

5 23



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

RECIBIDO EN LA FACULTAD DE QUIMICA
MEXICO D.F. 20 DE JUNIO DE 1994

FACULTAD DE QUIMICA

CARACTERIZACION DE PROPIEDADES FISICAS, MECANICAS Y TRIBOLOGICAS DE COMPOSITOS DE MATRIZ METALICA OBTENIDOS POR PULVIMETALURGIA.



EXAMEN DE PROFESIONALES
FAC. DE QUIMICA

T E S I S
QUE PARA OBTENER EL TITULO DE:
INGENIERO QUIMICO METALURGICO
P R E S E N T A
ARTURO CERVANTES TOBON



MEXICO, D. F.

1994

TESIS CON 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.

JURADO ASIGNADO SEGUN EL TEMA

PRESIDENTE: I.Q.M. EUSEBIO CANDIDO ATLATENCO TLAPANCO

VOCAL: I.Q.M. TERESITA ROBERT NUÑEZ

SECRETARIO: I.Q.M. SERGIO GARCIA GALAN

1er. SUPLENTE: I.Q.M. IGNACIO BELTRAN PIÑA

2do. SUPLENTE: I.Q.M. GERARDO ARAMBURO PEREZ

SITIO DONDE SE DESARROLLO EL TEMA:

**LABORATORIOS 205, 110 Y 008 DEL DEPARTAMENTO DE METALURGIA,
FACULTAD DE QUIMICA, U.N.A.M.**

ASESOR DEL TEMA


I.Q.M. Sergio Garcia Galdn.

SUPERVISOR TECNICO


I.Q.M. Gerardo Aramburo Pérez.

SUSTENTANTE


Arturo Cervantes Tobón.

DEDICATORIAS

A Dios:

Por permitirme llegar a este momento, dándome la fortaleza para alcanzar una de las metas más importantes de mi vida.

A mis padres:

Braulio A. Cervantes N. y Juana Tobón R. por todo el apoyo, comprensión y cariño que me han brindado ya que gracias a sus consejos, se me ha inculcado el valor del respeto y la honradez para ser una persona de provecho.

A mis hermanos:

Juan de Dios, Hilda y Elia por compartir conmigo este gran momento.

A mis amigos y amigas:

Luis A. M., Maru N., Lety R., Tere M., Alejandra S., Silvia G., Norma S., José Luis A (Chepe)., Eréndira M., Beatriz R., Sonia L., Adán H., Magdalena CH., Octavio V., Arturo J., Lety, Lupita, Miriam y Verónica Dominguez.

A Sirenia L.:

Por la gran amistad y confianza que existe entre nosotros.

A mi mejor amigo y compañero de toda la carrera esperando que nuestra amistad sea para siempre .

Juan Manuel Aquino C.

A una gran mujer a la que quiero mucho por ser como es y con quien he vivido momentos felices.

Erika Marbán C.

A todos mis compañeros y amigos de Metalurgia.

AGRADECIMIENTOS

A mi asesor el I.Q.M Sergio García Galán por compartir conmigo su amistad, sus conocimientos y su experiencia, agradeciendo también su valiosa asesoría en la realización de esta Tesis.

A mi supervisor técnico el I.Q.M Gerardo Arámburo Pérez por su amistad y el gran apoyo brindado para la culminación de este trabajo.

A los miembros del honorable jurado los I.Q.M's Eusebio Cándido Atlatenco Tlapanco y Teresita Robert Nuñez por sus valiosos comentarios y sugerencias así como por el tiempo dedicado en la revisión de este trabajo.

Al I.Q.M Ignacio Beltrán Piña y al M. en C. Antonio Huerta Cerdán por su amistad y apoyo incondicional.

A la Universidad Nacional Autónoma de México y a la Facultad de Química por haberme formado profesionalmente.

A todos mis profesores de cada una de las etapas de mi vida como estudiante.

**Arturo
Octubre 1994**

Ten tiempo para reir

Es la música del alma

Ten tiempo para meditar

Es la fuente del poder

Ten tiempo para jugar.

Es la fuente de la juventud

Ten tiempo para leer

Es la fuente de la sabiduría

Ten tiempo para orar

Es la mayor potencia del mundo

Ten tiempo para amar

Es el mayor don de Dios

Ten tiempo para trabajar

Es el precio del éxito.

E.M.C.

INDICE

PAGINA

RESUMEN.....7

INTRODUCCION.....9

CAPITULO 1 ANTECEDENTES

<i>1.1</i>	<i>Introducción a los compósitos</i>	11
<i>1.2</i>	<i>Procesos de fabricación de compósitos de matriz metálica con partículas reforzantes (cerámicos)</i>	14
<i>1.3</i>	<i>Selección de compósitos</i>	20
<i>1.4</i>	<i>Ventajas de los compósitos en aplicaciones específicas</i>	22
<i>1.5</i>	<i>Pulvimetalurgia (Metalurgia de polvos)</i>	23
<i>1.5.1</i>	<i>Métodos para la producción de polvos metálicos</i>	24
<i>1.5.2</i>	<i>Características de los polvos metálicos</i>	26
<i>1.5.3</i>	<i>Tratamientos de los polvos metálicos antes de ser compactados</i>	30
<i>1.5.3.1</i>	<i>Mezclado</i>	30
<i>1.5.3.2</i>	<i>Lubricación</i>	32
<i>1.5.4</i>	<i>La compactación</i>	33
<i>1.5.4.1</i>	<i>Concepto de compactación</i>	33
<i>1.5.4.2</i>	<i>Las fases de la compactación</i>	34

1.5.5 Métodos de compactación.....	36
1.5.5.1 Métodos aplicando presión.....	36
1.5.5.2 Métodos sin aplicación de presión.....	37
1.5.5.3 Sinterización de los polvos en el molde (Compactación por gravedad).....	38
1.5.6 Aspectos fundamentales de la compactación.....	39
1.5.6.1 Entrelazamiento de partículas.....	39
1.5.6.2 Adhesión.....	39
1.5.7 Etapas de compactación.....	40
1.5.8 Fuerzas de fricción durante la compactación.....	41
1.5.9. Influencia de las características del polvo durante la compactación.....	42
1.6 Porosidad durante la compactación.....	44
1.7 La sinterización.....	45
1.7.1 El concepto de sinterización.....	45
1.7.2 Consideraciones termodinámicas.....	45
1.7.3 Etapas del sinterizado.....	47
1.7.4 Mecanismos de la sinterización.....	48
1.7.4.1 Sin transferencia de materia.....	48
1.7.4.2 con transferencia de materia.....	49
1.7.5 Mecanismos de sinterización en la etapa de los poros interconectados.....	49
1.7.6 Mecanismos de sinterización en la etapa de los poros aislados.....	50
1.7.7 Transformaciones durante la sinterización.....	55

1.7.8 Variables que controlan el proceso de sinterización.....	56
1.7.8.1 Temperatura.....	56
1.7.8.2 El tiempo.....	56
1.7.9 Porosidad durante el sinterizado.....	57
1.7.9.1 Aspectos prácticos de la sinterización.....	57
1.7.9.2 Atmósferas de sinterización.....	58
1.7.9.3 Hornos de sinterización.....	60
1.7.9.4 Control de la sinterización.....	61
1.7.9.5 Tratamientos post-sinterización.....	62
1.7.9.5.1 Operaciones de calibrado y conformado.....	62
1.7.9.6 Ventajas de la forja de preformas sinterizadas.....	63
1.8 Ventajas y desventajas de la pulvimetalurgia.....	64
1.8.1 Aplicaciones de la pulvimetalurgia y compósitos obtenidos por esta ruta.....	66
a) Industria automotriz.....	66
b) Metales porosos.....	74
c) Piezas de preformas pulvimetalúrgicas.....	75
d) Materiales antifriccionantes.....	77
e) Aplicaciones eléctricas.....	78
f) Productos de formas complicadas.....	79
1.9 Desgaste.....	82
1.9.1 Fracturas tribológicas y mecanismos de desgaste.....	84
1.9.2 Tipos de desgaste.....	87
1.9.2.1 Desgaste adhesivo.....	88
1.9.2.2 Desgaste abrasivo.....	90

1.9.2.3 Desgaste por fatiga.....	91
1.9.2.4 Desgaste erosivo.....	92
1.9.2.5 Desgaste vibracional.....	92
1.9.3 Máquinas de desgaste.....	93
1.9.4 La curva de desgaste.....	94
1.9.5 Curva factor de desgaste - carga.....	96

CAPITULO 2
DESARROLLO
EXPERIMENTAL

2.1 Desarrollo experimental.....	99
2.2 Proceso de obtención.....	99
2.3 Condiciones óptimas de compactación y sinterización.....	101
2.4 Diseño experimental.....	105
2.5 Caracterización de los compósitos.....	106
2.5.1 Distribución de tamaño de partículas.....	108
2.5.2 Distancia entre partículas.....	108
2.5.3 Porosidad.....	111

CAPITULO 3
RESULTADOS
EXPERIMENTALES

1.1 Mezclado.....	113
3.2 Compactación.....	114
3.3 Sinterización.....	116
3.4 Dureza.....	118
3.5 Pruebas de desgaste.....	120
3.6 Distribución de tamaño de partículas.....	164
3.7 Distancia entre partículas.....	172
3.8 Porosidad.....	191

CAPITULO 4
ANALISIS Y DISCUSION
DE RESULTADOS

4.1 Compactación.....	194
4.2 Sinterización.....	194
4.3 Dureza.....	195
4.4 Desgaste.....	196
4.5 Distribución de tamaño de partículas.....	204
4.6 Distancia entre partículas.....	205
4.7 Porosidad.....	207

CAPITULO 5
CONCLUSIONES
Y RECOMENDACIONES

<i>5.1 Conclusiones</i>	209
<i>5.2 Recomendaciones</i>	210

CAPITULO 6
BIBLIOGRAFIA

<i>Bibliografía consultada</i>	213
--------------------------------------	-----

APENDICE

<i>A</i>	216
----------------	-----

APENDICE

<i>B</i>	232
----------------	-----

RESUMEN

El presente trabajo tiene objetivo principal el ofrecer una ruta alterna para la obtención de compósitos de matriz metálica. Por lo que se llevó a cabo la fabricación de dos compósitos de matriz de aluminio, uno con partículas reforzantes de grafito y otro con Alfa-alúmina.

Se utilizaron dos grados distintos de polvo de aluminio, grado 104(45-75 μm) y grado 120(65-75 μm); y partículas reforzantes malla 200 y malla 250 (75 y 65 μm respectivamente), adicionadas en un 5, 10, 15 y 20% en volumen. Se determinaron también las condiciones óptimas para la compactación (carga adecuada a aplicar), tiempo y temperatura de sinterización.

Para la caracterización de los compósitos obtenidos se efectuaron las pruebas de dureza, distribución de tamaño de partículas, desgaste, distancia entre partículas y la determinación del porcentaje de porosidad.

Industrialmente las aplicaciones comerciales de los compósitos son en áreas críticas de piezas para las industrias aeronáutica, automotriz, militar y aeroespacial entre las más importantes.

De los resultados obtenidos se observó, por ejemplo, el bajo contenido de porosidad y la buena distribución de las partículas reforzantes en los compósitos obtenidos, así como la mejor resistencia al desgaste para determinados % en volumen. de partículas adicionadas en comparación al aluminio puro.

También se observa un incremento en la dureza con respecto al aluminio obtenido por fundición que es de 17 Brinell (Kg/mm²) con el obtenido en este trabajo por pulvimetalurgia que fue de 34.63 Brinell, con 10.7 Ton. de compactación y 610°C de sinterización.

INTRODUCCION

Los compósitos (materiales compuestos) de matriz metálica han adquirido un gran interés en el área de nuevos materiales y desarrollo tecnológico, esto por las propiedades físicas y mecánicas que se logran obtener al mezclar un material metálico (matriz) y partículas de refuerzo (cerámicas). Es posible producir compósitos los cuales estén libres de defectos y mostrar al mismo tiempo una buena adhesión entre la matriz y las partículas reforzantes.

Actualmente se dispone de técnicas para la fabricación de los compósitos en las cuales se incorporan las partículas a la matriz metálica cuando se encuentra fundida, pero, en tales procesos se presentan dificultades para su incorporación por lo que resultan ser complicados. Por ésta razón en el presente trabajo se utiliza la pulvimetalurgia como ruta alterna para la fabricación de los compósitos, ya que éste proceso resulta ser muy eficiente.

Para la fabricación de los compósitos se partió de polvo de aluminio con un rango de tamaño de 45-100 μm , así como C(grafito) y $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ en partícula, los cuales fueron adicionados en 5, 10, 15 y 20% en volumen a la matriz metálica. La partícula de refuerzo se utilizó en dos tamaños diferentes (75 y 63 μm) por separado.

Obtenidos los compósitos se llevó a cabo su caracterización mediante análisis metalográfico (con microscopía óptica y electrónica) y pruebas mecánicas, esto con la finalidad de evaluar la distribución y la adhesión del cerámico a la matriz, así como su influencia en la dureza y resistencia al desgaste.

CAPITULO 1

ANTECEDENTES

1.1 INTRODUCCION A LOS COMPOSITOS

Un material compuesto ó compósito puede ser definido como una combinación macroscópica de dos ó más materiales distintos que tienen una interfase reconocible entre ellos, es decir que se observa que son mutuamente insolubles (1). De cualquier modo, debido a que los compósitos son generalmente utilizados por sus propiedades estructurales, la definición puede restringirse a incluir únicamente a aquéllos materiales que contengan elementos reforzantes ya sea en forma de fibras ó partículas dentro de un material que sirve de soporte conocido como matriz.

Por lo tanto los compósitos comúnmente contienen una fase a base de fibras discontinuas ó partículas reforzantes las cuales hacen que ésta sea más dura y resistente con respecto a la otra fase continua que es la matriz, incrementándose así las propiedades finales del material.

Los compósitos pueden ser divididos ó clasificados de distintas maneras:

Una manera simple de clasificarse consiste en separarlos de acuerdo a la forma del elemento reforzante teniendo entonces:

- 1.- Compósitos con partículas reforzantes*
- 2.- Compósitos con fibras reforzantes*
- 3.- Compósitos laminares*

A su vez los compósitos con fibras reforzantes pueden ser nuevamente divididos dentro de aquéllos que contengan fibras continuas ó discontinuas.

Un reforzante es considerado como "partícula" si todas sus dimensiones son aproximadamente iguales. Por lo tanto los compósitos con partículas reforzantes están constituidos por esferas, hojuelas y muchas otras formas axialmente iguales.

Los compósitos con fibras contienen reforzantes que tienen longitudes mucho mayores a las dimensiones de su sección transversal. Tales compósitos son considerados de fibras discontinuas ó fibras cortas conforme varía la longitud de la fibra.

Los compósitos laminares son todos aquéllos que están compuestos de dos ó más capas en forma de laminillas, las cuales resultan difíciles de observar con precisión como una fase continua en tres dimensiones.

Desde hace mucho tiempo el hombre se ha preocupado por desarrollar nuevos materiales que posean mejores características con respecto a los ya existentes, pero con un menor costo en su proceso de producción.

Fué entonces que se dió cuenta que si mezclaba en un mismo producto, dos ó más materiales distintos, cuyas características mecánicas se pudieran combinar, las propiedades de este nuevo material se verían mejoradas con respecto a los materiales originalmente utilizados, ya que este compuesto contenía incorporadas algunas de las propiedades de cada uno de sus constituyentes.

De aquí surge la idea de buscar materiales cuya combinación de sus propiedades, nos permita obtener un compuesto de mejor calidad, procurando en esta búsqueda que sean más resistentes y ligeros, para mejorar su funcionamiento, y eliminando el peso adicional.

El aluminio y sus aleaciones cumplen con las características de ligereza, pero carecen de ciertas propiedades físicas y mecánicas (como la resistencia al desgaste) de otros metales como el acero y el bronce.

Por tal motivo se realizan investigaciones en las cuales se adicionan distintas cantidades de cerámicos, tales como el grafito, alúmina, carburo de silicio, etc., en forma de partículas, fibras ó laminillas a un metal base como el aluminio para mejorar considerablemente sus propiedades mecánicas.

Las propiedades mecánicas de un compuesto dependen de muchos factores, entre ellos tenemos (2):

- 1.- Propiedades específicas de la matriz*
- 2.- Propiedades específicas de los elementos reforzantes*
- 3.- Cantidad adicionada de refuerzo (fracción en volumen)*
- 4.- Forma de los elementos reforzantes*
- 5.- Tamaño de los elementos reforzantes*
- 6.- Distribución de los elementos reforzantes*
- 7.- Orientación (solamente en el caso de adicionar fibras)*
- 8.- Enlace existente entre los elementos reforzantes y la matriz.*

La unión existente entre los elementos reforzantes y la matriz metálica contribuye de manera notoria en los compósitos obtenidos, pero ésta se ve afectada por la solubilidad y la humectación que exista entre la matriz y el elemento de refuerzo (partícula, fibra ó laminilla).

1.2 PROCESOS DE FABRICACION DE COMPOSITOS DE MATRIZ METALICA CON PARTICULAS REFORZANTES (CERAMICOS)

Existen dos rutas principalmente para la producción de compósitos y éstas son (3) (Figura 1):

1.- Utilización de metales líquidos (Fundición).

2.- Métodos en estado sólido, en donde se mezclan polvos metálicos con polvos cerámicos (reforzantes) y ambos se prensan para obtener un producto final (Pulvimetalurgia).

Para ambas rutas es importante que exista una distribución homogénea de las partículas reforzantes en la matriz metálica ya que de ello dependerá que se obtengan las propiedades requeridas.

La ruta más común y la más estudiada es aquella en donde se utilizan metales líquidos (Fundición), pero en dicha ruta existe una serie de problemas para obtener una dispersión homogénea de partículas reforzantes entre los cuales se mencionan a continuación los siguientes:

1.- Rechazo de la fase cerámica por la fase líquida, debido a una incompatibilidad entre ellas. Esto es por la poca habilidad de humectación del cerámico con el metal líquido.

La humectación dependerá de variables, tales como el calor de formación de las reacciones químicas interfaciales, tiempo de contacto y la temperatura del metal líquido (4).

2.- Distribución heterogénea de la segunda fase, debido a la diferencia de densidades de los constituyentes (densidades diferentes provocan un asentamiento ó flotación de las partículas en el metal).

3.- Viscosidad del metal líquido.- Puede ó no permitir el movimiento de las partículas en el metal fundido.

4.- Velocidad de enfriamiento durante la solidificación.- Si ésta es alta, las partículas no tienen tiempo para distribuirse de manera homogénea ó, dependiendo del método, puede ocurrir que las partículas queden distribuídas adecuadamente y una velocidad rápida evitaría que se rompa esa distribución. Algo similar podría ocurrir si habláramos de una velocidad baja de enfriamiento.

5.- Floculación de partículas.- No puede existir una distribución homogénea debido a alguna aglomeración ó aglomeraciones de partículas.

Existen varias técnicas de mezclado que son utilizadas para introducir y tratar de dispersar de manera homogénea partículas reforzantes en una matriz metálica, siendo algunas de ellas, las que se mencionan a continuación (4):

a) Adición de partículas con una agitación vigorosa del metal fundido (agitación en el crisol).

b) Inyección de polvos (cerámicos) transportados por un gas inerte en el metal fundido con una pistola de inyección.

c) Dispersión de pellets (bolitas) ó briquetas formados por compresión de polvos de la aleación base y cerámicos dentro del metal fundido agitando ligeramente.

d) Adición de polvos en una aleación fundida agitados electro-magnéticamente promoviendo un flujo turbulento que permita una suspensión uniforme.

e) Dispersión de partículas por centrifugación en el metal fundido.

f) Dispersión de partículas por el efecto de inyectar un gas inerte al metal fundido.

Para la fabricación de compósitos por la ruta de fundición existen varios procesos, cada uno con sus propias técnicas, ventajas y desventajas, entre los cuales se mencionan los siguientes: Fundición a presión, Colada vibracional, Infiltración al vacío, Colada centrifuga, Método del vortex, etc.

Para la obtención de compósitos de matriz metálica se ofrece como ruta alterna a la ruta en estado sólido ó pulvimetalúrgica, la cual debe poseer las siguientes cualidades para poder aplicarla a nivel industrial:

- 1.- El producto que se obtenga deberá estar libre de defectos.*
- 2.- El material cerámico reforzante deberá estar distribuido de manera homogénea en la matriz.*
- 3.- La fabricación del producto deberá ser relativamente fácil.*

Con el objetivo de satisfacer lo arriba antes mencionado, en el presente trabajo se ofrece como ruta alterna la pulvimetalurgia (Metalurgia de polvos) la cual consta de las siguientes etapas (Figura 2):

- 1) Producción ó selección de polvos.*
- 2) Mezclado.*
- 3) Compactación.*
- 4) Sinterización.*
- 5) Operaciones secundarias.*

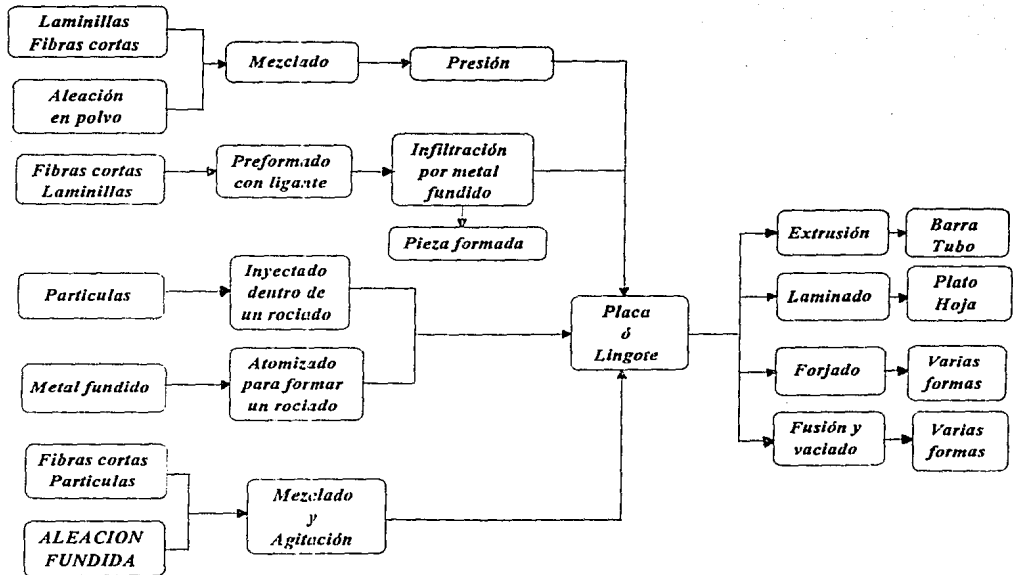


Figura 1 .- Rutas de procesos para la producción de compósitos.

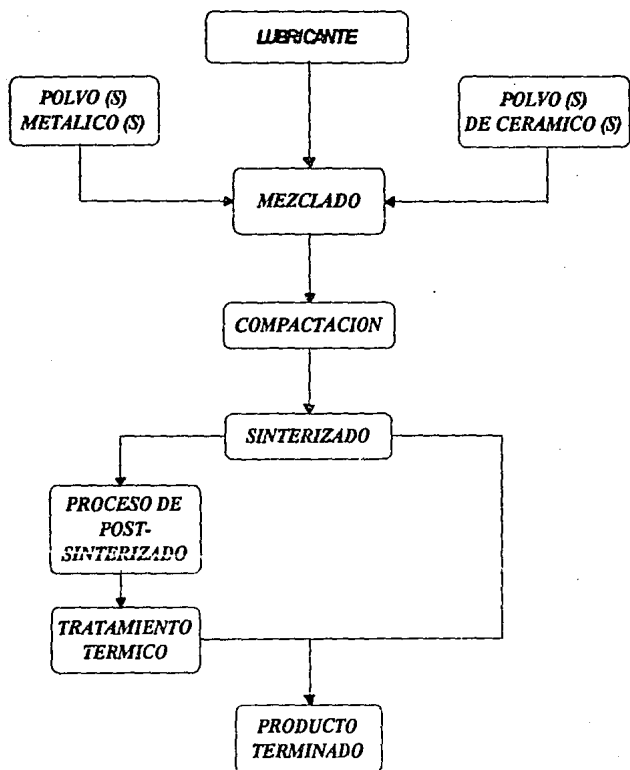


Figura 2.- Secuencia de operaciones de la pulvimetalurgia.

1.3 SELECCION DE COMPOSITOS

La selección de un material compuesto ó compósito para ser utilizado como un componente ó en un conjunto de piezas comienza por el conocimiento de los requerimientos del cliente, la capacidad para su elaboración, y las características de la materia prima que surten los proveedores.

Los requerimientos del cliente por un producto incluyen entre otras cosas el tamaño real, la forma, el peso, el acabado, el costo, el volumen, la repercusión al medio ambiente, la transportación, el buen funcionamiento, satisfacción del cliente, la buena calidad, y el fácil mantenimiento.

A continuación se hace una definición más detallada de los parámetros que hay que tener en cuenta para una buena selección de un compósito según los requerimientos de cada cliente:

1) Buena apariencia visual.- La materia prima cuando es procesada y terminada deberá exhibir una superficie agradable a la vista y al tacto, además de proyectar una imagen de funcionalidad, durabilidad y alta resistencia como producto final.

2) Compatibilidad con el material a ensamblar.- El material ya terminado deberá coincidir interfacialmente con los demás componentes ó piezas en términos de las tolerancias dimensionales, acabado superficial, unión, desgaste superficial, etc.; para que satisfagan el buen funcionamiento del producto.

3) **Fácil fabricación.**- La fabricación deberá ser una labor no muy complicada y de acuerdo al equipo y materia prima con que se cuenta.

4) **Bajo costo.**- El costo total de la materia prima, el conformado, el terminado, así como el proceso de ensamblaje deberá ser lo más accesible posible para obtener un producto final.

5) **Buena calidad.**- El producto terminado deberá estar libre de defectos superficiales (grietas, hoyos e inclusiones), así pues deberá estar también dentro de las tolerancias y dimensiones especificadas.

6) **Buen rendimiento.**- El producto final ya ensamblado deberá tener un buen funcionamiento y un período de vida útil aceptable, proporcionando así pues las características de operación especificadas por el cliente.

7) **Buenas propiedades (mecánicas, térmicas, físicas y eléctricas).**- Durante la operación del producto final éste deberá cumplir con los requerimientos mínimos de ciertas propiedades, tales como: la resistencia a la tracción, a la compresión, coeficiente de expansión térmica, densidad, etc.

8) **Infraestructura u bajo costo.**- Todas las facilidades del proceso, tanto para la materia prima, conformado, terminado y ensamble y todas las operaciones que éste involucra, así como el equipo, los edificios, las herramientas y el personal necesario deberán estar en un lugar fijo y cerca de los proveedores para evitar gastos innecesarios que hagan incosteable el proceso.

9) *Asesoría técnica profesional.*- Se deberá contar con el auxilio de personal altamente capacitado para que el proceso de fabricación de compósitos resulte adecuado, costeable y de buena calidad.

1.4 VENTAJAS DE LOS COMPOSITOS EN APLICACIONES ESPECIFICAS

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

Metales reforzados con fibras, como el compuesto Magnesio-grafito, pueden llegar a tener un coeficiente de expansión térmica tendiente a cero hasta temperaturas muy elevadas, resultando ser un excelente material con altas resistencias térmicas.

Cuando se tienen partículas en lugar de fibras continuas, las propiedades mecánicas no se ven alteradas de manera significativa, pero las propiedades tribológicas (resistencia al desgaste, fricción, etc.) muestran una gran mejoría.

La estabilidad dimensional de componentes estructurales elaborados con compósitos son de gran utilidad en equipos de rayos X, micrómetros, calibradores y partes para robots.

Los compósitos son capaces de disminuir las vibraciones acústicas y mecánicas con respecto a los metales convencionales.

Los compósitos de matriz metálica con partículas ó fibras de carbón (grafito) y/o alúmina diseñados para frenos, en combinación con su gran estabilidad dimensional, disminución de peso y características antrifriccionantes han tenido una gran aceptación en la industria aérea y en los autos de carreras.

1.5 PULVIMETALURGIA (METALURGIA DE POLVOS)

En la actualidad la pulvimetalurgia se ha convertido en una industria que se desarrolla ampliamente en los diferentes campos de la metalurgia; todo ello logrado a base de un intenso y sistemático estudio de sus características y posibilidades. Lo cual ha llevado a considerar a la pulvimetalurgia como: "La nueva dimensión en tecnología de materiales".

La pulvimetalurgia abarca las etapas comprendidas desde la obtención de polvos metálicos hasta las piezas acabadas, es decir, producción de polvos metálicos, mezcla, aglomeración ó compactación, sinterización y acabados.

1.5.1 METODOS PARA LA PRODUCCION DE POLVOS METALICOS

Los polvos metálicos son aleaciones ó metales puros finamente divididos en partículas, que son producidos por diferentes métodos, cada uno con sus propias características.

Los métodos empleados para la producción de polvos pueden ser divididos en las siguientes categorías:

- Métodos físicos*
- Métodos químicos*
- Métodos mecánicos*

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

METODOS FISICOQUIMICOS.- *Son procesos que de una u otra manera involucran cambios fisicoquímicos, reacciones, descomposiciones, etc.; para la producción de polvos (electrólisis, pirólisis, condensación).*

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

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

- El rendimiento del proceso no deberá ser menor del 75% en cuanto a la producción de polvo de grado comercial.

Dentro de las técnicas más apropiadas para producir polvos metálicos no ferrosos como el aluminio está el método de atomización.

La atomización (5) consiste en proyectar un chorro de metal ó de aleación fundida contra un fluido (aire, agua ó 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 precisión del fluido y otros factores de diseño (figura 3).



Figura 3 .- Obtención de polvos metálicos por atomización.

1.5.2 CARACTERISTICAS DE LOS POLVOS METALICOS

El objetivo de la pulvimetalurgia es la obtención de un componente metálico a partir de los polvos del metal. Por consiguiente es natural que las características de dichos polvos determinen las propiedades finales del componente y repercutan en las etapas de compactación y sinterización. Es decir, la calidad del producto y la economía del proceso de fabricación dependen de las características de los polvos.

A continuación se enumeran las principales características a tomar en cuenta:

1) Características del material

- a) Estructura*
- b) Densidad teórica*
- c) Punto de fusión*
- d) Plasticidad*
- e) Elasticidad*
- f) Pureza*

2) Características debidas al proceso de fabricación

- a) Densidad (porosidad)*
- b) Tamaño de partícula*
- c) Forma*
- d) Area superficial*
- e) Microestructura*
- f) Reactividad*
- g) Tipo y cantidad de defectos de red*
- h) Cantidad de superficie oxidada*

3) Características del polvo obtenido

- a) Tamaño medio de partícula*
- b) Distribución de tamaños*
- c) Forma promedio de partícula*

- d) *Distribución de las formas*
- e) *Superficie específica*
- f) *Densidad aparente*
- g) *Densidad semicompactada*
- h) *Fluidez*
- i) *Compresibilidad*

En la práctica normal de la pulvimetalurgia se presta especial atención a las siguientes propiedades:

1) **FORMA.**- *Depende básicamente del método de fabricación, obteniéndose formas esféricas, aciculares, irregulares, dendríticas, en forma de escamas, etc.*

2) **TAMAÑO DE PARTICULA.**- *El rango de tamaño usualmente varía entre 0.1 y 100 micrones.*

3) **POROSIDAD.**- *Indica el grado de compacidad de la partícula de polvo. Podemos distinguir dos tipos de porosidad, según donde se encuentre el poro ya sea en la superficie ó en el interior de las partículas del polvo, y que denominaremos porosidad externa y porosidad interna, respectivamente.*

4) **AREA SUPERFICIAL ESPECIFICA.**- *Se expresa en cantidad de área por unidad de peso (cm^2/g) y varía con el tamaño de partícula y es determinada por adsorción de gases. Debido a que las reacciones en la sinterización se inician en las superficies de las partículas, es importante considerarla.*

5) **ACTIVIDAD.**- Propiedad que determina la velocidad de difusión, absorción y reacciones similares; ésta se incrementa con la disminución de tamaño y depende de la forma, rugosidad, porosidad, etc.

6) **DENSIDAD SEMI-COMPACTADA Y DENSIDAD APARENTE.**- Desde un punto de vista práctico, éstas características representan un aspecto básico para el diseño de equipo. La densidad aparente es el peso por unidad de volumen del polvo suelto expresado en g/cm^3 , y determina el tamaño de la herramienta de compactación y la magnitud de desplazamiento de la prensa para lograr la densificación adecuada.

Algunas variables que afectan la densidad aparente son (6):

a) *La densidad aparente decrece:*

- 1.- *Al disminuir el tamaño de partícula*
- 2.- *Conforme la partícula es más irregular*
- 3.- *Al aumentar la rugosidad de la partícula*

b) *La densidad aparente puede manipularse, mezclando diferentes tamaños de partículas.*

La densidad semi-compactada (tap-density) es aquella que se obtiene sometiendo a la masa de polvo a una compactación que puede ser manual ó mecánica por medio de vibraciones ó volteando 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 ven sometidos a almacenaje y transporte.

7) **FLUIDEZ DEL POLVO.**- 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.

8) **COMPRESIBILIDAD.**- La compresibilidad del polvo es la reducción de volumen que se obtiene por prensado del mismo. La relación de compresión, se define como el cociente entre la densidad del polvo compactado en verde y la densidad aparente. Como es lógico, a una mayor presión aplicada le corresponde una reducción del volumen mayor, ó sea una mayor densidad en verde; por lo tanto, la relación de compresión es una relación asintótica que tiende a un valor máximo de la densidad.

1.5.3 TRATAMIENTOS DE LOS POLVOS METALICOS ANTES DE SER COMPACTADOS

La manipulación de los polvos, está encaminada a facilitar las etapas de la compactación y de la sinterización para mejorar las propiedades del componente acabado.

1.5.3.1 MEZCLADO

Una operación común, anterior a la compactación es el mezclado; por medio del cual se preparan los polvos para una compactación óptima.

Las condiciones de mezclado deben ser tales que permitan la obtención de las características deseadas sin detrimento de otras. Así pues los propósitos del mezclado son:

- a) Obtener una distribución uniforme del tamaño y forma de la partícula.*
- b) Cambiar propiedades como; la densidad aparente, la fluidez, etc.*
- c) Administrar lubricantes al polvo.*
- d) Mezclar polvos de materiales diferentes.*

Los principales defectos que se deben evitar son:

- 1) Un mezclado insuficiente.*

- 2) Un mezclado excesivo que produce:*
 - a) Una segregación de los componentes*
 - b) Endurecimiento de las partículas*
 - c) Degradación de las partículas*
 - d) Pegajocidad del lubricante*
 - e) Recubrimiento de partículas duras por finas*
 - f) Elevación de costos*

El equipo usualmente empleado en esta operación, son mezcladores de tipo "y" y de doble cono.

1.5.3.2 LUBRICACION

En la compactación, las condiciones de fricción juegan un papel muy importante en la compresibilidad de los polvos, el desgaste de la herramienta y la eficiencia del prensado; por lo tanto se desea una lubricación adecuada con la finalidad de incrementar la fluidéz del sistema para obtener una densidad más homogénea.

La lubricación se puede realizar de dos maneras:

1) LUBRICACION DEL MOLDE: Aunque se han propuesto sistemas de lubricación del molde para su aplicación a escala comercial, todavía se requiere un estudio más extenso en ésta área, para obtener un sistema óptimo que se adapte a las exigencias de la producción comercial.

