



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA
DE MÉXICO

20
2^o J.

FACULTAD DE QUÍMICA

OBTENCIÓN DE UN COMPOSITO ALUMINIO-
CARBURO DE SILICIO A PARTIR DE
POLVOS METÁLICOS

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE
INGENIERO QUÍMICO METALÚRGICO
P R E S E N T A:
GERARDO ZAVALA OLIVARES

MÉXICO, D. F.,

1992

FALLA DE ORIGEN



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 está 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.

CONTENIDO

Resumen	1
Capítulo 1. Introducción.	
Metalurgia de polvos	4
- Mezclado	13
- Lubricación	15
- Compactación	17
- Sinterización	27
- Aplicaciones	38
Compósitos	40
- Propiedades y aplicaciones de los compósitos	46
Capítulo 2. Proceso de obtención.	
Proceso de obtención	51
Diseño experimental	54
Equipo utilizado	59
Capítulo 3. Resultados y análisis de resultados.	
Resultados	63
Análisis de resultados	89
Capítulo 4. Conclusiones.	
Conclusiones	96
Bibliografía	98

RESUMEN

En años recientes se ha incrementado el interés en la tecnología de materiales compuestos o compósitos (los cuales están formados a partir de una matriz metálica y pequeñas partículas reforzantes distribuidas en el metal) especialmente en las áreas de aplicación ingenieril y de fabricación. Estos compósitos han sido fabricados generalmente por la ruta de fundición, mediante dispersión de las partículas en el metal líquido, y de ahí resulta el compósito que se vacía en moldes apropiados. Los estudios realizados sobre la tecnología de compósitos se basan principalmente en las técnicas para dispersar partículas no metálicas en el metal líquido, y los parámetros o variables que pueden afectar al proceso, con el fin de optimizar al máximo dichas técnicas.

Por otro lado, la Metalurgia de polvos o pulvimetalurgia se ha convertido en una industria que se desarrolla ampliamente en los diferentes campos de la Metalurgia. Lo anterior es debido a la utilidad que tiene al ofrecer algunas ventajas en la fabricación de partes metálicas que requieren alta precisión, por lo que se está presentando una optimización del proceso básico, junto con un mejor control de calidad de los productos.

Debido a la aceptación creciente de la pulvimetalurgia como proceso común de una amplia gama de materiales y productos en casi todas las industrias, lo que puede suceder a la pulvimetalurgia y a la industria que pueda beneficiarse con ella, depende en última instancia de la iniciativa y creatividad de los individuos que sepan aprovechar las posibilidades de esta nueva tecnología.

En el presente trabajo, se intenta combinar la tecnología de compósitos con la Metalurgia de polvos, con el fin de presentar una posible ruta alterna para obtener compósitos a partir de polvos metálicos y cerámicos.

Las ventajas que se presentarían son: por un lado, poder fabricar compósitos que no pueden ser obtenidos por la vía de fundición debido a las limitaciones propias de la técnica como pueden ser la forma de las piezas, incorporación inadecuada de las partículas, entre otras; por otro lado se busca mejorar algunas propiedades, tales como resistencia al desgaste, de las piezas fabricadas a partir de polvos metálicos y poder ampliar el rango de aplicación de la pulvimetalurgia.

Se decidió trabajar con un compósito de matriz de aluminio y partículas de carburo de silicio, debido a que actualmente se están desarrollando en la U.N.A.M. una serie de estudios en cuanto a la fabricación de compósitos de estos materiales, por la ruta de fundición, y los resultados que se obtengan en el presente trabajo, pueden servir como marco de comparación en cuanto a las propiedades y características obtenidas por las diferentes rutas de producción.

CAPITULO 1

INTRODUCCION

METALURGIA DE POLVOS

Los polvos metálicos son aleaciones o metales puros finamente divididos en partículas, producidos por diferentes métodos, cada uno de los cuales les confiere características propias muy particulares. Los métodos empleados en la producción de polvos se pueden dividir en las siguientes categorías:

- Métodos físicos
- Métodos químicos
- Métodos mecánicos

MÉTODOS MECANICOS. El principio básico de estos métodos es suministrar energía por medios mecánicos, para producir la separación del metal en partículas (atomización).

MÉTODOS FISICOQUIMICOS. Son procesos que de una u otra manera involucran cambios fisicoquímicos, reacciones, descomposiciones, etc., para producir polvos o productos transformables a ellos (electrólisis).

Cada uno de los métodos de producción de polvos tiene características tales como economía, limpieza, flexibilidad, propiedades fisicoquímicas, etc., que lo hacen adecuado para diferentes propósitos; sin embargo es posible delinear algunos principios generales, aplicables a la producción de polvos metálicos:

-El rendimiento del proceso no deberá ser menor del 75% de polvo de grado comercial.

-El método debe ser de tal manera que pueda mantener la composición química, granulometría, densidad aparente, compresibilidad, fluidez, etc., dentro de los límites estipulados.

Dentro de las técnicas más apropiadas para producir polvos metálicos no ferrosos está el método de atomización. La atomización consiste en proyectar un chorro de metal o de aleación fundido contra un fluido (aire, agua o gas inerte). Debido a la súbita solidificación que tiene lugar, el metal aparece en forma pulverulenta; y a continuación se recuece la masa formada en una atmósfera reductora, con el fin de eliminar el óxido superficial que se haya formado. En este método, se tienen en cuenta como variables importantes del proceso, la temperatura y régimen del metal fundido, la naturaleza y presión del fluido y otros factores procedentes del diseño.

Entre las propiedades que se toman en cuenta para los polvos metálicos tenemos:

- FORMA. La cual depende básicamente del método de fabricación, obteniéndose formas esféricas, aciculares, irregulares, dendríticas, fragmentadas, en forma de escama, etc. (figuras 1, 2, 3 y 4).

- TAMAÑO. El rango de tamaño usualmente varía entre 0.1 a 100 micrones.

- POROSIDAD. Variable de acuerdo al proceso y en naturaleza, ya que puede ser aislada o interconectada y ser superficial o interna e influir o no en la actividad superficial de la partícula, además de determinar la densidad de la misma y del producto.

- AREA SUPERFICIAL. Es una característica que depende de la forma.

- ACTIVIDAD. Es una propiedad que determina la velocidad de difusión, absorción y reacciones similares; se incrementa con la disminución de tamaño y depende de la forma, rugosidad, porosidad, etc.

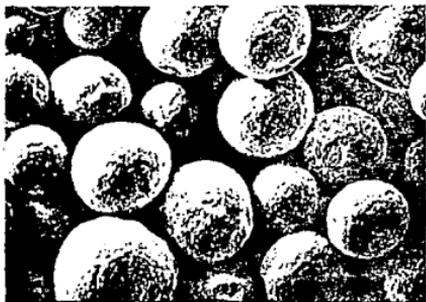


Figura 1.

Partículas de polvo esféricas.

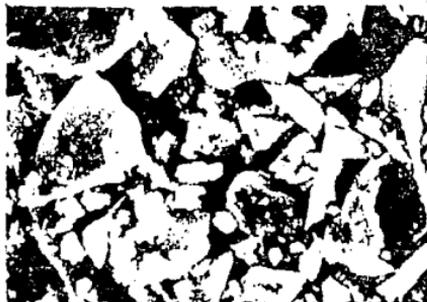


Figura 2.

Partículas de polvo irregulares.



Figura 3.

Partículas de polvo aciculares.

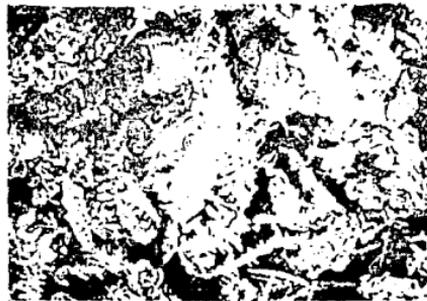


Figura 4.

Partículas de polvo dendríticas.

- PUREZA. Los polvos comerciales están disponibles en varios grados de pureza, pero generalmente el metal base tiene una pureza mínima de 97.5% hasta 99.5%.

Cuando se va a escoger un tipo de polvo para una aplicación específica, se deben considerar sus características para tener una selección adecuada. En la práctica normal se presta especial atención a las siguientes propiedades:

- TAMAÑO DE PARTICULA. Para la caracterización del tamaño de partículas se han desarrollado varias técnicas, con diferentes rangos de aplicación (7) (tabla 1.).

TABLA 1

MÉTODOS DE MEDICION DEL TAMAÑO DE PARTICULA Y SU RANGO DE APLICACION

CLASE	METODO	RANGO (μ)
1) Mallas	Malleo con agitación mecánica	44 - 800
	Micromallas	5 - 50
2) Microscopio	Luz visible	0.2 - 100
	Electrónico	0.001 - 5
3) Sedimentación	Gravitacional	1 - 250
	Centrífuga	0.05 - 60
4) Turbidimetría	Turbidimetría (medición de la atenuación de la intensidad de la luz)	0.05 - 500
5) Elutriación	Elutriación	5 - 50
6) Res. eléctrica.	Contador Coulter	0.5 - 800
7) Permeabilidad	Medidor Fisher	0.2 - 50
8) Area superficial	Adsorción de una fase gaseosa	0.01 - 20
	Adsorción de una fase líquida	0.01 - 50

- FORMA DE LA PARTICULA. El conocimiento de la forma de la partícula es de vital importancia para la selección adecuada del método de medición del tamaño. Y debido a las diferentes formas que de acuerdo a los procesos de fabricación presentan las partículas, los criterios son diversos; pero lo mejor es la inspección visual con luz normal o microscopio, y el uso de fotomicrografías (7) (tabla 2.).

TABLA 2

FORMA DE LA PARTICULA DE ACUERDO CON EL METODO DE FABRICACION

FORMA	PROCESO
a) Acicular	Descomposición química
b) Dendrítica	Electrólisis
c) Esférica	Descomposición de carbonilo
d) Angular	Desintegración mecánica
e) Irregular	Atomización, descomposición química
f) Irregular alargada	Desintegración mecánica
g) Escama	Desintegración mecánica
h) Redondeada	Atomización, descomposición química
i) Porosa	Reducción de óxidos

- AREA SUPERFICIAL ESPECIFICA. Es importante considerarla, pues las reacciones en la sinterización se inician en las superficies de las partículas. Se expresa en cantidad de área por unidad de peso, y varía con el tamaño de partícula; si el tamaño de partícula es relativamente grande, se tiene una área superficial específica menor a la que se tendría con partículas de menor tamaño.

- DENSIDAD SEMICOMPACTADA Y DENSIDAD APARENTE. La densidad aparente determina el tamaño de la herramienta de compactación y la magnitud de desplazamiento de la prensa para lograr la densificación adecuada. Se define como el peso de una unidad de volumen de polvo suelto (g/cc) y decrece:

- a) al disminuir el tamaño de la partícula
- b) conforme la partícula es mas irregular
- c) al aumentar la rugosidad de la partícula.

La densidad semicompactada es aquella que se obtiene sometiendo la masa de polvo a una compactación que puede ser manual o mecánica por medio de vibraciones o golpeando el recipiente para asentar el polvo. Los métodos son variados, pero se reconoce la necesidad de una buena reproducibilidad y es importante cuando los polvos se someten a transporte y almacenaje.

- FLUIDEZ. La rapidez de alimentación del polvo y el llenado del molde es fundamental para obtener altas velocidades de producción. Para la operación práctica, el factor importante que influye es la densidad aparente: a mayor densidad aparente, menor tiempo de flujo.

- COMPRESIBILIDAD. Expresa la cantidad de polvo que se comprimirá con la aplicación de presión. Se ha propuesto la definición siguiente de la compresibilidad en términos de un parámetro de densificación dado por:

$$P.D = \frac{D.P. - D.A.}{D.T. - D.A.}$$

P.D.= PARAMETRO DE DENSIFICACION
D.P.= DENSIDAD DE PRENSADO
D.A.= DENSIDAD APARENTE
D.T.= DENSIDAD TEORICA

Este parámetro representa la densidad fraccional obtenida con respecto a la máxima posible.

Otro aspecto importante de la compresibilidad es el factor conocido como: *Razón de compresión*, definido como el volumen del polvo suelto entre el volumen del compacto. Es importante tener una razón de compresión baja, porque:

- a) el tamaño del molde y herramienta disminuye
- b) disminuye el desgaste y la posibilidad de ruptura de las herramientas
- c) se obtiene un incremento en la velocidad de producción, al llenarse más rápido el molde pequeño.

- **PIROFORICIDAD.** Cuando se tiene polvo con tamaño de partícula muy pequeño, debido a la elevada superficie presentada por los polvos, respecto a su volumen, se puede presentar el problema de piroforicidad, es decir, una ignición u oxidación espontánea que suele ser exotérmica hasta niveles de explosión (tabla 3 y figura 5), y esto representa un inconveniente en el manejo de los polvos y requiere medidas de seguridad adecuadas (7.11)

- **TOXICIDAD.** La toxicidad cobra mayor importancia con el empleo de los polvos metálicos. No solo afecta la naturaleza tóxica del metal, sino también su estado físico, ya que las partículas finas tienen la habilidad de quedar suspendidas en la atmósfera, principalmente las partículas menores a 2 micrones.

TABLA 3
CARACTERISTICAS DE PIROFORICIDAD DE VARIOS POLVOS

MATERIAL	TAMAÑO (μ)	TEMP. IGNICION (°C)	CONC. MINIMA DE EXPLOSION (kg/m ³)
Aluminio atomizado	-44	760	0.045
Aleación Al - Mg	-44	480	0.020
Magnesio	-74	490	0.040
Zirconio	3	190	0.045
Titanio	10	510	0.045
Uranio	10	100	0.060
Torio	7	280	0.075
Boro	-44	400	-0.100
Cromo	-44 (98%)	400	0.290
Manganeso	-44	240	0.125
Tantalio	-44	900	-0.200
Estaño	-59 (90%)	490	0.190
Plomo	-59	270	-
Molibdeno	-74	900	-
Cobalto	-44	370	-
Wolframio	-74 (99%)	470	-
Berilio	1	540	-
Cobre	-44 (98%)	-	-

NOTA. La temperatura de ignición es para una capa de polvo, ya que también hay otra para polvo en forma de niebla. No es válida para polvos submicrónicos

Los valores negativos en el tamaño de los polvos se deben a que se está tomando como base que 1μ es equivalente a 10^{-6} m, y los valores negativos equivalen a tamaños del orden de 10^{-8} m.

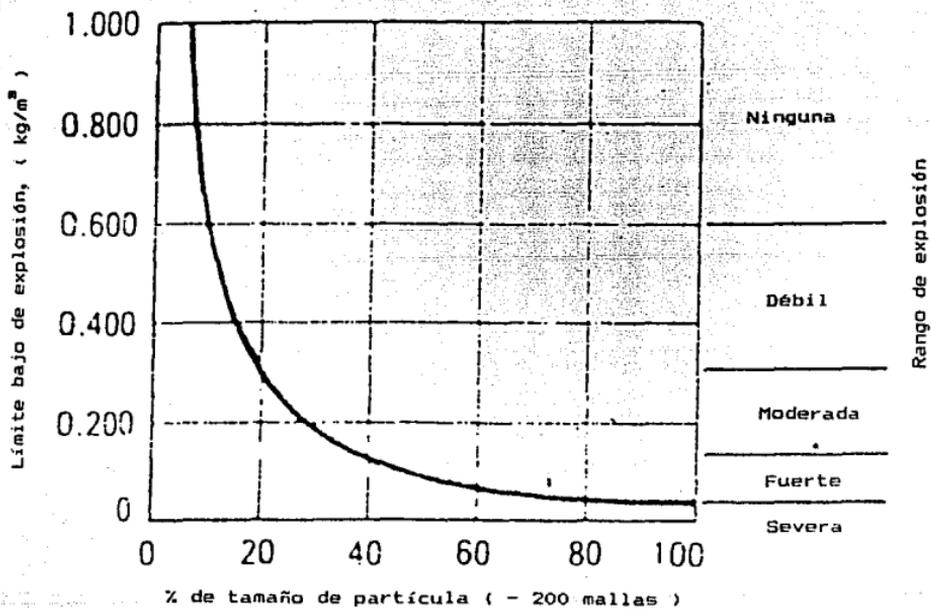


Figura 5. Efecto del tamaño de partícula del polvo de aluminio en la piroforicidad.

