3.- CINTAS. Las fibras pueden devanarse en un mandril, el cual determina el espaciamiento de las fibras individuales y preformadas con resina polimérica, como se muestra en la figura 3.11 (a). Las cintas hasta de 48 plg de anchura, son unidas para producir un material más ancho o apiladas para producir uno o más grueso. El calor y la presión completa el proceso de polimerización.

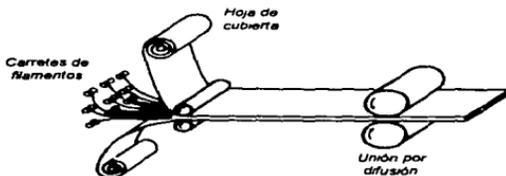


Fig. 3.11 (a)

4.- **PRE-RECUBRIMIENTO.** Puede aplicarse a una matriz y a una fibra un baño de metal fundido, un rociado con plasma, deposición por vapor o electrodeposición. Las fibras pre-recubiertas, a menudo en forma de cintas, son armadas y unidas mediante otras técnicas.

5.- **UNIÓN O SOLDADURA POR DEFORMACIÓN Y POR DIFUSIÓN.** Los procesos de deformación como la compresión en caliente y en laminado, unen capas de cintas, como se muestra en la figura 3.11 (b). La unión por difusión se usa también tanto para la introducción original de la matriz a las fibras como para unir las capas de las fibras. Las capas se apilan hasta el espesor adecuado y entonces una combinación de temperatura elevada y presión hace que se unan a las superficies. La difusión de átomos de la matriz llena los huecos en la interfase para producir un compuesto denso.

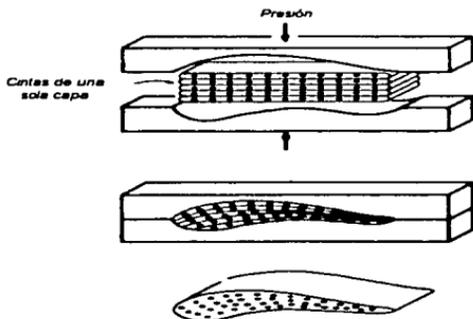


Fig. 3.11 (b)

6.- METALURGIA DE POLVOS. *La matriz en polvo es vertida alrededor de las fibras y compactada a presiones altas para producir un compacto de polvo. La sinterización a temperaturas elevadas consolida al polvo en una masa sólida. También se puede sinterizar en fase líquida. En este caso, el compacto de polvos es calentado a una temperatura entre la del líquido y la del sólido mientras se le somete a presión.*

3.5 MATERIALES COMPUESTOS LAMINARES

Los compuestos laminares incluyen recubrimientos muy delgados, superficies protectoras más gruesas, revestimientos, elementos bimetálicos o bimetales, laminados y muchos otros. Muchos compuestos laminares son diseñados para mejorar la resistencia a la corrosión mientras se mantiene a un bajo costo, alta resistencia o bajo peso. Otras aplicaciones importantes incluyen una superior resistencia al desgaste o abrasión, una mejor apariencia y características poco usuales de expansión térmica. Para producir los compuestos se usa una gran variedad de procesos de manufactura, como el laminado, soldadura por explosión, extrusión, compresión, y soldadura.

3.5.1 LAMINARES

Los laminares son capas de materiales unidos por un adhesivo orgánico. Un compuesto laminar muy conocido es la madera contrachapada o (triplay), en el cual un número impar de chapas u hojas de madera betadeada se aplica de modo que la beta quede en ángulo recto en cada capa alternada.

El vidrio de seguridad es un compuesto laminar en el cual un adhesivo plástico, como el butiral polivinilo, une dos hojas de vidrio, el adhesivo impide que vuelen los fragmentos de un vidrio cuando éste se rompe. Los laminares se utilizan como aislantes en motores, para hacer engranes, para tabillas de circuitos impresos y en artículos decorativos como las cubiertas y muebles con formaica.

3.5.2 RECUBRIMIENTOS DUROS

Capas superficiales duras resistentes al desgaste pueden ser depositadas sobre materiales más suaves y dúctiles mediante técnicas de soldadura por fusión, denominadas de recubrimiento protector. Las relaciones para tal objeto incluyen clases endurecibles de Acero, Hierro, y Aceros que producen Carburos de alta dureza, aleaciones a base de Cobalto y ciertas aleaciones no ferrosas. Las barras del compuesto de Carburo de Tungsteno pueden usarse también para proporcionar Carburo de Tungsteno en la superficie de desgaste.

Procedimientos similares de soldadura pueden mejorar la resistencia a la corrosión o al calor en las superficies.

3.5.3 METALES DE REVESTIMIENTO

Los materiales para este fin son compuestos Metal - Metal. Un ejemplo es la plata de acuñación de Estados Unidos. Una aleación Cu-8% Ni, se une por ambos lados a una aleación Cu-20% Ni. La relación de espesores es de aproximadamente 1/6:2/3:1/6. La aleación de alto Níquel da un color Plata, mientras que el corazón predominante de Cobre da un bajo costo.

Los materiales de revestimiento tienen una combinación de buena resistencia a la corrosión y alta resistencia. El Alclad es un compuesto en el cual el Aluminio comercialmente puro se une con aleaciones de Aluminio de mayor resistencia. El Aluminio puro se protege de la corrosión con la aleación más resistente. El espesor de la capa de Aluminio puro es de 1 y 15% del espesor total.

3.5.4 BIMETALES

Los indicadores y los controles de temperatura utilizan los diferentes coeficientes de dilatación térmica de dos metales en un compuesto laminar. Si se calientan dos piezas de metal, el metal con mayor coeficiente de dilatación se alarga más, como se muestra en la figura 3.12. Si las dos tiras de metal están rigidamente

unidas, la diferencia entre sus coeficientes provoca que en el elemento bimetalico se produzca una curvatura. Si uno de los extremos de la tira queda fijo, el extremo libre se moverá.

La cantidad de movimiento depende de la temperatura; midiendo la curvatura o deflexión de la tira, se puede determinar la temperatura. De modo semejante, si el extremo libre de la tira activa un relevador, la tira puede encender o apagar un horno o un acondicionador de aire para regular la temperatura. La deformación de la tira metálica está dada por el radio de curvatura que se produce. Si las dos tiras son del mismo espesor, entonces:

$$\frac{l}{r} = \frac{24(\alpha_2 - \alpha_1) t \Delta T}{t(14) \left(\frac{E_1}{E_1} + \frac{E_2}{E_2} \right)}$$

donde α_1 , α_2 son los coeficientes de dilatación térmica (plg/plg · °F); E_1 , E_2 son los módulos de elasticidad (psi), ΔT es el cambio de temperatura (°F), y t es el espesor de la tira (plg). Conforme se incrementa la diferencia en el coeficiente de expansión, o bien la temperatura, disminuye el radio de curvatura, lo cual determina una gran deflexión.

Los metales utilizados para los bimetales deben tener (a) coeficiente de dilatación muy diferente; (b) características reversibles y repentibles de expansión y (c) un alto módulo de elasticidad, de modo que el dispositivo bimetalico pueda funcionar. A menudo la tira de bajo coeficiente se hace de Invar, una aleación de Hierro - Níquel, mientras que la de alto coeficiente puede ser de Latón, Monel, Manganeso - Níquel - Cobre, Níquel - Cromo - Hierro o Níquel puro. Las características de los componentes bimetalicos se presentan en la tabla 3.2.



Fig. 3.12 Efecto del coeficiente de dilatación térmica en el comportamiento de los materiales. (a) El incremento de la temperatura aumenta la longitud de uno de los metales más que la del otro. (b) Si los dos metales se encuentran unidos (tira bimetalica), la diferencia en la expansión produce curvatura en la tira.

Tabla 3.2 Propiedades de algunos materiales que pueden formar parte de los bimetalicos.

Material	Coefficiente de dilatación térmica (10^{-6} cm/cm · °C)	Módulo de elasticidad 10^6 psi
Cu	17	17
Al	24	10
Ni	13	30
Acero	12	30
Latón Cu-30% Zn	16	22
Monel	14	26
Cuarzo fundido	5.5	10
Invar (Fe-36% Ni)	1	21.4

Fuente: Le Ciencia e Ingeniería de los Materiales. Capítulo 13. Donald R. Askeland 1987

3.5.5 VENTAJAS DE LOS MATERIALES COMPUESTOS SOBRE LAS OTRAS FAMILIAS DE MATERIALES

Entre las propiedades y características funcionales consideradas como positivas se tienen las siguientes:

- *Muy baja densidad entre 1 y 2 gr/cm³ los materiales compuestos más avanzados y de 2 a 3 gr/cm³ los materiales con matriz de poliéster y fibra de vidrio.*
- *Elevadas resistencias mecánicas a los principales esfuerzos, simples y combinados: tracción, compresión, flexión, torsión, etc.*
- *Como consecuencia de las dos propiedades anteriores, con los materiales compuestos se consiguen los más altos valores de resistencia mecánica y módulo elástico específicos (por unidad de peso) existentes.*
- *Elevada resistencia a los agentes externos atmosféricos (corrosión), químicos (ácidos y bases), abrasión, etc.*
- *Aceptable resistencia, en general, a las temperaturas actuales de operación.*
- *Buena resistencia a la flama (inflamable).*
- *Menor consumo de energía, en su producción que la requerida para la obtención de cualquier metal o aleación metálica.*
- *Coefficiente de dilatación prácticamente nulos, y como consecuencia, bajas deformaciones en las estructuras de estos materiales.*
- *Bajos costos de mantenimiento operativo, por ausencia de corrosión.*

- *Posibilidad de fabricar estructuras complejas en una operación única, con la casi ausencia de mecanizados, por lo que los costos de las fases de montajes secundarios de los diversos elementos quedan sensiblemente disminuidos.*
- *Como consecuencia de la ausencia práctica de mecanizados, el material desperdiciado (rebabas y virutas) en los procesos de fabricación es muy inferior, tan sólo de un 5 al 15% del material empleado en la pieza, en comparación con algunas piezas metálicas, que arrojan desperdicios de material del orden del 60 al 80%*
- *Posibilidad, como consecuencia de las elevadas resistencias específicas, de ser aplicados los materiales compuestos en estructuras sometidas a fuertes cargas de inercia.*
- *Mayores resistencias a la fatiga, en general, de los materiales compuestos frente a los materiales tradicionales, y por consiguiente, con mayor vida útil en condiciones operativas*
- *Baja transmisión de las vibraciones, del calor y de la electricidad (dieléctricos).*
- *Posibilidad de optimizar la orientación de las fibras (anisotropía), para "hacer a la medida" el material de la pieza o estructura, con el fin de cubrir las exigencias de resistencia y rigidez de las mismas.*
- *La elevada rigidez específica de los materiales compuestos, y sobre todo la gran direccionalidad de las propiedades de los compuestos de fibra de Carbono. Les proporcionan excelentes comportamientos aeroelásticos, con una sensible mejora de las superficies aerodinámicas en las aeronaves supersónicas.*
- *Alta capacidad de absorción de energía, con buenas condiciones de amortiguamiento.*

3.6 METALURGIA DE POLVOS

Uno de los procesos que más se aplica para formar a los materiales Compuestos de Matriz Metálica es el de Metalurgia de Polvos, por lo que se dará un tratamiento especial en este capítulo.

La metalurgia de polvos es la manufactura de productos a partir de metales finalmente divididos y compuestos metálicos. Los polvos están sueltos en algunas aplicaciones y en otras se comprimen en piezas y partes.

Los polvos sueltos del metal y sus compuestos se añaden a ciertos productos. Los polvos de Aluminio y Bronce se mezclan en pinturas para dar acabados metálicos. Los polvos de metal agregan resistencia al desgaste a los plásticos. Los metales en forma de polvo en los fuegos artificiales arden con efectos llenos de colorido.

Las aplicaciones crecientes más importantes de la metalurgia de polvos en la industria se encuentra en la manufactura de piezas y partes. Como ejemplo, un automóvil contiene más de 100 partes de metal en polvo. La metalurgia de polvos ha logrado esta relevancia porque es excelente en varios aspectos, los cuales se explican en los siguientes párrafos

La metalurgia de polvos es el único medio factible de fabricar ciertos materiales. Los puntos de fusión de los metales refractarios, como el Tungsteno a 3400 °C (6150 °F), Tantalio a 1999 °C (5425 °F), Molibdeno a 2620 °C (4750 °F), son tan altos que son difíciles de trabajar en cantidades apreciables con el equipo disponible. Otras sustancias, como el Zirconio a 1900 °C (3450 °F) reaccionan intensamente con los medios ambientes cuando se funden. La metalurgia de polvos es una forma práctica para refinar y fabricar tales metales. También es el único método factible de consolidar y formar los materiales superduros para herramientas, como los carburos cementados y los óxidos sintenzados.

Las combinaciones de metales y no metales que son obtenibles en forma económica en otras maneras pueden hacerse por la metalurgia de polvos. Esto es de valor particular en la industria eléctrica. Las escobillas del motor y los puntos de contacto deben tener conductividad apropiada pero ser resistentes al desgaste y al arco. Las escobillas se hacen de polvo de Cobre, Grafito y algunas veces Estaño y Plomo. Los puntos de contacto requieren combinaciones de Tungsteno y Cobre o Plata. Los imanes permanentes pueden hacerse con partículas dispersas finalmente y empacadas densamente de sustancias adecuadas y mantenerse dentro de tolerancias estrechas. Otros ejemplos son las partes revestidas o hechas con dos o más materiales unidos pero no mezclados, como barras y formas para reactores nucleares, unidos bimetálicas para termostatos y electrodos revestidos para soldadura.

La metalurgia de polvos hace posible una clase de materiales compuestos conocidos como "CERMETS". Como el nombre lo indica, son una combinación de metales y cerámicas, con las resistencias de los metales o aleaciones y las resistencias a la abrasión y al calor de los compuestos metálicos, los cuales son los cerámicos.

Un ejemplo es el Al-Cr. Los cermets fueron desarrollados en Alemania en la Segunda Guerra Mundial para utilización posible en los motores de propulsión. Este uso nunca se llevó a cabo debido a su fragilidad, pero se encontraron otras aplicaciones importantes, como aparatos químicos resistentes a la corrosión, equipo para energía nuclear, bombas para servicios severos y sistemas para manipular combustibles de cohetes.

Los metales pueden hacerse porosos por la metalurgia de polvos. Las aplicaciones prácticas son elementos de filtro de Bronce, Níquel y acero inoxidable, más resistentes al choque que las cerámicas, cojinetes, engranes, rotores de bombas, etc., impregnados con lubricantes para larga vida libre de mantenimiento.

Pueden hacerse muchas partes para las máquinas y las estructuras a menor costo por la metalurgia de polvos. Esto es cierto para las partes de precisión

intrincadas que pueden producirse en dos pasos rápidos por la metalurgia de polvos en lugar de varias operaciones costosas de maquinado. Los ejemplos son engranes, trinquetas, cerrojos, excéntricos, retenes de válvulas y abrazaderas. Como otro ejemplo, el preformado del metal en polvo se hace en dados simples y con pocos polvos, y por tanto, reduce el costo de forja de algunas partes. En algunos casos puede lograrse más alta pureza, más variedad y mejor control de las propiedades por la metalurgia de polvos que por fundir y colar a temperaturas de fusión.

La metalurgia de polvos abarca la preparación de los polvos y su combinación en artículos útiles. En forma básica, un polvo de metal se compacta a la forma deseada y se calienta para reforzar el compacto. Los procesos reales son muchos y difieren para adecuar los materiales tratados y obtener las propiedades requeridas en el producto terminado.

3.6.1 POLVOS DE METAL

Lo que producirá un molde de metal depende de su composición y características físicas. Las composiciones más usadas son los polvos con base de Cobre y base de Hierro; para partes estructurales el Latón, Hierro y Acero, Bronce para cojinetes. Otras de importancia, aunque en cantidades menores son Acero inoxidable, Aluminio, Titanio, Niquel, Estaño, Tungsteno, Cobre, Zirconio, Grafito, Óxidos metálicos y Carburos.

En forma sustancial, se usa polvo de metal puro para ciertas partes y aleaciones para otras. Las aleaciones pueden obtenerse aleando un metal antes de pulverizarlo o por el mezclado de polvos de los ingredientes deseados. El primer método de una aleación más fina y uniforme. El segundo es más fácil de componer pero debe sinterizarse con cuidado para asegurar que los ingredientes lleguen a difundirse.

Las características típicas de un metal en polvo están influenciadas por el modo en que se hace. Las principales características son forma de la partícula, tamaño y distribución del tamaño, pureza, estructura del grano, densidad, velocidad

de flujo y compresibilidad. Para obtener las propiedades deseadas, se acostumbra mezclar polvos diferentes.

La mayoría de los polvos de metal se obtiene por reducción del mineral refinado, de escoria de laminadora o de óxidos preparados por monóxido de Carbono o Hidrógeno. Los granos tienden a ser porosos. El tamaño de la partícula puede hacerse bastante uniforme, lo que contribuye a la uniformidad del producto final.

Los metales pueden atomizarse en una corriente de aire, vapor o gas inerte. Algunos pueden fundirse por separado e inyectarse a través de un orificio en la corriente. Otros como el Hierro y el Acero inoxidable, pueden fundirse en un arco eléctrico (como aspersión de metal), y los metales refractarios en un arco de plasma. Como ejemplo, las pequeñas gotas de Titanio se solidifican en polvo después de que se han lanzado desde el extremo de una barra que gira con rapidez calentada por un arco de plasma en una atmósfera de Helio. Las partículas atomizadas son un poco redondas.

En condiciones controladas el polvo de metal puede depositarse electrolíticamente. El material puede tener que triturarse y se muele para obtener finura, se calienta para recocerlo y expulsar el Hidrógeno, se selecciona y se mezcla. Los polvos electrodepositados se encuentran entre los de más pureza y tienen características dendríticas.

La molienda en molinos de bolas, martillos, trituradores, etc., es un medio para producir polvos casi con cualquier grado de finura a partir de metales frágiles o maleables. Los granos de Carburo de Tungsteno se pulverizan en esta forma. Algunos metales maleables se muelen con un lubricante en hojuelas, las cuales no son adecuadas para moldear pero se usan en pinturas y pigmentos.

Perdigonado es el proceso de dejar caer al agua partículas fundidas desde una abertura pequeña pasando a través de aire o de un gas inerte. Se producen partículas esféricas pero no de los tamaños más pequeños.

Las operaciones básicas de compactar o (comprimir) y calentar o (sinterizar) pueden combinarse en diversas formas en procesos para la fabricación de piezas a partir de polvos de metal. Los procesos comunes se describen en la figura 3.13. Además, las operaciones de compresión y sinterizado son variadas y se controlan para adecuarse a muchas condiciones y en algunos casos se agregan otras operaciones. Las operaciones básicas y los principios que gobiernan las operaciones se describen en las siguientes secciones.

3.6.3 COMPRESIÓN

El efecto de la presión en el metal en polvo es el de comprimir las partículas para enclavarlas en su lugar, iniciar enlaces interatómicos e incrementar la densidad de la masa. La presión aplicada a un compacto determina su densidad y resistencia finales. En la figura 3.14 se ilustra un caso típico. En forma teórica si un polvo se comprime lo suficiente, alcanzará el 100% de la densidad y resistencia del metal del que proviene, cuando menos, al ser sinterizado. Las altas presiones y en particular las operaciones adicionales son costosas y no se garantizan para partes que no requieren tener alta resistencia. En el otro extremo de la escala de densidad, no se necesita poca o ninguna presión para las partes porosas.

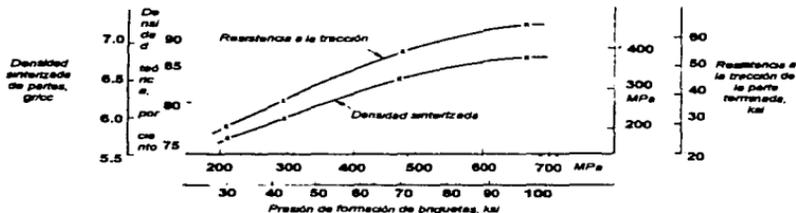


Fig. 3.14 Relaciones entre la presión de formación de briquetas y densidad sinterizada para un polvo de Hierro - Carbono sinterizado a 1110 °C (2030 °F) durante 30 minutos.

La mayoría de las partes se comprimen en frío. Para obtener más densidad y resistencia, las partes pueden comprimirse en caliente o forjarse (martillado) subsecuentemente. La compresión en caliente produce la mayor exactitud, pero la forja da la mayor resistencia y cuesta más.

La forma de la partícula adecuada, el tamaño y la distribución del tamaño, la selección cuidadosa y la mezcla son necesarias para obtener una parte comprimida satisfactoria. Las mejores ligas se obtienen entre partículas abruptas, pero las partículas redondas fluyen mejor en el molde y bajo presión. La forma en que el polvo llena el dado, determina la velocidad de operación. Puede agregarse estearato de Zinc para lubricar el dado y las partículas para disminuir el desgaste y ayudar en la compactación. Se volatiliza en el sintenzado y ayuda a mantener conectados a los poros.

El metal en polvo comúnmente se comprime en una cavidad de dado para tomar la forma de la parte mediante uno o más punzones. La calidad depende de empaquetar con uniformidad el material. El metal en polvo no fluye con facilidad en las esquinas y los recesos como los fluidos. La fricción es alta entre las partículas y las paredes del dado. Por tanto, un solo punzón no puede compactar a densidad uniforme cualquier parte, sino sólo las más simples. Las partes que en particular tienen escalones, paredes delgadas, bridas, etc., deben comprimirse con dos o más punzones para distribuir uniformemente la presión a través de las secciones. En la figura 3.15 se presenta un ejemplo simple. Las partes más complejas pueden requerir hasta dos movimientos superiores y tres o cuatro movimientos inferiores del punzón e incluso ciertos movimientos laterales al corazón se suministran por la prensa. Algunas partes no pueden hacerse con el equipo disponible.

La producción en compresión de polvos normalmente se hace en prensas diseñadas específicamente para el propósito. Se evalúa una de dichas prensas por la fuerza que puede suministrar y por la máxima profundidad de la cámara de dado que puede acomodar. La medición de la fuerza determina el área de la sección transversal de la parte más grande que puede sujetarse a una presión dada. La profundidad de la cámara del dado, llamada lleno de dado, determina qué tan

profundo puede ser el llenado de polvo en un dado, determina qué tan profundo puede ser el llenado de polvo en un dado. Esto limita la longitud de la parte comprimida. La razón de la profundidad de polvo respecto a la longitud de la parte compactada es de 2:1 o 3:1 para el Hierro y el Cobre y hasta de 8:1 para algunos materiales.

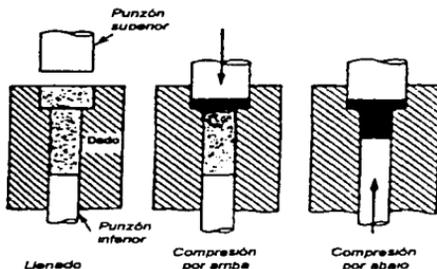


Fig. 3 15 Pasos en la compresión simple de polvo para hacer una parte de metal.

La mayoría de las prensas abajo de 1.5 MN (170 tons.) de capacidad de fuerza son mecánicas para obtener rapidez. Una prensa mecánica trabaja a tamaño uniforme, pero causa diferencias en densidad con variaciones en las condiciones como la cantidad de la carga. Una prensa hidráulica puede ajustarse para ejercer una presión dada para densidad uniforme o para detenerse en un tamaño uniforme. Las prensas hidráulicas grandes para metal en polvo tienen tasas hasta de 25 ó más MN (varios miles de toneladas). Las prensas varían desde los modelos alimentados a mano de una sola carrera para producir unas cuantas piezas por hora (en forma típica para piezas grandes en pequeñas cantidades), hasta máquinas automáticas rotatorias y de punzones múltiples capaces de producir cientos de partes por minuto.

3.6.4 OTROS MÉTODOS DE COMPACTACIÓN

El metal en polvo puede colarse, deslizándolo en moldes. El polvo se dispersa en un líquido que contiene químicos para mejorar las partículas y ayudar a distribuir las y entonces liberar la masa del molde. El molde puede ser poroso para absorber el líquido libre y puede vibrarse para densificar el compacto. Las partes coladas por deslizamiento se sinterizan después para que tengan resistencia adecuada para muchos propósitos. Se usan agregados de fibra para absorción del sonido y de la vibración como esfuerzos para los plásticos y metales. El costo del molde es bajo y el método es económico para partes que son complejas o se hacen en pequeñas cantidades.

Un método para polvos pesados, como el Carburo de Tungsteno, es la compactación centrífuga. El polvo se hace girar en un molde y se empaca con uniformidad con presiones hasta de 4 MPa (400 psi) en cada partícula. Las partes deben tener secciones redondas uniformes. El costo del equipo no es muy alto.

El metal en polvo también se moldea por inyección. Un lodo del polvo en agua ó mezclado con un material termoplástico se inyecta en un dado. El aglutinamiento se remueve en el sinterizado.

Se compactan cintas continuas y vanillas rolando piezas de Cobre, Latón, Bronce, Monel, Níquel, Titanio, Acero inoxidable o fibras. En un proceso, se alimenta de una tolva polvo de Acero inoxidable entre dos rodillos en un plano horizontal. El material emerge como una cinta con una densidad de 2 a 6.8 gr/cm³. Se sinteriza entonces y se vuelve a rolar tres veces y se recoce a una resistencia a la tracción de cerca de 745 MPa (108,000 psi) y un alargamiento del 33%. Otro proceso produce hojas porosas para filtros; se vierte una capa uniforme de polvo en una bandeja cerámica, se sinteriza entonces y se rola a la densidad deseada.

Un medio de aplicar presión para obtener densidad uniforme es encerrar el polvo en un molde con forma de plástico o hule con la forma deseada y sumergirlo en un gas o líquido en una cámara bajo presión de 70 a 700 MPa (10 a 100 ksi).

Esta es la compresión isostática, algunas veces llamada compresión hidráulica en un líquido. Pueden hacerse partes complicadas asimétricas y grandes con más facilidad que en otras formas. Se producen partes isotrópicas. Los dados de metal no son necesarios. Para trabajo grande, el equipo cuesta cerca de la décima parte que lo que cuesta una prensa.

El polvo de metal, en contenedores de metal o cerámica y las preformas, se sujetan a presiones de gas tan altas como 350 MPa (50,000 psi) a temperaturas hasta de 2200 °C (4000 °F) (por lo general es menos) en la compresión isostática caliente (HIP). Se ha encontrado que esto es efectivo para metales refractarios, cerámicos, cermets y polvos esféricos que nos responden a la compresión en frío. Mediante la HIP pueden obtenerse densidades cercanas a las teóricas.

Los polvos de Acero inoxidable, Uranio, y Zirconio se sellan en latas y se compactan al ser extruidos a través de dados mientras están protegidos de la contaminación. La vaina puede eliminarse para utilizar el metal base y puede dejarse para posterior protección como es el caso en las barras para reactores de Uranio.

Los tubos largos pueden compactarse magnéticamente. El metal en polvo se vierte rodeando un mandril dentro de un conductor coaxial. Se pulsa una corriente a través del conductor y se establece un campo magnético, que oprime el conductor interno contra el compacto.

El formado con alta cantidad de energía (mediante prensas y explosivos) es capaz de compactar polvos a las densidades teóricas aproximadas con marcada definición de detalles y tolerancias estrechas. Como por ejemplo, un disco de polvo de Hierro de 0.33 m (13 plg) de diámetro y 9 kg (20 lb) de peso se compactó a una densidad de 7.2 gr/cm³ (7.8 teórico) por 270 KJ (200,000 ftlb) de energía, como se muestra en la figura 3.16. Sería necesario utilizar una prensa de 7000 toneladas para obtener los mismos resultados.

3.6.5 SINTERIZADO

El sinterizado refuerza los enlaces entre las partículas y por lo tanto, refuerza un compacto de metal en polvo. En todos los casos esto ocurre debido a que los átomos de las partículas en contacto se entremezclan. En general esto se lleva a cabo en una de dos formas. En una forma, uno de los constituyentes del compacto se funde; en otra forma, ninguno se funde. Un ejemplo del primer caso es el sinterizado de Carburo cementado, el cual se hace arriba del punto de fusión del Cobalto constituyente. El Cobalto fundido se difunde en la matriz pero también actúa como medio en el cual los granos de Carburo pueden crecer juntándose para formar un esqueleto a través de la masa. Los átomos de Carburo parecen disolverse en el Cobalto en puntos de alto nivel de energía para construir los puentes entre los granos. Esto explica por qué los Carburos cementados son más duros a temperaturas elevadas que el Acero rápido que contiene Carburos aislados manteniéndose unidos por una matriz ferrosa susceptible al calor.

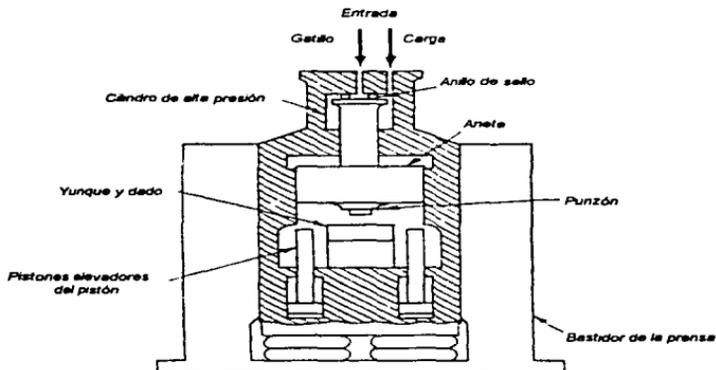


Fig. 3.16 Prensa de forja con alta tasa de energía.

El segundo caso es característico del sinterizado de los polvos en Hierro, Cobre o Tungsteno. Por lo general, se hace de 60 a 80% de la temperatura de fusión. Los átomos en los puntos de contacto se entremezclan y migran. La razón por la cual el sinterizado se hace abajo del punto de fusión es que el proceso en realidad colaría los metales si éstos se fundieran, y no se necesitarían los polvos. No obstante, la temperatura debe ser suficientemente elevada para evitar la movilidad atómica rápida.

Si un constituyente está presente en forma sustancial, como en el sinterizado del polvo de Hierro, una sola fase es continua de una partícula a la siguiente después del sinterizado. En compactos de dos o más metales diferentes, aleaciones ó compuestos, sea que uno se funda o no, se forman compuestos intermedios de fase de los constituyentes en los puntos de liga de las partículas. Conforme el sinterizado continúa en cualquier caso, las áreas ligadas crecen y el material más ó menos llena los vacíos entre las partículas. Esto se ilustra en forma ideal en la figura 3.17, en el cual se supone que las partículas son redondas y el metal que entra en los vacíos se muestra en negro.

Cuando no tiene lugar la fusión, los átomos deben migrar de las partículas madres sólidas para formar y agrandar las ligas y llenar los vacíos. Los mecanismos que se crean juegan un papel en el transporte de los átomos, y son de la difusión superficial. La evaporación, la condensación, el flujo de masa y la difusión en volumen.

Todos parecen tener lugar en forma individual, sucesivamente o en forma simultánea durante el proceso de sinterizado dependiendo del metal, la condición de los polvos, temperatura, tiempo y atmósfera.

Se ha comprobado que la difusión y el movimiento de los átomos en las superficies de las partículas son las actividades principales en las etapas iniciales del sinterizado. La tracción superficial es la fuerza que impulsa a reducir el área de la superficie, redondeando y suavizando las irregularidades superficiales y segregando los espacios sin llenar en menos poros, pero más grandes. El área superficial de las

partículas pequeñas es grande en relación con su volumen y la influencia de la difusión superficial es proporcionalmente mayor.

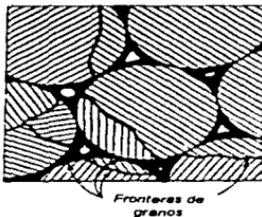


Fig. 3.17 Diagrama idealizado del arreglo de los granos en polvo de metal compactado. Las secciones de las partículas originales se indican como círculos.

Puede esperarse que la evaporación y la condensación tengan más efecto en un constituyente fundido que en los que no son volátiles. Un efecto definido parece ser la esferoidización de los vacíos angulares.

El flujo de masa es el movimiento de material sólido bajo esfuerzo. Algunos esfuerzos pueden quedar en las partículas después de la compresión, pero la mayoría parece que son inducidos por las fuerzas de tracción que envuelven las superficies, lo cual parece causar flujo viscoso del material dentro de las partículas lo mismo que en su superficie a las temperaturas de sinterizado.

La difusión en volumen se origina por los movimientos aleatorios de los átomos inducidos por la vibración térmica.

Los átomos tienden a moverse de una localización de concentración alta a una de más baja concentración. Dentro de los cristales de metal, los átomos migran de las fronteras de grano a los vacíos dentro de la estructura de la malla. Hay fuerte evidencia experimental de que la principal acción en las últimas etapas de sinterizado

es un movimiento de los átomos desde las fronteras de los granos a los vacíos entre las partículas. Abajo de la temperatura de recristalización los átomos migran con lentitud. Arriba de esas temperaturas los átomos se mueven con más rapidez, pero los granos crecen y las fronteras de granos son más reducidas. Se ha mostrado que los átomos no entran con rapidez y reducen los vacíos que ya no están conectados por las fronteras de grano.

Conforme los átomos dejan las fronteras de grano, su espacio se llena con los granos que se mueven juntándose. Esto explica la concentración de volumen frecuentemente evidente en el sinterizado. Después del suficiente crecimiento del grano, las fronteras de grano se vuelven insignificantes. Entonces prácticamente cesan la migración de átomos, la contracción de volumen, el enlace creciente entre partículas y el incremento de la resistencia por compactación. Esto explica por qué hay un tiempo óptimo de sinterizado en cada caso. Hasta ese tiempo las propiedades se mejoran, pero más allá de él hay muy poco beneficio.

No todos los materiales se contraen cuando se sinterizan; algunos crecen. Un ejemplo se encuentra en los compactos de Cobre - Latón en los cuales los átomos de Cobre migran al Latón y los átomos de Zinc migran del Latón. Las vacancias que dejan los átomos de Cobre parece que se llenan por dislocaciones y las fronteras de grano, pero los átomos de Zinc dejan agujeros en el Latón. Se ha observado que la porosidad se forma en el lado del Latón y los granos no se contraen. Los átomos de Zinc se agregan al Cobre y el resultado neto es un crecimiento.