2) ADICION DE LUBRICANTES AL POLVO: El sistema usual, es el mezclado de lubricantes en estado sólido con los polvos. Se ha estudiado mucho el efecto de los lubricantes sobre las propiedades de las piezas en verde y sinterizadas y se pueden hacer las siguientes observaciones:

a) Existe una cantidad óptima de lubricante para la cual la densidad aparente y la fluidéz son máximas.

b) En general, la resistencia en verde y en el sinterizado se ven disminuidas al aumentar el porcentaje de lubricante.

c) A mayor cantidad de lubricante, menor presión de eyección.

d) La temperatura de ignición de lubricante afecta las propiedades de las piezas sinterizadas.

e) El tipo de lubricante puede provocar variaciones en las dimensiones finales de las piezas.

f) La naturaleza del lubricante puede provocar daños a los hornos de sinterización.

La cantidad de lubricante empleado, normalmente varía entre 0.5% y 1.5% del peso total del polvo.

Por lo general, los lubricantes son eliminados en la etapa posterior a la compactación, que es la de sinterización.

1.5.4 LA COMPACTACION

1.5.4.1 CONCEPTO DE COMPACTACION

La compactación (6) es una etapa de la pulvimetalurgia que tiene por objeto dar forma y consistencia a la masa de polvo para su manipulación, con cuidado, desde su expulsión de la matriz hasta el paso por el horno de sinterización.

En esencia consiste en aplicar una presión suficiente a la masa de polvo (previamente tratada según aconsejen la naturaleza de la misma y las propiedades a conseguir) colocada en una matriz que es el negativo de la pieza terminada.

1.5.4.2 LAS FASES DE LA COMPACTACION

En la compactación se distinguen claramente tres fases: El llenado del molde, la compresión y la expulsión (Figuras 4 y 5).

En la fase de llenado, la cavidad de la matriz que es el negativo de la pieza acabada, se llena de polvo, previamente mezclado.

La cantidad de polvo se determina por volumen ó por peso. En la segunda fase la presión se ejerce con prensas mecánicas ó hidráulicas.

La expulsión del compacto se hace presionando con el punzón inferior ó por el desplazamiento de la matriz, siendo ésta la última fase de la compactación.

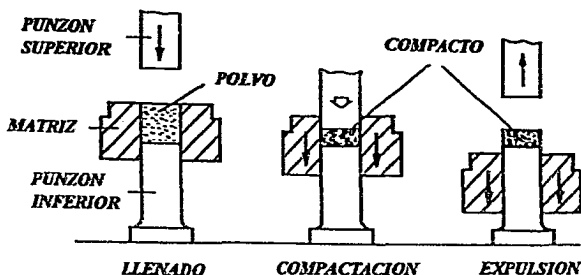


Figura 4 .- Etapas de la compactación: Llenado de la matriz, compresión del polvo ó polvos y expulsión del compacto.

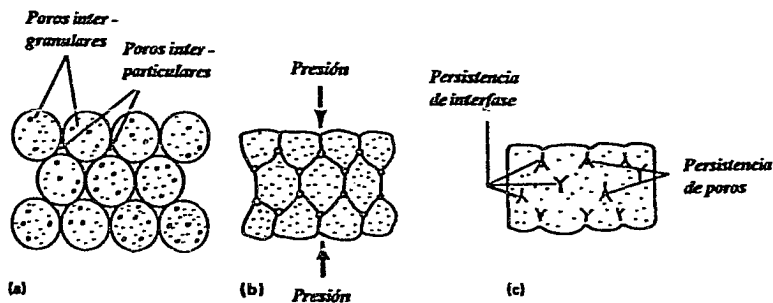


Figura 5 .- Los 3 estados de la compactación a nivel microscópico. (a) Estado inicial del polvo(s), (b) Deformación del polvo(s) y (c) Pieza ya compactada.

1.5.5 METODOS DE COMPACTACION

Existen varios métodos para lograr la consolidación de polvos metálicos, los cuales se llevan a cabo bajo la aplicación de presión ó sin ella.

1.5.5.1 METODOS APLICANDO PRESION (Figura 6):

a) Presión aplicada por un solo lado.- La presión de compactación sólo se aplica a la masa de polvos por el punzón inferior.

La distribución de la densidad en el compacto no es homogénea, debido a que la masa de polvos no cumple con las propiedades hidrodinámicas del Principio de Pascal (la presión ejercida en un punto cualquiera de una masa líquida ó gaseosa, se transmite, íntegra y por igual, en todas direcciones).

b) Presión aplicada simultáneamente por los dos extremos.- La matriz está equipada con dos punzones móviles, uno inferior y otro superior. Se consigue una densidad más homogénea que en el caso anterior.

Este es el método ideal, pero en la práctica es el más difícil de conseguir.

c) Matriz flotante.- En este caso la matriz está unida a la base por un muelle. La presión se aplica por el punzón superior de manera que la fuerza de fricción de la masa de polvo con las paredes de la matriz obligan al desplazamiento de ésta hacia abajo. El efecto resultante es parecida al del caso anterior, en el que dos punzones actuaban simultáneamente por los dos extremos.

d) *Presión aplicada por la matriz y por el punzón superior.* - La presión se aplica simultáneamente al punzón y la matriz en el mismo sentido, pero con distinta velocidad, de manera que una vez finalizada la carrera queda al descubierto el compacto.

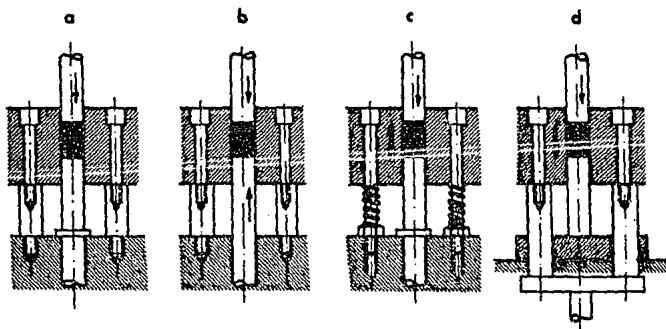


Figura 6 .- Distintos procedimientos de transmisión de la presión a la matriz.

a) *Presión aplicada por un sólo lado.*

b) *Presión aplicada simultáneamente por los dos lados.*

c) *Matriz flotante.*

d) *Presión aplicada por la matriz y por el punzón superior.*

1.5.5.2 METODOS SIN APLICACION DE PRESION:

Con el desarrollo de la pulvimetalurgia, nuevas ideas y métodos que se empleaban en otros campos, principalmente en la cerámica, se introdujeron a prueba.

El aprovechamiento de la característica principal de la pulvimetalurgia, la porosidad dió origen a varios procesos que sin la aplicación de presión permiten la consolidación de los polvos, en productos útiles.

1.5.5.3 SINTERIZACION DE LOS POLVOS EN EL MOLDE (COMPACTACION POR GRAVEDAD).- *Consiste en llenar un molde de la forma requerida, con el polvo de características seleccionadas y sinterizarlo.*

Su aplicación principal es en la fabricación de piezas porosas, principalmente para filtros. El control preciso del proceso, permite la obtención de las propiedades adecuadas y una alta calidad.

Entre las desventajas más sobresalientes se encuentran:

- 1) Necesidad de moldes químicamente inertes a elevadas temperaturas, para ello se emplean usualmente grafito, óxidos, carburos y cerámicos.*
- 2) Dificultad en la remoción de la pieza después de la sinterización.*
- 3) Llenado adecuado de moldes complejos.*
- 4) Sensibilidad del polvo a las vibraciones.*
- 5) Necesidad de grandes cantidades de moldes para tener alta producción.*
- 6) Elevado grado de encogimiento.*

1.5.6 ASPECTOS FUNDAMENTALES DE LA COMPACTACION

El proceso más importante en el mecanismo de compactación es la formación de áreas de contacto. Estos puntos son el producto de etapas sucesivas durante la aplicación de presión, los cuales pueden surgir ya sea por difusión, entrelazamiento de partículas ó adhesión. Si bien estas teorías se han separado para su estudio, se puede considerar que en los procesos se involucran todas.

ENTRELAZAMIENTO DE PARTICULAS.- *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 sí 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.*

Se considera que una partícula de forma irregular es el caso ideal, porque esta superficie favorece el anclaje entre partículas, lo que confiere a la pieza la razón de compresión deseada.

ADHESION.- *Cuando las partículas se acercan a una distancia menor de 50 nanómetros una de otra, ocurre una adhesión debido a la captura de valencias de superficies libres y fuerzas electrostáticas de Van der waals.*

Este efecto es el más notorio en partículas finamente divididas y es posible comprobarlo en métodos de molienda, donde ya no es posible una mayor separación de partículas, ya que éstas están fuertemente adheridas por éstas fuerzas.

1.5.7 ETAPAS DE COMPACTACION

La relación entre la presión aplicada a un polvo dentro de un molde y la densidad del compacto resultante tiene gran importancia en la práctica y la teoría del prensado en frío. La densificación ó empaquetamiento es el resultado de varios procesos que para su estudio se separan en las siguientes etapas:

1ª) Se llenan espacios entre partículas grandes por partículas de menor tamaño.

2ª.) La presión aplicada se usa en vencer las fuerzas de fricción entre las partículas y las paredes del molde. En esta etapa hay un deslizamiento y rotación mutua de partículas, así como el rompimiento de puentes de enlace.

3ª.) En esta etapa hay un aumento en la superficie de contactos como consecuencia de la deformación de las partículas en las zonas de contacto. En forma progresiva va disminuyendo el movimiento entre partículas y con posterior aplicación de presión las partículas ya deformadas plásticamente aumentan su resistencia a deformaciones subsiguientes.

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

1.5.8 FUERZAS DE FRICCIÓN DURANTE LA COMPACTACION

El carácter de la superficie determina las fuerzas de fricción que aparecen durante el proceso de compactación entre partícula y partícula. El proceso de fabricación determina la forma y textura de la superficie. Los diferentes tipos de fuerza de fricción son:

- *Fricción entre partículas*
- *Fricción entre las partículas y las paredes de la matriz*
- *Fricción entre el punzón móvil y las paredes de la matriz*
- *Fricción interna entre las partículas durante la deformación*

Los factores que afectan las pérdidas por fricción durante la compactación son un problema, que en casos extremos representa hasta 0.75 veces (3/4 partes) de la presión aplicada. Estos factores son:

- *Coefficiente de fricción entre el material del polvo y el molde*
- *Cantidad de partículas, que es función del tamaño y forma de las partículas*
- *Acabado de la superficie de la matriz y punzones*
- *Velocidad y tiempo de aplicación de la presión*

1.5.9 INFLUENCIA DE LAS CARACTERISTICAS DEL POLVO DURANTE LA COMPACTACION.

Para partículas con superficie específica grande (tamaño pequeño) ó de superficie rugosa se obtiene una buena compactabilidad, sin embargo en el primer caso aumentan las fuerzas de fricción y en el segundo se crean porosidades.

Los polvos que tienen baja densidad aparente requieren un ciclo mayor de compactación y cavidades más profundas para producir un aglomerado de dimensiones y densidad determinadas. La tendencia del comprimido a contraerse durante el sinterizado parece disminuir al aumentar la densidad aparente. En algunos casos los compactos se expanden durante el sinterizado; tal comportamiento se ha atribuido a la expansión del aire atrapado durante la operación de prensado ó a otros gases que se forman durante la sinterización.

En el proceso de prensado es importante que la presión se aplique 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 compacto aumenta con la aplicación de presión.

Los efectos de la dureza de los polvos en la transmisión de presión, es que los polvos suaves transmiten más presión que los duros y en atención a su tamaño, las partículas pequeñas transmiten más presión que las gruesas, logrando una mejor prensabilidad.

La compactabilidad de una masa de polvo depende fundamentalmente de la plasticidad de las partículas, la cual va aumentando a medida que la aplicación de la presión aumenta.

Otro factor importante es la composición química de las partículas, puesto que la formación de películas ó inclusiones de óxidos tienden a disminuir la plasticidad, impidiendo la unión partícula-partícula, disminuyendo los puntos de contacto.

Sin embargo se debe considerar la forma de la partícula ya que las partículas esféricas tienen buena compactabilidad, porque las fuerzas de fricción son pequeñas, y los puntos de contacto son menores, lo cual influye al momento de sinterizar (ya que comparando compactos de partículas de forma irregular con otros de partículas esféricas en iguales condiciones de densidad en verde, se logran mayores densidades de sinterizado para las partículas irregulares).

Para hacer posible la expulsión de la pieza prensada se aplican presiones considerables en una dirección, la cual en muchos casos es contraria a la dirección de la compactación.

En algunas ocasiones el cuerpo prensado tiene zonas de densidad heterogénea, y en el momento en que parte del cuerpo prensado abandona el molde ó matriz tiende a dilatarse, mientras que el resto aún está retenido dentro del molde, por ésta razón en el transcurso de la expulsión se producen grietas. Por esto se recomienda sacar el compacto en un solo paso.

1.6 POROSIDAD DURANTE LA COMPACTACION

El efecto de porosidad sobre la densificación del material es muy importante. La creación de poros surge durante la compactación, permanece durante el sinterizado y la que queda después de éstos proceso se llama porosidad residual.

En muchos casos la aparición de porosidades no es del todo despreciable, como en el caso de la fabricación de filtros; por lo que más que eliminarla se desea controlarla, mediante el estudio de los mecanismos por los cuales se generan.

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

1.7 LA SINTERIZACION.

1.7.1 EL CONCEPTO DE SINTERIZACION

El sinterizado es un proceso que reduce el área superficial de las partículas de polvo y la fuerza motriz, en este caso es el exceso de la energía libre en la superficie de los polvos. El problema fundamental del sinterizado es explicar por cuáles mecanismos ocurre ésta reducción de energía.

El sinterizado ocurre cuando los polvos compactados en frío son calentados a una temperatura cercana a su punto de fusión, las partículas se sueldan unas con otras y la densidad del compacto cambia con respecto al tiempo. Este cambio en densidad puede ser una disminución ó un aumento de ésta.

1.7.2 CONSIDERACIONES TERMODINAMICAS

De acuerdo con la termodinámica, el estado estable a temperaturas por debajo del punto de fusión de un material dado, es la de un cristal con sus defectos en equilibrio. Por lo que en la temperatura de sinterización existirán múltiples vacancias y dislocaciones que constituyen los inevitables defectos en la red.

El compacto se aproxima al estado estable a temperaturas elevadas, con la cooperación de los mecanismos de transporte concernientes al sinterizado; y por el exceso de energía libre que existe en la superficie de todas las partículas así como la presencia de una energía de red también en exceso.

La energía de red se debe a 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.

La proporción relativa ó diferencia entre la energía superficial con la energía de red (dependiente de la geometría) es muy pequeña, aún con los polvos muy finos; mientras la energía superficial alcanza sólo unos cientos de calorías por mol, la energía de red puede ser del orden de varias kilocalorías por mol.

Por otra parte, desde el punto de vista "cinético", la movilidad atómica en estado sólido es función de la temperatura. Por lo tanto, para que las partículas de polvo puestas en contacto se sintericen es necesario que los átomos tengan cierta movilidad lo que se consigue aumentando la temperatura del sistema, produciéndose así más zonas de contacto. Además si la masa de polvos está formada por distintos elementos químicos, tienen lugar fenómenos de aleación al mismo tiempo que se produce la unión de las partículas.

1.7.3 ETAPAS DEL SINTERIZADO

En la sinterización se distinguen tres etapas :

1) El primer fenómeno observado en la evolución de un compacto que se está sinterizando es el crecimiento de los puentes de enlace. Las áreas de contacto de las partículas de polvo aumentan, ya que se sueldan íntimamente. Las dimensiones del compacto varían ligeramente porque los centros de las partículas se aproximan y la resistencia aumenta. Bajo la influencia de tensiones y exceso de vacancias, el crecimiento de los puentes de enlace se desarrolla cumpliendo una ley exponencial. Las fuerzas resultantes de la tensión superficial original mantienen los límites interparticulares en el plano de contacto.

2) En la etapa de densificación y crecimiento de grano, las partículas independientes empiezan a perder su identidad aumentando la densidad y los cambios dimensionales de la pieza.

3) En la etapa final aparecen los poros aislados debido a la coalescencia de las partículas. Los poros se redondean y desaparecen los pequeños, en tanto que los mayores crecen. Los cambios dimensionales y de densidad apenas son perceptibles.

Es difícil distinguir entre el crecimiento de los puentes de enlace y la densificación ya que ocurren casi simultáneamente. Por esto algunos autores consideran que se trata de la misma etapa (Figura 7).

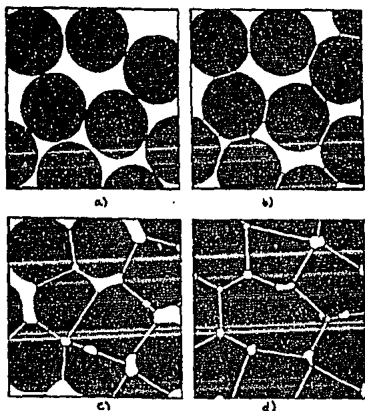


Figura 7 .- Desarrollo de las uniones interparticulares y transformacion del polvo durante el sinterizado. (a) Vaciado del polvo, (b) Estado inicial de unión de partículas (existe cierto grado de porosidad), (c) Estado intermedio (se empiezan a formar los límites de grano y la porosidad tiende a disminuir) y (d) Estado final (redondeamiento de poros y desaparición de los pequeños).

1.7.4 MECANISMOS DE LA SINTERIZACION

Los posibles mecanismos de la sinterización podemos clasificarlos de la siguiente manera:

1.7.4.1 SIN TRANSFERENCIA DE MATERIA: Solamente por adherencia.

1.7.4.2 CON TRANSFERENCIA DE MATERIA:

- 1) *Por difusión de la red a través de vacancias*
- 2) *Por difusión de la red a través de átomos intersticiales*
- 3) *Por difusión en los límites de grano*
- 4) *Por fluencia plástica*
- 5) *Por cizallamiento de los límites de grano*
- 6) *Por recristalización.*

1.7.5 MECANISMOS DE SINTERIZACION EN LA ETAPA DE LOS POROS INTERCONECTADOS.

a) *Difusión superficial.- Los átomos se mueven a lo largo de la superficie y se reúnen en los puntos de contacto entre partículas aumentando el radio de los puentes de enlace.*

b) *Evaporación-condensación.- En las zonas de contacto entre partículas donde hay mayor presión de vapor del metal, crece el radio de los puentes de enlace.*

c) *Difusión a través de la red.- Difusión de volumen.*

d) *Difusión-adhesión.- La adherencia tiene lugar al poner en contacto dos partículas bajo presión, lo que ocurre en la compactación. Se trata de un enlace débil.*

e) *Flujo plástico ó fluencia.*- Deformación a lo largo del puente de enlace como resultado de la tensión superficial.

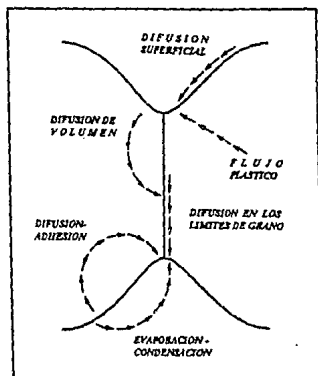


Figura 8 .- *Mecanismos de sinterización en la etapa de los poros interconectados.*

1.7.6 MECANISMOS DE SINTERIZACION EN LA ETAPA DE LOS POROS AISLADOS.

a) *Difusión superficial y evaporación-condensación.*- Estas ocurren simultáneamente. Los poros se redondean pero no tiene lugar el acercamiento de los centros de las partículas. No hay contracción.

b) *Difusión de volumen.*- Se reduce la porosidad total incrementándose el tamaño medio de los poros.

c) *Flujo plástico ó fluencia.*- Los poros se reducen por el peso del metal vecino.

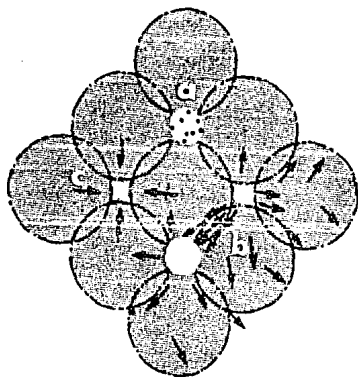


Figura 9 .- *Mecanismos de la sinterización en la etapa de los poros aislados.*

La difusión superficial es un mecanismo de sinteriación que ocurre cuando el compacto alcanza temperaturas del orden de $0.3 T_f$ (temperatura de fusión). En estas condiciones los átomos superficiales tienen suficiente movilidad para desplazarse, dirigidos por la tensión superficial, desde la zona convexa a la zona cóncava (Figura 9) de dos partículas de polvo que están sinterizándose. El resultado de este mecanismo es un aumento del espesor del puente 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, simultáneamente la evaporación y la condensación del metal. El cambio de fase predominante depende de la presión de vapor, que es mayor encima de una superficie cóncava ó menos convexa. Por esta razón se produce una disminución de la superficies convexas y un aumento de la superficies cóncavas.

No existe en este mecanismo acercamiento de los centros de partículas.

Cuando la temperatura en escala absoluta de sinterización es la mitad de la temperatura de fusión de los polvos, el mecanismo que adquiere mayor importancia es la difusión a través de la red.

Esta difusión es posible por las imperfecciones térmicas (vacancias y dislocaciones) existentes en los polvos metálicos ó generados en las etapas de mezcla, compactación y sinterización.

Las trayectorias de la difusión de vacancias van desde las zonas de máxima concentración de defectos a las zonas donde hay menor concentración, es decir de las fuentes de vacancias a los sumideros (tabla 1).

En la figura 10 están representadas las trayectorias de las vacancias en la sinterización de dos partículas esféricas.

FUENTE	SUMIDERO	EFEECTO
<i>I Superficie de cuello</i>	<i>Superficie partícula</i>	<i>No hay acercamiento de centros de partículas</i>
<i>II Superficie de cuello</i>	<i>Límite de grano</i>	<i>Hay acercamiento de los centros de las partículas</i>
<i>III Superficie de cuello</i>	<i>Dislocación</i>	<i>No hay acercamiento</i>
<i>IV Dislocación</i>	<i>Límite de grano</i>	<i>Hay acercamiento de los centros de las partículas</i>

TABLA 1 .- Dirección y efecto del desplazamiento de vacantes en la difusión de volumen.

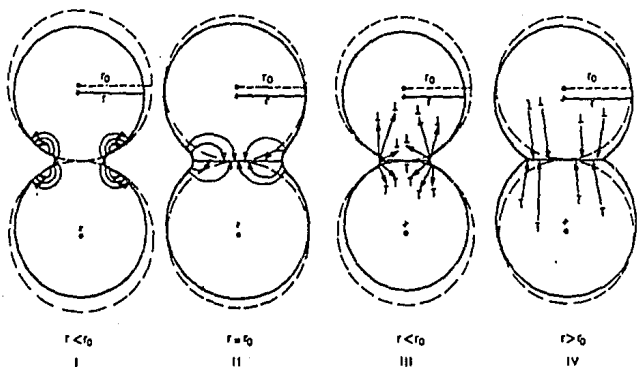


Figura 10 .- Probables trayectorias de difusión a través de las vacancias de la red en el experimento de modelos esféricos.

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

$$J = -DA(dC/dx)$$

Donde: J = Flujo del metal

D = Coeficiente de difusión

A = Superficie donde ocurre el flujo

dC/dx = Gradiente de concentración

El coeficiente de difusión depende de la temperatura, según la ecuación de Arrhenius: $D = D_0 \exp(-E_a/RT)$.

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

1.7.7 TRANSFORMACIONES DURANTE LA SINTERIZACION

Debido a los efectos de la compactación en frío, las partículas se encuentran bajo tensión y durante el ciclo de sinterización, se producen los fenómenos de recuperación, recristalización y crecimiento de grano, éste último de particular importancia en la sinterización por ser el que se realiza en mayor grado y por sus características metalúrgicas.

También se producen reacciones químicas, tales como oxidación, descarburación, etc., que afectan las condiciones superficiales e internas de las piezas, así como sus propiedades, además de las interacciones de la atmósfera con el refractario y elementos calentadores de los hornos.

Como una consecuencia de los cambios que suceden en la sinterización, se producen variaciones en la densidad y en las dimensiones de las piezas.

Una forma de evitar cambios dimensionales en las piezas, es tener una mezcla de polvos del mismo componente, pero con propiedades opuestas de expansión y contracción ó en el caso de mezclas la adición adecuada de aleantes.

1.7.8 VARIABLES QUE CONTROLAN EL PROCESO DE SINTERIZACION

Las dos variables más importantes son:

1.7.8.1 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 ó arriba de ésta las propiedades de resistencia son inferiores (Figura 11).

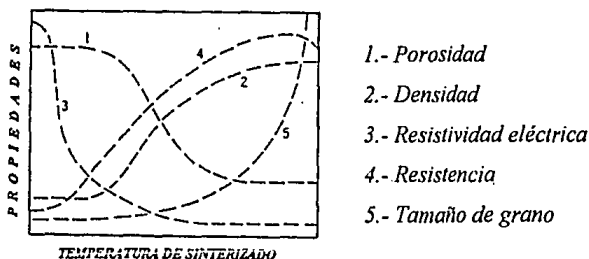


Figura 11 .- Efecto del sinterizado en varias propiedades.

1.7.8.2 EL 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.

1.7.9 POROSIDAD DURANTE EL SINTERIZADO

Se puede generalizar que los polvos finos tienen densidades menores en el sinterizado, pero con una distribución de porosidades más dispersa que las partículas gruesas, y que las partículas de forma irregular ó microporosas como las producidas por reducción de óxidos y variedades electrolíticas recocidas, las cuales sinterizan con mayores densidades que las formas redondeadas y angulares fabricadas por los procesos de atomización y fragmentación mecánica.

1.7.9.1 ASPECTOS PRACTICOS DE LA SINTERIZACION

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

a) Calentamiento y remoción de lubricantes.- Es práctica usual, remover los lubricantes empleados en la compactación en un paso anterior al de la sinterización. Dependiendo del tipo de horno, ésta remoción se puede realizar en forma independiente de la sinterización ó en el mismo horno.

b) Permanencia a la temperatura de sinterización.- Una vez realizada la eliminación del lubricante, evitando en lo posible una sinterización prematura; se lleva la pieza a la temperatura requerida, de acuerdo al material, donde es mantenida el tiempo necesario para una sinterización completa.

*c) **Enfriamiento.**- Es necesario realizar un enfriamiento de acuerdo a las propiedades que se requieran del material, evitando todo choque térmico que pueda distorsionar, fracturar ó producir oxidaciones al material final.*

1.7.9.2 ATMOSFERAS DE SINTERIZACION

En la mayoría de las operaciones comerciales de sinterización es común usar una atmósfera controlada que pueda cumplir con las siguientes funciones:

1) Prevenir cualquier reacción química entre el medio ambiente y las piezas a sinterizar.

2) Limpieza y purificación de los compactos.

3) Activar la sinterización.

4) Proveer uno ó más elementos que se puedan alear con los compactos ó mantener condiciones de equilibrio para no modificar su composición.

El tipo de atmósfera y las condiciones de sinterizado afectan directamente a las propiedades, cambios dimensionales y microestructurales del material, por lo cual es necesario seleccionar una atmósfera adecuada.

La atmósfera de sinterización puede ser neutra, oxidante, reductora ó al vacío. Los tipos más comunes de atmósferas son:

- | | |
|------------------------------|---|
| <i>a) Hidrógeno</i> | <i>b) Nitrógeno</i> |
| <i>c) Gas exotérmico</i> | <i>d) Gas endotérmico</i> |
| <i>e) Amoniacó disociado</i> | <i>f) Mezclas de H_2-N_2</i> |
| <i>g) Gas inerte</i> | <i>h) Vacío</i> |

En la pulvimetalurgia, el nitrógeno es el más comúnmente utilizado como atmósfera para el aluminio, debido a su alta pureza y una temperatura de rocío baja además de su moderado costo (6).

El amoniacó disociado también es muy utilizado en aplicaciones pulvimetalúrgicas de sinterizado de latón y partes de bronce y ahora también de aluminio pero debido a que éste contiene altas concentraciones de hidrógeno resulta ser peligroso porque es explosivo. Primero es necesario purgar el horno de sinterización con nitrógeno antes de introducir al amoniacó disociado (6).

1.7.9.3 HORNOS DE SINTERIZACION

En la actualidad los fabricantes de hornos se han preocupado por satisfacer las condiciones particulares de la pulvimetalurgia, aspecto importante que requiere una íntima relación entre comprador y diseñador, para lograr el diseño óptimo.

Los tipos de hornos más comunes son (6, 7):

1) Hornos discontinuos

- a) Tipo mufla
- b) Al vacío
- c) Tipo campana
- d) Tipo tubo

2) Hornos continuos

- a) De malla
- b) De rodillos
- c) Con empujador
- d) De viga caminante

Los hornos discontinuos son empleados con materiales en los cuales no importa la cantidad, sino la calidad y propiedades a obtener.

Para producciones y temperaturas altas (1350°C) son comunes los hornos con empujador y de viga caminante y para temperaturas medias (1000-1150°C) son empleados los hornos de rodillos y de malla.

1.7.9.4 CONTROL EN LA SINTERIZACION

Para obtener condiciones reproducibles, se requiere un control preciso, que permita lograr y mantener características similares en todas las operaciones para uno ó más lotes del mismo material.

Los dos aspectos fundamentales que necesitan un chequeo continuo para mantenerlos dentro del rango establecido, son:

1) La temperatura

2) La atmósfera

Para medir la temperatura, se utilizan termopares tipo Cromel-Alumel hasta temperaturas de 1090°C, Platino-Platino Rodio hasta 1530°C, pero generalmente para temperaturas superiores a 1370°C, son empleados pirómetros de radiación y termopares de Wolframio-Wolframio Renio.

En la selección se debe tener en cuenta el tipo de atmósfera de trabajo, rango de temperatura y la disposición en el horno debe ser tal, que facilite la correcta medición.

Para controlar la atmósfera se utilizan analizadores de gases, determinándose el punto de rocío, manteniendo una precisión de 0.05% para contenidos bajos de oxígeno.

1.7.9.5 TRATAMIENTOS POST - SINTERIZACION

Aunque una de las principales ventajas económicas de la pulvimetalurgia, es la producción de piezas con tolerancias aceptables después de la sinterización, las necesidades actuales requieren muchas veces que las piezas producidas sean sometidas a tratamientos posteriores. Además de que muchas piezas ya incluyen en su proceso uno ó más tratamientos adicionales como puede ser la impregnación en el caso de cojinetes autolubricantes, recubrimientos protectores, etc.

1.7.9.5.1 OPERACIONES DE CALIBRADO Y CONFORMADO

Una operación común después de la sinterización es el reprensado, el cual puede tener varias modalidades:

a) Cuando la sinterización fue realizada para obtener un compacto más ó menos resistente, se reprensa y se vuelve a sinterizar para lograr mayor densidad y tolerancia dimensional.

b) Reprensado para dar a la pieza una precisión dimensional más rigurosa.

c) Reprensado para incrementar la densidad, la resistencia mecánica y para mejorar el aspecto superficial.

Actualmente hay dos procesos de conformado de preformas sinterizadas, en productos con propiedades superiores a las normales en pulvimetalurgia. Estos procesos son la extrusión y la forja, los cuales están adquiriendo gran importancia tecnológica y comercial en la pulvimetalurgia hoy en día.

Se ha prestado especial interés a la forja de preformas, por ser un proceso competitivo tanto en economía como en propiedades con la forja convencional.

1.7.9.6 VENTAJAS DE LA FORJA DE PREFORMAS SINTERIZADAS.

a) Reduce el número de operaciones de control dimensional, consiguiéndose mejor acabado superficial.

b) Reduce las etapas de trabajo y permite trabajar a temperaturas y presiones más bajas.

c) Da lugar a microestructuras muy homogéneas, sin segregaciones ni impurezas, partiendo de polvos adecuados.

d) Aumenta la velocidad de fabricación.

Del lado de los inconvenientes podemos citar:

a) La necesidad de emplear un polvo de procedencia electrolítica ó atomizado de mayor pureza que el polvo reducido y aleado.

b) La estructura obtenida es más equiaxial que en la forja convencional.

1.8 VENTAJAS Y DESVENTAJAS DE LA PULVIMETALURGIA

Las ventajas de los procesos de metalurgia de polvos incluyen:

1) Conformado con dimensiones casi exactas.- La dimensión casi exacta del producto elimina en parte el maquinado posterior, aún cuando la forma sea compleja.

2) Reduce al mínimo las pérdidas de materia prima, puesto que sólo se usa la cantidad de polvo requerida para alcanzar el peso final.

3) Las operaciones pulvimetalúrgicas son susceptibles de automatización.

4) Es posible lograr buenos acabados superficiales, sin rebabas ni líneas de partición propias del moldeo.

5) Es la única técnica de aplicación que permite lograr una porosidad controlada y una oxidación interna muy repartida, apta para el endurecimiento.

6) Una característica importante es el bajo costo de producción, gracias a las dimensiones precisas y a que las formas complejas requieran poco ó ningún maquinado.

En la producción de cojinetes y bujes impregnados con aceite no se requiere maquinado y el costo de producción es más ó menos la quinta parte del de un cojinete obtenido por algún proceso convencional, ya sea fusión ó forja.

Las principales limitaciones que podemos anotar a ésta técnica son debidas a las características siguientes:

1) La forma de la pieza, la cual debe poder extraerse fácilmente de la matriz, con lo que se elimina una serie de posibilidades de diseño.

2) Las dimensiones. En efecto, las prensas normales no suelen sobrepasar las 500 Tm, lo cual limita la superficie de las piezas.

3) Las características mecánicas, pues a las piezas sinterizadas no se les puede exigir las mismas cualidades de alargamiento y resistencia que a las obtenidas por métodos convencionales.

4) La economía, ya que las matrices utilizadas en pulvimetalurgia se fabrican de acero aleado ó de carburo de tungsteno, que mejora el control dimensional, y sus acabados son muy difíciles de conseguir. En ambos casos resultan relativamente caras, incidiendo en el precio de los componentes obtenidos.

1.8.1 APLICACIONES DE LA PULVIMETALURGIA Y COMPOSITOS OBTENIDOS POR ESTA RUTA

a) INDUSTRIA AUTOMOTRIZ

Las aplicaciones automotrices de la pulvimetalurgia comienzan a mediados de los años 20's con el desarrollo de los cojinetes autolubricantes. Desde entonces la industria automotriz ha sido la principal consumidora de más del 50% del polvo de hierro utilizado en los Estados Unidos.

Proporciones ó cantidades similares son utilizados también en las industrias automotrices de Europa y Japón.

Después de la Segunda Guerra Mundial, cuando los productores de polvos abrieron sus mercados para la producción de herramientas, maquinaria agrícola, etc. El uso de partes pulvimetalúrgicas en la industria automotriz marcó un amplio dominio en los mercados con la introducción de nuevas aplicaciones.

En la figura 12 se puede observar un amplio rango de aplicaciones de la pulvimetalurgia en un automóvil moderno (6).

En Norteamérica la cantidad de material pulvimetalúrgico utilizado en un vehículo se ha incrementado de 7 kg. en 1977 a 11.8 Kg. empleados en 1993 (Tabla 2).

También se ha contribuido a la disminución del peso total del vehículo de 1663 Kg. a 1428 Kg. mediante el incremento de partes elaboradas con otros materiales como lo son los compósitos de matriz metálica, utilizando al aluminio en mayor cantidad como se puede ver en la tabla debido a su ligereza y propiedades así como la utilización de otro tipo de compósitos de tipo plástico.

Recientes estudios estiman que el uso de partes pulvimetalúrgicas en cada vehículo podría incrementarse a 12.2 Kg. en 1994 y 15.9 Kg. para el final de la década. Así pues para la siguiente década la pulvimetalurgia se convertirá en una industria muy competitiva en la rama automotriz debido a que se está desarrollando una nueva tecnología que es la de los compósitos obtenidos por esta nueva ruta (8).

