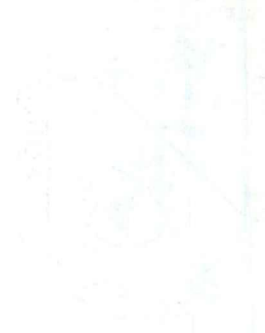


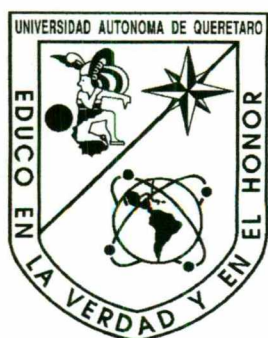
No. Adq. J50845

No. Titulo _____

Clas. 671.87

M 5381





UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE QUERÉTARO

FACULTAD DE QUÍMICA

**“INFLUENCIA DE LA ADICIÓN DE Al_2O_3 SOBRE LA
RESISTENCIA AL DESGASTE DE UNA ALEACIÓN
EUTÉCTICA Al-Si PROCESADA MEDIANTE
METALURGIA DE POLVOS”**

TESIS

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE

INGENIERO QUÍMICO METALÚRGICO

PRESENTA

LILIANA MÉNDEZ GONZÁLEZ

DIRIGIDA POR

Dr. J.D. OSCAR BARCEINAS SÁNCHEZ

SANTIAGO DE QUERÉTARO, QUERÉTARO, 2007.



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE QUERÉTARO

FACULTAD DE QUÍMICA

**“INFLUENCIA DE LA ADICIÓN DE Al_2O_3 SOBRE LA
RESISTENCIA AL DESGASTE DE UNA ALEACIÓN
EUTÉCTICA Al-Si PROCESADA MEDIANTE
METALURGIA DE POLVOS”**

TESIS

**QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE
INGENIERO QUÍMICO METALÚRGICO**

PRESENTA

LILIANA MÉNDEZ GONZÁLEZ

DIRIGIDA POR

Dr. J. D. OSCAR BARCEINAS SÁNCHEZ

SINODALES

Dr. J. D. OSCAR BARCEINAS SÁNCHEZ
DIRECTOR

Dr. J. DE JESUS CORONEL HERNÁNDEZ
SINODAL

Dr. GERARDO TORRES CAMACHO
SINODAL

M. C. J. ANTONIO UGALDE ZEPEDA
SINODAL

ÍNDICE GENERAL

Contenido	Página
ÍNDICE GENERAL	i
ÍNDICE DE FIGURAS	iv
ÍNDICE DE CUADROS	vi

RESUMEN

I. INTRODUCCIÓN	1
II. ANTECEDENTES	2
II.1 Compósitos	2
II.1.1 Técnicas de mezclado	4
II.1.2 Proporción de polvos	7
II.1.3 Tipos de lubricantes	9
II.2 Forma y tamaño del refuerzo	10
II.2.1 Fabricación de los polvos	12
II.2.2 Propiedades físicas	15
II.2.3 Precauciones	17
II.3 Compactación	19
II.3.1 Compactación en tibio	21
II.3.2 Plasticidad del Aluminio y sus aleaciones	22
II.3.3 Proporción de polvos	23
II.3.4 Presión	23
II.4 Sinterización	24
II.4.1 Estados de la sinterización	25
II.4.2 Sinterización multicomponente	27
II.4.3 Efecto de la atmósfera	28
II.4.4 Temperatura y tiempo	29
II.4.5 Velocidad de calentamiento	30
II.4.6 Cambios dimensionales	31
II.5 Propiedades físicas y mecánicas	32

II.5.1 Porosidad	32
II.5.2 Dureza y microdureza	34
II.5.3 Desgaste	35
II.5.3.1 Tipos de desgaste	36
II.5.3.2 Desgaste de superficies lubricadas	42
III. HIPÓTESIS	43
IV. OBJETIVOS	44
IV.1 General	44
IV.2 Específicos	44
V. METODOLOGÍA	45
V.1 Materiales	45
V.1.1 Polvos	45
V.1.2 Equipo	45
V.1.3 Gases	45
V.2 Métodos	46
V.2.1 Caracterización de los polvos	46
V.2.2 Preparación de las mezclas	47
V.2.3 Compactación	48
V.2.4 Caracterización de los compactados	49
V.2.5 Sinterización	49
V.2.6 Caracterización de los sinterizados	51
V.2.7 Ensayos de desgaste	52
V.2.8 Medición de microdureza de los sinterizados	54
V.3 Diseño experimental	55
VI. RESULTADOS	57
VI.1 Fluidéz	57
VI.2 Densidad aparente	58
VI.3 Caracterización de las muestras en verde y sinterizadas	59
VI.4 Desgaste	62

VII. DISCUSIÓN	63
VII. Fluidez	63
VII. Densidad aparente	63
VII. Caracterización de las muestras en verde	64
VII. Desgaste	64
VIII. CONCLUSIONES	65
IX. BIBLIOGRAFÍA	66

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura	Página
1 Sistemas de mezcladores	6
2 Esquema de los procesos de atomización	13
3 Varias formas de partículas y sus métodos de manufactura	14
4 Formas comunes de partícula como se presenta en ISO 3252	15
5 Diagrama de fases aluminio-silicio	18
6 Densificación durante la compactación mediante el cambio en la forma y el arreglo de las partículas	20
7 Los tres estados de sinterización	25
8 Posible mecanismo de sinterización en un área de cuello	26
9 Geometrías empleadas en pruebas de desgaste deslizante	38
10 Ilustración de las diferencias entre (a) abrasión entre dos cuerpos, (b) entre tres cuerpos, (c) erosión	39
11 Desgaste abrasivo por un indicador cónico	40
12 Aparato de Hall utilizado para la medición de fluidez y densidad	46
13 Mezclador de doble cono	47
14 Balanza analítica	47
15 Prensa utilizada para la etapa de compactación	48
16 Molde, punzones y accesorios utilizados durante la compactación en tibio	48
17 Programa LabVIEW 5.1	49
18 Horno tubular	49
19 Arreglo de entrada y salida de gas N ₂ hacia el interior del horno	50

20	Ciclo térmico de la sinterización mostrando las velocidades de calentamiento y enfriamiento, así como la etapa de deslubricación.	50
21	Controlador de temperatura	51
22	Tribómetro: accesorios, y durante un ensayo	52
23	Esquema de un ensayo de desgaste	53
24	Equipo para la preparación de probetas	54
25	Microdurómetro	54
26	Influencia del tipo de lubricante y porcentaje de alúmina agregado sobre la fluidez	57
27	Influencia del tipo de lubricante y porcentaje de alúmina agregado sobre la densidad aparente	58
28	Comparativo entre diferentes tratamientos de sinterización	62
19	sobre la dureza Vickers	

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro	Página
1 Propiedades físicas típicas de polvos de aluminio atomizados	17
2 Diseño experimental para la mezcla 1	55
3 Diseño experimental para la mezcla 2	56
4 Diseño experimental para la mezcla 3	56
5 Fluidez (s/50 g de muestra) de las mezclas con estearato de zinc como lubricante	57
6 Fluidez (s/50 g de muestra) de las mezclas con Acrawax como lubricante	57
7 Densidad aparente de las mezclas con estearato de zinc como lubricante	58
8 Densidad aparente de las mezclas con Acrawax como lubricante	58
9 Propiedades en verde y sinterizados de muestras obtenidas a partir de la mezcla 1	59
10 Propiedades en verde y sinterizados de muestras obtenidas a partir de la mezcla 2	60
11 Propiedades en verde y sinterizados de muestras obtenidas a partir de la mezcla 3	61
12 Tasas de desgaste obtenidas para los distintos tratamientos hechos	62

RESUMEN

La creciente necesidad de incorporar materiales ligeros a la industria automotriz, ha hecho que se investigue el uso de materiales compósitos en sustitución parcial o total de los materiales convencionales. Las investigaciones sobre este tema llevan ya casi tres décadas, los resultados encontrados hasta ahora solo satisfacen parte de los objetivos que se pretenden alcanzar. El propósito de este trabajo fue conocer el comportamiento de una aleación eutéctica aluminio-silicio con respecto a sus propiedades tribológicas, la aleación fue procesada mediante metalurgia de polvos, dándole al presente estudio un mayor interés, dado que dicha técnica es todavía poco utilizada. Cada uno de los tratamientos que se dieron al compósito formado por la aleación eutéctica aluminio-silicio y la partícula de refuerzo, tuvieron como finalidad encontrar las condiciones óptimas para obtener un buen sinterizado. La elección de las temperaturas límite de sinterización fue fundamental en este proyecto, ya que no se trabajó con metales puros como suele hacerse comúnmente en metalurgia de polvos, sino con una aleación eutéctica; de aquí que la elección de temperaturas se basa en el eutéctico que forma el aluminio y el silicio. La evaluación de cada uno de los tratamientos aplicados se basó fundamentalmente en los ensayos tribológicos para lo cual se aplicó la técnica "pin on disc". Finalmente se encontraron tres tratamientos que aportaron buenos resultados a las piezas a las cuales se aplican; T-9, T-10 y T-11 asimismo, se concluye que la concentración óptima de partícula de refuerzo está alrededor de 7.5%, ya que es la que aporta mayor resistencia al desgaste para este compósito.

I INTRODUCCIÓN

En los años recientes, la necesidad de obtener piezas de mejores características físicas ha llevado a la industria y a los centros de investigación a cubrir nuevos métodos de fabricación para sus productos y desarrollos tales como la metalurgia de polvos. Asimismo se han desarrollado desde hace tres décadas una serie de materiales compuestos que pretenden satisfacer las necesidades actuales de la industria. Una de las áreas que más interesa es aquella relacionada con el desgaste durante el funcionamiento de las piezas, debido a la pérdida de dimensiones por este fenómeno.

Es precisamente la industria automotriz una de las más interesadas en encontrar una solución a este problema, ya que además de la necesidad de tener materiales resistentes también se requiere que éstos tengan entre sus propiedades, ser ligeros; pues actualmente se requiere que el peso total de las piezas automotrices disminuya y esto derive en un mejor aprovechamiento de la energía que se consume.

Es por lo anterior que se ha estudiado el efecto de varios refuerzos a aleaciones de aluminio pretendiendo que la combinación de una serie de factores de proceso dé como resultado un material ligero pero resistente, entre otras cosas al desgaste.

Es bien conocido que grandes porcentajes de silicio tienden a endurecer las aleaciones de aluminio, partiendo de este conocimiento, se pretende encontrar dentro de este tipo de aleaciones, que reforzadas con alúmina, presente buenas características tanto en el estado de compactado (en "verde") como en el de sinterizado.

II ANTECEDENTES

II.1 COMPÓSITOS

Los compósitos pueden definirse como materiales multifase, cuyas fases simples a menudo, pertenecen a diferentes grupos de materiales, llámense metales, cerámicos o polímeros (ASM, 1993).

De las distintas combinaciones entre los grupos se obtienen:

- “Cermets”: vocablo en inglés para designar a los compósitos de matriz metálica y refuerzo cerámico (MMCs). El componente más duro del compósito es generalmente el cerámico. Son fabricados principalmente por mezclado de los componentes, compactación y consolidación. La fase dominante en porcentaje de volumen actúa como matriz, la otra se conoce como fase dispersa.
- Metales reforzados con fibras y hojuelas: la extensa aplicación de los refuerzos a metales, aleaciones y polímeros entre otros; ha hecho posible la penetración al campo de la pulvimetalurgia de “hojuelas ó flakes” así como de fibras cortas o continuas siendo las más utilizadas las de SiC, C o Al₂O₃. Su aceptación se debe a las propiedades que confieren como refuerzo ya que presentan gran resistencia y un tamaño muy pequeño. Para el caso particular del SiC llega a ser preferido el trabajar con “hojuelas” o fibras a otras partículas, ya que se alcanzan niveles de resistencia similares, sin embargo el costo hace que la elección de partículas de refuerzo se inclinen hacia las primeras (Thümmeler y Oberacker, 1993).
- Otros: los compósitos, principalmente basados en Cu, bronce o Fe con varias cantidades de componentes no metálicos, son usados como materiales tribológicos (fricción y antifricción). La mayoría de las

composiciones usadas son manufacturadas por metalurgia de polvos convencional. Los compósitos que contiene grafito y óxidos sirven en una amplia variedad de aplicaciones como materiales de fricción de alto rendimiento para frenos y embragues de vehículos pesados, excavadores, equipo militar, aeroplanos y otros. El contenido de estos metales (Cu, Fe, etc.) está alrededor de 85%, de grafito hasta un 20% y de óxidos tales como Al_2O_3 y SiO_2 abajo del 10%. Compósitos similares, pero sin aditivos de óxidos minerales, son usados como material antifricción, conteniendo lubricantes sólidos o líquidos. Grafito, politetrafluoretileno, MoS_2 o Pb son utilizados como lubricantes sólidos en cojinetes bajo condiciones de servicio en seco hasta un volumen de 50%.

Las ventajas de los materiales compósitos sobre los metales o los plásticos convencionales vienen de la capacidad de aportar una variedad de características mecánicas y físicas, en una misma dirección o no; en un solo material. Esto es logrado por una serie de pasos que se describen a continuación:

1. Selección y diseño de las combinaciones de refuerzos y del material de la matriz. Desde el punto de vista del refuerzo, partículas más finas tienden a producir propiedades mejoradas pero son más caras y se dificulta su incorporación por proceso de mezclado (Hunt, 1998).
2. Combinación del refuerzo y la matriz para alcanzar la distribución deseada.
3. Consolidación, vinculación, o fundición para combinar los componentes.
4. Proceso secundario, tales como acabado o rectificado.

Las propiedades de aleaciones de aluminio por metalurgia de polvos son atractivas para aplicaciones automotrices como pistones, barras conectoras, trazadores de líneas del cilindro y rotores de compresores (Hummert y col., 1998).

Desde 1950 cuando se incrementó el desarrollo de materiales compósitos se han hecho trabajos sobre la influencia del material de refuerzo agregado haciendo de este tema uno de los más estudiados, y no es para menos, ya que la proporción en la que se encuentren con respecto a la matriz determinará la interacción con ésta y por lo tanto, las propiedades que de ello resulten. La fabricación de compósitos mediante la metalurgia de polvos es un área ampliamente desarrollada para el caso de materiales féreos, sin embargo para otros ámbitos como es el caso de partes sinterizadas de aluminio, el conocimiento de este tópico tiene todavía muchas oportunidades de investigación.

Para el caso de un compósito de matriz metálica de aluminio o alguna de sus aleaciones, el refuerzo consiste en adiciones metálicas ó cerámicas; los refuerzos pueden ser continuos o discontinuos en la matriz. Los refuerzos en una matriz de aluminio incluyen grafito, SiC, boro y Al_2O_3 . Las propiedades mecánicas son dependientes de la cantidad, tamaño, forma y distribución de las fases dispersas (refuerzos), aparte de las propiedades mecánicas del material matriz (Apelian y Saha, 2000).

II.1.1 Técnicas de mezclado

Puede definirse al mezclado como la distribución de partículas de polvo de diferentes composiciones, puede ser descrita como un cambio no estacionario de concentración de los componentes a lo largo de las coordenadas locales. El cambio de la concentración se presenta por un transporte convectivo o dispersivo de las partículas. La dispersión óptima, la cual puede ser esperada de un proceso de mezclado, es una distribución al azar de los diferentes tipos de partículas (Thümmler y Oberacker, 1993).

El extenso uso de mezclas de polvos en comparación con los polvos pre-aleados se atribuye a factores técnicos y económicos: las mezclas de polvos a menudo son

menos caras, tienen mejores propiedades de compactación y algunas veces permiten tiempos de sinterización más cortos.