Debido a su área superficial relativamente grande, un compacto de polvo de metal es específicamente susceptible a la oxidación y al ataque, debe mantenerse limpio para coalescer en una escala atómica. Es común que el sinterizado se haga en una atmósfera neutra o reductora y aún en casos críticos en vacío. Algunas veces se agregan gases reactivos para acelerar el proceso y purgar las impurezas. Se mezclan con frecuencia sólidos con los polvos de metal para vaporizarse y abrir poros. Todas estas medidas no deben contaminar la atmósfera principal del sinterizado. Es importante el control preciso de las atmósferas y la temperatura. La mayoría del sinterizado se hace en hornos semi o plenamente continuos con una

banda de malla, un lugar giratorio, calor alto y enfriamiento. Se hace algún sinterizado por inducción; puede controlarse y automatizarse con facilidad para velocidades de fusiones altas.

El sinterizado por chispa se hace colocando polvo suelto en un dado, se pasa una corriente intensa a través de él y se aplica presión al mismo tiempo. Un transitorio inicial de corriente desnuda la capa de óxido de las partículas de polvo para dejar superficies limpias que se unen. Una corriente continua calienta la masa bajo presión. Este proceso se ha desarrollado en la industria aeroespacial para muchos materiales y partes comunes. Sólo se requiere un paso y la operación es rápida.

3.6.6 OPERACIONES DE ACABADO

Éstas imparten propiedades específicas o características a las partes de metal. Incluyen infiltración, tratamiento térmico, impregnación, clasificación de tamaño y maquinado.

La infiltración consiste en colar una pieza de aleación de Cobre en contacto con una parte de Hierro presinterizada y calentar a 1150 °C (2100 °F). El Cobre se funde y es absorbido por capilaridad dentro de los poros de la parte. El mismo resultado puede lograrse en la etapa de sinterizado con polvos de Hierro - Cobre. La infiltración aumenta la resistencia de 70 a 100% y puede mejorar la facilidad de maquinado pero hace más frágil el producto. Las tolerancias pueden mantenerse tan estrechas con la infiltración como sucede con los otros métodos, por ejemplo doble compresión. La infiltración con frecuencia es más costosa que los otros métodos, como usar presiones más altas para obtener densidad más alta.

Las partes de Hierro pueden tener Carbono agregado a la mezcla original ó Carbunizarse después del sinterizado. Entonces se calientan, enfrían bruscamente y se revienen como cualquier otro producto de Acero al alto Carbono a un alto grado de resistencia y dureza.

La impregnación tiene dos formas. Los compactos sinterizados, por ejemplo los cojinetes, pueden saturarse con aceite, cerca del 20% en volumen, por inmersión o al succionar aceite a través del compacto por vacío. El aceite depositado se retira por calor o presión conforme sea necesario en el servicio. Las partes de metales son polvo y todas las clases de colado como monobloques de motor, cajas de engranes, cuerpos de bombas y muchos más se impregnan para sellar los poros y evitar fugas en servicio. Esto se hace con silicato de sodio, resinas poliéster o polímeros anaeróbicos.

Las partes de metal en polvo pueden volverse a comprimir después del sinterizado. Esto se denomina dimensionado si se hace para mantener dimensiones y cuñado para aumentar la densidad. La recompresión puede hacerse en prensas compactadoras ó en prensas ordinarias.

3.6.7 METALES COMPUESTOS

Un nuevo campo de la metalurgia es la adición de filamentos y fibras para obtener altas resistencias en partes metálicas, particularmente a temperaturas elevadas. El esquema es similar a impregnar fibras con resinas para partes de plástico de alta resistencia. Puede aumentar la resistencia de las aleaciones de Aluminio de 350 a 700 MPa (50 a 100 psi), con un aumento del 50% en el módulo de elasticidad, por la adición del 10% de filamentos de Alúmina. Las aleaciones de Níquel con resistencias a la tracción de 135 a 275 MPa (20 a 40 psi), a 925 °C (1700 °F) permanece en esos niveles a 1100 °C (2000 °F) con la adición de filamentos de Alúmina pero cae a un tercio sin los filamentos. Pueden obtenerse compuestos casi con la misma rigidez que la del Acero con una densidad tan baja como un tercio, pero no se han encontrado adecuados para algunas aplicaciones a temperatura elevada. Los costos son más altos que para algunas aplicaciones a temperatura elevada. Los costos son más altos que para los metales ordinarios, pero se espera que bajen conforme crezca el mercado. Las formas de hacer los compuestos incluyen la mezcla de las fibras con metal fundido, deposición por vapor o electricidad del metal en las fibras, técnicas de metalurgia de polvos y solidificación eutéctica de la matriz y de los filamentos constituyentes.

3.6.8 DISEÑO DE PARTES DE METAL EN POLVO

Las cuatro guías para la producción con éxito de un metal en polvo:

- 1.- Diseñar partes adecuadas para el proceso, en especial si se han hecho previamente en otras formas.*
- 2.- Diseñar las herramientas de acuerdo con los principios de las operaciones de metal en polvo, para comprimir en forma uniforme el polvo de metal.*
- 3.- Estandarizar las partes tanto como sea posible para poder usar el número mínimo de herramientas en la mayoría de las partes.*
- 4.- Control estricto de todas las operaciones.*

Deben observarse varias reglas para diseñar partes en forma apropiada. Mantener las partes tan pequeñas como sea posible. Las formas más fáciles de comprimir son los cilindros, cuadrados, y rectángulos. Son mejores las piezas planas. Los pasos agregan dificultad para obtener la homogeneidad. Deben evitarse anstas y esquinas agudas, filos delgados y ranuras profundas ya que debilitan las herramientas, las preformas y las partes terminadas. Una parte no debe tener recesos laterales que eviten que se saquen del dado cuando se compactan. Las paredes que son muy delgadas son difíciles de llenar. La longitud de una parte no debe exceder de dos a tres veces su diámetro. Las secciones delgadas y gruesas no deben estar contiguas entre sí porque tienen diferente expansión con el calor y causan gnetas.

CAPÍTULO IV

**MATERIALES COMPUESTOS
DE MATRIZ
METÁLICA (MMC)**

CAPÍTULO IV

MATERIALES COMPUESTOS DE MATRIZ METÁLICA (MMC)

4.1 GENERALIDADES

Particularizando la definición de los metales compuestos diremos que los metales Compuestos de Matriz Metálica, son aquéllos que resultan de la unión de dos o más metales, ensamblados mecánicamente, y/o químicamente, siendo la matriz del compuesto el que se encuentra en mayor cantidad, y como resultado de esta combinación de metales, vamos a obtener un compuesto de propiedades que para cada aplicación específica representará mayores ventajas.

Entre los parámetros que podemos variar están: resistencia a la corrosión, resistencia a la abrasión, rigidez, peso, resistencia a la temperatura, dureza, conductividad eléctrica, etc. Como se mencionó los materiales Compuestos de Matriz Metálica (MMC), también se pueden clasificar en tres categorías, como se muestra en la figura 4.1.

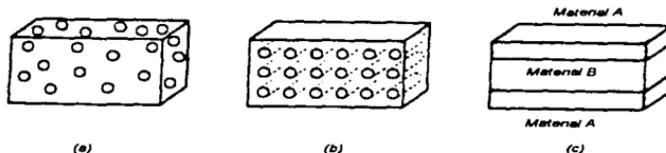


Fig. 4.1 Muestra los tres tipos de refuerzo. (a) con partículas, (b) con fibras, y (c) laminar.

4.2 MATERIALES COMPUESTOS DE MATRIZ METÁLICA (MMC) REFORZADOS CON PARTICULAS

Este tipo de materiales consiste en combinar con la matriz metálica que es blanda, las partículas de refuerzo que son de un material duro pero frágil, dicha combinación deberá ser uniforme. A su vez estos compuestos se subdividen en dos tipos que son:

- *Endurecidos por dispersión.*
- *Reforzados con partículas propiamente dichos.*

4.2.1 ENDURECIDOS POR DISPERSIÓN

La característica de este compuesto consiste en que el mayor soporte de la carga es el material formado por la matriz metálica.

La forma como trabajan los materiales así combinados, es la siguiente: como ya se mencionó, debido a que la deformación que sufre la matriz metálica se debe al deslizamiento y movimiento de las dislocaciones, al agregar partículas pequeñas, éstas obstaculizan dichos movimientos, dando como resultado un material compuesto, con mayor resistencia. El tamaño de las partículas utilizadas para este fin tienen un tamaño aproximado de 100 a 2500 Å.

Uno de los compuestos de este tipo por ejemplo lo constituye el Polvo de Aluminio Sinterizado (PAS), esto es polvo de Aluminio endurecido con hasta 14% de partículas de Al_2O_3 , este compuesto mejora sus características de termofluencia, debido a que el compuesto no sobrevejece debido a el proceso de unión que es mecánico, a diferencia de las aleaciones cuya unión es de dos fases. La figura 4.2 muestra el comportamiento de este compuesto.

Otro ejemplo es el compuesto formado por Hierro y Al_2O_3 , mostrado en la figura 4.3.

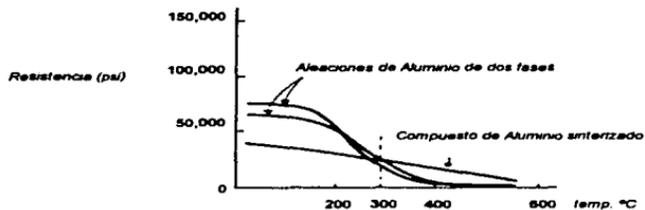


Fig. 4.2 Comparación del esfuerzo de fluencia entre aleaciones de Aluminio de dos fases y Aluminio sinterizado, a partir de 300 °C.

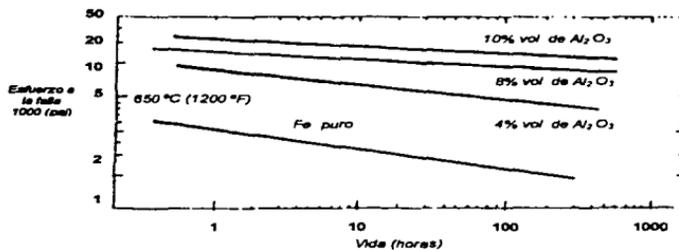


Fig. 4.3 Comparación del aumento del esfuerzo a la falla de un material puro contra materiales reforzados por partículas de Al_2O_3 .

También hay otros materiales compuestos endurecidos con este proceso y se ven en la tabla 4.1, indicando también sus aplicaciones generales y aplicaciones potenciales.

Tabla 4.1 Aplicaciones potenciales.

<i>Compuesto</i>	<i>Aplicaciones</i>
<i>Ag-CdO</i>	<i>Materiales para contactos eléctricos.</i>
<i>Al-Al₂O₃</i>	<i>Posible uso en reactores nucleares.</i>
<i>Be-BeO</i>	<i>Tecnología aeroespacial y nuclear.</i>
<i>Co-ThO₂Y₂O₃</i>	<i>Posibles materiales magnéticos resistentes a la termofluencia.</i>
<i>Ni-20%Cr-ThO₂</i>	<i>Componentes para turbomotores.</i>
<i>Pb-PbO</i>	<i>Pamillas para baterías o acumuladores.</i>
<i>Pt-ThO₂</i>	<i>Filamentos, componentes eléctricos.</i>
<i>W-ThO₂, ZrO₂</i>	<i>Filamentos, calefactores.</i>

Para lograr un compuesto óptimo con este proceso es necesario considerar lo siguiente en cuanto al dispersante:

- Debe ser un obstáculo efectivo para el movimiento de las dislocaciones.
- La cantidad, la distribución, el tamaño y la forma deben ser adecuados.
- Debe tener baja solubilidad en la matriz.
- No deben reaccionar químicamente.

4.2.2 MMC REFORZADOS CON PARTÍCULAS PROPIAMENTE DICHAS

En este tipo de refuerzo la carga está soportada en la misma proporción entre la matriz y las partículas, dichas partículas son grandes llegando a medir hasta un micrón, y su concentración llega hasta el 25% en volumen. Debido al gran tamaño de las partículas, éstas no contribuyen fuertemente a oponerse al deslizamiento de la matriz, por lo que este tipo de material compuesto no tiene gran resistencia, más bien es usado para otras propiedades.

Los Carburos cementados como se mencionó, son un ejemplo de este tipo de refuerzo, uno de los materiales que cae en esta clasificación es el Carburo de Tungsteno, que es extremadamente duro, pero muy frágil y resiste temperaturas elevadas, por esas razones se utiliza en herramientas de corte.

Otro ejemplo de MMC como ya se mencionó con este tipo de refuerzo es el utilizado en los contactos eléctricos, en los cuales se requiere resistencia al desgaste y conductividad, y esto se logra con la combinación de Tungsteno, que da resistencia al desgaste, y la Plata que proporciona la conductividad.

4.3 MATERIALES COMPUESTOS DE MATRIZ METÁLICA (MMC) REFORZADOS CON FIBRAS

Quando se usa este tipo de reforzamiento, la matriz debe ser tenaz y dúctil, para que no permita que se propaguen las grietas causadas por alguna fibra rota y para que transmita eficientemente la carga hacia las fibras que son el principal soporte.

Estos compuestos mejoran la resistencia al esfuerzo, la resistencia a la fatiga, la rigidez, la relación resistencia - peso, y tienen un buen comportamiento a temperaturas elevadas, a diferencia de los materiales endurecidos por dispersión. Los compuestos así reforzados son anisotrópicos, es decir, se comportan de diferente manera si la carga es aplicada en forma paralela o perpendicular a la dirección de la fibra, como se muestra en la figura 3.3.

Los compuestos reforzados con fibras se pueden clasificar en dos grupos que son:

- *Fibras Continuas:* Orientadas y Desorientadas.
- *Fibras Discontinuas:* Orientadas y Desorientadas.

4.3.1 FIBRAS CONTINUAS

El análisis que se realizará en este tema será en base al material de reforzamiento. Las propiedades dependen como lo predice la regla de las mezclas, del porcentaje en volumen de las propiedades de los constituyentes, y de la orientación de las fibras. La figura 4.4 nos da la comparación de resistencia al aplicar la carga en dirección y perpendicular a las fibras.

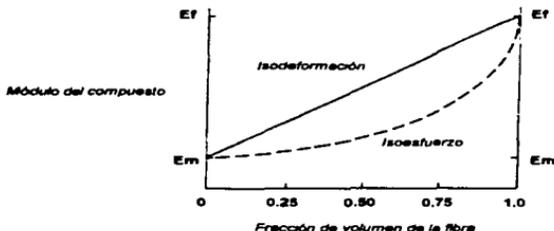


Fig. 4.4 Comportamiento de un material al aplicar una carga de isoefuerzo o isodeformación para un volumen agregado de fibra.

4.3.2 PROPIEDADES DE LOS MMC REFORZADOS CON FIBRAS CONTINUAS

A) FIBRAS DE BORO. Es un compuesto que tiene muchas aplicaciones actualmente, se usa con matrices de Aluminio y Titanio.

La resistencia de los materiales reforzados con fibras de Boro, depende de la fabricación, ya que se pueden presentar diversos defectos, como son las burbujas, esfuerzos internos y defectos de crecimiento de grano de la matriz.

La figura 4.5 muestra la resistencia de un Aluminio reforzado con estas fibras contra un material de matriz Epóxica y otros materiales, con el mismo refuerzo a

diferentes temperaturas, y observamos que el de matriz metálica es útil aún a 510 °C, mientras que el de matriz Epóxica sólo es útil hasta 190 °C.

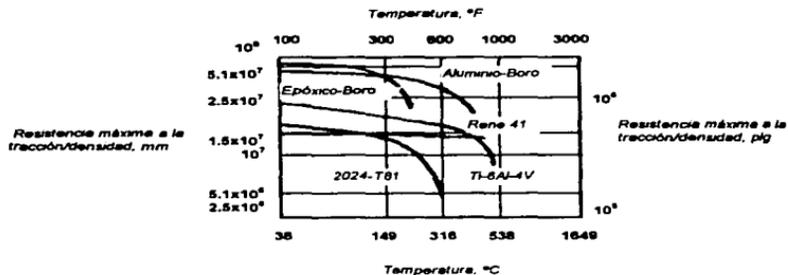


Fig. 4.5 Resistencia contra temperatura del Boro contra otros metales.

A continuación se dan una serie de gráficas y tablas que dan las características de los materiales reforzados con fibras de Boro.

Las figuras 4.6 y 4.7 nos dan la resistencia máxima a la tracción y el módulo elástico en función del ángulo de aplicación de la carga.

Las figuras 4.8 y 4.9 muestran las curvas de esfuerzo - deformación para el compuesto de Aluminio - Boro, para la carga, actuando en dirección paralela o perpendicular a la fibra.

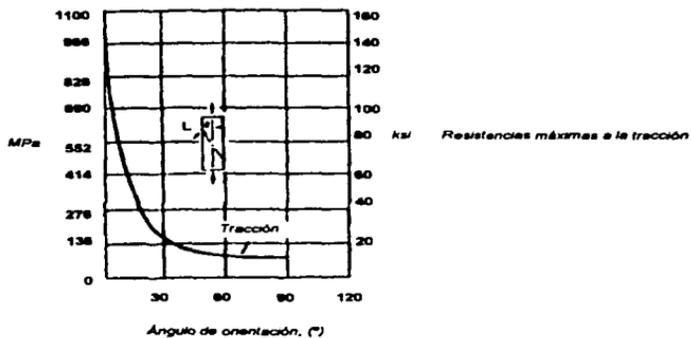


Fig. 4.6 Resistencia en función del ángulo de aplicación de la carga a temperatura ambiente.

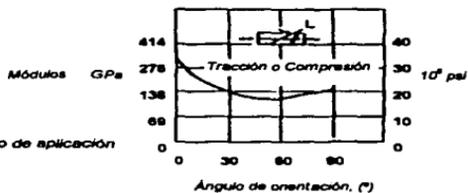


Fig. 4.7 Módulo en función del ángulo de aplicación de la carga a temperatura ambiente.

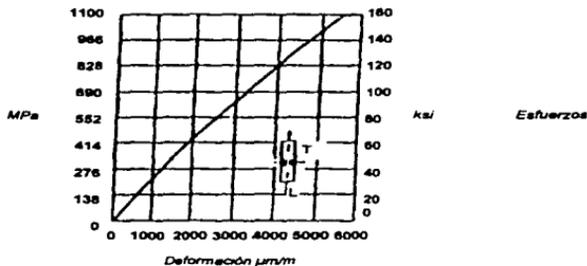


Fig. 4.8 Carga en dirección longitudinal.

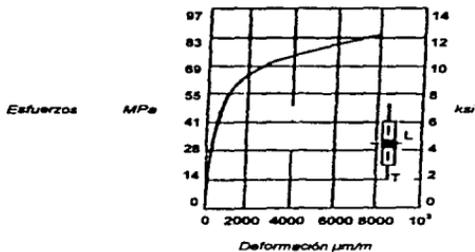


Fig. 4.9 Carga en dirección transversal.

Las tablas 4.2 y 4.3 muestran datos importantes para este material.

Las figuras 4.10, 4.11, y 4.12 muestran el comportamiento del esfuerzo, módulo y el esfuerzo al corte.

Tabla 4.2 Propiedades del Aluminio reforzado con Boro a temperatura ambiente a (0°) con 50% de volumen de filamentos.

Esfuerzo de Diseño

Máxima tracción longitudinal	MPa (ksi)	1100 (160.0)
Máxima tracción transversal	MPa (ksi)	110 (16.0)
Máxima compresión longitudinal	MPa (ksi)	1215 (176.0)
Máxima compresión transversal	MPa (ksi)	159 (23.0)
Máximo esfuerzo al corte plano	MPa (ksi)	69 (10.0)
Máximo esfuerzo al corte laminar	MPa (ksi)	126 (18.3)
Máxima deformación longitudinal	$\mu\text{m/m}$ o $\mu\text{plg/plg}$	5000 - 6000
Máxima deformación transversal	$\mu\text{m/m}$ o $\mu\text{plg/plg}$	8000 - 12000

Propiedades Plásticas

Módulo con tracción longitudinal	GPa (10 ⁹ psi)	235 (34.0)
Módulo con tracción transversal	GPa (10 ⁹ psi)	138 (20.0)
Módulo con compresión longitudinal	GPa (10 ⁹ psi)	207 (30.0)
Módulo con compresión transversal	GPa (10 ⁹ psi)	131 (19.0)
Módulo al corte plano	GPa (10 ⁹ psi)	66 (9.5)
Relación de Poisson longitudinal	.....	0.23
Relación de Poisson transversal	.....	0.17

Constantes Físicas

Densidad	g/cm ³	2.7
Coefficiente de expansión térmica longitudinal	$\mu\text{m/m}^{\circ}\text{C}$ ($\mu\text{plg/plg}/^{\circ}\text{F}$)	5.8 (3.2)
Coefficiente de expansión térmica transversal	$\mu\text{m/m}^{\circ}\text{C}$ ($\mu\text{plg/plg}/^{\circ}\text{F}$)	19.1 (10.6)

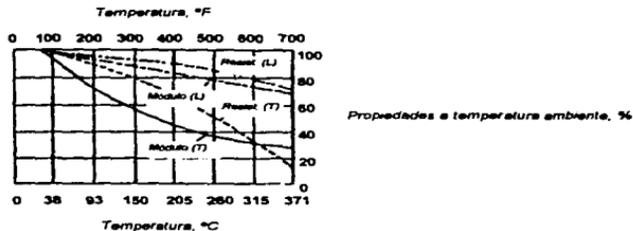


Fig. 4.10 Resistencias y Módulos contra temperatura, del Aluminio reforzado con Boro en tracción longitudinal y transversal a (0°).

Tabla 4.3 Propiedades de un plano cruzado de Aluminio - Boro a temperatura ambiente a (0°/90°) con 50% de volumen de filamentos.

Esfuerzo de Diseño

Máxima tracción longitudinal	MPa (ksi)	483 (70)
Máxima tracción transversal	MPa (ksi)	483 (70)
Máxima compresión longitudinal	MPa (ksi)	607 (88)
Máxima compresión transversal	MPa (ksi)	607 (88)
Máximo esfuerzo al corte plano	MPa (ksi)	103 (15)
Máximo esfuerzo al corte laminar	MPa (ksi)	98 (10)
Máxima deformación longitudinal	$\mu\text{m/m}$ o $\mu\text{plg/plg}$	6700
Máxima deformación transversal	$\mu\text{m/m}$ o $\mu\text{plg/plg}$	.....

Propiedades Plásticas

Módulo con tracción longitudinal	GPa (10^9 psi)	145 (21)
Módulo con tracción transversal	GPa (10^9 psi)	145 (21)
Módulo con compresión longitudinal	GPa (10^9 psi)	145 (21)
Módulo con compresión transversal	GPa (10^9 psi)	145 (21)
Módulo al corte plano	GPa (10^9 psi)	.....
Relación de Poisson longitudinal	.....	.....
Relación de Poisson transversal	.....	.....

Constantes Físicas

Densidad	gr/cm^3	2.7
Coefficiente de expansión térmica longitudinal	$\mu\text{m/m}^\circ\text{C}$ ($\mu\text{plg/plg}/^\circ\text{F}$)	.....
Coefficiente de expansión térmica transversal	$\mu\text{m/m}^\circ\text{C}$ ($\mu\text{plg/plg}/^\circ\text{F}$)	.....

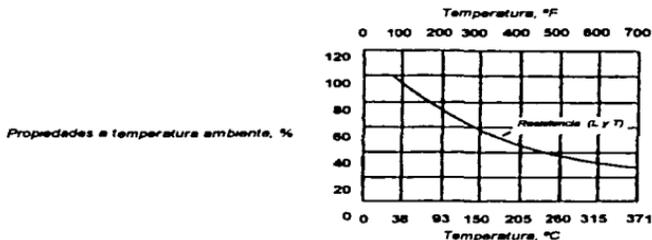


Fig. 4.11 Resistencia al corte contra temperatura, del Aluminio reforzado con Boro a (0°).

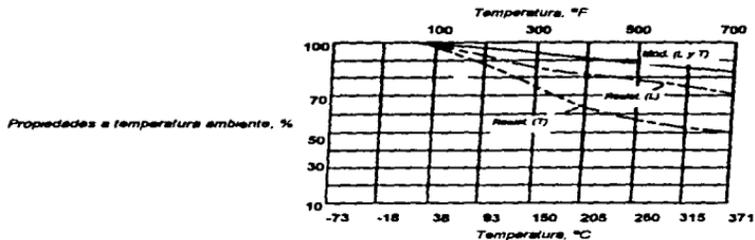


Fig. 4.12 Resistencias y Módulos, contra temperatura del Aluminio reforzado con Boro en un plano cruzado a (0°/90°) en tracción longitudinal y transversal.

En la figura 4.13 se proporcionan datos de fatiga.

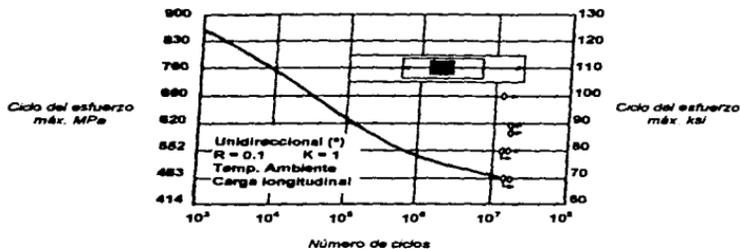


Fig. 4.13 Constante de amplitud de fatiga, del Aluminio reforzado con Boro con carga en forma longitudinal.

B) FIBRAS DE CARBURO DE SILICIO. Estas fibras tienen ventajas sobre las fibras de Boro, en que no reacciona fácilmente con el Aluminio, y además puede utilizarse para aplicaciones a mayores temperaturas.

El material de la matriz puede ser Aluminio, Titanio, Magnesio y Cobre. En las tablas 4.4 y 4.5, se pueden observar los datos más importantes para estos materiales con la matriz de Aluminio.

Tabla 4.4 Resistencia a la tracción de la fibra con el Aluminio SCS-2-AJ 47% de vol. de la fibra.

Orientación de la fibra	No de capas	Resistencia a la tracción		Módulo de tracción		Deformación total	Relación de Poisson
		MPa	ksi	GPa	10 ⁶ psi		
0°	6,8 12	1462 0	212 0	204 1	29 6	0 89	0 268
90°	6, 12 40	86 2	12 5	118 0	17 1	0 08	0 124
[0°/90°/0°/90°]	8	673 0	97 6	136 5	19 8	0 90	.....
[0°/45°/0°]	8	1144 0	166 0	180 0	26 1	0 92	.....
[0°/45°/0°/0°]	8	341 3	49 5	96 5	14 0	1 01	.....
± 45°	8, 12, 40	309 5	44 9	94 5	13 7	10 6	0 395
[0°/± 45°/0°]	8	800 0	116 0	146 2	21 2	0 96	.....
[0°/± 45°/0°/0°]	8	572 3	83 0	127 0	18 4	1 0	.....

Fuente: Engineering Materials Handbook, Vol 1 Composites, 1981 John A. Mc Ewen

Tabla 4.5 Resistencia de compresión de la fibra con el Aluminio SCS-2-AJ 47% de vol. de la fibra.

Dirección de la fibra	Capas	Carga		Esfuerzo		Módulo de tracción		Relación de Poisson
		N	lb	MPa	ksi	GPa	10 ⁶ psi	
0°	12	36000	8100	2647	383 9	.....	.....	.....
		38250	8600	2708	392 7	.....	.....	.....
		38700	8700	2739	397 3	.....	.....	.....
		40500	9100	2878	417 4	.....	.....	.....
		48900	11000	3296	478 0	212 4	30 8	0 241
90°	12	53100	11940	3689	535 0	222 7	32 3	.....
		4220	948	294 4	42 7	104 8	15 2	.....
		4380	985	300 6	43 6	116 5	16 9	0 174
		4270	960	294 4	42 7	.....	.....	.....
		4230	950	292 3	42 4	113 1	16 4	0 173
90°	40	3960	890	273 0	39 6	115 0	16 8	.....
		3780	850	259 2	37 6	124 1	18 0	.....
		13480	3030	293 7	42 6	.....	.....	.....
		14610	3285	294 4	42 7	131 7	19 1	0 136
		13280	2985	290 0	42 0	102 7	14 9	.....
13430	3020	287 5	41 7	108 6	15 8	.....	
13520	3040	294 4	42 7	115 1	16 7	.....	
13680	3075	297 2	43 1	142 0	20 6	0 158		

Fuente: Engineering Materials Handbook, Vol 1 Composites, 1981 John A. Mc Ewen

El material de matriz de Titanio se desarrolló para resistir más tiempo la exposición a temperaturas elevadas, y esto se observa en la tabla 4.6. En la tabla 4.7 sefala las propiedades de un material con matriz de Magnesio. y la tabla 4.8 corresponde a un material con refuerzos de esta fibra en una matriz de Cobre.

Tabla 4.6 Datos sobre la fibra y el Titanio SCS-6-TI.

	Resistencia máxima a la tracción		Módulo elástico		Deformación para falla, %
	MPa	ksi	GPa	10 ⁴ psi	
Propiedades Mecánicas del compuesto SIC-TI-6Al-4V (35% de vol.)					
Como fabricante					
Medio	1690	245	186.2	27.0	0.96
Desviación estándar	119.3	17.3	7.58	1.1	0.091
Después de calentarlo 7h a 905 °C (1660 °F)					
Medio	1434	208	190.3	27.6	0.86
Desviación estándar	108.9	15.6	8.3	1.2	0.087
Propiedades Mecánicas del compuesto SIC-TI-15V-3Sn-3Cr-3Al (38 a 41% de vol.)					
Como fabricante					
Medio	1572	228	197.9	28.7	.....
Desviación estándar	138	20	6.21	0.9	.....
Después de calentarlo 15h a 480 °C (900 °F)					
Medio	1951	283	213.0	30.9	.....
Desviación estándar	96.5	14	4.83	0.7	.....

Fuente: *Engineering Materials Handbook: Vol. 1 Composites*, 1991, John A. McEman

Tabla 4.7 Datos mecánicos sobre la fibra y el Magnesio SCS-Mg en un molde de barra.

Muestra No	Tiempo de exposición min	Resistencia máxima a la tracción		Deformación para falla, %	Módulo elástico		Fibra % de vol
		MPa	ksi		GPa	10 ⁴ psi	
VIR 67	5	1000	145	0.83	169.6	24.6	34
VIR 69	10	1524	221	0.88	209.6	30.4	46
VIR 72	10	1331	193	0.78	230.3	33.4	50
VIR 77	10	1379	200	0.95	180.6	26.2	37

Fuente: *Engineering Materials Handbook, Vol. 1 Composites*, 1991, John A. McEman

C) FIBRAS DE GRAFITO. Estos materiales son extremadamente resistentes, las fibras son largas y delgadas, están hechas de Carbono, su diámetro varía de 4 a 11 μm (160 a 430 μg) y están agrupadas en hilos que contienen de 500 a 4000 o más filamentos, se usa en matrices de Aluminio, Magnesio, Cobre, Plata, Estaño y Plomo. La tabla 4.9 indica las propiedades de esta fibra.

Tabla 4.8 Datos mecánicos sobre la fibra y el Cobre SCS-Cu.

Panel	Fibra % de vol.	Resistencia máxima a la tracción axial		Módulo axial	
		MPa	ksi	GPa	10 ⁶ psi
84 - 014	0.23	690	100	172.4	25.0
84 - 153	0.33	965	140	202.0	29.3
84 - 377	0.33	900	130	187.5	27.2

Fuente: *Engineered Materials Handbook, Vol. 1 Composites, 1991, David M. Goddard*

Tabla 4.9 Propiedades de las fibras de Carbono.

Tipo de fibra	Densidad gr/cm ³	Módulo de Young		Resistencia a la tracción		Conductividad térmica	
		GPa	10 ⁶ psi	GPa	10 ⁶ psi	W/m k	BTU pie/h pie ² °F
Alta resistencia	1.7 - 1.8	230 - 250	33 - 36	2.8 - 4.0	0.41 - 0.58	7.0 - 10.0	50 - 70
Última alta resistencia	1.7 - 1.8	260 - 290	38 - 42	4.1 - 5.7	0.59 - 0.83	7.0 - 9.0	50 - 60
Alto módulo	1.8 - 2.0	350 - 550	50 - 80	1.7 - 3.5	0.25 - 0.50	60 - 200	420 - 1400
Último alto módulo	2.0 - 2.2	600 - 900	90 - 130	2.1 - 2.5	0.30 - 0.36	400 - 2500	2800 - 17300
Bajo módulo	1.3 - 1.7	40 - 60	6.0 - 9.0	0.6 - 1.0	0.085 - 0.145	7.0 - 28.0	50 - 100

Fuente: *Engineered Materials Handbook, Vol. 1 Composites, 1991, David M. Goddard*

Para la fabricación del filamento se uso una amplia variedad de propiedades. La tabla 4.10 muestra las propiedades de estos sistemas.

Tabla 4.10 Propiedades del filamento del material compuesto.

	6061 - Al	AZ91 - Mg
Volumen de la fibra, %	50.2 +/- 2.0	54.3 +/- 2.0
Resistencia a la tracción promedio, MPa (ksi)	1385 ± 110 (201.0 ± 16)	1240 ± 90 (180.0 ± 13.0)
Módulo elástico promedio, GPa (10 ⁶ psi)	420 ± 25 (60.7 ± 3.4)	> 390 (>57)

Fuente: *Engineered Materials Handbook, Vol. 1 Composites, 1991, David M. Goddard*

A continuación se mencionan procesos de fabricación en los cuales se utilizan estas fibras como reforzamiento.

Mediante el proceso de pultrusión se obtienen tubos y otros perfiles de 13 a 50 mm, sus propiedades se ven en la tabla 4.11

Mediante el proceso de infiltración directa de metal se refuerza el Aluminio.

Mediante el proceso de fundición se obtienen partes de formas complejas que son fácilmente maquinables.

Tabla 4.11 Fabricación del tubo usando filamento LMI.

Configuración	Resistencia máxima a la tracción		Módulo de elasticidad		Grafto % de vol
	MPa	ksi	GPa	10 ⁶ psi	
19.1 mm (3/4 pig) diam., tres capas...	720	105	345	50	45
	676	98	345	50	45
	710	103	337	48	45
Promedio	703 + 20	102 + 3	338 + 7	49 + 1	45
1 pig de diam., dos capas	720	105	296	43	40
	703	102	283	41	40
	641	93	310	45	40
Promedio	690 + 34	100 + 5	296 + 14	43 + 2	40

Fuente: *Engineering Materials Handbook*, Vol. 1 Composites, 1981, David M. Goodhart

D) FIBRAS DE ÓXIDO DE ALUMINIO. Este es un compuesto muy importante en la industria automotriz, debido a sus características, por ejemplo su peso y su resistencia a las temperaturas elevadas. Las matrices donde se usa principalmente es en Aluminio y Magnesio, dándoles a éstos materiales excelente comportamiento al esfuerzo, rigidez y resistencia a la fatiga. En la tabla 4.12 se ven las propiedades físicas de estas fibras producidas por tres diferentes fabricantes.