MATERIAL	1993	1991	1987	1977
<i>Hojas, cintas ó tiras, barras de acero común</i>	624.2	608.3	661.8	904.9
<i>Acero de alta y mediana resistencia</i>	117.5	109.1	103.4	56.7
<i>Acero inoxidable</i>	19.7	16.8	14.5	11.8
<i>Otros aceros</i>	21.8	18.8	25.2	25.4
<i>Hierro</i>	186.6	195.5	208.6	244.9
<i>Plástico</i>	111.1	107.9	100.5	76.2
ALUMINIO	80.3	75.3	66.2	44.0
<i>Cobre, latón, bronce</i>	19.7	20.9	20.9	17.5
<i>Magnesio</i>	2.9	2.3	1.1	0.4
PARTES PULVI-METALURGICAS	11.8	10.6	8.8	7.0
<i>Zinc</i>	7.2	7.9	8.2	17.2
<i>Materiales aislantes</i>	61.0	61.5	61.5	68.0
<i>Vidrio ó cristal</i>	40.1	39.0	39.0	39.7
<i>Fluidos y lubricantes</i>	85.5	78.9	83.0	90.7
<i>Otros materiales</i>	39.0	34.7	38.8	58.1
TOTAL	1428.4	1387.5	1441.5	1662.5

TABLA 2 .- Kilogramos de material en un auto típico familiar.

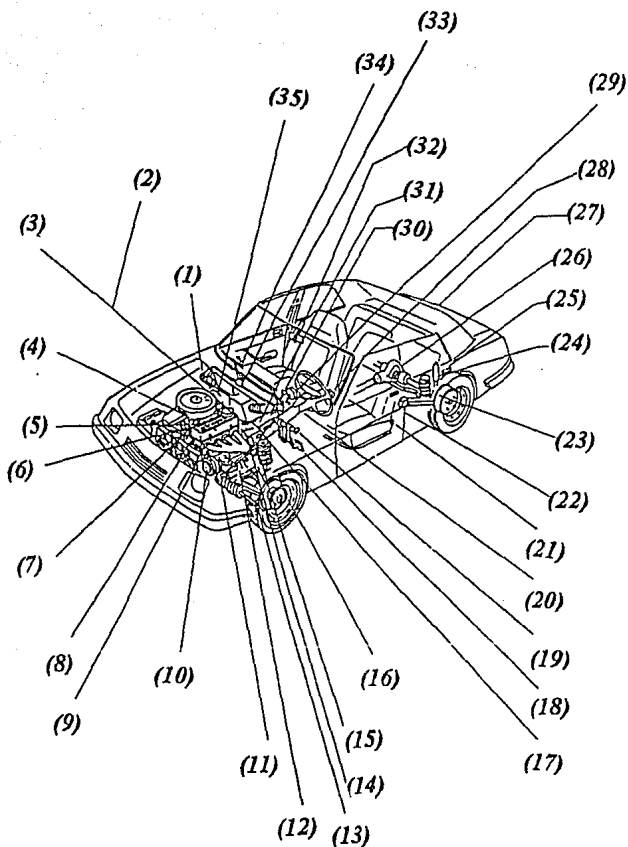


Figura 12 .- Partes pulvimetalúrgicas utilizadas en los automóviles.

Continuación figura 12:

(1) Poleas y engranes del motor del limpia-parabrisas

(2) Embrague de discos del clutch

Rotor frontal del clutch

Cojinete ó anillo intermedio del clutch

Poste sincronizador

Disco intermedio

Engranes de transmisión

Salida del poste del eje de transmisión

Inserto del sincronizador de transmisión

(3) Ejes, bujes y cojinetes de la transmisión

Cojinetes deslizantes de los rotores

Tolvas del sincronizador

Mecanismo del cojinete del velocímetro de transmisión

Recubrimiento del eje principal de la caja de velocidades

Espaceador de levas

Embrague del clutch

(4) Pistones para motor de: Al-C(g), Al-Si ó Al-Al₂O₃

(5) Partes del carburador

(6) Caja de la bomba de aceite

Rotores de la bomba de aceite

(7) Cojinetes del distribuidor

Puntos de contacto

Distribuidor de peso del balancín

Distribuidor de levas

(8) Engranaje impulsor de la bomba de aceite

(9) Rotores para el alternador y bomba de agua

Piñón del eje de levas

Caja del eje de levas

Soporte del eje de balance

Cremallera

Balancín (empuja válvulas)

(10) Poleas y chumaceras

Cojinetes espaciadores del alternador

(11) Cremalleras y cojinetes de la dirección

(12) Insertos del motor y caja de velocidades

(13) Unión de los soportes de la dirección

(14) Soportes del clutch

Soporte del eje de rotación de los cojinetes del clutch

- (15) *Cojinete del motor de la marcha*
Pieza terminal del electroimán del motor
- (16) *Soporte del cojinete del disco de frenado*
Suspensión del disco de frenado
Pistón del freno
- (17) *Manivela del eje del clutch*
Cojinete piloto del clutch
- (18) *Espaceador de la válvula de frenado*
- (19) *Pedales del clutch y freno*
- (20) *Guía de los ejes de embrague de la dirección*
- (21) *Pivotes reciclables del asiento*
- (22) *Tope de la portezuela*
- (23) *Accionador del mecanismo de frenado y carcasa*
Tuercas ajustadoras
- (24) *Amortiguador*
- (25) *Manijas de las portezuelas*

(26) Engrane de la caja del diferencial

(27) Cerradura de la cajuela

(28) Cerrojo del cinturón de seguridad

(29) Cojinetes del velocímetro

Abrazadera del velocímetro

Pieza electromagnética del velocímetro

(30) Pivote de apoyo para la palanca de velocidades

(31) Selector del cambio de velocidades

(32) Barra de soporte para el espejo retrovisor

(33) Engrane del motor del limpia-parabrisas y sus cojinetes

(34) Manija para abrir ó cerrar la ventanilla

(35) Cojinete conductor del motor

Rodamiento para el motor

b) METALES POROSOS

La pulvimetalurgia es el método más común para la producción de productos metálicos porosos, en los cuales la porosidad el tamaño y la distribución de los poros es controlada. Los tres grupos de metales porosos producidos comercialmente solamente difieren en la cantidad de porosidad contenida y éstos son:

1) Materiales metálicos en los cuales la estructura porosa sirve como lugar de depósito de lubricante, como los cojinetes autolubricantes.

2) Materiales metálicos en los cuales se tiene un control de la velocidad de permeabilidad de fluidos (líquidos ó gases) a través de la estructura porosa, la cual funciona principalmente como un filtro.

3) Materiales metálicos los cuales contienen una muy alta superficie interna que sirve como un electrodo poroso en baterías y otras celdas.



Figura 13 .- Conjunto de filtros obtenidos de polvo esférico de bronce.

c) PIEZAS FORJADAS DE PREFORMAS PULVIMETALURGICAS

Ejemplos de piezas forjadas de preformas son mostrados en las figuras 14, 15 y 16. En la figura 14 se observa tanto a la preforma como a la pieza forjada final en un engrane de clutch para una transmisión automática de un automóvil, obtenido mediante polvos prealeados de acero. En la figura 15 se observa a la izquierda varias partes de transmisión y a la derecha rodamientos para cojinetes, producidos en Estados Unidos.

Finalmente en la figura 16 observamos un grupo de partes forjadas hechas en Estados Unidos, Alemania, Suecia y Japón, indicándose el rango de tamaño y la gran variedad de formas que pueden obtenerse con ésta técnica.

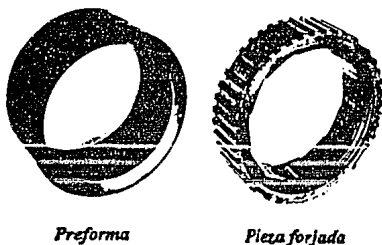


Figura 14 .- *Preforma y pieza forjada del rodillo inferior del eje del clutch de una transmisión automática elaborada por General Motors Company.*



Figura 15 .- Piezas forjadas para partes de transmisión y rodamientos de diversas formas y dimensiones.

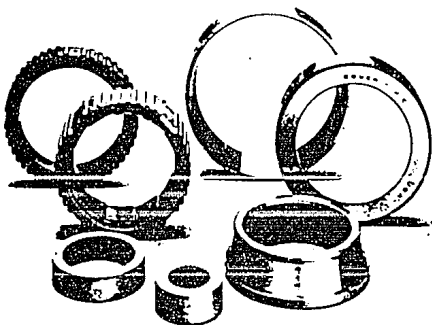


Figura 16 .- Partes forjadas de preformas pulvimetalúrgicas hechas en E.U., Alemania, Suecia y Japón.

d) MATERIALES ANTIFRICCIONANTES

Son aquéllos componentes de un mecanismo que convierten la energía mecánica en calor en un contacto deslizante. El producto convertido, es decir el calor, es absorbido ó disipado por el material antrifriccionante.

Los materiales antifriccionantes son producidos mediante le compactación y sinterización de mezclas de polvos metálicos y materiales cerámicos tales como: SiO_2 , SiC , Al_2O_3 , etc.

A continuación se muestran algunos ejemplos de la aplicación de materiales antifriccionantes.

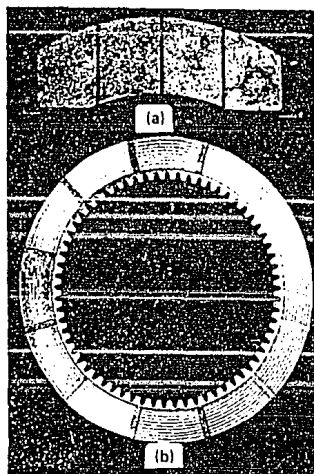


Figura 17 .- (a) Cojinete del disco de frenado y (b) Disco del clutch.

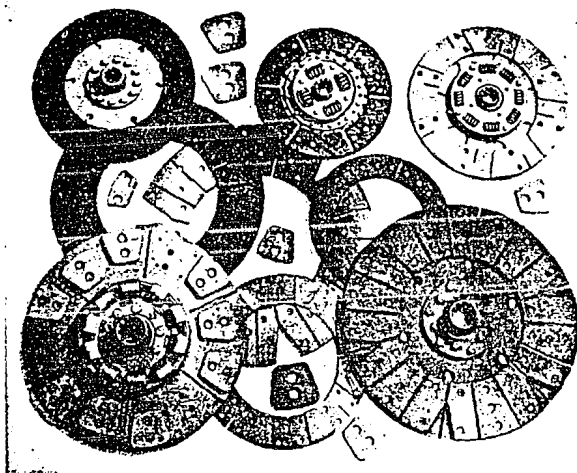


Figura 18 .- Juntas de cubiertas para fricción y botones de acero para frenos de avión.

e) APLICACIONES ELECTRICAS

Escobillas industriales de un compuesto metal-grafito los cuales transfieren una corriente eléctrica entre un elemento en rotación y otro estacionario en motores y generadores eléctricos de bajo y alto voltaje.

Estas escobillas son capaces de transportar 70 Amp/in^2 (100 Kamp/in^2), y se obtienen por vía pulvimetalúrgica utilizando como metal ó matriz cobre y grafito como reforzante.

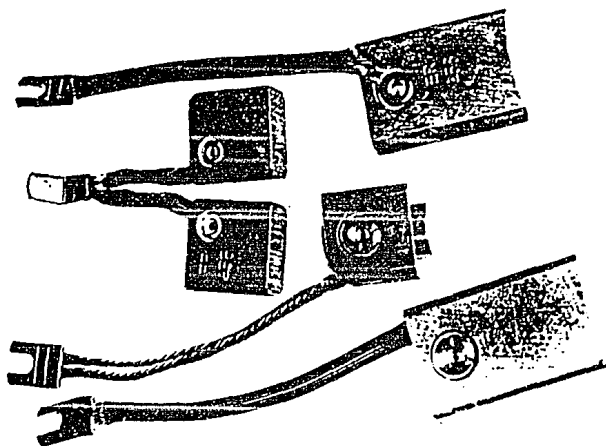


Figura 19 .- Escobillas industriales de un compuesto de matriz metálica con grafito como reforzante.

f) PRODUCTOS DE FORMAS COMPLICADAS

Piezas que requieren un maquinado considerable fabricadas por otra técnica. Por pulvimetalurgia se pueden fabricar grandes cantidades de piezas complejas como engranes, rotores, tuercas, etc. y debido a la precisión y fino acabado se elimina el proceso de maquinado disminuyendo al mismo tiempo el costo del producto final.

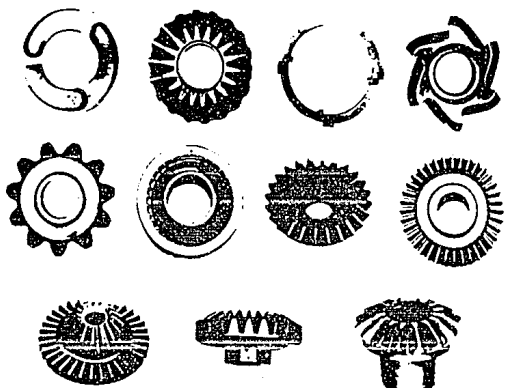


Figura 20 .- Engranés y rotores para diversos tipos de bombas producidos por pulvimetalurgia.

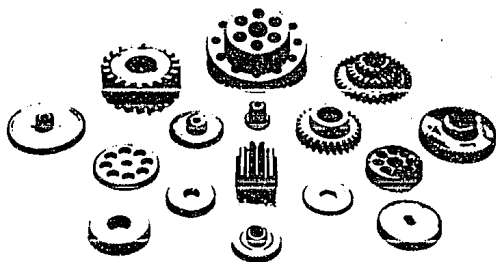


Figura 21 .- Engranés de diversas formas y dimensiones producidos por pulvimetalurgia.

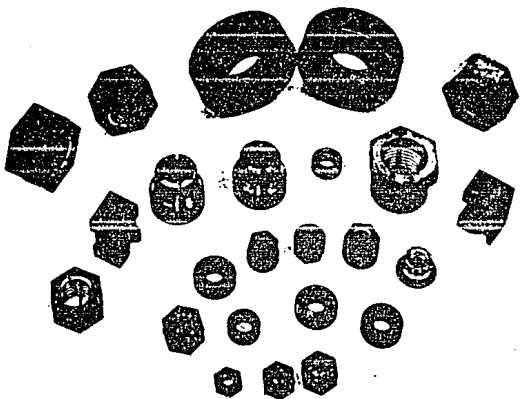


Figura 22 .- Tuercas y partes producidas por pulvimetalurgia compactadas en frio de Ti-6Al-4V.

1.9 DESGASTE

Un sistema tribológico está formado por dos ó más cuerpos en contacto superficial dinámico ó estático, y se gestan una vasta clase de fenómenos. La tribología estudia entre otras cosas, la adhesión, fricción, desgaste y lubricación de sólidos en contacto.

Según Vingsbo (9) las diversas definiciones de desgaste no son muy adecuadas, debido a que no abarcan toda la complejidad de éste fenómeno. Una definición aceptada de desgaste es: La remoción de material a partir de las superficies de un sistema tribológico, lo cual implica superficies en movimiento relativo bajo mecanismos de contacto.

Otra definición aceptada por la norma ASTM G40-88 es: El daño ocurrido en la superficie del sólido, que generalmente involucra pérdidas progresivas de material, debido al movimiento relativo entre las superficies de los cuerpos en contacto. Otros fenómenos como la deformación, reacciones químicas, ó fenómenos cíclicos son sólo casos particulares de determinados sistemas tribológicos.

Desgaste es el nombre genérico de una serie de eventos, por los cuales la pérdida de material tiene lugar. Por lo tanto el desgaste en un tribosistema ó sistema tribológico puede ser el resultado de un gran número de eventos con un número casi infinito de combinaciones. Existen muchos procesos y las interacciones de uno y otro es compleja (10), como se muestra en la figura 23.

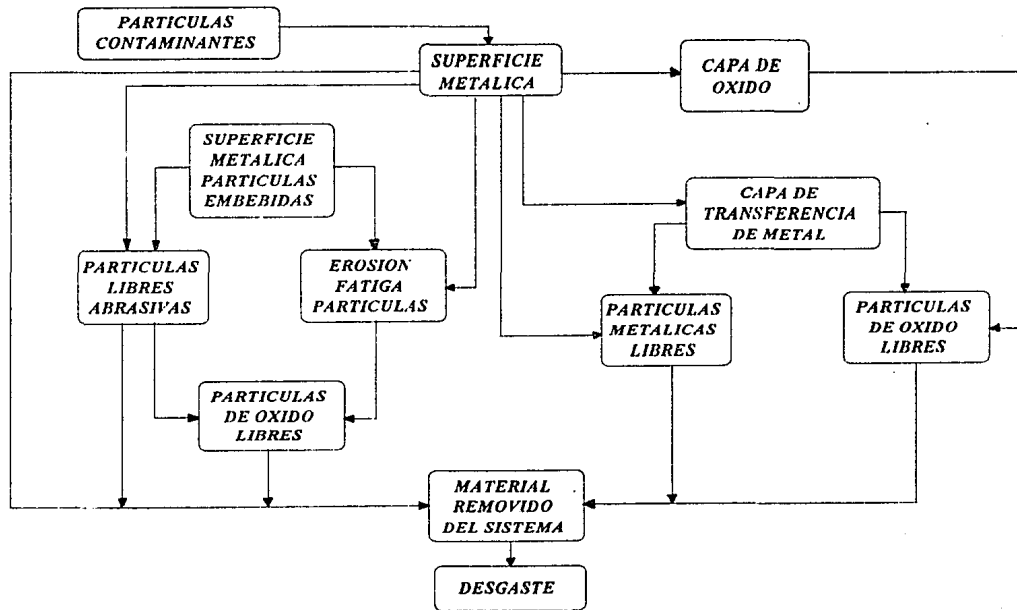


Figura 23 .- Esquema simplificado representando la relación entre varios procesos de desgaste.

El desgaste sigue una relación simple, llamada relación de Archard (12) que se expresa como:

$$K = V/S = W*P/H$$

Donde K es el factor de desgaste, V el volumen perdido, P es la presión ó carga aplicada, S es la distancia recorrida, H la dureza de indentación y W es una constante que dependerá del material y de las condiciones de la prueba. Esta constante, según el mecanismo de que se trate toma diferentes valores y significados. Se puede calcular, al realizar la prueba de desgaste, al tomar la dureza del material, ya que todos los términos que involucra la relación son conocidos.

1.9.1 FRACTURAS TRIBOLOGICAS Y MECANISMOS DE DESGASTE

Las superficies de los sólidos no son planas, sino que muestran irregularidades ó asperezas (como comúnmente son llamadas). Sólo los materiales frágiles que presentan clivajes a lo largo de planos cristalinos ó los monocristales presentan superficies regulares y planas.

Cuando los sólidos entran en contacto, ésto ocurre sólo en las asperezas. Bajo una carga aplicada, y dependiendo del material, puede ocurrir deformación, primero elástica y luego plástica en éstas asperezas. La deformación continuará hasta que el área de contacto real sea suficiente para soportar la carga. En este punto la deformación cesa.

Las áreas de contacto pueden formar uniones de acuerdo con las teorías de adhesión. Los contactos atómicos con ó sin contaminantes de la superficie admiten fuerzas de cohesión para crear uniones entre las partes del tribolismo. En movimiento deslizante, las uniones son continuamente deformadas, cortadas plásticamente y fracturadas, produciendo el desprendimiento de material y consecuentemente el desgaste.

Este es el fenómeno básico de fricción y el componente de fuerzas que actúa en la dirección del deslizamiento es la fuerza de fricción. Podemos observar que puede haber intercambio de material entre uno y otro de los componentes del sistema tribológico. Este es el mecanismo de adhesión presente en el desgaste.

Otro de los mecanismos que producen fractura y pérdida de material es el microcorte. Si una aspereza dura ó partícula se deslizan sobre la superficie de un material blando (bajo condiciones de las partículas ó alta dureza, etc.), actúa como una microherramienta de corte. Este mecanismo remueve material de la superficie por la formación de rebabas, fragmentos, etc. La profundidad y tamaño del zurco, depende del tamaño del elemento cortante.

Otro de los mecanismos que actúan en el desgaste es el impacto. Las condiciones normales de impacto son establecidas en la superficie mecánica de contacto bajo condiciones de percusión, con un ángulo de incidencia, el cual tiende a ser normal.

Si la energía transferida a la superficie no puede ser disipada como calor ó deformación plástica, la superficie se relaja formando fracturas por impacto. Esto requiere una alta densidad de energía y condiciones típicas de alta tensión durante una muy corta duración y un gran ángulo de incidencia. La fractura por impacto es el resultado de una percusión aislada y es más fácil de producir en un material frágil que en uno dúctil.

Durante movimientos cíclicos la superficie de un tribosistema puede estar sujeta a fenómenos de fatiga. Las fluctuaciones de carga pueden iniciar la sucesiva nucleación y crecimiento de fracturas por fatiga. La falla por fatiga resultante, representa otro de los mecanismos de las fracturas tribológicas.

Numerosas clases de fenómenos físicos y químicos interactúan con las fracturas tribológicas. Parte del trabajo de fricción es disipado generalmente como calor y el incremento de temperatura en pequeñas áreas de contacto puede ser muy alto dando lugar a otros fenómenos, como la soldadura, y en general a desviaciones a lo esperado en el comportamiento a temperatura ambiente.

Una combinación de alta concentración de deformación y alta temperatura activa una serie de cambios en la capa debajo de la superficie de contacto. Estos fenómenos internos que se pueden presentar son: Deformación plástica, cambios estructurales como cambios de fase en los metales, y cambios de composición química.

Además existen fenómenos externos, dependiendo de la interacción con la atmósfera que rodea al sistema tribológico, resultando la formación de una capa superficial, que se puede deber a:

a) Reacciones químicas; en el aire las superficies limpias, son cubiertas con una capa de óxido ó por componentes de corrosión.

b) Adsorción; las moléculas de gases predominantemente vapor de agua, se unen a la superficie de metal por adsorción y forman una segunda capa sobre la capa anterior. Estas capas evitan la formación de uniones minimizando el desgaste en sistemas aparentemente no lubricados.

1.9.2 TIPOS DE DESGASTE

Uno de los aspectos presentes en el desgaste es el movimiento relativo entre los componentes. Este puede ser unidireccional, en dos direcciones, deslizante ó rodante. Puede haber una combinación de rodamiento y deslizamiento ó movimientos oscilatorios. Un metal puede interaccionar con un no metal ó líquidos tales como aceite lubricante ó agua marina. Dependiendo de la naturaleza del medio envolvente en una interacción bajo carga, el desgaste puede ser clasificado de la siguiente manera:

1.9.2.1 DESGASTE ADHESIVO

En éste, la interacción ocurre bajo pequeñas amplitudes de carga. Se caracteriza por la formación y fracturas de uniones adhesivas. Eventualmente fracturas por fatiga nuclearán y se propagarán desprendiéndose fragmentos los cuales causan una pérdida del material. También se puede dar el proceso de adhesión y transferencia de material el cual puede repetir en ambas direcciones para que finalmente ocurra la pérdida por fragmentos. Dependiendo de la geometría, el mecanismo de adhesión produce protuberancias en la superficie sometida a desgaste, formado por el material transferido de una superficie a otra. En la figura 24 se muestra el mecanismo de desgaste por adhesión.

Este tipo de desgaste se puede expresar de la siguiente manera:

$$V = Z * A * S$$

Donde Z es el número de átomos removidos por encuentro, A es el área total, V es el volumen removido y S es la distancia recorrida. Pero esta área total se relaciona con la carga como sigue:

$$A = P/T$$

Donde P es la carga y T la tensión de fluencia del material blando, sustituyendo en la primera ecuación se obtiene:

$$V/S = Z \cdot P/T$$

Que tiene la forma de la relación de Archard. Ahora bien, utilizando la relación de tensión de fluencia y la dureza.

$$H = 3 \cdot T$$

Llegamos finalmente a la relación de H , sólo que en este caso la constante tiene que ver con el número de átomos removidos (12).

$$V/S = 3 \cdot Z \cdot P/H$$

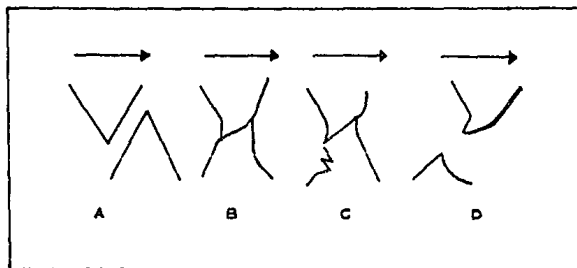


Figura 24 .- Formación, deformación y fractura de una unión adhesiva.

1.9.2.2 DESGASTE ABRASIVO

El desgaste abrasivo se caracteriza por la formación de surcos. Estas interacciones se llevan a cabo por microcorte, con deformación plástica al ser rasgada la superficie por un elemento abrasivo duro.

La deformación plástica se refleja en la formación de una cresta al mismo tiempo que el fragmento corta la superficie.

Las partículas abrasivas pueden provenir de material desprendido, de polvo de los alrededores, ó de partículas de impurezas que quedan atrapadas en la interfase deslizante y remueve gran cantidad de material. En otros se utiliza este tipo de desgaste, para la evaluación de abrasivos en forma sistematizada en un procesamiento estandarizado (ASTM G56-82), el desgaste abrasivo sigue una relación como las anteriores, sólo que la constante es considerada como un coeficiente de desgaste bajo una situación abrasiva entre dos cuerpos y toma valores de acuerdo a la geometría de la partícula que incide la superficie (12).

$$V/S = B \cdot P/H$$

Donde B es el término que contiene las consideraciones geométricas del modelo.

Para calcular la resistencia al desgaste abrasivo de un material sometido a investigación se puede utilizar la siguiente relación:

$$R_1/R_2 = A*H/P$$

Donde R_1 es la resistencia al desgaste de un material usado como referencia, R_2 es la resistencia del material bajo investigación, A es una constante, P es la presión aparente de contacto y H la dureza del material bajo investigación.

1.9.2.3 DESGASTE POR FATIGA

Los fenómenos de fatiga son generalmente importantes en todos los tipos de desgaste. Las tribofracturas son un fenómeno interactivo que son promovidas por efectos acumulativos durante fluctuaciones cíclicas de carga. Es común que el material removido sea predominantemente producido por fracturas de tipo fatiga en los sistemas tribológicos. El más típico sistema tribológico de fatiga es la de un dudo rodante en contacto, como por ejemplo los cojinetes. En estos los efectos de abrasión e impacto son reducidos. El desgaste adhesivo puede ser de importancia; en casos donde la lubricación es difícil como por ejemplo los cojinetes de los rodillos de laminación en caliente.

La propagación de fracturas por fatiga está concentrada en dos direcciones, una perpendicular y otra paralela a la superficie de contacto. El resultado es que al avanzar la fractura, la superficie del material es removida en escalas relativamente grandes en forma de hojuelas.

1.9.2.4 DESGASTE EROSIVO

Es el desgaste de una superficie, la cual es golpeada por una corriente de partículas. Si las partículas son gotas líquidas el desgaste es llamado erosión por cavitación y cuando se mencionan partículas erosivas se refieren a partículas sólidas.

Los sistemas tribológicos erosivos son también llamados sistemas de desgaste de tres cuerpos. Un cuerpo es la superficie expuesta, las partículas en contacto momentáneo con la superficie representan el segundo cuerpo. El medio el cual transfiere la carga sobre el segundo cuerpo, es considerado como el tercer cuerpo (9).

El principal mecanismo de tribofracturas en el desgaste erosivo son el microcorte y el impacto, adicionando la deformación plástica. Los ángulos de incidencia en erosión son menores que en abrasión.

1.9.2.5 DESGASTE VIBRACIONAL

El desgaste vibracional ó rozamiento, involucra elementos de todos los otros tipos. Los sistemas tribológicos de este tipo se caracterizan por estar sometidos a oscilaciones de varias frecuencias y pequeñas amplitudes. Dependiendo del material y las condiciones de superficie, la adhesión puede actuar como un mecanismo de activación para mecanismos de abrasión, y la fatiga es un componente inherente.

Dependiendo del diseño del sistema, este desprenderá partículas que no pueden escapar del área de contacto y toman una función abrasiva. Al mismo tiempo la dificultad de mantener una lubricación continua, provoca una adhesión.

Para materiales metálicos los efectos adicionales de la corrosión son muy severos incrementándose el factor de desgaste.

Una mezcla de partículas metálicas y partículas provenientes del rompimiento de la capa de corrosión es un efectivo medio abrasivo, el cual previene la adhesión y reemplaza al lubricante.

1.9.3 MAQUINAS DE DESGASTE

Al revisar la literatura publicada se observa que cada autor emplea en su laboratorio una máquina de desgaste y procedimiento diferente. Es reconocido y comprobado que el ensayo más informativo sobre el desgaste de piezas de máquinas se obtiene únicamente cuando se le somete a condiciones normales de funcionamiento, los ensayos abreviados de desgaste, realizados en el laboratorio, tienen sólo un valor comparativo, pero su realización es imprescindible como un método de control para materiales en los que la propiedad de resistencia al desgaste es primordial (13).

Generalmente los estudios de laboratorio de donde son obtenidos los datos de desgaste, se realizan bajo condiciones controladas, simulando situaciones reales.

Hay un gran número de máquinas para evaluar el desgaste, todas ellas requieren el diseño de un par metálico, el cual provee la interfase friccionante.

La máquina de perno con extremo plano y disco es un aparato popular para pruebas de desgaste, esta prueba ha sido normalizada con la denominación de ASTM G83-89, en el presente trabajo se utiliza un aparato y procedimiento análogo al descrito en esta norma, en éste la probeta es sometida a una carga normal.

Las variables son: la carga normal, la velocidad de deslizamiento, las condiciones atmosféricas y la temperatura del medio ambiente. La cantidad de desgaste puede ser establecida pesando el perno con una balanza analítica. Una prueba de desgaste completa supone graficar la pérdida de peso contra la distancia deslizada hasta obtener un desgaste inicial y un estado estable de desgaste. Es muy importante trabajar bajo condiciones estrictas de limpieza.

1.9.4 LA CURVA DE DESGASTE

Si el volumen ó el peso perdido es graficado continuamente contra la distancia, se obtiene una curva característica como la mostrada en la figura 25. El punto O es cuando la máquina empieza a funcionar y la distancia recorrida es cero.

La pérdida de peso inicial es parabólica y la cantidad de peso ó volumen perdido por unidad de distancia recorrida, decrece hasta el punto A, donde se une con una línea recta a B. El aumento del volumen ó el peso perdido en el estado de desgaste inicial está dado por AO, AB es el estado estable, que es usado para encontrar el factor de desgaste de un material, dependiendo de la naturaleza de la otra superficie.

Cuando dos metales entran en contacto bajo carga, crean una situación donde la carga se concentra en las áreas de contacto verdaderas, que se forman entre las asperezas.

Algunas veces, la tensión se concentra en dichas áreas de contacto, rebasando el límite elástico del material más blando del par, éste fluirá plásticamente y el área de contacto crecerá dentro de un equilibrio de tamaño proporcional a la aplicación de la carga. Si ambos metales son duros, las asperezas pueden ser removidas por algún mecanismo de los antes descritos y la superficie toma una apariencia llana, donde el área de contacto verdadera se incrementa. Esta puede ser la razón más común por la cual el desgaste inicial se presenta, y es superado al lograr un área de equilibrio, cuando el contacto se ha estabilizado. Pero esto no explica todos los casos, ya que algunas veces hay evidencia de formación de óxidos, ó un incremento en la dureza en las interfases. El mecanismo de desgaste inicial está gobernado por un gran número de factores interrelacionados.

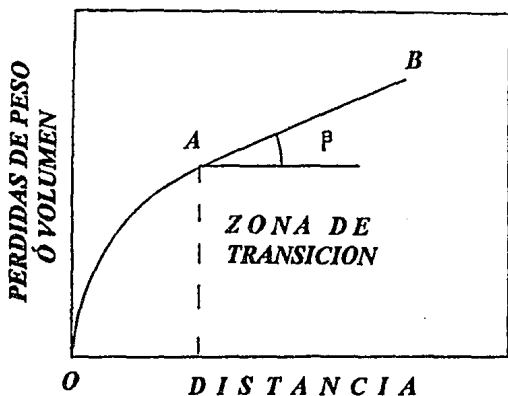


Figura 25 .- Curva típica de desgaste.

1.9.5 CURVA FACTOR DE DESGASTE - CARGA

Cuando un nuevo material es investigado, la primera fase del trabajo es usualmente una evaluación de la cantidad de desgaste con el incremento de la distancia recorrida. El siguiente paso es graficar el factor de desgaste contra la carga.

Para bajas cargas, hay un régimen de desgaste no severo (a,b), seguido por un régimen de transición (b,c) donde el factor se incrementa en pocos órdenes de magnitud. Posteriormente si se incrementa la carga, la curva se estabiliza, entrando a una zona donde el factor de desgaste vuelve a tener órdenes de magnitud similar (c,d).

La carga a la cual la curva tiene el punto de inflexión es llamada carga de transición y las zonas donde los factores son estables corresponden a regímenes de desgaste como se muestra en la figura 26.

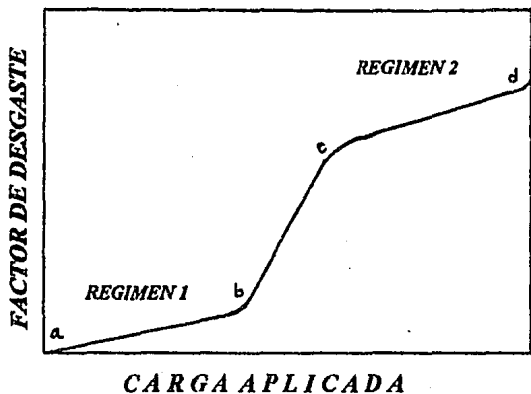


Figura 26.- Curva típica de factor de desgaste vs carga.

CAPITULO 2

***DESARROLLO
EXPERIMENTAL***

2.1 DESARROLLO EXPERIMENTAL

En el presente trabajo se obtuvieron y caracterizaron los compósitos Al-C (grafito) y Al- α -Al₂O₃ con 5, 10,15 y 20 % en volumen de partículas reforzantes de C(grafito) y α -Al₂O₃ en dos diferentes tamaños, malla 200 (75 μ m) y malla 250 (65 μ m).

Para esto, el trabajo se dividió en 2 etapas:

— 1ª Etapa (obtención) .- Consiste en determinar las condiciones óptimas de operación, es decir, la preparación de los polvos, carga de compactación, temperatura y tiempo de sinterización.

— 2ª Etapa (caracterización de los compósitos) .- Realización de ensayos mecánicos y metalografía.

2.2 PROCESO DE OBTENCION

Debido a que los compósitos que se pretenden obtener son mezclas de polvos de Aluminio y elementos reforzantes (C(grafito) y α -Al₂O₃) es de vital importancia conocer las características y propiedades de cada uno de ellos.

— **POLVO DE ALUMINIO** .- Se utilizaron 2 tamaños diferentes de polvo, los cuales fueron proporcionados por ALMEXA, S. A. de C.V que es uno de los distribuidores en México.

Los polvos poseen las siguientes características:

Polvo	Tamaño de partícula	Forma de la partícula	Densidad específica	Densidad aparente
Grado 104	45-75 μm	Semi-esférica	2.86 g/cm ³	1.1-1.5 g/cm ³
Grado 120	75-100 μm	Irregular	2.86 g/cm ³	1.1-1.3 g/cm ³

Composición química : Zn : 0.0051 % Ni : 0.0026 %
 Mn : 0.0310 % Pb : 0.0035 %
 Fe : 0.1070 % Cu : 0.0130 %
 Mg : 0.0017 % Al : 99.8361 %

— **POLVOS DE PARTICULAS REFORZANTES** .- C(grafito) Y $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ en 2 tamaños diferentes con las siguientes características cada uno:

Reforzante	Tamaño de partícula	Forma de la partícula	Densidad específica	Densidad aparente
C(g)	Malla 200 (75 μm) Malla 250 (65 μm)	Irregular	2.26 g/cm ³	0.83 - 0.85 g/cm ³
99.5 + $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ Cuerpo poroso	Malla 200 (75 μm) Malla 250 (65 μm)	Semi-esférica	3.26 g/cm ³	0.95 - 0.97 g/cm ³

Con el equipo que se tiene en el laboratorio (capacidad de la prensa, dados y matriz para la compactación), se pueden obtener probetas cilíndricas con un diámetro de 1.9 cm, 0.7-0.8 cm de altura y un peso de 6 - 6.3 g de peso.