Muchas propiedades de los polvos y partes sinterizadas, tales como la fluidez del polvo, la densidad aparente, cambio dimensional y resistencia mecánica son totalmente sensibles a los cambios pequeños de la distribución del tamaño de partícula y a las fluctuaciones de las concentraciones de los componentes dentro de la mezcla del polvo.

La mayoría de los tipos de equipos mezcladores alcanzan su más alto grado de distribución de partícula más rápidamente cuando se reparten con materiales secos de libre flujo. Es prudente determinar el tiempo mínimo necesario de proceso para alcanzar el resultado deseado.

El control sobre el tiempo de mezclado llega a ser más importante cuando se usa una velocidad más alta en los dispositivos de mezclado, en los cuales la fragmentación de la partícula puede introducir severos cambios en el comportamiento de la partícula y una tendencia hacia la segregación.

Hay un acuerdo general en la literatura de que las razones primarias para que se presente la segregación son las diferentes velocidades de flujo causadas por las propiedades de los polvos, o los gradientes de velocidad creados por mezclado, manejo, transporte o movimiento de los materiales.

Algunos de las variables que afectan la fluidez, y por lo tanto la segregación son (ASM, 1993):

- forma de la partícula, tamaño y distribución de tamaño
- rugosidad de la superficie

- dureza de la superficie
- densidad de la partícula
- densidad del material
- volumen de la carga
- relación de los componentes
- fenómenos electrostáticos
- condiciones de flujo de masa

Equipo muy variado está disponible para el mezclado de los polvos. Algunos ejemplos están esquematizados en la Figura 1.

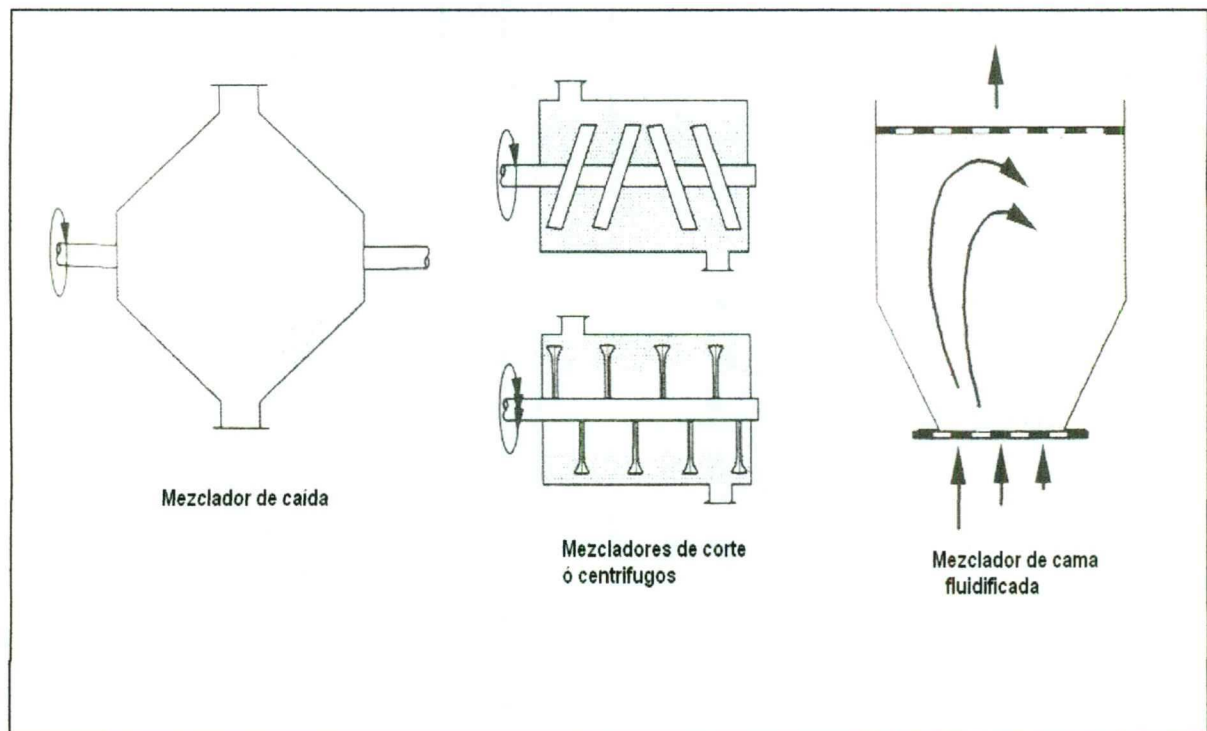


Figura 1. Sistemas de mezcladores (ASM, 1993)

Los mezcladores de caída utilizan la fuerza gravitacional para producir el movimiento de las partículas. Los mezcladores- agitadores por esquileo usan paletas u otros componentes de movimiento en un contenedor estacionario para esquilar el polvo a granel. Los mezcladores centrífugos tienen un diseño similar, pero operan en el rango de velocidades rotacionales, en las cuales el movimiento de partículas es controlado principalmente por la fuerza centrífuga. En los mezcladores de cama fluidificada, el polvo toma el carácter de un líquido y la contribución de convección y difusión del movimiento de la partícula y el mezclado se incrementa comparado con los métodos anteriores (Thümmeler y Oberacker, 1993).

Un mezclador adecuado para polvos metálicos debe (ASM, 1993):

- alcanzar un mezclado máximo en un mínimo de tiempo
- tener una acción de mezclado apacible para evitar la degradación de la partícula.
- Proveer la repetibilidad del mezclado
- Proveer por completo una descarga a granel
- Proveer accesibilidad para una limpieza fácil
- Tener bajo consumo de energía
- Requerir bajo mantenimiento

Finalmente cabe señalar, que la forma de la partícula también importa, es más fácil mezclar polvos de metal que presentan partículas esféricas que con partículas irregulares (Rosas y col., 1998).

II.1.2 Proporción de polvos

La proporción en la que se encuentre con respecto a la matriz determinará la interacción con ésta y por lo tanto las propiedades que de ella resulten.

Cuando hablamos de aluminio y sus aleaciones se tiene que los refuerzos más estudiados son el carburo de silicio y la alúmina en distintos tamaños y formas; y es que se busca un material ligero, propiedad que confiere el aluminio, y sin embargo se necesitan ciertas propiedades específicas muy altas, las cuales pueden ser proporcionadas por los materiales de adición.

T. N. Baker, por ejemplo, ha encontrado que se puede reforzar una aleación de aluminio 6061 con hasta 20 % SiC obteniéndose un material compuesto bien consolidado con poca porosidad (Baker y col., 1996).

T. Das también reporta una adición de 20% de SiC y Al_2O_3 como partículas de refuerzo a una aleación de aluminio 6061, sin embargo debido a la cantidad y el tipo de refuerzos provocan un comportamiento de envejecimiento por deformación (Das y col., 2002).

V. Amigó y col. procesaron compósitos mediante pulvimetalurgia con un porcentaje de refuerzo que va desde 0-15% encontrando que las propiedades finales tienen una estrecha relación con la distribución de las partículas, según sus resultados se obtuvo que alrededor de 5% de refuerzo se tiene una distribución de partículas óptima, y aumentando este porcentaje se tiende a tener una aglomeración que debilita las propiedades mecánicas finales (Amigó y col., 2000).

Como se puede ver la variación de porcentaje de refuerzo dependerá de los objetivos que se tengan contemplados, debido a que no se garantiza con un solo contenido de dichas partículas el obtener cada una de las propiedades físicas o mecánicas en su mejor resultado, además de las repercusiones económicas que tenga el emplear un porcentaje bajo o alto de refuerzo.

II.1.3 Tipos de lubricantes

Durante su procesado, los polvos metálicos o mezclas de estos tienen que ser manipulados, transportados y llenar los moldes en donde usualmente serán compactados en frío o en caliente. Los polvos deben ser adecuados para esas operaciones, las características mencionadas proveen la base para las propiedades deseadas en verde de los componentes finales sinterizados. Para esta función se requiere de aditivos que están presentes temporalmente en algunos pasos del proceso y son removidos en las etapas finales de éste. Dichos aditivos tienen la función de mantener unidas a las partículas, de lubricar y en algunos casos plastificar.

Los lubricantes facilitan el movimiento de las partículas bajo fuerzas aplicadas externamente reduciendo las fuerzas de fricción entre las partículas y los moldes o entre sí mismas (Thümmler y Oberacker, 1993). En la mayoría de las aplicaciones de pulvimetalurgia, el lubricante es premezclado directamente con el metal en polvo. Ácido esteárico, estearato de zinc, estearato de litio, y ceras sintéticas como el Acrawax; son los lubricantes más populares.

La cantidad de lubricante agregado depende de muchos factores, incluyendo composición del polvo metálico, tipo de herramental, densidad de compactado, y complejidad de la parte. Las cantidades generalmente varían de 0.5 a 1.5% (ASM, 1993), aunque generalmente se utiliza el 1%.

M. Gagne y col. utilizaron estearato de Litio y cera de Etilenbistereamida con polvos de Fe como lubricantes para analizar la influencia de la temperatura de compactación en la distribución de éstos; tomando en cuenta que la transición sólido-líquido se daba a temperaturas diferentes, siendo ésta de 230°C para el estearato de litio y de 145°C para la cera de Etilenbistereamida; encontrando que

las diferencias físicas, químicas y reológicas entre ellos afectaban directamente a la porosidad de las muestras sinterizadas (Gagné y col., 1998).

II.2 FORMA Y TAMAÑO DEL REFUERZO

El uso extenso de una variedad de aleaciones en el ámbito de la pulvimetalurgia, hace necesario tener un conocimiento previo acerca de las propiedades más representativas que tienen éstos, ya que la manipulación correcta de esta información eleva la probabilidad de obtener resultados favorables.

La forma y el tamaño tanto del elemento matriz como del elemento refuerzo son dos características importantes a considerar cuando se desarrolla un compuesto, ya que de ellos dependen muchas de las propiedades mecánicas que se pretenden obtener, de hecho la forma de la partícula es el factor más importante que contribuye a la resistencia en verde (ASM, 1993). Típicamente, los polvos utilizados en la fabricación de compósitos de matriz metálica con refuerzos discontinuos tienen un tamaño de 15 μm , nominalmente -325 mallas (Rack, 1991).

Sin embargo, la elección del refuerzo no es arbitraria como la lista de compósitos puede sugerir, pues es dictada por muchos factores:

1. La aplicación: si el compuesto es usado en aplicaciones estructurales, el módulo elástico, la resistencia y la densidad del compuesto serán importantes. La forma de la partícula puede ser importante, donde partículas angulares pueden actuar como cultivadores de esfuerzos locales, reduciendo la ductibilidad. Si el compuesto es usado en aplicaciones de manejo térmico, el coeficiente de expansión térmica y la conductividad térmica son importantes.

2. El método de manufactura del compuesto: como se considera en la siguiente sección, hay dos métodos genéricos para la manufactura de compósitos, metalurgia de polvos y métodos que involucran metal fundido. En el caso de metalurgia de polvos, el polvo de la aleación matriz es mezclado con partículas del refuerzo para alcanzar una mezcla homogénea. Para alcanzar esto, los tamaños de los polvos del metal y el cerámico necesitan ser cuidadosamente escogidos para no dejar aglomerados después de mezclar y acarrearlos al producto final. En el proceso de metalurgia de polvos, las partículas de cerámicos frágiles también son susceptibles de fractura, lo cual es determinante. Típicamente, el tamaño de partícula de polvo de aluminio atomizado esta en el rango de 20-40 μm , y los tamaños de partículas de refuerzos son de 3-20 μm con cocientes de aspecto de $< 5:1$.
3. Costo. Una razón mayor para el uso de partículas es para reducir el costo del compuesto, así que el refuerzo tiene que estar fácilmente disponible en las cantidades, tamaño y forma requerida a bajo costo.

Con estas condiciones en mente, los dos refuerzos que reciben mayor atención son SiC y Al_2O_3 (Lloyd, 1994).

En los siguientes apartados se hace una breve descripción de su obtención, propiedades así como de su manipulación; tres aspectos que ayudan a entender, desarrollar y comprender el comportamiento de los polvos, y en este caso particular; el del refuerzo.

II.2.1 Fabricación de los polvos

Existen actualmente técnicas variadas de producción de polvos para pulvimetalurgia, debido a la diferencia entre procesos los polvos obtenidos presentan diferentes características y por lo tanto sus usos son distintos.

Las técnicas pueden dividirse en dos grandes ramas: procesos mecánicos y procesos químicos. Los primeros abarcan producción de polvos por aleación mecánica y la atomización, los segundos contienen procesos como la reducción y oxidación, precipitación de una solución, descomposición térmica y otros métodos.

La técnica de atomización es la más difundida, la cual puede ser definida simplemente como el rompimiento de un líquido en finas gotitas típicamente más pequeñas que 150 μm (ASM, 1993). El proceso generalmente consiste en tres etapas: 1) fundición, 2) atomización (desintegración del fundido en gotitas) y 3) solidificación y enfriamiento.

De las distintas técnicas de atomización, son dos las más conocidas con líquidos (generalmente agua) y atomización con gas (Figura 2). De la primera se obtienen polvos totalmente irregulares y tiene un alto contenido de oxígeno superficial.

Los polvos atomizados por gas, por otro lado, generalmente son más esféricos o redondeados en forma y, si fueron atomizados por un gas inerte, generalmente tienen un más bajo contenido de oxígeno (óxido), los gases más utilizados para este propósito son aire, nitrógeno, argón o helio (Thümmeler y Oberacker, 1993).

Hay por supuesto, sus excepciones en cada tipo. Para un alto volumen, bajo costo de producción, la atomización con agua es preferida sobre la atomización con gas (ASM, 1993).

En muchos casos, un proceso adicional llega a ser necesario para que los polvos logren sus propiedades deseadas, por ejemplo, la reducción de óxidos superficiales, desgasificado, clasificación de tamaños, etc.