Tabla 4.12 Propiedades de las Fibras de Óxido de Aluminio

Fibra	Composición %		Fuerza en fibras	Diámetro de la fibra		Densidad g/cm ³	Resistencia a la tracción		Elongación %	Módulo de tracción	
	Al ₂ O ₃	SiO ₂		µm	µm		MPa	ksi		GPa	10 ⁶ psi
Fibra #1	99.5		200	20	710	3.9	1560	2.30	0.4	360	55
Supina	85.0	15.0	390	17	670	3.2	1775	290	0.8	210	30
Saffir	98.0	2.0	380	3	1.20	3.3	2000	290	0.7	300	45

Fuente: *Engineering Materials Handbook*, Vol. 1 Composites, 1981, James C. Beatty

La figura 4.14 muestra el comportamiento de los tres compuestos cuyos datos aparecen en la tabla anterior, graficándolos en conjunto con metales sin fibras, para observar sus diferencias y se puede ver que el módulo específico en función de la temperatura de los materiales reforzados es mucho mayor, y la figura 4.15 muestra que el esfuerzo de tracción específico en compuestos reforzados se mantiene casi

constante al incrementarse la temperatura, mientras que en el caso de los metales sin refuerzo, empieza a decrecer antes.

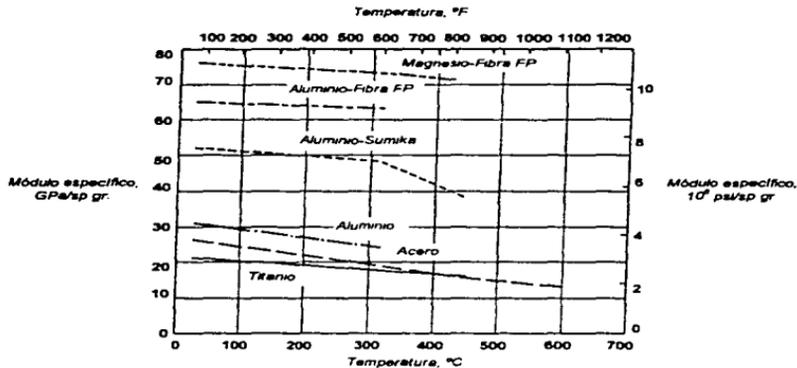


Fig. 4.14 Módulo específico en función de la temperatura.

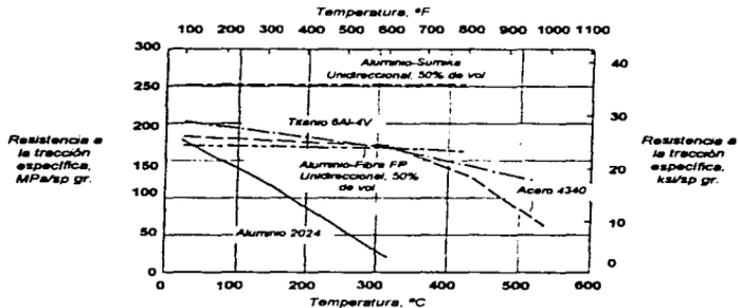


Fig. 4.15 Resistencia a la tracción específica en función de la temperatura.

E) FIBRAS DE TUNGSTENO. Estas fibras son muy importantes y se usan principalmente en la industria de la aviación, y de los cohetes espaciales, ya que no sólo proporcionan resistencia y rigidez, sino que además con ellas se logran materiales compuestos que tienen excelentes propiedades de resistencia a temperaturas elevadas, buena ductilidad y alta conductividad térmica.

Por sus buenas cualidades se les ha utilizado principalmente para reforzar superaleaciones y de esta manera se obtienen materiales compuestos que superan a cualquier material metálico monolítico.

Las fibras de Tungsteno comúnmente son mezclas que contienen otros materiales, tales como el Bióxido de Tono (W-ThO), el Hafnio (W-Hf-C), y el Renio (W-Re), y las matrices más usadas son Níquel, Acero y aleaciones de alta resistencia a la temperatura.

Para aplicaciones de intercambiadores de calor, también se usa el Cobre, Aluminio y Acero como matriz, lográndose buenos resultados. En los materiales compuestos reforzados con fibras de Tungsteno es importante la compatibilidad de la fibra con la matriz, ya que si no hay buena selección de esta combinación, el material puede fallar a temperaturas elevadas y esta falla es debido a la interacción de la fibra con la matriz. Dichas fallas pueden ser recristalización, fragilización de la fibra, y disolución de la fibra en la matriz.

La tabla 4.13 muestra el comportamiento de materiales compuestos reforzados con fibras de Tungsteno en diferentes matrices y a diferentes temperaturas de recocido, tratados durante una hora.

La temperatura de recristalización puede modificarse con la presencia de metales como: Paladio, Níquel, Aluminio, Magnesio, Platino, Hierro y Cobalto. Por ejemplo, para una matriz de Níquel, si le agregamos Tono, se incrementa a la temperatura de recristalización y si se le agrega Cromo disminuye la misma.

Tabla 4.13 Comparación del comportamiento de las fibras de Tungsteno en diferentes matrices.

Temperatura de recocido °C	°F	Matriz	No de composiciones investigadas	Número relativo de casos en, %			
				Recristalización	Compuesto intermetálico	No de recristalización	No de reacción
1200	2190	Base níquel	27	93	55	7	4
		Base cobalto	29	10	83	90	10
		Base hierro	30	3	30	97	70
1300	2370	Base níquel	27	95	63	4	4
		Base cobalto	19	21	84	79	10
		Base hierro	30	20	80	80	13

Source: Engineered Materials Handbook, Vol. 1 Composites, 1981, Crane M. Eickoff

4.3.3 FIBRAS DISCONTINUAS

Como se puede ver en la figura 3.3(b), estas fibras son tramos cortos distribuidos uniformemente en la matriz. Al tratar el tema de materiales reforzados con fibras discontinuas, es necesario hablar del término relación de aspecto que como ya se mencionó, es el cociente de la longitud entre el diámetro de la fibra. Entre mayor sea esta relación de aspecto, mayor será la resistencia del compuesto.

Los materiales compuestos de matriz metálica reforzados con fibras discontinuas son fabricados por procesos convencionales, tales como; extrusión, forja y rolado. Además tienen la ventaja que al maquinarse no pierden sus propiedades mecánicas ya que no se dañan las fibras en forma crítica. Hay tres clases de fibras discontinuas que son: fibras cortas, partículas y whiskers.

4.3.3.1 MMC REFORZADOS CON FIBRAS DISCONTINUAS CORTAS

Estas presentan las siguientes características:

- *No incrementan su resistencia a temperatura ambiente, sin embargo al aumentar la temperatura la resistencia se mantiene, como ejemplo esto se aprecia en la figura 4.16.*

- *El módulo de elasticidad se incrementa para todas las temperaturas, como ejemplo esto se ve en la figura 4.17.*

• El coeficiente de expansión térmica disminuye conforme aumenta el porcentaje de las fibras en la matriz, como ejemplo se ve en la tabla 4.14.

• La dureza del compuesto aumenta conforme el porcentaje de las fibras, apreciándose esto como ejemplo en la tabla 4.15.

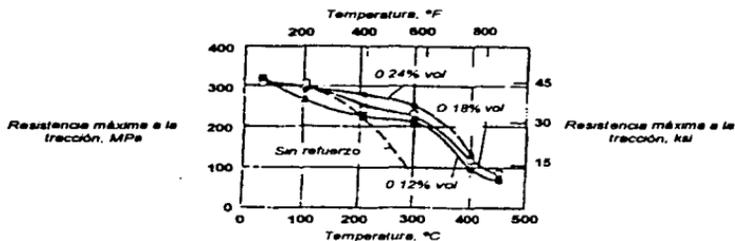


Fig. 4.16 Efecto de la temperatura sobre la resistencia máxima a la tracción del compuesto Al-9Si-3Cu.

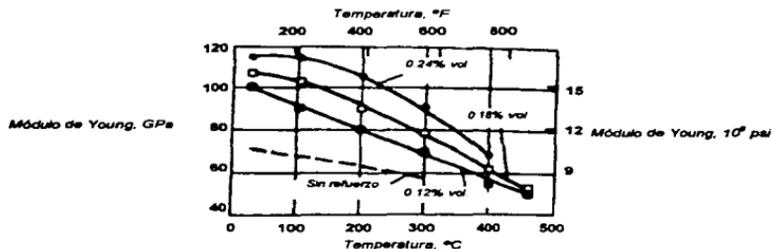


Fig. 4.17 Efecto de la temperatura sobre el módulo de elasticidad del compuesto Al-9Si-3Cu.

Tabla 4.14 Coeficiente de dilatación térmica.

Fibra % de vol.	(en plano) $10^{-6}/K$	(normal) $10^{-6}/K$
0	2.03	2.03
0.12	1.66	1.76
0.18	1.54	1.66
0.24	1.55	1.57

Tabla 4.15 Valor de dureza a 25 °C (80 °F).

Fibra % de vol.	Dureza Vickers No., HV10
0	131
0.12	179
0.18	190
0.24	212

Fuente: *Engineered Materials Handbook, Vol. 1 Composites*, 1991, William C. Hwang

4.3.3.2 **PPC REFORZADOS CON FIBRAS DISCONTINUAS TIPO PARTÍCULAS**

Uno de los materiales para este tipo de refuerzo es el Carburo de Silicio en matriz de aleación de Aluminio. Al mezclar el esfuerzo con la matriz se obtienen uniformes en dirección transversal y longitudinal siendo muy homogéneo el compuesto. La respuesta a los tratamientos térmicos es más rápida comparada con el material de la matriz. Los valores del módulo de elasticidad es función del porcentaje de refuerzo en volumen.

En la figura 4.18 se ve la curva de esfuerzo - deformación, donde se comparan los resultados obtenidos de un material reforzado, contra el material de la matriz, de donde se observa la gran diferencia, mientras la matriz sola cede a los 280 MPa el compuesto reforzado cede a los 380 MPa.

Una gran ventaja que tienen estos compuestos es la gran ductilidad, a diferencia de los compuestos reforzados con fibras continuas, llegando a ser hasta 10 veces mayor, decreciendo dicha ductilidad conforme aumenta el porcentaje de refuerzo en volumen.

En cuanto al coeficiente de expansión térmica, en estos compuestos al incrementar el porcentaje de refuerzo, dicho coeficiente disminuye y esto se observa en la figura 4.19.

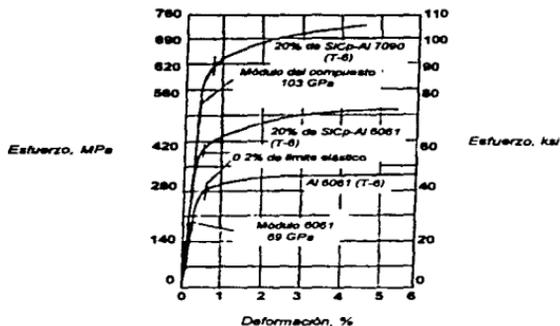


Fig. 4.18 Curvas esfuerzo - deformación para los compuestos de Aluminio 8081 y 7090 con un 20% de vol. de SICp.

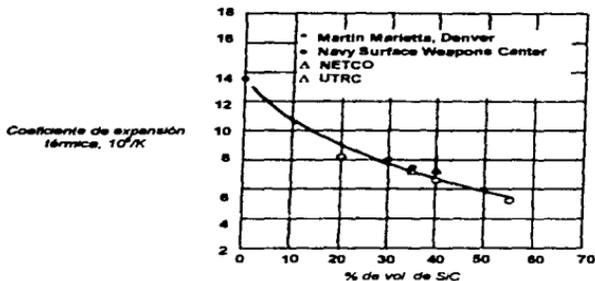


Fig. 4.19 Coeficiente de expansión térmica en función del porcentaje de refuerzo de un compuesto Aluminio - SIC.

4.3.3.3 MMC REFORZADOS CON FIBRAS DISCONTINUAS TIPO WHISKERS

La obtención de materiales compuestos con Whiskers es efectuada mediante procesos convencionales. Estos compuestos consisten en una distribución homogénea de las fibras a través de toda la matriz, su comportamiento mecánico es anisotrópico y existe posibilidad de fabricar piezas complicadas, lo que se traduce en una reducción final de costos.

Este reforzamiento produce alta resistencia al esfuerzo de tracción, superado a los refuerzos discontinuos vistos previamente. Esta fibra tiene una relación de aspecto de entre 50 a 150. Pueden ser fabricadas de Hierro, Níquel, y Cobre o de materiales cerámicos como el Óxido de Aluminio, Grafito, Sílice, Nitruros y Carburo de Silicio.

El material más común para esta fibra es el Carburo de Silicio que se produce con buena calidad a un costo razonable. Las matnces más usadas son: Aluminio, Magnesio, Titanio y Cobre. Siendo seleccionada para cada uso, considerando aspectos tales como; peso, resistencia, rigidez, resistencia a las temperaturas elevadas y conductividad térmica y sobre todo la compatibilidad física y química. Las características de estos compuestos son; alta resistencia al esfuerzo, alta rigidez, estabilidad dimensional, gran resistencia a la fatiga a temperaturas elevadas.

La tabla 4.16 compara las propiedades de un material sin refuerzo con otro reforzado con Whiskers.

Tabla 4.16. Propiedades de materiales estructurales con y sin reforzamiento con Whiskers.

Tipo de material	Resistencia máxima a la tracción		Límite elástico		Elongación %	Módulo de Young		Coeficiente de expansión térmica		Densidad gr/cm ³
	MPa	ksi	MPa	ksi		GPa	10 ⁶ psi	10 ⁻⁶ /°C	10 ⁻⁶ /°F	
Z124 - 78	482	69.9	448	64.9	7.0	74.4	10.8	22.9	2.77	
Z124 - 78 - 20% de vol de SiC Whiskers	856	24.0	497	72.0	3.4	127.0	18.4	13.0	2.86	
ZK80A - 78	365	52.9	303	43.9	11.0	44.8	6.49	24.3	1.83	
ZK80A - 78 - 20% de vol de SiC Whiskers	813	88.9	517	74.9	1.2	96.5	13.9	14.4	2.71	

Fonte: Ingénieur General Motors, Vol. 1 Composites, 1991, John L. Calk

Las figuras 4.20 y 4.21 muestran el comportamiento de un material con y sin refuerzo en cuanto a su resistencia y al módulo elástico en función de la temperatura.

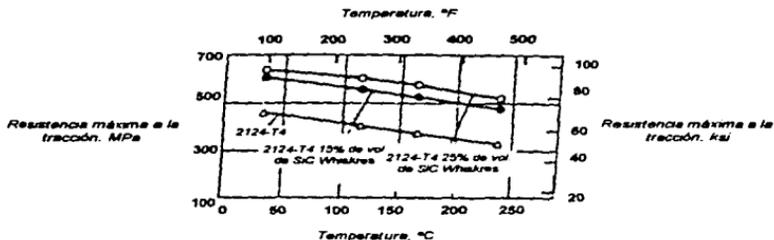


Fig. 4.20 Comportamiento de la resistencia a la tracción a diferentes temperaturas, de diferentes aleaciones de Aluminio con y sin reforzamiento, en una prueba a 100 h de exposición.

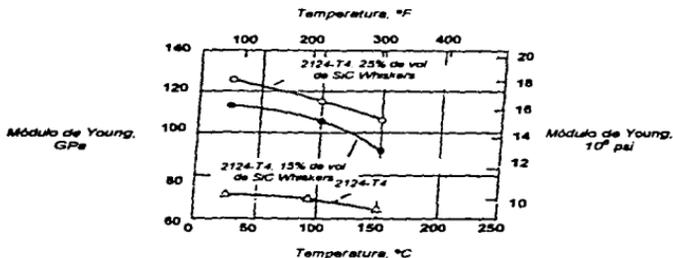


Fig. 4.21 Comportamiento del módulo a diferentes temperaturas, de aleaciones de Aluminio con y sin reforzamiento en una prueba a 100 h de exposición.

4.4 FABRICACIÓN DE LAS FIBRAS

En esta parte se describen en forma breve los métodos generales de obtención de fibras continuas que también se utilizan para las discontinuas con la diferencia de que para este caso se agrega un proceso de corte de las fibras.

El cuadro siguiente indica el tipo de fibras así como su proceso de fabricación.

Fibras	Proceso de fabricación
Continuas	Boro <i>Deposición química de vapores (C.V.D.)</i>
	Carburo de Silicio <i>Deposición química de vapores (C.V.D.) Pirólisis</i>
	Grafito <i>Pirólisis</i>
	Óxido de Aluminio <i>Fundición</i>
	Tungsteno <i>Trefilado</i>
Discontinuas	<i>Pirólisis</i>

A) DEPOSITACIÓN QUÍMICA DE VAPORES.

La fibra de Boro se produce por dos métodos basados en la deposición química de vapores, uno es de descomposición térmica de Boro hidruro, en el cual se usa Carbono como sustrato, dando como resultado una fibra débil. El otro método es el de reducción de Boro halide. En este proceso tiene lugar la siguiente reacción química:



Donde X mayúscula denota un halógeno que puede ser: Cloro, Bromo, o Yodo.

Debido a que en este proceso la temperatura que se maneja es muy alta, se necesita como sustrato un material resistente a temperaturas elevadas y esto se logra con el Tungsteno.

La obtención de la fibra se logra en un reactor que puede ser vertical u horizontal, donde por un extremo entra el hilo de Tungsteno y pasa a través de un sello de mercurio al inicio y al final de cada capa, este sello sirve como contacto eléctrico, ya que la deposición de los vapores de Boro en el filamento de Tungsteno se logra por que éste está en estado incandescente. Es decir, el hilo de Tungsteno actúa como una resistencia eléctrica. El proceso puede ser de una o varias etapas, en la figura 4.22 se ve un reactor de tres etapas donde se utiliza el hidrógeno como reductor.

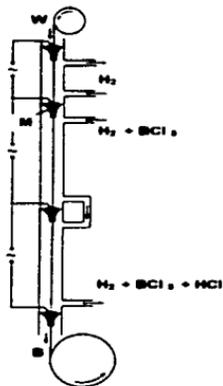


Fig. 4.22 Esquema de la producción de la fibra de Boro por descomposición de helido sobre un sustrato de Tungsteno.

Debido a que en este proceso la temperatura que se maneja es muy alta, se necesita como sustrato un material resistente a temperaturas elevadas y esto se logra con el Tungsteno.

La obtención de la fibra se logra en un reactor que puede ser vertical u horizontal, donde por un extremo entra el hilo de Tungsteno y pasa a través de un sello de mercurio al inicio y al final de cada capa, este sello sirve como contacto eléctrico, ya que la deposición de los vapores de Boro en el filamento de Tungsteno se logra por que éste está en estado incandescente. Es decir, el hilo de Tungsteno actúa como una resistencia eléctrica. El proceso puede ser de una o varias etapas, en la figura 4.22 se ve un reactor de tres etapas donde se utiliza el hidrógeno como reductor.

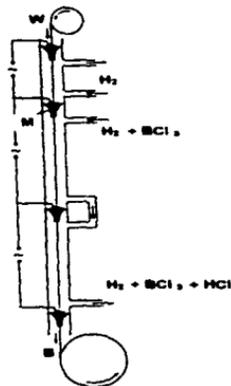


Fig. 4.22 Esquema de la producción de la fibra de Boro por descomposición de halide sobre un sustrato de Tungsteno.

La fibra de Carburo de Silicio también se puede obtener por este proceso, y esto se lleva a cabo en un reactor como el mostrado en la figura 4.23, en donde observamos que el sustrato, o sea el filamento inicial que puede ser Tungsteno o Carbono se introduce al reactor por la parte superior a través de un sello de mercurio y atraviesa al reactor que contiene una mezcla de gases con 70% de hidrógeno y 30% de alquitrán. El filamento ya recubierto sale por la parte inferior también a través de otro sello de mercurio que al igual que en el ejemplo anterior sirven de contactos eléctricos, y haciendo pasar por ellos una corriente de 250 mA, consiguiendo que el filamento alcance los 1300 °C. El diámetro final del filamento es de 100 µm.

En la parte inferior del reactor se tiene la salida de los gases de escape que son enviados a un condensador para recuperarlos y de este modo reducir considerablemente el costo de producción. La reacción química que tiene lugar es la siguiente:

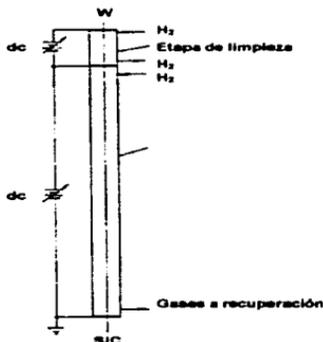


Fig. 4.23 Proceso de deposición química de vapores para producir la fibra de Carburo de Silicio.

B) PIRÓLISIS.

Las fibras de Grafito se pueden obtener a partir de diferentes precursores, por ejemplo; Poliacrilonitrilo (PAN), Rayón, Alquitrán, Polivinilalcohol, Polimidas y Fenoles. Independientemente de cual precursor se utilice el proceso es el mismo y cuenta con 3 etapas: estabilización, carbonización y grafitación.

- La estabilización se hace a 250 °C y la finalidad de esta etapa es alinear las moléculas para que la fibra resista las subsecuentes etapas a temperaturas elevadas.

- La carbonización consiste en aplicar calor hasta aproximadamente 1000 o 1500 °C para eliminar impurezas del carbono.

- Por último viene la etapa de grafitación, que se lleva acabo a 3000 °C y con esto se alcanzan las propiedades finales de la fibra.

La figura 4.24 muestra este proceso.

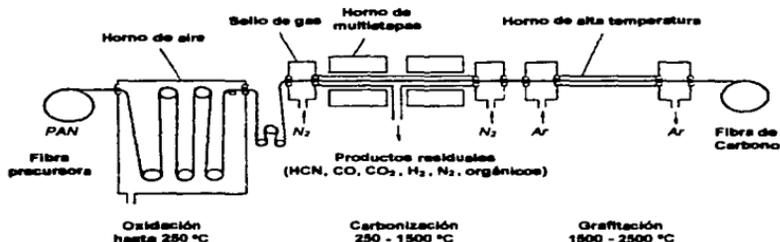


Fig. 4.24 Esquema de la producción de la fibra de Carbono.

C) FUNDICIÓN

Para la fabricación de la fibra de Óxido de Aluminio se utiliza este método que consta de los siguientes pasos:

- Se forma una mezcla acuosa con polvo de Óxido de Aluminio, agua y aditivos.*
- Se gradúa la viscosidad de la mezcla adecuando la cantidad de agua en la misma.*
- Se forma la hebra, se seca y se enrolla.*
- Se pasa por una flama tenue para que tome su longitud definitiva.*
- Se pasa por una flama más intensa para adecuar su densidad.*
- Se le agrega una capa de sílice para mejorar su superficie, que le ayuda para subsecuentes procesos e incrementa su resistencia a la tracción.*

D) TREFILADO.

Las fibras de Tungsteno se obtienen por el proceso de trefilado que es un proceso continuo, que mediante un dado se va reduciendo la sección transversal de un filamento de diámetro mayor.

Los dados normalmente son de rubí o de diamante artificial, por requerirse diámetros muy pequeños. Entre una y otra etapa de reducción hay cajas de engrase para impregnar el filamento y así se deslice mejor, y también entre etapas hay procesos de recocido para devolverle la ductilidad al filamento que se está formando, ya que se pierde al paso por cada trefila.

4.5 MATERIALES COMPUESTOS DE MATRIZ METÁLICA (MMC) LAMINADOS

Un compuesto laminar es la unión de dos o más capas o pliegues individualmente unidireccionales que se colocan de manera que se obtengan las propiedades físicas y mecánicas requeridas. Estos compuestos son anisotrópicos, a excepción de algunos que son casi - isotrópicos que tienen un arreglo especial que se verá más adelante. La finalidad de fabricar estos compuestos es para obtener características tales como: resistencia a la corrosión, bajo peso, resistencia al desgaste o abrasión, mejor apanencia y expansión térmica particular para usos definidos con costos reducidos.

Los espesores de las capas varían desde recubrimientos muy delgados hasta placas de considerable espesor, así mismo las formas pueden ser variables como se muestra en la figura 4.25, donde se ven algunas de ellas, por ejemplo la de escalera o la de rampa.

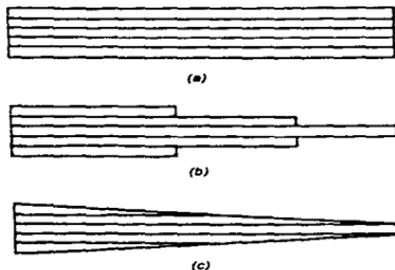


Fig. 4.25 Formas de laminados: (a) Capas uniformes, (b) Escalonadas, (c) Tipo rampa.

Por la colocación de las capas y la dirección de las fibras pueden darse los siguientes casos que se indican con sus nombres respectivos.

A) *Laminados simétricos.* Esto es cuando existen capas idénticas en material y en espesor por ambos lados de una capa central, ver figura 4.26(a).

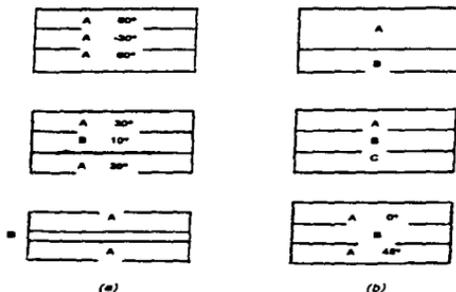


Fig. 4.26 Laminados. (a) Simétricos. (b) Asimétricos, donde A, B, y C indican material. ($^{\circ}$), indica la orientación de las fibras en cada capa.

B) *Laminados asimétricos.* Cuando no se localiza una capa central que se pueda tomar como referencia, alrededor de la cual haya capas idénticas por ambos lados, ver figura 4.26(b).

C) *Capas paralelas.* Cuando las fibras de las diferentes capas están alineadas, el espesor y el material pueden ser arbitrarios, ver figura 4.27(a).

D) *Capas con fibras fuera del eje.* Cuando las fibras de las diferentes capas tienen un ángulo diferente a 0° , el espesor y el material pueden ser arbitrarios, ver figura 4.27(b).

E) *Capas cruzadas.* Cuando hay 90° entre la dirección de las fibras de capas adyacentes, el espesor y el material debe ser idéntico, ver figura 4.28.

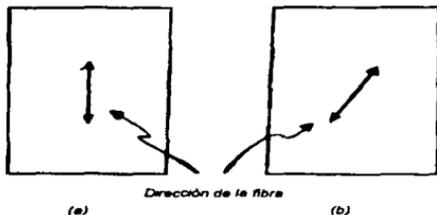


Fig. 4.27 (a) Capas paralelas. (b) Capas con fibras fuera del eje.

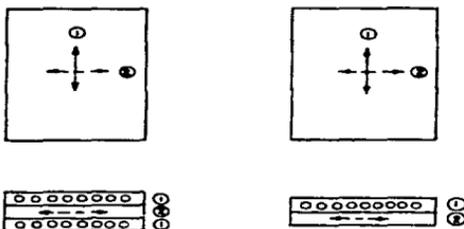


Fig. 4.28 Capas cruzadas.

F) Capas con fibras en ángulos iguales. Estos materiales laminados consisten en N capas con espesores y materiales iguales, pero con orientaciones de sus fibras entre capas adyacentes de $+\theta$ y $-\theta$ alternadamente, ver figura 4.29.

G) Laminados casi - isotrópicos. Este tipo de conformación de capas se comporta aproximadamente en forma isotrópica, y para hacer este tipo de compuesto, se necesita cumplir con las siguientes reglas:

- El número de capas debe ser 3 o más.
- Cada capa debe tener igual coeficiente elástico y espesor.
- Las fibras de cada capa deben ser orientadas según la siguiente ecuación:

$$\theta_k = \pi(k - 1)/S$$

Donde k es el orden de la capa en el conjunto, S es el número total de capas del conjunto.

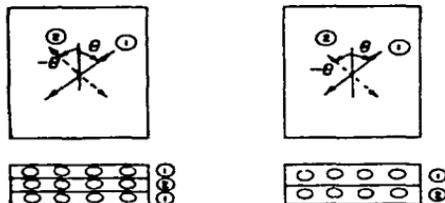


Fig. 4.29 Capas en ángulo.

La figura 4.30 muestra algunos ejemplos de estos arreglos.

Se dan también otros tipos de materiales laminados como los de la figura 4.31, donde se muestra en (a) una placa, la cuál está cubierta a su alrededor por una capa delgada de otro material, en (b) se aprecia una placa que tiene un barreno, y alrededor de este se le ha puesto un refuerzo, y en (c), (d) y (e) se observan placas con refuerzos de diferentes formas.

Hay un tipo especial de compuesto laminar que es el de forma de sandwich, el cual consiste normalmente de una capa central de material ligero y suave y una o más recubriendo esta capa central. La figura 4.32 muestra diferentes tipos de

sandwich y observamos en (a) uno de tres capas cuya capa central es de material ligero y suave y las capas superficiales son de características adecuadas al uso; en (b) se ve un sandwich de dos capas, una que puede ser gruesa y la superficial que normalmente es delgada, por último en (c) se ve un sandwich múltiple, cuyas capas se conforman según las necesidades.

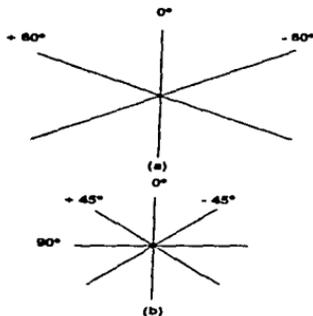
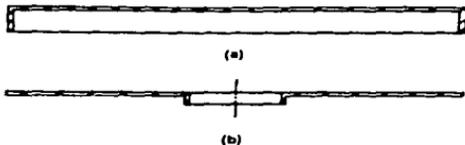


Fig. 4.30 Ejemplos de laminados casi - isotrópicos con: (a) $S = 3$; (b) $S = 4$.



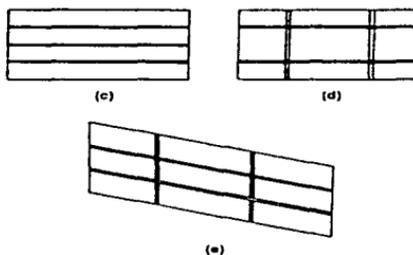


Fig. 4.31 (a) Vista en corte de una placa con refuerzo superficial, (b) Vista en corte de una placa con refuerzo alrededor de un barreno, (c), (d), y (e) Vista en planta de placas con diversos refuerzos.

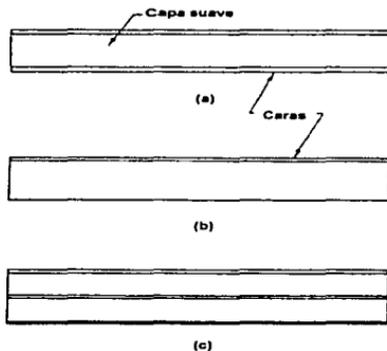


Fig. 4.32 Tipos sandwich: (a) ordinario, (b) una cara, y (c) múltiple.

4.6 FABRICACIÓN DE LOS MMC

A continuación se presenta un cuadro donde en la primera columna se enlistan los tipos de reforzamiento, y en la segunda columna sus procesos de fabricación más comunes.

<i>Tipo de reforzamiento</i>	<i>Proceso de fabricación</i>
<i>Con partículas</i>	<i>Metalurgia de polvos</i>
	<i>Unión por difusión</i>
	<i>Unión por difusión</i>
	<i>Unión por difusión</i>
<i>Con fibras continuas</i>	<i>Pultrusión</i>
	<i>Fundición</i>
	<i>Fundición</i>
	<i>Metalurgia de polvos</i>
<i>Con fibras discontinuas</i>	<i>Unión por difusión</i>
	<i>Fundición</i>
	<i>Metalurgia de polvos</i>
	<i>Fundición</i>
<i>Laminados</i>	<i>Forja</i>
	<i>Extrusión</i>
	<i>Rolado</i>
	<i>Coextrusión</i>
	<i>Soldadura por explosión</i>
<i>Soldadura blanda</i>	

A continuación se describirán cada uno de los procesos de fabricación mencionados en el cuadro anterior, su descripción se hará en forma genérica, teniendo ligeras variantes para cada aplicación específica.

A) METALURGIA DE POLVOS:

Como ya se mencionó es la formación de piezas a partir de polvos metálicos unidos dentro de una matriz, sometida a elevada presión y temperatura. La presión varía entre 3000 y 11000 Kg/cm² y la temperatura es de aproximadamente de 70% del punto de fusión del metal o del compuesto. Las ventajas de este proceso son:

- No se desperdicia el material.*
- Normalmente no se requieren maquinados posteriores.*
- La mano de obra es semicalificada.*
- Se logran propiedades únicas tales como la porosidad controlada, que sirve para obtener cojinetes autolubricados.*
- Son posibles mezclas que no se pueden obtener en la fundición.*
- Es el único método con el que se trabajan metales de alto punto de fusión.*

Hay 4 etapas en la fabricación por este método, como ya se mencionó.

- Producción de polvo metálico fino.*
- Mezcla y preparación del polvo para su utilización.*
- Prensado del polvo con la matriz deseada.*
- Calentamiento (sinterizado) para el enlace por difusión.*

Las piezas así obtenidas generalmente son de menos de 2 pulgadas de tamaño.

B) UNIÓN POR DIFUSIÓN.

Es un proceso de fabricación en el cual parte de las fibras preformadas se realizan, por ejemplo, la fabricación de materiales compuestos por este método con fibras de Boro, se hace con filamentos cuyo núcleo es el Tungsteno o de Carbono, y recubierto con B₄C mediante un proceso de esprayado.

A estas fibras se les arregla en forma de capas y se les coloca en los lados una láminas que son la matriz, dando como resultado un arreglo tipo sandwich al que posteriormente se le aplica calor y presión durante un tiempo dándose la unión por difusión entre las fibras y la matriz. Esto se ve en la figura 4.33.

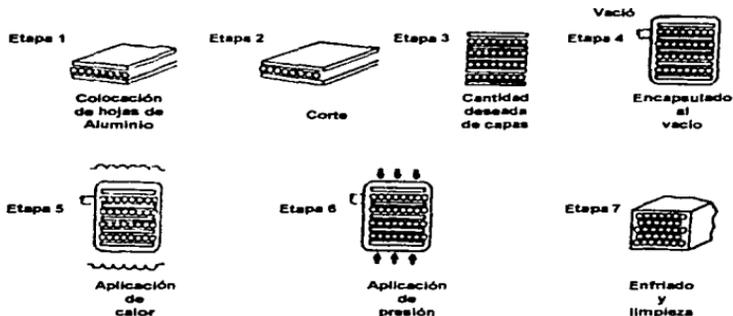


Fig. 4.33 Proceso de fabricación de un compuesto de Aluminio - Boro.