2.3 CONDICIONES OPTIMAS DE COMPACTACION Y SINTERIZACION

Se procedió de la siguiente manera :

1) Se mezclaron polvos de aluminio conteniendo un 50 % de polvo grado 104 y 50 % polvo grado 120 .

2) Se pesaron por separado las partes respectivas de aluminio y partículas reforzantes.

3) Se efectuó la mezcla en forma manual , debido a que la cantidad de polvo utilizar es muy pequeña , y por lo tanto si se utiliza un equipo de mezclado habría elevadas pérdidas de polvo, lo cual no es deseable.

4) Se vacían los polvos al sistema de compactación . Para conocer la carga óptima a aplicar en la compactación se trazaron gráficas de carga vs desplazamiento de las cuales se observó que con cargas de entre 10,400 Kg (10.4 Ton) - 16,000 Kg (16 Ton), el desplazamiento que se observa en el sistema es nulo en este rango y después de este se presenta un desplazamiento mucho mayor el cual indica que ya no es recomendable compactar a los polvos ya que éstos sufrirán una deformación que podría afectar en sus propiedades.

Por lo anterior se decidió trabajar con una carga de 10,700 Kg (10.7 Ton).

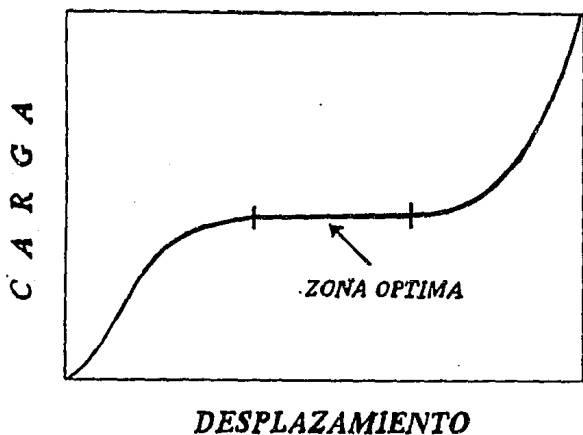


Figura 27 .- Curva típica para determinar la carga óptima de compactación.

5) La compactación se realizó simulando doble acción, esto es, conociendo la carga a aplicar de 10,700 Kg (10.7 Ton), se aplica la carga hasta 8,000 Kg por un lado y se retira la carga, se da un giro de 180° al sistema de compactación (el cual cuenta con 2 punzones) y se aplica nuevamente carga hasta completar los 10,700 Kg (10.7 Ton).

El objetivo de efectuar la doble acción en la compactación es lograr una mejor densificación en las piezas, ya que como se menciona en los antecedentes teóricos el tener densidades heterogéneas en las piezas complica su manejo y sus propiedades en verde.

Una vez expulsadas las probetas de la matriz se miden sus dimensiones (diámetro, altura) y se pesan para obtener su densidad en verde, mediante la siguiente fórmula, válida solamente para probetas cilíndricas:

$$\rho = 1273 * M / d^2 * h$$

Donde : ρ = Densidad en verde (g/cm³)

M = Peso del compactado (g)

h = Altura del compactado (cm)

d = Diámetro del compactado (cm)

Durante la compactación se observa que el aluminio se adhiere a las paredes de la matriz, por lo que resulta necesario utilizar algún lubricante.

Debido a que el lubricante está íntimamente ligado con la cantidad de porosidad de las piezas, se optó por lubricar solamente las paredes de la matriz y los punzones en vez de adicionar el lubricante como polvo en una cierta cantidad ó porcentaje.

Se preparó una especie de pintura lubricante disolviendo Acido estéarico en polvo (lubricante) con un punto de fusión de 69 ° C en Hexano líquido la cual se aplicó sin problema para facilitar la expulsión de las probetas ó piezas.

Después de una serie de pruebas para determinar las condiciones óptimas de temperatura y tiempo de sinterizado se eligió el siguiente ciclo:

— Eliminación de lubricante a 250 ° C durante 45 minutos. Aunque la cantidad de lubricante utilizada es mínima, es necesario este paso para evitar cualquier interferencia de este en la unión de las partículas.

— Elevar la temperatura a 610 ° C y mantener las probetas en esta temperatura por un lapso de 60 minutos. Analizando las probetas metalográficamente se observa que a temperaturas menores y tiempos menores de permanencia la unión entre partículas es muy deficiente, observándose incluso las fronteras entre varias partículas.

A temperaturas, mayores se alcanza una fusión parcial de las probetas observándose un rechupe en dirección a la carga aplicada.

— Utilizar una atmósfera inerte (Argón) para evitar cualquier reacción química que afecte las propiedades de las piezas.

— Sacar las probetas del horno y enfriar al aire.

DISEÑO EXPERIMENTAL

Se hicieron 4 probetas iguales para cada condición de %Vol. de refuerzo y 4 probetas con aluminio puro, lo que nos dá un total de 68 probetas, ya que se requieren hacer pruebas de dureza, distribución de tamaño de partículas, desgaste, distancia entre partículas y la determinación de la porosidad presente.

Así pues una vez identificadas las condiciones de trabajo, podemos establecer el diseño experimental de acuerdo a la siguiente tabla:

Tamaño C(g)	% Vol. C(g)	Probetas
Malla 200 (75µm)	5	1A,1B,1C,1D
	10	2A,2B,2C,2D
	15	3A,3B,3C,3D
	20	4A,4B,4C,4D
Malla 250 (65µm)	5	5A,5B,5C,5D
	10	6A,6B,6C,6D
	15	7A,7B,7C,7D
	20	8A,8B,8C,8D

Tamaño α -Al ₂ O ₃	% Vol. α -Al ₂ O ₃	Probetas
Malla 200 (75µm)	5	9A,9B,9C,9D
	10	10A,10B,10C,10D
	15	11A,11B,11C,11D
	20	12A,12B,12C,12D
Malla 250 (65µm)	5	13A,13B,13C,13D
	10	14A,14B,14C,14D
	15	15A,15B,15C,15D
	20	16A,16B,16C,16D
ALUMINIO		17A,17B,17C,17D

CARACTERIZACION DE LOS COMPOSITOS

Con las probetas ya sinterizadas, se realizan las siguientes pruebas:

- 1 .- DUREZA*
- 2 .- DESGASTE*
- 3 .- DISTRIBUCION DE TAMAÑO DE PARTICULAS*
- 4 .- DISTANCIA ENTRE PARTICULAS*
- 5 .- POROSIDAD*

***DUREZA** : Se toma dureza en la escala Brinell a las probetas, seleccionando 2 probetas por cada serie de 4 probetas iguales. La dureza se toma bajo las siguientes condiciones:*

- Carga = 300 Kg*
- Diámetro de la bola del indentador = 10 mm*
- Tiempo de carga = 30 segundos .*

Se obtiene un promedio de los valores de dureza de las 2 probetas. Esto nos permite deducir como influye la cantidad y el tamaño de las partículas reforzantes en la dureza de los compósitos.

***DESGASTE** : Las probetas de desgaste son cilindros de 1/4 de pulgada de diámetro y 1.5 cm de altura aproximadamente. Las condiciones de trabajo son:*

— **Máquina de desgaste** .- Consta de un motor eléctrico de 1/4 HP conectado a un sistema de transmisión para hacer girar el disco.

— **Disco de desgaste** .- Hecho de acero norma SAE 4140, templado y revenido, con una dureza de 53 HRC y cuya superficie está pulida.

— **Velocidad del disco de desgaste** .- Se utilizaron 3 velocidades, 0.36 m/s (56 rpm), 1.038 m/s (160 rpm) y 1.98 m/s (306 rpm) reguladas por medio de un reóstato.

— **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 coloca la probeta, puede calcularse la fuerza que se ejerce sobre esta, que es equivalente a la carga aplicada, la cual resultó ser de 1.25 Kg.

— **La probeta** se encuentra a una distancia de 6.2 cm del centro del disco.

— **Lubricante** .- No se empleo ninguno.

— **Temperatura ambiente**.

— Se pesan las probetas a intervalos de 15, 30, 60, 90 y 120 minutos, limpiando el disco después de cada medición.

— **Tiempo total de la prueba de desgaste por cada probeta** es de 2 horas.

Los cálculos de desgaste se efectúan en función de la pérdida de peso que sufren las probetas al interactuar con el disco, por lo cual deberán pesarse antes de iniciar la prueba.

2.5.1 DISTRIBUCION DE TAMAÑO 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.

Con ayuda del analizador de imágenes se obtienen las mediciones por la diferencia de grises (blanco y negro) que presentan las muestras. Se eligen 3 zonas al azar de la probeta y se comienzan a detectar las partículas (en la pantalla del analizador), cuidando de no sobre detectarlas para no obtener lecturas erróneas.

Se determina el porcentaje de área que ocupan las partículas de refuerzo, se registra la distribución de tamaños y la cantidad de partículas presentes en la zona visualizada, así hasta completar las 3 zonas requeridas. De estas 3 zonas se saca un promedio para tener una sola tabla de datos representativos de cada probeta.

2.5.2 DISTANCIA ENTRE PARTICULAS .- Se toman fotografías de 3 zonas al azar de cada probeta a los más bajos aumentos del microscopio óptico y se mide la distancia que hay entre una partícula con sus vecinas más cercanas, una vez realizada esta medición se toma otra partícula y se hace lo mismo sin volver a tomar la distancia con la partícula anterior.

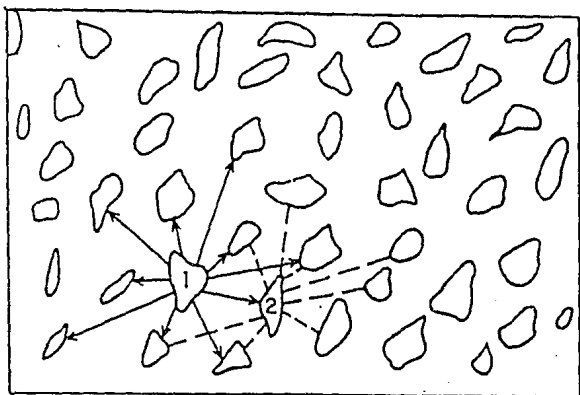


Figura 28

De igual forma que en la distribución de tamaño de partículas se efectua un promedio de las distancias de las 3 fotografías para obtener datos representativos de cada probeta.

Se midió la distancia entre la partícula 1 y sus vecinas más cercanas. Al escoger una partícula 2 se medirán también las distancias con sus vecinas, pero ya no con la partícula 1 debido a que ya fué cuantificada.

Con los datos obtenidos de distancia entre partículas y la cantidad de partículas en un intervalo de distancia (frecuencia), es posible trazar gráficas de frecuencia vs. distancia, las cuales nos indicarán la distribución de las partículas en los compósitos obtenidos.

Para obtener mayor información de estas gráficas es necesario efectuar cálculos estadísticos tales como: la media y la varianza, mediante las siguientes ecuaciones válidas sólo para intervalos:

$$\bar{X} = \left[\sum_{i=1}^c f_i m_i \right] / n$$

$$s^2 = \left\{ \left[\sum_{i=1}^c f_i m_i \right] - \left[\left(\sum_{i=1}^c f_i m_i \right)^2 / n \right] \right\} / n - 1$$

Donde: \bar{X} = Media muestral

c = Número de intervalos

m = Valor medio del intervalo

S^2 = Varianza muestral

f = Frecuencia

POROSIDAD .- Se determina la porosidad de los compósitos, basándose en su densidad. De acuerdo a la cantidad de C (grafito) y $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ presentes en los compósitos, se calcula la densidad teórica que presentarían estos si no tuvieran 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 teórica y la real, 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.

CAPITULO 3

RESULTADOS EXPERIMENTALES

Una vez realizadas las pruebas especificadas, los resultados que se obtuvieron se muestran a continuación:

3.1 MEZCLADO

Las probetas se mezclaron de acuerdo a la siguiente tabla (3):

Probetas	% Volumen Al Gdo. 104	% Volumen Al Gdo. 120	% Volumen C(grafito)	Tamaño de Partícula
1A, 1B, 1C, 1D	47.5	47.5	5	Malla 200 (75 μ m)
2A, 2B, 2C, 2D	45	45	10	
3A, 3B, 3C, 3D	42.5	42.5	15	
4A, 4B, 4C, 4D	40	40	20	
5A, 5B, 5C, 5D	47.5	47.5	5	Malla 250 (65 μ m)
6A, 6B, 6C, 6D	45	45	10	
7A, 7B, 7C, 7D	42.5	42.5	15	
8A, 8B, 8C, 8D	40	40	20	

Probetas	% Volumen Al Gdo. 104	% Volumen Al Gdo. 120	% Volumen α -Al ₂ O ₃	Tamaño de Partícula
9A, 9B, 9C, 9D	47.5	47.5	5	Malla 200 (75 μ m)
10A, 10B, 10C, 10D	45	45	10	
11A, 11B, 11C, 11D	42.5	42.5	15	
12A, 12B, 12C, 12D	40	40	20	
13A, 13B, 13C, 13D	47.5	47.5	5	Malla 250 (65 μ m)
14A, 14B, 14C, 14D	45	45	10	
15A, 15B, 15C, 15D	42.5	42.5	15	
16A, 16B, 16C, 16D	40	40	20	

Probetas	% Volumen Al Gdo. 104	% Volumen Al Gdo. 120	ALUMINIO
17A, 17B, 17C, 17D	50	50	

TABLA 3

3.2 COMPACTACION

Los resultados obtenidos de la compactación se muestran en las siguientes tablas (4,5) :

Tamaño de partícula	% Volumen C(grafito)	Probeta	Peso (g)	Altura (cm)	Diámetro (cm)	Densidad en verde (g/cm ³)
MALLA 200 75 µm	5 %	1A	6.1720	0.82	1.92	2.65
		1B	6.1860	0.82	1.92	2.66
		1C	6.1703	0.81	1.92	2.68
		1D	6.1700	0.82	1.92	2.65
	10 %	2A	6.1883	0.84	1.92	2.59
		2B	6.1910	0.84	1.92	2.59
		2C	6.1969	0.84	1.92	2.60
		2D	6.1775	0.84	1.92	2.59
	15 %	3A	6.2050	0.87	1.92	2.51
		3B	6.2092	0.87	1.92	2.51
		3C	6.2099	0.87	1.92	2.51
		3D	6.1925	0.87	1.92	2.50
	20 %	4A	6.2197	0.88	1.92	2.49
		4B	6.1797	0.88	1.92	2.47
		4C	6.1941	0.88	1.92	2.48
		4D	6.1978	0.88	1.92	2.48
MALLA 250 65 µm	5 %	5A	6.1875	0.81	1.92	2.69
		5B	6.1820	0.81	1.92	2.69
		5C	6.1916	0.81	1.92	2.69
		5D	6.1682	0.81	1.92	2.68
	10 %	6A	6.1947	0.83	1.92	2.63
		6B	6.1773	0.83	1.92	2.62
		6C	6.1916	0.83	1.92	2.63
		6D	6.1740	0.83	1.92	2.62
	15 %	7A	6.2038	0.86	1.92	2.54
		7B	6.2012	0.86	1.92	2.54
		7C	6.2174	0.86	1.92	2.54
		7D	6.2057	0.86	1.92	2.54
	20 %	8A	6.2202	0.88	1.92	2.49
		8B	6.2110	0.88	1.92	2.48
		8C	6.2126	0.88	1.92	2.48
		8D	6.2097	0.88	1.92	2.48

TABLA 4

Tamaño de partícula	% Volumen $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$	Probeta	Peso (g)	Altura (cm)	Diámetro (cm)	Densidad en verde (g/cm^3)
MALLA 200 75 μm	5 %	9A	6.2011	0.82	1.92	2.66
		9B	6.2467	0.82	1.92	2.68
		9C	6.2743	0.83	1.92	2.66
		9D	6.2668	0.83	1.92	2.66
	10 %	10A	6.2121	0.84	1.92	2.60
		10B	6.2256	0.84	1.92	2.61
		10C	6.2706	0.84	1.92	2.63
		10D	6.2541	0.84	1.92	2.62
	15 %	11A	6.2671	0.86	1.92	2.56
		11B	6.2711	0.86	1.92	2.57
		11C	6.2786	0.86	1.92	2.57
		11D	6.2741	0.86	1.92	2.57
	20 %	12A	6.2739	0.88	1.92	2.51
		12B	6.2292	0.88	1.92	2.49
		12C	6.2799	0.89	1.92	2.48
		12D	6.2790	0.89	1.92	2.48
MALLA 250 65 μm	5 %	13A	6.2142	0.82	1.92	2.67
		13B	6.2522	0.83	1.92	2.65
		13C	6.2786	0.83	1.92	2.66
		13D	6.2672	0.83	1.92	2.66
	10 %	14A	6.2506	0.84	1.92	2.62
		14B	6.2747	0.84	1.92	2.63
		14C	6.2058	0.83	1.92	2.63
		14D	6.2483	0.84	1.92	2.62
	15 %	15A	6.2663	0.86	1.92	2.56
		15B	6.2234	0.86	1.92	2.55
		15C	6.2149	0.86	1.92	2.54
		15D	6.2672	0.86	1.92	2.56
	20 %	16A	6.2751	0.88	1.92	2.51
		16B	6.2480	0.88	1.92	2.50
		16C	6.2852	0.88	1.92	2.51
		16D	6.2603	0.88	1.92	2.50
ALUMINIO		17A	6.1260	0.88	1.92	2.68
		17B	6.1027	0.81	1.92	2.65
		17C	6.1268	0.81	1.92	2.65
		17D	6.1476	0.81	1.92	2.67

TABLA 5

3.3 SINTERIZACION

Los resultados obtenidos después de la sinterización son (tabla 6 y 7):

Tamaño de partícula	% Volumen C(grafito)	Probeta	Peso (g)	Altura (cm)	Diámetro (cm)	Densidad Real (g/cm ³)
MALLA 200 75 μ m	5 %	1A	6.1684	0.82	1.92	2.65
		1B	6.1807	0.82	1.92	2.65
		1C	6.1649	0.82	1.92	2.65
		1D	6.1650	0.82	1.92	2.65
	10 %	2A	6.1808	0.85	1.92	2.56
		2B	6.1834	0.85	1.92	2.56
		2C	6.1905	0.85	1.92	2.56
		2D	6.1705	0.85	1.92	2.56
	15 %	3A	6.1927	0.86	1.92	2.53
		3B	6.1969	0.86	1.92	2.54
		3C	6.1978	0.86	1.92	2.54
		3D	6.1803	0.86	1.92	2.53
	20 %	4A	6.2043	0.91	1.92	2.40
		4B	6.1642	0.91	1.92	2.38
		4C	6.1780	0.91	1.92	2.39
		4D	6.1821	0.91	1.92	2.39
MALLA 250 65 μ m	5 %	5A	6.1820	0.81	1.92	2.69
		5B	6.1676	0.81	1.92	2.68
		5C	6.1862	0.81	1.92	2.69
		5D	6.1629	0.81	1.92	2.68
	10 %	6A	6.1872	0.83	1.92	2.62
		6B	6.1700	0.83	1.92	2.62
		6C	6.1843	0.83	1.92	2.62
		6D	6.1680	0.83	1.92	2.62
	15 %	7A	6.1914	0.86	1.92	2.53
		7B	6.1880	0.86	1.92	2.53
		7C	6.2046	0.86	1.92	2.54
		7D	6.1930	0.86	1.92	2.53
	20 %	8A	6.2035	0.91	1.92	2.40
		8B	6.1949	0.91	1.92	2.40
		8C	6.1955	0.88	1.92	2.48
		8D	6.1930	0.88	1.92	2.48

TABLA 6

Tamaño de partícula	% Volumen a -Al2O3	Probeta	Peso (g)	Altura (cm)	Diámetro (cm)	Densidad Real (g/cm ³)
MALLA 200 75µm	5 %	9A	6.2152	0.82	1.92	2.67
		9B	6.2664	0.83	1.92	2.66
		9C	6.2862	0.83	1.92	2.67
		9D	6.2750	0.83	1.92	2.66
	10 %	10A	6.2308	0.84	1.92	2.61
		10B	6.2382	0.84	1.92	2.61
		10C	6.2868	0.84	1.92	2.63
		10D	6.2670	0.84	1.92	2.63
	15 %	11A	6.2868	0.86	1.92	2.57
		11B	6.2921	0.86	1.92	2.58
		11C	6.2931	0.86	1.92	2.58
		11D	6.2897	0.86	1.92	2.57
	20 %	12A	6.2890	0.88	1.92	2.52
		12B	6.2436	0.88	1.92	2.50
		12C	6.3032	0.88	1.92	2.52
		12D	6.2854	0.88	1.92	2.51
MALLA 250 65µm	5 %	13A	6.2334	0.81	1.92	2.71
		13B	6.2635	0.81	1.92	2.72
		13C	6.2797	0.81	1.92	2.73
		13D	6.2697	0.81	1.92	2.73
	10 %	14A	6.2663	0.84	1.92	2.63
		14B	6.2888	0.84	1.92	2.64
		14C	6.2178	0.84	1.92	2.61
		14D	6.2709	0.84	1.92	2.63
	15 %	15A	6.2905	0.86	1.92	2.57
		15B	6.2417	0.86	1.92	2.55
		15C	6.2280	0.86	1.92	2.55
		15D	6.2835	0.86	1.92	2.57
	20 %	16A	6.2899	0.88	1.92	2.52
		16B	6.2608	0.88	1.92	2.50
		16C	6.2955	0.88	1.92	2.52
		16D	6.2746	0.88	1.92	2.51
ALUMINIO		17A	6.1410	0.80	1.92	2.69
		17B	6.1202	0.81	1.92	2.66
		17C	6.1431	0.81	1.92	2.67
		17D	6.1627	0.81	1.92	2.68

TABLA 7

NOTA : DENSIDAD REAL = $m/v = m/A \cdot h$ $A = D^2 \cdot \pi / 4$

Donde : m = masa , v = volumen , A = altura , D = diámetro , $\pi = 3.1416$

3.4 DUREZA

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

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

Donde : HB = Dureza Brinell

P = Carga aplicada = 300 Kg

D = Diámetro de la bola de indentación = 10 mm

d = Diámetro de la impresión

Los resultados obtenidos se muestran en la tabla 8 y en la gráfica 1:

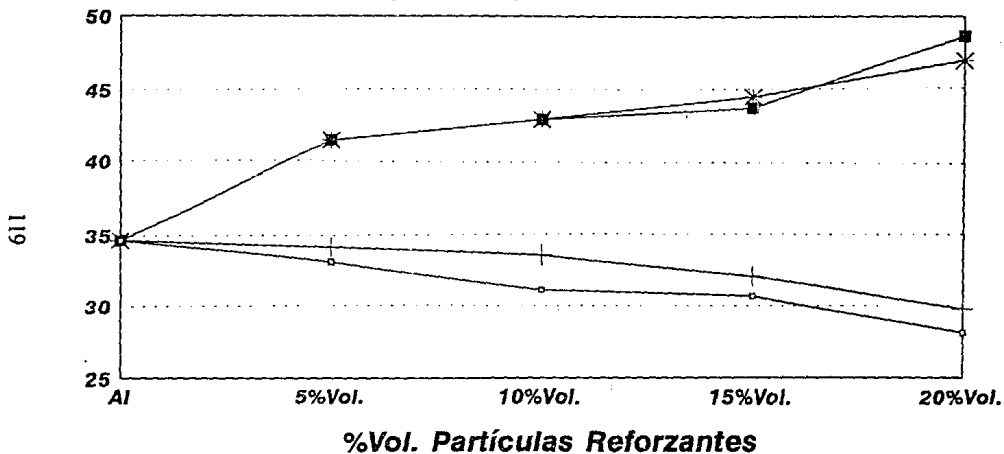
Probeta	Dureza Brinell (Kg/mm ²)
1A,1B	33.07
2A,2B	31.10
3A,3B	30.64
4A,4B	28.08
5A,5B	34.09
6A,6B	33.57
7A,7B	32.05
8A,8B	29.75
9A,9B	41.46
10A,10B	42.91
11A,11B	44.44
12A,12B	46.89
13A,13B	41.46
14A,14B	42.91
15A,15B	43.67
16A,16B	48.63
17A,17B	34.63

TABLA 8

Dureza

Compósitos C(grafito) Y Alfa-Alúmina

Dureza Brinell (Kg/mm²)



○ C(grafito) Malla 200

+ C(grafito) Malla 250

* Alfa-Alúmina Malla 200

■ Alfa-Alúmina Malla 250

GRAFICA 1

3.5 PRUEBAS DE DESGASTE

Las tablas 9, 10 y 11 presentan las pérdidas de peso a distintos intervalos de tiempo y distancias recorridas para cada velocidad de desgaste efectuada.

Probeta	Peso inicial (g)	MASA PERDIDA (mg)				
		15 min	30 min	60 min	90 min	120 min
		0.33 Km*	0.65 Km*	1.31 Km*	1.96 Km*	2.62 Km*
1C	1.4346	1.0	1.5	2.5	3.0	3.2
2C	1.3546	0.6	0.9	2.4	3.0	3.4
3C	1.3094	0.3	0.6	0.8	1.5	1.7
4C	1.2732	0.7	1.9	2.3	2.9	3.3
5C	1.4292	0.4	1.5	2.9	5.1	5.7
6C	1.3690	0.5	0.8	1.5	2.0	2.9
7C	1.3696	0.3	0.7	0.9	1.1	1.4
8C	1.3503	0.4	0.9	1.2	1.5	1.8
9C	1.2437	0.6	0.9	2.9	4.5	6.1
10C	1.3562	0.9	2.4	4.4	6.1	7.9
11C	1.3276	0.8	2.2	4.0	6.2	7.7
12C	1.3392	1.1	2.5	4.8	7.1	10.0
13C	1.2819	0.6	1.9	3.6	4.9	6.2
14C	1.3286	0.5	2.0	5.0	8.0	10.0
15C	1.3495	0.7	1.7	4.1	6.2	7.7
16C	1.3248	0.9	2.5	5.4	7.6	10.1
17C	1.4753	1.2	2.6	5.6	8.0	10.5

(*) Distancia recorrida en cada intervalo de tiempo.

TABLA 9.- Vel. de prueba 0.36 m/s (56 rpm).

		MASA PERDIDA (mg)				
		15 min	30 min	60 min	90 min	120 min
Probeta	Peso inicial (g)	0.93 Km*	1.87 Km*	3.74 Km*	5.61 Km*	7.48 Km*
1C	1.4549	2.5	5.3	9.7	15.4	20.7
2C	1.4198	2.8	6.1	10.8	23.4	27.4
3C	1.3239	2.4	4.7	6.7	8.0	9.2
4C	1.2893	1.7	2.6	3.9	5.3	16.1
5C	1.4489	1.9	4.4	9.1	14.4	19
6C	1.4786	1.4	2.2	7.1	14	20.3
7C	1.3852	2.5	3.7	5.5	15.8	26.7
8C	1.3683	2.1	3.3	4.2	6	13.5
9C	1.2602	1.4	4.0	7.7	11.3	16.3
10C	1.3900	2.4	9.1	19.1	25.1	32.9
11C	1.3495	2.7	7.2	11.5	16.4	21.1
12C	1.3663	3.7	8.1	15.8	21.7	27.1
13C	1.3090	1.9	3.9	11.5	20.1	25.7
14C	1.3682	2.4	9.5	19.9	22.4	29.6
15C	1.3676	2.7	5.6	7.2	12.5	18.3
16C	1.3558	4.1	7.5	16.6	24.1	31
17C	1.4922	4.4	9.9	20.4	26.7	33.6

(*) Distancia recorrida en cada intervalo de tiempo.

TABLA 10.- Vel. de prueba 1.038 m/s (160 rpm).

Probeta	Peso inicial (g)	MASA PERDIDA (mg)				
		15 min	30 min	60 min	90 min	120 min
		1.78 Km*	3.57 Km*	7.15 Km*	10.73 Km*	14.3 Km*
1C	1.4314	3.8	7.7	15.3	22.7	41.7
2C	1.3374	3.3	10.8	26.8	38.8	45.1
3C	1.3427	0.5	0.8	2.2	4.2	7.2
4C	1.2695	0.8	1.9	3.0	6.2	8.6
5C	1.4232	2.3	5.8	14.6	21.9	30.7
6C	1.3585	3.4	6.7	11.8	16.1	22.7
7C	1.3659	0.7	1.1	2.4	4.1	6.7
8C	1.3485	1.0	1.9	3.2	4.8	6.8
9C	1.3350	2.2	11.1	28	59.9	71.9
10C	1.3166	6.3	13.5	26.7	51.5	64.8
11C	1.3554	10.1	18.6	51.9	85.2	119.7
12C	1.3292	20	42.3	67.2	88.7	155.1
13C	1.2465	4.6	12.2	27.8	59.0	83.8
14C	1.3130	6.7	13.0	21.1	58.7	79.8
15C	1.3423	7.0	17.3	48.7	80.7	114.6
16C	1.3640	16.4	34.0	61.4	91.4	152.8
17C	1.4477	12.4	24.9	56.4	168.8	313.5

(*) Distancia recorrida en cada intervalo de tiempo.

TABLA II.- Vel. de prueba 1.98 m/s (306 rpm).

En las tablas 12 , 13 , 14 , 15 , 16 y 17 se presentan los datos necesarios para obtener los coeficientes de desgaste para las 3 velocidades de desgaste efectuadas. La ecuación utilizada para obtener el coeficiente de desgaste es la siguiente:

$$K = V * Hm / P * S$$

Donde : K = Coeficiente de desgaste

Hm = Dureza knoop del material (Kg / mm²)

S = Distancia recorrida (mm)

P = Carga aplicada (Kg)

V = Volumen desgastado (mm³)

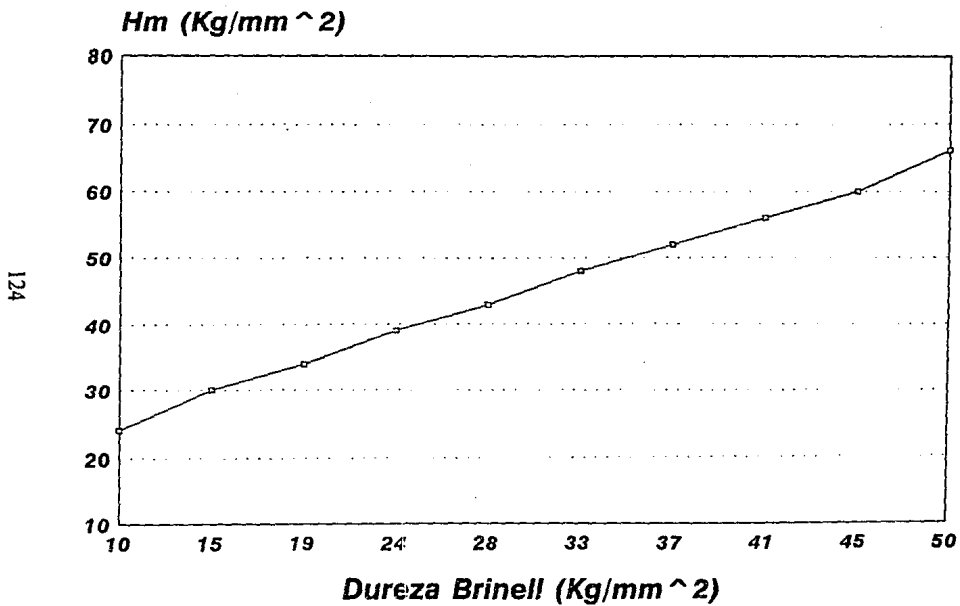
El volumen desgastado se calculó de la siguiente manera:

Volumen desgastado = Masa perdida / Densidad real

NOTA : Los valores de Hm (Dureza knoop) fueron leídos de una gráfica construida a partir de datos reportados en el libro: " Aluminium alloys : structure and properties " de Mondolfo L. F, 1st edition, Ed. The Butter Worth Group , England 1976 .

A continuación se muestra la gráfica antes mencionada.

Durezza Knoop



GRAFICA 2

PROBETA	Hm (kg/mm ²)	Distancia recorrida S (mm)					Carga P (kg)
		15 min 0.33 Km*	30 min 0.65 Km*	60 min 1.31 Km*	90 min 1.96 Km*	120 min 2.62 Km*	
1C	47.5	327200	654400	1308800	1963200	2617600	1.25
2C	46.0						1.25
3C	44.9						1.25
4C	43.0						1.25
5C	48.5						1.25
6C	48.0						1.25
7C	46.5						1.25
8C	44.9						1.25
9C	56.8						1.25
10C	58.6						1.25
11C	59.5						1.25
12C	62.1						1.25
13C	56.8						1.25
14C	58.6						1.25
15C	59.0						1.25
16C	65.0						1.25
17C	50.0						1.25

PROBETA	Volumen desgastado V (mm ³)				
	15 min 0.33 Km*	30 min 0.65 Km*	60 min 1.31 Km*	90 min 1.96 Km*	120 min 2.62 Km*
1C	0.377	0.566	0.943	1.132	1.207
2C	0.234	0.351	0.937	1.171	1.328
3C	0.118	0.236	0.315	0.590	0.669
4C	0.292	0.794	0.962	1.213	1.380
5C	0.148	0.557	1.078	1.895	2.118
6C	0.190	0.305	0.572	0.763	1.106
7C	0.118	0.285	0.354	0.433	0.551
8C	0.161	0.362	0.483	0.0604	0.725
9C	0.224	0.337	1.086	1.685	2.284
10C	0.342	0.912	1.673	2.319	3.003
11C	0.310	0.852	1.550	2.403	2.984
12C	0.436	0.992	1.904	2.817	3.968
13C	0.219	0.695	1.318	1.794	2.271
14C	0.191	0.766	1.915	3.065	3.831
15C	0.272	0.661	1.595	2.412	2.996
16C	0.357	0.992	2.142	3.015	4.007
17C	0.449	0.973	2.097	2.996	3.932

TABLA 12.- Datos para poder obtener el coef. de desgaste K, para una vel. de prueba de 0.36 m/s (56 rpm).