MEZCLADO

. Antes de que los polvos sean comprimidos en moldes, usualmente son mezclados o combinados. Las condiciones del mezclado deben ser tales que permitan la obtención de las características deseadas sin detrimento de otras. El mezclado se realiza con diversos propósitos:

- para obtener una distribución uniforme del tamaño de las partículas y de su forma.
- para mezclar polvos de distintos materiales.
- para revestir las partículas con lubricantes.

La mezcla puede realizarse tanto en seco como húmeda. Puede utilizarse agua o un solvente para obtener un mejor mezclado, reducir el desgaste y los riesgos de explosión. Una mezcla uniforme facilita la operación posterior y ayuda a asegurar la homogeneidad de toda la serie producida. Los principales defectos que se deben evitar son:

- un mezclado insuficiente
- un mezclado excesivo, que produce:
 - a) segregación de los componentes
 - b) endurecimiento de las partículas
 - c) degradación de las partículas
 - d) pegajosidad del lubricante
 - e) recubrimiento de partículas gruesas por finas
 - f) elevación de los costos.

A nivel industrial existen varios tipos de mezcladores, variando ligeramente en cuanto al diseño ⁽⁴⁾ (figura 6.).

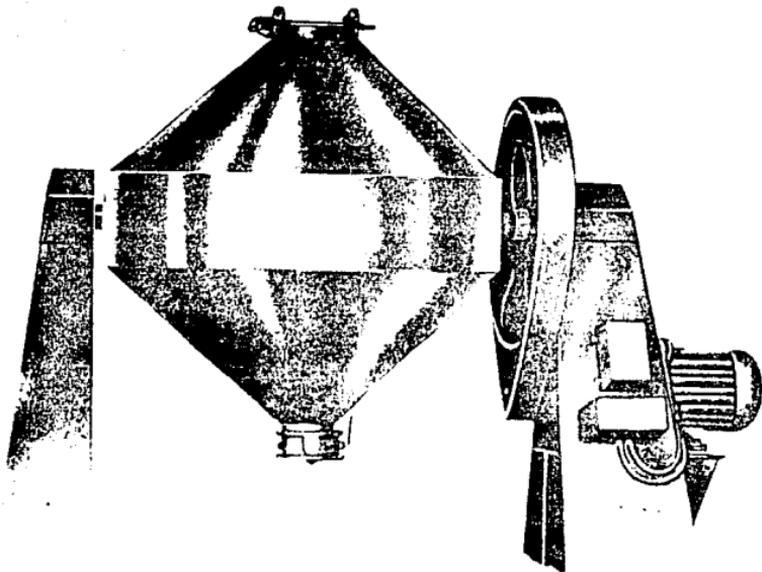


Figura 6. Mezclador de doble cono.

LUBRICACION

En la compactación, las condiciones de fricción juegan un papel muy importante en la compresibilidad de los polvos, desgaste de herramienta y eficiencia. La lubricación se puede realizar de dos maneras:

- lubricación del molde
- adición de lubricantes al polvo.

El sistema usual es el mezclado de lubricantes en estado sólido con los polvos. Después de una serie de estudios sobre el efecto de los lubricantes sobre las propiedades de las piezas en verde y sinterizadas, se pueden hacer las siguientes observaciones:

- * Existe una cantidad óptima de lubricante para la cual la densidad aparente y la fluidez son máximas.
- * En general, la resistencia en verde y en sinterizado se ven disminuidas al aumentar el porcentaje de lubricante.
- * A mayor cantidad de lubricante, menor presión de eyección.
- * La presión de eyección aumenta al incrementar la presión aplicada.
- * La temperatura de ignición del lubricante afecta las propiedades de las piezas sinterizadas.
- * El tipo de lubricante puede provocar grandes variaciones en las dimensiones de las piezas.
- * La naturaleza de los residuos puede inferir en la sinterización.
- * La naturaleza del lubricante puede provocar daños a los hornos de sinterización.

Se requiere un estudio cuidadoso en la selección del lubricante para evitar, en lo posible, los inconvenientes y obtener los beneficios de la lubricación. La cantidad de lubricante empleado, normalmente varía entre 0.5% y 1.5% del peso total del polvo.

Los lubricantes, por lo general, son eliminados en la etapa posterior a la compactación, que es el sinterizado. Cuando son compuestos orgánicos se queman en las etapas primarias del sinterizado y se condensan en las partes frías del horno.

Sin embargo, los lubricantes penetran parcialmente en la masa del polvo y producen residuos carbonosos, gases contaminantes, compuestos oxidados que afectan las propiedades químicas, físicas y mecánicas del compacto. Los lubricantes mas comunes empleados en la compactación de polvos, son (7) (tabla 4):

LUBRICANTE	TEMPERATURA DE FUSION (°C)
1. Estearato de zinc	190
2. Estearato de calcio	180
3. Estearato de aluminio	108
4. Estearato de magnesio	88
5. Estearato de plomo	116
6. Estearato de litio	221
7. Acido esteárico	69
8. Acido oleico	
9. Acido benzoico	122
10. Parafina	40-60
11. Disulfuro de molibdeno	2185
12. Disulfuro de volframio	1250 (descompone)
13. Acido caproico	101
14. Grafito	
15. Melamina	menor de 250
16. Amelida	descompone
17. Amelina	descompone
18. Anhídrido molibdénico	795

COMPACTACION

La compactación es la técnica mediante la cual, polvos metálicos son conformados en formas bien definidas, con dimensiones deseadas. Los objetivos básicos de la compactación son:

- consolidar los polvos en la forma deseada
- obtener, en forma precisa, las dimensiones requeridas
- obtener la porosidad adecuada
- lograr una resistencia aceptable

Existen varios métodos para lograr la consolidación de polvos metálicos, los cuales se llevan a cabo bajo la aplicación de presión o sin ella (tabla 5).

TABLA 5

MÉTODOS PARA CONSOLIDAR POLVOS METÁLICOS

<i>Métodos aplicando presión.</i>	Prensado unidireccional (acción simple y doble acción)
	Prensado isostático
	Laminación
	Extrusión
	Forja
	Prensado de alta energía (explosivo)
<i>Métodos sin aplicación de presión.</i>	Sinterización de los polvos en el molde
	Compactado vibracional
	Colada en suspensión

El proceso mas importante en el mecanismo de compactación es la formación de areas de contacto. Estos puntos son el producto de etapas sucesivas durante la aplicación de presión, las cuales pueden surgir ya sea por difusión, entrelazamiento de partículas o adhesión.

- *Entrelazamiento de partículas.* Se consideran partículas de superficie rugosa y forma irregular, como caso ideal, sometidas a una presión y confinadas dentro de un molde. Bajo esta fuerza externa las partículas se deslizan entre si y se acomodan tridimensionalmente hasta ocupar la mayoría del espacio disponible, formando varios puntos de contacto partícula-partícula, de manera que al relevar el esfuerzo aplicado, la pieza posea una alta compactabilidad.

- *Unión por fricción.* Las fuerzas de fricción provocadas por el deslizamiento entre los diferentes materiales cuando se aplica un esfuerzo mecánico a una masa de polvo dentro de un molde, provocan la fusión del borde de grano, y en estas zonas calientes las partículas se adhieren.

- *Adhesión.* La adhesión se presenta cuando las partículas se acercan a una distancia menor de 50 nanómetros una de otra; y esto se debe a la captura de valencias de superficies libres y fuerzas electrostáticas de Van der Waals. Este efecto puede notarse mas en partículas muy finas, donde ya no es posible una separación mayor, debido a que se adhieren fuertemente por estas fuerzas.

Cuando los polvos metálicos son presionados en un dado, los compactados que resultan generalmente se tensionan tanto que se pueden manejar sin que se rompan. La relación entre la presión aplicada a un polvo dentro de un molde y la densidad del compactado resultante tiene gran importancia en investigaciones prácticas y teóricas en el campo de prensado en frío.

Si se incrementa la presión aplicada, la densidad del polvo aumenta o, visto de otra manera, su porosidad disminuye. La relación entre la presión aplicada y la densidad (o la porosidad) de los polvos compactados ha sido estudiada por un gran número de investigadores, que han intentado establecer relaciones matemáticas entre la presión y el % de densidad relativa.

La primera ecuación que relaciona las dos variables antes mencionadas fué sugerida por M. Yu Balshin⁽¹⁾:

$$\ln P = AV + B$$

donde P = presión aplicada

V = volumen relativo del polvo (la relación del volumen del polvo compactado y el volumen del metal sólido de la misma masa).

A y B = constantes.

Balshin considera la constante A como un " módulo de presión ", análogo al módulo de elasticidad. La ecuación anterior no es válida a altas presiones, debido a que con una presión finita (relativa) se pueden predecir volúmenes menores que 1.

La segunda ecuación utilizada, aplicada a la relación presión-porosidad fué derivada por R. W. Heckel⁽¹⁾:

$$P = \frac{1}{K} \left[\ln \frac{1}{1-D} + B \right]$$

P = presión aplicada

D = densidad del compactado

K y B = constantes

En cuidadosos experimentos se mostró que la ecuación se aplica a un gran número de polvos de diferentes metales y producidos por diferentes métodos.

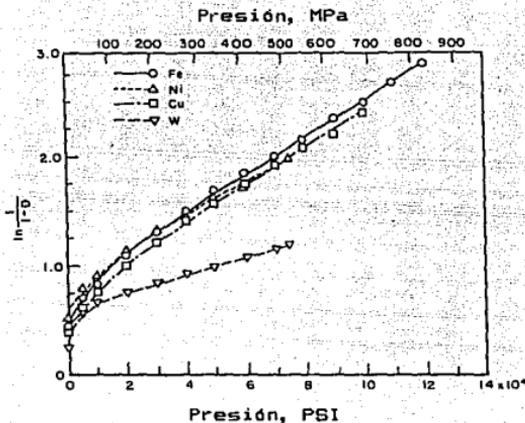


Figura 7.

La figura 7 muestra que a presiones altas, se obtiene una línea recta; la constante K se obtiene de esta gráfica por medio de la pendiente de la línea recta y la constante A de la intersección de la porción de la línea recta de la curva con el eje de las ordenadas ($\ln \frac{1}{1-D}$).

Heckel creía que la desviación de una línea recta que presentaban las curvas se podían explicar, atribuyéndolo a una etapa de empaquetamiento del polvo, pero después se demostró que no era correcto. Algunos estudios indicaron que la relación lineal entre presión y $\ln[1/(1-D)]$ también se aplica a los compactados en forma isostática, pero la pendiente de las líneas es menor que para los compactados por medio de dados rígidos. También se sabe que a muy altas presiones (cerca de 100000 psi) ocurre una desviación de la línea recta de la ecuación de Heckel.

El proceso que ocurre cuando una columna de polvo es compactada en un dado se puede postular como una serie de etapas:

- Empaquetamiento
- Deformación elástica y plástica
- Fractura de las partículas bajo la carga aplicada
- *Empaquetamiento*. El empaquetamiento es el resultado de varias etapas:
 - a) Se llenan espacios entre partículas grandes por partículas de menor tamaño.
 - b) La presión aplicada se usa para vencer las fuerzas de fricción entre partículas y paredes del molde.
 - c) aumento en la superficie de contacto.

- *Deformación elástica y plástica*. Las deformaciones elásticas juegan un papel poco importante. La deformación mas grande que ocurre es la plástica, y depende de la ductilidad del metal.

- *Fractura de la partícula*. Las partículas se fracturan debido a la aplicación de la carga, y forman pequeños fragmentos. Esta tercera etapa es mas importante para la compactación de polvos no metálicos.

Estas etapas representan los diferentes grados de deformaciones mecánicas que endurecen la superficie de la partícula y provocan lesiones en todo el volumen del compacto en verde.

El carácter de la superficie determina las fuerzas de fricción que aparecen durante el proceso de compactación.

El proceso de fabricación determina la forma y textura de la superficie. Los diferentes tipos de fuerzas de fricción son:

- a) fricción entre partículas
- b) fricción entre partículas y paredes del molde
- c) fricción entre el punzón móvil y las paredes del molde.

Los factores que afectan las pérdidas por fricción durante la compactación, pueden llegar a representar hasta tres cuartas partes de la presión aplicada:

- Coeficiente de fricción entre el material del polvo y el molde.
- Cantidad y forma de las partículas.
- Acabado de la superficie de la matriz y punzones.
- Velocidad y tiempo de aplicación de la presión.

CARACTERISTICAS DEL POLVO DURANTE LA COMPACTACION

La resistencia de los compactados en verde está en función de la unión de las irregularidades sobre las superficies de las partículas. Para partículas con superficie específica grande (pequeñas o de superficie rugosa) se obtiene buena compactabilidad, pero las desventajas son que cuando se tienen partículas pequeñas las fuerzas de fricción son mayores, y cuando son rugosas se crean porosidades.

Los polvos que tienen baja densidad aparente requieren un ciclo mayor de compactación. La tendencia del comprimido a contraerse durante el sinterizado parece disminuir al aumentar la densidad aparente. El efecto en fluidez es similar; aunque en algunos casos los compactados se expanden durante el sinterizado, tal comportamiento se ha atribuido normalmente a la expansión del aire atrapado durante la operación de prensado o a otros gases que se forman durante la sinterización.

La densidad aparente y la fluidez de un polvo es en orden decreciente según su forma para:

- a) partículas esféricas
- b) partículas redondeadas
- c) partículas irregulares
- d) partículas dendríticas

esto se debe a que las fuerzas de fricción son menores en partículas esféricas. Las partículas pequeñas fluyen mas rápido que las grandes hasta una medida en la cual por fuerzas electrostáticas no fluyen.

Durante el prensado, la presión debe aplicarse en forma uniforme. Si la velocidad en la aplicación de la presión varía, provoca una estructura con capas de diferentes densidades. Si la velocidad seleccionada es muy alta, impide que el aire que se encuentra entre las partículas pueda escapar originando porosidades. En general, la densidad en verde del compactado aumenta con la aplicación de presión.

La compactabilidad de una masa de polvo depende fuertemente de la plasticidad de las partículas, la cual va aumentando a medida que la aplicación de presión aumenta. Bajo la acción de un esfuerzo, las partículas se deforman y ocurre un endurecimiento, además de la creación de tensiones en el volumen total impidiendo la densificación.

Un factor importante es la composición química de las partículas, puesto que la deformación de películas o inclusiones de óxidos tienden a disminuir la plasticidad, impidiendo la unión metal-metal y disminuyendo los puntos de contacto.

Se espera que los polvos correctamente reducidos, recocidos y por tanto blandos, de forma de partícula irregular, de tamaños mezclados en una proporción adecuada, queden mejor compactados. Los compactados que han sido prensados a muy altas presiones disminuyen su densidad con la temperatura de sinterizado porque se relevan los esfuerzos ocasionados por la deformación y el tamaño de grano puede crecer.

El efecto de la porosidad en la densidad del material es importante. Los poros surgen durante la compactación, disminuyen durante el sinterizado, y la que queda es llamada porosidad residual.

Se suponen dos tipos de nucleación de poros, que son homogéneos y heterogéneos; los primeros crecen a partir del mismo material y los últimos a partir de impurezas o de estados de tensión creados durante la compactación.

Se sabe que la formación de porosidades depende fuertemente de los procesos de fabricación del polvo, de los cuales resulta el tamaño y forma de las partículas. Es posible distinguir dos tipos de poros, aquellos que están interconectados mediante canales, y que son llamados poros abiertos y aquellos que están encerrados en el interior de un material, y que reciben el nombre de poros cerrados.

COMPACTACION DE POLVOS DE ALUMINIO

Los polvos de aluminio se compactan a bajas presiones, y se pueden adaptar a todos los tipos de equipo de compactación.

La curva de presión - densidad en verde, mostrada a continuación (figura 8), la cual compara las características del compactado con otros polvos metálicos, nos indica que el aluminio se puede compactar de una manera mas simple. La baja presión de compactación del aluminio permite usar un equipo no muy sofisticado⁽¹⁴⁾.