Para el caso de las fibras de Carburo de Silicio, el proceso puede hacerse según indica la figura 4.34, el material preformado son unas láminas de Titanio que

contienen las fibras, en seguida se les coloca en los dados, que les proporcionan la temperatura y presión necesarias para la unión por difusión, además de que también les dan la forma de la pieza que se requiere, por ejemplo en el caso de la figura es una hoja de un compresor.

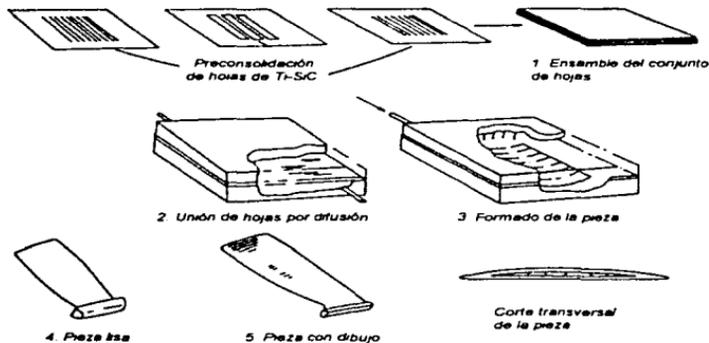


Fig. 4.34 Proceso de fabricación de Titanio reforzado con fibras de Carburo de Silicio.

Cuando se va a usar fibra de Grafito, estos hilos son calentados a 700 °C y pasados a través de vapores de tricloruro de Titanio y tetracloruro de Titanio, formándosele a su alrededor una capa que a su vez facilita la depositación de otra capa ahora de Aluminio o Magnesio que es la matriz. La figura 4.35 muestra el esquema de al proceso anterior conocido como Chemical Vapor Deposition (CVD).

Una vez teniendo los filamentos formados, éstos se colocan según el espesor que se desee obtener y con la orientación deseada, se les aplica calor y presión durante un tiempo apropiado, obteniéndose así la unión por difusión.

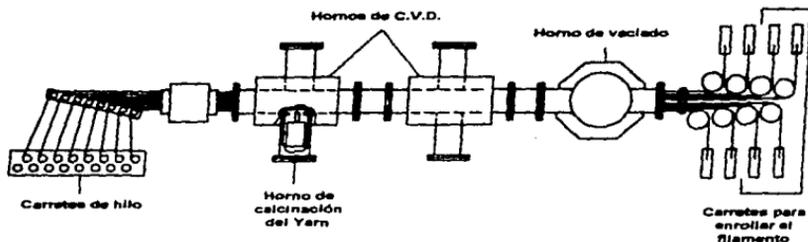


Fig. 4.35 Proceso de deposición química de vapores.

C) PULTRUSIÓN.

Es un proceso de fabricación continuo que consiste en una máquina que tiene una matriz o dado que es el que le va dando la forma al material compuesto.

Con este método se producen piezas de sección constante con alta orientación de las fibras, es un proceso barato y versátil. La velocidad de producción normalmente es de 1.2 m/min.

El equipo consta de 6 estaciones: Alimentadores de material (fibras y matriz), área para impregnación de fibras, fundas de calor, mecanismos de sujeción y avance, elementos de corte y estación de chequeo. La figura 4.36 muestra un esquema de un proceso de pultrusión.

D) FUNDICIÓN.

Como es conocido este proceso en el cual el material se calienta hasta su fase líquida y se vacía en moldes apropiados. Este proceso es propio para materiales compuestos reforzados con fibras continuas y es recomendable para fabricar piezas de forma compleja, piezas de considerable espesor y para orientar las fibras en varias direcciones. Es adecuado para los refuerzos con fibras continuas

debido a que durante el proceso no se aplica presión, por lo tanto las fibras no sufren daño. La figura 4.37 muestra las diferentes técnicas para llevar a cabo el moldeo.



Fig. 4.36 Proceso de pultrusión.

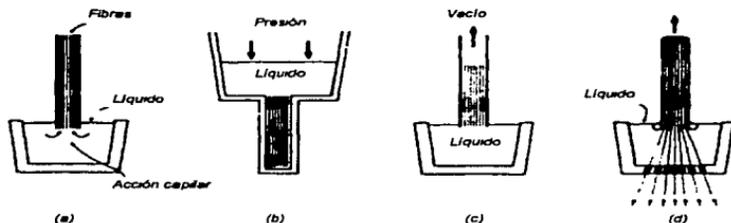


Fig. 4.37 Técnicas para la producción de materiales compuestos, (a) por capilaridad, (b) por presión, (c) por infiltración al vacío, y (d) por colada continua.

En la figura 4.37(a) se ve como el metal fundido cubre todos los huecos entre las fibras debido al efecto de capilaridad.

En la figura 4.37(b) se nota que para evitar poros en el compuesto final, se aplica una presión sobre el metal líquido para forzarlo a introducirse en todos los

espacios entre las fibras que en este caso previamente se les puede acomodar como se desee.

En la figura 4.37(c) el metal se hace que penetre en los espacios libres mediante la succión.

Por último en la figura 4.37(d) se muestra un proceso continuo de colado.

Es común que se agregue una pequeña cantidad de Litio para asegurar el mojado de las fibras y así obtener un compuesto final libre de porosidades.

E) FORJA.

Es un proceso de deformación plástica de un metal que puede o no calentarse antes de darle forma a través de presión o golpe. Durante el formado, la estructura se alinea a la forma de la pieza por lo que se obtienen excelentes propiedades de resistencia a la tracción y al impacto. En muchos casos no son necesarios procesos posteriores de maquinado debido a que el acabado y las dimensiones son aceptables, lográndose con esto economía en material y tiempo de máquina y quedando listo sólo para algún tratamiento térmico final.

Para piezas de alta resistencia o precisión en la industria automotriz, aviación, construcción y maquinaria en general, frecuentemente es el primer paso de fabricación por razones económicas.

La selección de la máquina con la cual se va a realizar el forjado, es en función del material, siendo adecuado el impacto cuando dicho material permite deformación rápida y usándose la presión cuando la deformación debe ser lenta. La deformación del material se va logrando por medio de doblado, estirado, adelgazado y recalado.

Se usan dos tipos de matrices para el proceso de forja que son; las cerradas y las abiertas. En las matrices abiertas la fuerza se aplica localmente por lo que el

trabajo es progresivo, y en el caso de matrices cerradas, la fuerza se aplica a toda la pieza y se le obliga a rellenar todas las cavidades de la matriz en una sola etapa. Entre las piezas obtenidas con este proceso están las bielas para motores, fabricadas con matrices de Aluminio o Magnesio reforzadas con fibras de Carburo de Silicio u Óxido de Aluminio.

F) EXTRUSIÓN.

Es un proceso de formado de metales que parte de un tocho y por medio de la compresión de un pistón sobre el material alojado en una caja, lo fuerza a salir a través de una boquilla que tiene la forma del perfil deseado. El producto siempre será de sección uniforme.

La extrusión puede ser en frío o en caliente. Cuando es en caliente se manejan temperaturas entre 300 y 2200 °C. Ventajas de este proceso:

- Este proceso se caracteriza por obtener mayor deformación que cualquier otro proceso en una etapa, consiguiéndose relaciones de entre 10 y 60 a 1.*
- Se pueden trabajar metales frágiles que no soportan otros procesos.*
- Se obtienen gran variedad de configuraciones reemplazando conjuntos que con otros procesos se lograría a base de una serie de subensambles como los mostrados en la figura 4.38.*
- Las matrices son sencillas y económicas.*
- Es posible fabricar pequeños lotes de piezas sin representar altos costos.*

También se puede efectuar la extrusión en frío consiguiéndose la plasticidad del material por medio de altas presiones, las piezas así obtenidas son económicas y la producción puede ser elevada.

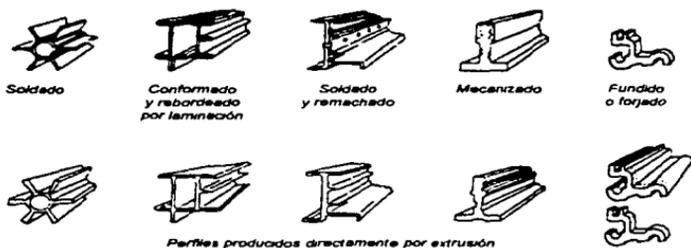


Fig. 4.38 Ejemplos de mejora de diseños estructurales posibles con la extrusión.

G) ROLADO.

A este proceso también se le conoce como laminado y consiste en hacer pasar entre dos rodillos que giran en sentido opuesto, un material que previamente ha sido calentado. Debido a que el rolado es un proceso terminal para muchos materiales, el calentamiento debe ser uniforme para obtener una deformación con tolerancias dimensionales adecuadas y para evitar rupturas o desgarros. Con este proceso se puede unir una amplia variedad de materiales en forma de lámina, dicha unión se forma a base de calor y presión.

En la figura 4.39 se observa un material compuesto con el núcleo de acero inoxidable y las caras superficiales de láminas de acero al Carbono, los cordones de soldadura que se ven en la periferia son usados para proteger el compuesto de la oxidación durante el calentamiento, y una vez que ha terminado el proceso, éstos son eliminados por un proceso de corte, quedando listo el compuesto para algún otro proceso como, el templado, abrillantado, etc.

H) COEXTRUSIÓN.

Es un proceso similar al laminado para materiales compuestos y la diferencia con el proceso de extrusión es que el producto obtenido está formado por dos capas

como se muestra en la figura 4.40, siendo el núcleo de un material y el recubrimiento de otro y la unión entre ellos se logra por difusión.

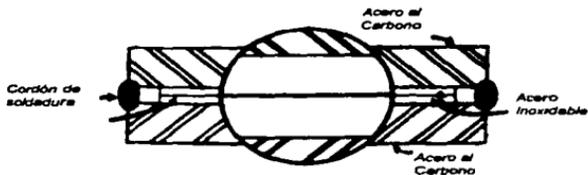


Fig. 4.39 Corte transversal de un compuesto fabricado por roledo.

Es un proceso adecuado para la fabricación continua del filamento hecho de Cobre, cubierto con Aluminio, también se pueden fabricar barras y formas rectangulares.

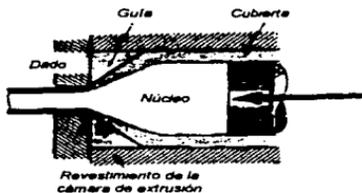


Fig. 4.40 Esquema del proceso de coextrusión.

1) SOLDADURA POR EXPLOSIÓN.

Es otro método de unión de láminas de materiales diferentes, siendo la única forma de unión de algunas combinaciones de materiales. Es un proceso rápido y económico.

La figura 4.41 muestra como se efectúa este proceso y para efecto de compresión esta figura es sólo un esquema ilustrativo. Se colocan dos placas: una inferior y una superior, la inferior está firme y la superior es volante, es decir, hay un espacio entre ellas; sobre la placa superior se coloca una capa de material explosivo. La unión entre las placas se logra mediante la presión producida por la explosión que es progresiva y llega a alcanzar una presión de 1.4×10^8 psi.

En la realidad la colocación de la placa superior debe tener un ángulo apropiado. Con este método se han llegado a unir 200 láminas en una sola operación.

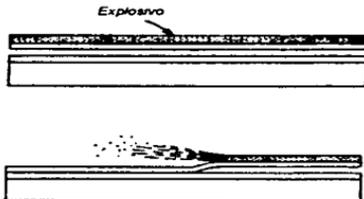


Fig. 4.41 Esquema de soldadura para explosión.

J) SOLDADURA DE BAJA TEMPERATURA.

Este método de unión de láminas o filamentos consiste en usar una aleación adecuada con los materiales que se van a unir, de baja temperatura de fusión, llevarla a su fase líquida y vaciarla entre los materiales a unir. Por ejemplo, los filamentos de Cobre con Latón o Estaño.

4.7 APLICACIONES DE LOS MATERIALES COMPUESTOS DE MATRIZ METÁLICA (MMC)

A continuación se presentan en forma tabulada las aplicaciones generales de estos materiales indicando también el tipo de refuerzo y los materiales que intervienen en el compuesto.

Tipos de refuerzo		Materiales	Aplicación
Con Partículas	Endurecidos por dispersión	Ag - CdO	Contactos eléctricos
		Al - Al ₂ O ₃	Reactores nucleares
		Be - BeO	Aeroespacial y nuclear
		Co - ThO ₂ , Y ₂ O ₃	Materiales Magnéticos resistentes a la termofluencia
		Ni - 20%Cr - ThO ₂	Componentes para turbomotores
		Pb - PbO	Rejillas para baterías
	Propiamente dichas	Pb - ThO ₂	Fierros para componentes eléctricos
		W - ThO ₂ - ZrO ₂	Filamentos calefactores
		WC, Co, Ti, C	Herramienta de corte
Fibras Continuas	Boro	Al	Estructuras de cohetes especiales
		Al	Estructuras de plataformas de lanzamiento de cohetes
		Al	Dispersores de calor de microchips
		Al	Cubiertas de alas de aviones
	Carburo de Silicio	Al	Bestidores de bridas
		Ti	Cubiertas para proyectiles
		Ti	Partes para turbinas
		Ti	Hojas huecas para hélices
	Cu	Cubiertas para misiles	
	Bronce	Hélices para aplicaciones navales	

Tipo de refuerzo	Materiales	Aplicación
Fibras Continuas	Grafito [Al	Tubos de pared delgada
	[Al	Antenas de alta ganancia
	Óxido de Aluminio [Al	Pistones
	[Cu	Aplicaciones en criogenia Enfriadores para motores de cohetes espaciales
Tungsteno	Ni	Partes para turbinas de avión
Fibras Discontinuas	Coria Al con (SiC)	Pistones
	Partículas [Al con (SiC)	Tubos y placas
	[Al con (SiC)	Bolas
	Whiskers Al con (SiC)	Estructuras de aviones y naves espaciales
Laminados	Aldeal	Estructuras de aviones
	Cu - Acero inox	Cubiertas para edificios
	Cu - Al	Alambre
	Ti - Acero	Equipo para procesos químicos
	Cu - Zn	Casquillos de bolas
	Cu - Ni	Monedas
	Ni-Cu - C - Fe	Armaduras de proyectiles
	Al - Acero	Estructuras naves
	Al, Mg, Zr, Ni, Be, Nb, V, Grafito y Acero inox	Reactores nucleares
	Ni, Cr, Fe, Mn, Mo, Bronce, Monel	Amplia variedad de termostatos

CAPÍTULO V

MATERIALES COMPUESTOS DE MATRIZ METÁLICA (MMC) EN LA INDUSTRIA AUTOMOTRIZ

CAPÍTULO V

MATERIALES COMPUESTOS DE MATRIZ METÁLICA (MMC) EN LA INDUSTRIA AUTOMOTRIZ

5.1 INTRODUCCIÓN

El desarrollo de una familia de nuevos materiales como lo son los materiales compuestos, los cuales son diseñados para aumentar los límites de propiedades relativas a las presentes condiciones cada vez más severas, como son: propiedades específicas, fatiga, condiciones de temperaturas y estabilidad térmica.

Existen muchos materiales en desarrollo, uno de los que más promete es el compuesto Carbono - Carbono y sistemas Compuestos de Matriz Metálica, que debido a sus propiedades complejas son difícil de procesar, un diseño eficiente para que soporte varias cargas se puede evaluar por las pruebas no destructivas.

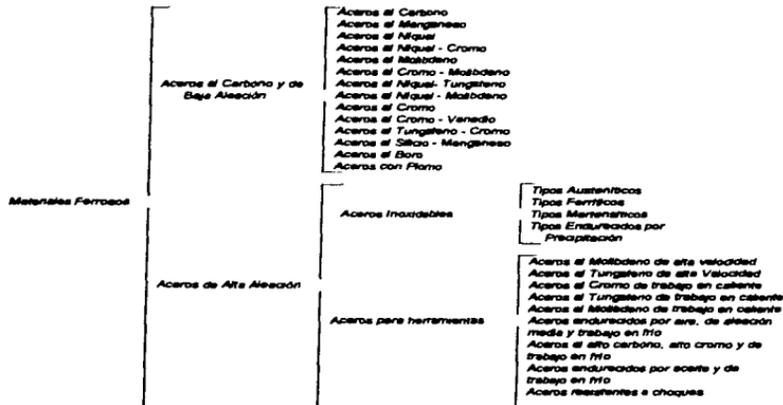
Debido a la dificultad para proteger los materiales compuestos de Carbono - Carbono de la oxidación, se ha limitado el interés para desarrollar materiales de éste tipo, y los Compuestos de Matriz Metálica tienen que usarse a una temperatura límite que generalmente son más bajas a los niveles que se necesitan para ser aplicados, por ejemplo en los motores en los que generan temperaturas elevadas. Los nuevos materiales ofrecen una amplia gama de compuestos que pueden ser usados en turbinas, componentes estructurales y aisladores que se pueden usar con mucha seguridad y funcionalidad contra la oxidación a temperaturas elevadas.

El Compuesto de Matriz Metálica, como se mencionó consiste de un metal base que es reforzado con uno o más constituyentes, los que son Continuos como; Grafito, Alúmina, Carburo de Silicio, Fibra de Boro, y los Discontinuos como; Grafito y Materiales Cerámicos en forma de Whiskers (Fibras Finas). En el caso de los compuestos reforzados con fibras continuas, la fibra es el constituyente dominante, y la matriz de metal sirve como un transporte para transmitir la carga a la fibra reforzada. En los compuestos que se incorporan reforzamientos discontinuos, es

donde los reforzamientos dominan a la matriz, formando una estructura de falso endurecimiento por dispersión. Las propiedades óptimas pueden lograrse con compuestos de fibras continuas reforzadas, cuando las fibras son orientadas en una sola dirección. Los compuestos reforzados con Whiskers (Fibras Finas) o partículas tienden a ser Isotrópicos.

Estos son entre muchos los materiales Compuestos de Matriz Metálica (MMC) que pueden emplearse en la industria automotriz y las dificultades que se presentan en el uso de estos materiales. En este capítulo trataremos los materiales Compuestos de Matriz Metálica y los diferentes reforzamientos empleados en la industria automotriz.

A continuación se mencionaran los materiales ferrosos y no ferrosos con sus respectivas aleaciones, como también el tipo de reforzamiento para los materiales ferrosos y no ferrosos.



Materiales Ferrosos	Acero de Alta Aleación	Aceros para herramientas	Aceros de baja aleación para herramientas de propósito especial Aceros de bajo Carbono para moldear Aceros endurecidos por agua para herramientas
		Superaleaciones	Aleación de solución sólida de base Hierro Aleación de solución sólida de base Cobalto Aleación de solución sólida de base Níquel Aleación endurecida por precipitación de base Hierro Aleación endurecida por precipitación de base Cobalto Aleación endurecida por precipitación de base Níquel
	Hierros Fundidos	Hierro Blanco Hierro Gris Hierro Ductil Hierro Maleable	
Materiales No Ferrosos	Aleación de Aluminio con	Cobre, Estaño, Níquel, Zinc, Silicio, Hierro, Titanio, Bismuto, Magnesio, Cromo, Plomo	
	Aleación de Cobre con	Aleaciones al Alto Cobre, Fósforo, Níquel, Silicio, Aluminio, Plata	
	Aleación de Níquel con	Manganeso, Cobalto, Molibdeno, Hierro, Bario, Cobre, Zinc, Aluminio, Cromo, Plata, Silicio	
	Aleación de Magnesio con	Aluminio, Cobre, Silicio, Zinc, Níquel, Rano, Zirconio, Tano	
	Metales Diversos con	Antimonio, Germanio, Silicio, Arsénico, Calcio, Bario, Plutonio, Magnesio, Litio, Manganeso	
	Metales Refractarios con	Molibdeno, Tungsteno, Zirconio, Tantalio, Vanadio, Titanio, Niobio, Bario, Cromo, Rano, Hafnio, Cobalto, Cromo	
	Metales Preciosos con	Indio, Platino, Rutenio, Oro, Paladio, Plata, Osmio, Rodio	
Reforzamientos	Ferrosos	Compuestos de Matriz de Carbono Compuestos Multidireccionales de Matriz de Carbono/Grafito Compuestos Resistentes a la Oxidación de Carbono - Carbono Compuestos Estructurales de Carbono - Carbono Compuestos Estructurales Cerámicos Compuestos Multidireccionales de Cerámica	
	No Ferrosos	Fibras de Boro Fibras de Carbono de Silicio Fibras de Grafito Fibras de Óxido de Aluminio Fibras de Tungsteno Fibras Discontinuas tipo Partículas Fibras Discontinuas tipo Whiskers Fibras Discontinuas de Cerámica	

5.2 MMC REFORZADOS CON FIBRAS DE BORO

El Boro es un material con una elevada resistencia como fibra, con un elevado coeficiente de reforzamiento, puede ser usado en aplicaciones de Compuestos de Matriz Metálica MMC, en Matrices de Aluminio y Titanio. La producción del compuesto de Aluminio reforzado con Boro tiene propiedades prometedoras y se han desarrollado con una extensa base de datos de propiedades físicas y mecánicas. En la producción del compuesto de Titanio reforzado con Boro, la Fibra de Boro presenta inconvenientes al ser expuesta a severos tratamientos que degradan su resistencia y rigidez.

5.2.1 ELABORACIÓN DEL COMPUESTO CON FIBRAS DE BORO

Este compuesto preformado se fabrica usando fibras de 140 μm de diámetro. La figura 5.1 muestra un esquema de la fabricación para producir el compuesto de Aluminio reforzado con Boro para compuestos preformados. Comúnmente la presión elevada, produce un tipo de unión por difusión que es la única técnica de fabricación comercial, usada en la fabricación de MMC reforzado con Boro. Por lo general contiene aproximadamente 50% de volumen de filamentos, aunque con un rango de 20 a 60% de volumen, ha sido producido exitosamente, el tamaño de la hoja que se produce es de 305 mm x 610 mm (1 ft x 2 ft) ó 760 mm x 9200 mm (2.5 ft x 30 ft).

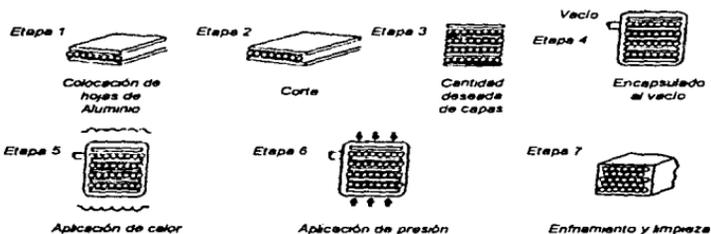


Fig. 5.1 Proceso de fabricación de un compuesto de Aluminio - Boro.

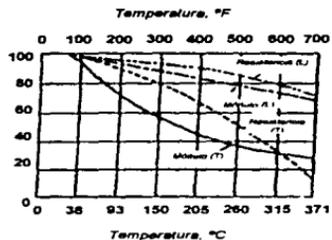
5.2.2 PROPIEDADES DEL COMPUESTO

La primera ventaja de un MMC con reforzamiento con Boro, con un complemento de Epóxico - Boro es la alta temperatura de operación a la que puede exponerse. Por ejemplo, como se mencionó el compuesto de Aluminio - Boro ofrece propiedades mecánicas convenientes hasta 510 °C (950 °F), mientras que un equivalente compuesto de Epóxico - Boro se limita a 190 °C (375 °F). La figura 4.5 compara la resistencia máxima a la tracción de algunos materiales en función de la temperatura

Como con todos los Compuestos de Matriz Metálica MMC con reforzamiento con Boro, las propiedades mecánicas dependen directamente de la secuencia de las capas. Las propiedades longitudinales en dirección paralela a la de las fibras son dominadas por la matriz de metal. En una aplicación, ambas hojas están orientadas y el número de hojas varía. Por esta razón, las propiedades mecánicas dan compuestos anisotrópicos.

Las figuras 4.6 y 4.7 muestran la resistencia máxima a la tracción y el módulo elástico en función del ángulo con respecto al eje de la carga de los compuestos unidireccionales. Las figuras 4.8 y 4.9 muestran las curvas de esfuerzo y deformación para el compuesto unidireccional de Aluminio - Boro en la dirección longitudinal y transversal. Es interesante notar la casi perfecta conducta elástica del compuesto en la fibra dominante en la dirección longitudinal, contra la matriz dominante en la dirección transversal.

Las propiedades mecánicas de los materiales compuestos dependen de la temperatura ambiente. Las figuras 5.2, 5.3, y 5.4 muestran el comportamiento del esfuerzo, módulo y esfuerzo al corte para planos unidireccionales y planos cruzados laminados. Estas figuras muestran que las propiedades son menos afectadas en la dirección longitudinal de la fibra que en la dirección transversal de la matriz.



Propiedades a temperatura ambiente, %

Fig. 5.2 Resistencia y Módulos contra temperatura, del Aluminio reforzado con Boro en tracción longitudinal y transversal a (0°).

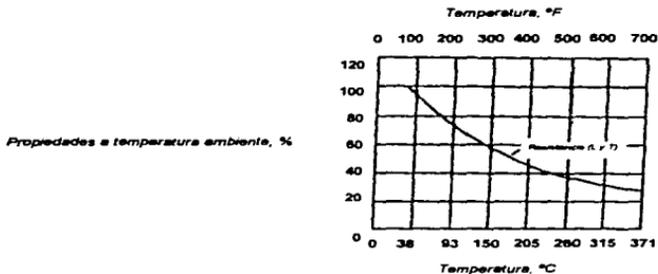


Fig. 5.3 Resistencia al corte contra temperatura, del Aluminio reforzado con Boro a (0°).

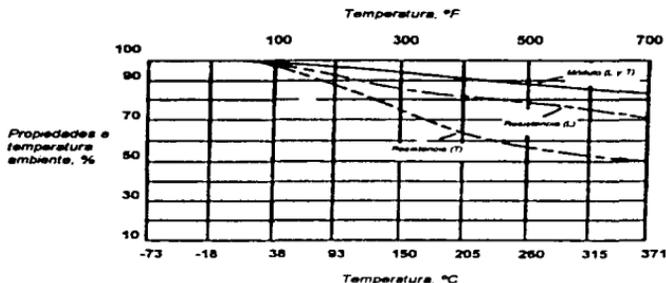


Fig. 5.4 Resistencias y Módulos, contra temperatura del Aluminio reforzado con Boro en un plano cruzado a (0°/90°) en tracción longitudinal y transversal.

5.2.3 APLICACIONES

La primera aplicación del compuesto de Aluminio-Boro fue para una estructura de cohetes espaciales usada como la armadura y miembros de piso con viguetas. En la construcción del tubo de Aluminio - Boro resultó tener un 44% más de resistencia que el diseño original de Aluminio.

Otras aplicaciones para las fibras de Boro serían las siguientes: En la paleta de ventilación del motor de jet, Revestimiento del ala de avión, Partes de automóviles, y Marcos de bicicletas.

5.3 MMC REFORZADOS CON FIBRAS DE CARBURO DE SILICIO

Las fibras de Boro reaccionan rápidamente con el Aluminio, y las propiedades mecánicas de la unión por difusión, se degradan en el compuesto de Aluminio - Boro a largo tiempo por encima de temperaturas mayores de 480 °C (900 °F).

Consiguientemente, las fibras de Boro no pueden usarse en aplicaciones para temperaturas altas o fabricarse por los métodos, tales como la fundición ó presiones bajas con temperaturas altas, que pueden ser más factibles económicamente. Estas desventajas han impulsado el desarrollo de las fibras de Carburo de Silicio (SiC).

El promedio de propiedades mecánicas y físicas del filamento de Carburo de Silicio (SiC), son:

- Resistencia a la tracción: 3950 MPa (580 ksi)
- Módulo de tracción: 400 GPa (60×10^6 psi)
- Densidad: 3.045 gr/cm³
- Coeficiente de dilatación térmica: $1.5 \times 10^{-6}/K$
- Diámetro: 140 μ m (5500 μ plg)

Los diversos grados de las fibras que se producen son los siguientes; SCS - 2, SCS - 6, y SCS - 8, todos con base β - SiC en el proceso de deposición en que una estructura cristalina es desarrollada en el crecimiento del Carbono que es un material base. La base β - SiC se presenta como tal, a través de toda la fibra de sección cruzada.

5.3.1 LAS VARIACIONES DE LA FIBRA

La figura 5.5 muestra los diagramas de la composición de los tres tipos de fibras.

La fibra SCS - 2, tiene un revestimiento de Carbono de 1 μ m (39 μ plg), que aumenta el contenido del silicio. Esta fibra se ha usado exitosamente como reforzamiento con el Aluminio.

La fibra SCS - 6, tiene un revestimiento de Carbono de $3 \mu\text{m}$ ($118 \mu\text{g/g}$), en que aumenta el contenido máximo de silicio. Esta fibra se usa primordialmente como reforzamiento con el Titanio.

La fibra SCS - 8, tiene un revestimiento de Carbono de $6 \mu\text{m}$ de grano muy fino. Esta fibra se desarrolla para dar mejores propiedades mecánicas que la fibra SCS - 2, en compuestos transversales de Aluminio a la dirección de la fibra.

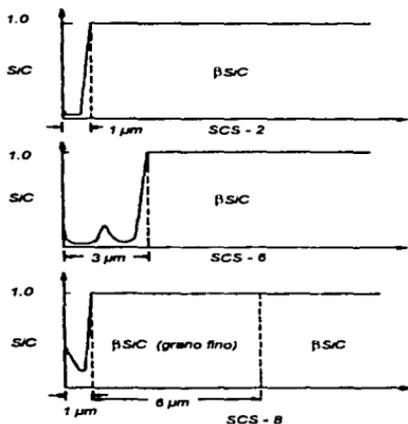


Fig. 5.5 Composición de los tres tipos de fibras.

5.3.2 PROPIEDADES DEL COMPUESTO

Los reforzamientos continuos de SiC en metales estarán disponibles con una base de datos de propiedades que se desarrollan en un periodo relativamente corto de tiempo, dependiendo de la aplicación.

En el Aluminio reforzado con Carburo de Silicio, el moldeo en caliente es el proceso de consolidación más antiguo del compuesto Al - SiC, la base de datos más grande de propiedades mecánicas desarrolladas es para el moldeo en caliente, para el compuesto SCS - 2 - Al 6061. El diseño incluye una base de datos en propiedades estáticas de compresión y tracción, resistencia interlaminar al esfuerzo cortante, tracción - deformación, fatiga, resistencia (curva S - N), y datos de fractura - dureza. La mayor parte de los datos se desarrolla sobre un intervalo de temperatura de - 55 a + 75 °C (- 65 a + 165 °F). Con la prueba estática de tracción resulta hasta 480 °C (900 °F). Los datos se resumen en las tablas 5.1, 5.2, 5.3, y 5.4 y las figuras 5.6 y 5.7. Como puede observarse la inclusión de un alto rendimiento de SiC en una fibra de Al 6061 produce una muy alta resistencia 1378 MPa (200 ksi), alto módulo 207 GPa (30 x 10⁶ psi), es un material compuesto anisotrópico y tiene una densidad ligeramente mayor (2.85 gr/cm³) que el Aluminio. Como en compuestos orgánicos de matriz cruzada o angular produce una gama de propiedades útiles a diseñadores, como se muestra en la figura 5.8.

Tabla 5.1 Resistencia a la tracción de la fibra con el Aluminio SCS-2-Al, 47% de vol. de la fibra

Orientación de la fibra	No de capas	Resistencia a la tracción		Módulo de tracción		Deformación total	Relación de Poisson
		MPa	ksi	GPa	10 ⁶ psi		
0°	6, 8, 12	1462.0	212.0	204.1	29.6	0.89	0.268
90°	6, 12, 40	86.2	12.5	118.0	17.1	0.08	0.124
[0°/90°/0°/90°]	8	673.0	97.6	136.5	19.8	0.90	.....
[0°/45°/90°]	8	1144.0	165.0	180.0	26.1	0.92	.....
[90°/45°/90°]	8	341.3	49.5	96.5	14.0	1.01	.....
± 45°	6, 12, 40	309.5	44.9	94.5	13.7	1.06	0.395
[0°/± 45°/0°]	6, 16	800.0	116.0	146.2	21.2	0.88	.....
[0°/± 45°/00°]	8	572.3	83.0	127.0	18.4	1.0	.....

Fuente: Engineering Materials Handbook, Vol 1 Composites 1981 John A. McEwen

**Tabla 5.2 Resistencia de compresión de la fibra con el Aluminio SCS-3-A1
47% de vol. de la fibra.**

Dirección de la fibra	Capas	Carga		Esfuerzo		Módulo de tracción		Relación de Poisson
		N	lb	MPa	ksi	GPa	10 ⁶ psi	
0°	12	36000	8100	2647	383.9			
		38250	8600	2708	392.7			
		38700	8700	2739	397.3			
		40500	9100	2878	417.4			
		48900	11000	3286	478.0	212.4	30.8	0.241
90°	12	53100	11940	3689	535.0	222.7	32.3	
		4220	948	294.4	42.7	104.8	15.2	
		4380	985	300.6	43.6	118.5	16.9	0.174
		4270	960	284.4	42.7			
		4230	950	292.3	42.4	113.1	16.4	0.173
90°	40	3960	890	273.0	39.6	115.6	16.8	
		3780	850	259.2	37.8	124.1	18.0	
		13480	3030	283.7	42.8			
		14810	3285	294.4	42.7	131.7	19.1	0.138
		13280	2985	290.0	42.0	102.7	14.9	
		13430	3020	287.5	41.7	108.9	15.8	
		13520	3040	294.4	42.7	115.1	16.7	
		13880	3075	297.2	43.1	142.0	20.6	0.158

Fuente: *Engineered Materials Handbook, Vol. 1 Composites, 1991, John A. Sfe Ethan*

**Tabla 5.3 Resistencia al esfuerzo cortante de la fibra con el Aluminio
SCS-3-A1, 18° fuera del eje, 47% de vol. de la fibra.**

Prueba de temperatura °C	°F	Esfuerzo de falla		Resistencia al esfuerzo cortante		Módulo de rigidez	
		MPa	ksi	MPa	ksi	MPa	ksi
Temperatura ambiente ...		455.7	66.1	113.8	16.5	42.5	6.17
		452.3	65.6	113.1	16.4	39.5	5.73
		479.2	69.5	120.0	17.4	39.8	5.77
		422.6	61.3	105.5	15.3	40.3	5.85
Promedio	75	452.9	65.6	113.1	16.4	40.8	5.96
		437.1	63.4	109.6	15.9	40.2	5.83
		434.4	63.0	108.9	15.8	43.2	6.27
		424.7	61.6	106.2	15.4	41.7	6.05
Promedio	-55	432.1	62.6	108.2	16.7	41.7	6.08
		501.2	72.7	125.2	18.2	44.5	6.48
		482.6	70.0	120.7	17.5	39.6	5.75
		453.0	65.7	113.1	16.4	39.6	5.75
Promedio		478.0	68.4	118.8	17.3	41.3	6.08

Fuente: *Engineered Materials Handbook, Vol. 1 Composites, 1991, John A. Sfe Ethan*

Tabla 8.4 Resistencia con muescas de la fibra con el Aluminio SCS-2-AI
12 capas de material, 47% de vol. de la fibra.