Coefficiente de desgaste

Velocidad de desgaste 0.36 m/s (56 rpm)

<i>K exp - 05</i>					
	<i>15 min</i>	<i>30 min</i>	<i>60 min</i>	<i>90 min</i>	<i>120 min</i>
<i>Probeta</i>	<i>0.33 Km *</i>	<i>0.65 Km *</i>	<i>1.31 Km *</i>	<i>1.96 Km *</i>	<i>2.62 Km *</i>
<i>1C</i>	4.378	3.286	2.737	2.191	1.752
<i>2C</i>	2.631	1.973	2.634	2.195	1.866
<i>3C</i>	1.295	1.295	0.864	1.079	0.918
<i>4C</i>	3.069	4.173	2.528	2.125	1.813
<i>5C</i>	1.755	3.302	3.195	3.745	3.139
<i>6C</i>	2.229	1.789	1.678	1.492	1.622
<i>7C</i>	1.341	1.563	1.006	0.820	0.783
<i>8C</i>	1.767	1.987	1.325	1.105	0.994
<i>9C</i>	3.110	2.340	3.770	3.900	3.139
<i>10C</i>	4.900	6.533	5.992	5.537	5.378
<i>11C</i>	4.509	6.197	5.637	5.826	5.426
<i>12C</i>	6.619	7.530	7.227	7.128	7.530
<i>13C</i>	3.041	4.825	4.575	4.152	3.942
<i>14C</i>	2.736	5.487	6.859	7.319	6.861
<i>15C</i>	3.923	4.767	5.752	5.799	5.402
<i>16C</i>	5.673	7.882	8.510	7.985	7.960
<i>17C</i>	5.488	5.947	6.408	6.104	6.008

(*) *Distancia recorrida en cada intervalo de tiempo.*

TABLA 13

PROBETA	Hm (kg/rpm ²)	Distancia recorrida S (mm)					Carga P (kg)
		15 min	30 min	60 min	90 min	120 min	
		0.93 Km*	1.87 Km*	3.74 Km*	5.61 Km*	7.48 Km*	
1C	47.5	934800	1869600	3739200	5608800	7478400	1.25
2C	46.0						1.25
3C	44.9						1.25
4C	43.0						1.25
5C	48.5						1.25
6C	48.0						1.25
7C	46.5						1.25
8C	44.9						1.25
9C	56.8						1.25
10C	58.6						1.25
11C	59.5						1.25
12C	62.1						1.25
13C	56.8						1.25
14C	58.6						1.25
15C	59.0						1.25
16C	65.0						1.25
17C	50.0						1.25

PROBETA	Volumen desgastado V (mm ³)				
	15 min	30 min	60 min	90 min	120 min
	0.93 Km*	1.87 Km*	3.74 Km*	5.61 Km*	7.48 Km*
1C	0.943	2.000	3.660	5.811	7.811
2C	1.093	2.312	4.218	9.140	10.703
3C	0.944	1.850	2.637	3.149	3.622
4C	0.711	1.087	1.631	2.217	6.736
5C	0.706	1.635	3.382	5.353	7.063
6C	0.534	0.839	2.709	5.343	7.748
7C	0.984	1.455	2.165	6.220	10.511
8C	0.846	1.330	1.693	2.419	5.443
9C	0.524	1.491	2.883	4.232	6.104
10C	0.912	3.460	7.262	9.543	12.509
11C	1.046	2.790	4.457	6.356	8.178
12C	1.468	3.214	6.269	8.611	10.753
13C	0.695	1.428	4.212	7.362	9.413
14C	0.919	3.639	7.624	8.582	11.34
15C	1.050	2.178	2.801	4.863	7.120
16C	1.626	2.976	6.587	9.563	12.301
17C	1.647	3.707	7.640	10.000	12.584

TABLA 14.- Datos para poder obtener el coef. de desgaste K, para una vel. de prueba de 1.038 m/s (160 rpm).

Coefficiente de desgaste

Velocidad de desgaste 1.038 m/s (160 rpm)

K exp - 05					
	15 min	30 min	60 min	90 min	120 min
Probeta	0.93 Km *	1.87 Km *	3.74 Km *	5.61 Km *	7.48 Km *
1C	3.883	4.065	3.719	3.936	3.969
2C	4.302	4.688	4.151	5.996	5.266
3C	3.627	3.554	2.533	2.016	1.739
4C	2.616	2.000	1.500	1.359	3.098
5C	2.930	3.393	3.509	3.703	3.664
6C	2.193	1.723	2.782	3.658	3.978
7C	3.915	2.897	2.153	4.125	5.228
8C	3.250	2.555	1.626	1.549	2.614
9C	2.547	3.640	3.503	3.428	3.708
10C	4.573	8.675	9.104	7.976	7.841
11C	5.326	7.103	5.673	5.394	5.205
12C	7.801	8.540	8.329	7.627	7.143
13C	3.378	3.470	5.118	5.964	5.719
14C	4.608	9.124	9.558	7.173	7.108
15C	5.301	5.498	3.535	4.092	4.493
16C	9.044	8.277	9.160	8.865	8.553
17C	7.047	7.931	8.172	7.131	6.730

(*) *Distancia recorrida en cada intervalo de tiempo.*

TABLA 15

PROBETA	Hm (kg/mm ²)	Distancia recorrida S (mm)					Carga P (kg)
		15 min	30 min	60 min	90 min	120 min	
		1.78 Km*	3.57 Km*	7.15 Km*	10.73 Km*	14.3 Km*	
1C	47.5	1787700	3575400	7150800	10726200	143301600	1.25
2C	46.0						1.25
3C	44.9						1.25
4C	43.0						1.25
5C	48.5						1.25
6C	48.0						1.25
7C	46.5						1.25
8C	44.9						1.25
9C	56.8						1.25
10C	58.6						1.25
11C	59.5						1.25
12C	62.1						1.25
13C	56.8						1.25
14C	58.6						1.25
15C	59.0						1.25
16C	65.0						1.25
17C	50.0						1.25

PROBETA	Volumen desgastado V (mm ³)				
	15 min	30 min	60 min	90 min	120 min
	1.78 Km*	3.57 Km*	7.15 Km*	10.73 Km*	14.3 Km*
1C	1.433	2.905	5.773	8.566	15.735
2C	1.289	4.218	10.468	15.156	17.617
3C	0.196	0.314	0.866	1.653	2.834
4C	0.334	0.794	1.255	2.594	3.598
5C	0.855	2.156	5.427	8.141	11.412
6C	1.297	2.557	4.503	6.145	8.664
7C	0.275	0.433	0.944	1.614	2.637
8C	0.401	0.766	1.290	1.935	2.741
9C	0.823	4.157	10.486	22.434	26.928
10C	2.395	5.133	10.152	19.581	24.638
11C	3.914	7.209	20.116	33.023	46.395
12C	7.936	16.785	26.666	33.198	61.547
13C	1.684	4.468	10.183	21.611	30.695
14C	2.567	4.980	8.084	22.490	30.574
15C	2.723	6.731	18.949	31.490	44.591
16C	6.507	13.492	24.365	36.269	60.634
17C	4.644	9.325	21.123	63.220	117.415

TABLA 16.- Datos para poder obtener el coef. de desgaste K, para una vel. de prueba de 1.98 m/s (306 rpm).

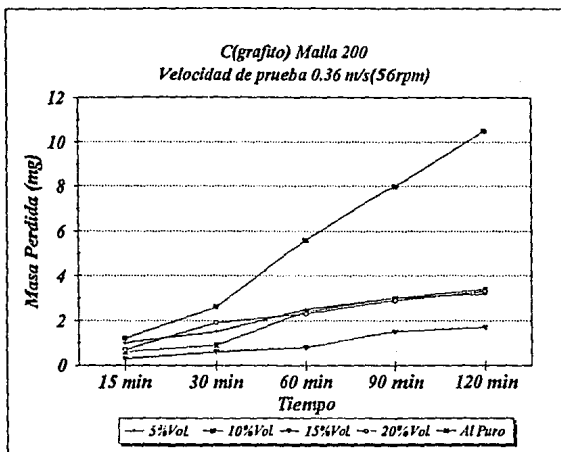
Coeficiente de desgaste

Velocidad de desgaste 1.98 m/s (306 rpm)

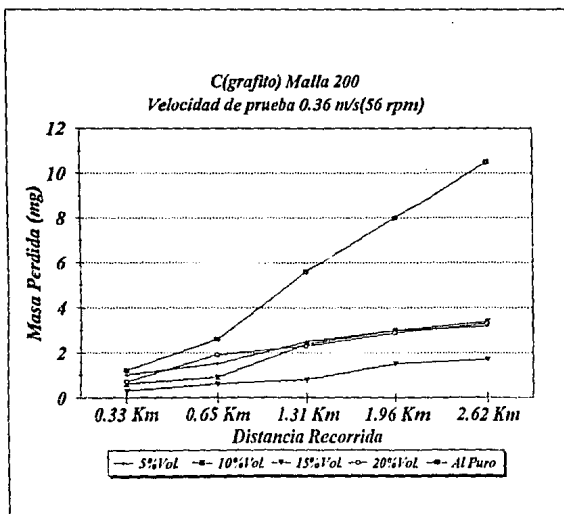
	K exp - 05				
	15 min	30 min	60 min	90 min	120 min
Probeta	1.78 Km *	3.57 Km *	7.15 Km *	10.73 Km *	14.3 Km *
1C	3.046	3.087	3.067	3.034	4.180
2C	2.653	4.341	5.387	5.199	4.533
3C	0.393	0.315	0.435	0.553	0.711
4C	0.642	0.763	0.603	0.831	0.865
5C	1.855	2.339	2.944	2.944	3.096
6C	2.785	2.746	2.418	2.199	2.326
7C	0.572	0.450	0.491	0.559	0.685
8C	0.809	0.769	0.647	0.617	0.688
9C	2.091	5.283	6.663	9.503	8.555
10C	6.280	6.730	6.655	8.558	8.076
11C	10.421	0.210	13.390	14.654	15.441
12C	22.054	23.322	18.526	16.302	21.379
13C	2.091	5.678	6.470	9.155	9.752
14C	6.280	6.529	5.299	9.829	10.022
15C	7.189	8.885	12.507	13.817	14.716
16C	18.927	19.622	17.718	17.583	22.046
17C	10.391	10.432	11.815	23.575	32.839

(*) Distancia recorrida en cada intervalo de tiempo.