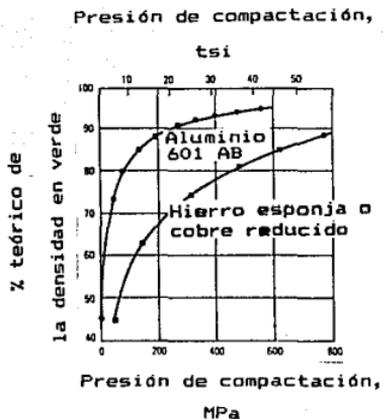


Figura 8

Debido a que el aluminio responde mejor a la compactación, y fluye con mayor facilidad en el dado, se pueden producir formas mas complejas y con precisión.

SINTERIZACION

La sinterización es la etapa en donde un conjunto de partículas, compactadas por presión o simplemente confinadas en un molde, se unen químicamente entre ellas para formar un cuerpo coherente, bajo la influencia de la temperatura adecuada.

El proceso de sinterizado se efectúa generalmente a una temperatura inferior a la del constituyente de mas alto punto de fusión. En algunos casos, la temperatura es suficientemente alta para formar un constituyente líquido, como en la manufactura de carburos cementados, en que el sinterizado se hace por encima del punto de fusión del metal cementador. En otros casos, no tiene lugar la fusión de ninguno de los constituyentes.

A pesar de que se han realizado numerosas investigaciones sobre el mecanismo de sinterizado se debe admitir que su conocimiento no está entendido completamente. El sinterizado es un proceso que reduce el área superficial de las partículas de polvo y la fuerza promotora en este caso se realiza a partir del exceso en energía libre de la superficie del polvo sobre la del material sólido. El problema fundamental del sinterizado es explicar por cuales mecanismos ocurre esta reducción en energía, ya que se presume que intervienen hasta cinco mecanismos, que son difíciles de cuantificar en cuanto a su importancia en el proceso:

1. Difusión superficial.
2. Difusión por borde de grano.
3. Difusión en volumen.
4. Evaporación y condensación.
5. Flujo plástico.

La difusión superficial es un mecanismo de sinterización que ocurre cuando el compactado alcanza temperaturas del orden de $0.3 T_f$. En estas condiciones los átomos superficiales tienen suficiente movilidad para desplazarse, orientados por la tensión superficial, y se reúnen en el punto de contacto entre partículas, aumentando el radio de los puentes de enlace, sin que ocurra acercamiento de los centros de las partículas.

A temperaturas más elevadas que las necesarias para la difusión superficial, se produce en forma simultánea la evaporación y la condensación del metal. El cambio de fase predominante depende de la presión de vapor.

Cuando el mecanismo que adquiere mayor importancia es la difusión a través de la red, ésta es posible por los defectos existentes en los materiales (vacancias y dislocaciones) y los que se generan durante las etapas de mezclado, compactación y sinterización. La difusión de vacancias aumenta el espesor del puente de enlace y redondea los poros.

Tanto en la difusión por vacancias como en la difusión por átomos intersticiales se cumple la Ley de Fick:

$$J = -DA(\delta C/\delta X)$$

donde: J = es el flujo del metal

D = coeficiente de difusión

A = superficie donde ocurre el flujo

$\delta C/\delta X$ = gradiente de concentración

El coeficiente de difusión depende de la temperatura, según la ecuación de Arrhenius:

$$D = D_0 \exp(-a/RT)$$

donde D_0 es una constante que depende de la naturaleza del metal y del tipo de difusión, a es la energía de activación, R es la constante de los gases y T la temperatura absoluta.

La termofluencia es la deformación plástica que experimenta un material sometido a un esfuerzo y a una cierta temperatura. La difusión de lugares vacantes produce fluencia si se lleva el material desde los límites de grano que están sometidos a una carga, o a una temperatura.

Cuando se tiene un material dado, por debajo de su temperatura de fusión, su estado estable es el de un cristal con sus defectos en equilibrio. Lo anterior nos lleva a que en la temperatura de sinterización existirán múltiples vacancias y dislocaciones que constituyen los defectos en la red.

El material compactado se aproxima al estado estable a temperaturas elevadas, con la cooperación de los mecanismos de transporte que se presentan en la sinterización; la energía libre que está en exceso en el compactado está en forma de energía superficial de todas las interfases (ambas con la atmósfera y entre los granos individuales, lo que representa a la energía en borde de grano), y como una energía de red en exceso.

La energía de red es ocasionada por la existencia de vacancias y dislocaciones, las cuales junto con las tensiones internas fueron introducidas en el momento de la fabricación del polvo y durante las etapas de compactación.

Por otro lado, desde un punto de vista cinético, la movilidad atómica en estado sólido es función de la temperatura. Se requiere que los átomos se encuentren con cierta movilidad para que ocurra la sinterización, y esto se consigue aumentando la temperatura del sistema, produciéndose así más zonas de contacto.

Un modelo simplificado del proceso de sinterización, indica una expresión de la forma⁽⁷⁾:

$$\frac{\chi}{\delta} = \frac{F(T)t}{\delta^m}$$

donde:

χ = radio del cuello entre esferas (ver figura 9)

δ = radio de la esfera

$F(T)$ = es una función exclusiva de la temperatura que contiene el coeficiente que caracteriza al mecanismo operante; por ejemplo cuando predomina la difusión, este término es el coeficiente de difusión correspondiente.

t = tiempo

n y m = exponentes determinados por el mecanismo operante:

$n = 2$	$m = 1$	flujo viscoso newtoniano
$n = 3$	$m = 2$	evaporación y condensación
$n = 5$	$m = 3$	difusión en volumen
$n = 6$	$m = 4$	difusión por borde de grano
$n = 7$	$m = 4$	difusión superficial

Se han presentado discusiones acerca de los valores de estos exponentes, provocando desviaciones. Se determinó la existencia de un factor de forma (c) que relaciona al exponente (n) con otro factor (b) determinado por el mecanismo operante:

$$n = cb + 1$$

y se mostró también que las desviaciones del modelo esférico cambian el valor de (n).

Desde el punto de vista práctico, la aplicación de estos modelos es limitada y los problemas técnicos de la sinterización han sido mas o menos sobrellevados. Para una explicación descriptiva del proceso de sinterizado, se pueden distinguir varias etapas:

1. *Unión inicial de las partículas.* La formación de uniones entre las partículas se presenta en los inicios del proceso, sin cambio dimensional, pero promoviendo en el material un incremento de la resistencia y la coherencia (figura 9).

2. *Crecimiento del cuello.* Por medio del transporte de material se produce un crecimiento de los cuellos entre partículas (figura 9).

3. *Oclusión de los canales entre poros.* La porosidad sufre cambios significativos al cerrarse los canales entre poros.

4. *Redondeamiento de los poros.* Los poros se redondean debido al crecimiento de los cuellos.

5. *Densificación o reducción de los poros.* La reducción de los poros involucra un desplazamiento del material y la eliminación de gases, reduciendo el volumen de la masa sinterizada. Sin embargo, la eliminación de la porosidad requiere de tiempos y temperaturas que en la práctica no son económicas.

6. *Crecimiento de los poros.* Una vez realizadas las etapas anteriores, se tiene un crecimiento de los poros a expensas de otros, pero manteniendo la misma porosidad total.

Las dos variables mas importantes que controlan el proceso de sinterización son:

TEMPERATURA. El proceso de sinterizado depende mucho de la temperatura; a grosso modo se puede indicar que un aumento de 10°C duplica la velocidad de sinterización y aumenta los cambios que ocurren. Se ha encontrado que hay una temperatura óptima, en donde, por abajo o arriba de esta las propiedades de resistencia son inferiores (figura 10).

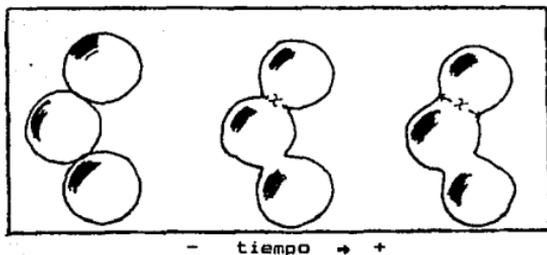


Figura 9. Efecto del sinterizado en un arreglo de partículas esféricas (se observa el radio del cuello entre esferas α)

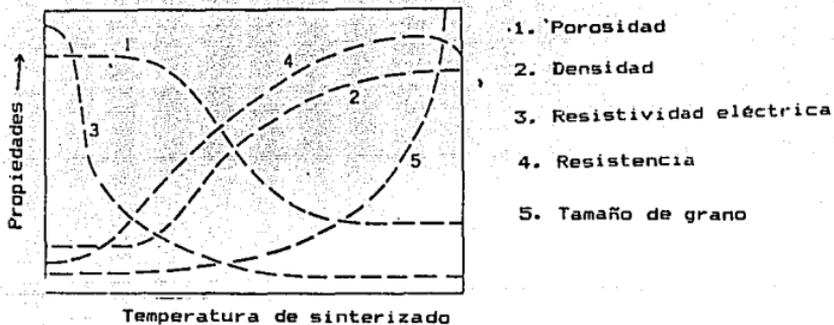


Figura 10. Efecto del sinterizado en varias propiedades.

TIEMPO. Aunque el grado de sinterización aumenta con el tiempo, su efecto es mucho menor comparado con el de la temperatura; se ha encontrado que cualquier cambio tiene una relación con el tiempo de la forma t^n donde n es menor que la unidad.

También se tienen otras variables, que están relacionadas a las partículas y condiciones de prensado, como son: porosidad, densidad, resistividad eléctrica, resistencia, tamaño de grano, etc.

La porosidad durante el sinterizado toma una gran importancia, ya que de ella dependen las propiedades finales de la pieza. Este proceso se realiza en condiciones en donde la movilidad atómica aumenta y los procesos difusivos se vuelven mas rápidos. La densificación ocurre cuando las vacancias llegan a los límites de grano, se acumulan, colapsan y se reemplazan por planos de átomos. La difusión de vacancias hacia las regiones intergranulares se promueve por el gradiente de concentración de vacancias, debido a que existe una alta densidad de estas en la red cristalina alrededor del poro cerrado.

Se puede generalizar que los polvos finos tienen densidades menores en el sinterizado, pero con una distribución de porosidades mas dispersa que las partículas gruesas⁽¹¹⁾.

Debido a los efectos de la compactación en frío, las partículas se encuentran bajo tensión, y en la sinterización se producen los fenómenos de recuperación, recristalización y crecimiento de grano. El término recristalización ha sido utilizado en dos diferentes sentidos: el primero ha sido atribuido a la reorganización de la red después de haber deformación en frío, que sucede por la difusión de átomos individuales desde la red deformada hacia el punto de nucleación; el segundo sentido del

término recristalización significa cualquier cambio en la forma cristalina llevada a cabo por el movimiento de átomos individuales.

Otros fenómenos que pueden suceder son transformaciones de fases, debido a las propiedades naturales de los metales, por ejemplo la transformación ferrita - austenita en el hierro (α - γ).

También se producen reacciones químicas (oxidación, descarbonización, etc.) que afectan las condiciones superficiales e internas de las piezas, así como sus propiedades.

Como una consecuencia de los cambios que suceden en la sinterización, se producen variaciones en la densidad y en las dimensiones de las piezas. Se emplea un método para controlar la densidad mediante un parámetro de densificación:

$$P.D. = \frac{\text{Densidad sinterizada} - \text{Densidad en verde}}{\text{Densidad teórica} - \text{Densidad en verde}}$$

Aspectos prácticos

Una vez realizada la compactación, la pieza es transportada a los hornos de sinterización, en donde el proceso se realiza en varias etapas:

a) *Calentamiento y remoción de lubricantes.* Es común remover los lubricantes empleados en la compactación en un paso anterior al de la sinterización, para evitar posibles daños al equipo, o para evitar deterioro en las propiedades de la pieza, su aspecto y dimensiones.

b) *Permanencia a la temperatura de sinterización.* Se lleva a la temperatura de sinterización requerida de acuerdo al material, donde permanece el tiempo necesario para una sinterización completa y evitar problemas de sinterizado insuficiente, con el consiguiente deterioro de las propiedades.

c) *Enfriamiento.* Es necesario realizar un enfriamiento de acuerdo a las propiedades que se piden al material, evitando todo choque térmico que pueda producir distorsiones, fracturas o microestructuras indeseables, pero manteniendo temperaturas superiores al punto de rocío de la atmósfera empleada, para evitar oxidación.

ATMOSFERAS DE SINTERIZACION

En la mayoría de las operaciones comerciales de sinterización es usual el tener una atmósfera controlada, con el fin de cumplir las siguientes funciones:

- prevenir cualquier reacción química entre el ambiente y las piezas a sinterizar.
- limpieza y purificación de los compactados.
- activar la sinterización.
- mantener condiciones de equilibrio para no modificar la composición de los compactados.

Las atmósferas pueden ser neutra, oxidante, reductora o realizarse la sinterización en vacío. Una gran parte de la sinterización de los metales cuyos óxidos se reducen fácilmente con el hidrógeno (por ejemplo el hierro, cobre, níquel.) se realiza en una atmósfera de hidrógeno seco o amoníaco disociado. Los metales que forman hidruros deben sinterizarse en gas noble muy puro o en vacío. El material no deseado (como óxido superficial) debe eliminarse antes de y durante la operación de sinterizado, de tal manera que puedan conservarse limpias las superficies necesarias para la interdifusión.

Los tipos mas comunes de atmósferas son^(1.11):

- a) hidrógeno
- b) nitrógeno
- c) gas exotérmico
- d) gas endotérmico
- e) amoníaco disociado
- f) mezclas de hidrógeno y nitrógeno
- g) gas inerte
- h) vacío

HORNOS DE SINTERIZACION

En la actualidad se trata de satisfacer las condiciones particulares de la pulvimetalurgia. Los tipos de hornos mas usados son^(1,11):

1.- HORNOS DISCONTINUOS

- a) tipo mufla
- b) a vacío
- c) tipo campana
- d) tipo tubo

2.- HORNOS CONTINUOS

- a) de malla
- b) de rodillos
- c) con empujador
- d) de viga caminante

Cada uno de estos hornos tiene características propias que lo hacen adecuado para determinadas condiciones de operación. Los hornos discontinuos son empleados con materiales en los cuales no importa la cantidad, sino la calidad y propiedades a obtener; para alta temperatura (1350°C) y producción , son comunes los hornos de empujador y de viga caminante; para temperaturas medias (1000 - 1150°C) son empleados los hornos de rodillos y de malla.

APLICACIONES

Cuando la metalurgia de polvos empezó a desarrollarse, fué una técnica para minimizar los problemas que se tenían en el proceso convencional de tratamiento de metales de alto punto de fusión. Sin embargo, con su desarrollo se llegó a emplear como una técnica sencilla y con un rango muy amplio de aplicación a un sin número de materiales con propiedades muy particulares y en la elaboración de productos de diversos metales comunes, sin olvidar que sus requerimientos deben ser satisfechos económicamente por esta técnica. La pulvimetalurgia abarca diferentes metales: ferrosos y no ferrosos, dentro de los últimos metales tanto de bajo como de alto punto de fusión.

a) Metales de bajo punto de fusión. (considerados abajo de 1700°C). Encontramos abajo de esta temperatura varios metales con propiedades diferentes: aluminio, hierro, cinc, titanio, etc. El titanio y el berilio han resultado estratégicamente útiles en la industria aeronáutica y son reconocidos por su resistencia; las llamadas superaleaciones, a base de níquel y cobalto, empleadas en turbinas, motores de jets, piezas resistentes a la corrosión.

b) Metales refractarios. Es indispensable mencionar al wolframio por la importancia dentro de la industria metal mecánica. Las aleaciones empleadas en masas de inercia, contrabalanzas, protectores de radiación, etc., son hechos por pulvimetalurgia. Existen productos refractarios formados por nitruros, carburos, óxidos, boruros, etc., que asociados a los metales, forman compuestos denominados *cermets*, así como compuestos intermetálicos como los beriluros, siliciuros, etc.

c) Otros materiales. Se pueden mencionar gran diversidad de aplicaciones en las cuales se pueden emplear diferentes tipos de materiales producidos por pulvimetalurgia, como son los filtros

muy usados en la industria química, los materiales mixtos usados en los contactos eléctricos, los cojinetes autolubricados, etc. (figuras 11, 12, 13 y 14).