Muestra	Promedio del esfuerzo bruto a TA		Promedio del esfuerzo neto a TA		Factor de corte	
	Mpa	ksi	Mpa	ksi	75 °C (165 °F)	(-55 °C) (-65 °F)
Muecas en dos bordes 0°	814.8	118.2	1289.5	184.1	0.82	0.80
Agujero central 1.6 mm (1/16 plg) diam 0°	1125.9	163.3	1162.8	168.8	0.84	0.72
Agujero central 3.2 mm (1/8 plg) diam 0°	991.7	143.8	1001.8	154.0	0.77	0.72
Agujero central 6.4 mm (1/4 plg) diam 0°	842.1	122.1	886.4	140.2	0.70	0.72
Agujero central 3.2 mm (1/8 plg) diam 0° a 45°	728.1	105.6	777.4	112.8	0.80	0.72
Agujero central 6.4 mm (1/4 plg) diam 0° a 45°	620.5	90.0	710.8	103.1	0.83	0.72
Agujero central 3.2 mm (1/8 plg) diam 0° a 90°	437.1	63.4	467.1	67.8	0.80	0.72
Agujero central 6.4 mm (1/4 plg) diam 0° a 90°	400.6	58.1	460.8	66.8	0.89	0.72
Agujero central 2.4 mm (3/32 plg) diam 45°	244.7	35.5	258.8	37.2	0.85	0.72
Grates central 6.4 mm (1/4 plg)	822.0	119.2	844.2	121.0	0.68	0.72
Grates central 12.7 mm (1/2 plg)	659.0	95.7	886.8	128.8	0.64	0.72

* TA Temperature Ambiente

Fuente: Experimental Mechanics Products, Inc. Composites, 1981, April 4, An. 30.

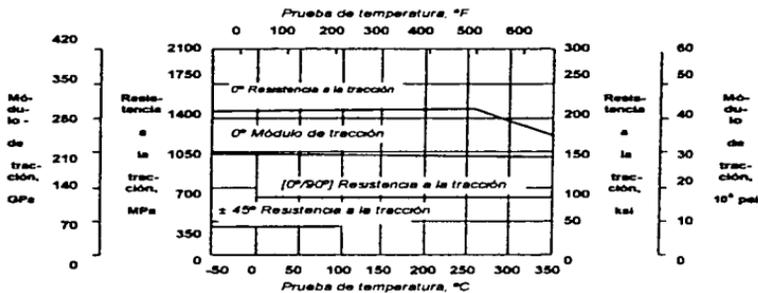


Fig. 5.6 Resistencia del compuesto SCS - 2 - Al 6061 en función de la temperatura.

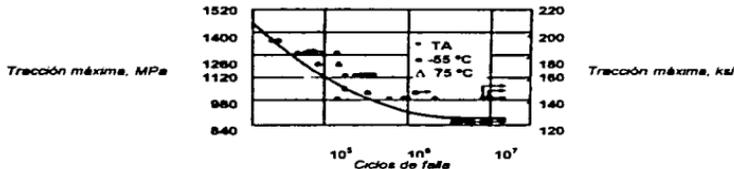


Fig. 5.7 Curva tracción - fatiga para el compuesto SCS - Al a 0°, 12 capas de laminas, 47% de vol. de la fibra; R = Tracción mínima / Tracción máxima.

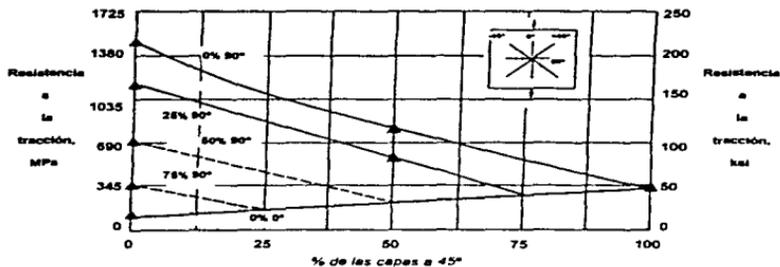


Fig. 5.8 Resistencia a la tracción del compuesto SCS - 2 - Al 6061 en función de la orientación de las capas.

En el Titanio reforzado con Carburo de Silicio. El compuesto SCS - 6 - Ti - 6Al - 4V originalmente se desarrolla para resistir a temperaturas altas. Como se muestra en la tabla 5.5, la resistencia del compuesto permanece por arriba de 1380 MPa (200 ksi) después del tratamiento con calor. Es un programa exitoso para reforzar el β - Ti con la aleación 15V - 3Sn - 3Cr - 3Al y con el compuesto de la fibra SCS, se ha logrado que las propiedades compuestas sean superiores, resistencia de tracción de 1585 a 1930 MPa (230 a 280 ksi).

Las partes de Titanio son fabricadas por la unión por difusión y por la técnica de presión y calentamiento isostático, que han sido particularmente exitosas en la forma de partes reforzadas. Las propiedades de la resistencia alta, y un módulo alto del compuesto SCS - 6 - Ti representa un mayor mejoramiento sobre el compuesto B₄C - β - Ti, en que el módulo del compuesto es relativamente mayor que la matriz pero la resistencia de tracción no es alta. Módulos y resistencias a temperaturas elevadas se muestran en las figuras 5.9 y 5.10.

Tabla 5.5 Datos sobre la fibra y el Titanio SCS-6-TI.

	Resistencia máxima a la tracción		Módulo elástico		Deformación para rotura, %
	MPa	ksi	GPa	10 ⁶ psi	
Propiedades Mecánicas del compuesto SIC-TI-6Al-4V (36% de vol.)					
<i>Como fabricante</i>					
Medio	1690	245	186.2	27.0	0.96
Desviación estándar	119.3	17.3	7.58	1.1	0.091
<i>Después de calentarlo 7h a 905 °C (1660 °F)</i>					
Medio	1434	208	190.3	27.6	0.86
Desviación estándar	108.9	15.6	6.3	1.2	0.087
Propiedades Mecánicas del compuesto SIC-TI-15V-3Sn-3Cr-3Al (38 a 41% de vol.)					
<i>Como fabricante</i>					
Medio	1572	228	107.9	28.7	.....
Desviación estándar	138	20	6.21	0.9	.....
<i>Después de calentarlo 15h a 480 °C (900 °F)</i>					
Medio	1951	283	213.0	30.9	.....
Desviación estándar	96.5	14	4.83	0.7	.....

Fuente: Experimental Materials Handbook Vol. 1 Composites 1981 John A. Mc Ewen

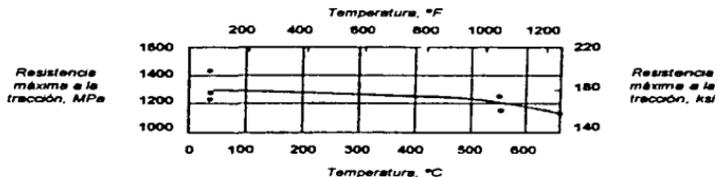


Fig. 5.9 Resistencia máxima a la tracción en función de la temperatura para el compuesto SCS - 6 - Ti.

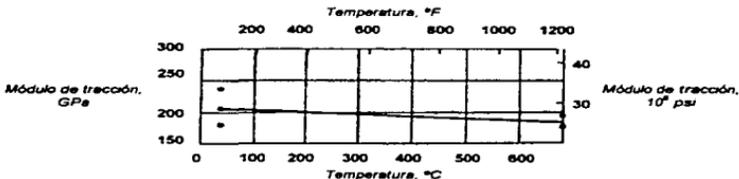


Fig. 5.10 Módulo de tracción en función de la temperatura para el compuesto SCS - 6 - Ti.

En el Magnesio reforzado con Carburo de Silicio y el Cobre reforzado con Carburo de Silicio. Las fibras SCS - 2 son exitosamente moldeadas con magnesio, las propiedades se enlistan en la tabla 5.6 bajo un programa resiente. En las fibras SCS - 2 se ha iniciado el desarrollo del Cobre reforzado con SiC. Donde en la actualidad la resistencia se ha logrado en un 85% en la Regla de las Mezclas, en fracciones de volumen del 20 al 33%. Los datos se muestran en la tabla 5.7.

Tabla 5.6 Datos mecánicos sobre la fibra y el Magnesio SCS-Mg en un molde de barra.

Muestra No	Tempo de exposición	Resistencia máxima a la tracción		Deformación para falla %	Módulo elástico		Fibra % de vol
	min	MPa	ksi		GPa	10 ⁶ psi	
VIR 67	5	1000	145	0.83	169.6	24.6	34
VIR 69	10	1524	221	0.88	209.6	30.4	48
VIR 72	10	1331	193	0.78	230.3	33.4	50
VIR 77	10	1379	200	0.95	180.6	26.2	37

Fuente: *Engineered Materials Handbook, Vol 1 Composites, 1991, John A. Mc Ewen*

Tabla 5.7 Datos mecánicos sobre la fibra y el Cobre SCS-Cu.

Panel	Fibra % de vol	Resistencia máxima a la tracción axial		Módulo axial	
		MPa	ksi	GPa	10 ⁶ psi
84 - 014	0.23	690	100	172.4	25.0
84 - 153	0.33	965	140	202.0	29.3
84 - 377	0.33	900	130	187.5	27.2

Fuente: *Engineered Materials Handbook, Vol 1 Composites, 1991, John A. Mc Ewen*

5.3.3 APLICACIONES

La alta resistencia, rigidez y baja densidad de las fibras de SiC que sirven como reforzador a los Compuestos de Matriz Metálica, han generado interés importante en la industria aeroespacial, resultando en la indicación de muchos programas de investigación y desarrollo. El área principal de interés es el alto rendimiento estructural tales como aeronaves, proyectiles y motores. Sin embargo, como más sistemas desarrollan la sensibilidad al peso del transporte, se están

haciendo consideraciones para aplicaciones menos sofisticadas para estos nuevos materiales en la industria automotriz.

El Aluminio reforzado con Carburo de Silicio, se utiliza para las aletas de los proyectiles para usarse con una mayor velocidad, los proyectiles están siendo evaluados con un 30% de vol. de la fibra, diseñados para poco peso y aumentar la rigidez para mejorar la estabilidad del vuelo.

El Titanio reforzado con Carburo de Silicio, se manejan sobre ejes que son desarrollados y fabricados por el proceso de presión y calentamiento isostático. Son utilizados generalmente para el núcleo de un motor, requiriendo aumentar la rigidez específica, para aumentar la velocidad con rangos críticos

5.4 MMC REFORZADOS CON FIBRAS DE GRAFITO

Las fibras de Grafito que refuerzan a los Compuestos de Matriz Metálica MMC, son una clase de materiales con rendimiento sumamente alto, porque las propiedades de estos materiales se rigen principalmente por las propiedades de las fibras contenidas en ellas.

5.4.1 FIBRAS CONTINUAS CONTRA DISCONTINUAS

Una fibra de Carbono reforzada con Grafito es básicamente un filamento delgado y largo, compuesto principalmente de Carbono con un diámetro que es normalmente entre 4 y 11 μm (160 y 430 $\mu\text{m/g}$).

Las fibras continuas de Carbono consisten de filamentos esencialmente agrupados, en hilos de 500 a 4000 filamentos individuales ó más. Los hilos pueden trenzarse para proveer un máximo atado, pero son más frecuentes desenredados, proporcionando una máxima amplitud a los filamentos. Las fibras continuas de Carbono se usan para fabricar materiales compuestos para conseguir valores máximos en las propiedades, como en la resistencia ó rigidez. La fibra de Grafito con

un módulo alto generalmente, se usa como reforzamiento continuo de MMC, lo que produce lo último en propiedades mecánicas y físicas.

Los reforzamientos con fibras discontinuas en MMC pueden ser isotrópicos o casi - isotrópicos. Las fibras discontinuas de Carbono consisten de filamentos cortos con longitudes de 0.2 mm (0.008 plg) a varios centímetros. Las longitudes de las fibras son uniformes si se obtienen algunas veces cortando la longitud de la fibra. El módulo alto para las fibras P55 y P100 es de (380 y 690 GPa) o (55 y 100 x 10⁶ psi) respectivamente, es el primer reforzamiento discontinuo realizado con ambas aleaciones, empleadas en matrices de Aluminio y Magnesio.

5.4.2 LA SUPERFICIE DE LA FIBRA DE CARBONO

Las características de la superficie de las fibras de Carbono entran en dos categorías, dependiendo si las fibras son tratadas con calor a una baja ó alta temperatura (HTT). El tratamiento con calor a una baja temperatura en la fibra, es en la cual posee una superficie activa para que los metales y resinas de la matriz puedan adherirse fuertemente. El tratamiento con calor a una alta temperatura en la fibra, es en la cual posee más interés en la superficie que para los materiales de matriz con adherencia débil; estas fibras son también más resistentes a la oxidación. La superficie activa da una categoría para la fibra de Carbono donde se mejora por un tratamiento de superficie que consiste de una oxidación química ó electroquímica.

5.4.3 FUNDICIÓN

La fundición de MMC con fibras continuas de Grafito, es una tecnología especialmente apropiada para su fabricación, cuando estos materiales están para ser usados en formas complejas, tales como los componentes de un motor de combustión interna.

Es también un excelente método para producir estos materiales en secciones gruesas o en secciones que contienen una variedad de orientación de la fibra. Sin embargo, la fundición no es favorable para la fabricación de hojas planas y delgadas

a causa de la dificultad de la alimentación del metal fundido sobre las distancias largas, mediante secciones delgadas y cruzadas.

Una mayor diferencia entre las configuraciones de la fibra es la resina y en los compuestos de metal son los metales, las fibras comúnmente tejidas no son apropiadas como los reforzamientos. La razón es que las fibras tejidas se doblan a causa del trenzado del tejido. Sin embargo, con los metales, el módulo relativamente alto de la matriz resiste el proceso de enderezamiento de la fibra, donde el proceso de enderezamiento hace que la fibra no se rompa. Por esta razón, la fundición de la fibra reforzada con metal usa fibras preformadas que consisten de dobles capas de fibras. Frecuentemente con las fibras orientadas en una variedad de direcciones en capas consecutivas.

Una base de datos de propiedades mecánicas y físicas limitan al Magnesio reforzado con la fibra de Grafito. A causa de la amplia variedad de los tipos de fibras y casi un número ilimitado de la orientación de la fibra que es posible en la fundición.

Los compuestos de metal con Grafito tienen una buena fabricación comparados con el Epóxico - Grafito, que son difíciles para maquinarse. Muchos materiales con reforzamientos son usados en MMC, tales como los óxidos y carburos, por lo que el Grafito no es un abrasivo, mientras que las fibras por sí mismas no actúan como un lubricante, ninguna de ellas conduce al desgaste excesivo de herramienta, y de hecho tiende a actuar como rompe virutas en el corte.

5.5 MMC REFORZADOS CON FIBRAS DE ÓXIDO DE ALUMINIO

Las fibras de Óxido de Aluminio que refuerzan a los Compuestos de Matriz Metálica MMC, se emplean para los materiales más importantes en aplicaciones sensibles de peso y que operan a temperaturas elevadas. Bajo estas condiciones, los MMC son más resistentes que los metales sin reforzamiento en rigidez, resistencia, propiedades de fatiga, y características de desgaste. Estas

características se mejoran considerablemente, esta es una función de las propiedades de las fibras de Óxido de Aluminio.

La tendencia a oxidarse y la química inerte del Óxido de Aluminio han limitado la degradación de la fibra durante ambas temperaturas elevadas, de uso y fabricación del compuesto.

El Óxido de Aluminio tiene buenas propiedades mecánicas con algunas fibras policristalinas que se aproximan teóricamente al módulo de tracción de 400 GPa (58×10^8 psi). La resistencia y rigidez permanecen a temperaturas elevadas, los compuestos se mueven menos y tienen resistencia a la fatiga significativamente mejor que los metales sin reforzamiento. La dureza del Óxido de Aluminio clasifica a las propiedades de desgaste excepcionalmente buenas en los MMC. La deficiencia principal del Óxido de Aluminio es su densidad relativamente alta de (3.2 a 4.0 gr/cm³).

Las fibras de Óxido de Aluminio ahora se usan más y se han considerado como reforzadoras con un número de matnces de metal, especialmente con el Aluminio y Magnesio.

5.5.1 LOS MATERIALES CONSTITUYENTES

Las dos fibras de Óxido de Aluminio que actualmente son comerciales y disponibles son la fibra FP de Du Pont y Sumika de Sumitomo. Estos multifilamentos de hilos contienen por lo menos 85% de Óxido de Aluminio.

Saffil, una fibra pequeña fabricada principalmente por ICI, se ha evaluado en muchas de las mismas aplicaciones como las fibras continuas. Las propiedades físicas de estas importantes fibras de Óxido de Aluminio se dan en la tabla 5.8.

El desarrollo de la fibra de Óxido de Aluminio que refuerza a los MMC, se ha enfocado en el mínimo punto de fusión de los metales, tales como el Aluminio y el Magnesio y su norma de aleaciones con fundiciones. Sin embargo, con los

compuestos de acero y superaleaciones las fibras de Óxido de Aluminio tienden a sufrir degradaciones en los cambios de microestructuras a las temperaturas requeridas de uso y fabricación.

Tabla 6.5 Propiedades de las Fibras de Óxido de Aluminio.

Fibra	Composición %		Fibras en %	Diámetro de la fibra		Densidad g/cm ³	Resistencia a tracción		Elongación %	Módulo de tracción		
	Al ₂ O ₃	SiO ₂		µm	µm/g		MPa	MPa		GPa	10 ⁴ psi	
Fibra FP	99.5		200	20	790	3.9	1950	2.30	0.4	390	55	
Sumos	99.0	15.0	380	17	670	3.2	1775	260	0.8	210	30	
ICAF	99.0	97.0	3.0 - 4.0	380	3	120	3.3	2070	260	0.7	300	45

Fuente: *Advanced Materials Handbook*, Vol. 1, Compuestos, 1997, John C. Pechter

Mientras los compuestos son elaborados por fundición, a la temperatura de 1600 °C (2910 °F), la reacción agresiva del hierro fundido ocasionaría el crecimiento de grano y ataque químico en el Óxido de Aluminio. En el caso de superaleaciones, los compuestos pueden ser formados por rocío de plasma ó unión por difusión, pero estas aleaciones son generalmente usadas en aplicaciones que requieren temperaturas de 1000 °C (1830 °F) y superiores, la mayoría de las fibras de Óxido de Aluminio perderían eventualmente la resistencia mediante el crecimiento de grano y el flujo de baja carga.

5.5.2 LA FABRICACIÓN

Las fibras sirven para controlar la ubicación y distribución de fases en la matriz, para guiar o romper el crecimiento de la dendrita. La superficie de la fibra puede actuar como catalizador, para la nucleación en el proceso de solidificación, y la interfase de la matriz con la fibra es frecuentemente el sitio de reacción en el cual ocurre durante el proceso.

La fabricación de MMC presentan una única oposición, donde las propiedades de desgaste son dominadas por el Óxido de Aluminio, que es un material muy abrasivo.

Sorprendentemente, el torneado y el fresado con el Aluminio con la fibra FP a una velocidad de 30.48 m/min (100 ft/min) con un recubrimiento de Carburo C - 2 o

un recubrimiento cerámico con Carburo, las herramientas de fabricación son más resistentes.

La orientación unidireccional de las fibras se usan frecuentemente, aunque algunos de los datos se hayan generado en dobleces cruzados, filamentos enrollados, u otras geometrías de las fibras más complejas. Muchas normas y propiedades de ingeniería, tales como tracción y resistencia de compresión, comportamiento de flexión, módulos, y fatiga se han determinado por lo menos en unos materiales compuestos.

La evaluación no destructiva (NDE) de los materiales compuestos es esencial para garantizar la calidad. El desarrollo considerable del método ha requerido que se adapte la evaluación no destructiva (NDE) como pruebas en los MMC, por que las fibras actúan como una fase interna dentro de la matriz y complican el análisis.

5.5.3 PROPIEDADES DEL COMPUESTO

Las propiedades mecánicas de las fibras de Óxido de Aluminio que refuerzan a los MMC, también se han generado en conexión con el desarrollo de aplicaciones específicas, tales como componentes de automóviles, la carcasa de la transmisión del helicóptero, y en los electrodos. Los MMC en módulos obedecen la Regla de las Mezclas en que un compuesto unidireccional, contiene 50% de la fibra por el volumen que tendrá en dos veces el módulo de tracción de la matriz de metal (200 contra 85 GPa) o (29 contra 12×10^6 psi), para el Aluminio reforzado con la fibra FP.

La figura 5.11 muestra el módulo específico de distintos MMC, en función de la temperatura. Los datos para metales sin reforzamiento se incluyen para compararlos.

En una base específica, la temperatura ambiente sirve para observar la resistencia en la dirección del Aluminio con la fibra FP para un compuesto unidireccional, que es el mismo como con los metales sin reforzamiento. Sin

embargo, cuando la temperatura de uso aumenta, las propiedades del compuesto se detienen a un grado mayor, como se muestra en la figura 5.12.

La resistencia a la fatiga impartida por las fibras de Óxido de Aluminio a metales, tales como Aluminio y Magnesio pueden ser sustituidos por componentes densos de acero en la sensibilidad de peso como partes del motor.

Los resultados muestran que un compuesto de Aluminio reforzado con la fibra de Óxido de Aluminio, pueden proveer la resistencia, rigidez y las propiedades de fatiga requeridas, por ejemplo para reemplazar el acero en las bielas, a la mitad del peso del componente.

5.5.4 APLICACIONES

La Compañía de Motores Toyota introduce la primera aplicación comercial de un compuesto de Aluminio reforzado con las fibras de Óxido de Aluminio para los pistones. Es una evidencia que estos materiales puedan encontrar el valor en el mercado, pero el desarrollo comercial dependerá de la economía y adelantos técnicos.

5.6 MMC REFORZADOS CON FIBRAS DE TUNGSTENO

Las fibras de Tungsteno que refuerzan a los Compuestos de Matriz Metálica MMC, no solamente proveen una resistencia ó rigidez a la matriz de metal, sino que tiene una buena capacidad a temperaturas elevadas, buena ductilidad, y alta conductividad térmica.

Las aplicaciones del Tungsteno como reforzante para los Compuestos de Matriz Metálica MMC son particularmente apropiadas para una orientación de carga en componentes estructurales tales como; alabes de turbina, y recipientes a presión. En el área de temperaturas elevadas los MMC se han enfocado en el desarrollo de las fibras reforzadas con superaleaciones (FRS).

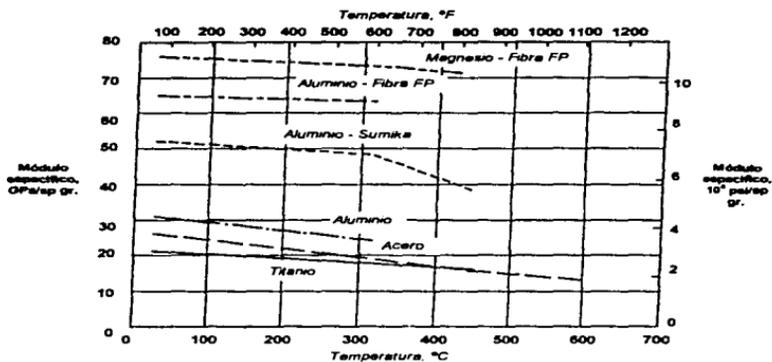


Fig. 5.11 Módulo específico en función de la temperatura.

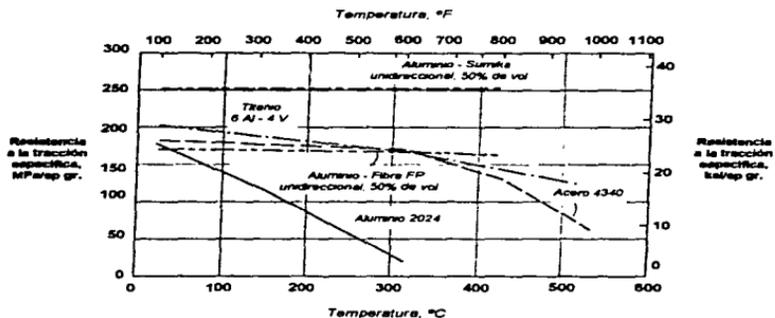


Fig. 5.12 Resistencia a la tracción específica en función de la temperatura.

La designación FRS, se refiere a una clase de materiales de ingeniería en que una aleación con la matriz resiste la oxidación, que es reforzada con una resistencia, rigidez, y fluencia de resistencia de la fibra. Aunque los diversos tipos de fibras que se han investigado para las aplicaciones en FRS, incluyen las aleaciones de Tungsteno, Molibdeno, Carburo de Silicio, Óxido de Aluminio, entre otros. El más importante es el Tungsteno y aleaciones de Tungsteno.

Aunque una variedad de fibras están reforzadas con superaleaciones (FRS) los materiales se evalúan, por lo que el sistema comúnmente más estudiado es para la aplicación en turbinas de gas para aeronaves. Las fibras de Tungsteno comúnmente son mezclas que contienen otros materiales, tales como el Bióxido de Tono (W - ThO₂), el Hafnio (W - Hf - C), el Renio (W - Re), y en matrices de base Níquel e Hierro y en aleaciones de alta resistencia a la temperatura.

5.6.1 COMPATIBILIDAD DE LA FIBRA CON LA MATRIZ

Si la compatibilidad de la fibra con la matriz, la resistencia a la degradación puede ocurrir durante las temperaturas elevadas en los MMC. Los efectos observados, muestran que esta falla es debido a la interacción de la fibra con la matriz, Dichas fallas pueden ocasionar recristalización, fragilidad de la fibra, formación y crecimiento de capas intermetálicas, y disolución de la fibra con la matriz.

La selección de las fibras de Tungsteno, combinadas con una amplia gama de aleaciones binarias como son el Hierro (Fe), Níquel (Ni), Cobalto (Co), Titanio (Ti), y Cromo (Cr) con 5, 10, y 25% de vol., adicionándolas con Aluminio (Al), Cobre (Cu), Silicio (Si), Zirconio (Zr), Niobio (Nb), Molibdeno (Mo), y Tungsteno (W). La tabla 5.9 muestra el comportamiento de materiales compuestos reforzados con fibras de Tungsteno en diferentes matrices y a diferentes temperaturas de recocido, tratados durante una hora.

En matrices con aleaciones de base Cobalto, los compuestos intermetálicos se formaran en la interfase de la fibra con la matriz. El proceso puede suprimirse a

1200 o 1300 °C (2190 o 2370 °F), solo para matrices de Aluminio con aleaciones de Cobalto.

Tabla 5.9 Comparación del comportamiento de las fibras de Tungsteno en diferentes matrices.

Temperature de recocido		Matriz	No de composiciones investigadas	Número relativo de casos en. %			
°C	°F			Recristalización	Compuesto intermetálico	No de recristalización	No. de recocido
1200	2190	Base Níquel	27	93	55	7	4
		Base Cobalto	26	10	83	90	10
		Base Hierro	30	3	30	87	70
1300	2370	Base Níquel	27	96	63	4	4
		Base Cobalto	19	21	84	79	10
		Base Hierro	30	20	80	80	13

Fuente: *Engineered Materials Handbook, Vol. 1 Composites, 1991, Diane M. Essock*

En una matriz de Níquel, si le agregamos Torio, se incrementa la temperatura de recristalización y si se le agrega Cromo disminuye la misma. Se ha notado en muchos casos que el Tungsteno recristalizado se ubica a temperaturas bajas como 950 °C (1740 °F). Donde la recristalización se ubica en el perímetro de la fibra interna donde se requiere para su propagación una continua fuente de Níquel, se puede lograr que la recristalización se disminuya como la concentración de Níquel en aumento de interfase. Los datos que apoyan esta observación se muestran en la tabla 5.10.

Tabla 5.10 Temperatura de recristalización para los filamentos de Tungsteno en distintas matrices.

Matriz	Contenido de Ni en la matriz,	Temperature de Recristalización	
	% de vol.	°C	°F
W - Ni	100	1150-1200	2100-2190
W - NiCr	20	1300	2370
W - 2% ThO ₂ NiCr	20	1250	2280
W - 2% ThO ₂ Ni	100	1080-1130	1980-2065
W - 2% ThO ₂ Inconel 718	52	1175	2150
W - 2% ThO ₂ Hastelloy X	48	1200	2190
W - 2% ThO ₂ Kovar	29.5	1250-1300	2280-2370
W - 2% ThO ₂ Acero Inoxidable	10	1435	2615
W - 2% ThO ₂ Acero Inoxidable	10	1465	2670

Fuente: *Engineered Materials Handbook, Vol. 1 Composites, 1991, Diane M. Essock*

6.6.2 RESISTENCIA A LA FALLA

La prueba del esfuerzo a la falla se utiliza mucho para indicar el potencial de los materiales a temperaturas elevadas. Para los MMC reforzados con Tungsteno, la resistencia a la falla del compuesto dependerá de la fracción del volumen de la fibra. La tabla 5.11 muestra las características de diferentes aleaciones de fibra de Tungsteno en una prueba de 100 h a 1093 °C (2000 °F) y 1024 °C (2200 °F), y se muestra en la figura 5.13. La superioridad de las aleaciones W - Hf - C y W - Re - Hf - C son evidentes.

La tabla 5.12 representa 100 h de resistencia a la falla y composiciones para compuestos y superaleaciones a 1100 °C (2010 °F), tomando en cuenta los diámetros de los filamentos.

La potencia para un aumento adicional en la resistencia a la falla se espera con un aumento de fracción de volumen en la fibra, por lo que todos los compuestos reforzados con Tungsteno tienen esfuerzo resistente a la falla con las matrices, ejemplo de esto es el compuesto W - Hf - C que muestra resistencia superior.

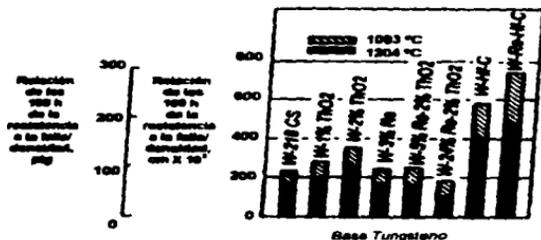


Fig. 5.13 Relación de las 100 h de la resistencia a la falla/densidad, para distintas aleaciones con la fibra de Tungsteno.

Tabla 5.11 Representación de propiedades de aleaciones de Tungsteno, con Blaueritas de aleaciones refractarias.

Aleaciones	Densidad g/cm ³	Diámetro del filamento		Resistencia máxima a la tracción		Esfuerzo para 100 h		Esfuerzo/Deformación para 100 h de falla	
		mm	µg	MPa	kg	MPa	kg	cm x 10 ⁴	g x 10 ⁴
Aleaciones de Tungsteno, 1083 °C (2000 °F)									
218CS	19.1	0.20	0.008	880	126	434	63	234	92
W - 1%ThO ₂	19.1	0.20	0.008	970	142	331	77	282	111
W - 2%ThO ₂	19.9	0.38	0.015	1193	173	635	95	336	140
W - 3%Re	19.4	0.20	0.008	1475	214	476	86	249	98
W - 3%Re - 2%ThO ₂	19.1	0.20	0.008	1213	176	483	70	234	100
W - 2%Re - 2%ThO ₂	19.4	0.20	0.008	1455	211	345	50	182	72
W - Re - C	19.4	0.38	0.015	1427	207	1110	161	584	230
W - Re - Hf - C	19.4	0.38	0.015	2185	314	1413	209	744	293
Aleaciones de Tungsteno, 1324 °C (2400 °F)									
218CS	19.1	0.20	0.008	745	108	317	46	170	67
W - 1%ThO ₂	19.1	0.20	0.008	841	122	372	54	188	78
W - 2%ThO ₂	19.9	0.38	0.015	1034	150	483	70	257	101
W - 3%Re	19.4	0.20	0.008	1082	157	317	46	168	64
W - 3%Re - 2%ThO ₂	19.1	0.20	0.008	1070	148	303	44	160	63
W - 2%Re - 2%ThO ₂	19.4	0.20	0.008	1014	147	183	28	102	40
W - Hf - C	19.4	0.38	0.015	1386	201	765	111	404	158
W - Re - Hf - C	19.4	0.38	0.015	1837	281	910	132	480	189

Fuente: Engineering Materials Handbook, Vol. 1, Composites, 1991, John Wiley & Sons.

Estudios enfocados en la resistencia a la falla en la matriz de Niquel con reforzamiento de Tungsteno, muestran la variación de la fibra que contienen estos compuestos aumentando sus ventajas de temperatura sobre las superaleaciones, con el tiempo y el esfuerzo resistente a la falla, aumentando de modo lineal el contenido de la fibra.

Tabla 5.12 Resistencia a la falla y deformación para compuestos y superaleaciones.

Aleación, % de al. c	Diámetro del filamento		% de al. c	Densidad g/cm ³	100 h de Resistencia a la falla		Tracción para deformación para 100 h de falla	
	mm	µg			MPa	kg		
100 h de resistencia a la falla a 1100 °C (2010 °F)								
Al-12 SiC-7W-4 Ni-5Mo-2 Ti (C2H38)	0.305	0.0120	40	12.5	138	20	112.5	44.3
Al-11Mo-4W-2Ni-1Ti			0	8.2	51	7.4	63.5	25.0
Al-12 SiC-2.5W-2Mo-1Mo-6Al-1Ti			0	8.0	48	7	81.3	24.1
Co-21 SiC-25W-10Mo-3.5Ti-0.8Ti			0	48	7			
Al-25W-15Co-2Al-2Ti			0	9.5	23	3.3	25.4	10
Al-24Co-5Al-1Ti	0.38	0.015	50	12.5	242	35	195.7	76.8
Al-24Co-5Al-1Ti	0.38	0.015	35	11.3	242	35	214.7	84.5

Fuente: Engineering Materials Handbook, Vol. 1, Composites, 1991, John Wiley & Sons.

En la matriz de Hierro reforzada con Tungsteno, se tiene que probar que en el ciclo térmico antes de llegar al esfuerzo a la falla ninguna propiedad se degrade.