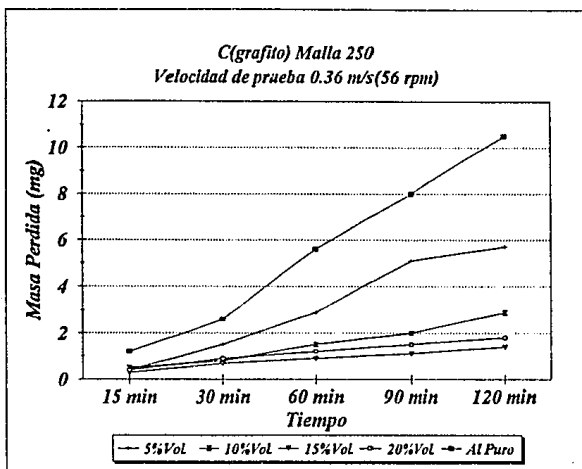
TABLA 17



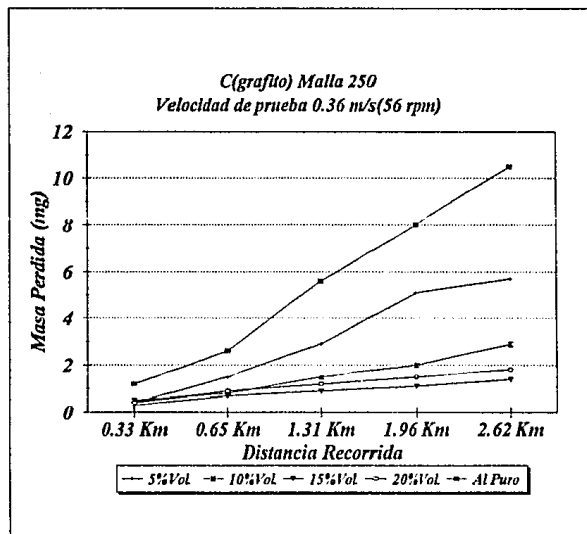
GRAFICA 3



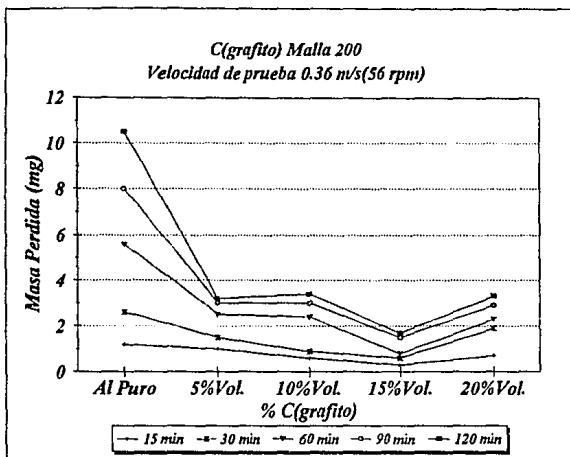
GRAFICA 4



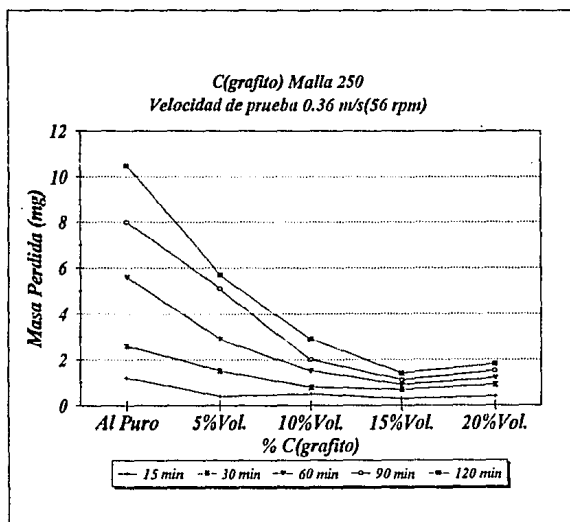
GRAFICA 5



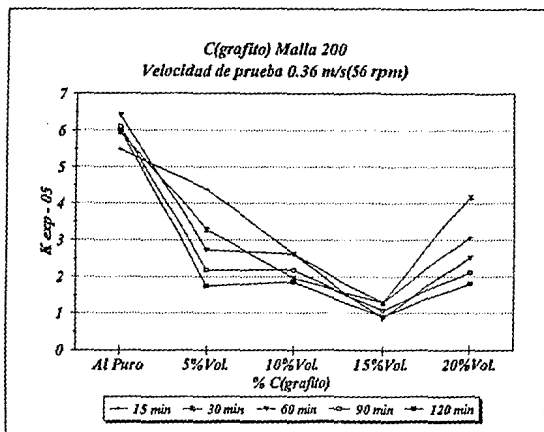
GRAFICA 6



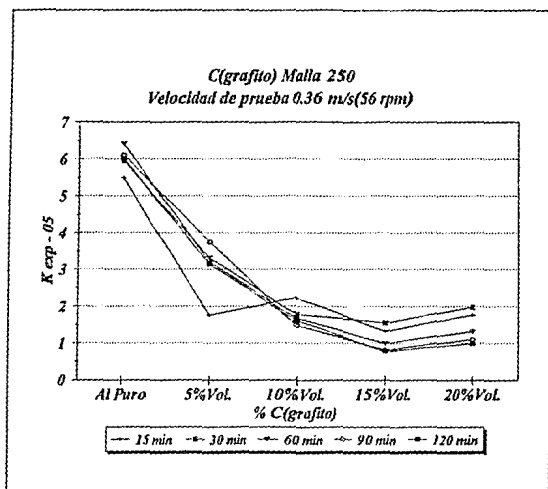
GRAFICA 7



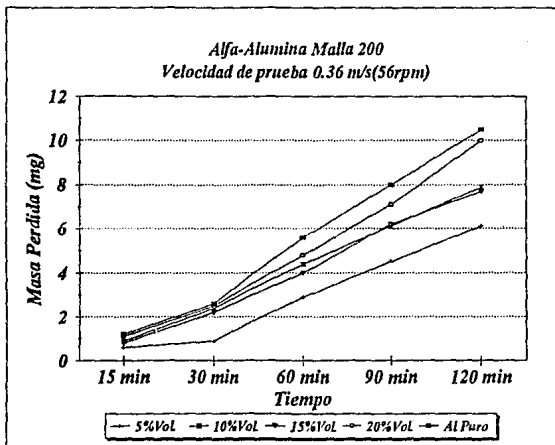
GRAFICA 8



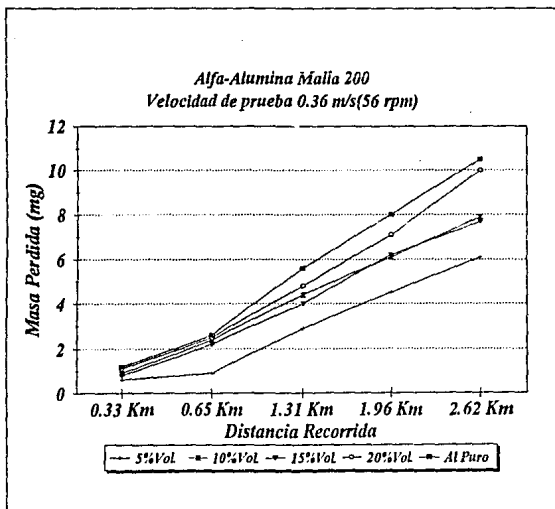
GRAFICA 9



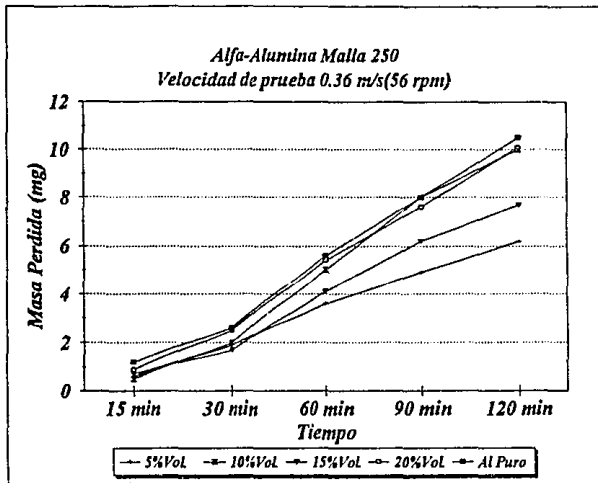
GRAFICA 10



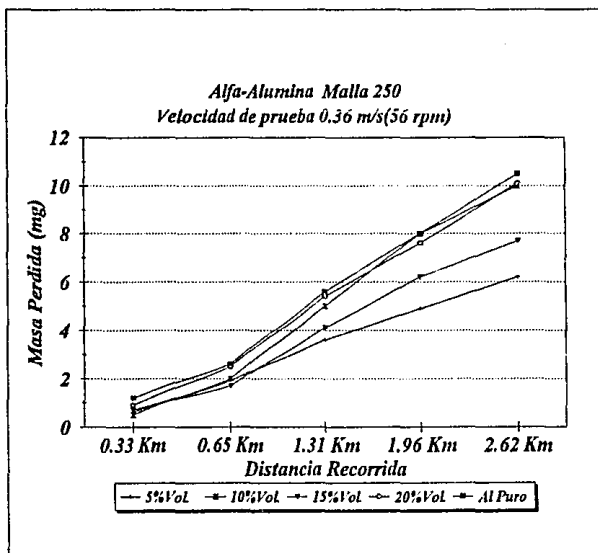
GRAFICA 11



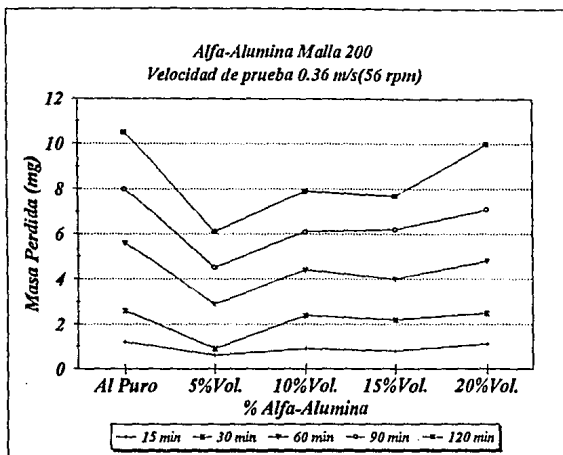
GRAFICA 12



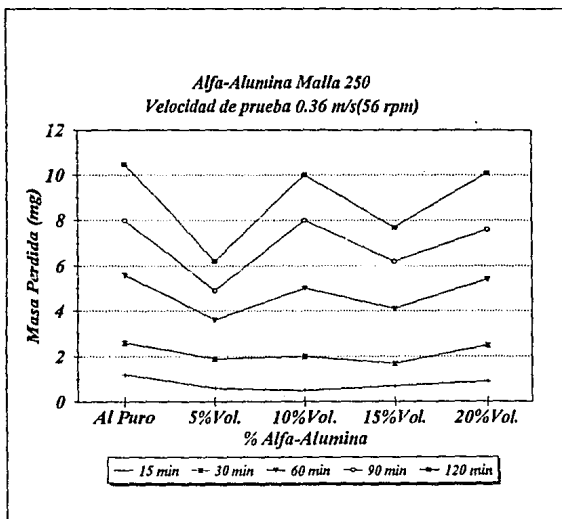
GRAFICA 13



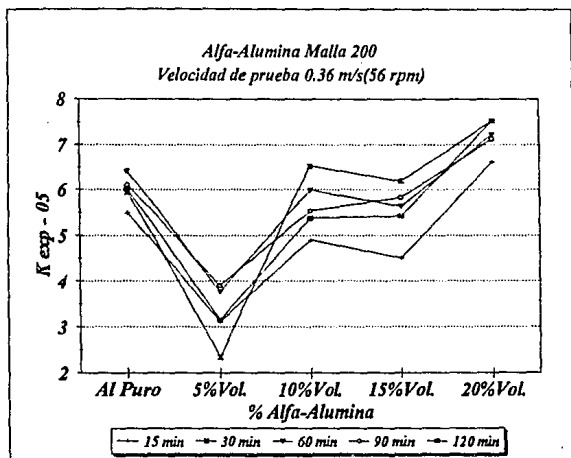
GRAFICA 14



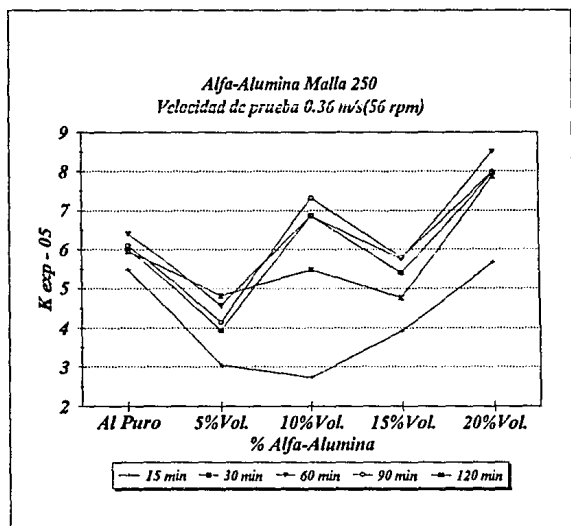
GRAFICA 15



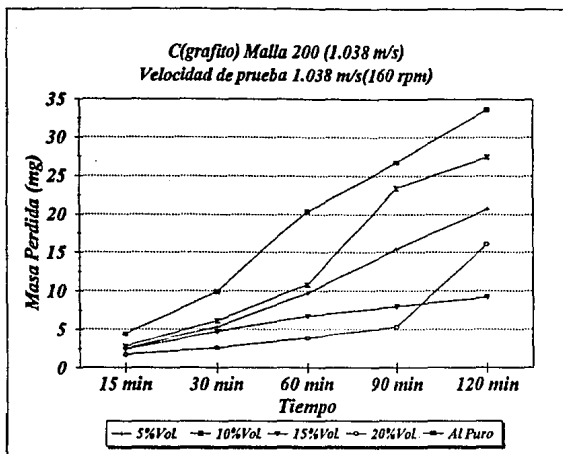
GRAFICA 16



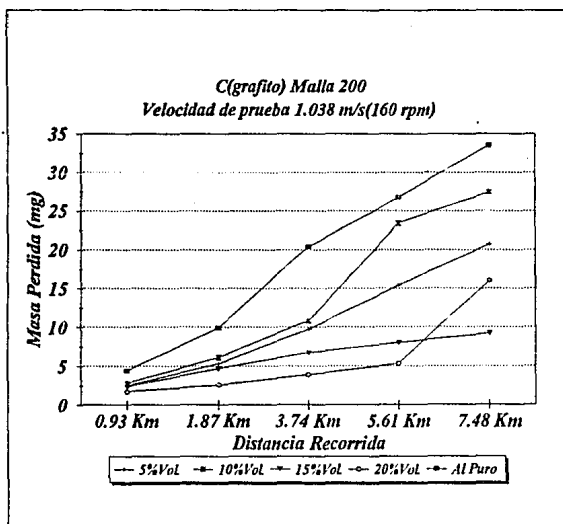
GRAFICA 17



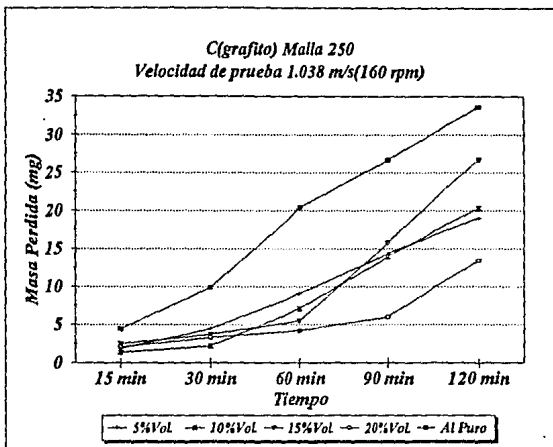
GRAFICA 18



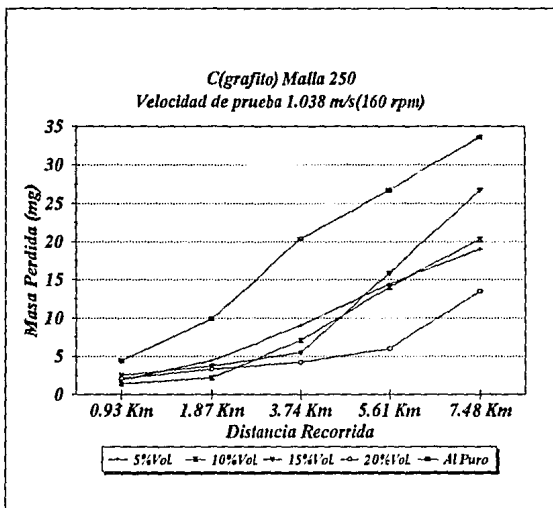
GRAFICA 19



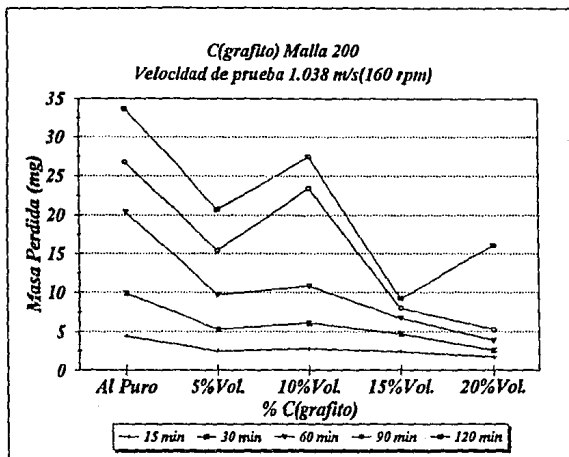
GRAFICA 20



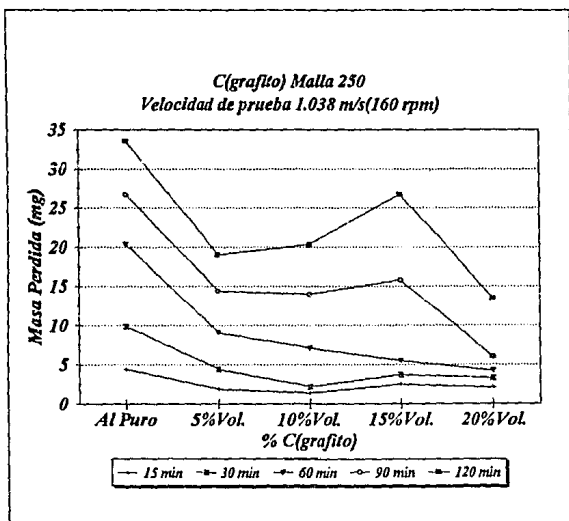
GRAFICA 21



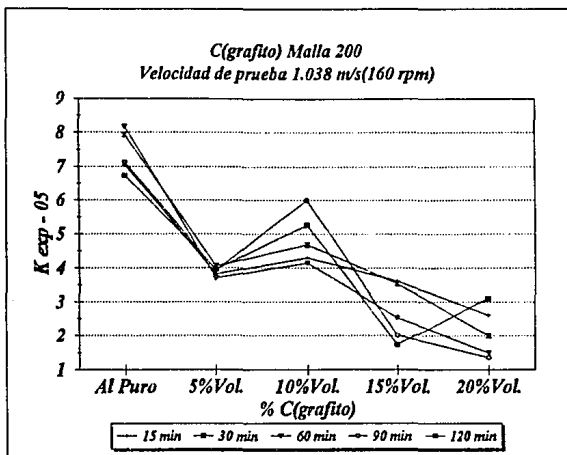
GRAFICA 22



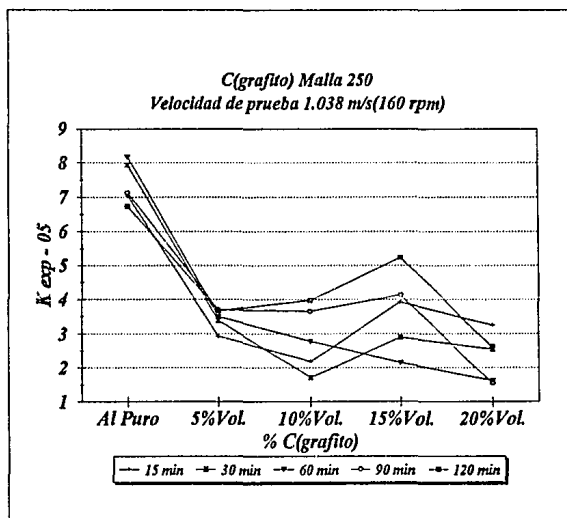
GRAFICA 23



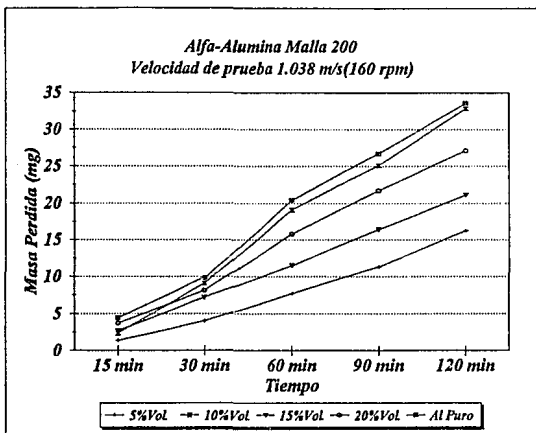
GRAFICA 24



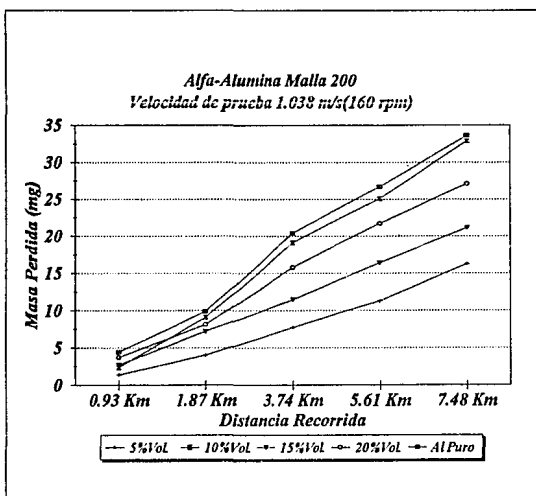
GRAFICA 25



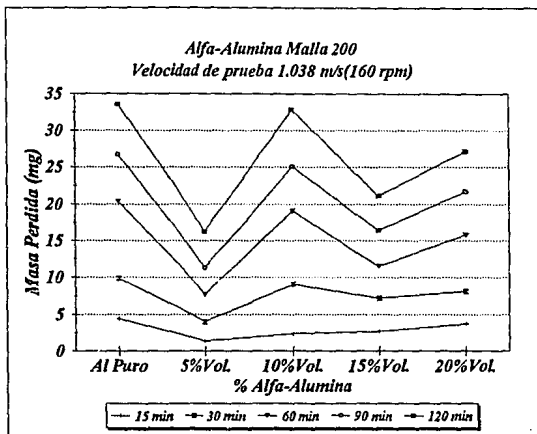
GRAFICA 26



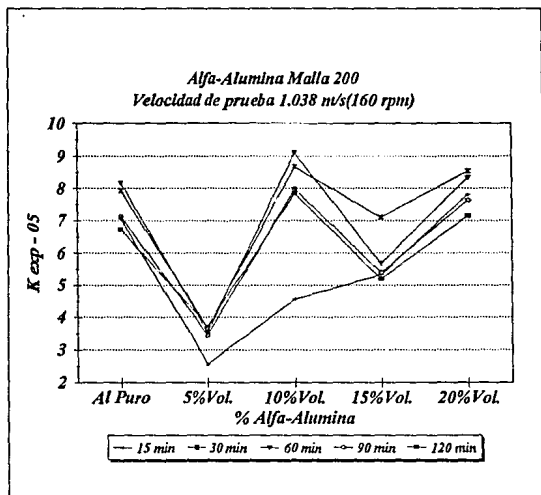
GRAFICA 27



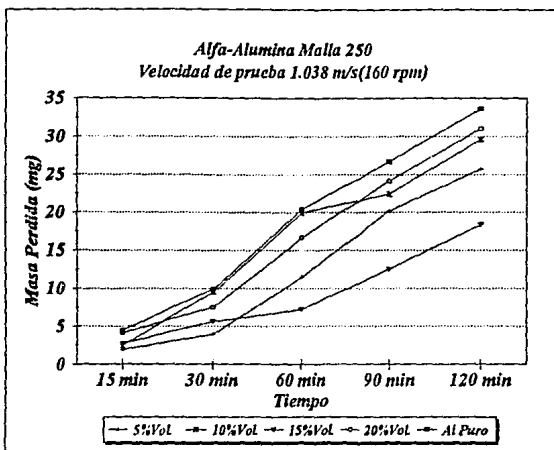
GRAFICA 28



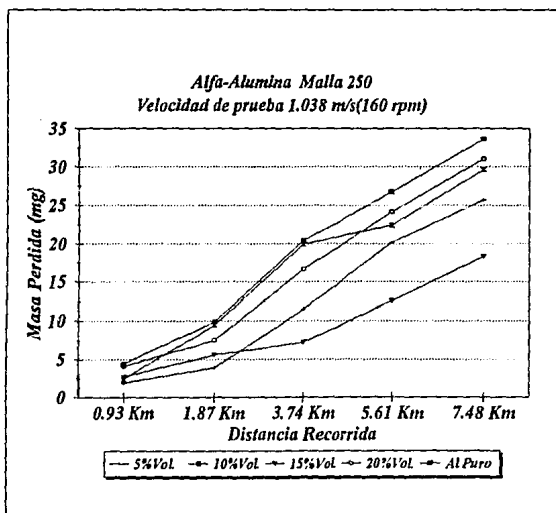
GRAFICA 29



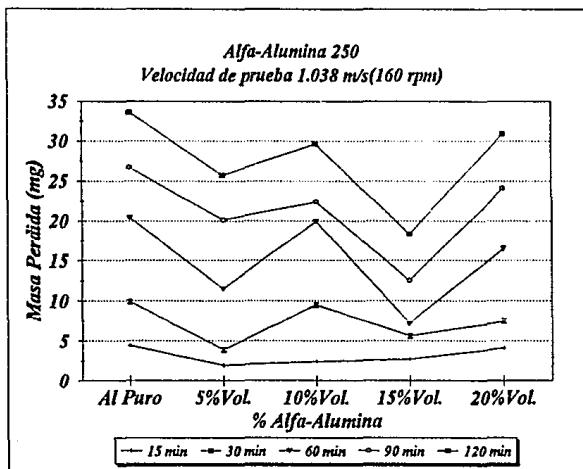
GRAFICA 30



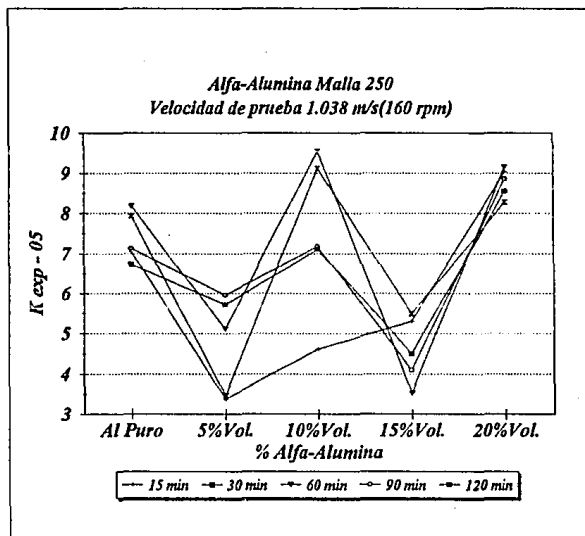
GRAFICA 31



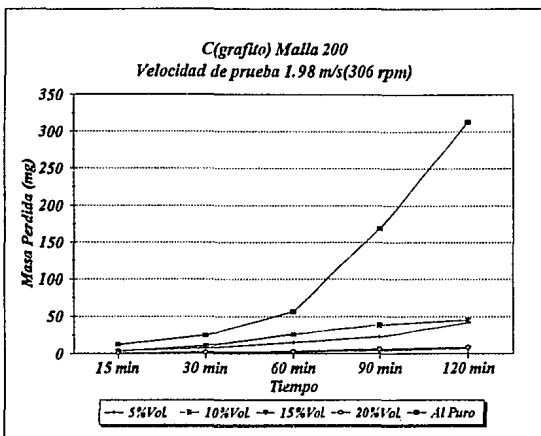
GRAFICA 32



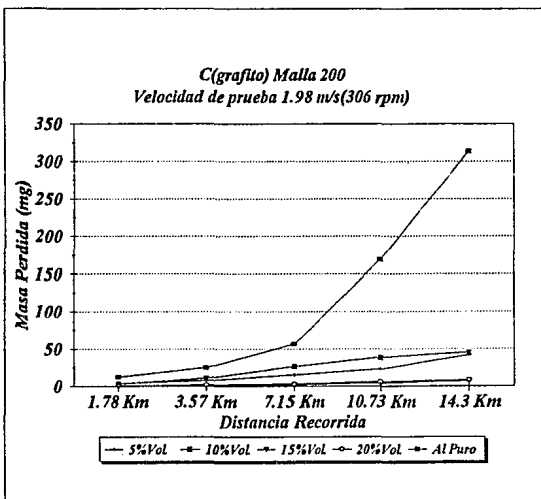
GRAFICA 33



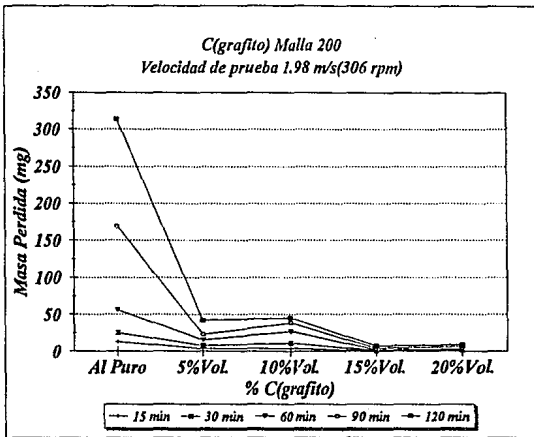
GRAFICA 34



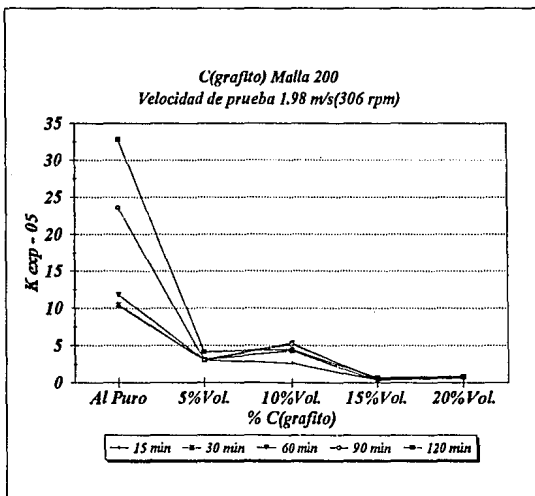
GRAFICA 35



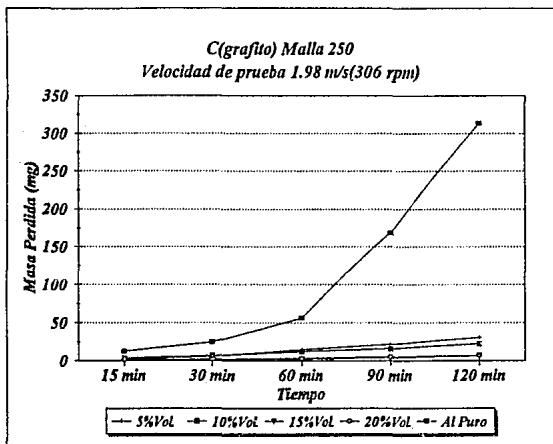
GRAFICA 36



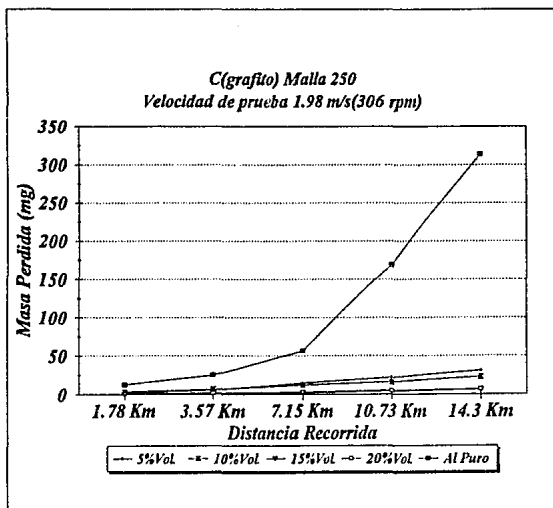
GRAFICA 37



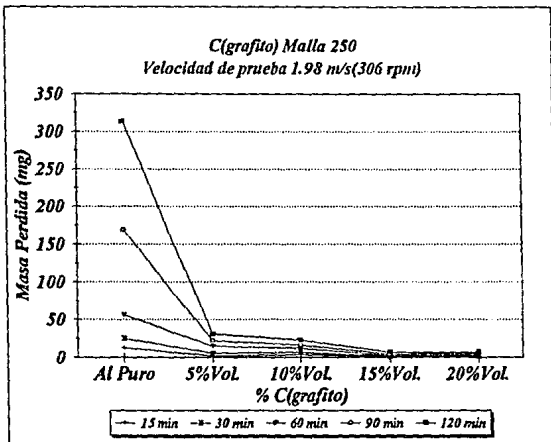
GRAFICA 38



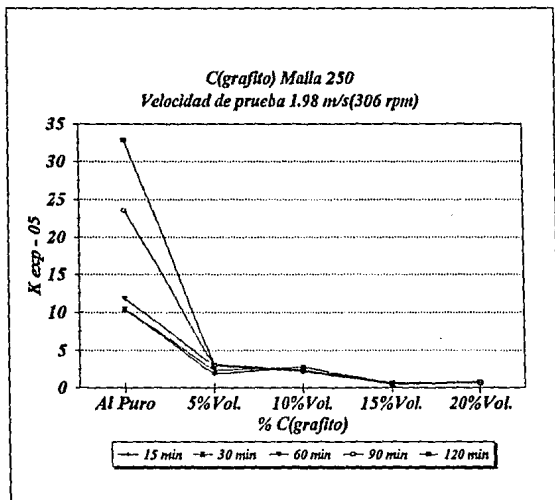
GRAFICA 39



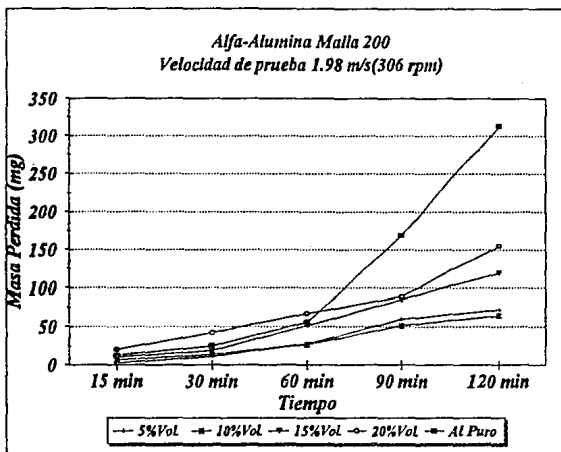
GRAFICA 40



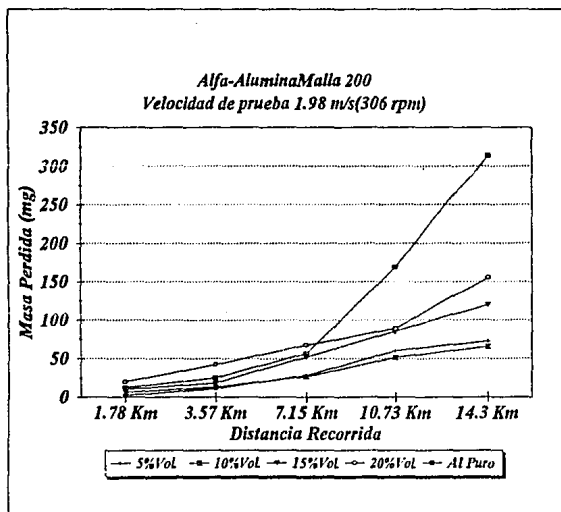
GRAFICA 41



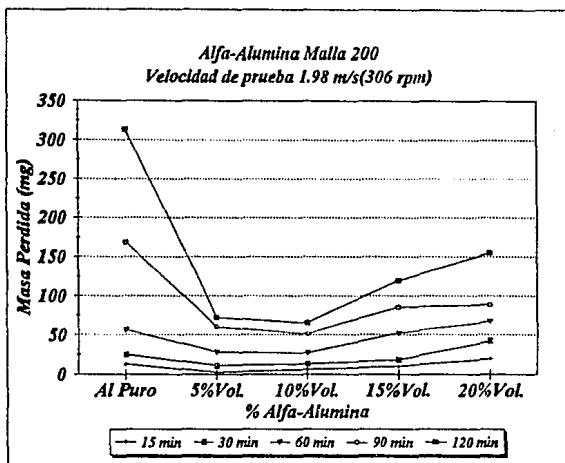
GRAFICA 42



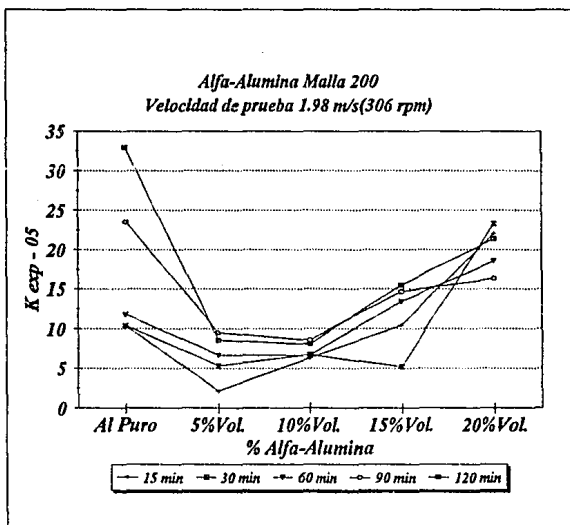
GRAFICA 43



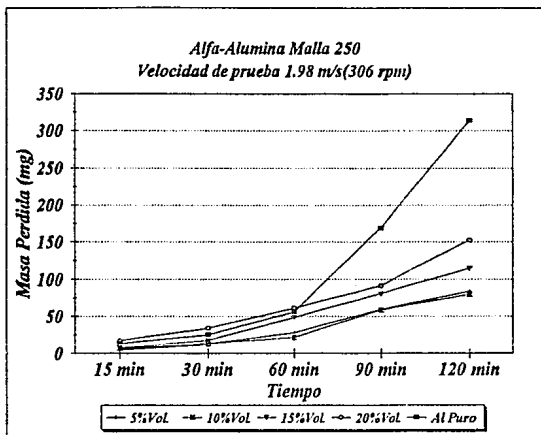
GRAFICA 44



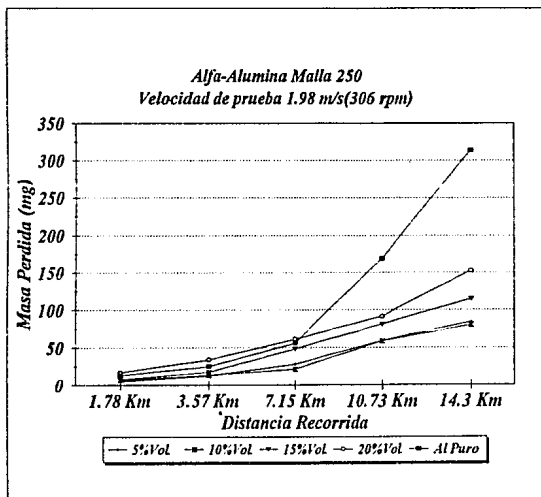
GRAFICA 45



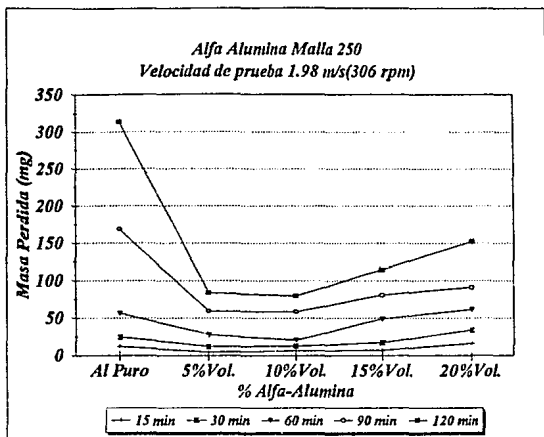
GRAFICA 46



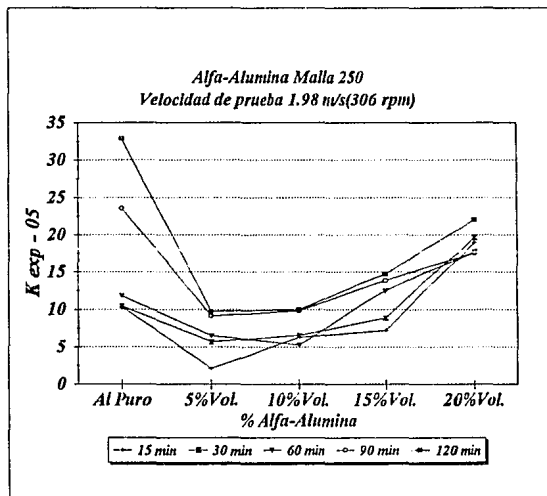
GRAFICA 47



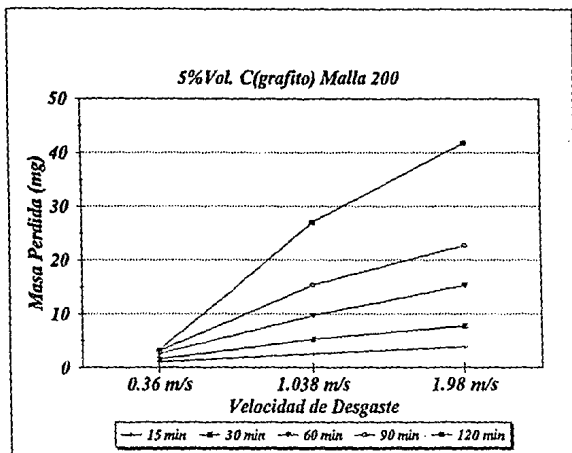
GRAFICA 48



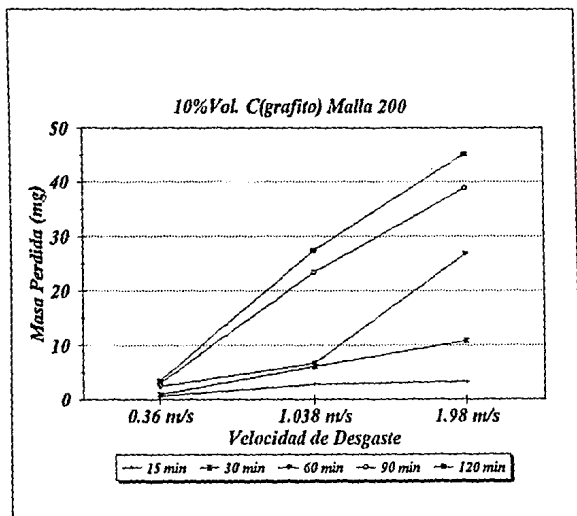
GRAFICA 49



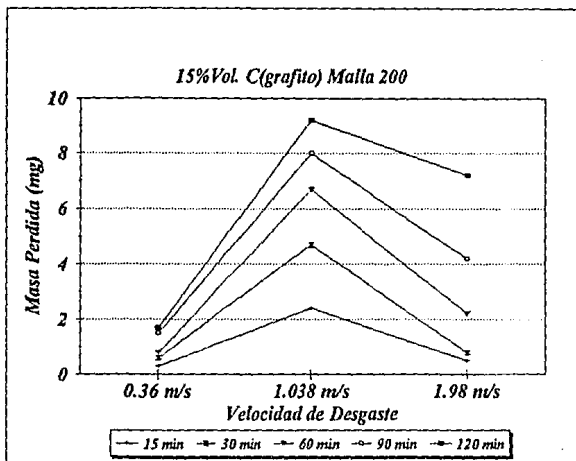
GRAFICA 50



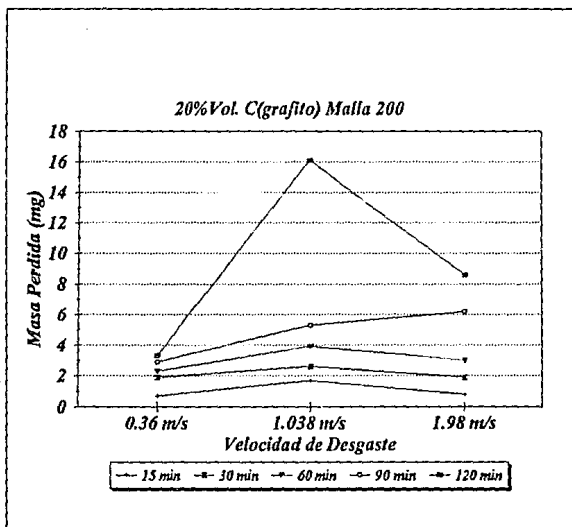
GRAFICA 51



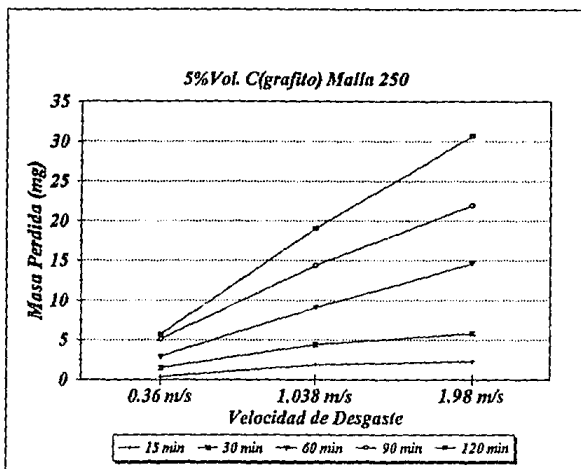
GRAFICA 52



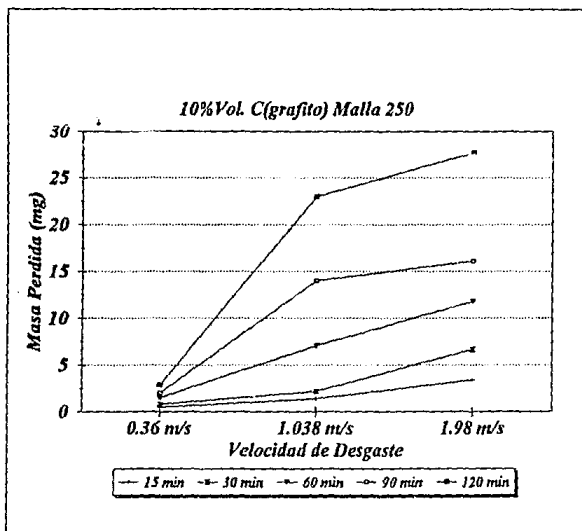
GRAFICA 53



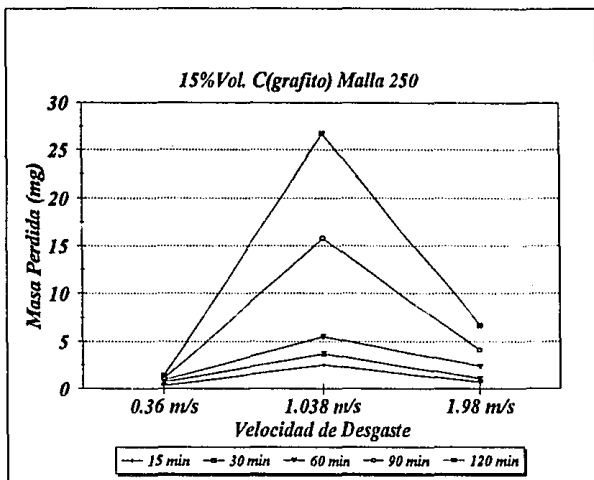
GRAFICA 54



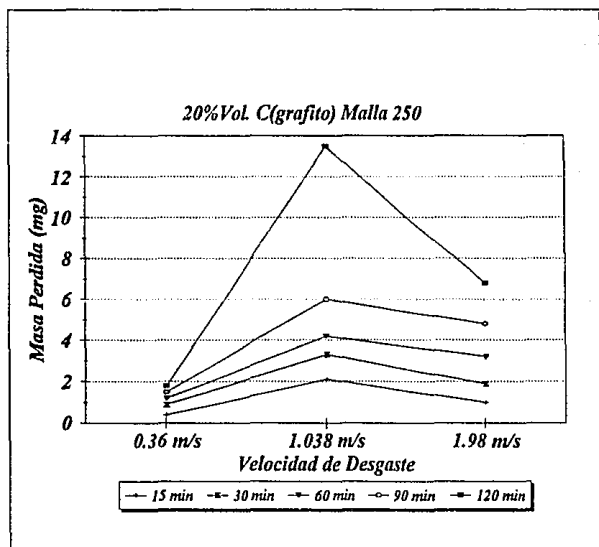
GRAFICA 55



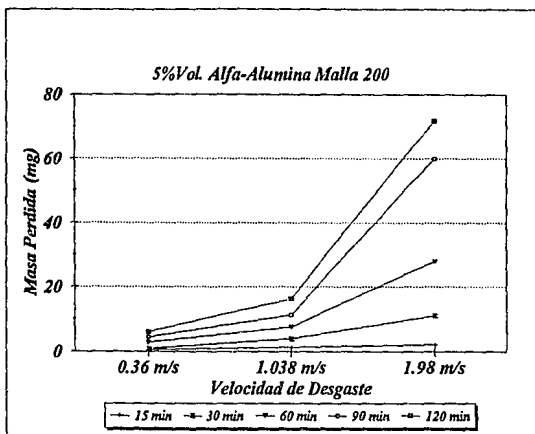
GRAFICA 56



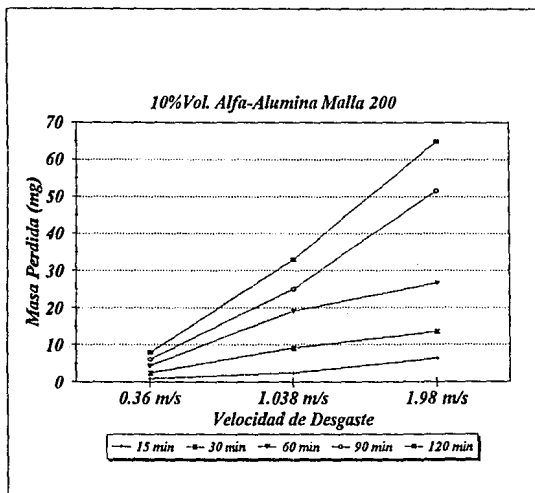
GRAFICA 57



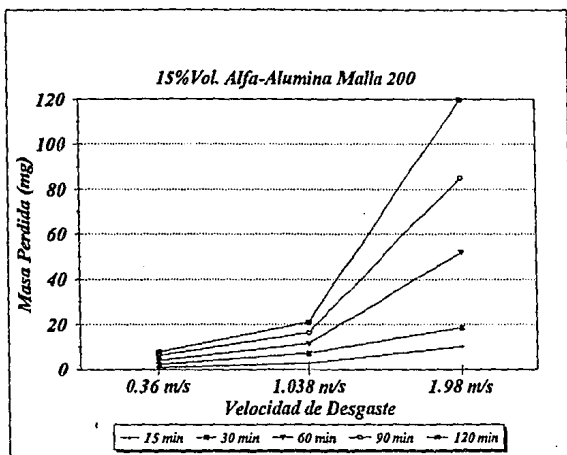
GRAFICA 58



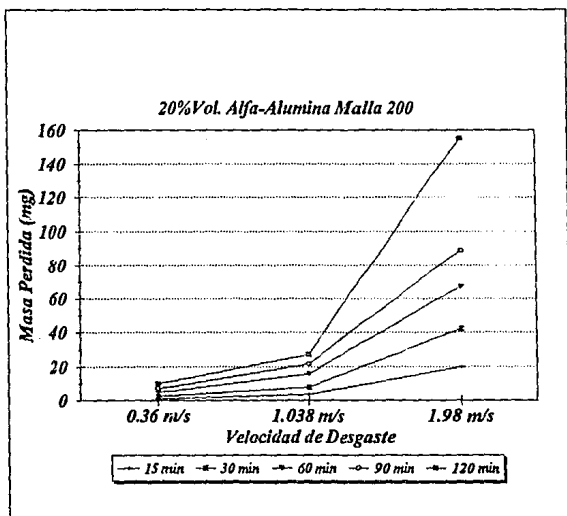
GRAFICA 59



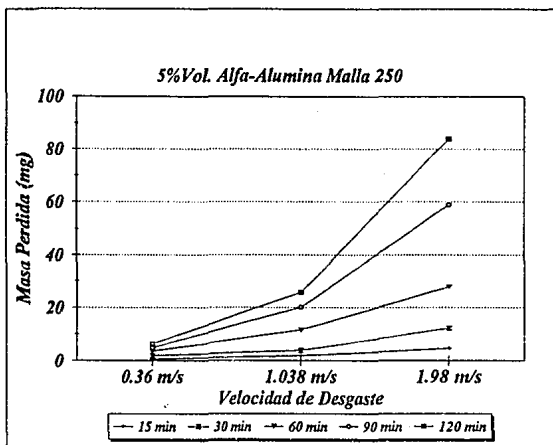
GRAFICA 60



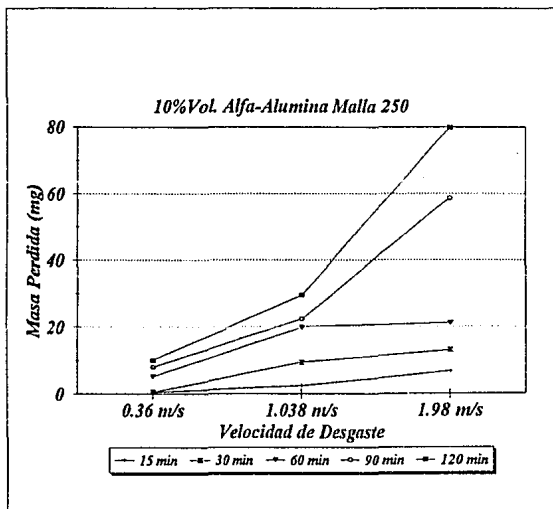
GRAFICA 61



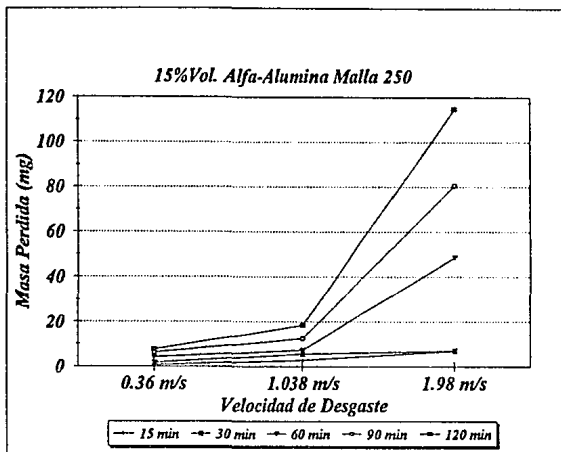
GRAFICA 62



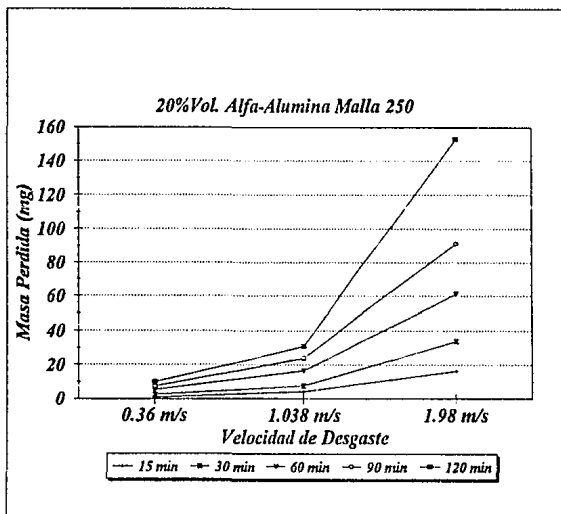
GRAFICA 63



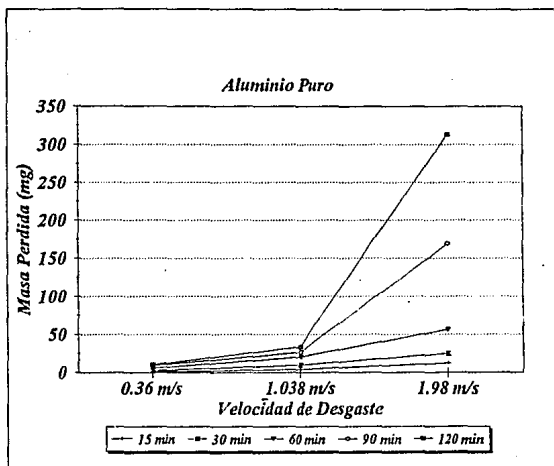
GRAFICA 64



GRAFICA 65



GRAFICA 66



GRAFICA 67

3.6 DISTRIBUCION DE TAMAÑO DE PARTICULAS

Para utilizar el analizador de imágenes, primero es necesario calibrarlo. Se parte de un círculo de calibración, cuya superficie es conocida con exactitud, 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 leídos en cantidades reales.

—Área medida del círculo de calibración = 3354 pp²

—Área real del círculo de calibración = 6362 μ²

—Factor de calibración de área = ARCCalib. / AMCCalib.

Donde : ARCCalib. = Área real del círculo de calibración.

AMCCalib. = Área medida del círculo de calibración.

Factor de calibración de área = 1.8968 μ² / pp²

—Factor de calibración de longitud = (Factor de calib. de área)^{1/2}

Factor de calibración de longitud = 1.3772 μ / pp

—Tamaño de la banda = 5 / 1.3772 = 3.63

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 solamente para las probetas con un 15 %Vol. de partículas reforzantes ya que se observó que las gráficas de todas las probetas tienen tendencias muy similares, por lo que se decidió presentar solamente gráficas representativas de todo el conjunto. De este modo se eligió de manera arbitraria a las probetas del 15 %Vol.

Rango de tamaño (micras)	Probeta 3A 15%Vol. C(grafito)		Probeta 7A 15%Vol. C(grafito)	
	Malla 200		Malla 250	
	Partículas Σ	Porcentaje %	Partículas Σ	Porcentaje %
0 - 3.63	4	7.14	5	5.55
3.63 - 7.26	8	14.28	15	16.66
7.26 - 10.89	5	8.92	7	7.77
10.89 - 14.52	4	7.14	7	7.77
14.52 - 18.15	3	5.35	9	10
18.15 - 21.78	2	3.57	10	11.11
21.78 - 25.41	4	7.14	8	8.88
25.41 - 29.04	2	3.57	7	7.77
29.04 - 32.67	5	8.92	4	4.44
32.67 - 36.30	3	5.35	6	6.66
36.30 - 39.93	5	8.92	3	3.33
39.93 - 43.56	3	5.35	2	2.22
43.56 - 47.19	2	3.57	3	3.33
47.19 - 50.82	1	1.78	2	2.22
50.82 - 54.45	1	1.78	0	0
54.45 - 58.08	1	1.78	1	1.11
58.08 - 61.71	1	1.78	0	0
61.71 - 65.34	1	1.78	1	1.11
65.34 - 68.97	1	1.78	-----	-----
TOTAL =	56	99.9	90	99.93

TABLA 18

Rango de tamaño (micras)	PROBETA 11A 15%Vol. α -Al ₂ O ₃		PROBETA 15A 15%Vol. α -Al ₂ O ₃	
	Malla 200		Malla 250	
	Partículas Σ	Porcentaje %	Partículas Σ	Porcentaje %
0 - 3.63	2	4	7	10.6
3.63 - 7.26	4	8	1	1.51
7.26 - 10.89	3	6	11	16.66
10.89 - 14.52	2	4	3	4.54
14.52 - 18.15	3	6	8	12.12
18.15 - 21.78	5	10	2	3.03
21.78 - 25.41	3	6	4	6.06
25.41 - 29.04	5	10	8	12.12
29.04 - 32.67	4	8	6	9.09
32.67 - 36.30	6	12	5	7.57
36.30 - 39.93	5	10	4	6.06
39.93 - 43.56	3	6	2	3.03
43.56 - 47.19	1	2	2	3.03
47.19 - 50.82	1	2	2	3.03
50.82 - 54.45	1	2	1	1.51
54.45 - 58.08	1	2	0	0
58.08 - 61.71	1	2	-----	-----
61.71 - 65.34	-----	-----	-----	-----
65.34 - 68.97	-----	-----	-----	-----
TOTAL =	50	100	66	99.96

TABLA 19

La tabla 20 muestra los resultados obtenidos para el porcentaje real de partículas reforzantes en cada probeta, tomadas a partir del promedio de las 3 zonas analizadas en cada muestra.

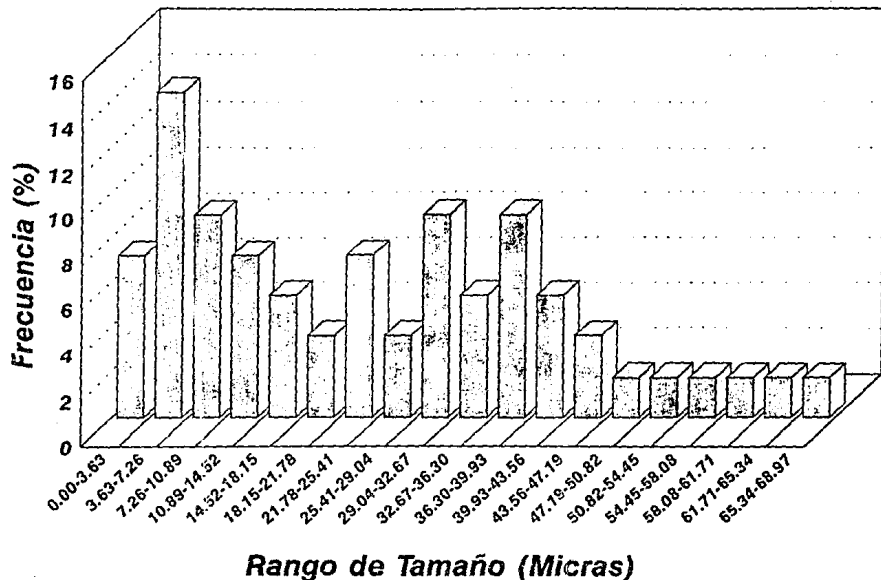
<i>Probeta</i>	<i>% Partículas reforzantes (área)</i>
<i>1A</i>	<i>6.0</i>
<i>2A</i>	<i>10.6</i>
<i>3A</i>	<i>14.5</i>
<i>4A</i>	<i>20.4</i>
<i>5A</i>	<i>5.3</i>
<i>6A</i>	<i>9.7</i>
<i>7A</i>	<i>15</i>
<i>8A</i>	<i>19.6</i>
<i>9A</i>	<i>5.4</i>
<i>10A</i>	<i>12.5</i>
<i>11A</i>	<i>15.9</i>
<i>12A</i>	<i>20.8</i>
<i>13A</i>	<i>5.3</i>
<i>14A</i>	<i>10.1</i>
<i>15A</i>	<i>14.6</i>
<i>16A</i>	<i>20.1</i>

TABLA 20

A continuación se muestran las gráficas obtenidas a partir de las tablas 18 y 19.