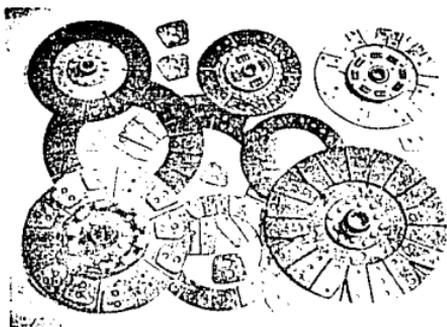


Figura 11. Juntas de cubiertas para fricción.



Figura 12. Dos diseños de rotores de bombas de transmisión.

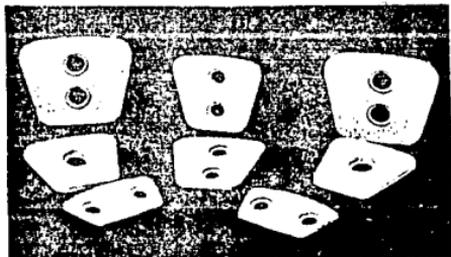


Figura 13. Botones de acero para frenos de aeroplano.



Figura 14. Partes de transmisión.

COMPOSITOS .

Un compósito se puede definir como una mezcla o combinación mecánica de dos o mas materiales que son sólidos en su estado final, son mutuamente insolubles y difieren en naturaleza química. Los compósitos según su naturaleza pueden ser de diferentes tipos, entre los cuales los principales son:

1. Laminados de madera, papel o tela y un material adhesivo que los una como lo son resinas, hule, silicones, etc. (por ejemplo esqueletos de las llantas, estructuras de aislamiento eléctrico).
2. Los cermets, que son mezclas de polvos metálicos y cerámicos, comprimidos y tratados térmicamente (Metalurgia de polvos).
3. Plásticos reforzados, principalmente los fabricados a partir de fibra de vidrio y una resina termógena. Otros tipos de fibras son el boro, silicato de aluminio, carburo de silicio, grafito.
4. Telas, en las cuales se utilizan combinaciones de fibras de lana o algodón y una fibra sintética.
5. Compósitos rellenos, en los cuales el material adherente tal como el aceite de linaza, asfalto o resina, se mezcla con un relleno en forma de hojuelas o partículas pequeñas. Algunos ejemplos son el linoleum, mezcla de vidrio y hojuelas plásticas para cajas de baterías y asfalto.
6. Compósitos en los cuales es utilizada una matriz metálica en la cual se encuentran fibras o partículas de algún otro material, como lo es el grafito, carburo de silicio, alúmina, limadura de hierro, etc.

Al colocar en un mismo producto dos materiales distintos y con características mecánicas distintas, algunas propiedades de este nuevo material se incrementan con respecto a las propiedades de los materiales utilizados originalmente; es así como nacen los compósitos.

Los compósitos de matriz metálica tuvieron una aplicación muy importante en la industria aeroespacial, y se ha extendido más recientemente a otros campos, incluida la industria automotriz, entre otras cosas porque pueden utilizarse materiales más ligeros (como aluminio y magnesio) que pueden sustituir a los convencionales (por ejemplo acero) dando propiedades equivalentes, ayudados por los materiales cerámicos.

Las partículas que se usan para reforzar la matriz metálica pueden presentarse en forma de fibras continuas, laminillas, partículas, fibras discontinuas, y los materiales más comunes que se presentan en esas formas son el boro, carbono, carburo de silicio, alúmina.

Los procesos de fabricación de compósitos de matriz metálica se pueden concentrar en dos rutas principales⁽¹³⁾ (figura 15):

1. Uso de metales líquidos.
2. Métodos en estado sólido, en donde se mezcla polvos metálicos con polvos cerámicos y ambos se prensan para formar un producto.

Para las dos rutas mencionadas, es esencial una distribución uniforme del material cerámico en la matriz, ya que de ello dependen fundamentalmente las propiedades deseadas.

La ruta más común y la más estudiada es donde se usan metales líquidos. Aquí, para introducir y dispersar en forma homogénea una fase en metal fundido, las técnicas usadas generalmente son⁽¹⁴⁾:

- a) Adición de partículas con una agitación vigorosa del metal fundido.
- b) Inyección de la fase cerámica en el metal fundido.
- c) Dispersión de pellets o briquetas, formados por compresión de polvos cerámicos los cuales son introducidos en el metal fundido ligeramente agitado.
- d) Adición de polvos a un sistema de ultrasonido en donde se encuentra el metal fundido.
- e) Adición de polvos al metal fundido, que se encuentra bajo el efecto de un campo electromagnético. El flujo provocado por el movimiento electromagnético es utilizado para obtener una suspensión uniforme.
- f) Dispersión de las partículas por medio de centrifugado en el metal líquido.
- g) Dispersión de partículas por efecto de inyección de un gas inerte en el metal líquido.

El arreglo de la fase cerámica en la estructura principal determina las propiedades del compuesto. La distribución de las fases depende de la calidad en la unión metal-partícula y de las variables siguientes:

* Velocidad de enfriamiento. Si la velocidad es alta, es posible que las partículas no tengan tiempo suficiente para distribuirse uniformemente o, dependiendo del método, puede ocurrir que las partículas queden distribuidas adecuadamente y una velocidad rápida de enfriamiento evitaría que se rompa esa distribución. Fenómenos similares pueden ocurrir cuando se habla de velocidad baja de enfriamiento.

* Viscosidad del metal líquido. Puede o no permitir el movimiento de las partículas dentro del metal líquido.

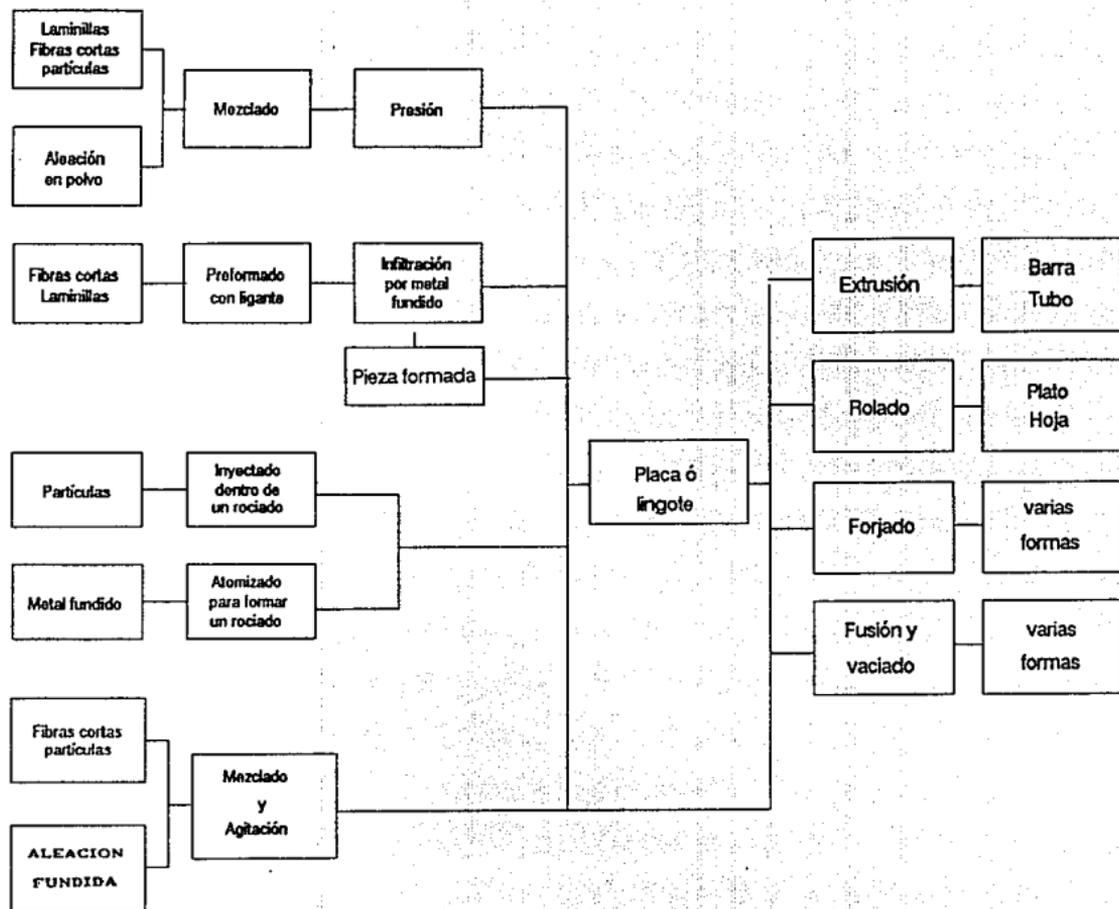


Figura 15. Rutas de procesos para producción de compósitos.

* Forma, tamaño y fracción de volumen de las partículas. El tamaño y la forma de las partículas está ligada con su fluidez en el metal fundido.

* Gravedad específica de las partículas y el metal. Gravedades diferentes provocan un asentamiento o flotación de las partículas en el metal líquido.

* Química, morfología de las fases y las interacciones entre partículas. Es importante notar las posibles reacciones de solubilidad y adherencia que pueden ocurrir entre los dos materiales.

* La floculación de partículas. Puede evitar una distribución homogénea de partículas por la aglomeración.

* La presencia de cualquier fuerza externa durante la solidificación.

Cuando se habla de los métodos en estado sólido, se pueden esperar variables distintas, tales como la porosidad que se presenta al compactar los polvos, pero pueden eliminarse otras como velocidades de enfriamiento, problemas de homogeneidad, entre otros.

Los compósitos consistentes en una matriz de aluminio y carburo de silicio disperso en ella, tienen una gran aplicación en la industria debido principalmente a las cualidades de resistencia a la deformación tanto plástica como elástica, así como al desgaste por fricción y abrasión. Sin embargo, se encontró también que su fabricación mediante la ruta de fundición es bastante complicada, lo cual ha sido la principal limitante en el desarrollo y aplicación de este material.

Los compósitos antes mencionados no puede ser refundidos sin que sus propiedades se vean afectadas debido a cambios en su microestructura. Para los compósitos a base de aluminio estas propiedades incluyen una elevada resiliencia, resistencia a la deformación y resistencia al desgaste, la cual es mucho mayor que la de materiales comunmente usados como el acero, aluminio y hierros colados; mejores propiedades a temperaturas elevadas, si se comparan con una aleación de aluminio sin reforzar.

El uso de la ruta en estado sólido no ha sido estudiada en forma satisfactoria, y se espera poder aportar algo a esta ruta en el presente trabajo

Para que estos compósitos puedan ser usados a nivel industrial, deben de poseer las siguientes cualidades:

- El material obtenido debe estar libre de defectos.
- El material cerámico debe estar disperso adecuadamente en la matriz.
- Su fabricación debe ser relativamente fácil.

Uno de estos compósitos es el de aluminio-carburo de silicio, el cual posee todas las características antes señaladas pero que presenta grandes dificultades para su fabricación debidas principalmente a la integración de las partículas de carburo de silicio al aluminio.

Las propiedades mecánicas del compuesto son el resultado de la combinación de la dureza (9.5 en la escala de Mohs) y resistencia al desgaste del carburo de silicio y de la maleabilidad del aluminio. Al mismo tiempo el material conserva la ligereza y resistencia a la corrosión del aluminio^(13,14).

Los valores de la resistencia dependen de la uniformidad en la distribución de las partículas de carburo de silicio dentro de la matriz de aluminio.

El carburo de silicio, siendo sumamente abrasivo, aumenta considerablemente la resistencia al desgaste por fricción y abrasión del material.

Debido a que las partículas de carburo de silicio son mas densas que el aluminio (3.23 y 2.7 g/cc, respectivamente), estas tienden a asentarse en el fondo cuando el aluminio se encuentra fundido, por lo que al estar el aluminio en estado líquido debe haber una agitación del material para evitar heterogeneidad en la distribución del carburo de silicio dentro de la matriz de aluminio.

Se ha logrado determinar que el aluminio reacciona con el carburo de silicio a una temperatura mayor a los 800°C, formándose carburo de aluminio el cual precipita en forma de cristales de color amarillo⁽⁹⁾. La reacción que se lleva a cabo es la siguiente:



Mediante la ruta de fabricación en estado sólido, es posible evitar por completo la reacción anterior, ya que las temperaturas alcanzadas son menores a la temperatura de fusión del aluminio.

PROPIEDADES Y APLICACIONES DE LOS COMPÓSITOS

Los compósitos de matriz metálica desarrollados por diferentes técnicas, encuentran una gran variedad de aplicaciones, dependiendo de los requerimientos económicos y de las especificaciones de las propiedades ingenieriles que se desean en las piezas. Entre estas propiedades, algunas pueden ser: la gran resistencia que presentan a temperaturas elevadas y normales, coeficiente de expansión térmica cercano a cero, buenas conductividades eléctricas y térmicas, excelentes propiedades de antifricción, antiabrasión y maquinabilidad.

Se han desarrollado algunos modelos teóricos que predicen las propiedades de los compósitos de matriz metálica, a través de ecuaciones simples y reglas que casi siempre proporcionan buenos resultados. La resistencia a la tensión, módulo de elasticidad y densidad de los compósitos, se puede estimar a través de una regla de mezclas. Por ejemplo, la regla de mezclas para el módulo elástico es una simple suposición de las contribuciones efectivas de las fases constituyentes sobre la propiedad total:

$$E_c = E_m * V_m + E_p * V_p$$

donde: E_c = Módulo elástico del compósito

E_m = Módulo elástico de la matriz

E_p = Módulo elástico de la partícula

V_m = Fracción de volumen de la matriz

V_p = Fracción de volumen de las partículas

Se pueden encontrar relaciones similares para otros sistemas.

El coeficiente de expansión térmica de los compósitos es una propiedad importante para varias aplicaciones, como en la industria aeroespacial, en donde las dimensiones constantes sobre un rango de temperatura se vuelve una variable importante.

Metales reforzados con fibras, como el compuesto magnesio-grafito, pueden tener un coeficiente de expansión térmica de cero hasta temperaturas muy elevadas y resulta un excelente material para algunas aplicaciones estructurales.

La resistencia mecánica de muchos compósitos reforzados con fibras continuas es anisotrópica, así como extremadamente sensible a los cambios en fracción de volumen de la fase cerámica. Los compósitos aluminio-carburo de silicio tienen buena resistencia a temperaturas del orden de 500°C; sin embargo arriba de esta temperatura la falta de cohesión y límite de grano entre las fibras y la matriz provoca que las fibras se arranquen y el material falle.

Cuando se tiene partículas en lugar de fibras continuas, las propiedades mecánicas no se alteran en forma significativa, pero las propiedades tribológicas (desgaste, fricción, etc.) muestran un marcado mejoramiento.

La adición de partículas también puede dar mejor conductividad a la matriz metálica. Por ejemplo, los contactos eléctricos hechos de compuesto cobre-grafito, funcionan mejor que los materiales usados generalmente, porque la aleación combina la capacidad del grafito de no pegarse a otros materiales, con la alta conductividad eléctrica del cobre.

Algunos compósitos son utilizados en partes de automóvil, como en motores a diesel, por ejemplo pistones, cojinetes. El uso de partículas de grafito en partes de motores de automóviles reduce en forma considerable el desgaste de las piezas y proporciona eficiencia en el consumo de combustible y potencia.

Los compósitos con partículas cerámicas dispersas han encontrado aplicación en propulsores y otros sistemas tribológicos

que operan a temperaturas elevadas, donde es muy posible una falla del líquido lubricante. Se han propuesto compósitos de aluminio reforzados con partículas cerámicas para el uso de propulsores de turbocargadores, los cuales trabajan a temperaturas altas (figuras 16 y 17).

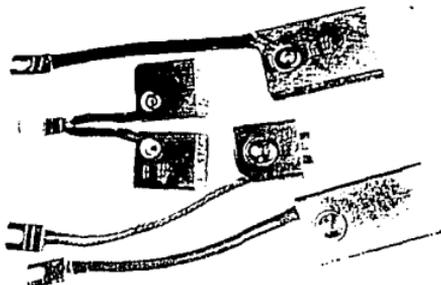


Figura 16. Escobillas industriales hechas de metal-grafito.