El esfuerzo y la fluencia de falla en las propiedades se mide por el reforzamiento de Tungsteno con aleaciones de Cobre a 650 y 815 °C (1200 y 1500 °F).

5.6.3 RESISTENCIA DE FLUENCIA

La fluencia normal responde a las regiones mostradas primera, segunda, y tercera en una tracción contra el tiempo relacionados con el esfuerzo cortante que es usualmente para los compuestos reforzados con Tungsteno. Una serie de pruebas llevo a un 45% de vol. 0.38 mm (0.015 pig) del diámetro de la fibra W - 1%ThO₂ en una matriz Fe - Cr - Al - Y. En la figura 5.14 a las muestras a 1150 °C (2100 °F) se les incrementaron las cargas para resistir niveles de 210, 228, y 240 MPa (30, 33, y 35 ksi).

La resistencia de fluencia para la matriz Fe - Cr - Al - Y es extremadamente baja a estas temperaturas, la resistencia de fluencia total del compuesto es determinada por la fibra de Tungsteno.

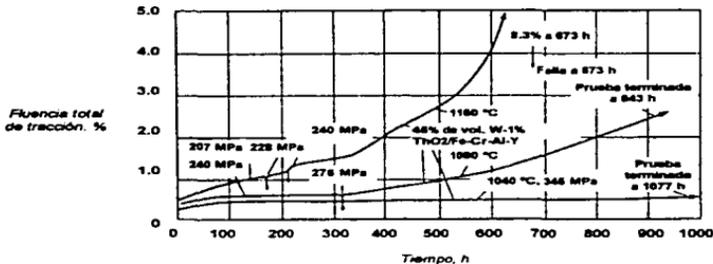


Fig. 5.14 Datos de fluencia para compuestos reforzados con fibras de Tungsteno a 1037, 1093, y 1149 °C (1900, 2000, y 2100 °F)

5.6.4 OXIDACIÓN Y CORROSIÓN EN CALIENTE

Los materiales usados en los respiraderos de las turbinas de gas son susceptiblemente atacados por la oxidación y corrosión en caliente. El ambiente de la turbina tiene una atmósfera oxidante y agentes oxidantes, como los productos que tienen sulfuros, sulfatos, cloruros, y otros productos. Cuando los materiales se exponen al ambiente de combustión, cenizas ó sales que se depositan en su superficie. La reacción de la superficie se considera diferente, bajo tales condiciones la degradación del material se refiere a la corrosión en caliente.

La oxidación de la fibra y la sulfatación son pruebas del 40% de vol. de la fibra de Tungsteno en una matriz Ni - 20Cr expuestos a la rápida oxidación de la fibra de Tungsteno, seguida por la considerable distorsión y degradación de la matriz. El peso incrementa a las curvas para la oxidación del material a 900 y 1000 °C (1650 y 1830 °F) como se muestra en la figura 5.15. Para este sistema, las interacciones considerables ocurren entre los óxidos en la matriz adyacente a las fibras y el óxido sobre las fibras por si mismas.

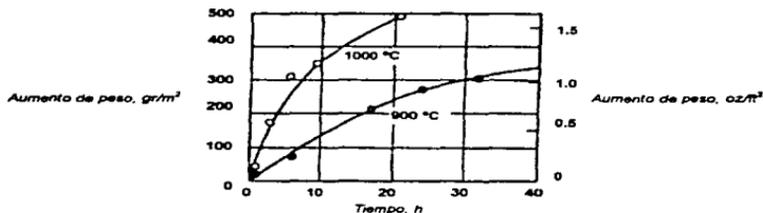


Fig. 5.15 Oxidación de la matriz Ni - 20Cr reforzada con fibras de W a 900 °C (1650 °F) y 1000 °C (1830 °F).

5.7 MMC REFORZADOS CON FIBRAS DISCONTINUAS TIPO PARTICULAS

Las fibras discontinuas tipo particulas que refuerzan a los Compuestos de Matriz Metálica MMC, son una clase de materiales que tienen una mezcla de propiedades en los reforzamientos y en la matriz. El reforzamiento puede ser muy resistente con las Fibras Whiskers (Fibras Finas) ó particulas. Donde cada reforzamiento tiene sus propiedades, y costos que dictan su uso en una situación determinada. Todos los MMC tienen la ventaja de ser capaces de ser procesados con los mismos métodos de trabajo como los metales. Pueden ser formados por extrusión, forjado, laminado, etc.

En el Aluminio, el Carburo de Silicio (SiC) Whiskers tiene muy buena resistencia, módulo de fatiga y propiedades con las temperaturas elevadas. Sin embargo, el costo de los Whiskers es muy alto, por lo que se limita el desarrollo continuo de este sistema.

Las fibras de alumina primero eran usadas para reforzar el área de los anillos en los pistones de diesel, por lo cual se tuvo que mejorar a la fibra teniendo un costo relativamente menor.

Las fibras con la matriz a temperatura ambiente, no aumentan la resistencia a la falla; sin embargo la resistencia se detiene a la temperatura de aproximadamente 300 °C (570 °F).

En la incorporación de las fibras se disminuye el coeficiente de dilatación térmica, disminuye conforme aumenta el porcentaje de las fibras en la matriz como se observa en la tabla 5.13. La dureza del compuesto aumenta conforme el porcentaje de las fibras, como se observa en la tabla 5.14. Esta combinación de propiedades ha hecho a el pistón un éxito.

Los compuestos que contienen Fibras Policristalinas de Alumina y de SiC Whiskers, en una aleación por fundición con Aluminio son más resistentes. Estos compuestos también son hechos por una fundición comprimida: Donde la

temperatura ambiente, el módulo elástico así como también el límite elástico son mejoradas por la adición de ambos reforzamientos. El SiC Whiskers resulta en ambos valores de módulo y límite elástico muy altos, como se muestra en la tabla 5.15.

Tabla 5.13 Coeficiente de dilatación térmica.

Fibra % de vol.	(en plano) 10 ⁻⁶ /K	(normal) 10 ⁻⁶ /K
0	2.03	2.03
0.12	1.66	1.76
0.18	1.54	1.66
0.24	1.55	1.57

Fuente: Engineers Materials Handbook, Vol 1 Composites, 1991, Willem C. Herington

Tabla 5.14 Valor de dureza a 25 °C (80 °F).

Fibra % de vol	Dureza Vickers No., HV10
0	131
0.12	179
0.18	190
0.24	212

Las propiedades de resistencia a temperaturas elevadas se muestran en la tabla 5.16. La resistencia de un compuesto que contiene 20% de vol. de reforzamiento a 350 °C (660 °F), es igual o mayor que la resistencia de la matriz a 250 °C (480 °F). El límite de fatiga a 10⁷ ciclos se mejora para 80 MPa (11.6 ksi), en la aleación con la matriz a 109 MPa (15.8 ksi) con un 20% de vol. de fibras policristalinas de alumina, y 131 MPa (19.0 ksi) con fibras de SiC Whiskers.

Tabla 5.15 Datos de aleaciones de Aluminio reforzadas con Fibras Policristalinas de Alumina y SiC Whiskers.

Fibra, % de vol	Límite elástico (0.2 %)		Resistencia máxima a la tracción			Módulo de Young			
	MPa	ksi	Desviación estándar	MPa	ksi	Desviación estándar	GPa	10 ⁶ psi	Desviación estándar
Policristalina de Alumina									
0	210	30.5	3.8	297	43.1	1.8	71.9	10.4	4.5
0.05	232	33.6	4.2	282	40.9	6.5	78.4	11.4	2.3
0.12	251.5	36.3	14.6	273	40.0	18.6	83.0	12.0	7.8
0.20	282.5	41.0	11.3	312	45.3	16.0	95.2	13.8	2.7
SiC Whiskers									
0	210	30.5	3.8	297	43.1	1.8	71.9	10.4	4.5
0.12	266.5	38.7	4.2	350	52.1	33.6	93.3	13.8	1.6
0.18	264.5	38.4	0.0	374	54.2	8.0	90.0	13.1	3.7
0.20	298	43.2	4.0	383.6	55.6	15.2	117.0	16.7	3.0

Fuente: Engineers Materials Handbook, Vol 1 Composites, 1991, Willem C. Herington

Tabla 5.16 Aleaciones de Aluminio reforzadas con las Fibras Polibutílicas de Aluminio y SiC Whiskers a diferentes porcentajes.

Fibra % (en vol)	330 °C (600 °F)				350 °C (650 °F)				380 °C (700 °F)			
	Límite elástico		Resistencia máxima a la tracción		Límite elástico		Resistencia máxima a la tracción		Límite elástico		Resistencia máxima a la tracción	
	MPa	ksi	MPa	ksi	MPa	ksi	MPa	ksi	MPa	ksi	MPa	ksi
Polibutílica de Aluminio												
0	33	5.1	55	8.0	70	10.2	70	10.2	115	16.7	115	16.7
0.05	56	7.9	83	11.9	79	11.5	88	12.6	112	16.2	134	19.4
0.12	86	12.4	74	10.7	194	27.9	154	22.3	188	27.0	190	27.3
0.20	110	15.8	112	16.2								
SiC Whiskers												
0	35	5.1	55	8.0			70	10.2	70	10.2	115	16.7
0.12	84	12.0	128	18.4	153	22.2	180	26.1	187	26.6	228	32.8
0.18	120	17.4	147	21.3								
0.20	163	23.6	186	26.8	217	31.0	233	34.1	268	38.6	294	41.9

La microestructura de los compuestos extruidos para 20 y 30% de vol. con el SiC reforzando los niveles de una matriz de Aluminio 6061. Donde estos compuestos responden al tratamiento en caliente en una manera similar al de la aleación con la matriz, como se muestra en la figura 5.16. Sin embargo, el periodo de tiempo para lograr la atracción de pico se reduce.

La tabla 5.17 contiene los resultados de las pruebas efectuadas con diferentes volúmenes con el porcentaje de forja.

Los valores de módulo son muy impresionantes, siendo igual al Titanio a 25% de vol. de SiC, y aumentando a 140 GPa (20×10^6 psi) con un 40% de vol. Estos compuestos tienen curvas de esfuerzo - deformación que son similares a los metales, en la figura 5.17 se observa la deformación plástica.

El límite elástico del Aluminio 6061 se aumenta desde 280 a 380 MPa (40 a 55 ksi) por la adición de 20% de vol. de SiC, y en el de Aluminio 7091 se aumenta de 540 a 630 MPa (78 a 92 ksi) por la adición de 20% de vol. de SiC.

La ductilidad de estos compuestos es mucho mayor para los compuestos de fibras continuas. La ductilidad disminuye con la cantidad en aumento del reforzamiento en algunos casos, como en el Aluminio 6061 y Aluminio 2124 con un 20% de vol. de SiC, la ductilidad es aceptable para los diseños estándar de metales que requieren por lo menos 5% de elongación.

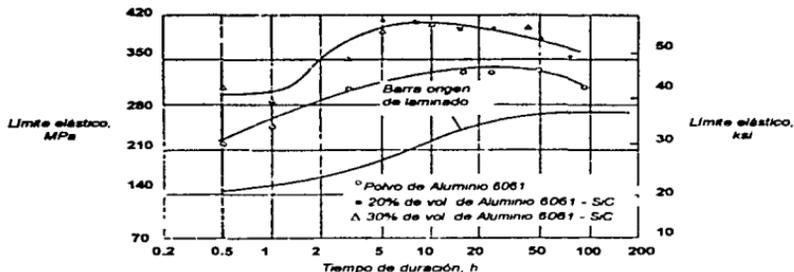


Fig. 5.16 Características de estabilización para un compuesto de Aluminio 6061 - SiC, en polvo y barra a 160 °C (325 °F), con un 20 y 30% de vol.

Con el compuesto de Aluminio con SiC se puede ahorrar material y también puede ser de poco peso, para reducir el exceso del material del borde en las articulaciones. El coeficiente de expansión del Aluminio con $23 \times 10^{-6}/K$ disminuye el compuesto de SiC, mientras que para el Aluminio con $11 \times 10^{-6}/K$ aumenta un 40% de vol. del compuesto de SiC. Este comportamiento de expansión es isotrópico.

El procesamiento de metalurgia de polvo es la técnica más común para producir compuestos de Aluminio reforzados con Whiskers. Estos compuestos también deben ser trabajados con metales para desarrollar mejores propiedades. A causa de su base como un polvo.

El reforzamiento para una aleación con la matriz y un metal en los compuestos de Whiskers, tienden a tener valores de módulos más altos en la dirección alineada a la extrusión, aproximadamente también tiene el mismo rendimiento de tracción, y una resistencia a la falla más alta, que hace que las partículas refuercen a los compuestos.

Tabla 5.17 Propiedades mecánicas de compuestos de aleaciones de Aluminio reforzados con partículas de B.C.

Aleación y % de vol.	Módulo de elasticidad		Límite elástico		Resistencia máxima a la tracción		Ductilidad, %
	GPa	10 ⁶ psi	MPa	ksi	MPa	ksi	
6061							
Forja	68.9	10	275.6	40	310.3	45	12
15	96.5	14	400.0	58	455.1	66	7.5
20	103.4	15	413.7	60	486.4	72	5.5
25	113.8	16.5	427.5	62	517.1	75	4.5
30	120.7	17.5	434.3	63	551.6	80	3.0
35	134.5	19.5	455.1	66	551.6	80	2.7
40	144.8	21	448.2	65	551.6	85	2.0
2124							
Forja	71.0	10.3	420.6	61	455.1	66	9
15 .....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....
20	103.4	15	400.0	58	551.6	80	7.0
25	113.8	16.5	413.7	60	565.4	82	5.8
30	120.7	17.5	441.3	64	593.0	86	4.5
35 .....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....
40	151.7	22	517.1	75	669.5	100	1.1
7099							
Forja	72.4	10.5	506.1	65	634.3	92	8
15 .....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....
20	103.4	15	655.0	95	724.0	105	2.5
25	115.1	16.7	675.7	98	729.9	115	2.0
30	127.6	18.5	703.3	102	772.2	112	1.2
35	131.0	19	710.2	103	724.0	105	0.90
40	144.8	21	689.5	100	710.2	103	0.90
7061							
Forja	72.4	10.5	537.8	78	586.1	85	10
15	96.5	14	579.2	84	669.5	100	5.0
20	103.4	15	620.6	90	724.0	105	4.5
25	113.8	16.5	620.6	90	724.0	105	3.0
30	127.6	18.5	675.7	98	785.3	111	2.0
35 .....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....
40	139.3	20.2	620.6	90	655.0	95	1.2

Fuente: *Engineering Materials Handbook*, Vol. 1 Composites, 1997, William C. Hwang.

Los compuestos de Whiskers tienen propiedades más bajas en la dirección perpendicular a la extrusión. Las características de expansión de los compuestos de Whiskers son al igual que para los compuestos de partículas, sin embargo, los compuestos de Whiskers están limitados a un máximo de 25% de vol. a causa de su dificultad con la aleación.

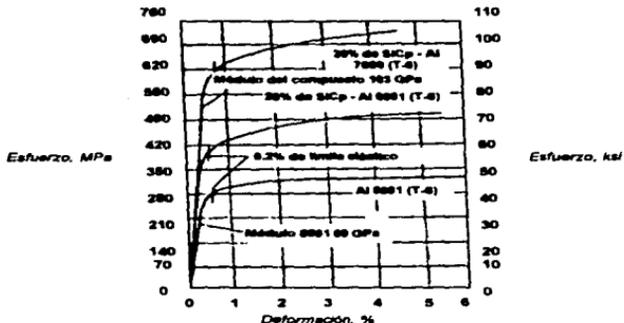


Fig. 5.17 Curvas Esfuerzo - Deformación para los compuestos de Aluminio 8061 y 7060 con un 20% de vol. de SiCp.

5.8 MMC REFORZADOS CON FIBRAS DISCONTINUAS TIPO WHISKERS

Las fibras Whiskers que refuerzan a los Compuestos de Matriz Metálica MMC, constituyen una categoría distinta de materiales avanzados que proveen diferentes ventajas, que las aleaciones comunes, en muchas aplicaciones de alto rendimiento. Estos materiales consisten de una dispersión uniforme como agujas cristalinas a lo largo de una matriz metálica homogénea. Las fibras Whiskers tienen mayor rigidez (Módulo de Young), resistencia más alta, y mejor estabilidad dimensional, sin un aumento importante en la densidad.

Una de las principales ventajas del reforzamiento con Whiskers en los MMC es la oportunidad de usar materiales más resistentes para la formación de la matriz para tener una orientación y tener una textura, como la resistencia de un cristal. La resistencia direccional puede muchas veces obtenerse en componentes terminados mediante extrusión, laminado, forja, etc.

La fabricación de partes complejas con reforzamiento de Whiskers en los MMC, es una operación que sirven para reducir potencialmente su peso, tales componentes son configurados con secciones más delgadas que las otras partes sin reforzamiento. Así, el uso del reforzamiento con Whisker en los MMC puede proporcionar la oportunidad para aumentar el ciclo de vida, en muchas aplicaciones críticas de peso.

5.8.1 LA MATRIZ DE METAL

La mayoría de las actividades desarrolladas se han enfocado en cuatro sistemas de aleaciones que son; Aluminio, Magnesio, Titanio, y Cobre, formalmente usadas en aplicaciones Especiales, Automotrices, Marítimas, y muchas otras.

Las aleaciones selectas de estos materiales tienen como características, un peso ligero, alta resistencia específica, rigidez, capacidad de temperaturas elevadas y alta conductividad térmica, cuando se refuerza con un 10 o 20% de vol. de SIC Whiskers.

Las mejores propiedades pueden obtenerse en un compuesto cuando el reforzamiento con Whiskers y aleaciones con la matriz son física y químicamente compatibles. La composición especial de la aleación con la matriz, en conjunción con los únicos revestimientos con Whiskers, se han ideado para perfeccionar el desempeño de seguros compuestos metálicos. Algunos de los compuestos más exitosos se diseñaron para aplicaciones comerciales que usan aleaciones con matrices de Aluminio y Magnesio.

5.8.2 PROPIEDADES DEL COMPUESTO

Las propiedades mecánicas del SIC reforzadas con Whiskers en los MMC son superiores comparados con la alta resistencia de aleaciones de Aluminio y Magnesio, tienen resistencia y rigidez más alta, mejor estabilidad dimensional, y gran resistencia a la fatiga especialmente a temperaturas elevadas. La capacidad para adaptar ambas propiedades mecánicas y físicas son un aspecto único e importante.

Aumentando el contenido de Whiskers en el material, aumenta la resistencia a la tracción, límite elástico y módulo elástico.

La figura 5.18 muestra el comportamiento de un compuesto con diferentes porcentajes de reforzamiento. Estas comparaciones muestran que los Whiskers tienen propiedades superiores sobre las partículas a cualquier fracción de volumen.

La tabla 5.18 compara las propiedades de un material sin reforzamiento con otro con reforzamiento con Whiskers. Se observa que hay mejoras en las propiedades como resistencia a la tracción, límite elástico, y módulo elástico, que afrontan la reducción del espesor de la sección y peso estructural.

La tabla 5.19 muestra las propiedades traccionales del SiC reforzadas con Whiskers para una aleación de Aluminio 2024 - T6 antes y después de la extrusión. Mientras la extrusión en los MMC ha aumentado la resistencia a la tracción longitudinal, relativamente poco ha cambiado en su resistencia a la tracción transversal.

El Coeficiente de Dilatación Térmica (CTE) longitudinal y transversal, puede ser igual a un valor de la relación apropiada a la extrusión, para un determinado contenido de SiC reforzado con Whiskers.

Tabla 5.18 Propiedades de materiales extruísos con y sin reforzamiento con Whiskers.

Tipo de material	Resistencia máxima a la tracción		Límite elástico		Elongación %	Módulo de Young		Coeficiente de expansión térmica		Densidad gr/cm ³
	MPa	Ksi	MPa	Ksi		GPa	10 ⁶ psi	10 ⁻⁶ /°F	10 ⁻⁶ /°F	
2124 - T6	482	69.9	446	64.9	7.0	74.4	10.8	22.5	2.77	
2124 - T6 - 20% de vol de SiC Whiskers	806	24.0	497	72.0	2.4	127.0	18.4	13.0	2.86	
ZK60A - T3	365	52.9	303	43.9	11.0	44.8	6.49	24.3	1.83	
ZK60A - T3 - 20% de vol de SiC Whiskers	813	88.9	517	74.9	1.2	98.5	13.9	14.4	2.11	

Source: Engineer Bulletin Handbook, Vol. 1 Composites, 1991, John L. Cox.

El Carburo de Silicio reforzado con Whiskers puede elaborarse por medio de la extrusión, forja y laminado para producir un MMC de hoja con promedio de direccionales de alto rendimiento. Las propiedades del SiC reforzado con Whiskers en los MMC de hoja, se muestra en la tabla 5.20.

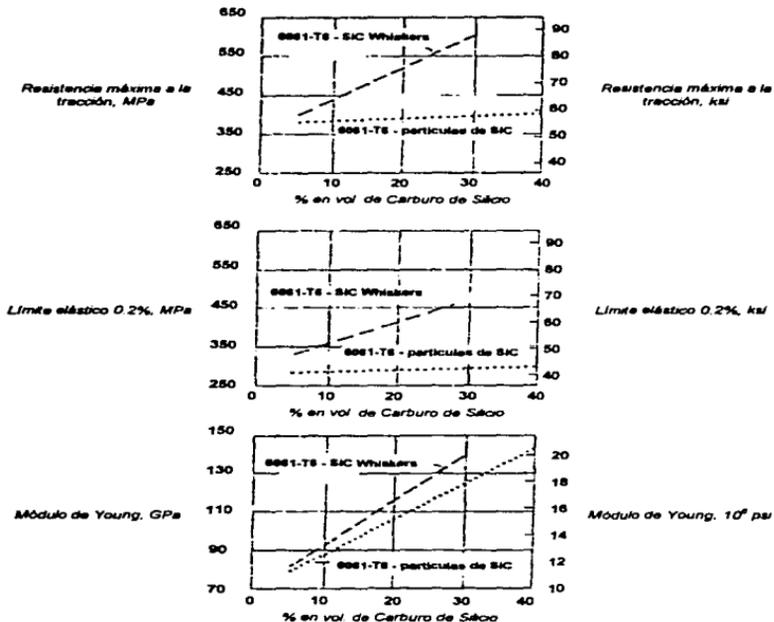


Fig. 5.18 Efecto del porcentaje de Whiskers sobre las propiedades de un compuesto.

El material es caracterizado por la alta resistencia y rigidez, con la ductilidad y dureza suficiente para muchas aplicaciones estructurales aeroespaciales. Las figuras 5.19 y 5.20 muestran el comportamiento de un material con y sin reforzamiento en cuanto a su resistencia y al módulo elástico en función de la temperatura.

Tabla 5.19 La extrusión de laminado, mostrando los efectos de alineación del SiC con Whiskers.

Material 2024 - T8 reforzado con 70% de vol de SiC Whiskers

Material para MMC	Pruebas de Orientación	Resistencia máxima a la tracción		Límite elástico		Densidad (g/cm ³)	Coeficiente de dilatación térmica 10 ⁻⁶ /K
		MPa	ksi	MPa	ksi		
Diám. de 12 pig cilíndrico	Longitudinal (e=0)	496	71.9	351	50.9	2.86	16.1
1/2 pig por 3 pig extruido	Longitudinal	737	107	448	64.9	2.86	13.0
Diám. de 12 pig cilíndrico	Transversal	503	72.9	358	51.9	2.86	16.4
1/2 pig por 3 pig extruido	Transversal (e=0)	462	67.0	379	54.9	2.86	19.8

Fuente: Experimental Mechanics International, Vol. 7, Septiembre, 1991, José L. Casas

Tabla 5.20 Propiedades de la aleación de Aluminio reforzado con SiC Whiskers en una hoja.

Material 2124 - T8 reforzado con 13% de vol de SiC Whiskers

Grupo de la hoja mm	Prueba de Orientación pig	Resistencia máxima a la tracción		Límite elástico		Elongación %	Módulo de Young	
		MPa	ksi	MPa	ksi		GPa	10 ⁶ psi
2.54	0 100 Longitudinal (e lo largo de la dirección del rollo)	718	104	573	83.1	5.3	114	16.5
2.54	0 100 Transversal (90° a la dirección del rollo)	559	81.0	386	56.4	8.3	85	14

Fuente: Experimental Mechanics International, Vol. 7, Septiembre, 1991, José L. Casas

5.8.3 APLICACIONES

El SiC reforzado con Whiskers se emplea en la industria aeroespacial, teniendo una alta resistencia, buena dureza de fractura, y mejoramiento en el desempeño a temperaturas elevadas, esto se refleja directamente en la reducción de peso del diseño de vuelo.

En el prototipo de un proyectil las alas del proyectil son de Aluminio con reforzamiento de SiC Whiskers, esto es un ejemplo óptimo de componentes de alto rendimiento que pueden ser fabricados por este material. Estos compuestos tienen la resistencia a temperaturas elevadas y la resistencia de abrasión necesaria para soportar el calentamiento aerotérmico del vuelo. En el reemplazo del proyectil convencional más pesado de Titanio vuela con las alas de MMC, resulta que tiene una reducción importante de peso.

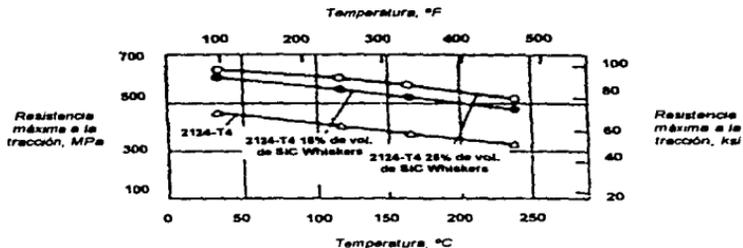


Fig. 5.19 Comportamiento de la resistencia a la tracción a diferentes aleaciones de Aluminio con y sin reforzamiento, en una prueba a 100 h de exposición.

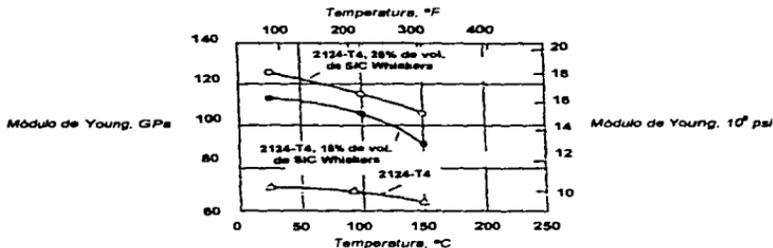


Fig. 5.20 Comportamiento del módulo a diferentes temperaturas, de aleaciones de Aluminio con y sin reforzamiento en una prueba a 100 h de exposición.

Otra aplicación sería en las herraduras especiales para los caballos de pura sangre, caza, y de exhibición, son moldeadas por aleaciones de Aluminio reforzadas con SiC Whiskers. Estas herraduras son elaboradas por MMC, son más ligeras y resistentes, y tienen una excelente resistencia a la corrosión y al desgaste.

5.9 MMC REFORZADOS CON FIBRAS DISCONTINUAS DE CERÁMICA

Las fibras Discontinuas de Cerámica que refuerzan a los Compuestos de Matriz Metálica MMC, tiene una flexibilidad considerable en términos de composición, desempeño, y método de fabricación. Las características de estas fibras permiten el uso total o selectivo del reforzamiento, y el desarrollo de propiedades isotrópicas o anisotrópicas. Las propiedades claves que pueden ser modificadas por la adición de las fibras discontinuas de Cerámica incluyen dilatación y conductividad térmica, características de amortiguamiento, módulo de resistencia, límite de resistencia a la fatiga, y resistencia al desgaste.

Las fibras discontinuas de Cerámica que refuerzan a los MMC se compone de tres constituyentes; las fibras, que no tienen ningún valor estructural, generalmente tienen alta resistencia y rigidez; la matriz, que junta a las fibras en la orientación y le proporciona correctamente la distribución de las cargas aplicadas; y la interfase de zona que mezcla a la fibra y a la matriz, para determinar la unión y carga de traslado.

5.9.1 LAS FIBRAS

Las composiciones de las fibras discontinuas de Cerámica que predominan como reforzadoras en matrices de metal son: el Carburo de Silicio, Alumina, Aluminosilicato, y Zirconio.

En el caso del Carburo de Silicio, el reforzamiento puede ser de una fibra ($>$ a $1 \mu\text{m}$ o $40 \mu\text{plg}$ de diámetro) ó un Whiskers ($<$ a $1 \mu\text{m}$ o $40 \mu\text{plg}$ de diámetro). Como se mencionó, estas formas de fibras son producidas por el proceso de deposición química de vapor (CVD) ó por el proceso de vapor liquido sólido (VLS).

Las fibras de Carburo de Silicio inicialmente se desarrollaron para utilizarse como un reforzamiento medio, muchas de las fibras discontinuas de Cerámica se usan como reforzamiento en aisladores y materiales refractarios. Las fibras de Alumina, Aluminosilicato y Zirconio son iguales que las fibras de Carburo de Silicio.

Las características importantes de los distintos grados de reforzamientos con las fibras discontinuas de Cerámica se dan en la tabla 5.21.

Tabla 5.21 Características de las Fibras Discontinuas de Cerámica

Material	Forma	Diámetro		Densidad g/cm ³	Resistencia inducida a la tracción		Módulo de tracción		Coeficiente de dilatación térmica 10 ⁻⁴ /K
		µm	IPS		MPa	ksi	GN/m ²	10 ⁴ psi	
Carburo de Silicio	Cristalino	0.2	8	3.2	800	120	300	75	4.3
Carburo de Silicio	Cristalino	1.20	4700	3.2					
Alumina	Cristalino	2	120	3.2	2000	290	300	45	8.1
Aluminosilicato	Amorfo	2	80	2.7	1730	250	104	15	
Zirconio	Cristalino	5	200	5.7			208	30	10.5

Fuente: *Engineering Materials Handbook, Vol. 1 Composites, 1991*; Milton W. Toaz

La resistencia de las fibras discontinuas de Cerámica es muy alta, por lo que se tiene un rango de temperatura hasta 1500 °C (2730 °F). La rigidez en la mayoría de los casos, es mucho más alta que para las aleaciones con la matriz, de importancia particular el coeficiente de dilatación térmica (CTE) es bajo, con respecto a las fibras discontinuas de Cerámica.

El costo de las fibras discontinuas de Cerámica varia considerablemente, como se muestra en la tabla 5.22. Por que muchos de estos materiales son derivados de fibras refractarias comerciales.

Tabla 5.22 Costo relativo de las Fibras Discontinuas de Cerámica.

Material	\$/kg	\$/lb
Carburo de Silicio	90 - 550	40 - 250
Zirconio	330 - 440	150 - 200
Aluminosilicato	13 - 45	13 - 20
Alumina	35 - 90	16 - 40

Fuente: *Engineering Materials Handbook, Vol. 1 Composites, 1991*; Milton W. Toaz

5.9.2 LA ALEACIÓN CON LA MATRIZ

La aleación con la matriz predominante sigue siendo usada en las fibras discontinuas de Cerámica, con base de Aluminio, Magnesio, Titanio, y Cobre.

Las aleaciones de Aluminio son iguales que las aleaciones con fundición y forja. Estas aleaciones son aplicadas por la técnica de Presión por Fundición, y por la técnica de Metalurgia de Polvo (P/M). Ejemplos de estas aleaciones se muestran en la tabla 5.23.

Tabla 5.23 Matrices de Aluminio reforzadas con Fibras Discontinuas de Cerámica.

<i>Proceso P/M</i>	<i>Proceso de Fundición</i>
2014	242.0
2024	332.0
4032	336.0
6061	339.0
7075	354.0
	356.0
	390.0

Fuente, Engineered Matenas Handbook, Vol 1 Composites, 1997, Milton W Toez

5.9.3 PROPIEDADES DEL COMPUESTO

PROPIEDADES FÍSICAS.-

La estructura de una fibra discontinua de Cerámica que refuerza a un compuesto, es diferente desde su fibra reforzada con las partes donde las fibras no tienen una cierta orientación uniaxial en el estado de fabricación. En el caso del proceso de Metalurgia de Polvo (P/M), la orientación inicial de la fibra es en todas direcciones. En el proceso de fundición los compuestos tienen dos orientaciones dimensionales, esto es una consecuencia del proceso preformado.

Las propiedades de las fibras discontinuas de Cerámica reforzadas con los compuestos son superiores, en la dirección longitudinal de la fibra (0°), e inferior en la dirección transversal a la fibra axial (90°).

La capacidad para influir en el Coeficiente de Dilatación Térmica (CTE) de un material, es importante cuando las tolerancias entre metales son requeridas.

Las fibras discontinuas de Cerámica tienen muy poco Coeficiente de Dilatación Térmica (CTE) que los metales, por lo que es posible alterar las características de expansión de las fibras que refuerzan a los compuestos, particularmente en el eje de la fibra.

La conductividad térmica de las fibras discontinuas de Cerámica son relativamente más bajas que las aleaciones con la matriz. Como uno espera la composición contenida, y la orientación de las fibras, son importantes en la transferencia de calor, las características de estas fibras que refuerzan a los compuestos, se muestran en la tabla 5.24.

Tabla 5.24 Características de las fibras reforzadas.

Matriz	Fibra, % de vol	0 °C		Conductividad térmica W/m·K (Btu in/h·ft²·°F)		90 °C	
	
332.0 T5 .....	.....	.....	.....	176	1220	.....	.....
	Alumina, 5	158	1100	.....	.....	140	970
	Alumina, 15	134	930	.....	.....	98	680
	Zirconio, 19	116	800	.....	.....	87	600
339.0 T5 .....	.....	.....	.....	144	1000	.....	.....
	Alumina, 10	112	780	.....	.....	.....	.....
	Alumina, 15	99	690	.....	.....	.....	.....
	SiC, 15	136	940	.....	.....	.....	.....
2024 T6 .....	.....	.....	.....	151	1050	.....	.....
	SiC, 25	102	710	.....	.....	.....	.....

Fuente: *Engineered Materials Handbook, Vol 1 Composites*, 1991, Milton W. Toolz

PROPIEDADES MECÁNICAS.-

Las fibras discontinuas de Cerámica se consideran más duras que las fibras metálicas. Algunas fibras discontinuas de Cerámica refractarias tienen un módulo

elástico que es más alto que el de la aleación con la matriz. En cualquier caso, el módulo del compuesto aumenta con el contenido en aumento de la fibra según la regla de las mezclas. La alta rigidez del Carburo de Silicio Whiskers puede resultar en un importante mejoramiento con una aleación de Aluminio, como se muestra en la figura 5.21.