Distribución de tamaño de partículas
Probeta 3A 15%Vol. C(grafito) Malla 200

891

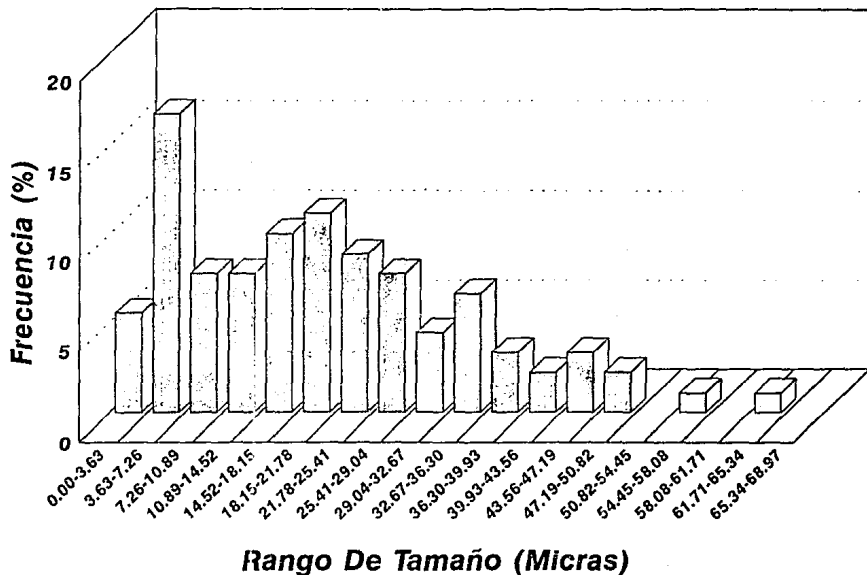


GRAFICA 68

Distribución de tamaño de partículas

Probeta 7A 15%Vol. C(grafito) Malla 250

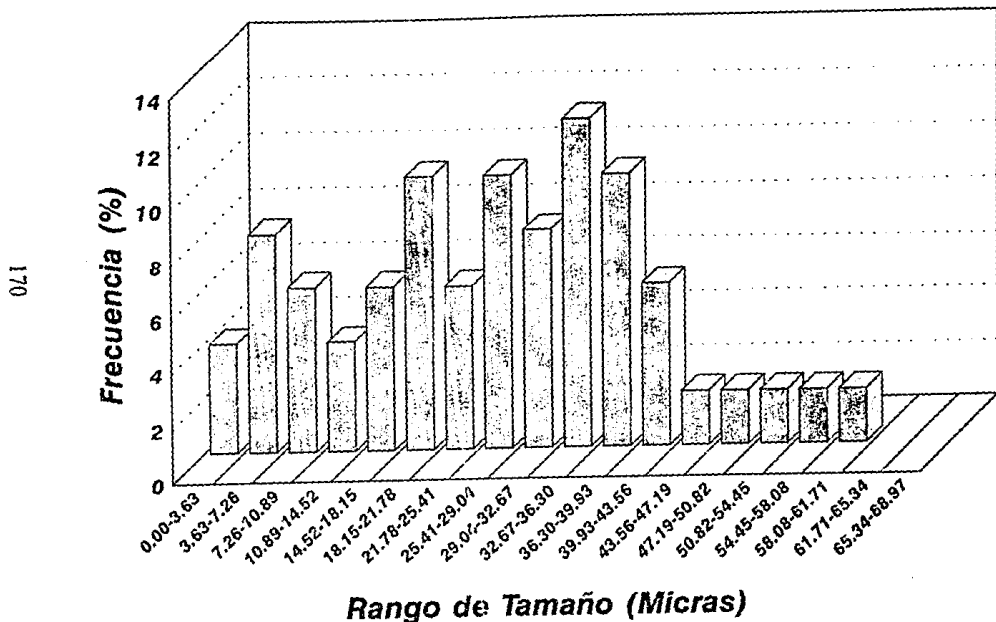
169



GRAFICA 69

Distribución de tamaño de partículas

Probeta 11A 15%Vol. Alfa-Alúmina Malla 200

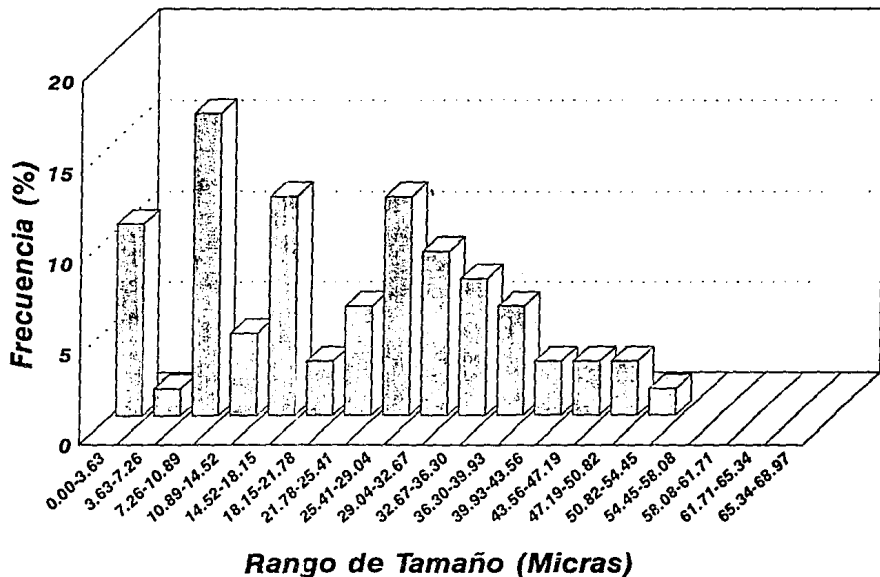


GRAFICA 70

Distribución de tamaño de partículas

Probeta 15A 15%Vol. Alfa-Alúmina Malla 250

171



GRAFICA 71

3.7 DISTANCIA ENTRE PARTICULAS

A continuación se presentan los resultados obtenidos de las mediciones de la distancia entre partículas.

Intervalo de distancia (mm)	FRECUENCIA			
	Probeta 1A	Probeta 2A	Probeta 3A	Probeta 4A
0 - 0.020	1	6	9	14
0.030 - 0.061	3	9	14	28
0.072 - 0.103	5	23	32	40
0.154 - 0.247	9	34	42	35
0.257 - 0.350	7	17	23	15
0.360 - 0.453	8	7	4	5
0.463 - 0.556	5	3	2	2
0.567 - 0.659	2	1	1	1
0.670 - 0.762	1	-----	-----	-----

TABLA 21 .- Compósito C(grafito) Malla 200.

Intervalo de distancia (mm)	FRECUENCIA			
	Probeta 5A	Probeta 6A	Probeta 7A	Probeta 8A
0 - 0.020	4	9	16	29
0.030 - 0.061	6	17	41	69
0.072 - 0.103	13	42	69	103
0.154 - 0.247	26	50	48	69
0.257 - 0.350	16	28	20	11
0.360 - 0.453	10	12	7	4
0.463 - 0.556	9	8	2	-----
0.567 - 0.659	6	4	1	-----
0.670 - 0.762	4	-----	-----	-----

TABLA 22 .- Compósito C(grafito) Malla 250.

Intervalo de distancia (mm)	FRECUENCIA			
	Probeta 9A	Probeta 10A	Probeta 11A	Probeta 12A
0 - 0.020	3	3	8	18
0.030 - 0.061	6	12	16	29
0.072 - 0.103	14	15	34	49
0.154 - 0.247	9	29	39	35
0.257 - 0.350	8	19	20	5
0.360 - 0.453	4	15	18	3
0.463 - 0.556	2	9	7	2
0.567 - 0.659	1	3	3	1
0.670 - 0.762	-----	1	1	-----

TABLA 23 .- Compósito de $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ Malla 200.

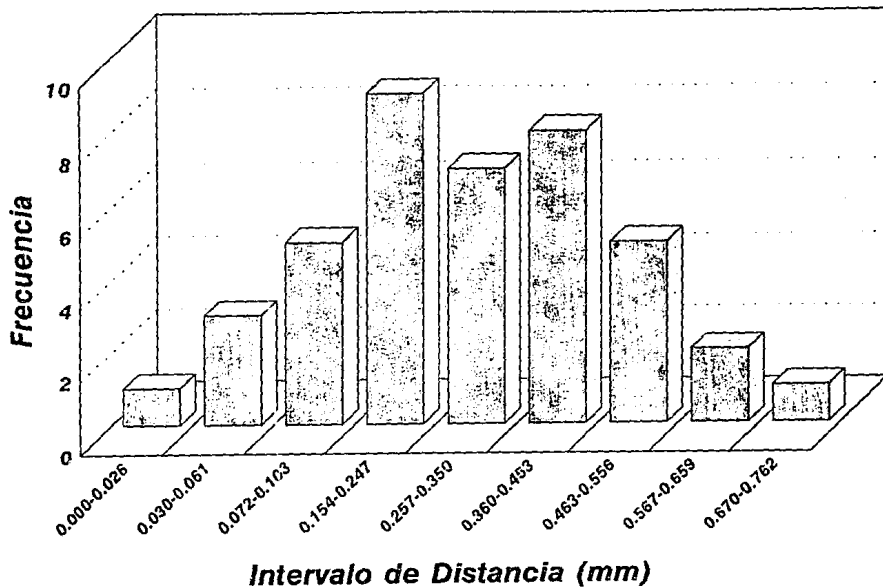
Intervalo de distancia (mm)	FRECUENCIA			
	Probeta 13A	Probeta 14A	Probeta 15A	Probeta 16A
0 - 0.020	1	5	7	35
0.030 - 0.061	6	17	36	54
0.072 - 0.103	15	35	60	72
0.154 - 0.247	17	40	81	61
0.257 - 0.350	15	35	40	12
0.360 - 0.453	10	16	15	4
0.463 - 0.556	6	4	4	3
0.567 - 0.659	3	2	2	1
0.670 - 0.762	1	1	1	-----

TABLA 24 .- Compósito de $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ Malla 250.

<i>Probeta</i>	\bar{X}	S^2	S
1A	0.301	0.215	0.464
2A	0.200	0.161	0.402
3A	0.181	0.149	0.386
4A	0.153	0.129	0.360
5A	0.288	0.207	0.455
6A	0.207	0.165	0.406
7A	0.145	0.125	0.353
8A	0.196	0.158	0.398
9A	0.197	0.162	0.402
10A	0.254	0.191	0.437
11A	0.218	0.171	0.414
12A	0.132	0.115	0.34
13A	0.261	0.195	0.442
14A	0.215	0.170	0.412
15A	0.187	0.152	0.390
16A	0.132	0.115	0.339

TABLA 25 .- *Media, varianza y desviación estándar de la distancia entre partículas de los compósitos obtenidos.*

Distancia interparticular
Probeta 1A 5%Vol. C(grafito) Malla 200

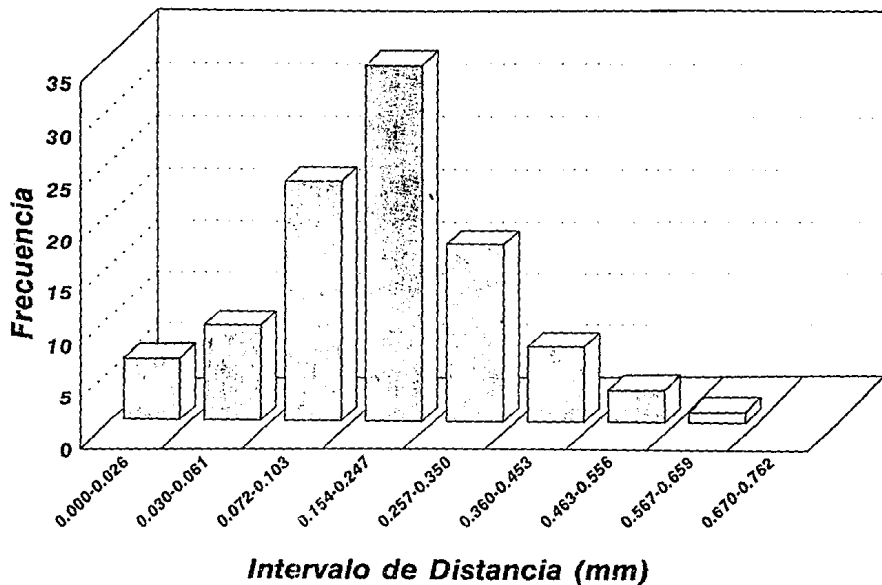


175

GRAFICA 72

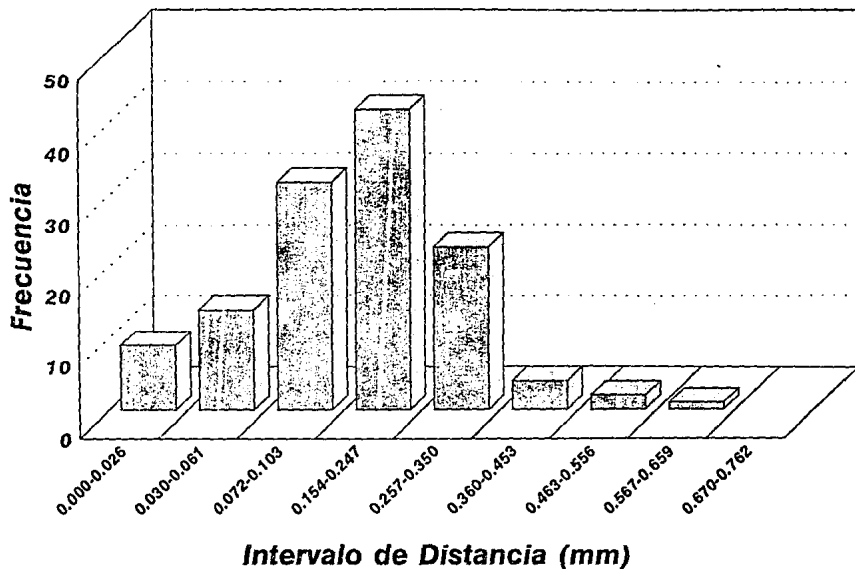
Distancia interparticular
Probeta 2A 10%Vol. C(grafito) Malla 200

176



GRAFICA 73

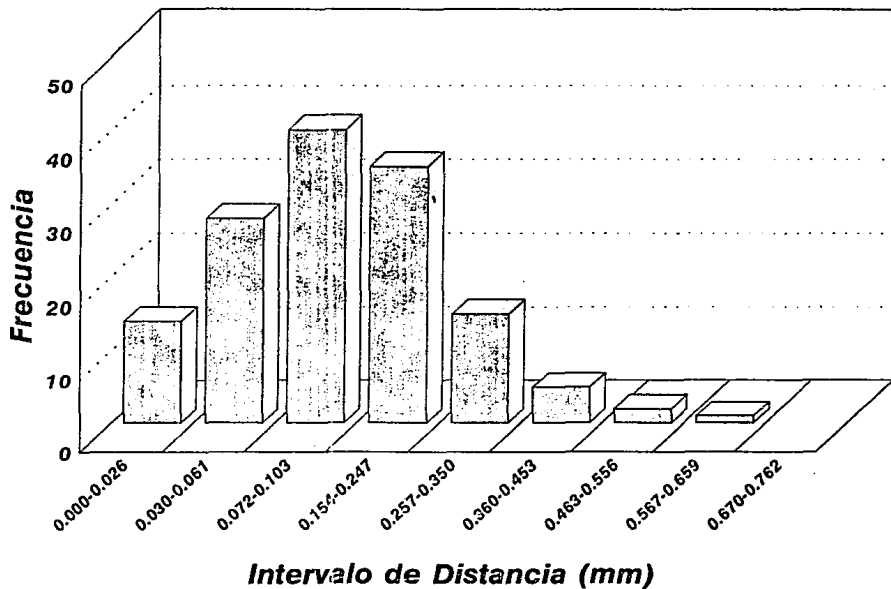
Distancia interparticular
Probeta 3A 15%Vol. C(grafito) Malla 200



GRAFICA 74

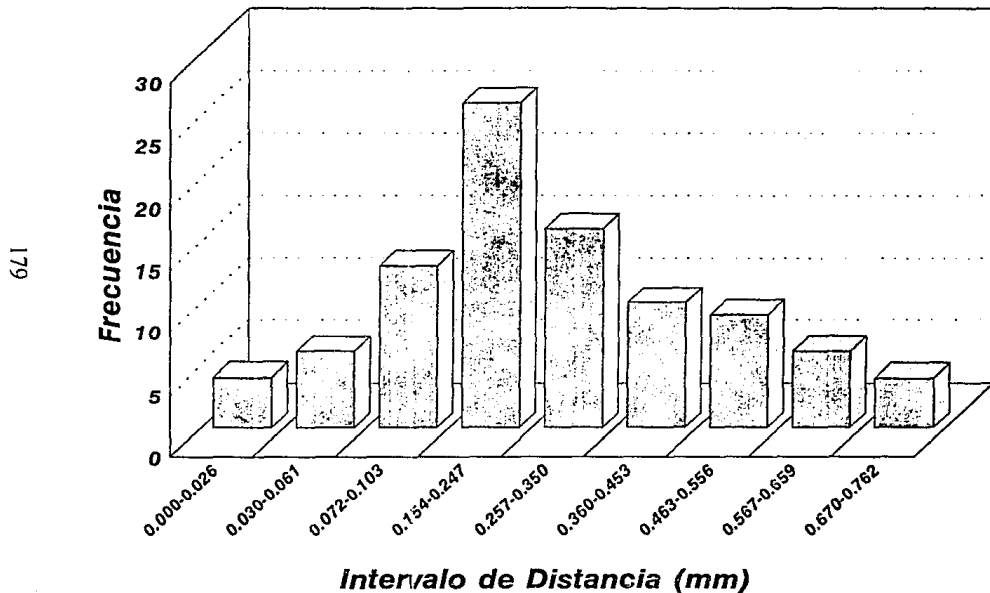
Distancia interparticular
Probeta 4A 20%Vol. C(grafito) Malla 200

178



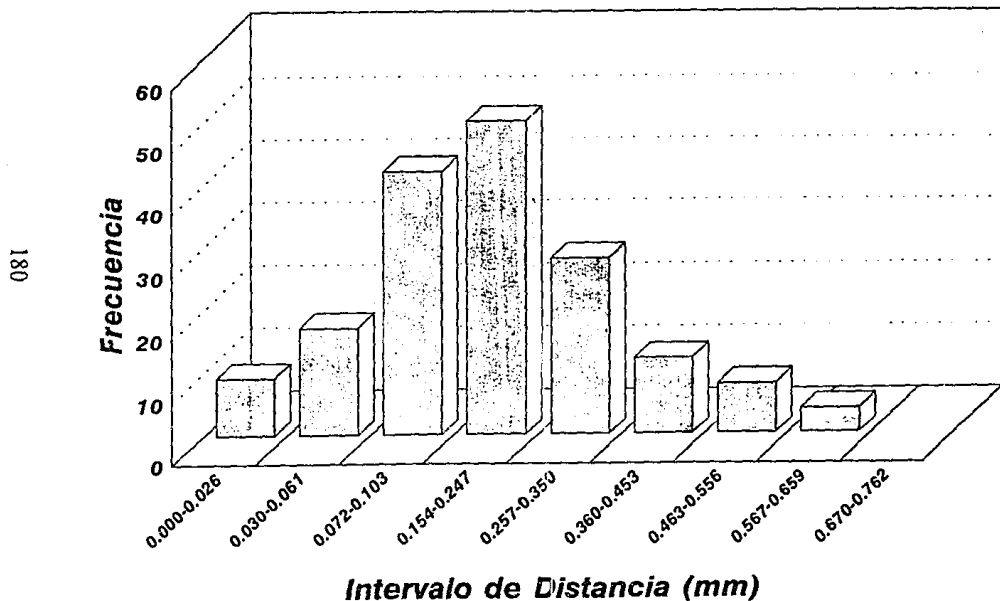
GRAFICA 75

Distancia interparticular
Probeta 5A 5%Vol. C(grafito) Malla 250



GRAFICA 76

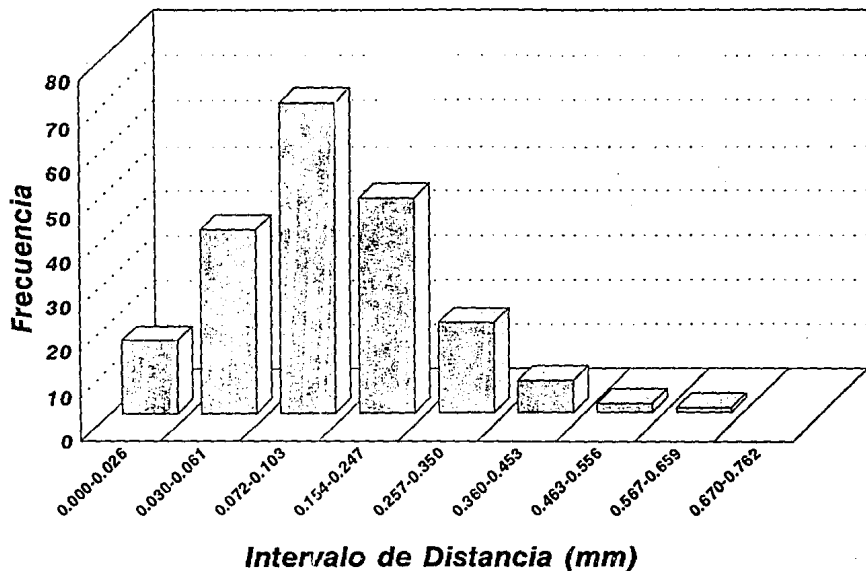
Distancia interparticular
Probeta 6A 10%Vol. C(grafito) Malla 250



GRAFICA 77

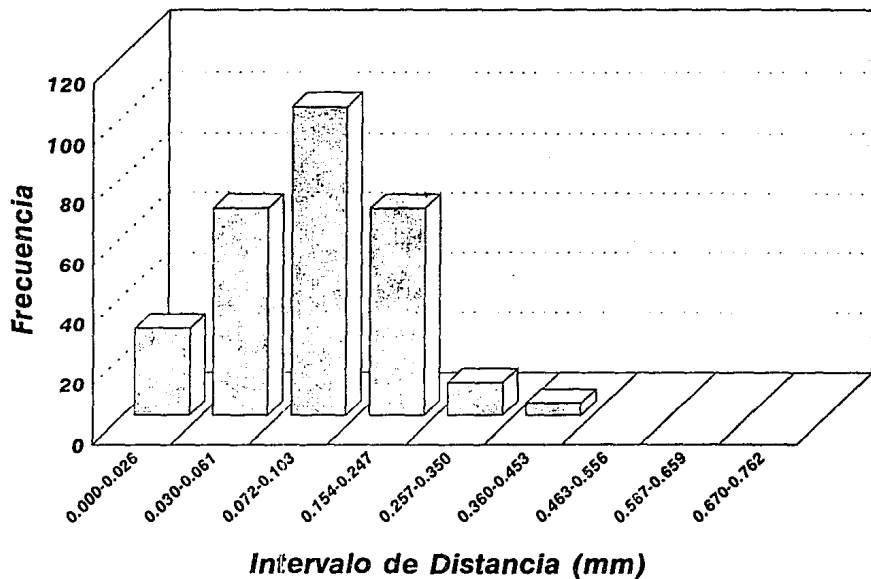
Distancia interparticular
Probeta 7A 15%Vol. C(grafito) Malla 250

181



GRAFICA 78

Distancia interparticular
Probeta 8A 20%Vol. C(grafito) Malla 250

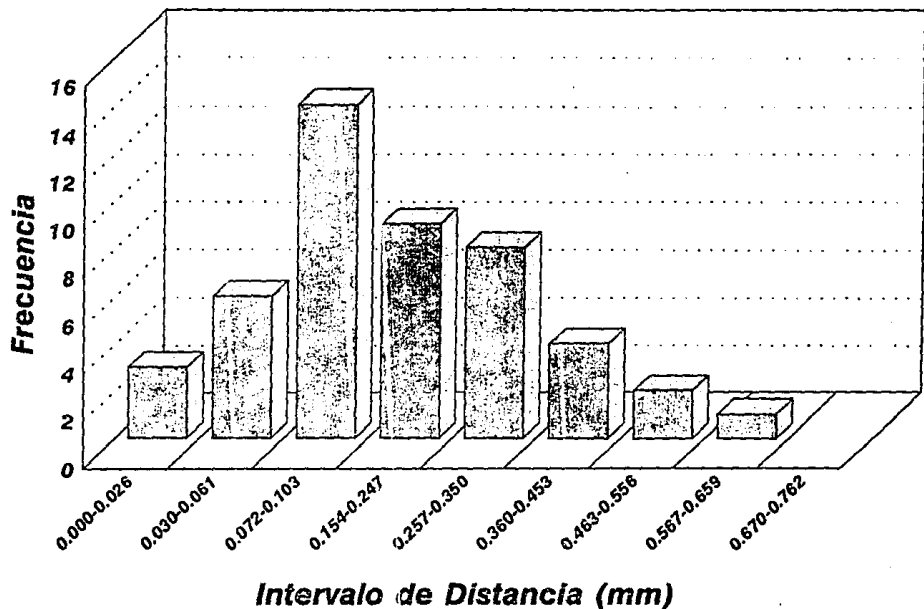


182

GRAFICA 79

Distancia interparticular
Probeta 9A 5%Vol. Alfa-Alúmina Malla 200

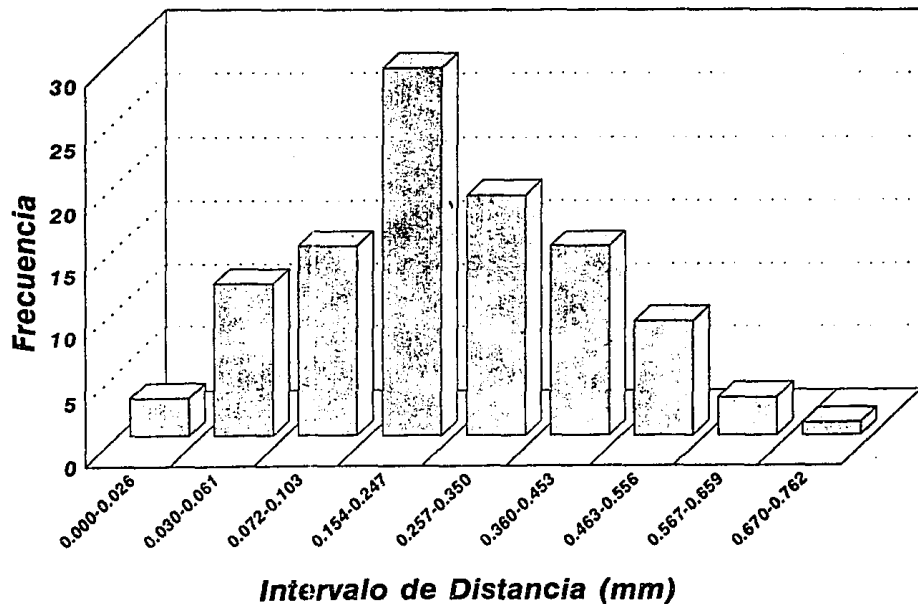
183



GRAFICA 80

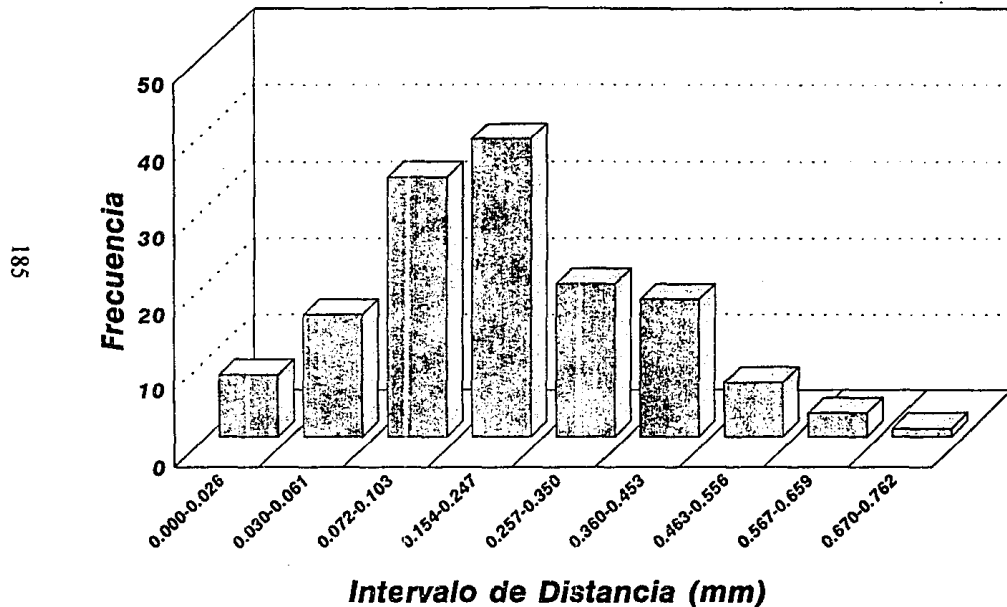
Distancia interparticular
Probeta 10A 10%Vol. Alfa-Alúmina Malla 200

184



GRAFICA 81

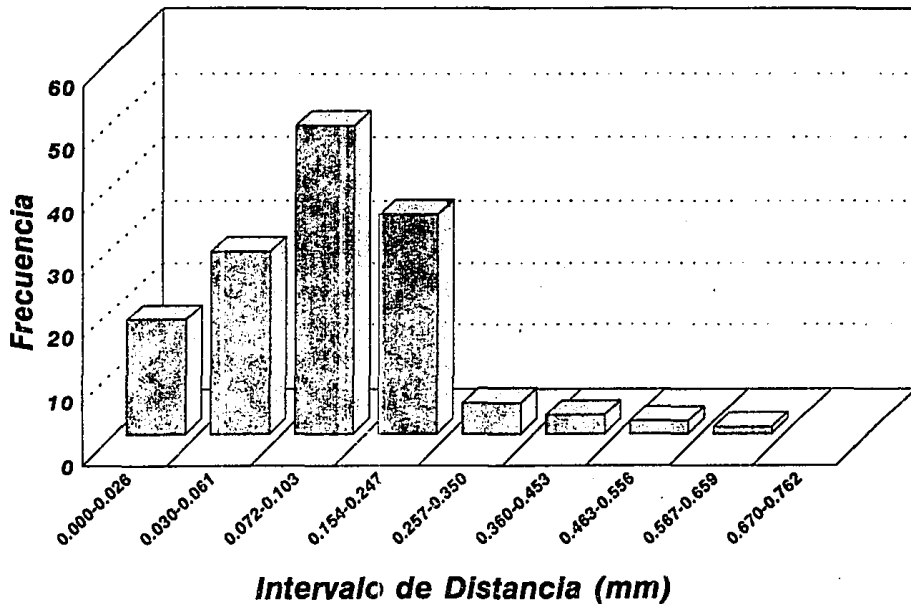
Distancia interparticular
Probeta 11A 15%Vol. Alfa-Alúmina Malla 200



GRAFICA 82

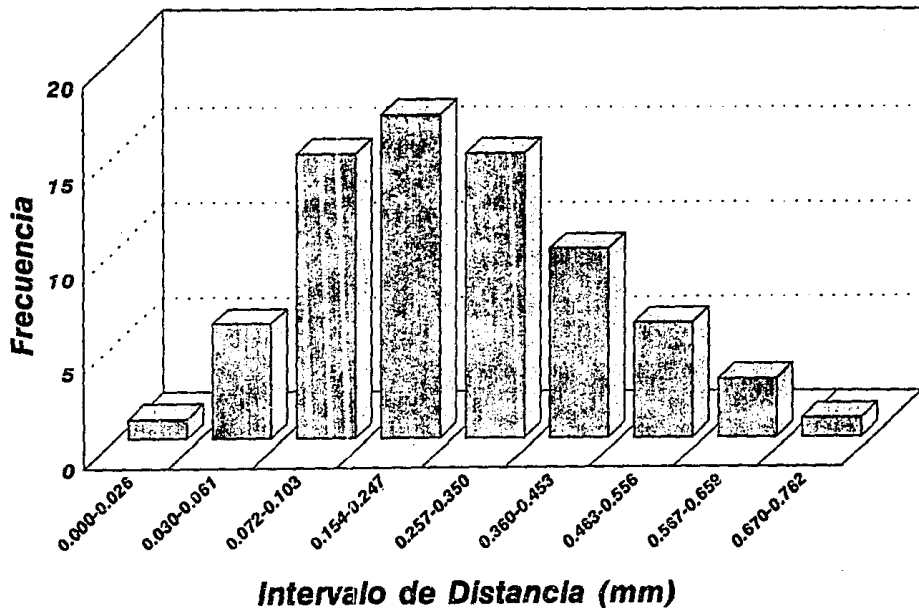
Distancia interparticular
Probeta 12A 20%Vol. Alfa-Alúmina Malla 200

186



GRAFICA 83

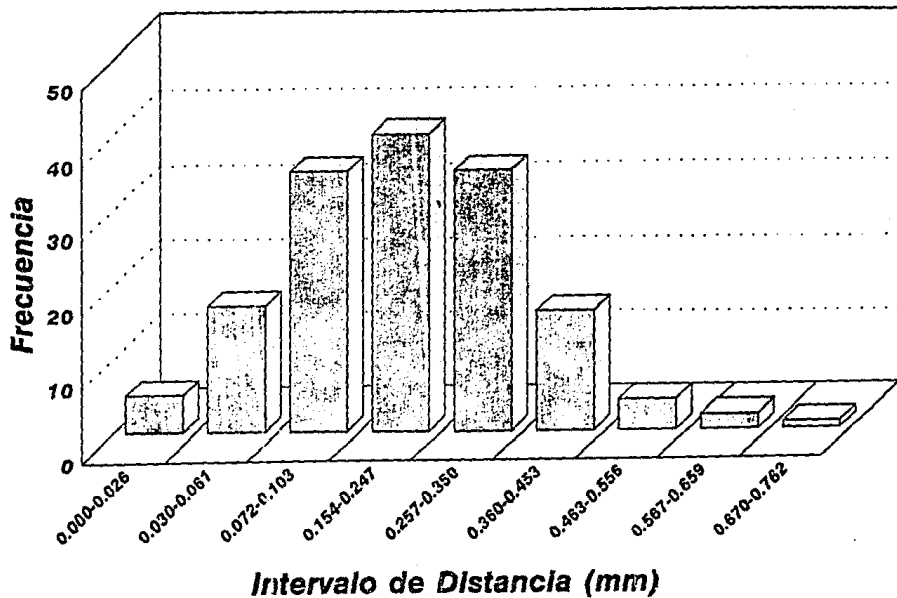
Distancia interparticular
Probeta 13A 5%Vol. Alfa-Alúmina Malla 250