(a)

(b)

Figura 17. Comparación del desgaste de un pistón standard después de 30 hrs de trabajo (a) y un pistón de aluminio-grafito después de 60 hrs de trabajo.

CAPITULO 2

PROCESO DE OBTENCION

PROCESO DE OBTENCION

Dado que el compósito que se pretende obtener es una mezcla de polvos de aluminio y carburo de silicio, es importante conocer las características de cada uno de ellos (proporcionadas por el proveedor).

- *Polvo de aluminio.* Se dispuso de dos tamaños diferentes de polvo, los cuales fueron proporcionados por ALMEXA S.A. y cuyas características son:

	TAMAÑO DE PARTICULA	FORMA DE PARTICULA	DENSIDAD APARENTE
a) polvo grado 104	45-75 μm	semiesférica	1.1-1.5 g/cc
b) polvo grado 120	75-100 μm	irregular	1.1-1.3 g/cc

Composición química: Zn: 0.0051 % Mn: 0.0310 %
 Fe: 0.1070 % Mg: 0.0017 %
 Ni: 0.0026 % Pb: 0.0035 %
 Cu: 0.0130 % Al: resto

- *Polvo de carburo de silicio.* Se trabajó con dos tamaños de polvo de carburo de silicio, ambos de calidad comercial, con las características siguientes:

- a) Carburo de silicio, malla 220 (70 μ), partícula irregular
- b) Carburo de silicio, malla 280 (50 μ), partícula irregular

Inicialmente se realizó un estudio para determinar la altura mas adecuada de la probeta, con el fin de facilitar su manejo a nivel laboratorio. De estudios anteriores se parte de un peso inicial de 6 gramos, y se pudo establecer, de acuerdo al diámetro de la probeta, una altura mínima de 0.71 cm, con un diámetro de 1.9 cm, valores aceptables en la manipulación de la probeta.

El mezclado se realizó en forma manual, debido a que la cantidad de polvo a utilizar es muy pequeña, y por lo tanto si se utiliza un equipo de mezclado las pérdidas del polvo son muy grandes.

Para determinar la presión de compactación, se realizaron ensayos de compactación, y se trazaron gráficas de carga vs deformación, obteniéndose que a cargas mayores de 6,700 kg la disminución en el volumen del compactado es casi nula.

El siguiente paso consistió en determinar la cantidad de lubricante a agregar. Para esto, se compactaron cuatro probetas con 0.0%, 0.5%, 1.0% y 1.5% de estearato de zinc como lubricante, (se utilizó estearato de zinc por ser el lubricante disponible) bajo las siguientes condiciones de trabajo:

Presión de compresión = 6,700 kg
Temperatura de sinterización = 590°C
tiempo de sinterizado = 15 minutos

Para la evaluación de la porosidad se prepararon las muestras metalográficamente, y se realizó un análisis de porosidades en el analizador de imágenes (la porosidad es una variable que está relacionada con la cantidad de lubricante) de la siguiente manera:

- En una zona interior, que comprende el cilindro formado por la mitad del radio de la probeta.
- En una zona exterior, que es la que rodea a la zona interior.
- En una zona vertical, obtenida al cortar las probetas en forma longitudinal, para observar la porosidad producida en el sentido de la compresión (figura 18).

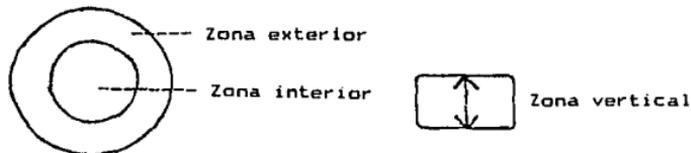


Figura 18. Esquema de las zonas en donde se realizó el análisis de porosidades.

Con los resultados obtenidos:

Muestra	porosidad (%)		
	Zona exterior	Zona interior	barrido vertical
0% lub.	2.685	0.58	1.80
0.5% lub.	3.060	1.40	1.76
1.0% lub.	2.400	2.10	3.40
1.5% lub.	6.800	5.80	7.10

Se observa un incremento de la porosidad con respecto a la cantidad de lubricante adicionado, por lo que se decidió no utilizar lubricante, aunque el polvo comercial viene con un 0.5% de lubricante.

Al realizar la evaluación del efecto del contenido de lubricante, se observaron algunas dificultades al preparar metalográficamente las probetas, lo que indicaba que probablemente el sinterizado aplicado era insuficiente, por lo que se realizó otra serie de pruebas con el fin de establecer las condiciones óptimas. Estas pruebas consistieron en combinar los siguientes valores:

Temperaturas: 570°C, 590°C, 610°C, 630°C.

Tiempos: 15 min, 20 min, 25 min, 30 min.

Así se tienen 16 condiciones diferentes de sinterizado, de donde, después de observar su comportamiento ante una compresión que se realizó para inferir su grado de sinterizado, se determinaron las mejores condiciones, las cuales fueron:

$T = 590^{\circ}\text{C}$

$t = 30 \text{ min.}$

La compresión realizada consistió en someter a las probetas a una carga de dos toneladas (las probetas se maquinaron para tener una relación de 2 a 1 en altura-diámetro) y observar el comportamiento presentado.

DISEÑO EXPERIMENTAL

Una vez identificadas las condiciones de trabajo, podemos establecer el diseño experimental en la siguiente forma: se harán probetas con 5%, 10%, 15% y 20% en volumen de carburo de silicio con dos tamaños diferentes, estas probetas tendrán un peso total de 6 gramos.

Como se observa en la siguiente tabla, se harán cuatro probetas iguales para cada condición, lo que nos da un total de 36 probetas, ya que se requieren hacer pruebas de desgaste, dureza y distribución de partículas por cada condición.

tamaño SiC	NSiC	Probetas
	0	0A, 0B, 0C, 0D
malla 220 (70 μ m)	5	1A, 1B, 1C, 1D
	10	2A, 2B, 2C, 2D
	15	3A, 3B, 3C, 3D
	20	4A, 4B, 4C, 4D
malla 280 (50 μ m)	5	5A, 5B, 5C, 5D
	10	6A, 6B, 6C, 6D
	15	7A, 7B, 7C, 7D
	20	8A, 8B, 8C, 8D

MEZCLADO. Debido a que la teoría indica que se obtienen mejores resultados en cuanto a compactabilidad y porosidad cuando se tienen tamaños diferentes y formas irregulares, se decidió utilizar como matriz una mezcla de los dos polvos de aluminio disponibles: 50% de polvo grado 120 y 50% de polvo grado 104.

Se pesa por separado los polvos (Al grado 120, Al grado 104 y SiC) y se mezclan perfectamente antes de vaciarlos al sistema de compactación.

COMPACTACION. El hecho de escoger una carga de 6,700 kg, se basó en que a ese valor, se observa que las partículas de aluminio sufren una compactación adecuada.

La velocidad de compactación trató de controlarse para desarrollar todas las compactaciones en la misma condición, a manera de llegar a los 6,700 kg en un lapso de 45 segundos. Lo anterior es con la finalidad de evitar las capas que se forman cuando la velocidad de compactación es muy alta.

Una vez compactado el compósito y expulsado del sistema de compactación, se miden sus dimensiones y peso, con el fin de determinar su densidad en verde.

SINTERIZADO. Se estabilizó el horno de sinterización (tipo tubo, marca Lindberg) en 590°C, (calibrado con el termopar) y mediante una base metálica se introdujeron primero 4 probetas iguales, y a los treinta minutos se sacan para dejarlas enfriar al aire; se introducen las siguientes 4 probetas iguales, y así sucesivamente hasta terminar los nueve grupos de probetas.

No se utiliza atmósfera controlada, debido a que en los ensayos no se nota ninguna interferencia del aire atmosférico con el compósito. Una vez que están frías, se miden de nuevo sus dimensiones a las probetas que salen del sinterizado y se pesan.

CARACTERIZACION DEL COMPOSITO. Con las probetas ya sinterizadas, se realizan las siguientes pruebas:

1. Dureza
2. Porosidad
3. Desgaste
4. Distribución de partículas

DUREZA. Se toma dureza en la escala Brinell a las probetas, seleccionando dos probetas por cada serie de cuatro probetas iguales. La dureza se toma por las dos caras, bajo las siguientes condiciones:

- carga = 300 kg
- diámetro de la bola = 10 mm
- tiempo de carga = 30 seg.

Se obtiene un promedio de los valores de dureza para cada probeta. Esto nos permite deducir como influye la cantidad y el tamaño de las partículas de carburo de silicio en la dureza del compuesto.

POROSIDAD. Se determina la porosidad del compuesto, basándose en su densidad. De acuerdo a la cantidad de aluminio y carburo de silicio presentes en el compuesto, se calcula la densidad teórica que presentaría el compuesto si no tuviera porosidad, y con las dimensiones de las probetas y su peso, es posible estimar una densidad real para cada probeta. La diferencia entre la densidad real y la teórica, nos puede indicar la porosidad presente en cada probeta, tomando como base que el volumen que está en exceso con respecto al volumen teórico de la probeta, es el que corresponde a la porosidad.

DESGASTE. Las probetas de desgaste son cilindros de 1/4 de pulgada. Las condiciones de trabajo son:

- Disco de desgaste. Hecho de acero norma SAE 4140, templado y revenido, con la superficie pulida.
- Velocidad del disco de desgaste: 160 rpm.
- Carga aplicada. Para calcular la carga aplicada, se pesa el brazo que sostiene a la probeta sobre el disco, y con la distancia del punto donde se sujeta el brazo con el soporte hasta el punto donde se coloca la probeta; puede calcularse la

- fuerza que se ejerce sobre la probeta, que es equivalente a la carga aplicada. El valor encontrado es de 1.25 kg.
- Lubricante. No se utiliza ningún lubricante.
 - Temperatura ambiente.
 - Se desgastan las probetas en el disco sin interferencia exterior.
 - Se pesan las probetas a intervalos de 15, 30, 60, 90 y 120 min., limpiando el disco después de cada medición.
 - La probeta se encuentra a una distancia de 6.2 cm del centro del disco de desgaste.
 - El tiempo total de desgaste es de 2 horas por probeta.
 - Se tiene una distancia recorrida, a la velocidad mencionada, de:
 - a) 934,800 mm cada 15 min.
 - b) 7,478,400 mm en las dos horas
 - Los cálculos de desgaste se realizan en función de la pérdida de peso que sufren las probetas al interactuar con el disco, por lo que deben pesarse antes de iniciar las pruebas.

Utilizando la información que se obtiene de las pruebas de dureza y desgaste, es posible determinar un coeficiente de desgaste y estimar el efecto del carburo de silicio en la matriz de aluminio.

DISTRIBUCION DE PARTICULAS. Las probetas son cortadas por la mitad en forma transversal a las caras de la probeta, en dirección de la carga aplicada, y se preparan metalográficamente para observarse en el microscopio.

Debido a que el analizador de imágenes basa sus mediciones en las diferencias de tonalidades (claras y oscuras) que presentan las probetas analizadas, se presenta un problema: las partículas de carburo de silicio no pueden definirse con facilidad; así que para identificar con mayor claridad las partículas, se utiliza luz polarizada en el microscopio, y el efecto que se produce es el

oscurecer las partículas de carburo de silicio, y de esta manera es mas fácil la cuantificación; pero no se puede trabajar con luz polarizada en el analizador de imágenes. Se decide tomar fotografías a las imágenes que nos da el microscopio con luz polarizada y observarlas a través de la cámara de video (macrovisor).

Se toman ocho fotografías por probeta, en una zona diferente cada fotografía, como se muestra a continuación:

1	2	5	6
3	4	7	8

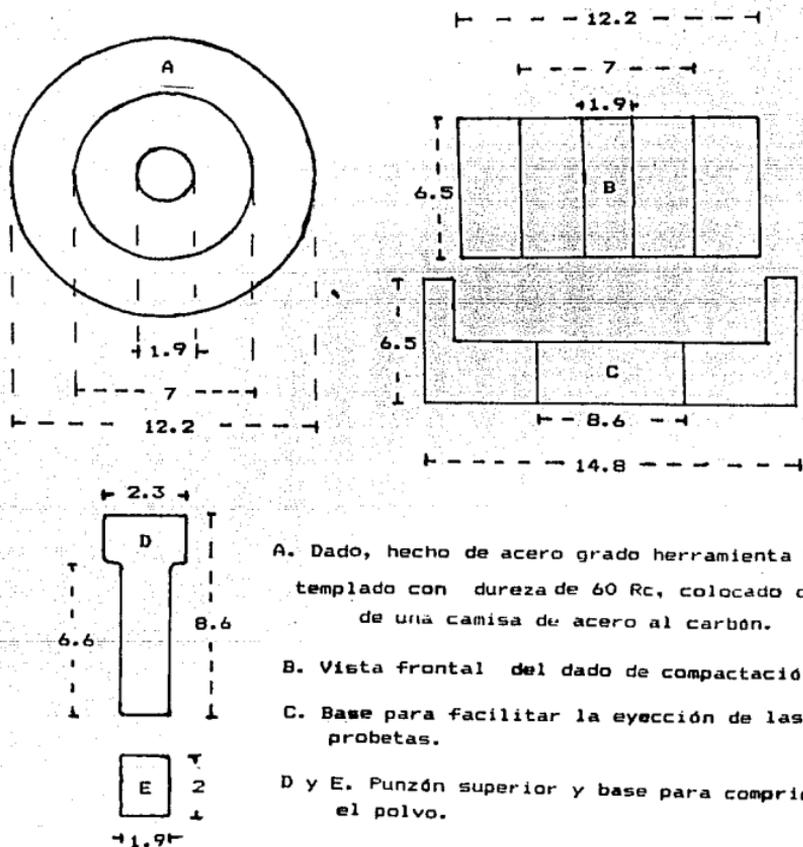
Con ayuda del analizador de imágenes, se determina el porcentaje de área que ocupan las partículas de carburo de silicio presentes, y se desarrolla una distribución de los tamaños y cantidad de partículas presentes en la muestra.

Los resultados anteriores pueden ofrecer el criterio para determinar la homogeneidad en la incorporación de las partículas a la matriz de aluminio.

EQUIPO UTILIZADO

1. Balanza analítica, Oert ling NA 164.
2. Maquina universal, Mohr & Federhaff A.G.
3. Dado para compactación (ver figura 19).
4. Horno tipo tubo, Lindberg.
5. Termopar tipo K (chromel - alumel).
6. Equipo para preparación metalográfica.
7. Equipo para análisis metalográfico (incluye fotografías).
8. Analizador de imágenes, Omnimet, adaptado a un macrovisor.
9. Equipo para prueba de desgaste (ver figura 20).
10. Calibrador Mauser (vernier).
11. Máquina de dureza Brinell, Shimadzu.

DADO PARA COMPACTACION



A. Dado, hecho de acero grado herramienta O1, templado con dureza de 60 Rc, colocado dentro de una camisa de acero al carbón.

B. Vista frontal del dado de compactación.

C. Base para facilitar la eyección de las probetas.

D y E. Punzón superior y base para comprimir el polvo.

Nota. Todas las dimensiones en centímetros.

Figura 19. Dado para compactación.

EQUIPO PARA PRUEBA DE DEGASTE

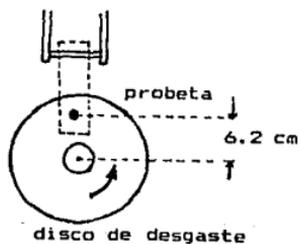
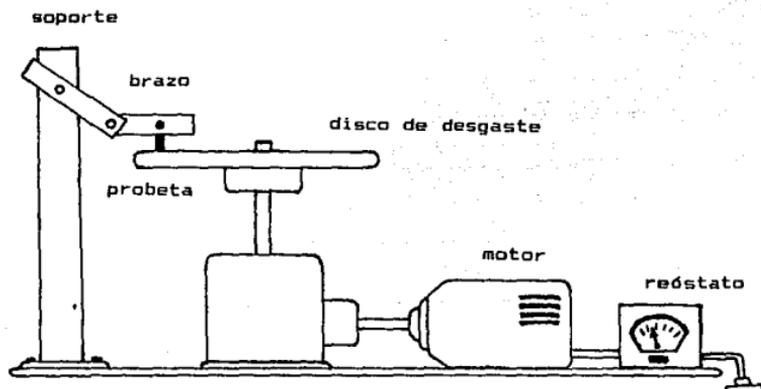


Figura 20. Equipo para prueba de desgaste.