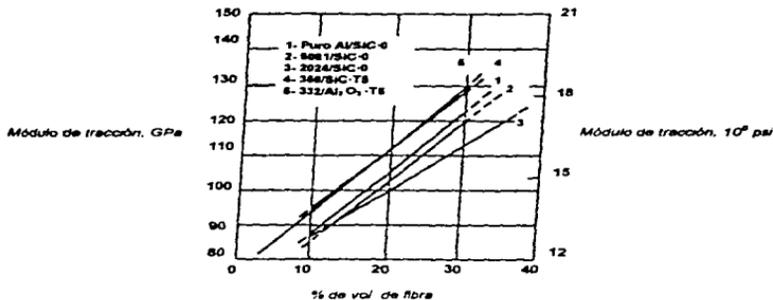


Fig. 5.21 Módulo de elasticidad de la fibra de Aluminio en función del contenido de la fibra.

La resistencia de un compuesto de matriz de Aluminio que contiene fibras de Aluminosilicato puede ser inferior a la resistencia de la aleación con la matriz a bajas fracciones de volumen (< 10%). Las adiciones de las fibras de Carburo de Silicio mejoran las propiedades de temperatura ambiente, como se muestra en la tabla 5.25.

Un importante mejoramiento de la resistencia ocurre a temperaturas elevadas, por encima de las temperaturas de la aleación con la matriz.

Ejemplos de dos aleaciones por fundición de Aluminio reforzadas con fibras de Alumina se muestra en la figura 5.22 y en la figura 5.23 se muestra un ejemplo del desempeño de una aleación forjada reforzada con fibras de Carburo de Silicio

Tabla 5.25 Resistencia a la tracción de compuestos de Carburo de Silicio y Aluminio.

Material	Fibra, % de vol.	Resistencia máxima a la tracción			
		Base MPa	ksi	Reforzamiento MPa	ksi
Puro Aluminio	11	59	8.6	235	34.1
6061 - T6	16	300	43.5	441	64.0
2024 - T4	20	470	68.2	565	81.9

Fuente: Engineered Materials Handbook, Vol. 1 Composites, 1991, Milton W. Toaz

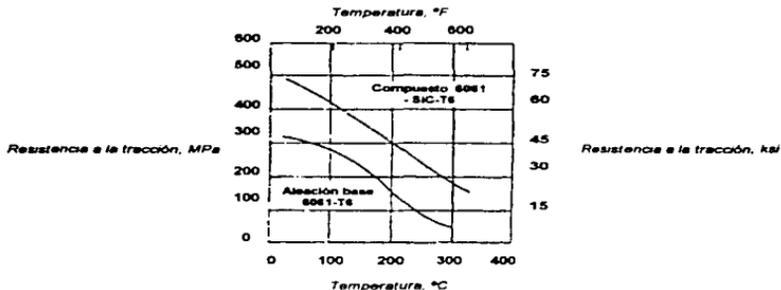


Fig. 5.23 Resistencia a la tracción en función de la temperatura para 16% de vol. de las fibras de Carburo de Silicio en una aleación de Aluminio 6061-T6.

5.9.4 APLICACIONES

En la Industria Automotriz, se está creando mucho interés en el reforzamiento del motor de diesel, en el cual se están haciendo investigaciones para hacer un mejoramiento en los pistones diseñados. La área de presión en el cilindro es más alta, por lo que aumenta la presión de inyección del combustible, por tal motivo se hace un estudio para poder aplicar las fibras discontinuas de Cerámica, para cambiar la zona de la cámara de combustión.

Otra aplicación de estas fibras es en los compuestos para frenos de tambor y de disco.

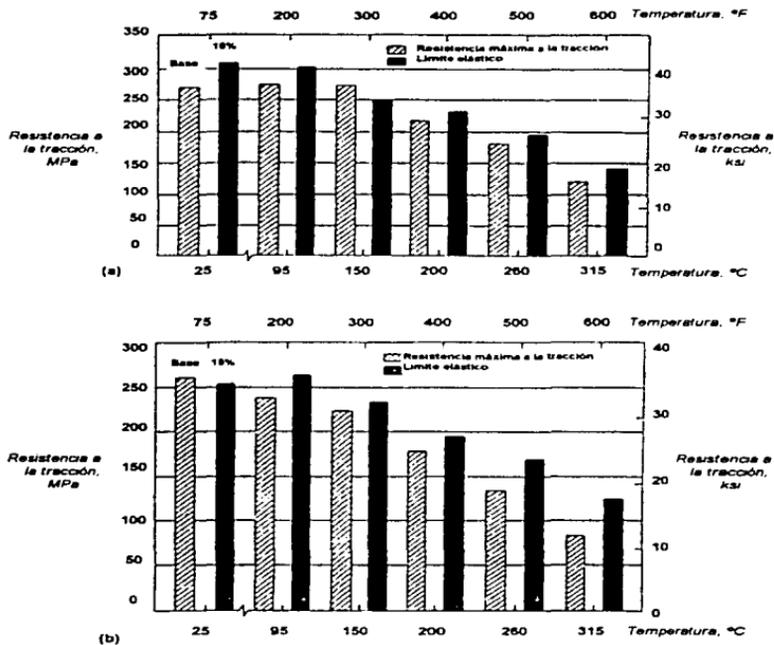


Fig. 5.22 Resistencia máxima a la tracción en función de la temperatura para 2 aleaciones de Aluminio reforzadas con fibras discontinuas de Cerámica. (a) 242 O/Al, (b) 339 O/Al, tratadas con calor.

CAPÍTULO VI

CASOS PRÁCTICOS

CAPÍTULO VI

CASOS PRÁCTICOS

6.1 INTRODUCCIÓN

En este capítulo se observaran las aplicaciones específicas, que se le dan a los Materiales Compuestos de Matriz Metálica MMC, en la industria automotriz

Estos materiales son, ampliamente utilizados en la industria automotriz en diferentes partes de los automóviles. Las aplicaciones que se les dan son muy diversas, debido a sus diferentes propiedades; que además pueden ser vanadas con facilidad, para el objetivo o aplicación deseada.

Los materiales compuestos fueron descubiertos en los años treinta, y no fue hasta los años sesenta que se empezó a investigar con profundidad a este tipo de materiales, debido a que se presentó en la industria automotriz la necesidad de utilizarlos debido a sus propiedades tales cómo, un menor peso, aislante térmico, aislante eléctrico, facilidad de maquinado, facilidad para el trabajo en frío o en caliente, alta resistencia a la corrosión, etc.

Las primeras aplicaciones de estos materiales fueron en los pistones de los motores con ciclo diesel, por las altas temperaturas que estos desarrollan, para lo cual se usaron aleaciones de Aluminio. Otra de las aplicaciones de estos materiales fue en los sistemas de frenos, con una aleación de Hierro con reforzamiento de Grafito.

En el año de 1934, fue cuando se registro el uso de estos materiales en S. A. E. (Society Automotive Engineers), pero es hasta el año de 1971 que se dio una mayor importancia a estos materiales, que entran en el grupo de materiales no metálicos. En este capítulo observaremos por medio de ejemplos de casos prácticos, las aplicaciones y ventajas que tienen los materiales Compuestos de Matriz Metálica (MMC) en la industria del automóvil.

CASO
PRÁCTICO
NO. I



6.2 CASO No. 1

La aplicación de MMC en los pistones, en las aleaciones y su reforzamiento. La empresa que proporciona los requerimientos de diseño es AE Goetze™ (Alemania).

Los principales requerimientos de diseño de los pistones son:

Bajo coeficiente de expansión térmico.- *Debido a las temperaturas elevadas y medidas ajustadas es importante, que existan materiales de bajo coeficiente térmico de expansión.*

Materiales de bajo peso.- *Por el uso constante de este mecanismo es necesario, que el material del mismo sea ligero, para evitar sobrepeso, y provocar un par mayor al diseñado.*

Bajo desgaste al uso continuo.- *Los materiales usados deben tener características que les permitan tener una baja dureza, para una mayor vida útil.*

Factibilidad de producción y maquinado.- *Punto importante para la aceptación de estos materiales, que con elevada producción su costo sea viable. El maquinado debe ser punto muy importante para crear diferentes tipos de piezas según las necesidades que se necesiten satisfacer.*

Para ello la justificación de los reforzamientos para la fabricación de pistones en la industria automotriz. Debe ser en base a sus necesidades y condiciones de trabajo; por medio de las aleaciones y los reforzamientos del pistón.

Las aleaciones que se utilizan para los pistones son, de Aluminio y Cobre. Su reforzamiento básicamente es de dos tipos, la fibra discontinua tipo partícula y la fibra discontinua de Cerámica.

La utilización de estos materiales, se debe a las necesidades que tienen los fabricantes de motores de las diferentes compañías, a continuación

mencionaremos algunas necesidades; poco peso, mayor rendimiento, alto módulo de rigidez, fácil manejo, aislamiento térmico, bajo coeficiente de fricción, etc.

Las aleaciones de Aluminio se utilizaron en principio para los motores de ciclo diesel, por las temperaturas elevadas que este ciclo desarrolla; para ello el Aluminio tiene un bajo coeficiente térmico, y por ello el peso tiene que ser bajo para no provocar un par alto en el eje de transmisión.

Estos tipos de aleaciones con el tiempo se fueron generalizando en todos los motores por el potencial que se observó en este. Después las necesidades se fueron haciendo más difíciles de satisfacer con el uso exclusivo de Aluminio para ello se inventaron los reforzamientos que incrementan ciertas propiedades de las diferentes aleaciones, para la satisfacción de las mismas. El Aluminio por sí sólo, no cuenta con características muy importantes, sin embargo, al combinarse con otros elementos en mayor o menor proporción, resulta de gran utilidad para un gran número de usos.

En los Estados Unidos existen diferentes Sociedades para dar una normatividad a las aleaciones y los reforzamientos de materiales compuestos, en la industria automotriz y son; S. A. E. (Society Automotive Engineers); A. S. M. (American Society Materials); y A. S. T. M (American Society Testing Materials).

De estas sociedades y sus normas se basan los criterios para el uso y selección de las aleaciones y los reforzamientos. Como se especifica en la tabla 6.1.

Las aplicaciones de las aleaciones de Aluminio se quedan en los pistones normalmente con un reforzamiento de fibra discontinua de Cerámica ó fibra discontinua tipo partícula, con el reforzamiento adquieren propiedades requeridas para la aplicación deseada.

Cuando la matriz es una aleación de Aluminio, con un reforzamiento de fibras discontinuas tipo partícula de Carburo de Silicio Whisker y Alumina; se hacen cabezas de refuerzo en los pistones que reciben directamente la explosión, y donde

ocurre por lo tanto el mayor desgaste. Las fibras tienen las propiedades de tener alta resistencia al esfuerzo, alto rendimiento, elevado módulo de elasticidad a temperaturas elevadas, como se observa en las figuras 6.1 y 6.2.

Tabla 6.1 Las aleaciones de Aluminio y Cobre comunmente utilizadas en los pistones son.

S.A.E.	I.S.O.	Características	Aplicaciones
<i>Designación</i>			<i>Generales</i>
Aleaciones de Aluminio			
782	Al Cd3Cu Ni	Excelente resistencia a la corrosión, esfuerzo a la fatiga, resistencia al desgaste.	Cojinetes de los Cigüñales de alto desempeño, Pistones
784	AlSi11Cu		
785	AlZn5Si2CuPb		
Aleaciones de Cobre			
792*	CuPb10Sn10	Muy buena resistencia a la fatiga, buena capacidad de carga resistencia al uso, regular resistencia a la corrosión, pobre conformabilidad	Pasador del Pistón, (pequeño), Chamela de dirección, Bujes, Balancin.

Fuente, Handbook S.A.E., Vol 7, 1993, Capítulo 11

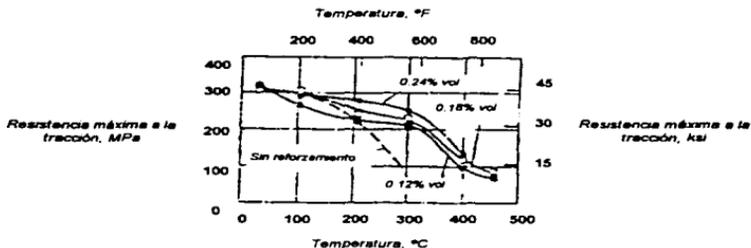


Fig. 6.1 Efecto de la temperatura sobre la resistencia máxima a la tracción del compuesto Al - 9Si - 3Cu.

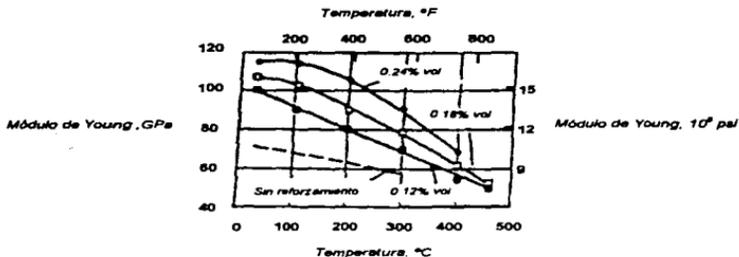


Fig. 6.2 Efecto de la temperatura sobre el módulo de elasticidad del compuesto Al - 9Si - 3Cu.

Otro factor que justifica el uso de las fibras, es en la tabla comparativa de tracción de los compuestos de Alúmina policristalina y SiC Whiskers, con la aleación de Aluminio y Cobre. De donde se observa que los reforzamientos incrementan las propiedades en medida de mayor o menor proporción del contenido del reforzamiento, en este caso en función de la temperatura, ver tabla 6.2.

Tabla 6.2 Datos de aleaciones de Aluminio reforzadas con Fibras Policristalinas de Alúmina y SiC Whiskers.

Fibra, % de vol	Límite elástico (0.2 %)		Resistencia máxima a la tracción			Módulo de Young			
	MPa	ksi	Desviación estandar	MPa	ksi	Desviación estandar	GPa	10 ⁶ psi	Desviación estandar
Policristalina de Alúmina									
0	210	30.5	3.8	297	43.1	1.8	71.9	10.4	4.5
0.05	232	33.6	4.2	282	40.9	6.5	78.4	11.4	2.3
0.12	251.5	36.5	14.6	273	40.0	19.6	83.0	12.0	7.8
0.20	282.5	41.0	11.3	312	45.3	16.0	85.2	13.8	2.7
SiC Whiskers									
0	210	30.5	3.8	297	43.1	1.8	71.9	10.4	4.5
0.12	266.5	38.7	4.2	359	52.1	33.6	85.3	13.8	1.6
0.16	264.5	38.4	0.6	374	54.2	6.0	80.0	12.1	3.7
0.20	288	43.2	4.0	383.6	55.6	15.2	111.0	16.1	5.0

Fuente: Handbook of Composite Materials, Vol. 2

Las aplicaciones de los reforzamientos son más usados en las aleaciones de Aluminio. Por lo que nos concentraremos en estas aleaciones con mayor énfasis.

Una de las principales causas del uso del reforzamiento es su resistencia a temperaturas elevadas con una mínima variación de valores en el esfuerzo de trabajo y esfuerzo máximo. Por ello se tomaran en cuenta los comportamientos del material con los reforzamientos para el diseño mecánico. Como se observa en la tabla 6.3.

Tabla 6.3. Aleaciones de Aluminio reforzadas con las Fibras Politermosticas de Aluminio y SAC. Resistencia a diferentes temperaturas.

Fibra, %	250 °C (480 °F)				300 °C (570 °F)				230 °C (440 °F)			
	Límite elástico MPa	Resistencia máxima a la tracción MPa	Elongación %	Resistencia máxima a la tracción MPa	Límite elástico MPa	Resistencia máxima a la tracción MPa	Elongación %	Resistencia máxima a la tracción MPa	Límite elástico MPa	Resistencia máxima a la tracción MPa	Elongación %	Resistencia máxima a la tracción MPa
Politermostica de Aluminio												
0	35	51	35	8.0	79	11.3	70	10.2	70	10.2	115	18.7
0.05	34	7.8	8.2	8.1	84	12.8	11.2	16.2	134	18.4		
0.12	68	9.9	74	10.7								
0.20	110	18.0	11.2	18.2	154	22.3	15.3	22.5	188	27.0	188	28.7
SAC Whesslers												
0	33	3.1	30	8.0			70	10.2	70	10.2	115	18.7
0.12	34	12.8	124	18.0	13.3	22.2	180	28.1	18.7	28.8	236	32.8
0.18	120	17.4	141	21.3								
0.20	18.7	21.0	184	28.2	20.7	30.0	23.5	34.1	20.8	34.0	284	41.2

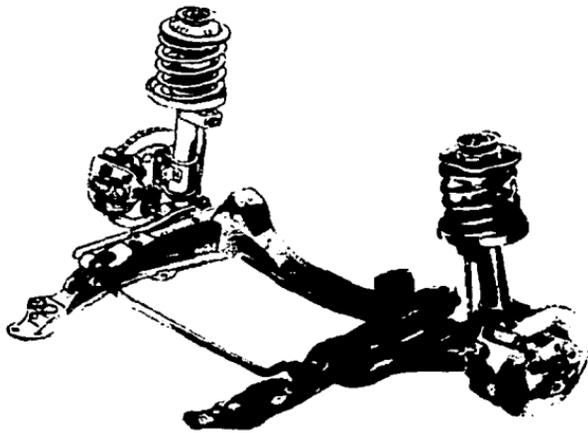
Fuente: Whesslers y Composites Materials, Inc. 2

El reforzamiento de las fibras discontinuas de Cerámica y las de tipo partícula tienen como fin, bajar el coeficiente de expansión térmico. Los coeficientes térmico varían según la concentración del reforzamiento con valores que van desde 24.5 a 112.4 ($10^{-6}/K$).

Lo que nos ayuda porque una de las principales condiciones de los pistones es el bajo coeficiente térmico de expansión, por la temperatura que en ellos se desarrolla.

La importancia de los materiales compuestos radica en el avance de los motores que nos exigen menores perdidas, mayor rendimiento, una gran fiabilidad, facilidad de producción y maquinado, etc..

CASO
PRÁCTICO
NO. 2



6.3 CASO No. 2

La aplicación de la aleación de Aluminio con reforzamiento de fibras discontinuas de Cerámica en la suspensión del disco de frenado, y sus características son proporcionadas por la empresa Duralcan™ U.S.A., conjuntamente con sus principales requerimientos.

Bajo peso.- *Con ello se evita una carga excesiva, por lo tanto se reducen el ruido y las vibraciones, obteniendo una mayor eficiencia.*

Resistencia al uso.- *Es necesario que el material tenga gran resistencia al desgaste por el uso continuo del mismo.*

Resistencia a la corrosión.- *Por su localización, se requiere una elevada resistencia a la corrosión, como se tiene un contacto continuo con la humedad tiende a oxidarse rápidamente.*

Bajo coeficiente de expansión térmico.- *Debido a las temperaturas elevadas hasta 400 °C que se logran alcanzar, se requiere un material, que no presente cambios a temperaturas elevadas.*

Facilidad de conformado.- *Es decir, que puedan hacerse cualquier tipo de piezas o mecanismos con facilidad.*

Número elevado de producción.- *Gracias a la necesidad, de un volumen muy grande de piezas de este material se requiere que el proceso sea rápido y de una elevada fiabilidad.*

La principal causa del uso de la aleación de Aluminio, es la sustitución de las fundiciones de Hierro, por el sobrepeso que existía en todo el mecanismo de frenado, provocando desgaste, vibraciones, ruidos, etc., para ello la aleación de Aluminio baja hasta un 40% el peso del mecanismo, permitiendo una mayor eficiencia en el freno.

Por lo cual se observara a continuación una tabla comparativa de la fundición de Hierro contra la aleación de Aluminio, ver tabla 6.4.

Como se observa la aleación de Aluminio reforzado tiene algunas características mejores que la fundición de Hierro, pero la principal razón de su utilización es la disminución de peso. La tendencia de reducir peso en los automóviles tiene la causa del ahorro de combustible. La empresa Duralcan™ tiene la patente del proceso para producir fundiciones y lingotes de este material para su aprovechamiento en otros usos.

Tabla 6.4. Aleación de Aluminio contra Fundición de Hierro

Designación Propiedad	S.A.E 209:A.M.S. 4219 F3S.20S - T61	Fundición Hierro Gns Grado 30 / 35
Módulo elástico, GPa (10 ⁶ psi)	100 (14.3)	90 - 120 (13 - 17.2)
Esfuerzo de cedencia, MPa (ksi)	340 (49)	215 - 270 (31 - 39)
Densidad, gr/cm ³ (lb /ptg ³)	2.8(0.10)	7.2 (0.26)
Conductividad Térmica W/m · K (Btu · h °F)	182 (105)	47 (27.3)
Calor Especifico J/kg · K (Btu/lb · °F)	837 (0.200)	402 (0.096)
Coefficiente térmico de expansión, 10 ⁻⁶ /°C (10 ⁻⁶ /°F)	17.4 (9.7)	12.2 (6.8)

Fuente: Advanced Composite Materials Magazine December 1985

La matriz de Aluminio en una fundición de S.A.E. No 359.0. Con la adición de hasta un 20% de SiC en partículas, esto proporciona un realce de la resistencia al desgaste por uso, incrementa la conductividad térmica, aumenta un cuarto la temperatura del esfuerzo y dureza, y da resistencia a temperaturas elevadas.

Las propiedades físicas del reforzamiento con fibras discontinuas de Cerámica, es que, debido a su orientación que es superior a lo largo del material.

Las dos principales propiedades físicas para su uso en los frenos son, la característica de expansión con respecto a la fundición de Hierro, la misma

orientación de las fibras discontinuas es la que provoca una expansión pequeña ó casi nula a diferencia de las fibras continuas, que por su alineamiento provocan una mayor expansión que las fibras discontinuas. Por ello se puede deducir que la orientación tiene un aspecto fundamental con respecto a la expansión.

La otra característica es que por la orientación de las fibras discontinuas estas tienden a reducir las vibraciones minimizándolas significativamente. Desgraciadamente esta propiedad sólo se observa en algunas aleaciones de Aluminio y Magnesio.

Las propiedades mecánicas de los materiales tienen características diferentes. Normalmente las fibras discontinuas de Cerámica son más duras que los metales, consecuentemente la adición de una fibra discontinua de Cerámica a un metal, vuelve al metal más duro, en proporción de la suma de la fibra añadida, algunas fibras discontinuas de Cerámica tienen un módulo de elasticidad mayor que la matriz o la aleación. El alto refuerzo que proporciona la fibra resulta importante con la matriz de Aluminio. En la figura 6.3 se observa como afecta el módulo elástico a los materiales.

Módulo elástico de la fibra reforzada con Aluminio en función del contenido de la fibra. En diversas investigaciones se ha comprobado la influencia de las fibras con el comportamiento de la aleación de Aluminio con reforzamiento, en el que el reforzamiento con una fracción baja de volumen ($< =10\%$) tiene una menor resistencia mecánica que la matriz a temperaturas superiores a los 130 °C. Ejemplo del comportamiento de dos aleaciones de Aluminio reforzadas con fibras de Alumina, se observa en la figura 6.4.

Un inconveniente del reforzamiento con fibras discontinuas de Cerámica, es el costo que puede llegar a variar considerablemente, con las fibras refractarias en la variación de 4 a 1. Como se puede observar en la tabla 6.5.

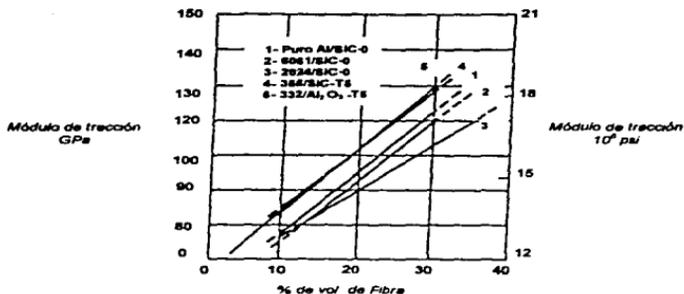


Fig. 6.3 Módulo de elasticidad de la fibra de Aluminio en función del contenido de la fibra.

Tabla 6.5 Costo relativo de las Fibras Discontinuas de Cerámica.

Material	\$/kg	\$/lb
Carburo de Silicio	90 - 550	40 - 250
Zirconio	330 - 440	150 - 200
Aluminosilicato	13 - 45	13 - 20
Alumina	35 - 90	16 - 40

Fuente: Property by Alloys. A S T M. 1993

Uno de los problemas de trabajar con las fibras discontinuas de Cerámica es la seguridad física del personal que las trabaja, ya que no debe de existir contacto con la piel, ni con alguna otra parte del cuerpo. El personal que labore con ellas debe ser altamente capacitado previamente, para prevenir accidentes. Por lo tanto este tipo de consideraciones incrementa el costo de las fibras.

Más sin embargo, su utilización es necesaria si se quiere seguir avanzando en el campo de nuevos materiales con mayores prestaciones de diseño.

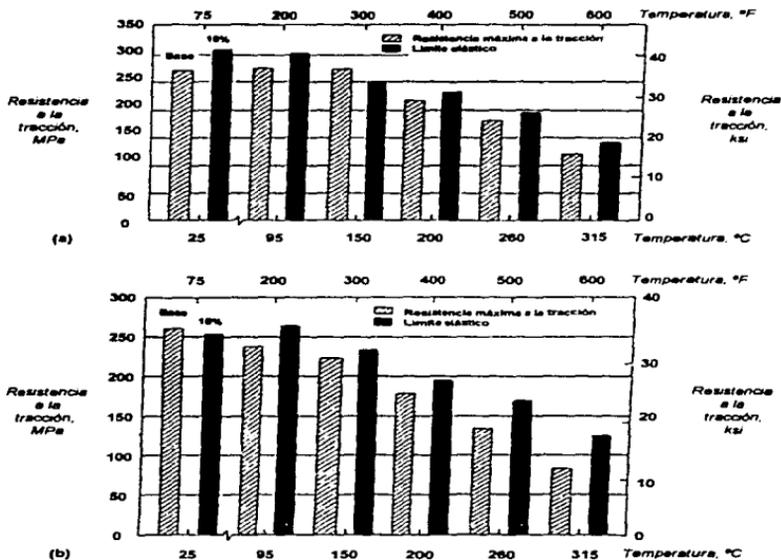
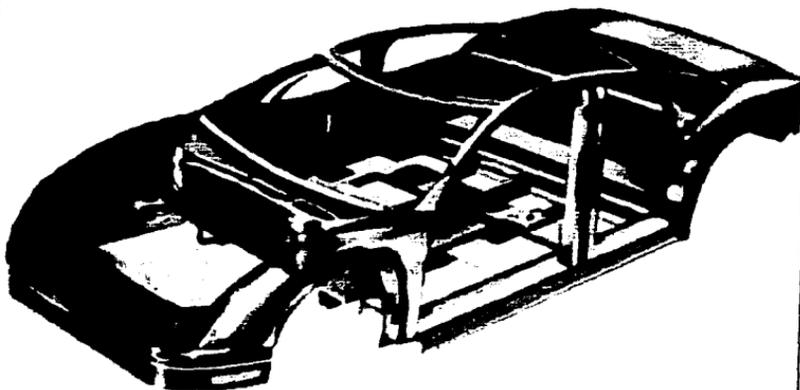


Fig. 6.4 Resistencia máxima a la tracción en función de la temperatura para 2 aleaciones de Aluminio reforzadas con fibras discontinuas de Cerámica. (a) 24.2 wtAl, (b) 33.9 wtAl, tratadas con calor.

CASO
PRÁCTICO
NO. 3



6.4 CASO No. 3

La aplicación de las aleaciones de Aluminio y Acero con reforzamiento con fibras de Carbono y Carburo de Silicio en partes específicas del chasis de un automóvil.

En automóviles modernos el chasis se fabrica principalmente de Aluminio e Hierro con reforzamiento en partes específicas del automóvil, como el motor, tanque de gasolina, cabina de pasajeros, etc..

Las especificaciones del chasis son esencialmente dadas por la S.A.E., pero en este caso se tomaron de la compañía alemana Audi™ S.A. en el modelo AL-1.

Producción en masa.- *Debido a la gran demanda de este componente es necesario tener un gran volumen de material.*

Reducción de costos de manufactura.- *Por su versatilidad el material se reduce mucho con el tiempo de maquinado y solo se enfatiza el reforzamiento en partes específicas, que pueden ser añadidas posteriormente, al chasis.*

Flexibilidad de estilo.- *Una de las propiedades del Aluminio y el Hierro, es el de dar formas complicadas con gran precisión directamente en las fundiciones, con un leve acabado posterior.*

Bajo peso.- *Al igual que en casos anteriores el uso del Aluminio se relaciona directamente por la reducción de peso en zonas convenientemente distribuidas alrededor del coche.*

Absorción de impacto.- *La aleación de Aluminio con el Hierro tienen la propiedad de absorber los impactos, a manera que las personas reciban una mínima cantidad del impacto en un choque.*

Ensamblado simplificado.- *Es decir, la fácil incorporación de las piezas al chasis por medio de un proceso de automatización.*

Con las limitaciones de los Aceros a ciertas formas y gran peso, se a dado un giro de 180 ° grados con respecto a los materiales con la inclusión de Aluminio con reforzamientos de Carbono, también se observaron aleaciones de Acero con reforzamiento de compuestos de Alumina.

La principal aceptación de estos materiales es debido a la reducción del peso del cuerpo del automóvil, aunque la vida del material es limitado. El criteno del funcionamiento estructural, reduciendo el capital de manufactura, en la simplificación de los métodos de ensamble. En suma la gran diversidad de formas de hojas, fundiciones, extrusiones y forjado, cumplen con el objetivo de reducir las partes.

Una de las principales condiciones físicas, a las que se someterá al Aluminio, son los métodos de unión que reducen sus propiedades e inclusive varían de manera significativa, las mismas por exposición al calor excesivo.

Cuando se tomo en cuenta al Aluminio, se observaron los métodos de unión con sus especificaciones estructurales. Debido a qué la estructura del chasis es diseñada contra cargas y esfuerzos relativamente altos, conjuntamente con sus uniones.

Los puntos con mayor ataque por llamarlo de alguna manera son los sistemas de suspensión, en este caso se tiene una carga excesiva donde la fatiga se somete a la mayor consideración. Como se observa en las gráficas 6.5, 6.6 y 6.7.

En la firma Audi™ específicamente en el automóvil modelo Auvus ó AL-1, el 40% del total del auto, esta hecho con Aluminio, comparado con el Acero utilizando 1.72 veces más que el Acero. El Aluminio soporta esfuerzos menores que el Acero pero es más ligero y por lo tanto más fácil de manejar.

Un factor que ayuda al reforzamiento del Acero con el Alumina es la resistencia a la corrosión que se eleva considerablemente sin tratamientos térmicos posteriores a su fabricación. La forma de unión de los diferentes materiales es muy

importante sobre todo, para los materiales con los reforzamientos de MMC, de aquí la importancia de conocer los métodos de unión.

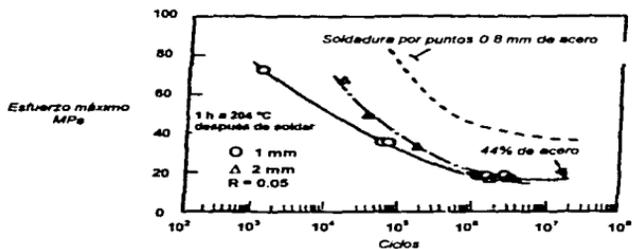


Fig. 6.5 Muestra la fatiga en una hoja de espesor de 25.4 mm (1 plg) de un compuesto de Al - 6009 - 782 por el método de unión de soldadura.



Fig. 6.6 Comportamiento del método de unión por aplastamiento.

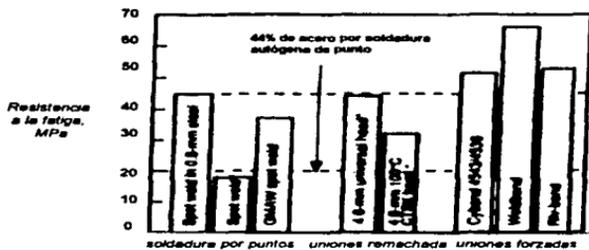


Fig. 6.7 Carga axial, con resistencia a la fatiga de una unión montada en 1 mm, en una hora a 204 °C.

Los principales métodos de unión del Aluminio, con sus propiedades y sus usos se observaran en la tabla 6.6.

El chasis del coche esta hecho de Acero - Aluminio, tiene reforzamiento en partes especificas como, los soportes del motor, soportes de la transmisión, soporte de la dirección, guía de los ejes de embrague de la dirección, soportes del tanque de la gasolina.

Necesitan cada uno de ellos un cierto tipo de reforzamiento en mayor o menor grado de diferente tipo de reforzamiento para el incremento de las propiedades deseadas.

Una de las principales partes que tiene reforzamiento son los soportes del motor, pese a su tamaño que es pequeño (2 cm aproximadamente) son hechos de aleación de Aluminio, con reforzamiento de fibras de Boro (Duralcon™ S.A.).

Las fibras de Boro son poco utilizadas por su costo. Pero en cambio combinados con el Aluminio tienen propiedades al impacto, según el diámetro de la fibra, como se observa en la tabla 6.7.

Tabla 6.6 Los principales métodos de unión de Aluminio, sus propiedades y usos.

<i>Método de unión</i>	<i>Propiedades</i>	<i>Usos</i>
<i>Arco eléctrico</i>	<i>Proceso familiar Automatización aplicable Soldadura tolerable hasta 1.5 mm. resistencia de unión hasta 80 - 90% Robots de trabajo en 3 -D aplicables</i>	<i>Necesario control del proceso con obtención de propiedades funcionamiento a fatiga afectado por geometría de la unión.. Fundición afectada por la tecnología de fundición. Banco de datos requiendo para su control.</i>
<i>Unión por adhesivos</i>	<i>Resistencia a la corrosión Resistencia a la fatiga Propiedades de retención Unión de diversos materiales</i>	<i>Resistencia de unión. Durabilidad. Superficie de tratamiento. Aseguramiento de calidad.</i>
<i>Soldadura por puntos</i>	<i>Proceso estandarizado Rápido, bajo costo Automatización aplicable puede usarse con adhesivo</i>	<i>Bajo desarrollo de fatiga. Alto poder de aplicación, larga vida de electrodo y alta calidad de la soldadura. Aseguramiento de la calidad.</i>
<i>Remaches</i>	<i>Tecnología conocida Automatización aplicable Superficie insensible Sistemas robustos de manufactura Buen desempeño a la fatiga Facil inspección de acabado.</i>	<i>Materiales consumibles. Uniones durables Adhesión de superficie.</i>
<i>Uniones Mecánicas</i>	<i>Fuerte agarre de soldadura Bajo costo, insensibilidad de aleación o superficie de composición. Unión de diferentes metales</i>	<i>Unión durable Unión no permanente, si se desea Características de absorción de energía</i>
<i>Uniones Magnéticas</i>	<i>No existen efectos por el calor Uniones rápidas Operación independiente Bajo costo de operación</i>	<i>Requerimientos de herramienta Producción viable a gran escala. Uniones multiples de ensamble en serie.</i>

Fuente: Journal Materials Science 28 (1992), Wear Behavior of Aluminum

Como se observó en la tabla anterior el diámetro de la fibra depende en gran manera de la capacidad de resistencia al impacto o tenacidad del material.