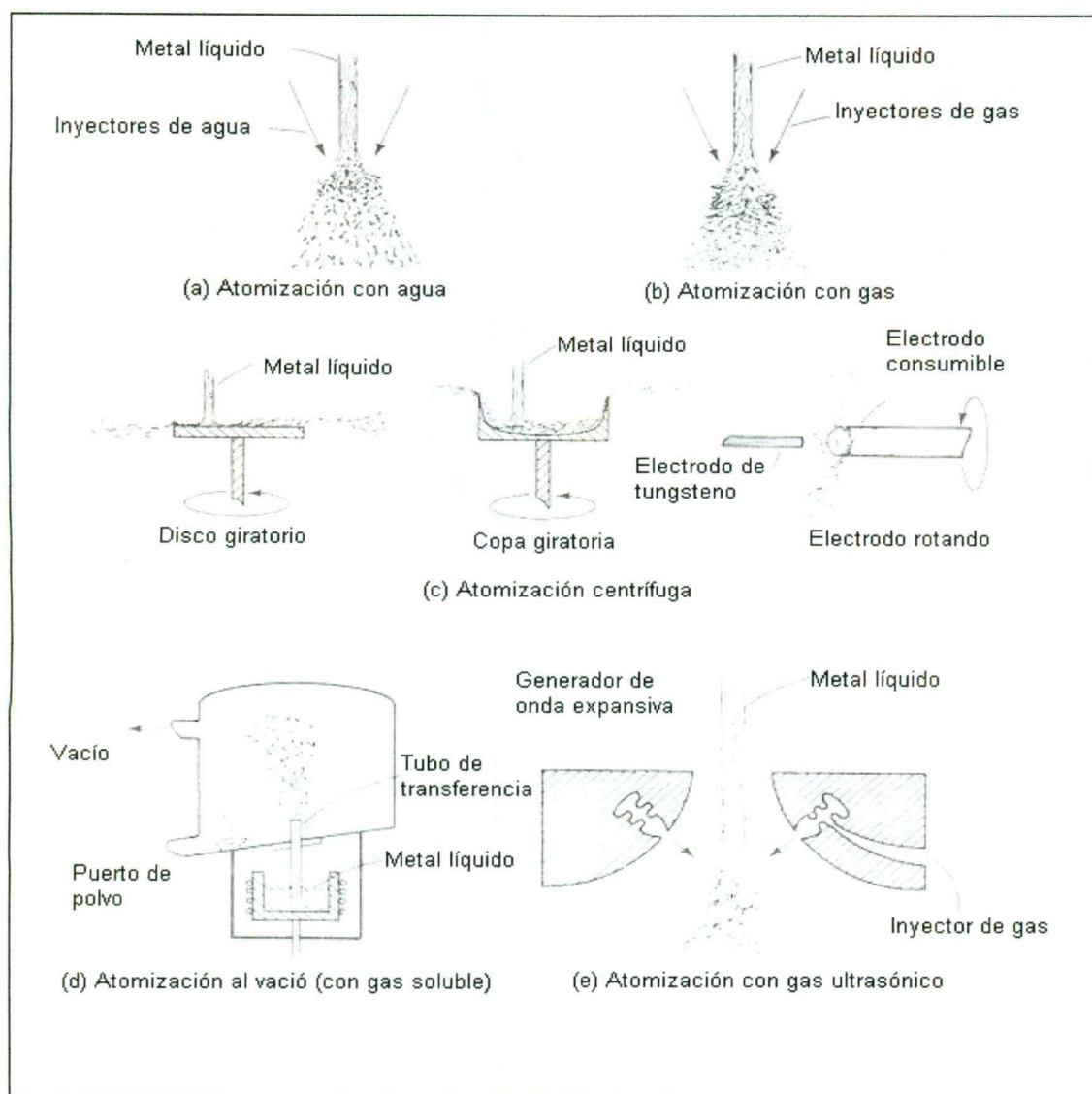


Figura 2. Esquema de los procesos de atomización. (ASM,1993)

En muchos casos, un proceso adicional llega a ser necesario para que los polvos logren sus propiedades deseadas, por ejemplo, la reducción de óxidos superficiales, desgasificado, clasificación de tamaños, etc.

La atomización con aire es todavía usada en la producción de aluminio y aleaciones de aluminio, cobre y sus aleaciones, metales preciosos, polvos de latón y plomo (Thümmeler y Oberacker, 1993).

Dentro de los procesos químicos para la producción de polvos encontramos la reducción de óxidos, la precipitación de soluciones o de un gas, la descomposición térmica, fragilidad química y la descomposición de hidruros entre otros. Los procesos más ampliamente utilizados son los primeros tres mencionados, por ejemplo la producción de polvos de hierro, cobre, tungsteno y molibdeno a partir de sus respectivos óxidos son procesos comerciales establecidos; así como la precipitación de una solución es el medio por el cual se obtienen polvos de cobre, níquel y cobalto a partir de sus sales disueltas (ASM, 1993).

Hasta la fecha, el acercamiento más común a describir y distinguir las formas de las partículas, ha sido el uso de conceptos cualitativos. Los conceptos fundamentales que han sido usados son: (1) la dimensionalidad de la partícula y (2) el contorno de la superficie de la partícula.

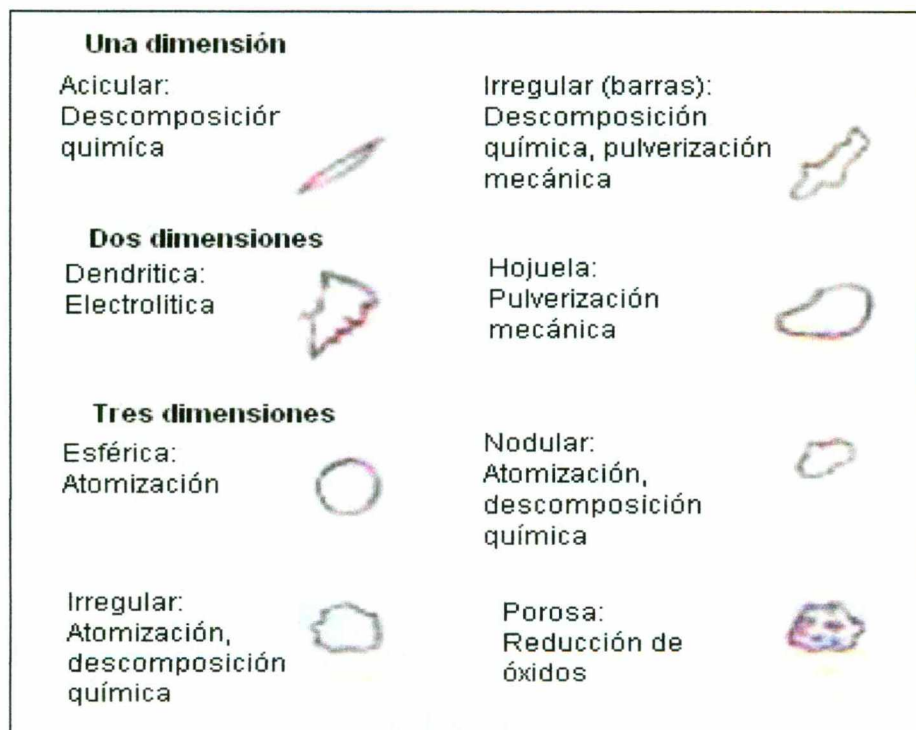


Figura 3. Varias formas de partículas de polvo y sus métodos de manufactura. (ASM, 1993)

Usando estos conceptos, un sistema modelo de caracterización de forma es presentado en la Figura 3. En la Figura 4 se presentan fotomicrografías de muchos tipos de polvos descritos por la Organización Internacional de Estándares, en el estándar ISO 3252 (ASM, 1993).

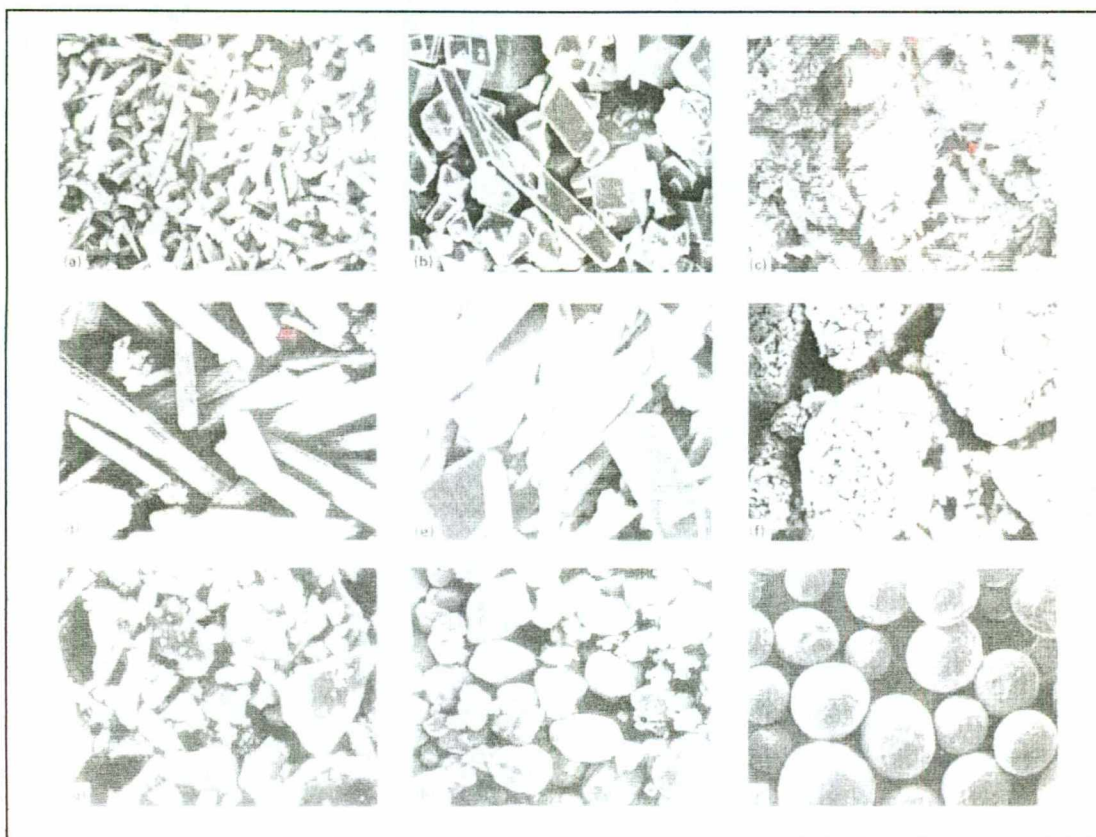


Figura 4. Formas comunes de partícula como se representa en ISO 3252. (a) partículas de polvo aciculares. (b) de polvo angulares. (c) de polvo dendríticas. (d) de polvo en fibra. (e) de polvo en hojuelas. (f) de polvo granulares. (g) de polvo irregulares. (h) de polvo nodulares. (i) de polvo esferoidales. (ASM, 1993)

II.2.2 Propiedades físicas

Los polvos producidos tienen que satisfacer los requerimientos de los usuarios, de ahí, que se utilicen distintos procesos para su fabricación y, por lo tanto, se

obtengan diferentes formas y tamaños, de estas dos características dependen algunas de las propiedades físicas de los polvos.

Los polvos usados para prensado uniaxial convencional tienen que satisfacer ciertos requerimientos (Delarbre y Krehl, 2000). Algunos de estos requerimientos son:

- fluidez
- compresibilidad
- densidad aparente
- bajo contenido de óxido
- fricción reducida entre el polvo y el dado por aplicación de un lubricante ambientalmente no reprobable (por ejemplo cera).
- Cambio dimensional controlado durante la sinterización.

Se reconoce que el polvo de aluminio tiene una pobre fluidez, en parte debido a su baja densidad.

La distribución del tamaño de partículas tiene un importante impacto sobre la fluidez de los polvos. Aunque los polvos finos están a favor de un número de aplicaciones, las partículas más gruesas son preferidas generalmente por una razón de manejo (Lefebvre y col., 2000).

Por modificación de los parámetros de proceso, la distribución de tamaños de partícula de los polvos atomizados puede ser ajustada a un rango de productos de granulos de aluminio (típicamente +200 mallas) a polvos finos atomizados (Hasta un 99% -325 mallas).

Las propiedades físicas típicas de polvos de aluminio atomizados se muestran en el Cuadro 1. La densidad real de polvos de aluminio se aproxima a la del metal base,

la densidad aparente varía como función de la distribución del tamaño de partícula (ASM, 1993).

La densidad permite la distinción entre materiales diferentes y la determinación de la porosidad cerrada de una parte sinterizada, por lo tanto es un parámetro importante a medir.

Cuadro 1. Propiedades físicas típicas de polvos de aluminio atomizados.

Las propiedades físicas típicas de los polvos de aluminio son:	
Densidad	2.7 g/cm ³ (metal)
Punto de fusión	660 °C (1220 °F)
Punto de ebullición	2430 °C (4410 °F)
Tensión superficial a 800°C(1470°F)	865 dinas/cm
Densidad aparente	0.8 a 1.3 g/cm ³
Densidad con golpes	1.2 a 1.5 g/cm ³
Punto de fusión del óxido	2045 °C (3720 °F)
Contenido de Al ₂ O ₃	0.1 a 1.0 % en peso total

Ya en los compósitos es importante resaltar esta propiedad como una de las que más influencia tienen en el desempeño de una pieza determinada. Se ha encontrado que por ejemplo, la densidad decreció con el incremento de las cantidades de SiC a un polvo de Aluminio puro y el decremento del tamaño de las partículas del SiC, utilizadas en este experimento; derivan resistencias a la compresión altas (Campbell y col., 1998).

Para este proyecto en particular es relevante conocer el eutéctico Al-Si que se muestra en la Figura 5.

II.2.3 Precauciones

La naturaleza de los polvos puros y aleados en pulvimetalurgia hace indispensable tener un conocimiento así como una aplicación de las normas de seguridad. Todas las partículas comparten muchas características físicas que afectan su comportamiento en la atmósfera.

Los factores más importantes que afectan sus propiedades, son el método de manufactura, el grado de pureza química, el tamaño de partícula, el área superficial y la densidad aparente (ASM, 1993).

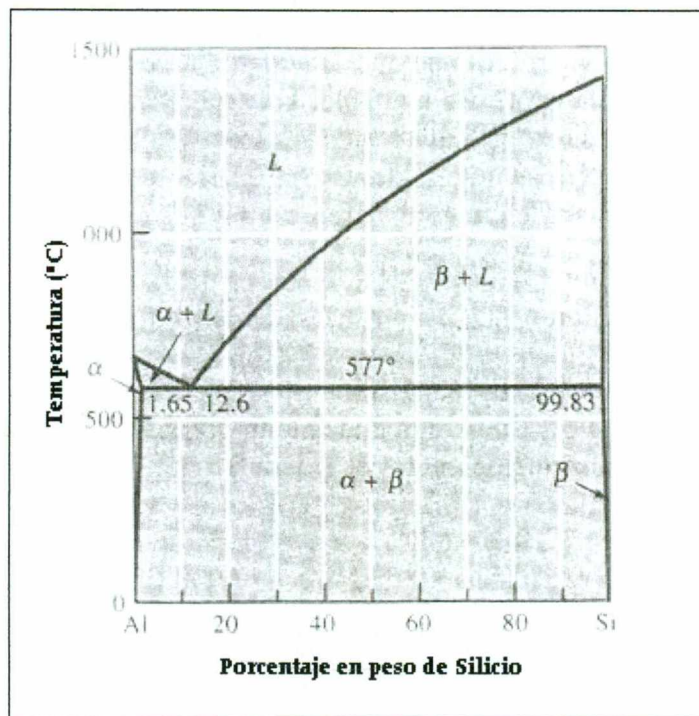


Figura 5. Diagrama de fases Al-Si (Azkelan, 2003)

El aluminio reacciona fácilmente con la humedad o con el oxígeno libre en el aire durante su fabricación para formar un recubrimiento de óxido en la superficie del polvo (ASM, 1993). Esta capa de óxido le confiere al polvo una estabilidad en el aire. Sin embargo un tamaño pequeño de partícula hace al polvo más reactivo y

con la posibilidad de ignición si es que se encuentra una chispa en los alrededores donde se manipula, incluso si se deja al aire libre, por ejemplo, Ni en polvo.

Es altamente recomendable evitar nubes de polvo cuando se maneja aluminio o cualquiera de sus aleaciones; si se mezcla en seco con algún otro componente debe cuidarse de no tener una fricción mayor para lo cual puede utilizarse un mezclador cónico. Debe evitarse también las fuentes de ignición en los alrededores de los polvos; delimitar el área de trabajo para evitar algún accidente. Como precaución extra puede tenerse disponible un extinguidor o arena seca para sofocar cualquier ignición.

Es recomendable tener en cuenta cada una de estas precauciones para el mejor manejo de polvo de aluminio o de sus aleaciones y primordialmente para salvaguardar la seguridad de quien lo manipula.

II.3 COMPACTACIÓN

Se tiene entendido como compactación a la consolidación de las partículas de polvo obteniéndose una forma y densidad deseada. Algunos procesos varían o combinan las operaciones de conformado con el paso de sinterizado.