CAPITULO 3

RESULTADOS Y ANALISIS DE RESULTADOS

RESULTADOS

Una vez realizadas las pruebas especificadas, los resultados obtenidos se presentan a continuación.

MEZCLADO. Las probetas se mezclaron de acuerdo a la siguiente tabla (7):

TABLA 7

probetas	Mal gdo 104	Mal gdo 120	MSIC	tamaño SIC
1A, 1B, 1C, 1D	47.5	47.5	5	malla 220
2A, 2B, 2C, 2D	45.0	45.0	10	
3A, 3B, 3C, 3D	42.5	42.5	15	
4A, 4B, 4C, 4D	40.0	40.0	20	
5A, 5B, 5C, 5D	47.5	47.5	5	malla 280
6A, 6B, 6C, 6D	45.0	45.0	10	
7A, 7B, 7C, 7D	42.5	42.5	15	
8A, 8B, 8C, 8D	40.0	40.0	20	
9A, 9B, 9C, 9D	50.0	50.0	0	

COMPACTADO. Los resultados obtenidos son (tabla 8):

TABLA 8

probeta	peso (g)	altura (cm)	diámetro (cm)	densidad en verde (g/cc)
1A	0.0172	0.81	1.0	2.62
1B	0.0817	0.82	1.0	2.59
1C	0.0158	0.82	1.0	2.59
1D	0.8896	0.87	1.0	2.57
2A	0.0704	0.81	1.0	2.64
2B	0.0415	0.80	1.0	2.66
2C	0.0820	0.81	1.0	2.69
2D	0.0542	0.81	1.0	2.69
3A	0.1001	0.82	1.0	2.62
3B	0.1865	0.82	1.0	2.64
3C	0.1052	0.82	1.0	2.69
3D	0.0750	0.82	1.0	2.61
4A	0.1381	0.82	1.0	2.64
4B	0.1311	0.82	1.0	2.64
4C	0.1452	0.82	1.0	2.64
4D	0.1405	0.83	1.0	2.61
5A	5.9914	0.81	1.0	2.61
5B	5.0815	0.82	1.0	2.57
5C	5.9899	0.80	1.0	2.64
5D	5.9620	0.81	1.0	2.59
6A	6.0470	0.81	1.0	2.69
6B	6.0358	0.81	1.0	2.69
6C	6.0217	0.82	1.0	2.59
6D	5.9969	0.81	1.0	2.61
7A	6.0854	0.82	1.0	2.62
7B	6.0450	0.82	1.0	2.60
7C	6.0156	0.81	1.0	2.65
7D	6.0689	0.81	1.0	2.64
8A	6.1622	0.83	1.0	2.62
8B	6.1707	0.83	1.0	2.60
8C	6.1282	0.83	1.0	2.60
8D	6.1555	0.84	1.0	2.58
9A	5.9190	0.80	1.0	2.60
9B	5.9140	0.805	1.0	2.60
9C	5.9220	0.81	1.0	2.58
9D	5.9200	0.81	1.0	2.58

Nota. La densidad en verde es aquella que presenta el compactado después del prensado, y para el cálculo de esta densidad se utiliza la fórmula siguiente, válida solo para cilindros:

$$\delta = \frac{1273 * M}{d^2 * h}$$

M = masa del compactado (g)
d = diámetro del compactado (mm)
h = altura del compactado (mm)
δ = densidad en verde (g/cc)

SINTERIZADO. Los resultados obtenidos en la sinterización son los siguientes (tabla 9):

T A B L A 9

probeta	peso (g)	altura (cm)	diámetro (cm)
1A	6.0172	0.81	1.0
1B	6.0917	0.82	1.0
1C	6.0158	0.81	1.0
1D	6.9906	0.86	1.0
2A	6.0704	0.81	1.0
2B	6.0415	0.80	1.0
2C	6.0320	0.81	1.0
2D	6.0542	0.81	1.0
3A	6.1001	0.81	1.0
3B	6.1305	0.81	1.0
3C	6.1052	0.81	1.0
3D	6.0750	0.81	1.0
4A	6.1381	0.82	1.0
4B	6.1311	0.82	1.0
4C	6.1452	0.82	1.0
4D	6.1405	0.83	1.0
5A	5.0014	0.81	1.0
5B	5.0815	0.80	1.0
5C	5.0803	0.80	1.0
5D	5.0620	0.80	1.0
6A	6.0470	0.80	1.0
6B	6.0358	0.80	1.0
6C	6.0217	0.81	1.0
6D	5.0000	0.80	1.0
7A	6.0854	0.81	1.0
7B	6.0450	0.81	1.0
7C	6.0056	0.81	1.0
7D	6.0683	0.81	1.0
8A	6.1622	0.83	1.0
8B	6.1207	0.83	1.0
8C	6.1282	0.83	1.0
8D	6.1555	0.83	1.0
9A	5.0130	0.80	1.0
9B	5.0140	0.80	1.0
9C	5.0220	0.80	1.0
9D	5.0200	0.81	1.0

CARACTERIZACION DEL COMPOSITO. Como ya se mencionó, las pruebas realizadas son: dureza, desgaste, distribución de partículas y porosidad, y los resultados obtenidos son:

DUREZA

Se realizaron pruebas de dureza en la escala Brinell. La ecuación utilizada es la siguiente:

$$HB = \frac{L}{(\pi D/2) (D - (D^2 - d^2)^{1/2})}$$

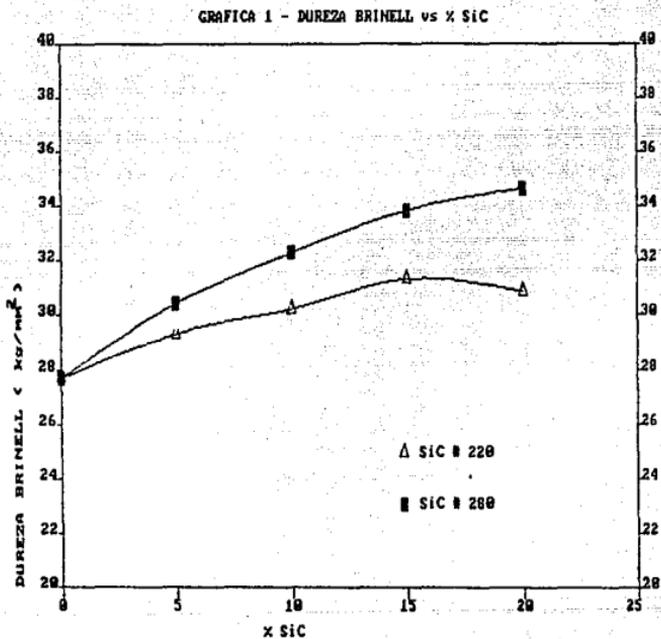
L = carga = 300 kg
 D = diámetro de la bola = 10 mm
 d = diámetro de la impresión(mm)

y los resultados obtenidos son (tabla 10):

T A B L A 10

PROBETA	DUREZA BRINELL (kg/mm ²)
1A, 1B	29.32
2A, 2B	30.20
3A, 3B	31.30
4A, 4B	30.85
5A, 5B	30.40
6A, 6B	32.275
7A, 7B	33.835
8A, 8B	34.65
9A, 9B	27.70

La gráfica 1 que se presenta a continuación esquematiza los resultados que se presentan en la tabla anterior.



Gráfica 1. Dureza brinell vs % SiC.

DESGASTE

Los resultados obtenidos durante las pruebas de desgaste se presentan en las siguientes tablas (tabla II):

TABLA II

probeta	peso inicial (g)	M A S A P E R D I D A (m g)				
		15 min.	30 min.	60 min.	90 min.	120 min.
1C	0.8520	1.9	3.1	7.8	13.7	16.8
2C	0.8662	0.7	2.2	5.9	11.4	14.7
3C	0.9051	0.0	1.8	7.3	9.1	11.4
4C	0.9182	0.0	1.8	5.6	10.6	12.6
5C	0.9089	2.6	5.0	9.9	14.6	17.4
6C	0.7822	2.0	4.2	8.8	12.8	17.1
7C	0.8575	1.9	2.7	6.0	7.4	10.5
8C	0.8711	2.4	5.3	8.4	9.5	14.0
9C	0.7824	2.2	5.1	10.8	14.6	20.2

La tabla 12 agrupa una serie de valores, necesarios para obtener el coeficiente de desgaste. La fórmula utilizada es la siguiente:

$$K = \frac{V \cdot H_m}{P \cdot S}$$

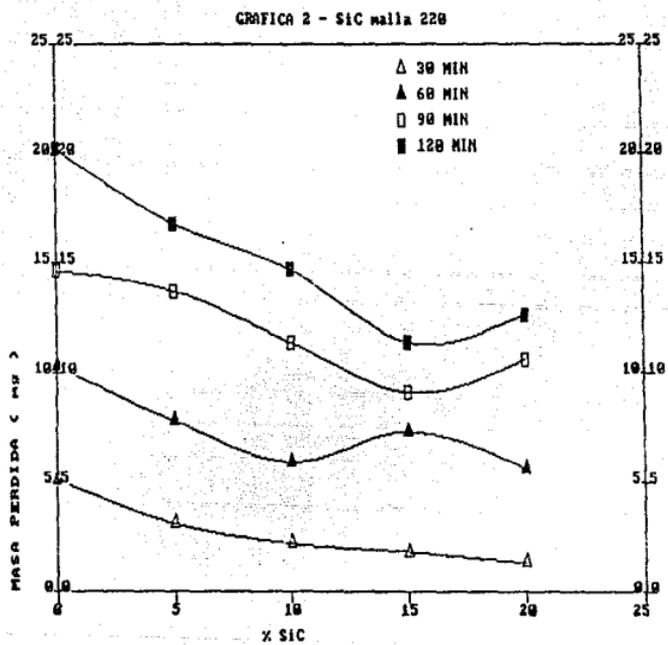
K = Coeficiente de desgaste
 Hm = Dureza Knoop del material (kg/mm²)
 S = Distancia recorrida (mm)
 P = Carga aplicada (kg)
 V = Volumen desgastado (mm³)

T A B L A 12

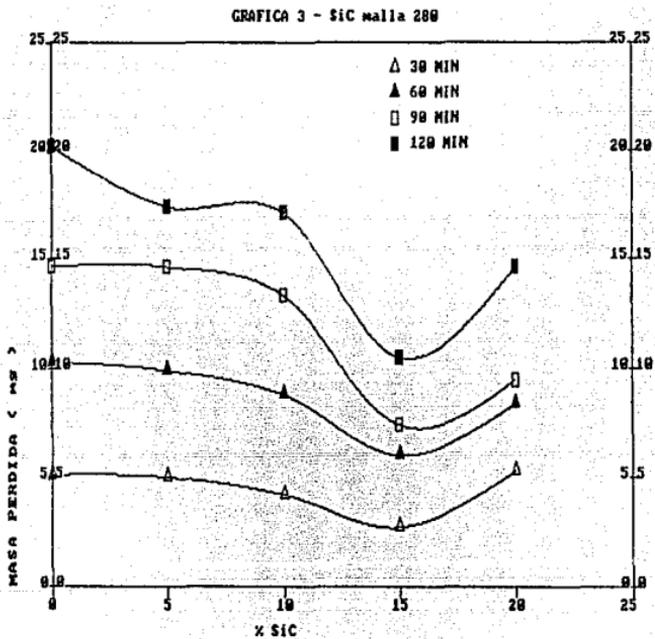
probeta	Hm kg/mm ²	S (mm)		P kg	V (mm ³)		K * 10 ⁵	
		15 min	120 min		15 min	120 min	15 min	120 min
1C	44.82	034800	7478400	1.25	0.7252	6.4122	2.7506	9.04
2C	45.20	034800	7478400	1.25	0.2682	5.5263	1.0181	2.672
3C	46.30	034800	7478400	1.25	0.0000	4.2857	0.0000	2.1227
4C	45.85	034800	7478400	1.25	0.0000	4.7700	0.0000	2.3396
5C	45.40	034800	7478400	1.25	0.0848	6.5909	3.826	8.2
6C	47.275	034800	7478400	1.25	0.7634	6.5267	9.0885	9.3
7C	48.885	034800	7478400	1.25	0.7170	3.0623	2.0965	2.060
8C	49.65	034800	7478400	1.25	0.0291	5.6154	9.0223	2.08
9C	42.7	034800	7478400	1.25	0.8420	7.7895	9.08	8.585

NOTA. Los valores de Hm (dureza knoop) fueron tomados de:
 Mondolfo L. F., "Aluminium alloys: Structure and properties"
 1st. edition, ed. The Butter Worth Group, England 1976.

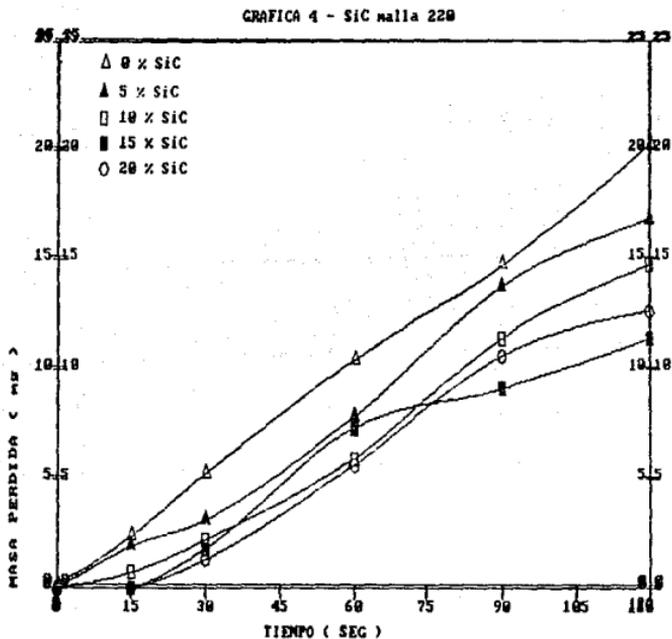
Las gráficas siguientes esquematizan los resultados de las dos tablas anteriores (gráficas 2, 3, 4 y 5).



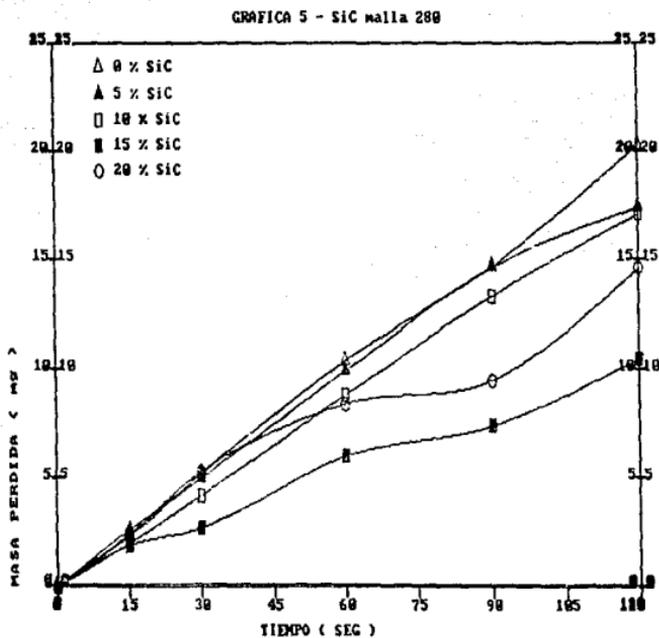
Gráfica 2. Influencia del porcentaje de SiC malla 220 en el desgaste, a diferentes tiempos.



Gráfica 3. Influencia del porcentaje de SiC malla 280 en el desgaste, a diferentes tiempos.



Gráfica 4. Influencia del tiempo en el desgaste, para diferentes contenidos de SiC malla 220.



Gráfica 5. Influencia del tiempo en el desgaste, para diferentes contenidos de SiC malla 280.