En la tabla 6.8 se observa las principales características de la fibra de Boro unidireccional al 50%, con la matriz de Aluminio 6061.

Tabla 6.7 Ensayo de Charpy con muestra de fibra de Boro hasta con un 55%.

<i>Díámetro de la fibra µm</i>	<i>Matriz</i>	<i>Energía total de impacto, J</i>
200	Aluminio 1100	95
145	Aluminio 1100	55
145	Al - aleación - 6061	35
<i>Sin reforzamiento</i>	<i>Ti - 6Al - 4V</i>	<i>25</i>
<i>Sin reforzamiento</i>	<i>Al - aleación 6061 - T6</i>	<i>15</i>

Nota: Las designaciones son SAE 1100 y 6061, I.S.O. Ti 6Al 4V

Fuente: Advanced Composite Materials New Developments and Applications, Capítulo 7, 1995

El comportamiento térmico de la fibra de Boro lo hace ideal para el soporte del motor por su bajo coeficiente de expansión, que depende de la orientación de la fibra siendo la orientación ideal a 90° grados.

En la figura 6.8 se observará el comportamiento de la fibra de Boro con la matriz Al 1100.

Los soportes de la transmisión y de la dirección son hechos en aleaciones de Titanio - Aluminio con reforzamiento en las zonas de contacto con las fibras discontinuas de Cerámica.

Por sus propiedades mecánicas este tipo de aleaciones son ideales para el objetivo deseado.

Los objetivos de los soportes de la suspensión y la dirección son parecidos en sus características. Por lo tanto se puede utilizar la misma aleación en ambos casos.

La aleación de Titanio Alfa, es una aleación con 5% de Al y 2.5% de Sn. Una de sus características principales es la resistencia a la corrosión, a temperaturas elevadas, a la fricción, resistencia al uso continuo.

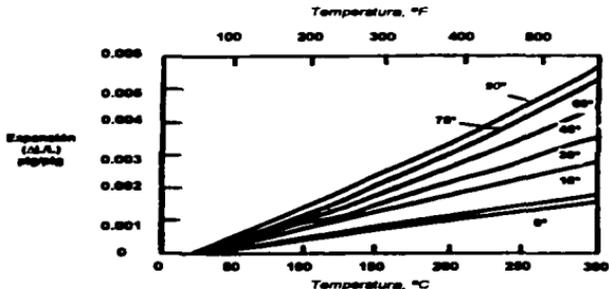
Las propiedades mecánicas de la aleación de Titanio - Aluminio, se observan a detalle en la tabla 6.9

Tabla 6.8 Principales características de la fibra de Boro unidireccional al 50% con matriz de Aluminio 6061.

<i>Resistencia a la tracción</i>	
Longitudinal	1490 MPa (216 ksi)
Transversal	138 MPa (20 ksi)
<i>Módulo de elasticidad</i>	
Longitudinal	214 GPa (31 x 10 ⁶ psi)
Transversal	138 GPa (20 x 10 ⁶ psi)
<i>Ratio de Poisson</i>	
Longitudinal	0.23
Transversal	0.13
<i>Resistencia a la compresión</i>	
Longitudinal	1725 MPa (250 ksi)
Transversal	207 MPa (30 ksi)
<i>Módulo de compresión</i>	
Longitudinal	221 GPa (32 x 10 ⁶ psi)
Transversal	138 GPa (20 x 10 ⁶ psi)
<i>Esfuerzo cortante longitudinal</i>	
159 MPa (23 ksi)	
<i>Módulo de esfuerzo cortante</i>	
41 GPa (6 x 10 ⁶ psi)	
<i>Resistencia a la fatiga sin muesca</i>	
Longitudinal	1035 MPa (105 ksi)*
Transversal	41 MPa (6 ksi)*

* Temperatura 24 °C (107 Ciclos)

Fuente: Advanced Composite Materials, capítulo 7, 1985



**Tabla 6.9 Propiedades mecánicas de la aleación
Titanio - Aluminio.**

<i>Material</i>	<i>Resistencia a la tracción (psi)</i>	<i>Esfuerzo de fluencia (psi)</i>	<i>Elongación (%)</i>
<i>Titanio comercialmente puro</i>	<i>33.500</i>	<i>26.000</i>	<i>24</i>
<i>99.5% Ti</i>	<i>81.000</i>	<i>71.000</i>	<i>14</i>
<i>99.0% Ti</i>			
<i>Aleación Ti Alfa</i>			
<i>5% de Al - 2.5 de Sn</i>	<i>127.000</i>	<i>112.000</i>	<i>15</i>
<i>Aleación Ti Beta</i>			
<i>13V 11% Cr 3% Al</i>	<i>183.500</i>	<i>174.000</i>	<i>6</i>

Fuente: Metals Handbook American Society for Materials 1993

Las aleaciones de Titanio tienen buenas propiedades mecánicas, por ello con el reforzamiento se hacen excelentes las prestaciones, sobre todo en tres aspectos, la resistencia a la corrosión, resistencia al uso y resistencia a temperaturas elevadas. Estas propiedades se incrementan de manera significativa con el reforzamiento de fibras discontinuas de Cerámica.

Aunque en este tipo de partes sus aplicaciones son experimentales la aleaciones de Titanio - Aluminio tienen un porvenir a mediano plazo en la industria automotriz que solo espera mejores procesos de producción para reducir los costos, que por el momento resultan elevados, sin embargo la empresa Thermal Ceramics™ garantiza que en un futuro de 5 a 15 años en la mayoría de los automóviles se sustituirán partes importantes por materiales compuestos.

CASO
PRÁCTICO
NO. 4



6.5 CASO No. 4

Aplicación de la aleación Aluminio - Magnesio con reforzamiento con fibras de Carbono en los engranes del sistema de dirección.

Por medio de las propiedades del Aluminio y del Magnesio, una de ellas es su bajo peso (Empresa KRUPP Frankhauffer Institute, Experimental™), que lo hace ideal para conformar los nuevos motores, a continuación se observarán las principales características que exige el sistema de dirección.

Resistencia al esfuerzo.- *Por sus requerimientos es necesario que los materiales a utilizar no tengan fallas o defectos en su construcción, para evitar una posible fractura en alguna pieza del mecanismo.*

Resistencia al uso.- *El mecanismo se encuentra en constante movimiento y roce con otros materiales, se recomienda que las zonas de contacto tengan un previo tratamiento superficial para su mayor duración.*

Resistencia a la corrosión y al desgaste.- *Es recomendable que los materiales tengan propiedades anticorrosivas, debido al desempeño al que serán sometidas. También se necesita que el material no se desgaste con otra superficie de contacto.*

Resistencia a la fatiga.- *El material debido a las cargas a las que se encuentra sometido requiere de buenas propiedades mecánicas (módulo de elasticidad, módulo de fluencia, elongación, etc.).*

En las aleaciones de Aluminio - Magnesio sus principales propiedades se refieren al peso y la corrosión, por ello la función del reforzamiento es incrementar las propiedades de las aleaciones de manera que tengan una resistencia dentro de los rangos de diseño de el engranaje .

El reforzamiento con materiales compuestos es necesario, ya que cada uno, de los materiales por si sólo no alcanza los niveles mínimos de desempeño.

Las fibras de Carbono proporcionan el incremento de las propiedades dependiendo del porcentaje en la aleación. Las fibras específicamente utilizadas para los fines antes mencionados son las fibras continuas de Carburo de Silicio.

El tipo de aleación que se utiliza es denominación S. A. E. (5 xxx y 6 xxx), para la aleación. La información que proporciona S.A.E. para este tipo de designaciones son con carácter de experimentales y sus propiedades no están bien definidas, sólo se pueden tener propiedades variables en proporcionalidad con la aplicación dada.

La justificación de la fibra según menciona la empresa KRUPP™, a parte del incremento de propiedades mecánicas y reducción de peso, es la durabilidad de todo el sistema que debe de incrementarse con respecto a las fundiciones de Hierro y Acero en un 30% con respecto a las mismas.

Principales características de las fibras de Carburo de Silicio.

1.- Resistencia a la tracción: 3950 MPa (580 ksi)

2.- Módulo de tracción: 400 GPa (60 x10⁶ psi)

3.- Densidad: 3.045 gr/cm³

4.- Coeficiente térmico de expansión: 1.5 x 10⁻⁴/K.

5.- Diámetro de la fibra: 140 µm (5500 µplg.)

Fuente: Solidificación, Structures and Properties of Cast Metal Ceramic Composites; International Material Reviews 1988, Vol. 3, No. 3

Una de las pruebas que ilustra el comportamiento se muestra en la figura 6.9 por medio de un histograma, de un tipo en especial de la fabricación de la fibra, de donde por un número de pruebas de esfuerzo medio, con un coeficiente de varianza del 15%.

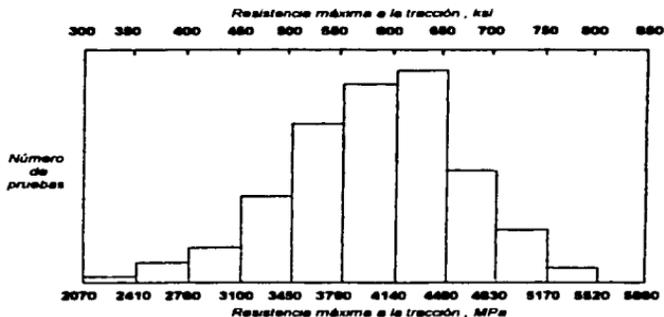


Fig. 6.9 Las variables son número de pruebas contra esfuerzo máximo a la tracción

En las fibras de Carburo de Silicio el tipo de fabricación depende de las propiedades mecánicas que se requieran, otros procesos para su fabricación hacen variaciones en la construcción de las fibras de Carburo de Silicio con el proceso primario CVD.

Una de las principales características para la explotación comercial de la fibra en los procesos es su compatibilidad con otros materiales y su bajo costo dentro del nivel industrial, ya que es mas barato en comparación con las fibras de Boro y Tungsteno, cuyos procesos resultan más caros. Por lo tanto es mejor utilizar este material principalmente como un recubrimiento superficial de los engranes, pifones, etc.

Debiendo observar el acomodo del reforzamiento a manera de que no existan fracturas superficiales en los puntos críticos de falla del mecanismo.

La aleación experimental del Aluminio - Magnesio, con el reforzamiento de las fibras de Carburo de Silicio según la marca Audi™ con el Instituto Frankhoeffler cumple con los requerimientos de tracción y compresión estática para el

mecanismo de dirección, cumpliendo con los requerimientos de diseño en lo referente a las propiedades mecánicas requeridas por; S.A.E., A.G.M.A., I.S.O., y D.I.N.

Una de las ventajas de la aleación, es la facilidad con la que se encuentran estos materiales en la naturaleza siendo el Magnesio el tercer elemento mas abundante en la naturaleza, a pesar de que la aleación se maneja experimentalmente por el fabricante, se menciona que la aleación contiene aparte de Aluminio - Magnesio, una pequeña cantidad de Zinc, la cual se podría comportar como la designación M10100 que se utiliza normalmente para esfuerzos elevados y disipación de calor. La ventaja del uso de este tipo de aleación es su facilidad de obtención por fundición y su bajo costo lo hacen muy rentable para las grandes compañías automotrices.

En conjunto con las propiedades antes mencionadas del Aluminio se obtendría una aleación que apenas obtuviera los valores óptimos de diseño para el sistema de dirección, sólo que por regla de diseño se da un factor de seguridad arriba de un 30% para que el diseño tenga viabilidad, cómo consecuencia se dará un reforzamiento superficial a los engranes para alcanzar los valores de diseño.

Por efectos de falta de información sólo se podrá suponer el tipo de reforzamiento superficial, como se muestra en la figura 6.10.

Según información recabada del libro Design Gear de S.A.E. las dos principales zonas son lugar de contacto y lugar de falla del material por terminación de su ciclo de vida útil.

Los engranes deben de ser principalmente diseñados contra la fatiga, temperaturas elevadas, resistencia al desgaste, resistencia al impacto, resistencia a la corrosión y contra altos ciclos de esfuerzo.

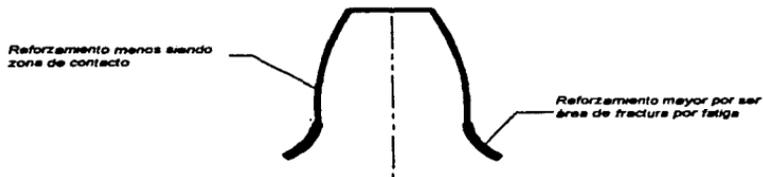


Fig. 6.10 Posible desempeño de la fibra de Carburo de Silicio como reforzamiento en el diente del engrane.

En los trenes de engranajes se debe tener en cuenta el máximo esfuerzo permitido, para que el diseño sea óptimo, según las acotaciones de la A.G.M.A. la dureza máxima permitida para la caja de la dirección debe ser superior a los 300 HB. Los principales requerimientos contra los que se debe diseñar para un sistema de manejo son:

- 1.- Radio del engrane.
- 2.- Diseño de torqué.
- 3.- Tiempo de operación.
- 4.- Requerimientos de espacio.
- 5.- Fuente de poder..
- 6.- Tipo de carga.
- 7.- Condiciones de trabajo ó desempeño.
- 8.- Especificaciones de materiales para engranes.
- 9.- Calidad de los materiales.

10.- Lubricación media.

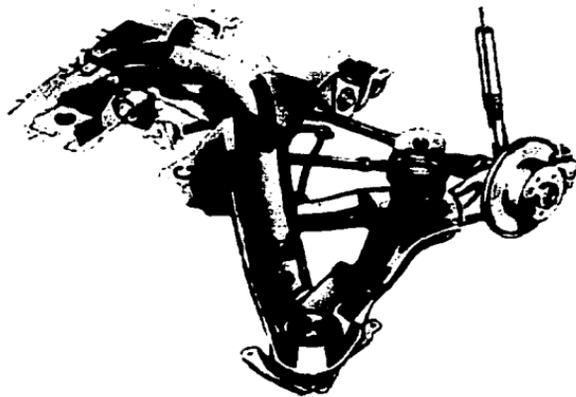
11.- Métodos de lubricación y enfriamiento.

La metodología antes dada es avalada por A.G.M.A. por lo tanto si se quiere diseñar un pistón se deben tomar estas consideraciones.

El Magnesio y el Aluminio son materiales con propiedades mecánicas bajas para los engranes pero con un cierto reforzamiento superficial, alcanzan los límites establecidos, aunque su precio resulta aun elevado a comparación de un Acero y que con un tratamiento relativamente de bajo costo se llega a los parámetros.

La principal ventaja de la aleación de Aluminio - Magnesio con el reforzamiento de las fibras de Carburo de Silicio es la reducción de peso, conjuntamente con una durabilidad estimada de 15 a 20 años sin que sus propiedades decrezcan más del 30% en sus propiedades originales. En este caso específico se demuestra que el reforzamiento puede ser bien encaminado en años posteriores para una completa aceptación, por el momento se encuentra en fase de prototipo y se espera su salida al mercado dentro de cinco años.

CASO
PRÁCTICO
NO. 5



6.6 CASO No. 5

Uso de los reforzamientos de matriz metálica en los cojinetes de los automóviles en diferentes materiales y partes de los mismos.

Los principales requerimientos sobre este tipo de parte en especial tienen una gran diversidad de aplicaciones como nos indica la empresa Thomson Inds™, y los principales materiales de aplicación son dentro de los metales; el Cobre, Aluminio y aleaciones de diferentes tipos, con elementos como el Plomo Pb, Arsénico As, Estaño Sn, Antimonio Sb, en conjunto con diversos materiales para las diferentes necesidades a satisfacer. El material que se usa en la actualidad y se necesita sustituir es el Nylon que satisface la necesidad de tener poco peso pero en cambio no cumple un rango medio de durabilidad y en cierta ocasiones no es posible utilizarlo. Debido a esto la empresa Thomson ind™. Desarrolla en conjunto con el colegio de Boston la aplicación de los diferentes tipos de reforzamiento con fibras de matriz metálica con aleaciones de Cobre y otros elementos.

Los principales requerimientos de S.A.E. en los cojinetes son los siguientes.

Reducción de fricción. - *La función principal de un cojinete es la reducción de la fricción, que normalmente es igual al doble de la velocidad de funcionamiento.*

Reducción de peso. - *Punto importante para la mejor utilización de los cojinetes es poco peso para que en el diseño sea despreciado, para un mejor desempeño de ejes y flechas.*

Resistencia al uso. - *Por ser un elemento mecánico en continuo contacto es necesario que los materiales tengan una resistencia adecuada con el material de contacto para tener un desgaste ligero.*

Resistencia a la fatiga. - *Por ser un elemento de contacto los materiales deben tener una buena resistencia al uso continuo.*

Resistencia a la corrosión.- Materiales sin resistencia a la corrosión no pueden ser utilizados, por el uso de lubricantes que ocasionan en ciertos casos por deficiencias del lubricante corrosión.

Disipación de calor.- Es necesario que los materiales tengan un cierto grado de absorción de calor, es decir, materiales con bajo coeficiente térmico de expansión.

La empresa Thomson™ hace mención de la aplicación de los reforzamiento de matriz metálica principalmente en cojinetes antifrictionantes y los deslizamientos.

El cojinete del cual se hace mención es una aleación de Cobre, a continuación se observa en la tabla 6.10 las diversas aleaciones de Cobre aplicadas en los cojinetes.

Tabla 6.10 Diversas aleaciones de Cobre aplicadas en los cojinetes.

SAE No. Designación	ISO	Características	Aplicación
48	Cu Pb30	Buena resistencia a la fatiga resistencia a la erosión.	Conexiones de cojinetes con sobrecarga.
49	Cu Pb24 Sn	Conformalidad ideal a elevados esfuerzos, sobrepasa los requerimientos en cigüeñales.	transmisiones y bombas hidráulicas.
794*	Cu Pb24 Sn4	Excelente resistencia a la fatiga, gran capacidad de carga y resistencia al uso.	Cigüeñales que requieran elevados esfuerzos y otras aplicaciones diversas.
793*	Cu Pb10 Sn10	resistencia media corrosión.	

Fuente: Handbook S.A.E. 1993 capítulo 10 Vol. 1

Existen además de las aleaciones mostradas en la tabla otras con diferentes concentraciones de diversos materiales, como polímeros y otros elementos, solo con el inconveniente de baja durabilidad pero a bajo costo.

Debido a que en ciertas partes los cojinetes tienen su desempeño más elevado se hizo necesario reforzar a las aleaciones de Cobre con fibras de Tungsteno.

La principales características de la fibra de Carburo de Tungsteno son que proveen resistencia, en adición con otro material, resistencia a temperaturas elevadas, buena ductilidad, alta conductividad térmica. Las aplicaciones son diversas pero son comúnmente utilizadas en lugares con elevados esfuerzos y cargas. Se dice que su uso debe estar solo en las superaleaciones por su difícil proceso de obtención. Debido a ello su aplicación en los rodamiento como explica Thomson™, es todavía experimental con las aleaciones de Cobre.

En la tabla 6.11 se apreciara el comportamiento de las fibras de Carburo de Tungsteno con las aleaciones de Cobre. Se debe mencionar que algunas aplicaciones son todavía experimentales por lo que sus valores pueden variar en las aplicaciones que se usen.

La tabla nos muestra el comportamiento de la fibra con diferentes materiales que pueden ser aplicados, dependiendo de las necesidades para el cojinete.

En la figura 6.11 se observa el desempeño del Cobre con y sin reforzamiento o conocido como OFHC Cooper, en 1000 horas de prueba de resistencia a la falla.

Observando lo anterior se puede tener un criterio para la aplicación de las aleaciones de Cobre con diferentes tipos de reforzamiento con fibras de Tungsteno. Por lo tanto Thomson™ menciona el uso de tres tipos de aleación para la fabricación de los prototipos que son aleaciones de Cobre - Titanio, Cobre - Cromo, y Cobre - Aluminio.

Esto no quiere decir que no se usen las demás aleaciones, solo que en el uso de cojinetes las aleaciones mencionadas son las mejores, por sus propiedades. La misma empresa utiliza un criterio único para el diseño de los cojinetes con una vida media superior a 10000 horas de uso continuo, lo que nos proporciona una cierta holgura de trabajo para manejar los cojinetes.

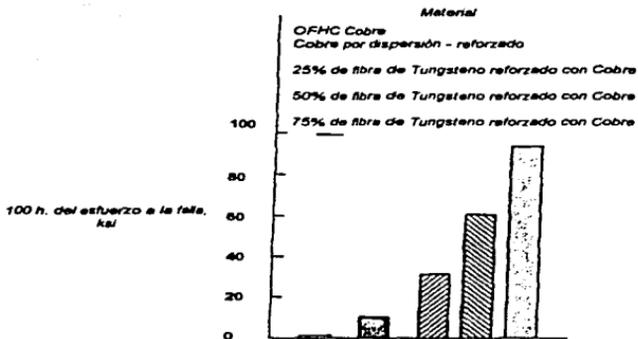
La aplicación del cojinete a pesar de tener diversas aplicaciones, tiende a ser en este caso concreto usado en partes que tengan esfuerzo y cargas excesivas como el

cigüeña dependiendo del tipo de uso será la aleación que se utilizara con el grado de reforzamiento adecuado.

Tabla 6.11 Comportamiento de las fibras de Carburo de Tungsteno con aleaciones de Cobre.

<i>Matnz</i>	<i>Solubilidad máxima de la aleación en Tungsteno</i>	<i>Contenido de la fibra % vol</i>	<i>Resistencia a la tracción MPa</i>	<i>ksi</i>	<i>Tipo de fractura</i>
<i>Cobre puro</i>	<i>Insoluble</i>	65	1556	225.7	<i>Dúctil</i>
		70.2	1641	238.0	<i>Dúctil</i>
		75.4	1722	249.8	<i>Dúctil</i>
<i>Cobre - Niquel</i>	0.3	79	1700	246.6	<i>Dúctil</i>
		78.4	1724	250	<i>Dúctil</i>
		76	1509	218.9	<i>Dúctil</i>
		74.1	908	131.7	<i>Frágil</i>
		75.5	750	108.8	<i>Frágil</i>
<i>Cobre - Cobalto</i>	0.3	77.3	1513	219.4	<i>Semidúctil</i>
		76	1470	213.2	<i>Semidúctil</i>
		74.8	15	229.3	<i>Dúctil</i>
		74.7	1015	147.2	<i>Frágil</i>
<i>Cobre - Zirconio</i>	2.6	63.4	682	98.6	<i>Frágil</i>
		72.4	1060	153.8	<i>Semidúctil</i>
		76.1	1065	154.5	<i>Semidúctil</i>
		78.2	1542	223.7	<i>Semidúctil</i>
<i>Cobre - Titanio</i>	8	71.7	1518	220.1	<i>Semidúctil</i>
		76.3	128	186.7	<i>Frágil</i>
		72.8	1489	216	<i>Frágil</i>
<i>Cobre - Zirconio</i>	3	78.5	1760	255.3	<i>Dúctil</i>
		75.6	1564	229.6	<i>Semidúctil</i>
		64.7	1190	172.6	<i>Frágil</i>
		64.3	1349	195.7	<i>Semidúctil</i>
		75.9	736	106.7	<i>Frágil</i>
<i>Cobre - Cromo</i>	<i>Solubilidad Completa</i>	78.7	1541	223.5	<i>Semidúctil</i>
		77.5	1572	228	<i>Dúctil</i>
		77.2	1558	225.9	<i>Semidúctil</i>
		76.4	1666	241.7	<i>Dúctil</i>
<i>Cobre - Niobio</i>	<i>Solubilidad Completa</i>	75.4	1635	237.1	<i>Dúctil</i>
		75.1	1538	223	<i>Dúctil</i>

Fuente, Testing Composites Alloys, A.D. Saker 1993



El uso del reforzamiento aunque es caro se recompensa con las prestaciones que proporciona, la aleación incrementa sus propiedades de manera significativa, aumentando como según sea el caso o la necesidad.

CONCLUSIONES

CONCLUSIONES

1.- Hoy en día los materiales Compuestos de Matriz Metálica (MMC) son utilizados en las industrias de la Aviación, Aeroespacial, y Militar, no obstante en la industria Automotriz, su uso no es común, por lo que los diseñadores automotrices deben aprovechar las ventajas que estos materiales ofrecen.

En México no existen fabricantes de materiales Compuestos de Matriz Metálica, los cuales están reforzados a base de fibras, en consecuencia estamos frente a un campo virgen, lo cual toma un punto muy importante en la actualidad, ya que esto incrementaría las fuentes de empleo, dando una nueva visión para los profesionistas.

2.- Al término del desarrollo de este tema de tesis fue la sustitución de una gama diversa en relación a materiales y características propias de cada uno de los materiales Compuestos de Matriz Metálica (MMC), entre los cuales podemos mencionar otro tipo de materiales como los plásticos, polímeros, cerámicos y materiales compuesto, estos comparados con los elementos metálicos, fueron analizados por medio de tablas y catálogos, con los cuales se puede asegurar en un futuro no muy lejano la aplicación de dichos materiales, todo esto enfocado al bajo consumo de combustible que esto implica, además de obtener mayor seguridad y comodidad relacionado con su mantenimiento.

3.- La calidad de los materiales Compuestos de Matriz Metálica (MMC), hacen que sean de gran eficiencia al usarlos, esto lo podemos verificar en los 5 ejemplos descritos en este tema de tesis, de los cuales podemos mencionar los siguientes:

a) Pistones b) Chasis c) Engranés d) Frenos e) Cojinetes

Debido a las características propias de los materiales como lo es la resistencia al calor, dilatación, baja densidad, incremento en las propiedades físicas y mecánicas, reducción de los costos de mantenimiento por ausencia o reducción en la composición del material, producción única sin necesidad de procesos posteriores de maquinado, alta capacidad de absorción de energía, etc..

4.- Naturalmente los materiales Compuestos de Matriz Metálica (MMC) son recomendados por los expertos para su aplicación en la industria Automotriz, podemos mencionar un ejemplo, los pistones hechos por medio de Aluminio Sinterizado con una ventaja con su fácil aleación con la fundición de hierro.

5.- Las partes que forman un motor trabajan a temperaturas elevadas, por lo cual las fibras de Boro son empleadas con la matriz de Aluminio ó Titanio, debido a su configuración de la fibra con la matriz. Otra aplicación sería en los inyectores de gasolina, todo esto con una pequeña limitante lo que se ve reflejado en su tamaño y costo.

6.- Las fibras de Óxido de Aluminio se recomiendan se utilizadas con matrices de Aluminio ó Magnesio en el eje de la transmisión para reducir su peso y tener mayor resistencia.

7.- En lo que se refiere a los componentes de las partes de un motor y a la caja de velocidades, existen un sin número de materiales a utilizar, entre los que podemos mencionar a las fibras refractarias como son el Hafnio, Torio y Renio.

8.- Los cojinetes son elementos importantes por lo que su reforzamiento es necesario, esto se realizaría con un reforzamiento con partículas de Carburo de Silicio para incrementar sus propiedades mecánicas.

9.- El uso de los materiales Compuestos de Matriz Metálica (MMC) tiene una limitante, su elevado costo en el mercado, esto debido a su producción, ya que no es muy comercial, ahora si ampliamos el uso de estos materiales dentro de la industria Automotriz obtendríamos una mayor demanda, con lo cual su costo se reduciría notablemente.

10.- Durante el desarrollo general de este tema de tesis, el pasante se da cuenta del mundo de materiales que pueden ser utilizados dentro del ámbito Automotriz. En la búsqueda de información desafortunadamente la gente no coopera con el pasante con lo cual se niega todo tipo de información al respecto, pero apesar de todo esto se logra el objetivo principal de este tema, el cual es crear una fuente de información que sirva de guía para un nivel superior y laboral, a las necesidades que demanda el mundo Automotriz, encaminado a la tecnología actual.

GLOSARIO

GLOSARIO

Aglutinante: *Función de conjuntar o pegar.*

Anisotrópico: *Lo que no es isotrópico.*

Aspersión: *Distribuir líquido a presión en área ó cuerpo.*

Carbonización: *Conocido como pitoración, proceso de trefilado para la fabricación de compuestos por fibras, extracción de los átomos diferentes del carbono de una fibra polimérica, dejando atrás de si una fibra de grafito de alta resistencia.*

Cerments: *Grupo de materiales compuestos, compuestos de cerámicas y metales en diferentes proporciones.*

Dendrita : *Estructura arboriforme del sólido que crece cuando nuclea un líquido subenfriado; cirtal que tiene una configuración de tipo arborecente, más evidente en metales fundidos lentamente enfriados a través de un intervalo de solidificación.*

Difusión: *Propagación o divulgación; Movimiento espontaneo de átomos y moléculas a nuevos sitios dentro el material.*

Dispersión: *Acción de separación ó segregación.*

Dúctil: *Qué puede alargarse, estirarse ó adelgazarze, sin romperse; ejemplo el oro. Medida por elongación ó reducción de una prueba tensil.*

Dureza: *Resistencia de un material a ser penetrado.*

Esferooidización: *Formación de cuerpos en forma esfénca.*

Estearato: *Sal del ácido estearico.*

Eutético: *Reacción de tres fases en la cual una fase líquida se transforma en dos fases sólidas; reacción isotérmica reversible en que una solución intimamente mezclados al enfriar, cuyo número de sólidos formados es el mismo que el de los componentes que integran el sistema.*

Fusión: *Paso de un cuerpo sólido a un estado líquido, por medio de calor.*

Infiltración: *Paso lento de un líquido a los poros de un cuerpo.*

Interfase: *Conexión intermedia entre dos cuerpos que sirve de unión de los mismos.*

Iso deformación: *Deformación de un cuerpo constante.*

Isoesfuerzo: *Aplicación de una carga constante en un cuerpo.*

Isotrópico: *Característica de un cuerpo a mantener sus propiedades constantes; A medida que se funden, muchas sustancias pasan por un rango de temperatura en la que se tienen propiedades intermedias entre las de un sólido y un líquido. El rango en el que se presentan esta marcado por temperaturas de transición definidas. La fase o fases intermedias se describen como líquido cristalinas y en ellas las moléculas conservan un ordenamiento parcial, muy diferente de comportamiento al azar, llamado isotrópico, que es una característica de fase líquida.*

Homogeneización: *Conservar a alta temperatura para eliminar o disminuir la segregación química por difusión.*

Poliámidas: *Estructura de cadena del Nylon.*

Polímero: *Estructura formada a partir de dos ó más monómeros.*

Reactivo: *Sustancia que por medio de la química produce reacción*

Recristalización: *Cambio de una cristalina a otra ocurre al calentar ó al enfriar a través de una temperatura crítica*

Reforzamiento: *Proporciona un incremento en la propiedades reales de un cuerpo elevando la propiedades que se necesite.*

Rigidez: *Medida cualitativa de la deformación elástica producida por un material.*

Sinterizado: *Tratamiento a temperatura elevada que se utiliza para unir partícula pequeñas . La difusión de los átomos a los puntos de contacto ocasiona que se formen, enlaces entre partículas. La difusión continua finalmente ocupa todos los huecos existentes.*

Substrato: *Capa de metal subyacente en una recubierto independiente se capa es metal base.*

Tenacidad: *Medida cualitativa de las propiedades al impacto de un material. Un material que resiste la fractura es tenaz.*

Termofluencia: *La aplicación de un esfuerzo a un material que esta a temperatura elevada (Dicho un material puede estirarse y finalmente fallar) aun si el esfuerzo aplicado es menor que el de fluencia a tal temperatura. La deformación plástica esta también conocida como termofluencia.*

Whiskers: *Conocidos como bigotes son monocristales de excepcional delgadez, son discontinuos con relación de su aspecto de 20 a 1000; fibras finas que crecen de modo que producen cristales simples sin dislocaciones, generando resistencias muy cercanas a las teóricas.*

BIBLIOGRAFÍA

BIBLIOGRAFÍA

- 1.- *Handbook S.A.E.*
Chapters 10 y 11; 1995.
- 2.- *Advanced Composite Materials.*
New Develoments and Applications.
A.S.M. International; 1993.
- 3.- *Engineered Materials Hanbook.*
Volumen 1 Composites.
A.S.M. International; 1991.
- 4.- *A.D. Sarker.*
Wear of Metals.
Pergmon Press Oxford, 1986.
- 5.- *German Hirt, M.*
Mechanical Design.
Frankhouffer Institute, Munchen 1991.
- 6.- *Hossel Niemann.*
Principles and Aplications; Aluminium.
Journal Materials; A.S.M. 33; 1993.
- 7.- *Carl M. Cartwrnth.*
Automotive Design.
A.S.M.E.; 1990.

- 8.- John J. Coy.
Gear Design.
A.S.M.E.; 1993.
- 9.- Bardoff H. Miels.
Testing New Materials.
A.S.T.M.; 1993.
- 10.- Edward Shigley.
Diseño Mecánico.
Ed. Mc Graw Hill; 1992.
- 11.- Tesis Profesional de Alejandra Garza Vázquez.
Materiales Compuestos en la Industria Aeronáutica.
Facultad de Ingeniería, U.N.A.M. 1994.
- 12.- Donald R. Askeland.
La Ciencia e Ingeniería de los Materiales.
Ed. Iberoamérica; 1987.
- 13.- James F. Shackelford.
Ciencia de los Materiales para Ingenieros.
Ed. Prentice Hall; Tercera Edición; 1995.
- 14.- Laurence E. Doyle; Carl A. Káiser.
Materiales y Procesos de Manufactura para Ingenieros.
Ed. Mc Graw Hill; 1992.
- 15.- *How to Apply Advanced Composites Technology.*
Engineered Society of Detroit.
A.S.M. International; Laurence E. Mcallyster.

- 16.- Theodore L. Brown.**
Bruce E. Bursten.
Química la ciencia central.
Ed. Prentice Hall; 1993.
- 17.- Engineer Guide to Composite Materials.**
American Society for Materials.
A.S.M. International Metals, Park Ohio; 1992.
- 18.- Ing. Sergio Zirath; y Biólogo Luis Hernandez.**
Secretaria del Medio Ambiente del D.F.
Dirección de Estudios y Proyectos Ambientales; 1996.