Las operaciones de preformado con presión asistida pueden ser subdivididas en métodos de compactación en caliente y en frío. Desde el punto de vista de los materiales, la compactación en frío toma lugar en un rango de temperatura dentro de la cual los mecanismos de deformación a alta temperatura como la dislocación o la fluencia lenta por difusión pueden ser despreciados. En casos más prácticos, la compactación en frío ocurre a temperatura ambiente, mientras la compactación en caliente es llevada a cabo a temperaturas altas, cercanas a las de fusión según el metal del que se trate. Para materiales de bajo punto de fusión como el plomo, sin

embargo, la compactación en caliente se lleva a cabo a temperatura ambiente (Thümmeler y Oberacker, 1993).

Al final de la operación de compactado se requiere que la pieza tenga una densidad de entre 85-90% de la densidad teórica. Este nivel de densidad está más allá de la densidad aparente de los polvos, la cual es modificada después de que el polvo ha llenado la cavidad para ser prensado Figura 6.

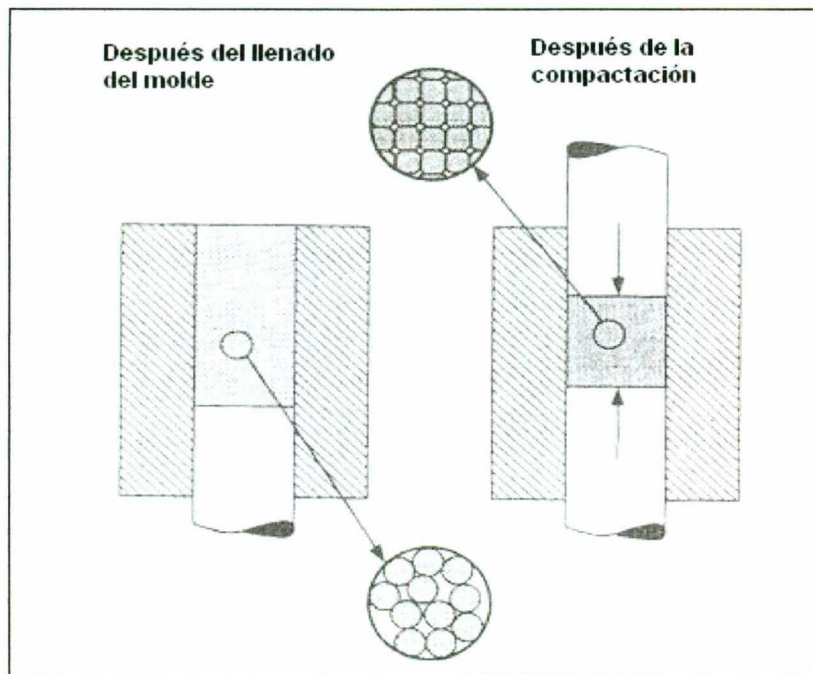


Figura 6. Densificación durante la compactación mediante el cambio en la forma y el arreglo de las partículas. (ASM, 1993)

Los procesos principales mediante los cuales los polvos son compactados por la aplicación de una fuerza exterior son:

- Prensado de polvos en moldes rígidos
- Prensado isostático de polvos en moldes flexibles
- Compactación con rodillos en hoja o tira.

- Extrusión de productos de polvo metálico.

La compactación en moldes rígidos o isostáticamente ha sido descrita cuantitativamente por Seeling y Wulff, quienes postularon tres estados. En el primer estado, las partículas de polvo son apilados o reacomodados de tal manera que haya uniones entre ellos, lo cual siempre ocurre en un arreglo aleatorio. El segundo estado involucra deformación elástica y plástica de las partículas. La cantidad de deformación depende de la ductibilidad del material en polvo. La deformación es más extensa en un polvo de material dúctil que en un polvo de cerámico frágil, incluso en los polvos integrados por el mismo metal dúctil, la compresibilidad, o la densidad obtenible en un compactado en verde con una presión dada, puede variar considerablemente.

En el tercer estado, las partículas de polvo, las cuales son inherentemente frágiles, como polvos cerámicos, o han sido fragilizados por endurecimiento por trabajado, se fracturan bajo la carga aplicada y forma pequeños fragmentos. Estos tres estados generalmente se traslapan (ASM, 1993).

La operación de compactación requiere de prensas mecánicas o hidráulicas. La compactación en las prensas mecánicas siempre es controlada por la longitud de la parte a compactar. Las variaciones en la densidad de llenado resultan en variaciones de presión de compactación y la densidad del compactado (Thümmeler y Oberacker, 1993).

II.3.1 Compactación en tibio

Al inicio de los años ochentas se empezaron a realizar pequeños experimentos en Nuova Merisinter con lo que ahora se conoce como compactado en tibio, se buscaba entonces como ahora, mejorar las propiedades de los compactados

“verdes”, enfocándose en la densidad. La mayoría de los materiales ensayados hasta ahora son polvos de Fe o de alguna de sus aleaciones (Bocchini, 1999).

Se han realizado experimentos calentando el polvo ó el molde y a veces ambos, hasta una temperatura de 100°C mostraron que había una mejora en la compresibilidad, a partir de estos buenos resultados surgieron nuevas interrogantes sobre el compactado en tibio, que hasta la fecha sigue siendo un campo de oportunidades en cuanto a investigación se refiere.

La compactación en tibio es una técnica que utiliza temperaturas moderadas, usualmente en el rango de 90 a 150 °C (Chagnon y St-Lauren, 2000).

Los efectos positivos del calentamiento sobre la respuesta de los metales y aleaciones a la deformación plástica, son bien conocidos desde tiempos antiguos sobre todo en los procesos de conformado. La tasa de resistencia a la tensión se ve reducida mientras la temperatura se incrementa. Es observado que a 150°C la resistencia a la tensión de los materiales no excede el 65% de la misma a temperatura ambiente (Bocchini, 1999).

II.3.2 Plasticidad del Aluminio y sus aleaciones

Los materiales granulados finos son más favorables para las operaciones en donde se requiere una alta plasticidad.

Las variaciones del comportamiento súper-plástico de un compuesto de matriz de aluminio según R.S. Mishra son (Mishra y col., 1995):

- (a) Super-plasticidad ha sido observada a muy altas velocidades de deformación (entre 10^{-1} y 10 s^{-1});

- (b) un incremento en el exponente de esfuerzo aparente es usualmente observado con el decremento de la velocidad de deformación, nuevamente sugiriendo una presencia de esfuerzo de umbral y,
- (c) alguna de las temperaturas de prueba sobre 770 K a las cuales la superplasticidad ha sido observada que puede estar arriba de la temperatura de sólidos.

II.3.3 Proporción de polvos

La proporción de los polvos a compactar es un factor importante, considerando que la distribución de tamaños de partícula para el caso del aluminio y sus aleaciones, indican que las propiedades de compresibilidad de los polvos dependen principalmente de la variedad de tamaños presentes en la mezcla ya que su efecto en la densidad de briquetas es considerable, alcanzándose densificaciones de hasta un 97% respecto a la densidad teórica (Rosas y col, 1998).

En relación a la proporción que deben de guardar los polvos, las aleaciones Al-Si para los procesos convencionales de pulvimetalurgia típicamente contienen 15 % en peso aproximadamente de Si (aleaciones hipereutécticas). A más alto y uniforme contenido de Si las propiedades técnicas, entre otras el flujo y la densidad aparente del polvo, se ven reducidas y por lo tanto los polvos con contenido de Si más alto que 18% en peso no tienen un uso difundido (Delarbre, 2000).

II.3.4 Presión

Cuando se incrementa la presión aplicada, la densidad de la masa del polvo se incrementa, o la porosidad decrece. La relación entre la presión aplicada y la densidad o porosidad ha sido estudiada por muchos investigadores quienes han procurado establecer relaciones matemáticas entre la presión y la densidad relativa. En muchos de los trabajos anteriores sobre estas relaciones, los polvos fueron compactados en moldes rígidos. Este método de compactación es uno de

la matriz sólida, una densificación lenta adicional puede ocurrir, especialmente en microestructuras de granos muy finos (Thümmler y Oberacker, 1993).

II.4.2 Sinterización multicomponente

La sinterización de mezclas de polvos puede ocurrir con o sin la presencia de una fase líquida, y durante el estado sólido de la sinterización, con o sin solubilidad de los componentes.

La condición común es el decremento de las energías superficiales totales (γ) en el sistema. En una mezcla binaria (componente A y componente B), tres tipos de contactos de partículas, principalmente A-A, B-B y A-B están presentes, con la energía interfacial γ_{AB} . Cuando en un sistema mutuamente insoluble

$$\gamma_{AB} > \gamma_A + \gamma_B$$

Entonces la no sinterización de los contactos A-B toma lugar, aunque los contactos A-A, y B-B pueden sinterizar. La condición para la sinterización de los contactos A-B es

$$\gamma_{AB} < \gamma_A + \gamma_B$$

Cuando

$$\gamma_{AB} < \left| \gamma_A + \gamma_B \right|$$

la sinterización completa es posible termodinámicamente. En sistemas insolubles el estado de equilibrio es aquél en el que el componente con más baja γ cubra al otro componente. La energía interfacial controla el proceso en todos los casos con o sin la formación de fases líquidas.

La probabilidad de sinterización de mezclas de polvos, especialmente en el estado sólido, está generalmente influenciada por la generación de esfuerzos de sinterizado, resultando de diferentes fuentes principalmente (Thümmeler y Oberacker, 1993):

1. Anisotropía por expansión térmica de fases no cúbicas.
2. Sinterizado no homogéneo resultante de un rango largo o corto de gradientes de densidad en la mezcla (causado por compactación o aglomerados).
3. Expansión térmica al mismo tiempo de las fases.
4. Sinterización diferencial causada por la no homogeneidad de la mezcla.

II.4.3 Efecto de la atmósfera

Las funciones de la atmósfera de sinterización pueden enunciarse como sigue:

1. Evitar o controlar las reacciones químicas que pudieran presentarse tales como la oxidación, reducción, carburización, decarburización, nitruración, y descomposición entre otras. El evitar la oxidación de las piezas podría decirse que es su principal función, ya que la mayoría de los metales la sufren a elevadas temperaturas.
2. Evitar la evaporación indeseada del componente principal o de alguno de los componentes de compactado.
3. Remover mezclas volátiles y productos de descomposición de los lubricantes utilizados para mezclar y compactar.
4. Proveer una transferencia de calor uniforme en el interior del horno de sinterizado.

La atmósfera de sinterización debe ser compatible con el material del cual está construido el horno. El quemado de aglutinantes o lubricantes es a veces un paso por separado. Los gases puros (H_2 , N_2 y Ar) son atmósferas utilizadas para aplicaciones especiales. Dichos gases están disponibles con una pureza de hasta 99.999%.

El nitrógeno de bajo punto de rocío es usado para sinterizar aluminio y sus aleaciones, siendo completamente inerte a estas aleaciones donde no se requiere potencial de reducción. Lefebvre, utiliza una atmósfera 100% N_2 para la etapa de deslubricación y sinterización de una aleación 6061 de Aluminio, al igual Shaffer, quien sinterizó una aleación Al-Cu-Mg-Si y Liu (Lefebvre y col., 2000).

II.4.4 Temperatura y tiempo

Estas dos variables son parte fundamental del proceso de sinterización, puede lograrse que el aumento de una u otra; o alguna combinación entre ellas se obtengan mejores resultados en cuanto a la consolidación de las partículas presentes en la mezcla.

La temperatura de sinterización es uno de los parámetros fundamentales para la metalurgia de polvos, está debajo de la temperatura del punto de fusión del polvo del metal o la temperatura del solidus de una aleación del polvo homogénea. Generalmente se toma como rango de 0.7-0.9 de la temperatura de fusión del componente de mayor proporción en la mezcla.

Con la energía proporcionada por la temperatura más la influencia del tiempo de sinterizado, se logra que las partículas se unan reduciéndose la porosidad que había entre ellas.

Teóricamente, las propiedades de resistencia son determinadas contando el endurecimiento debido al crecimiento de los cuellos entre las partículas durante la

sinterización y el ablandamiento debido al incremento de temperatura (Zhen y Kang, 1997).

No podemos desligar la interacción que existe entre la temperatura y el tiempo de sinterizado; ambos factores dependen de la naturaleza de los polvos que forman la mezcla, existe una combinación óptima entre ellos a la cual siempre se pretende llegar ya que la localización de este punto conlleva a un ahorro de energía y por lo tanto de costos durante el proceso.

La temperatura es la variable que va a proporcionar a las partículas, la energía necesaria para que se efectúen los fenómenos de superficie que sean necesarios y que determinarán la unión entre las partículas tanto de la matriz como las de refuerzo, en tanto que el tiempo es necesario para que esa energía cause efecto en las partículas, dependiendo del material del cual se trate habrá o no una necesidad de aumentar o no el tiempo durante la sinterización (Olevsky y col., 2000). Se demuestra en un estudio que incrementando la temperatura de 975 °C a 1050° C ó incrementando el tiempo de sinterización de 30 a 60 min mejora las propiedades de resistencia a la ruptura transversal (TSR). Y es que es lógico pensar en una mejora de propiedades finales del material en cuanto mayor unión haya entre sus partículas (Liu y col., 2000).

II.4.5 Velocidad de calentamiento

Generalmente para los procesos de sinterización se contemplan velocidades de calentamiento bajas de 3°C-10°C/min, ya que ésta depende de tres factores principalmente: la temperatura, el coeficiente de transferencia de calor y el tamaño de las partículas.

Velocidades bajas de calentamiento, garantizan que se obtengan piezas con consolidación mayor sus partículas mayor y por lo tanto un menor porcentaje de porosidades, lo cual al final deriva en mejores propiedades mecánicas.

En cuanto a las velocidades de calentamiento más utilizadas, están aquellas que son bajas por ejemplo Liu y col. utilizan una velocidad de calentamiento de 5 grados por minuto hasta $600\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$ para sinterizar durante una hora, seguidos por un enfriamiento a aproximadamente 5 grados por minuto a temperatura ambiente para obtener un compuesto Aluminio-SiC (Liu y col.,2000).

Smith utiliza una velocidad de calentamiento de $3^{\circ}\text{C}/\text{min}$ antes de la de-lubricación y $10^{\circ}\text{C}/\text{min}$ después de la de-lubricación (Smith y Aziz, 1994).

En general se pide que las velocidades de calentamiento, ya sea divididas por etapas, sean bajas, menores a $20^{\circ}\text{C}/\text{min}$.

II.4.6 Cambios dimensionales

Un cambio dimensional es determinado como la diferencia en dimensiones entre los compactados en "verde" y "sinterizados", paralelos y perpendiculares a la dirección de presión y son expresados en porciento de las dimensiones en "verde".

Cuando compactados de polvo metálico de una fase simple son sinterizados, usualmente se contraen y la densidad se incrementa. Otro factor que afecta la contracción es el tamaño de partícula del polvo.

II.5 PROPIEDADES FÍSICAS Y MECÁNICAS

Las propiedades mecánicas describen la forma en que el material responde a una fuerza aplicada, incluyen resistencia, rigidez, ductilidad. Sin embargo, a menudo se está interesado en la manera en que se comporta un material al ser expuesto a un golpe repentino e intenso (impacto), sometido a la aplicación de cargas cíclicas en el tiempo (fatiga), expuesto a altas temperaturas (termofluencia) o sujeto a condiciones abrasivas (desgaste). Las propiedades mecánicas también determinan la facilidad con la cual se puede deformar un material para llegar a una forma útil. A menudo cambios estructurales pequeños tiene un efecto profundo sobre las propiedades mecánicas.

Las propiedades físicas, que incluyen el comportamiento eléctrico, magnético, óptico, térmico, elástico y químico dependen tanto de la estructura como del procesamiento de un material. Incluso minúsculas modificaciones de la estructura causan cambios profundos en la conductividad eléctrica de muchos materiales semiconductores, por ejemplo, temperaturas de fusión altas pueden reducir de manera importante las características de aislamiento térmico de los ladrillos cerámicos (Askeland, 2003).