DISTRIBUCION DE PARTICULAS

Para utilizar el analizador de imágenes, primero es necesario calibrarlo. Se parte de un círculo de calibración, cuya superficie es conocida exactamente, y se mide esta superficie conocida en el analizador de imágenes, que da resultados en pp (ver nota). Una simple relación de los valores obtenidos para el área exacta y la medida en el analizador nos da el factor de calibración para el aparato, y permite transformar los valores reales leídos en cantidades reales.

--- área total de la pantalla = 666,683 pp²

--- área medida del círculo de calibración = 9,503 pp²

--- área real del círculo de calibración = 6,362 μ²

--- Factor de calibración de área = $\frac{\text{área real del círculo de calib}}{\text{área medida del círculo de cal}}$

Factor de calibración de área = 0.6695 μ²/pp²

--- Factor de calibración de longitud = (factor de calib. Área)^{1/2}

Factor de calibración de longitud = 0.8182 μ/pp

NOTA. El término "pp" equivale a puntos de pantalla en el analizador de imágenes, y "μ" corresponde a las micras que se tienen realmente.

A continuación se presentan los resultados obtenidos, después de sumar todas las partículas detectadas por probeta en las ocho fotografías tomadas y promediar el % de carburo de silicio contenido en la matriz de aluminio (tabla 13, 14 y 15).

TABLA 13

rango de tamaño (micras)	probeta 1A		probeta 2A		probeta 3A		probeta 4A	
	partículas Σ	%	partículas Σ	%	partículas Σ	%	partículas Σ	%
0-4.0	1	0.84	0	0.00	5	0.58	31	2.49
4.0-9.0	0	2.05	21	3.46	39	4.54	95	7.63
9.0-14.7	27	9.24	69	11.37	40	4.65	139	11.16
14.7-19.0	89	18.95	78	12.85	80	9.31	178	14.29
19.0-24.5	28	9.59	81	13.34	155	18.04	211	16.95
24.5-29.4	41	14.04	64	10.54	181	15.25	126	10.12
29.4-34.8	46	15.75	81	13.34	106	12.34	182	10.60
34.8-39.2	36	12.39	60	9.88	105	12.22	97	7.79
39.2-44.1	23	7.88	88	6.26	59	6.87	76	6.10
44.1-49.0	12	4.11	85	5.76	34	3.96	61	4.90
49.0-53.9	11	3.77	29	4.77	39	4.54	38	3.05
53.9-58.8	4	1.37	7	1.15	22	2.56	17	1.36
58.8-63.7	2	0.68	11	1.81	17	1.98	12	0.96
63.7-68.6	6	2.05	8	1.32	10	1.16	9	0.72
68.6-73.5	3	1.03	5	0.82	6	0.70	9	0.72
73.5-78.4	4	1.37	5	0.82	4	0.47	4	0.32
78.4-83.3	2	0.68	5	0.82	3	0.35	5	0.40
83.3-88.2	1	0.34	2	0.33	3	0.35	1	0.08
88.2-93.1	0	0	1	0.16	0	0	2	0.16
93.1-98.0	0	0	1	0.16	1	0.17	2	0.16
TOTAL =	292	99.97	607	99.94	859	100.04	1245	99.96

La tabla 13 corresponde a las probetas que tienen un tamaño de partícula de carburo de silicio igual a 220 mallas.

TABLA 14

rango de tamaño (micras)	probeta 5A		probeta 6A		probeta 7A		probeta 8A	
	partículas Σ	%						
0-4.0	09	11.01	60	5.45	42	2.44	45	1.83
4.0-9.0	109	22.84	78	7.09	89	4.81	106	4.32
9.0-14.7	137	16.21	183	16.64	242	14.04	450	18.32
14.7-19.0	134	16.33	235	21.36	308	23.09	493	20.07
19.0-24.5	93	11.01	194	17.64	285	16.53	486	19.79
24.5-29.4	80	9.47	132	12.00	234	13.57	325	13.23
29.4-34.3	47	5.56	85	7.73	161	9.34	197	8.02
34.3-39.2	28	3.31	67	6.09	118	6.84	138	5.62
39.2-44.1	12	1.42	33	3.00	64	3.71	82	3.34
44.1-49.0	14	1.66	21	1.91	87	2.15	56	2.28
49.0-53.9	4	0.47	8	0.73	31	1.80	45	1.83
53.9-58.8	5	0.59	3	0.27	16	0.93	17	0.69
58.8-63.7	1	0.12	1	0.09	13	0.75	12	0.49
63.7-68.6	0	0	0	0	0	0	3	0.12
68.6-73.5	0	0	0	0	0	0	1	0.04
73.5-78.4	0	0	0	0	0	0	0	0
78.4-83.3	0	0	0	0	0	0	0	0
83.3-88.2	0	0	0	0	0	0	0	0
88.2-93.1	0	0	0	0	0	0	0	0
TOTAL =	845	100.0	1100	100.0	1724	100.0	2456	99.99

La tabla 14 se refiere a las probetas con partículas de carburo de silicio de un tamaño igual a 280 mallas

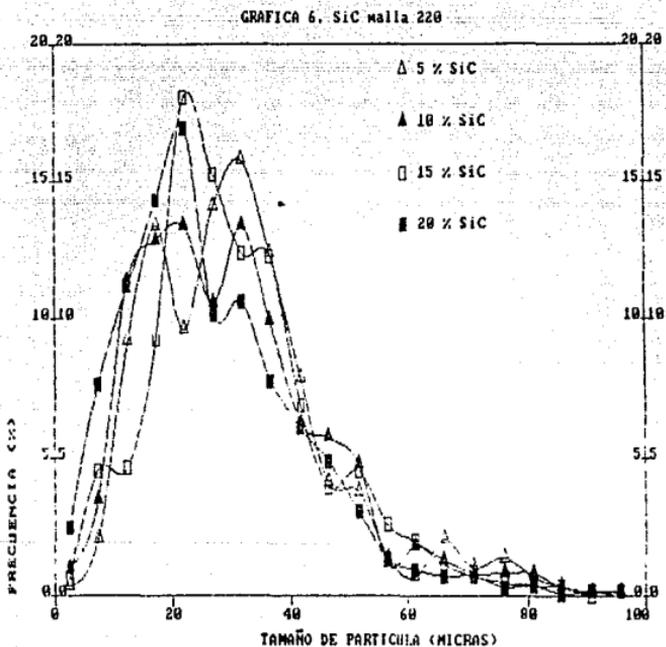
La tabla 15 muestra los resultados obtenidos para el porcentaje real de carburo de silicio en cada probeta, tomados a partir del promedio de las ocho fotografías tomadas.

T A B L A 15

probeta	% SiC (area)
1A	4.765
2A	9.790
3A	14.500
4A	18.940
5A	4.970
6A	9.280
7A	14.620
8A	10.500

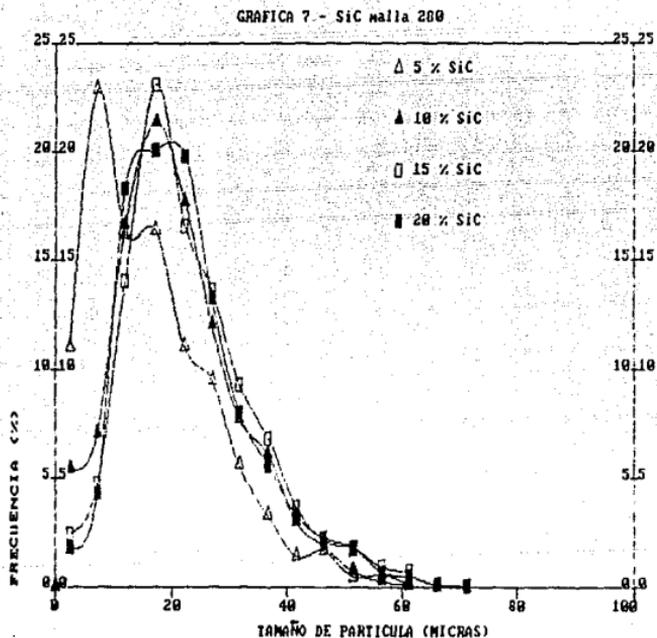
A continuación, se presentan las gráficas obtenidas a partir de las tres tablas anteriores. Las gráficas están agrupadas de tal manera que pueda compararse por un lado, la distribución de un mismo tamaño de carburo de silicio, pero a diferentes porcentajes; y por otro lado, la distribución de tamaños diferentes de carburo de silicio, pero a un mismo porcentaje (gráfica 6 a la 11).

Se presenta también una serie de fotografías tomadas para presentar la distribución obtenida de carburo de silicio en la matriz de aluminio para cada probeta (fotografías 1 a la 8).

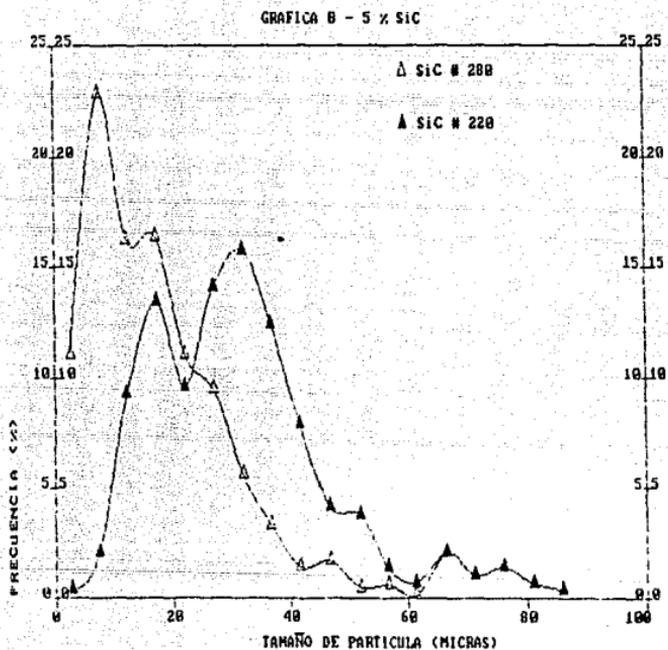


Grafica 6. Distribución del tamaño de partículas para el SiC malla 220.

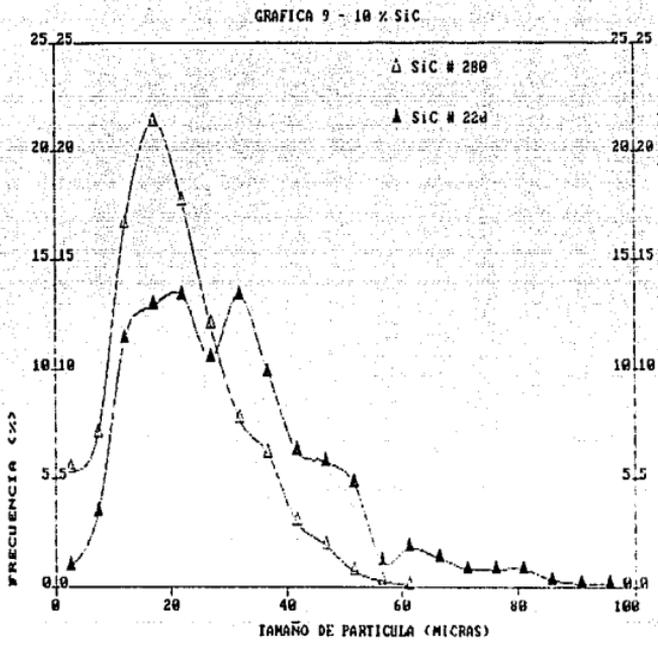
ESTA TESIS NO DEBE
SALIR DE LA BIBLIOTECA



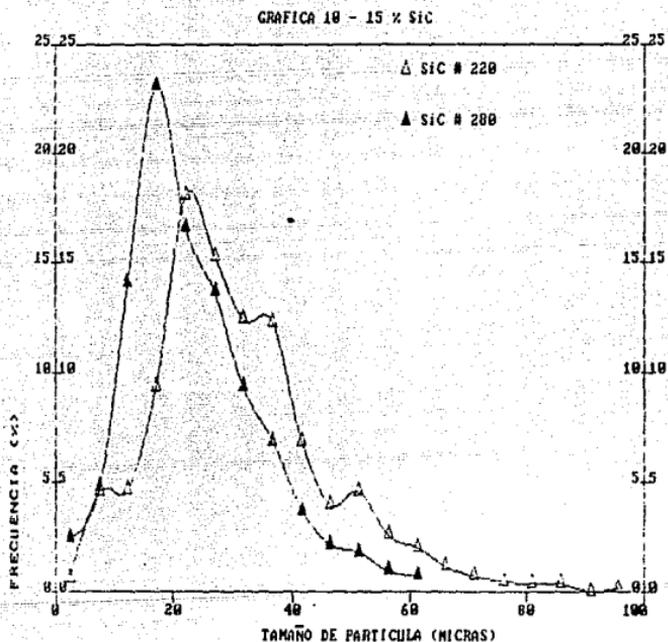
Gráfica 7. Distribución del tamaño de partículas para el SiC malla 280.



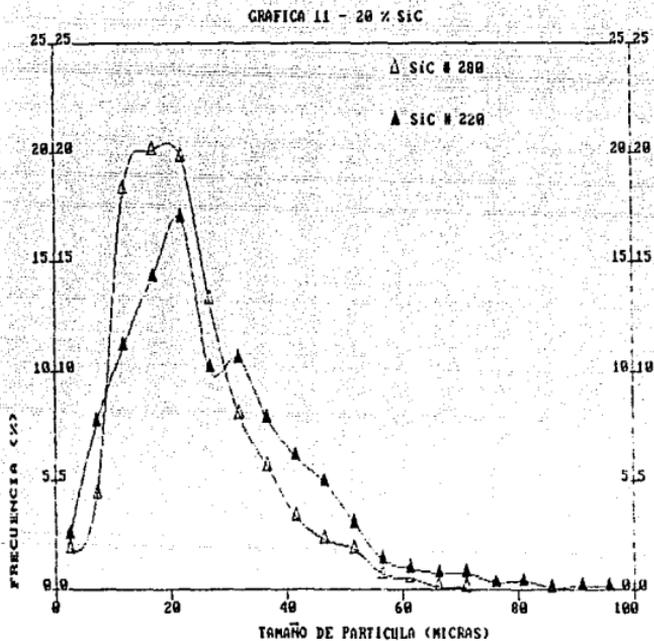
Grafica B. Distribución del tamaño de partículas para un 5% de carburo de silicio.



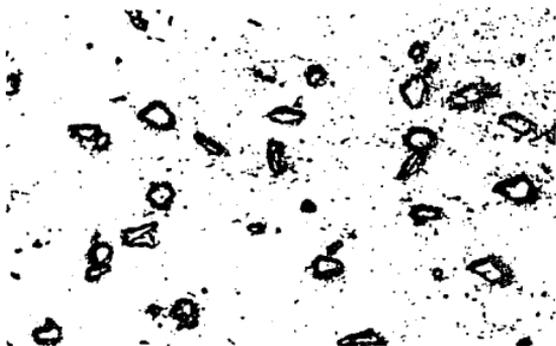
Gráfica 9. Distribución del tamaño de partículas para un 10% de carburo de silicio.



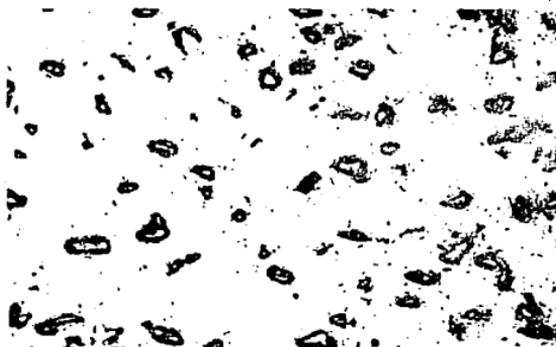
Gráfica 10. Distribución del tamaño de partículas para un 15% de carburo de silicio.



Gráfica 11. Distribución del tamaño de partículas para un 20% de carburo de silicio.



Fotografía 1. 5% SiC malla 220; 37.5 X; temp. de sinterizado=590°C
presión de compactación=6.7 ton.



Fotografía 2. 5% SiC malla 280; 37.5 X; temp. de sinterizado=590°C
presión de compactación=6.7 ton.



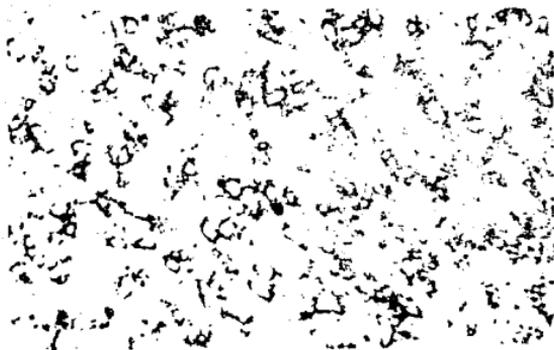
Fotografía 3. 10% SiC malla 220; 37.5 X; temp. de sinterizado=590°C; presión de compactación=6.7 ton.



Fotografía 4. 10% SiC malla 280; 37.5 X; temp. de sinterizado=590°C; presión de compactación=6.7 ton.



Fotografía 5. 15% SiC malla 220; 37.5 X; temp. de sinterizado=590° C; presión de compactación=6.7 ton.



Fotografía 6. 15% SiC malla 200; 37.5 X; temp. de sinterizado=590° C; presión de compactación=6.7 ton.



Fotografía 7. 20% SiC malla 220; 37.5 X; temp. de sinterizado=590°C; presión de compactación=6.7 ton.



Fotografía 8. 20% SiC malla 280; 37.5 X; temp. de sinterizado=590°C; presión de compactación=6.7 ton.

P O R O S I D A D

La tabla 16 agrupa los resultados de los cálculos realizados para poder estimar la porosidad de las probetas fabricadas, en función de sus densidades reales y teóricas.

T A B L A 16

probeta	masa (g)	volumen real cm^3	% SIC promedio	densidad real (g/cc)	densidad teórica (g/cc)	% de porosidad
1C	6.0158	2.2066	4.765	2.62	2.71	3.32
2C	6.0320	2.2682	9.79	2.66	2.74	2.92
3C	6.1052	2.2066	14.5	2.66	2.76	3.62
4C	6.1452	2.3249	18.94	2.64	2.78	5.03
5C	5.9893	2.2682	4.97	2.64	2.71	2.58
6C	6.0717	2.2066	9.28	2.62	2.74	4.38
7C	6.0956	2.2066	14.62	2.65	2.76	3.98
8C	6.1287	2.3533	19.50	2.60	2.78	6.47
9C	5.9220	2.2682	0.0	2.61	2.69	2.97

ANÁLISIS DE RESULTADOS

COMPACTADO. En los datos obtenidos se observa un ligero aumento en el peso de las probetas a medida que aumenta el contenido de carburo de silicio, y esto es evidente por ser más denso que el aluminio. Las dimensiones de las probetas no varían con respecto al contenido de carburo de silicio, presentando casi las mismas dimensiones todas las probetas.

Las dimensiones teóricas esperadas quedaron por abajo de las obtenidas, es decir que se obtuvieron probetas con mayor altura con respecto al valor esperado. Esto confirma la presencia de porosidad.

Se observa en la tabla 8 que la densidad en verde, para todas las probetas es menor a la densidad que se obtiene teóricamente, aunque los resultados obtenidos no se alejan mucho de los esperados. Al parecer no hay tendencia alguna en cuanto al comportamiento de la densidad en verde con respecto al tamaño y porcentaje de carburo de silicio.

SINTERIZADO. Después de sinterizar las probetas, la altura de las probetas se redujo ligeramente. El diámetro de las probetas no sufrió cambio durante la sinterización.

Si se comparan los valores de la densidad en verde con los presentados en la tabla de resultados de porosidad (tabla 16), se observa un aumento en la densidad al sinterizar las piezas, pero este aumento no es suficiente para obtener la densidad teórica.

El sinterizado, al parecer solo logró una cohesión entre las partículas presentes, y no ejerció influencia en la porosidad.

DUREZA. La dureza presenta un aumento al incrementar el contenido de carburo de silicio. Con respecto al tamaño del carburo de silicio, si este disminuye, la dureza presenta un incremento. El aumento en dureza no es muy marcado, debido a que el aluminio es el metal que soporta la carga y el carburo de silicio solo refuerza algunas propiedades. Tamaños menores de SiC presentan mayor cantidad de partículas y esto provoca mayores tensiones por lo que la dureza puede aumentar un poco, y lo mismo ocurre si se aumenta el contenido de carburo de silicio.

Se observa que para el carburo de silicio malla 220, el valor de dureza presenta un máximo en 15 %, y disminuye para 20 %. El carburo de silicio malla 280 no presenta el comportamiento anterior, y la dureza aumenta en forma constante con respecto al contenido de carburo de silicio.

Los valores de dureza obtenidos son típicos de un material suave; lo anterior es lógico al ser el aluminio material base del compuesto.

DESGASTE. La probeta que sufre un mayor desgaste en 2 horas, según las condiciones de trabajo, es la que no tiene carburo de silicio; y la que presenta un desgaste menor corresponde a las probetas con un 15 % de carburo de silicio. Las probetas que contienen 20 % de carburo de silicio aumentan su desgaste con respecto a las de 15 %.

Para el mismo contenido de carburo de silicio, las probetas con partículas malla 280 sufren un mayor desgaste que las de malla 220 hasta un contenido de 10 % de carburo de silicio; pero en probetas con 15 %, las probetas con partículas malla 220 son las que presentan un mayor desgaste con respecto a las de malla 280.

Se tiene un punto clave, que corresponde al 15 % de carburo de silicio, en donde se nota un desgaste menor que para las demás probetas con otros contenidos de carburo de silicio (esto se observa con mas claridad en la gráfica 3).

Las curvas de desgaste (gráficas 4 y 5) presentadas a partir de los datos experimentales, nos dan a las 2 horas un aumento constante en la cantidad de masa perdida; y aunque su comportamiento no es completamente lineal, no se observa ninguna tendencia a disminuir o estabilizar el desgaste con respecto al tiempo.

Durante la prueba se observa una ligera capa que se forma entre la probeta y el disco de desgaste. Esto indica que el material que se desgasta es atrapado, debido a la geometría del sistema de desgaste, entre la probeta y el disco, provocando una autolubricación, que deberia disminuir la velocidad de desgaste.

El coeficiente de desgaste representa la probabilidad de que se rompa la unión de las dos superficies (disco y probeta), provocando un desgaste. Los valores del coeficiente de desgaste pueden diferir hasta en varios ordenes de magnitud, dependiendo de factores como: la similitud de los materiales en contacto, la rugosidad de las superficies de contacto, la carga aplicada, la lubricación y la limpieza de las superficies.

En general, materiales similares y muy rugosos aumentan los valores del coeficiente de desgaste. Altas cargas tambien aumentan el valor del coeficiente. Una buena lubricación disminuye el valor del coeficiente.

Para los resultados obtenidos se esperaria un coeficiente de desgaste igual para los dos tiempos (15 y 120 min.).

Comparando los dos tamaños de carburo de silicio, se tiene que para probetas con carburo de silicio malla 220, el valor del coeficiente de desgaste a 15 minutos es menor que para la malla 280, e incluso tiene un valor de cero para 15 % y 20% de carburo. Puede observarse una tendencia a disminuir el valor del coeficiente si se aumenta el contenido de carburo de silicio en todas las probetas.

Para un tiempo de 120 minutos, se observa una tendencia a disminuir el valor del coeficiente de desgaste si se aumenta el contenido de carburo de silicio, pero el valor mas bajo se presenta para probetas con 15 % de carburo y el mas alto en la probeta que no tiene carburo de silicio. El valor para las probetas con 20 % de carburo es mayor que para 15 %. debido al arranque de partículas que se presenta al tener un porcentaje de carburo muy elevado.

POROSIDAD. Tomando como base el contenido de carburo de silicio obtenido a través del analizador de imagenes, se obtiene un volumen y una densidad para cada probeta. No se observa alguna tendencia en los resultados, pues son muy irregulares. La porosidad mas alta se presenta en las probetas que tienen 20 % de carburo de silicio, y el valor mas bajo corresponde a la probeta con 5 % de carburo de silicio malla 280, valor que es mas bajo aún que la porosidad presentada por la probeta que no contiene carburo.

Según la tabla 16, puede decirse que el carburo de silicio provoca mayor porosidad en 15 y 20 %. La porosidad no se ve afectada hasta que tenemos un 10 % de carburo. Las probetas con carburo de silicio malla 280 presentan mayor porosidad que las de malla 220 en contenidos de 10, 15 y 20 % de carburo, pero con 5 % de carburo la malla 280 presenta el valor mas bajo de porosidad.

DISTRIBUCION DE PARTICULAS. De acuerdo a los resultados obtenidos, se presenta para todas las probetas un porcentaje de carburo de silicio menor al esperado (% en volumen).

Para las probetas con carburo de silicio malla 220 , la grafica 6 muestra una distribución de la cantidad de partículas (en porcentaje) y de los tamaños de las partículas de carburo de silicio en las probetas con 5, 10, 15 y 20 %; se esperaban curvas bastantes parecidas, ya que se trabajaron porcentajes y existe una buena distribución. Las curvas no son iguales, pero si se observa un comportamiento parecido. La mayor cantidad de partículas se concentra entre 10 y 50 μ , y el porcentaje mas elevado corresponde a un tamaño entre 19.6 y 24.5 μ para las probetas con 10, 15 y 20% de carburo de silicio; para la probeta con 5%, el valor mas elevado es para partículas entre 29.4 y 34.3 μ . De acuerdo con la A.S.T.M., los valores anteriores corresponden a mallas mayores a 270, que no corresponde al tamaño de carburo de silicio utilizado (malla 220 = 70 μ). El resultado anterior nos lleva a pensar que las partículas de carburo de silicio presentan una geometria muy irregular y acicular (forma de agujas, con una relación largo/ancho $\gg 1$) y que presentan longitudes relativamente grandes (malla 220) pero pasan por espacios mas pequeños, explicando así el tener partículas aparentemente mas pequeñas.

Para las probetas con carburo de silicio malla 280, la grafica 7 muestra que la probeta con 5% de carburo se desplaza ligeramente hacia la izquierda en cuanto al punto donde se localiza la mayor concentración de partículas. Para 10, 15 y 20 % de carburo, el mayor porcentaje de partículas tiene un tamaño entre 14.7 y 19.6 μ y la de 5 % tiene su máximo entre 4.9 y 9.8 μ . Para todas las probetas, la mayor cantidad de partículas se concentran entre 1 y 30 μ .

En las gráficas 6 y 7 puede observarse que las partículas de carburo de silicio malla 220 tienen una mayor concentración de partículas en tamaños mayores, y su intervalo es mas amplio que para las partículas de malla 280, y esto puede verse en las gráficas 8, 9, 10 y 11, en donde se comparan los dos tamaños con un mismo porcentaje de carburo.

Las cantidades de partículas, en las tablas 13 y 14 de resultados de distribución, llevan un orden ascendente con respecto al contenido de carburo de silicio. Por ejemplo, para la malla 220, se tiene:

- La probeta con 5% SiC presentó 292 part. en el área medida.
- La probeta con 10% SiC presentó 607 part. en el área medida.
- La probeta con 15% SiC presentó 859 part. en el área medida.
- La probeta con 20% SiC presentó 1245 part. en el área medida.

La relación entre la cantidad de partículas es congruente con el contenido de carburo de silicio. Para la malla 280 se observa que:

- La probeta con 5% SiC presentó 845 part. en el área medida.
- La probeta con 10% SiC presentó 1100 part. en el área medida.
- La probeta con 15% SiC presentó 1724 part. en el área medida.
- La probeta con 20% SiC presentó 2456 part. en el área medida.

Aunque para la malla 280 los resultados no son iguales a los de la malla 220 en cuanto a la relación de cantidad de partículas y contenido de carburo de silicio, se observa el incremento en la cantidad de partículas. El resultado anterior puede explicarse si se observa la cantidad de partículas para ambos tamaños de SiC, se tiene una relación casi al doble de partículas malla 280 con respecto a la malla 220, excepto para un contenido de 5% SiC, en donde la relación de partículas es mayor a dos, teniéndose una relación no congruente entre cantidad de partículas y contenido de carburo de silicio, principalmente por la irregularidad de la forma de las partículas.

CAPITULO 4

CONCLUSIONES

CONCLUSIONES

En general, para los compósitos obtenidos, la dureza aumenta si el contenido de carburo de silicio aumenta.

Las probetas con carburo de silicio malla 280 presenta mayor dureza comparadas con las probetas con carburo de silicio malla 220.

La resistencia al desgaste aumenta conforme se aumenta el contenido de carburo de silicio hasta un 15%.

Para un 20% de carburo de silicio, se tiene una disminución en la resistencia al desgaste con respecto a un contenido de 15%. Esto se debe a que se tiene una gran cantidad de partículas de carburo de silicio, las cuales no se adhieren completamente al material base.

Las probetas que contienen carburo de silicio malla 220 presentan mejor resistencia al desgaste que las probetas con partículas de carburo malla 280.

El coeficiente de desgaste es menor para las probetas que tienen carburo de silicio con respecto a la probeta hecha solo de aluminio, lo cual nos indica el efecto producido por el carburo de silicio en los compósitos: mejorar la resistencia al desgaste.

Al obtener compósitos aluminio - carburo de silicio mediante pulvimetalurgia, se presenta una distribución homogénea de las partículas de carburo de silicio en el aluminio, sin presentarse problemas de incorporación de partículas a la matriz.

Al agregar las partículas de carburo de silicio al aluminio, la porosidad del compuesto disminuye debido a que las partículas de carburo, al tener un tamaño menor que el aluminio, ocupan los huecos que quedan entre las partículas de aluminio.

La microporosidad que presentan las piezas está distribuida en forma homogénea, y solo se aprecia a grandes aumentos (400 X).

Podemos concluir que es posible obtener un compuesto aluminio - carburo de silicio por la vía de pulvimetalurgia, y las propiedades que presenta son superiores a las del aluminio en polvo, obteniéndose los mejores resultados para las probetas que contienen un 15% de carburo de silicio.

BIBLIOGRAFIA

1. Lenel F. V., Powder Metallurgy: principles and applications, Library of Congress, 1980.
2. Hausner Henry H. and Mal Kumar, Handbook of Powder Metallurgy, second edition, Chemical Publishing Co., 1982.
3. Henderson Robert, Powder Metallurgy in Europe and the European automotive industry, of Progress in Powder Metallurgy, vol. 19, Metal Powder Industries Federation, 1963.
4. Hausner Henry H. and Kempton H. Roll, Forging of Powder Metallurgy preforms, vol. 6, Metal Powder Industries Federation, New York, 1973.
5. Bradburg Samuel, Source book on Powder Metallurgy, A.S.M., U.S.A., 1979.
6. Froes F. H. and Smugeresky John, Powder Metallurgy of Titanium alloys, The Metallurgical Society of AIME, 1980.
7. Becerril Ortega Benito, Aspectos generales de la Metalurgia de Polvos, tesis U.N.A.M. Facultad de Química, Mexico, 1978.
8. Ortega Rodriguez Arturo, Metalurgia de polvos del cobre, bronce, latón y aluminio, tesis U.N.A.M. Facultad de Química, México, 1986.
9. Aguilar Ortiz Julio A., Obtención de un composito de matriz de aluminio con carburo de silicio por medio de rotación del molde durante la solidificación, tesis U.N.A.M. Facultad de Química, México, 1990.

10. A.S.M., Metals Handbook, vol. 8, Mechanical Testing, 9th. edition, U.S.A., 1984.
11. A.S.M., Metals Handbook, vol. 7, Powder Metallurgy, 9th. edition, U.S.A., 1984.
12. Mondolfo L. F., Aluminum alloys: structure and properties, 1st. edition, The Butter Worth Group, England, 1976.
13. Harris S. J., Cast metal matrix composites, of Materials Science and Technology, March 1988, vol. 4, pag. 231.
14. Pradeep Rohatgi, Cast Metal-Matrix Composites. of Metals Handbook, vol. 15, Casting, 1984, pag. 840.
15. Stacey M. H., Production and characterisation of fibers for metal matrix composites, of Materials Science and Technology, March 1988, vol 4, pag. 227.