En la metalurgia de polvos se presenta un caso especial, la mayoría de los productos manufacturados por esta vía están caracterizados por su porosidad. La consolidación completa es alcanzada solamente en casos especiales, por lo tanto esta característica toma una importancia relevante al influir de manera considerable sobre las propiedades mecánicas de dichos productos.

II.5.1 Porosidad

La porosidad es la cantidad de poros (vacíos) expresada como un porcentaje del volumen total de una parte de metalurgia de polvos (ASM, 1993). Los poros pueden ser divididos en cerrados e interconectados.

La porosidad total puede ser medida por simple geometría mediante la determinación de la masa y las dimensiones. Generalmente es obtenida midiendo la densidad aparente (ρ_s) del compactado y del sinterizado mediante el principio de Arquímedes pesando la muestra en aire y subsecuentemente en un líquido (agua). Es simple:

$$\rho_s = \frac{m}{V} = \frac{m}{m_a - m_w} \cdot \rho_w$$

donde m = masa y V = volumen de la muestra seca; ρ_w = densidad del agua a su temperatura correspondiente, m_a y m_w son la masa pesando en aire y en agua, respectivamente, con los poros totalmente sellados en la superficie. Cualquier intrusión de agua en la porosidad causa error en la medición.

La porosidad total (P_t) en % es:

$$P_t(\%) = \frac{\rho_{th} - \rho_s}{\rho_{th}} \times 100$$

Siendo ρ_{th} la densidad del material libre de poros. El porcentaje de densidad teórica es:

$$TD[\%] = \frac{\rho_s}{\rho_{th}} \times 100 = 100 - P_t [\%]$$

El porcentaje de porosidad abierta (interconectada) (P_o) está definido como:

$$P_o [\%] = \frac{V_{P_o}}{V} \times 100$$

Para esta medición la masa de la muestra completamente infiltrada por el líquido tiene que ser considerada:

$$P_o [\%] = \frac{(m_i - m)}{(m_a - m_w)} \rho_w \times 100$$

Cuando se trata de porosidad interconectada podemos utilizar el método de porosimetría de mercurio. El mercurio es presionado para que entre en los poros del sólido y el volumen introducido es medido como función de la presión aplicada. Esto es aplicable en un rango de diámetro de alrededor de 100 a 0.003 μm a una presión máxima de 4000 bar. El método es usado en metalurgia de polvos y cerámicos así como para muchos otros materiales porosos. El fondo teórico es la ecuación de Washburn,

$$r(p) = \frac{2\gamma \cdot \cos\theta}{p}$$

Dando la relación entre el radio de los poros r (que se toma como circular) siendo solamente penetrado a una presión dada $p \cdot \gamma =$ tensión superficial del mercurio ($\gamma = 480 \text{ MN m}^{-1}$) y θ es el ángulo de contacto entre el mercurio y el material a ser analizado. El mercurio no moja a la mayoría de los materiales (θ entre 90 y 180°), lo cual es una condición para la aplicación de este método (Thümmeler y Oberacker, 1993).

II.5.2 Dureza y microdureza

Los índices de dureza se utilizan principalmente como base de comparación de materiales: de sus especificaciones para la manufactura y tratamiento térmico, para el control de calidad y para efectuar correlaciones con otras propiedades de los mismos.

Los ensayos microVickers (HV) y Knoop (HK) son pruebas de microdureza; producen penetraciones tan pequeñas que se requiere de un microscopio para obtener su medición.

La dureza se relaciona con la buena resistencia al desgaste. Un material que se utiliza para fragmentar o para moler mineral debe ser muy duro para asegurarse de que no se desgastará o sufrirá abrasión debido a los duros materiales que maneja. De una manera similar, los dientes de los engranes en la transmisión o en el sistema impulsor de un vehículo deberán ser lo suficientemente duros para que no se desgasten.

Generalmente se encuentra que los materiales poliméricos son excepcionalmente blandos, los metales son de una dureza intermedia y los cerámicos son excepcionalmente duros (Askelan, 2003).

II.5.3 Desgaste.

El desgaste es definido como "la pérdida progresiva de sustancia de una superficie en funcionamiento de un cuerpo que ocurre como resultado del movimiento relativo de la superficie (Arnell y col., 1991). Probablemente sea el problema de desgaste junto con el de corrosión, uno de los principales causantes de pérdidas de piezas en funcionamiento, y es que finalmente se pierden las dimensiones necesarias para el trabajado adecuado. Y aunque la importancia del conocimiento de los mecanismos de desgaste es demasiada, su estudio se complica dado que no es posible predecir con exactitud la manera en que se llevará a cabo; ya que las condiciones se particularizan para cada caso, sin embargo se trata de que el desgaste que se presente, lo cual no se puede evitar, sea el menos posible; de aquí la importancia de escoger bien el par de materiales que estará en contacto.

Para este proyecto en particular se parte de la base de que las aleaciones Al-Si con menos del 15% de Si muestran ventajas sobre las aleaciones con Mg, Cu y Zn ya que presentan mejor resistencia al desgaste y no necesitan ser envejecidas para alcanzar una resistencia mecánica alta (Delarbre, 2000).

II.5.3.1 Tipos de desgaste

Se puede dividir a los procesos de desgaste en dos principales tipos. Mecánicos y químicos.

Los procesos mecánicos pueden dividirse de la siguiente manera:

- Desgaste adhesivo: Cuando dos superficies se cargan una contra la otra, pueden adherirse en el área de contacto verdadera para formar uniones de fricción, y para que estas uniones puedan romperse debe existir un deslizamiento relativo. El rompimiento ocurrirá en la parte más débil de la unión, es decir puede presentarse en la intercara original o en el más débil de los dos materiales, este proceso puede ser cíclico, dependiendo de las condiciones en donde se presente, dando origen al desgaste.

Para el entendimiento de la contribución de la adhesión a la fricción es útil describir la adhesión de dos sólidos colocados en contacto estático, en donde se involucran las energías interfaciales de ambos materiales. La energía libre superficial de un sólido es definida como la energía reversible termodinámicamente involucrada en la creación de una unidad de área de una nueva superficie. Similarmente, si dos superficies se tienen en contacto, la energía libre interfacial es definida como la energía reversible termodinámicamente involucrada en crea una unidad de área de intercara. Así, si tomamos dos superficies que tienen energías superficiales γ_1 y γ_2 y se colocan en contacto, para formar una intercara con energía interfacial $\gamma_{1,2}$, entonces la energía liberada es

$$\Delta\gamma = \gamma_1 + \gamma_2 - \gamma_{1,2}$$

Esta cantidad se conoce como el trabajo termodinámico de la adhesión, en un principio, una cantidad semejante de trabajo que se necesita para separar los cuerpos.

Aunque la ecuación ha sido aplicada exitosamente para líquidos, es bien conocido que no puede ser aplicada precisamente a sólidos idealmente elásticos o frágiles. Para sólidos de otros tipos, la energía calculada por la ecuación anterior es únicamente una pequeña fracción de la energía que realmente se requiere para separar las superficies (Arnell y col., 1991).

Siguiendo el modelo de Archard obtenemos tres leyes para el desgaste adhesivo:

1. El volumen del material desgastado es proporcional a la distancia de deslizamiento.
2. El volumen de material desgastado es proporcional a la carga.
3. El volumen de material desgastado es inversamente proporcional a la dureza del material más suave.

Archard asumió que un área de contacto comprende un número de lugares de contacto con radio a . El área de cada lugar de contacto es πa^2 y asumiendo deformación plástica de un material ideal elástico-plástico cada contacto soporta una carga de $\pi a^2 H$, donde H es la presión de trabajo ó la dureza. La superficie opuesta pasará sobre la aspereza en una distancia de deslizamiento de $2a$ y se asume que el desgaste producido por cada aspereza es hemisférico en forma y volumen de $2\pi a^3/3$. Entonces el volumen de desgaste δQ producido por una aspereza en contacto con una distancia de deslizamiento dada está dado por

$$\delta Q = (2\pi a^3 / 3) / 2a = \pi a^2 / 3$$

Y el volumen total desgastado Q , por unidad de distancia de deslizamiento es $Q = n\pi a^2/3$, donde n es el total de numero de contactos. Dado que cada contacto soporta una carga de $\pi a^2 H$, la carga total sea $W = n\pi a^2 H$, y $n\pi a^2 = W/H$, por lo tanto tenemos que (Arnell y col., 1991):

$$Q = W / 3H$$

En la Figura 9 se muestra algunos de los métodos empleados para ensayos de desgaste para este tipo de desgaste.

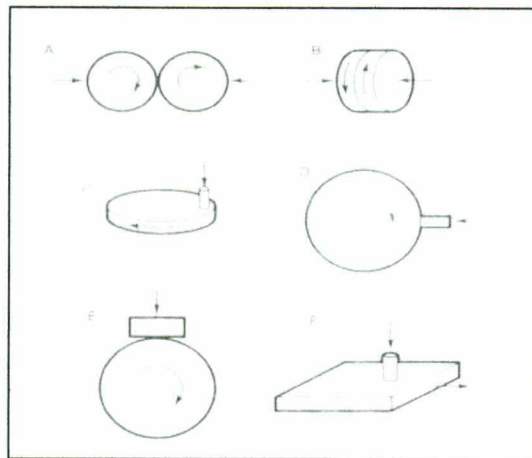


Figura 9. Geometrías empleadas en pruebas de desgaste deslizante (Hutchings, 1992).

- Desgaste abrasivo: Cuando se habla que material ha sido removido o desplazado de una superficie por partículas duras o por protuberancias muy duras sobre una superficie, debido a un movimiento forzado y deslizando a lo largo de la superficie, se dice entonces que un desgaste abrasivo tiene lugar.

Una distinción es a menudo hecha entre el desgaste abrasivo entre dos cuerpos, y el desgaste abrasivo entre tres cuerpos (Figura 10) El desgaste abrasivo es causado por protuberancias sobre una superficie, mientras que en el desgaste entre tres cuerpos ocurre cuando partículas muy duras están

libres y ruedan o se deslizan entre dos, quizás no similares, superficies deslizantes (Hutchings, 1992).

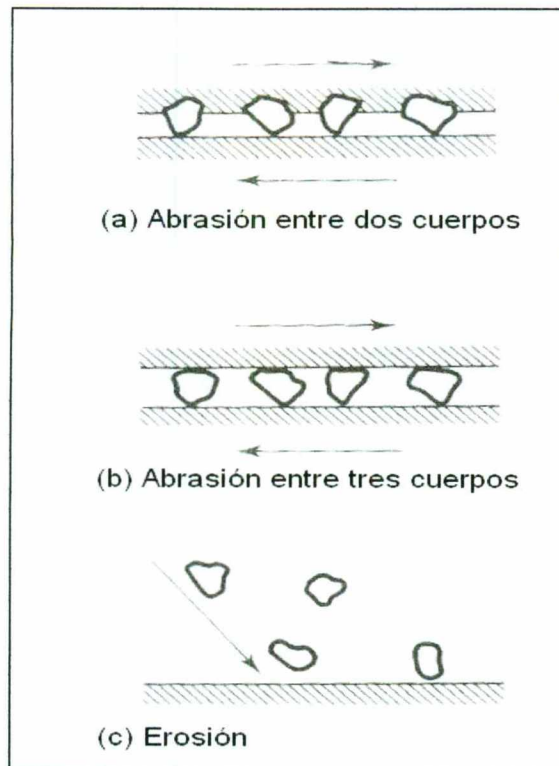


Figura 10. Ilustración de las diferencias entre (a) abrasión entre dos cuerpos, (b) abrasión entre tres cuerpos y (c) erosión (Hutchings, 1992).

En algunas ocasiones, el desgaste es causado por partículas duras golpeando la superficie, éstas acarreadas por vapor o gas o arrastradas por el flujo de un líquido. Este tipo de desgaste es llamado erosión (Figura 10 c).

Inicialmente podemos obtener una expresión para la velocidad de desgaste abrasivo asumiendo un modelo simplificado en el cual una partícula abrasiva tiene una forma cónica, definida por un ángulo θ , como se muestra en la Figura 11, y la superficie más suave desgastada es plana, en dicha Figura muestra una partícula simple abrasiva arando una pista a través de la superficie más suave que al atravesar una unidad de distancia desplaza a un volumen de material $v = r*d$. Pero

$d = r \cdot \tan \theta$; por lo tanto, $v = r^2 \cdot \tan \theta$. Por simplicidad, asumimos que el material más suave ha rendido bajo una carga normal únicamente y por lo tanto las partículas abrasivas transmiten la carga normal de $\pi r^2 H/2$, donde H es la dureza del material más suave.

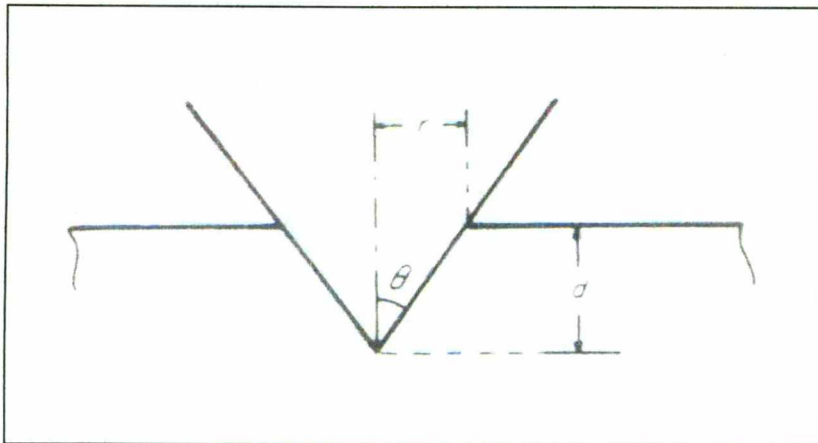


Figura 11. Desgaste abrasivo por un indicador cónico. (Arnell y col., 1991)

Así, si hay n contactos, la carga normal total W , esta dada por $W = n \pi^2 H/2$, y el volumen total de material desplazado en una unidad de distancia deslizante es Q , donde $Q = nr^2 \cdot \tan \theta$.

Eliminando n ,

$$Q = 2W \tan \theta / \pi H$$

Al igual que con el desgaste adhesivo, es encontrado que no todas las partículas transversales producen pérdidas de ruinas de desgaste, así que la ecuación es modificada a:

$$Q = k \cdot (\tan \theta / \pi) \cdot W / H$$

Donde k es la proporción de eventos en los cuales realmente resultan en la formación de partículas de desgaste, o

$$Q = K \cdot W / H$$

Donde $k = k \tan \theta / \pi$ (Arnell y col., 1991).

- Desgaste por fatiga: Este fenómeno puede ser un importante fenómeno en dos escalas: microscópico y macroscópico. El desgaste por fatiga macroscópica ocurre en superficies cargadas que no se conforman, tales como aquella encontradas en los contactos de rolado, mientras que la fatiga microscópica ocurre en los contactos entre asperezas deslizantes.

- Desgaste por delaminación: esta teoría involucra consideraciones detalladas de interacciones de dislocaciones sub-superficiales. Las bases físicas de esta teoría pueden resumirse de la siguiente manera:
 1. Cuando dos superficies deslizantes interactúan, las asperezas sobre la superficie más suave son aplanadas por un carga plástica repetida, hasta que la condición de deslizamiento corresponda a la del más duro, la superficie rugosa deslizándose contra una superficie más suave plana aproximadamente. Así, en cada punto de la superficie más suave hay una carga cortante cíclica sub-superficial repetida.
 2. Mientras este ciclo continúa, vacíos y fracturas son nucleados debajo de la superficie, la nucleación de fracturas en la superficie llega a ser prevenido por el esfuerzo compresivo triaxial el cual existe inmediatamente bajo la superficie.
 3. Además el ciclo causa que estos vacíos y fracturas se conecten, para formar grandes fracturas en una distancia constante aproximadamente debajo de la superficie.
 4. Cuando las fracturas alcanzan alguna longitud crítica, la situación de la tensión en la extremidad de la grieta causa el rompimiento a través de la superficie libre, resultando en la formación de placas delgadas como partículas de desgaste las cuales son a menudo observada en la práctica (Arnell y col., 1991).

II.5.3.2 Desgaste de superficies lubricadas

El desgaste es invariablemente reducido si las superficies pueden ser lubricadas continuamente con un aceite adecuado (Arnell y col., 1991). En un sistema lubricado, la relación λ entre el espesor de la capa lubricante y la raíz cuadrada de la altura de la aspereza determina el régimen de lubricación (Hutchings, 1992).

Los fluidos lubricantes tienen tres efectos importantes en la reducción de la fricción y el desgaste de las superficies deslizantes:

- (1) Proveen una capa de fuerza cortante baja entre las superficies, así mitiga los efectos de la adhesión. Este efecto es particularmente marcado, en las fronteras de los lubricantes o aditivos están presentes en el lubricante.
- (2) Enfrían las superficies, reduciendo la entrada de energía de fricción y removiendo el calor, reduciendo así los efectos térmicos tales como el ablandamiento superficial.
- (3) En sistemas con recirculación se acarrearán productos de desgaste desde la intercara, así se previene la abrasión de tres cuerpos de la superficie por ruinas endurecidas u oxidadas (Arnell y col., 1991).

Ortiz y col., encontraron que el principal tipo de desgaste entre una matriz de aluminio y el anillo de acero cromado es el desgaste cohesivo cristalino y que las presiones mínimas para la existencia del desgaste adhesivo disminuyen cuando la fricción no elimina el calor interfacial generado, como ocurre en el desgaste sin lubricación (Ortiz y col, 2000).

III HIPÓTESIS

La adición de alúmina (Al_2O_3) como partícula de refuerzo, a un polvo de la aleación eutéctica Aluminio-Silicio para obtener una mezcla en particular, elevará sus propiedades mecánicas, entre las que se encuentra la resistencia al desgaste.

IV OBJETIVOS

IV.1 General

- Obtener un compuesto mediante la variación de la proporción de la mezcla de la aleación eutéctica Aluminio-Silicio y partículas de alúmina (Al_2O_3), que proporcione la mayor resistencia al desgaste

IV.2 Específicos

- Desarrollar la técnica más adecuada para obtener mediante la metalurgia de polvos, piezas con ciertas características físicas y mecánicas de este compuesto en particular.
- Cuantificar el porcentaje de porosidad de las piezas en verde y sinterizadas.
- Determinar la tasa de desgaste

V METODOLOGÍA

V.1 Materiales

V.1.1 Polvos

- Polvo S-20 de Valimet, Inc. © (aleación eutéctica de Aluminio-Silicio).
- Polvo de alúmina (malla -325).
- Polvo de Estearato de Zinc (lubricante).
- Polvo Acrawax (lubricante).

V.1.2 Equipo

- Juego de tamices mallas 80, 100, 200, 250 y 325.
- Mezclador de doble cono
- Bolas de zirconio
- Prensa mecánica
- Molde y punzones para prensado
- Balanza analítica
- Vernier digital
- Espátulas
- Cronómetro
- Horno tubular para sinterizado
- Tubos cerámicos para horno tubular
- Regulador de temperatura
- Cortadora
- Pulidora
- Montadora de probetas
- Microscopio óptico
- Difractómetro de rayos X

V.1.3 Gases

- Tanque de N₂, 99.99% de pureza

V.2 Métodos

V.2.1 Caracterización de los Polvos.

Para la caracterización de los polvos se utilizaron las normas referidas en el Standard Test Methods for Metal Powders and Powder Metallurgy Products publicado por Metal Powder Industries Federation.

La fluidez de los polvos de aleación Al-Si y de cada una de las mezclas siguiendo estándar MPIF 04 " Determination of flow rate of free-flowing metal powders using the Hall apparatus" , (Figura 12).

Se determinó también la densidad aparente del polvo virgen, así como de cada una de las mezclas siguiendo estándar MPIF 03 "Determination of apparent density of free-flowing metal powders using the Hall apparatus".



Figura 12. Aparato de Hall utilizado para la medición de fluidez y densidad aparente de polvos.

V.2.2 Preparación de las mezclas

Utilizando el mezclador de doble cono (Figura 13), y las bolas de zirconia, se prepararon las mezclas de Polvo S-20 de Valimet, Inc. © con el polvo de alúmina, y el respectivo lubricante utilizando un tiempo de mezclado de 45 minutos. El peso de cada la mezcla fue de 300 g (Figura 14) . Dichas mezclas se guardaron en contenedores de plástico de capacidad de 500 ml.



Figura 13. Mezclador de doble cono.



Figura14. Balanza analítica.

V.2.3 Compactación

Se determinó que la presión de compactación óptima para este compósito era de 200 MPa, una vez hecho esto se procedió a compactar muestras de 10.00 g de forma cilíndrica de alrededor de 6.5 mm de espesor con la ayuda de la prensa hidráulica (Figura 15). Lo anterior se logró colocando el polvo en el molde que ya contenía al punzón inferior y colocando el superior (Figura16), al final del vaciado de la mezcla, se centró perfectamente para que el pistón de la prensa aplicará la presión correspondiente; la presión de compactación pudo ser verificada con la ayuda del programa Lab View 5.1 (Figura 17), instalado a la prensa.



Figura 15. Prensa utilizada para la etapa de compactación.



Figura 16. Molde, punzones y accesorios utilizados durante la compactación en tibio.



Figura 17. Programa LabVIEW 5.1

V.2.4 Caracterización de los compactados.

Se pesaron las muestras con la ayuda de una balanza analítica y se midieron las dimensiones con un vernier digital, es decir, diámetro y altura; esto con la finalidad de calcular su volumen y por consiguiente su densidad, parámetros que ayudaron a cuantificar matemáticamente el porcentaje de porosidad que presentan las piezas en verde.

V.2.5 Sinterización

Para sinterizar los compactados se utilizó un horno tubular (Figura 18), que fue previamente caracterizado para definir la zona efectiva de calentamiento, y de esta manera tener la mínima variación en temperatura durante el ciclo de calentamiento.

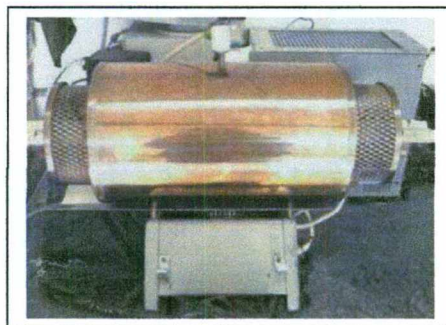


Figura 18. Horno Tubular.

Las muestras fueron colocadas en el interior del tubo cerámico del horno, mismo que se selló con tapones de hule teniendo un tubo de entrada y salida de gas (Figura 19), fue programada una velocidad de calentamiento de 5°C/min bajo una atmósfera de 99.9% N₂. En la Figura 20 se muestra una grafica que detalla la etapa de sinterización.

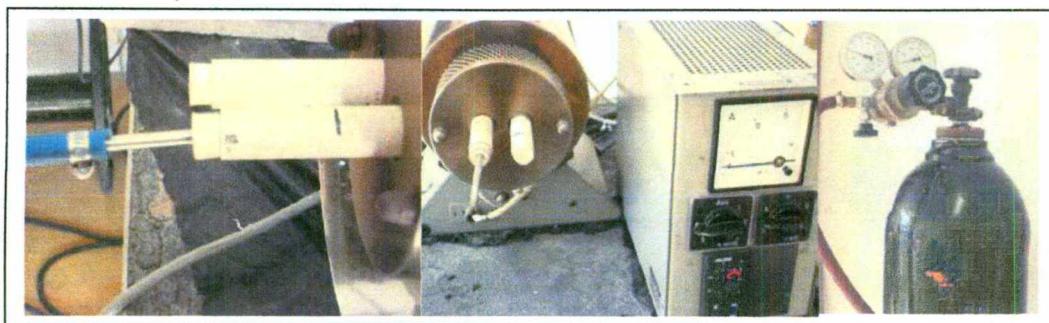


Figura 19. Arreglo de entrada y salida de gas N₂ hacia el interior del horno.

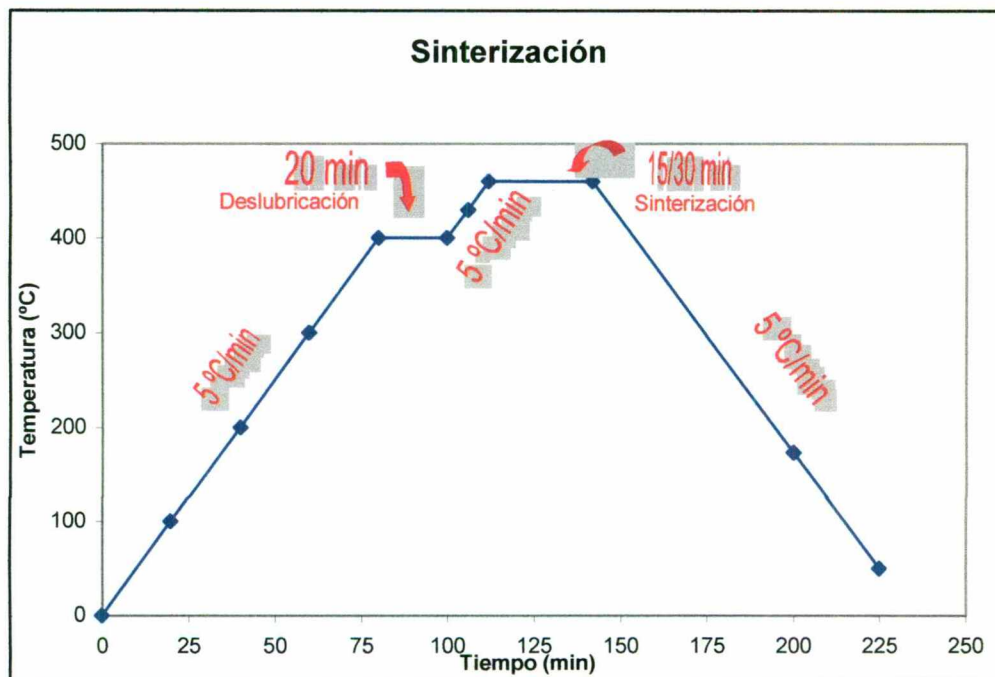


Figura 20. Ciclo térmico de la sinterización, mostrando las velocidades de calentamiento y enfriamiento, así como la etapa de deslubricación.

Cabe señalar que fue programada una etapa de deslubricación a los 400°C, con una duración de 20 minutos; esto se aplicó a todos los experimentos. Con la ayuda del controlador de temperatura del horno tubular (Figura 21), fue posible realizar esta operación.

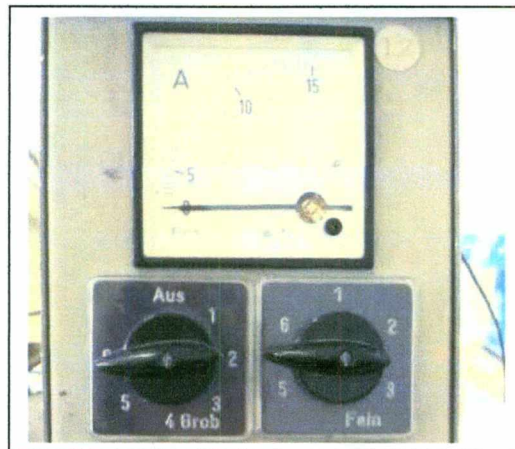


Figura 21. Controlador de temperatura.

La velocidad de enfriamiento fue del mismo orden que la de calentamiento.

Durante el enfriamiento la atmósfera (N_2) permaneció hasta que la temperatura fue de 50°C, esto para garantizar la no alteración de las muestras, es decir evitar que se presentara la oxidación de éstas.

V.2.6 Caracterización de los sinterizados

Nuevamente con la ayuda de un vernier digital y una balanza analítica se midieron dimensiones y se pesó cada una de las muestras, con esto se obtuvieron suficientes datos para calcular densidad y porosidad.

A continuación se muestran algunas consideraciones para los cálculos.

Primero, se calculó la densidad teórica, para lo cual se tomaron los datos de densidad de los elementos que componen a la mezcla.

$$\text{Densidad Teórica} = \frac{100}{(\%A / \rho_A + \%B / \rho_B + \%C / \rho_C + \dots)}$$

$$\rho_{Al} = 2.7 \text{ g/cm}^3$$

$$\rho_{Si} = 2.33 \text{ g/cm}^3$$

$$\rho_{Mg} = 1.74 \text{ g/cm}^3$$

$$\rho_{Mn} = 7.43 \text{ g/cm}^3$$

$$\rho_{Al_2O_3} = 3.965 \text{ g/cm}^3$$

El porcentaje de porosidad fue calculado como sigue:

$$\text{Porosidad} = \left(1 - \frac{\rho_{\text{verde}}}{\rho_{\text{teórica}}} \right) \times 100$$

V.2.7 Ensayos de desgaste

Fueron llevados a cabo ensayos de desgaste en seco con la ayuda de un tribómetro del tipo "pin-on-disc" y del programa Tribbox 2.0 de CSM ® Instruments (Figura 22), mediante el cual se obtuvieron datos para calcular la velocidad de desgaste en $\text{mm}^3/\text{N/m}$.

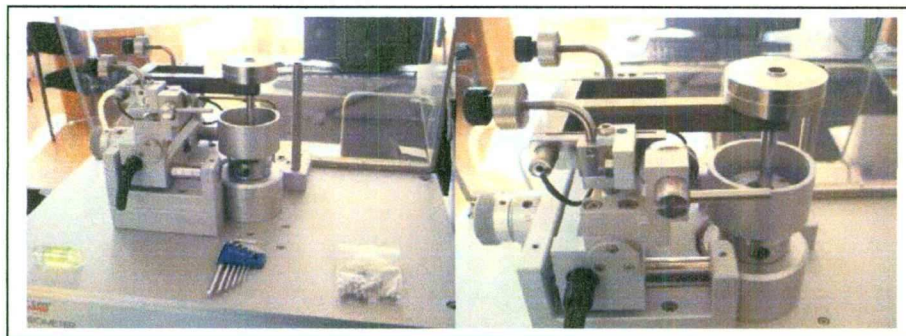


Figura 22. Tribómetro: accesorios y durante un ensayo.

Para estos ensayos cada una de las muestras es nombrada como TX-X, significando el primer número el tratamiento aplicado y el segundo número la mezcla con la cual se trabajó.

Únicamente se sometieron a ensayo de desgaste aquellas piezas que lograron una sinterización satisfactoria. El esquema de ensayo es mostrado en la Figura 23.

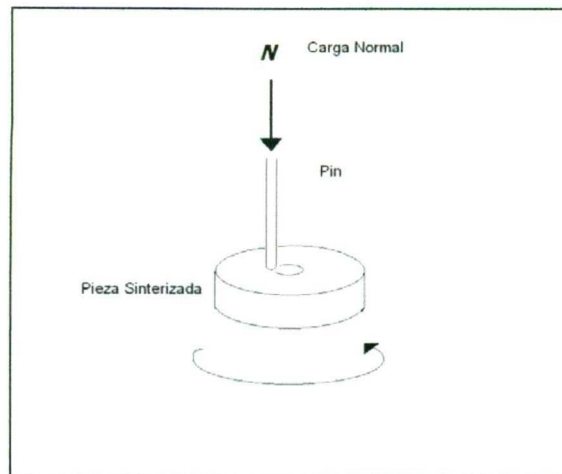


Figura 23. Esquema de ensayo de desgaste.

Las condiciones de prueba fueron elegidas basándose en experimentos como el que realizó Díaz y col., quienes tomaron una velocidad de 0.2 cm/s; la carga aplicada fue de 4N, ya que ésta permitiría, según ensayos previos, que el tribómetro hiciera gráficos más detallados (Díaz y col., 1999).

Radio: 3 mm

Velocidad: 0.1 cm/s

Carga Normal: 4 N

Condición de alto: $\mu > 0.95$ donde μ es el coeficiente de fricción.

Se utilizó la siguiente fórmula para calcular la tasa de desgaste:

Tasa de desgaste $\text{mm}^3/\text{N}/\text{m} = \text{Volumen perdido} / \text{Carga aplicada} / \text{distancia recorrida}$

V.2.8 Medición de microdureza de los sinterizados.

Se montaron las muestras en baquelita con la ayuda de un horno y una montadora de probetas (Figura 24), se pulieron y se midió microdureza de los sinterizados utilizando un microdurómetro de marca LECO (Figura 25), en el cual fue aplicada una carga de $50 \text{ kgf}/\text{mm}^2$.

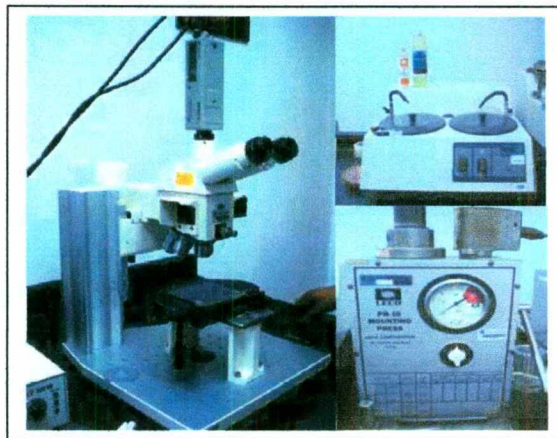


Figura 24. Equipo para preparación de probetas.

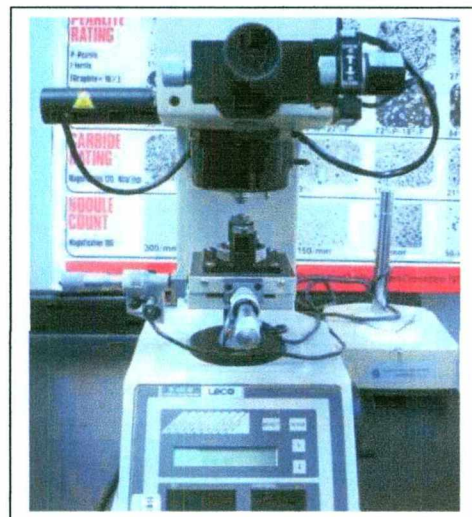


Figura 25. Microdurometro.

V.3 Diseño Experimental

Se muestra a continuación el diseño experimental propuesto. Puede verse en los Cuadros 2, 3 y 4; el resultado de la combinación de 4 variables con 2 y/ó 3 niveles cada una.

Cuadro 2. Diseño experimental para la mezcla 1.

Material	Tratamiento	% Al ₂ O ₃			Lubricante		Temperatura de Sinterización (°C)			Tiempo de sinterización (min)	
		0.0	7.5	15.0	Estearato de Zinc	Acrawax	460	490	520	15	30
Mezcla 1	1	X			X		X			X	
	2	X			X			X		X	
	3	X			X				X	X	
	4	X			X		X				X
	5	X			X			X			X
	6	X			X				X		X
	7	X				X	X			X	
	8	X				X		X		X	
	9	X				X			X	X	
	10	X				X	X				X
	11	X				X		X			X
	12	X				X			X		X

Cuadro 3. Diseño experimental para la mezcla 2.

Material	Tratamiento	% Al ₂ O ₃			Lubricante		Temperatura de Sinterización (°C)			Tiempo de sinterización (min)	
					de Zinc	Acrawax	460	490	520	15	30
Mezcla 2	1	X			X		X			X	
	2	X			X			X		X	
	3	X			X				X	X	
	4	X			X		X				X
	5	X			X			X			X
	6	X			X				X		X
	7	X				X	X			X	
	8	X				X		X		X	
	9	X				X			X	X	
	10	X				X	X				X
	11	X				X		X			X
	12	X				X			X		X

Cuadro 4. Diseño experimental para la mezcla 3.

Material	Tratamiento	% Al ₂ O ₃			Lubricante		Temperatura de Sinterización (°C)			Tiempo de sinterización (min)	
		0.0	7.5	15.0	Estearato de Zinc	Acrawax	460	490	520	15	30
Mezcla 3	1			X	X		X			X	
	2			X	X			X		X	
	3			X	X				X	X	
	4			X	X		X				X
	5			X	X			X			X
	6			X	X				X		X
	7			X		X	X			X	
	8			X		X		X		X	
	9			X		X			X	X	
	10			X		X	X				X
	11			X		X		X			X
	12			X		X			X		X

VI RESULTADOS

VI.1 Fluidez

Cuadro 5. Fluidez (s/50 g de muestra) de las mezclas con estearato de zinc como lubricante

Ensayo	Tiempo (segundos)			
	Polvo virgen	Mezcla 1	Mezcla 2	Mezcla 3
1	46.78	61.82	71.29	89.68
2	46.64	61.01	69.60	88.98
3	46.30	59.02	65.83	90.21
promedio	46.57	60.62	68.91	89.62

Cuadro 6. Fluidez (s/50 g de muestra) de las mezclas con Acrawax como lubricante

Ensayo	Tiempo (segundos)			
	Polvo virgen	Mezcla 1	Mezcla 2	Mezcla 3
1	46.78	55.68	74.49	80.50
2	46.64	55.95	73.99	81.09
3	46.30	55.88	74.34	82.01
promedio	46.57	55.84	74.27	81.20

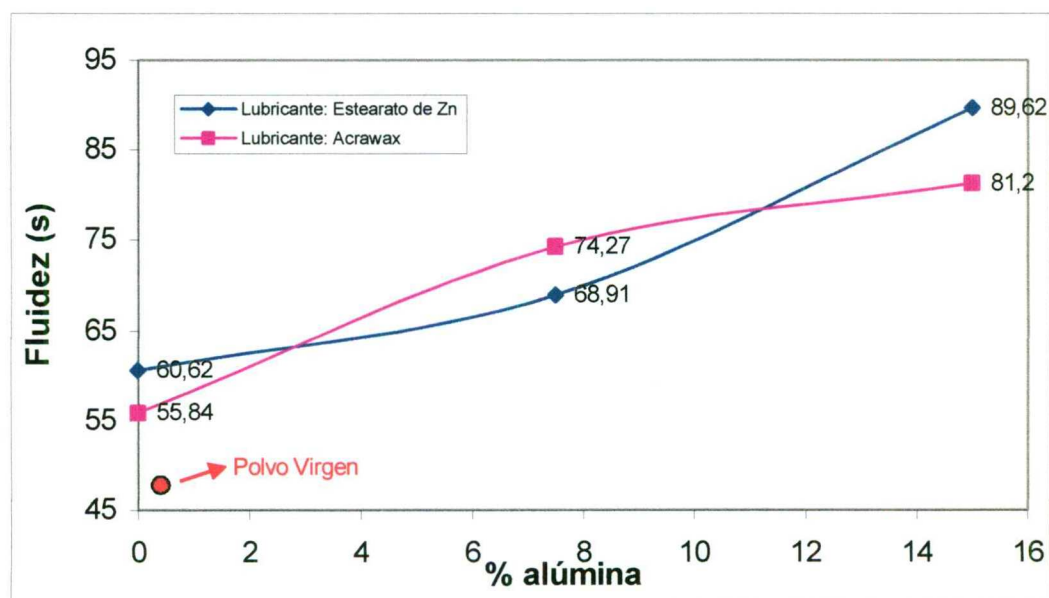


Figura 26. Influencia del tipo de lubricante y porcentaje de alúmina agregado sobre la fluidez.

VI.2 Densidad aparente

Cuadro 7. Densidad aparente de las mezclas con estearato de zinc como lubricante

Ensayo	Densidad aparente (g/cm ³)			
	Polvo virgen	Mezcla 1	Mezcla 2	Mezcla 3
1	1.360	1.399	1.364	1.326
2	1.360	1.397	1.370	1.328
3	1.362	1.396	1.370	1.330
promedio	1.361	1.397	1.368	1.328

Cuadro 8. Densidad aparente de las mezclas con Acrawax como lubricante

Ensayo	Densidad aparente (g/cm ³)			
	Polvo virgen	Mezcla 1	Mezcla 2	Mezcla 3
1	1.360	1.332	1.292	1.226
2	1.362	1.326	1.288	1.229
3	1.362	1.327	1.288	1.227
promedio	1.361	1.328	1.289	1.227

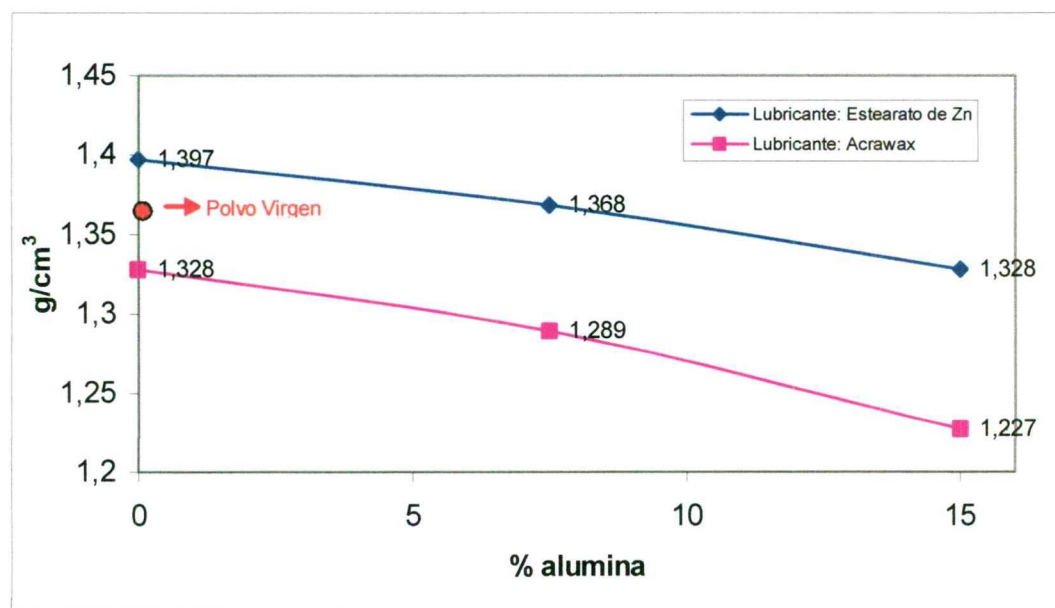


Figura 27. Influencia del tipo de lubricante y porcentaje de alúmina agregado sobre la densidad aparente.

VI.3 Caracterización de las muestras en verde y sinterizadas.

A continuación se muestran las densidades y el porcentaje de porosidad obtenidos después del compactado en tibio y después del sinterizado:

Cuadro 9. Propiedades en verde y sinterizados de muestras obtenidas a partir de mezcla 1.

Material	MUESTRA EN VERDE										MUESTRA SINTERIZADA				Comentarios				
	%Al ₂ O ₃		Lubrificante		Temperatura de Sinterización °C.			Temperatura de Tinter (min)	Densidad teórica	Muestra	Densidad en verde	Densidad relativa	Porosidad	Densidad de Sinterizado		Densidad relativa	Porosidad	Dureza Vickers (carga = 50 kgf/mm ²)	
	0.0	7.5	15.0	Escarado de Zinc	460	490	520	15	30		g/cm ³	g/cm ³	%	g/cm ³		g/cm ³	%	Longitudinal	Transversal
Mezcla 1	1	X		X				X			2.231	0.84	15.832	2.518	0.95	5.005	X	X	NO SINTERIZO
	2	X		X			X			2.268	0.86	13.709	2.497	0.94	5.799	X	X	NO SINTERIZO	
	3	X		X			X			2.298	0.87	13.300	2.366	0.89	10.735	X	X		
	4	X		X				X		2.271	0.86	14.350	2.496	0.94	5.859	X	X	NO SINTERIZO	
	5	X		X				X		2.250	0.85	15.137	2.461	0.93	7.159	X	X	NO SINTERIZO	
	6	X		X				X		2.268	0.86	14.462	2.469	0.93	6.865	X	X	NO SINTERIZO	
	7	X		X				X		2.310	0.87	12.848	2.458	0.93	7.268	X	X	NO SINTERIZO	
	8	X		X				X		2.291	0.86	13.577	2.465	0.93	7.027	30.930	34.000		
	9	X		X				X		2.257	0.85	14.843	2.376	0.90	10.358	40.420	36.420		
	10	X		X				X		2.274	0.86	14.223	2.490	0.94	6.080	40.930	43.430		
	11	X		X				X		2.278	0.86	14.081	2.444	0.92	7.827	37.950	38.780		
	12	X		X				X		2.331	0.88	12.055	2.467	0.93	6.933	39.100	32.270		

Cuadro 10. Propiedades en verde y sinterizados de muestras obtenidas a partir de la mezcla 2.

Material	MUESTRA EN VERDE										MUESTRA SINTERIZADA				Comentarios						
	%Al ₂ O ₃		Lubrificante		Temperatura °C			tiempo (min)		Densidad teórica	Muestra	Densidad en verde	Densidad relativa	Porosidad		Densidad de Sinterizado	Densidad relativa	Porosidad	Dureza Vickers (carga = 50 kgf/mm ²)		
	0.0	7.5	15.0	Estearato de Zinc	400	460	520	15	30	g/cm ³		g/cm ³	g/cm ³	%		g/cm ³	g/cm ³	%	Longitudinal	Transversal	
Mezcla 2	1	X		X			X					2.367	0.87	12.927	2.512	0.92	7.587	X	X	NO SINTERIZÓ	
	2	X		X		X						2.362	0.87	13.120	2.474	0.91	8.988	X	X	NO SINTERIZÓ	
	3	X		X			X					2.364	0.87	13.052	2.462	0.91	9.406	X	X	NO SINTERIZÓ	
	4	X		X		X			X			2.382	0.88	12.365	2.435	0.90	10.423	X	X	NO SINTERIZÓ	
	5	X		X		X			X			2.391	0.88	12.036	2.469	0.91	9.176	X	X	NO SINTERIZÓ	
	6	X		X			X		X			2.400	0.88	11.726	2.460	0.90	9.509	X	X	NO SINTERIZÓ	
	7	X			X				X		2.7185	2.360	0.87	13.189	2.542	0.93	6.507	50.830	44.450		
	8	X			X		X		X			2.345	0.86	13.757	2.491	0.92	8.379	X	X	NO SINTERIZÓ	
	9	X			X		X		X			2.360	0.87	13.176	2.436	0.90	10.403	46.630	47.130		
	10	X			X		X		X			2.333	0.86	14.186	2.428	0.89	10.675	50.380	49.500		
	11	X			X		X		X			2.375	0.87	12.650	2.501	0.92	8.002	47.720	45.050		
	12	X			X		X		X			2.352	0.87	13.496	2.462	0.91	9.437	X	X	NO SINTERIZÓ	

Cuadro 11. Propiedades en verde y sinterizados de muestras Obtenidas a partir de la mezcla 3.

Material	MUESTRA EN VERDE										MUESTRA SINTERIZADA				Comentarios			
	%Al ₂ O ₃		Lubrificante		Temperatura °C		tiempo (min)	Densidad teórica	Muestra	Densidad en verde	Porosidad	Densidad de Sinterizado	Densidad relativa	Porosidad		Dureza Vickers (carga = 50 kg/mm ²)		
	0.0	7.5	15.0	Estearato de Zinc	400	460	520	15	30	g/cm ³	g/cm ³	%	g/cm ³	%		g/cm ³	Longitudinal	Transversal
Mezcla 3	1	X	X	X	X		X			2.418	0.87	13.327	2.446	0.88	12.303	X	X	NO SINTERIZO
	2	X	X	X	X		X			2.462	0.88	11.762	2.629	0.94	5.759	X	X	NO SINTERIZO
	3	X	X	X	X		X			2.457	0.88	11.925	2.471	0.89	11.408	X	X	NO SINTERIZO
	4	X	X	X	X		X			2.427	0.87	13.001	2.373	0.85	14.932	X	X	NO SINTERIZO
	5	X	X	X	X		X			2.436	0.87	12.693	2.424	0.87	13.124	X	X	NO SINTERIZO
	6	X	X	X	X		X			2.423	0.87	13.151	2.532	0.91	9.229	X	X	NO SINTERIZO
	7	X	X	X	X		X			2.412	0.86	13.337	2.433	0.87	12.801	X	X	NO SINTERIZO
	8	X	X	X	X		X			2.422	0.87	13.161	2.312	0.83	17.135	X	X	NO SINTERIZO
	9	X	X	X	X		X			2.400	0.86	13.950	2.511	0.90	10.005	X	X	NO SINTERIZO
	10	X	X	X	X		X			2.386	0.86	14.477	2.436	0.87	12.670	X	X	NO SINTERIZO
	11	X	X	X	X		X			2.419	0.87	13.304	2.555	0.92	8.421	X	X	NO SINTERIZO
	12	X	X	X	X		X			2.455	0.88	12.003	2.538	0.91	9.016	X	X	NO SINTERIZO

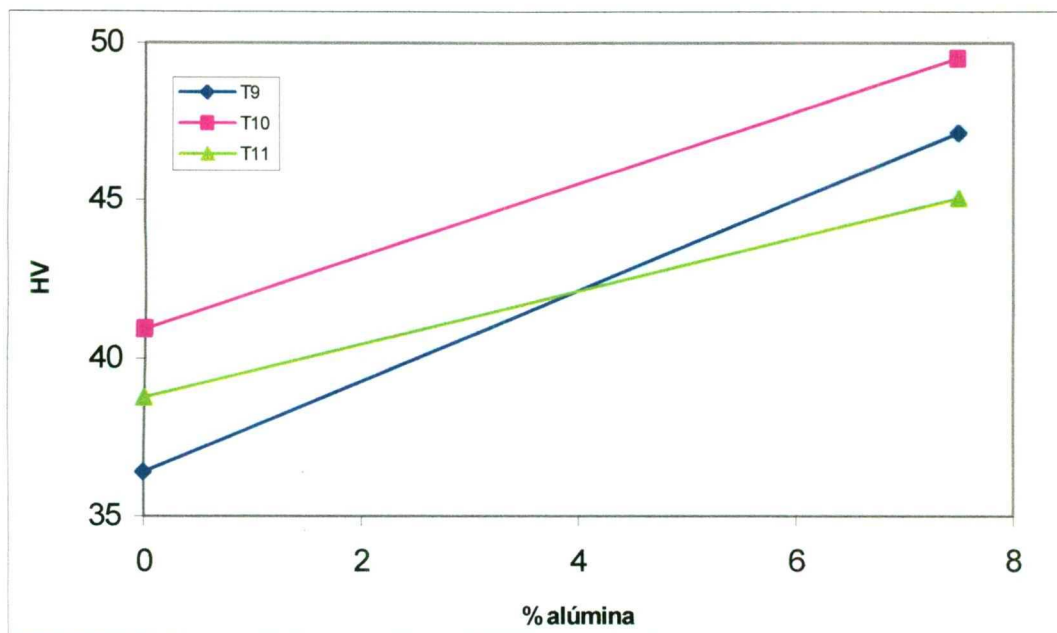


Figura 28. Comparativo entre diferentes tratamientos de sinterización sobre la dureza Vickers.

VI.4 Desgaste

Cuadro 12. Tasas de desgaste obtenidas para los distintos tratamientos hechos.

Ensayo en tribómetro								
MUESTRA	Peso antes (g)	Peso despues (g)	Pérdida en peso (g)	Densidad sinterizado (g/cm^3)	Volumen perdido (mm^3)	Carga aplicada (N)	Distancia recorrida (m)	Tasa de desgaste $mm^2/N/m$
T8-1	4.0841	4.0459	0.0382	2.4650	15.4970	4.0000	0.2600	14.9010
T8-2	4.3315	4.3195	0.0120	2.4910	4.8173	4.0000	0.2400	5.0180
T9-1	4.5207	4.5193	0.0014	2.3760	0.5892	4.0000	0.2600	0.5665
T9-2	4.5048	4.5042	0.0006	2.4360	0.2463	4.0000	2.5100	0.0245
T10-1	4.4933	4.4923	0.0010	2.4900	0.4016	4.0000	1.1100	0.0905
T10-2	4.5731	4.5714	0.0017	2.4280	0.7002	4.0000	0.4200	0.4168
T11-1	4.6832	4.6806	0.0026	2.4440	1.0638	4.0000	0.9000	0.2955
T11-2	4.5754	4.5731	0.0023	2.5010	0.9196	4.0000	0.7100	0.3238
T12-1	4.9686	4.9679	0.0007	2.4670	0.2837	4.0000	1.8000	0.0394

VI DISCUSIÓN

VII.1 Fluidéz

Como resultado de la adición de alúmina a la aleación eutéctica aluminio-silicio, podemos observar en los Cuadros 5 y 6, un decremento en la fluidez. Cuanto más se eleva el porcentaje de la partícula de refuerzo ésta disminuye.

También es posible observar, comparando un lubricante con otro, que el Acrawax proporciona a la mezcla un tiempo de fluidez menor, en este caso de algunos segundos, pero que podrían resultar significativos en un proceso industrial.

Es reconocido que el polvo de aluminio tiene una fluidez pobre, en parte debido a su baja densidad (Lefebvre y col., 2000).

VII.2 Densidad aparente

En los Cuadros 7 y 8 podemos observar las densidades aparentes que las diferentes mezclas presentaron con cada uno de los dos lubricantes utilizados.

En el Cuadro 7 podemos apreciar como la densidad va disminuyendo, recordando que la alúmina tiene una densidad de aprox. 3.8 g/cm^3 (Hawley, 1992) se esperaría que la densidad fuera en aumento, sin embargo, como se vio anteriormente, la fluidez disminuye. Esto por la interacción entre el lubricante y las partículas de refuerzo que tienden a aglomerarse cuanto más porcentaje de éstas hay, y por consecuencia la densidad aparente será menor.

Lo anterior concuerda con lo que se menciona en dado que la aglomeración tuvo un efecto importante en la densidad aparente de las mezclas. La baja densidad aparente del polvo aglomerado está asociada con la distribución del tamaño de los gránulos.

VII.3 Caracterización de las muestras en verde y sinterizadas.

Los Cuadros 9, 10 y 11 nos muestran una serie de resultados interesantes:

1. Primero, pudo observarse que la relación que existe entre las densidades teóricas de las mezclas, ya que como era de esperarse entre más porcentaje de la aleación es sustituido por la alúmina, el valor de la densidad aumenta.
2. En las muestras en verde puede corroborarse lo arriba mencionado.
3. Otro punto importante a resaltar es el caso de las porosidades, que tienden en general, a tomar valores más pequeños cuanto más porcentaje de alúmina es adicionado a la aleación, y cuyo valor disminuye aún más cuando se llega a la etapa de sinterización; haciéndose más notorio este efecto cuando las piezas pasan por un tratamiento de sinterización que se realiza a tiempos más largos y a una temperatura más elevada.
4. Finalmente, en cuanto a la dureza Vickers (Figura 28), medida a las piezas que lograron consolidarse durante el proceso de sinterización, también se observa un aumento proporcional al porcentaje de partículas de refuerzo.

VII.4 Desgaste

Como puede verse en el Cuadro 12, existen 3 tratamientos que le proporcionan a las piezas sinterizadas, cualidades para que al final de un ensayo tribológico exhiban una tasa de desgaste muy baja en relación a los demás, éstos tratamiento son los T9-2, T10-1 y T12-1.

Con lo anterior se constata que la mezcla con 7.5% de alúmina es una opción buena si se quiere obtener un compósito con está aleación de Al (Valimet S-20); aunque también es importante mencionar que la Aleación por sí sola ofrece un buen desempeño sobre todo cuando se trabajan con tiempos de 30 min y temperaturas más cercanas a la de fusión.

VIII CONCLUSIONES

La fluidez de las mezclas disminuye cuanto más porcentaje de partículas de refuerzo (Al_2O_3) es adicionado.

La densidad aparente disminuye por la adición de un porcentaje mayor de partículas de refuerzo; lo mismo que el porcentaje de porosidad total.

Otra característica que es proporcional al porcentaje de partícula de refuerzo es la densidad aparente, ya sea de la muestra en verde o sinterizada.

La dureza Vickers que exhiben las muestras también se incrementa por la adición de alúmina.

La tasa de desgaste en seco de cada una de las muestras, que lograron sinterizarse, muestran una mejora, y aquí intervienen a su favor variables como temperatura elevada y tiempos de sinterización largos, así como el porcentaje de alúmina agregado.

Para esta aleación en particular, porcentajes altos de alúmina no son recomendables, ya que la etapa de sinterización no es cumplida satisfactoriamente para cada uno de los tratamientos realizados. Es recomendable para estudios posteriores que se trabaje con porcentajes menores a 7.5%, cuestión que resultaría en una mejor distribución de la aleación Al-Si sobre las partículas de alúmina y por ende mayor formación de "cuellos" o puentes de sinterización que resultarían en una mejor consolidación de las piezas.

IX BIBLIOGRAFÍA

Amigó, V., Ortíz, J.L., Salvador, M.D. **2000.** Microstructure and mechanical behavior of 6061Al reinforced with silicon nitride particles, processed by powder metallurgy. *Scripta materialia.*: Vol. 42: 383-388.

ASM Handbook. **1993.** Volume 7: Powder Metallurgy. American Society for Metals. USA: 25-79, 211-270, 295-360.

Apelian, D., Saha, D. **2000.** Aluminum P/M processed components-challenges and opportunities. Proceeding or the second international powder metallurgy aluminum & light alloys for automotive applications conference.: Vol 11: 1-10.

Arnell, R.D, Davies, P.B., Halling, J., Whomes, T.L.**1991.** Tribology: Principles and Design applications. 1er. ed. McMillan education Ltd. Londres: 66-125.

Azkelan, D.R., **2003.** Ciencia e Ingeniería de los materiales. 4a Edición. Internacional Thomson Editores. México: 270-274.

Baker, T.N., Gorton, A.J., Song, Y., Ni, X., Carvalho, H., Marcelo, T.M., Carvalhinhos, H. **1996.** Powder processing of AA 6061 aluminium metal matrix composites using hot forging as means of consolidation. *Powder Metallurgy.* Vol. 39: 223-227.

Bocchini, G.F. **1999.** Warm compaction of metal powders: why it Works, why it requires a sophisticated engineering approach. *Powder Metallurgy:* Vol. 42: 171-180.

Campbell, G.T., Raman, R., Fields, R. Optimum press and sinter processing for aluminum/sic composites. **1998.** Proceeding or the powder metallurgy aluminum & light alloys for automotive applications conference.: 109-125.

Chagnon, F., St-Laurent, S. **2000.** Study of compaction and ejection properties of powder mixes processed by warm compaction. 2000 PM2TEC International Conference.: 7-11.

Das, T., Bandyopadhyay, S., Blairs, S., 2002, On thermal studies of SiC and Al₂O₃ particulate reinforced aluminium metal matrix composites. *International Journal Materials and production technology.* Kensington, Australia. Vol 9: 436-438.

- Delarbre, P., Krehl, M. 2000.** Applications of P/M aluminum parts – materials and processing schemes. Proceeding of the second international powder metallurgy aluminum & light alloys for automotive applications conference.: Vol 11: 33-40
- Gagné, M., Thomas, Y., Lefebvre, L.P., 1998,** Effect of compaction temperature on the lubricant distribution in powder metal parts. Acta metall. mater.: Vol. 67: 515-532.
- Hummert, K., Schattevoy, R., Ringhand, D. 1998.** Forming P/M aluminium alloys into con-rods, pistons, liners, and other automotive components. Proceeding of the powder metallurgy aluminum & light alloys for automotive applications conference.:115-126.
- Hunt, W.H. 1998.** Metallurgical considerations in the design and processing of aluminum powder metallurgy alloys. Proceeding of the powder metallurgy aluminum & light alloys for automotive applications conference. : 1-10.
- Hutchings, I.M. 1992.** Tribology: friction and wear of engineering materials. 1er. ed. Edward Arnold. Great Britain: 22-25, 77-116, 133-141198-203.
- Lefebvre, L.P., Thomas, Y., Pelletier, S. 2000.** Processing and properties of Al-SiC composites fabricated with agglomerated powders. Proceeding of the second international powder metallurgy aluminum & light alloys for automotive applications conference. Vol. 11: 77-84.
- Liu, F., Papaefthimiou, S., Luk, S., Hunt, W.H. 2000.** Forged P/M connecting rod development using aluminum metal matrix composites. Proceeding of the second international powder metallurgy aluminum & light alloys for automotive applications conference. Vol. 11: 153-160.
- Lloyd, D.J. 1994.** Particle reinforced aluminium and magnesium matrix composites. International Materials Reviews. Vol. 39: 1-23.
- Mishra, R.S., Bieler, T.R., Mukherjee, A.K. 1995.** Superplasticity in powder metallurgy aluminum alloys and composites. Acta metall mater. Vol. 43: 877-891.
- Olevsky, E.A., Shoales, G.A., German, R.M. 2001.** Temperature effect on strength evolution under sintering. Materials Research Bulletin. Vol. 36: 449-459.

Ortíz, J.L., Amigó V., Ferrer, C. 2000. Friction and wear rate of an AlMgSiCu alloy reinforced with nitride particles, processed by powder metallurgy. Scripta mater. Vol. 47: 283-288.

Rack, H.J. 1991, Powder techniques in processing of metal matrix composites. Academic Press. Departments of Mechanical Engineering.: Vol. 4: 35-38.

Rosas, C., Arcaraz, I., Aragón, A., De Ita, A., 1998. Matrices metálicas no ferrosas para materiales compuestos por pulvimetalurgia. Memorias V Congreso Internacional de Materiales. Saltillo, México. 25,10: 91-101.

Smith, P.M., Aziz, M.J. 1994. Solute trapping in aluminum alloys. Acta metall. mater.: Vol. 42: 3515-3525.

Standard test methods for Metal Powders and Powder Metallurgy Products, 1999. Published by Metal Powder Industries Federation, New Jersey, 4-12

Thümmler, F., Oberacker, R.1993. Introduction to Powder Metallurgy. 1er ed., The institute of Materials, Londres: 17-25, 30-39, 65-85, 121-137, 181-198, 199-203.

Zhen, I., Kang, S.B. 1997. The effect of pre-aging on microstructure and tensile properties of Al-Mg-Si alloys. Scripta Materialia. Vol. 36: 1089-1094.