GRAFICA 84

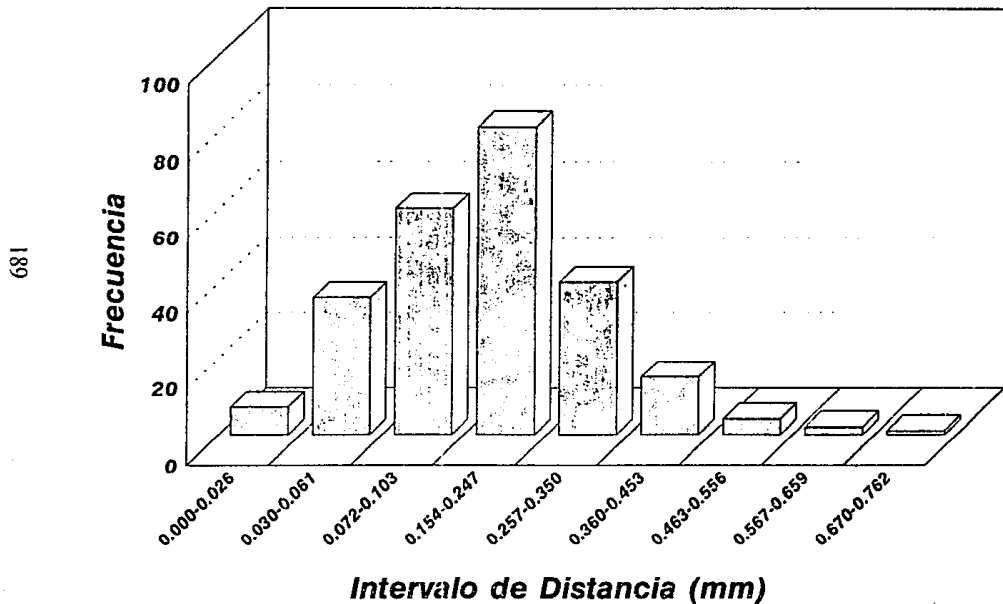
Distancia interparticular
Probeta 14A 10%Vol. Alfa-Alúmina Malla 250

188



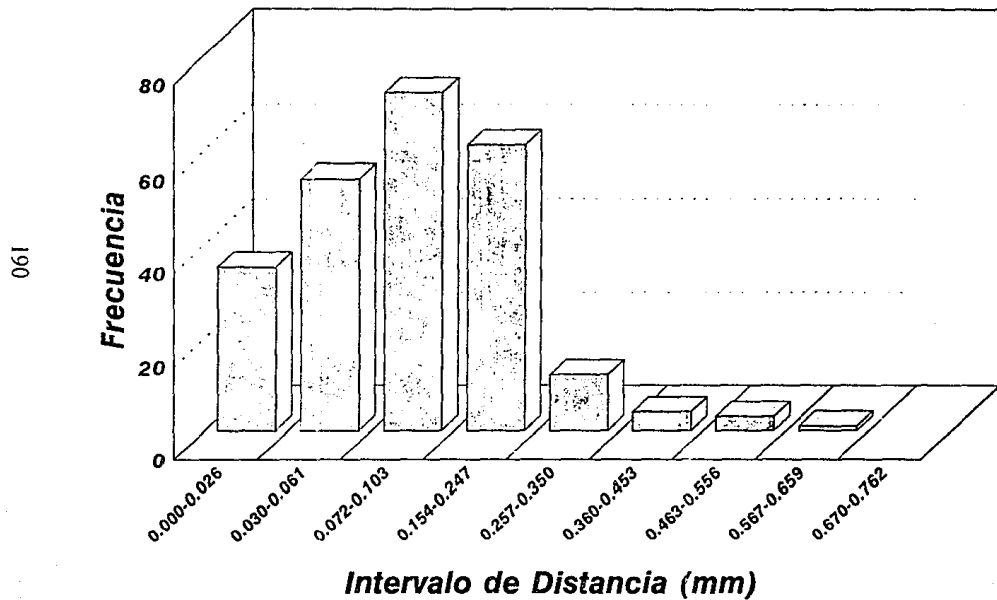
GRAFICA 85

Distancia interparticular
Probeta 15A 15%Vol. Alfa-Alúmina Malla 250



GRAFICA 86

Distancia interparticular
Probeta 16A 20%Vol. Alfa-Alúmina Malla 250



GRAFICA 87

3.8 POROSIDAD

La tabla 26 agrupa los resultados de los cálculos realizados para poder determinar la porosidad de las probetas de los compósitos obtenidos, en función de sus densidades reales y teóricas mediante la siguiente fórmula:

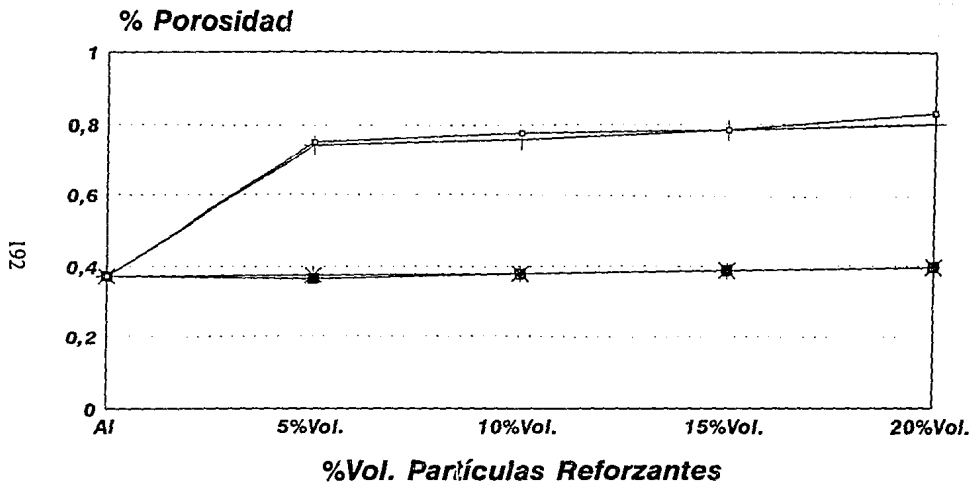
$$\% \text{POROSIDAD} = [\text{Dens. Teórica} - \text{Dens. Real} / \text{Dens. Teórica}] * 100$$

Probeta	Densidad Teórica g/cm ³	Densidad Real g/cm ³	% Porosidad
1A	2.67	2.65	0.749
2A	2.58	2.56	0.775
3A	2.55	2.53	0.784
4A	2.41	2.39	0.829
5A	2.70	2.68	0.740
6A	2.64	2.62	0.757
7A	2.55	2.53	0.784
8A	2.50	2.48	0.800
9A	2.67	2.66	0.374
10A	2.64	2.63	0.378
11A	2.58	2.57	0.387
12A	2.52	2.51	0.396
13A	2.74	2.73	0.364
14A	2.64	2.63	0.378
15A	2.58	2.57	0.387
16A	2.52	2.51	0.396
17A	2.69	2.68	0.371

TABLA 26

A continuación se presenta una gráfica a partir de la tabla anterior para observar mejor el comportamiento de la porosidad con respecto al incremento del %Vol. de partículas reforzantes.

% POROSIDAD
Compósitos C(grafito) Y Alfa-Alúmina



○ C(grafito) Malla 200 + C(grafito) Malla 250
* Alfa-Alúmina Malla 200 ■ Alfa-Alúmina Malla 250

GRAFICA 88

CAPITULO 4

ANALISIS Y DISCUSION DE RESULTADOS

4.1 COMPACTACION

Analizando las tablas 4 y 5 en las que se muestran los valores de altura, diámetro y densidad de las probetas compactadas, se observa que el diámetro de todas las probetas es el mismo, en cambio la altura se va incrementando conforme aumenta el contenido de partículas reforzantes en ambos compósitos.

Los valores de altura obtenidos después de la compactación son mayores a los valores esperados, es decir, a los valores determinados teóricamente, por lo que se confirma la presencia de porosidad.

Se observa también que la densidad en verde disminuye conforme se incrementa el %Vol. de partículas reforzantes para los dos compósitos obtenidos.

4.2 SINTERIZACION

Después de sinterizar las probetas, la altura de éstas se redujo ligeramente en algunos casos y permaneció constante en la mayoría. El diámetro no sufrió cambio alguno durante la sinterización.

Una vez sinterizadas las probetas se observa que éstas adquieren una mayor resistencia, es decir que sí se logró una cohesión entre las partículas de los polvos.

En la densidad real es decir después del sinterizado casi no se observan cambios con respecto a la densidad en verde solamente en algunos casos se observan incrementos y descensos pero en su mayoría permanece casi constante.

4.3 DUREZA

Para el compuesto C(grafito) se observa que para los dos tamaños de partícula, la dureza tiende a disminuir conforme se incrementa el %Vol. de partículas reforzantes. Además la dureza obtenida es menor que la del aluminio puro, pero esto no quiere decir que sea malo, ya que debido a que el grafito es un material blando y puede actuar como lubricante sólido, puede ser muy eficiente en otro tipo de propiedades como por ejemplo la resistencia al desgaste como veremos más adelante.

Se observa que para el compuesto de $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ la dureza presenta un aumento al incrementar el contenido de partículas reforzantes así pues para la malla 200 se alcanza un máximo en 20 %Vol. con un valor de 46.89 HB que es mucho mayor al valor de dureza del aluminio puro (34.63 HB) y para la malla 250 también se alcanza un máximo en el 20 %Vol. con un valor de 48.63 HB que también es superior al del aluminio puro, observándose con esto que si se disminuye el tamaño de partícula el valor de la dureza se irá incrementando hasta un valor máximo.

4.4 DESGASTE

Las pruebas de desgaste fueron realizadas bajo una carga constante de 1.25 Kg y 3 velocidades que fueron: 0.36 m/s (56 rpm), 1.038 m/s (160 rpm), y 1.98 m/s (306 rpm).

COMPOSITO C(grafito) VEL. DE DESGASTE = 0.36 m/s (56 rpm)

En las gráficas 3 a la 6 se observa que la probeta que sufrió un mayor desgaste después de 2 hr de prueba es la del aluminio puro.

Para la malla 200 todos los %Vol. de refuerzo quedan por debajo del aluminio puro con respecto al tiempo y la distancia recorrida, siendo la probeta con un 15 %Vol. la que sufre un menor desgaste con respecto a las demás que tienen un comportamiento similar (gráficas 3 y 4).

Para la malla 250 la probeta con un 15 %Vol. es también la que sufre un menor desgaste, seguida muy de cerca por las de 20 %Vol. Y 10 %Vol. con respecto al tiempo y la distancia recorrida (gráficas 5 y 6).

Comparando ambas mallas se observa que la 200 presenta un mejor comportamiento con respecto a la 250.

De la gráfica 7 observamos que la masa perdida con respecto al %Vol. de C(grafito) es menor en la probeta con un 15 %Vol. y es mucho menor con respecto al aluminio puro, mientras que en la gráfica 8 C(grafito) malla 250 las probetas que sufren una menor pérdida con respecto al aluminio puro son las de 15 %Vol. y 20 %Vol..

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 órdenes de magnitud, dependiendo de factores como: la similitud de los materiales en contacto, la rugosidad de las superficies en contacto, la carga aplicada, la lubricación y la limpieza de las superficies.

En general, materiales similares y muy rugosas aumentan los valores del coeficiente de desgaste. Altas cargas también aumentan el valor del coeficiente y una buena lubricación disminuye su valor.

Comparando ambas mallas de C(grafito) se observa la tendencia de disminuir el coeficiente de desgaste conforme se incrementa el %Vol. de C(grafito), aunque para la malla 200 el coeficiente tiende a incrementarse otra vez con un 20 %Vol., pero en ambas mallas se logra una disminución utilizando un 15 %Vol. (gráficas 9 y 10).

COMPOSITO α -Al₂O₃ VEL. DESGASTE = 0.36 m/s (56 rpm)

Para la malla 200 se observa que todas las probetas quedan por debajo del aluminio puro con respecto al tiempo y la distancia recorrida, siendo la probeta del 15 %Vol. la que se desgasta menos (gráficas 11 y 12).

En la malla 250 las probetas con un 10 y 20 %Vol. tienen un comportamiento casi igual al del aluminio puro y las que presentan un comportamiento mejor son las de 5 y 15 %Vol. (gráficas 13 y 14).

En la gráfica 15 se corrobora que la probeta que pierde menos masa es la de un 5 %Vol. de α -Al₂O₃ para la malla 200 y para la 250 son las probetas con un 5 y 15 %Vol. (gráfica 16).

Con respecto al coeficiente de desgaste para ambas mallas se observa una tendencia a incrementarse excepto para el 5 %Vol. que si logra abatirlo (gráficas 17 y 18).

COMPOSITO C(grafito) VEL. DESGASTE = 1.038 m/s (160 rpm)

Para la malla 200 se observa que todas las probetas muestran pérdidas de peso inferiores al aluminio puro con respecto al tiempo y la distancia recorrida y la probeta que presenta una menor pérdida es la del 20 %Vol. aunque después de 90 minutos la pérdida tiende a incrementarse, posteriormente le siguen en cuanto a menor pérdida de peso las probetas con un 15, 5 Y 10 %Vol. en este orden (gráficas 19, 20, 23 y 24).

En la malla 250 se observa un comportamiento ligeramente mucho mejor que en la malla anterior, aunque aquí la probeta con 10 %Vol. en los primeros 30 minutos y 1.87 Km es la que pierde menos peso.

Después de 30 minutos, es decir, a los 60 minutos ahora es la probeta con un 20 %Vol. la que sufre menor pérdida de peso y la de 10 %Vol. sufre pérdidas considerables junto con la probeta de 5 y 15 %Vol. (gráficas 21 y 22).

En la gráfica 23 C(grafito) malla 200 se ve que conforme se incrementa el %Vol. de refuerzo y conforme pasa el tiempo las probetas con 15 y 20 %Vol. son las que sufren menores pérdidas de peso. De igual forma si de la gráfica 24 C(grafito) malla 250 la probeta con un 20 %Vol. es la que pierde menos peso.

Con respecto al coeficiente de desgaste para ambas mallas se ve una tendencia a disminuirlo conforme se incrementa el contenido de partículas reforzantes. En la malla 200 se logra la disminución del coeficiente adicionando 15 y 20 %Vol. de C(grafito) y para la malla 250 con un 20 %Vol. (gráficas 25 y 26).

COMPOSITO α - Al_2O_3 VEL. DESGASTE = 1.038 m/s (160 rpm)

De las gráficas 27 y 28 malla 200 se observa que las probetas que sufren una menor pérdida de peso con respecto al tiempo y la distancia recorrida son las de 5, 15, 20 y 10 %Vol. en este orden, y si vemos la gráfica 29 veremos que las probetas con 5 y 15 %Vol. son las que sufren la menor pérdida.

En la probeta con 5 %Vol. el coeficiente de desgaste es menor con respecto a sus similares con 10, 15 y 20 %Vol. como se observa en la gráfica 30.

La pérdida de peso en la malla 250 no tiene un comportamiento muy uniforme y sólo podemos decir que las probetas que sufren una menor pérdida con respecto al tiempo y la distancia son las del 15 y 5 %Vol. respectivamente (gráficas 31 y 32), y podemos corroborar esto si observamos la gráfica 33.

En esta malla el coeficiente de desgaste disminuye cuando se adicionan 5 y 15 %Vol. de α - Al_2O_3 , ya que con 10 y 20 %Vol. este coeficiente tiende a incrementarse aún por encima del valor del coeficiente de desgaste del aluminio puro (gráfica 34).

COMPOSITO C(grafito) VEL. DESGASTE = 1.98 m/s (306 rpm)

Para esta velocidad se obtiene un buen comportamiento para ambas mallas. Si observamos las gráficas 35 y 36 para la malla 200 todas las probetas quedan por debajo del aluminio puro, las probetas de 15 y 20 %Vol. tienen un comportamiento similar a las que sufren la menor pérdida de peso con respecto al tiempo y la distancia recorrida seguidas por las de 5 y 10 %Vol. respectivamente, esto se puede comprobar mediante la gráfica 37.

De igual manera el coeficiente de desgaste tiene una tendencia muy marcada de disminución conforme se incrementa el %Vol. de partículas reforzantes. Si observamos la gráfica 38 veremos la tendencia antes mencionada y solamente los valores del 10 %Vol. están ligeramente arriba de los del 5 %Vol. y las probetas con 15 y 20 %Vol. tienen un comportamiento similar.

Para la malla 250 se observa un mejor comportamiento en comparación a la malla 200 con respecto al tiempo y la distancia recorrida. De acuerdo a las gráficas 39, 40 y 41 las probetas con 15 y 20 %Vol. son las que sufren pérdidas de peso menores seguidas en este caso por las de 10 y 5 %Vol. en este orden.

Con respecto al coeficiente de desgaste se observa un comportamiento similar al de la malla 200, es decir, se logra abatirlo.

COMPOSITO α -Al₂O₃ VEL. DE DESGASTE = 1.98 m/s (306 rpm)

Para las mallas 200 y 250 se observan comportamientos similares en cuanto a las pérdidas de peso, ya que en las gráficas 43, 44 y 45 malla 200 las probetas que logran una menor pérdida de peso son aquellas que tienen un 5 y 10 %Vol., seguidas por las de 15 %Vol.; ya que las de 20 %Vol. al principio pierden mayor peso inclusive más que el aluminio puro.

Por lo tanto el coeficiente de desgaste se puede disminuir adicionando 5, 10, y tal vez considerar al 15 %Vol.

Con respecto a la malla 250 se observa un comportamiento exactamente igual al de la malla 200 descrito anteriormente.

De las gráficas presentadas acerca del comportamiento de la pérdida de peso de los compósitos obtenidos con respecto a las 3 velocidades de prueba utilizadas, podemos mencionar lo siguiente (ver gráficas 51 → 67):

Conforme se incrementa la velocidad de rotación del disco las probetas tienden a perder peso de manera proporcional, excepto en las probetas de C(grafito) malla 200 con 15 y 20 %Vol. que en la última velocidad hay una caída en cuanto a la pérdida de peso. De igual forma se presenta este fenómeno para la malla 250 en los mismos porcentajes de partículas reforzantes.

Para los compósitos de $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ así como para el aluminio puro se observó como las probetas pierden peso de manera progresiva conforme se incrementa la velocidad de desgaste.

Por último si se observan las fotografías de microscopía electrónica de barrido (APENDICE A) tomadas a las superficies desgastadas, se puede observar que para los compósitos de C(grafito) existe una buena adherencia entre la matriz y las partículas, no así para los compósitos de $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ en donde vemos que nuestras partículas son porosas, lo cual influye en una falta de adherencia y por consecuencia se vieron afectadas las pruebas de desgaste, ya que existió el desprendimiento de partículas.

*Con respecto a los mecanismos de desgaste tenemos que: Para el aluminio puro el mecanismo predominante es el del tipo **Adhesivo**.*

*Para los compósitos de C(grafito) se presenta una combinación de mecanismos; presentándose como mecanismo principal el del tipo **Adhesivo - Abrasivo**, observándose al grafito actuando como lubricante sólido, esto se puede ver en las fotografías 19 y 21 del APENDICE A en donde se observan unas zonas oscuras de grafito.*

*De igual forma para los compósitos con $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ el mecanismo presente es el del tipo **Adhesivo - Abrasivo**. Ahora si se observan las fotografías de las superficies desgastadas y más aún en las de las superficies rotadas apreciaremos el brusco arrancamiento de las partículas debido a la falta de adherencia ya antes mencionada.*

4.5 DISTRIBUCION DE TAMAÑO DE PARTICULAS

Para la probeta 3A con 15 %Vol. C(grafito) malla 200 se puede observar en la gráfica 68 que existe una cantidad considerable de finos ó partículas pequeñas dentro de un rango de 3.63-18.15 micras, por lo que la distribución de tamaño de partículas realmente está en un rango de entre 21.78-68.97 micras, de lo cual podemos decir que no es una buena distribución ya que se aprecian valores de tamaño de partículas menores a los que corresponden a la malla utilizada (malla 200, 75 μm).

Para la probeta 7A con 15 %Vol. C(grafito) malla 250 observamos en la gráfica 69 que existe una buena distribución en cuanto a tamaños medidos, pero no es buena con respecto a la malla utilizada (malla 250, 65 μm), ya que hay muy pocas partículas con el tamaño correspondiente, además de la presencia de finos.

De igual manera para la probeta 11A con 15 %Vol. $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ malla 200 se observa la presencia de finos al igual que en la probeta 15A con 15 %Vol. $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ malla 250, pero existe una mejor distribución en cuanto a tamaños medidos en la probeta 11A que en la 15A (gráficas 70 y 71).

Aunque al igual que en los 2 compósitos anteriores de C(grafito) los valores de tamaño de partículas también están por debajo de los esperados para las mallas utilizadas, por lo que podemos decir que no existe una buena distribución de tamaños de acuerdo a nuestros requerimientos.

4.6 DISTANCIA ENTRE PARTICULAS

De acuerdo a los resultados obtenidos, se observa que la distancia entre partículas disminuye conforme se incrementa el %Vol. de partículas reforzantes adicionadas.

Para ambos compósitos obtenidos para un 5 %Vol. el valor de distancia entre partículas es mayor al que se observa con un 20 %Vol.; la distancia entre partículas también se ve disminuida al disminuir el tamaño de partícula, es decir, con 20 %Vol., para los 2 tamaños de partícula utilizadas (malla 200 y 250), la distancia entre partículas es menor para todas las probetas de los compósitos de C(grafito) y α - Al_2O_3 malla 250.

En las probetas del compósito C(grafito) malla 200 y 250; para 5 %Vol. la máxima distancia entre partículas se encuentra en el intervalo de 0.670 - 0.762 mm (670 - 762 μ m). El valor máximo de frecuencia se encuentra en el intervalo de 0.154 - 0.247 mm (154 - 247 μ m).

Para las probetas con 10, 15 y 20 %Vol. la máxima distancia entre partículas se encuentra en el intervalo 0.567 - 0.659 mm (567 - 659 μ m) y el valor máximo de frecuencia se encuentra en el intervalo de 0.154 - 0.247 mm (154 - 247 μ m) para 10 y 15 %Vol. y 0.072 - 0.103 mm (72 - 103 μ m) para el 20 %Vol..

Para las probetas del compuesto $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ malla 200; para 10 y 15 %Vol. la máxima distancia entre partículas se encuentra en el intervalo de 0.670 - 0.762 mm (670 - 762 μm) y los valores máximos de frecuencia se encuentran en el intervalo 0.154 - 0.247 mm (154 - 247 μm) y para las probetas con 5 y 20 %Vol. la máxima distancia entre partículas se encuentra en el intervalo de 0.567 - 0.659 mm (567 - 659 μm).

En la malla 250 de $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ para las probetas con 5, 10 y 15 %Vol. la máxima distancia entre partículas está en el intervalo 0.670 - 0.762 (670 - 762 μm) y los valores máximos de frecuencia en el intervalo de 0.154 - 0.247 mm (154 - 247 μm).

Para el 20 %Vol. el valor de la máxima distancia entre partículas está en el intervalo de 0.567 - 0.659 mm (567 - 659 μm) y el máximo valor de la frecuencia en el intervalo de 0.072 - 0.103 mm (72 - 103 μm).

Además los valores de la varianza se encuentran en un rango de 0.1 - 0.2 ó son muy parecidos al igual que la desviación estandar en un rango de 0.3 - 0.4 lo cual nos indica que se tiene una distribución muy homogénea de las partículas reforzantes en los compósitos obtenidos.

4.7 POROSIDAD

Los resultados obtenidos, mostrados en la tabla 26 y la gráfica 88 muestran que el % de porosidad aumenta al incrementarse el %Vol. de partículas reforzantes en ambos compósitos (C(grafito) y α - Al_2O_3). Si se observa la gráfica se tiene una mayor cantidad de porosidad en el compósito C(grafito) en comparación al de α - Al_2O_3 .

Al analizar las probetas metalográficamente y al observar las fotografías obtenidas de ambos compósitos (APENDICE A), notamos la presencia de porosidades en la matriz y alrededor de ciertas partículas.

CAPITULO 5

CONCLUSIONES

Y

RECOMENDACIONES

5.1 CONCLUSIONES

Para los compósitos de C(grafito) obtenidos, la dureza disminuye al incrementarse el %Vol. de partículas reforzantes, siendo la malla 200 (75 μm) la de menor dureza con respecto a la malla 250 (65 μm) y éstas a su vez son inferiores al aluminio puro.

En los compósitos de $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ se observa un comportamiento contrario al de los compósitos de grafito ya que en este caso la dureza se ve incrementada para ambos tamaños de partícula.

En cuanto a las pruebas de desgaste para las 3 velocidades utilizadas, en general podemos decir que los compósitos que tuvieron un mejor rendimiento en cuanto a la pérdida de peso y la disminución del coeficiente de desgaste fueron los compósitos de grafito. No obstante los compósitos de Alfa-Alumina con ciertos porcentajes de partículas reforzantes también cumplen de manera satisfactoria con las pruebas de desgaste.

De acuerdo a los resultados obtenidos para la distancia entre partículas, podemos afirmar que es posible lograr una distribución muy homogénea de las partículas en los compósitos obtenidos, superando así uno de los problemas que afrontan otras técnicas (de fundición principalmente).

Se observó que la porosidad de los compósitos obtenidos aumenta al incrementar el %Vol. de las partículas reforzantes. A pesar de esto vemos que el porcentaje de porosidad está dentro de un rango aceptable en comparación a los compósitos obtenidos por otra ruta ó técnica.

Se puede concluir que se cumplió con el objetivo del presente trabajo que es el de obtener compósitos por la vía pulvimetalúrgica, con propiedades mejores a las del aluminio puro, ofreciendo así una ruta alterna para la producción de dichos materiales.

5.2 RECOMENDACIONES

Para trabajos futuros se hacen las siguientes recomendaciones:

1) Como en el presente trabajo no se tuvo una buena distribución de tamaño de las partículas reforzantes, se recomienda la utilización de otras técnicas distintas al cribado para una mejor selección, como por ejemplo la elutriación.

2) En este trabajo se decidió utilizar una atmósfera inerte de Argón para evitar posibles reacciones químicas que afecten las propiedades de nuestras piezas finales, para trabajos posteriores se recomendaría que primero se investigaran y estudiaran las posibles reacciones y así elegir una atmósfera más adecuada al proceso.

3) Se recomendaría también ahondar más en el proceso de sinterización para tratar de lograr al máximo la adhesión de las partículas a la matriz, llevando también un control del % de porosidad presente debido al tipo de lubricante utilizado, por lo que sería necesario probar con otros.

4) Después de controlar todo lo antes mencionado es recomendable efectuar las pruebas de desgaste para ver si existe mejoría.

5) Por último se recomendaría también fabricar otros compósitos, pero ahora tratando de utilizar otras formas de reforzantes como por ejemplo las fibras u obteniendo híbridos entre los compósitos obtenidos en este trabajo y otros ya existentes.

CAPITULO 6

BIBLIOGRAFIA

6.1 BIBLIOGRAFIA CONSULTADA

- 1.- *Engineered Materials Handbook*
Volumen 1 Composites
ASM International.

- 2.- *Thorton, P.A. , Colangelo, V. J*
Fundamentals of Engineering Materials
Prentice Hall, 1985.

- 3.- *Harris S.J, Cast Metal Matrix Composites*
Materials Science and Technology
March 1988 Vol. 4, pág. 231.

- 4.- *Pradeep Rohatgi, Cast Metal - Matrix Composites*
Metals Handbook Vol. 15, págs. 840-853
ASM, 9th Edition, U.S.A 1984.

- 5.- *P. Molera*
Introducción a la pulvimetalurgia
Ediciones bellaterra, S.A 1977.

- 6.- *Metals Handbook Vol. 7 Powder Metallurgy*
ASM, 9th Edition, U.S.A 1984.

7.- Lenel F. V

Powder Metallurgy : Principles and Applications
Library of Congress, 1980.

8.- *Metal Powder Report : What lies ahead for automotive PM?*

Volume 49, Number 1, January 1994.

9.- O. Vingsbo, *Wear and Wear Mechanims.*

The American Society of Mechanical Engineering Wear
of Materials
U.S.A 1976.

10.- E. F. Finkin

Speculations on the theory of adhesive wear
Wear 1972, vol. 21, pág 103

11.- J. F. Archard

Contact and Rubbing of Flat Surfaces
Journal Appl. Phys. 1953, vol. 24, pág. 981.

12.- A.D. Sarkar

Wear of Metals
Pergamon Press Oxford, 1976.

13.- *Tratamientos Térmicos de los Aceros*

Wanke Klaus and Schramm Klaus
Ed. Aguilar, 1974, Barcelona.

- 14.- P.K. Rohatgi, R. Asthana and S. Das
*solidification, structures, and properties of cast metal -
ceramic particle composites*
International Metals Reviews 1986, Vol. 31, N° 3.
- 15.- C.S Lee, Y.H Kim, K.S Han, T. Lim
Wear behaviour of Aluminium matrix composite materials
Journal of Materials Science 27 (1992).
- 16.- Y. Liu, P.K Rohatgi and S. Ray
*Tribological characteristics of Aluminium - 50 vol. pct
Graphite composite*
Metallurgical Transactions A
Volume 24A, January 1993.
- 17.- Zavala Olivares Gerardo., *Obtención de un compuesto
Aluminio-Carburo de Silicio a partir de Polvos Metálicos.*
Tesis U.N.A.M Facultad de Química, México, 1992.
- 18.- Becerril Ortega Benito., *Aspectos Generales de la
Metalurgia de Polvos.*
Tesis U.N.A.M Facultad de Química, México, 1978.
- 19.- Castañeda Huitrón Carlos., *Obtención y Caracterización
de un compuesto Al-ZrO₂-SiO₂ por Metalurgia de Polvos.*
Tesis U.N.A.M Facultad de Química, México, 1994.

APENDICE

A



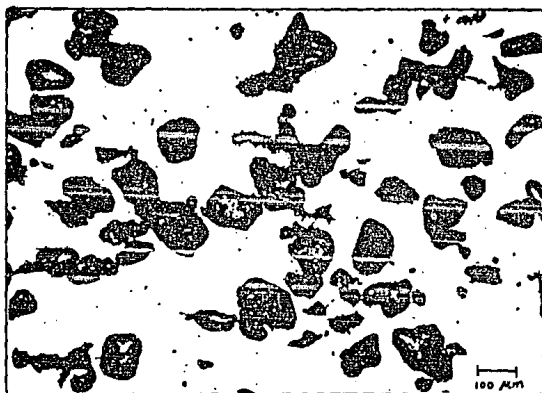
Fotografía 1 .- Compósito con 5% vol. de C(grafito) malla 200; Temp. de sinterizado = 610 °C y 10.7 ton. de presión de compactación.



Fotografía 2 .- Compósito con 10% vol. de C(grafito) malla 200; Temp. de sinterizado = 610 °C y 10.7 ton. de presión de compactación.



Fotografía 3 .- Compósito con 15% vol. de C(grafito) malla 200; Temp. de sinterizado = 610 °C y 10.7 ton. de presión de compactación.



Fotografía 4 .- Compósito con 20% vol. de C(grafito) malla 200; Temp. de sinterizado = 610 °C y 10.7 ton. de presión de compactación.



Fotografía 5 .- Compósito con 5% vol. de C(grafito) malla 250; Temp. de sinterizado = 610 °C y 10.7 ton. de presión de compactación.



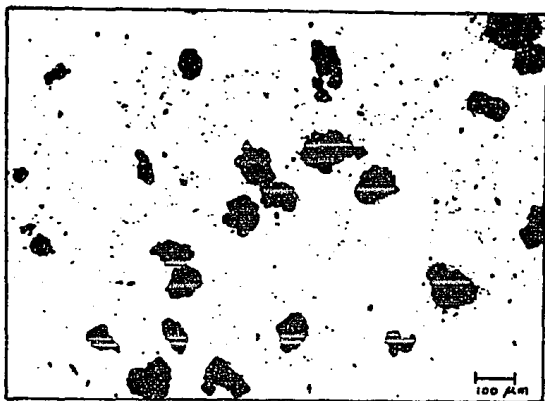
Fotografía 6 .- Compósito con 10% vol. de C(grafito) malla 250; Temp. de sinterizado = 610 °C y 10.7 ton. de presión de compactación.



Fotografía 7 .- Compósito con 15% vol. de C(grafito) malla 250; Temp. de sinterizado = 610 °C y 10.7 ton. de presión de compactación.



Fotografía 8 .- Compósito con 20% vol. de C(grafito) malla 250; Temp. de sinterizado = 610 °C y 10.7 ton. de presión de compactación.



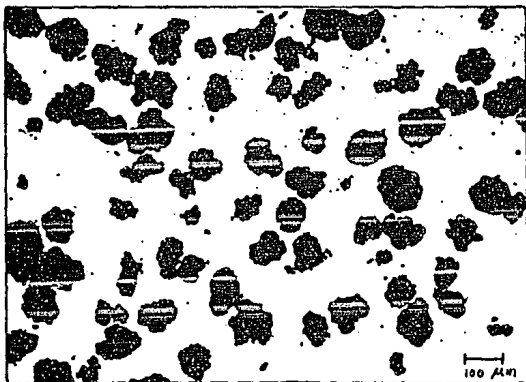
Fotografía 9 .- Compósito con 5% vol. de α -Al₂O₃ malla 200; Temp. de sinterizado = 610 °C y 10.7 ton. de presión de compactación.



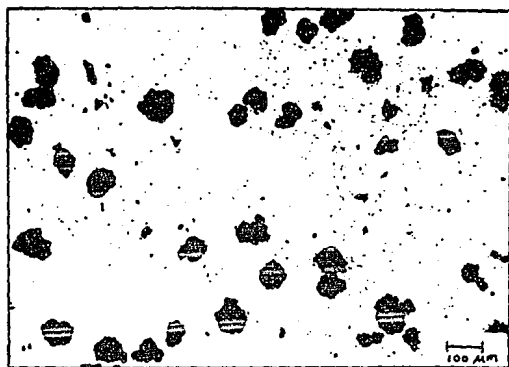
Fotografía 10 .- Compósito con 10% vol. de α -Al₂O₃ malla 200; Temp. de sinterizado = 610 °C y 10.7 ton. de presión de compactación.



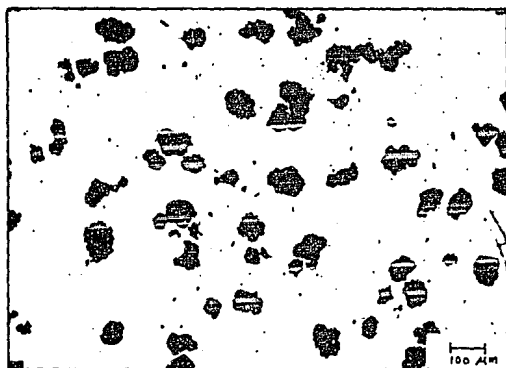
Fotografía 11 .- Compósito con 15% vol. de α -Al₂O₃ malla 200; Temp. de sinterizado = 610 °C y 10.7 ton. de presión de compactación.



Fotografía 12 .- Compósito con 20% vol. de α -Al₂O₃ malla 200; Temp. de sinterizado = 610 °C y 10.7 ton. de presión de compactación.



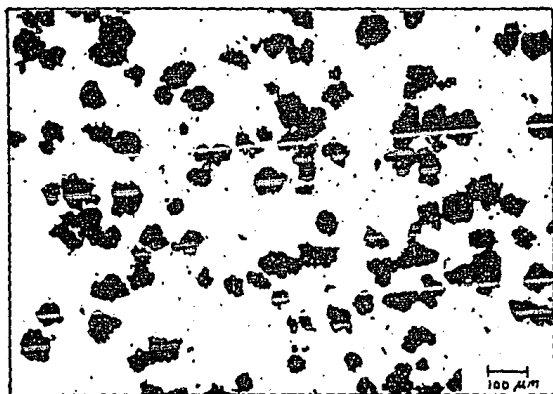
Fotografía 13 .- Compósito con 5% vol. de α -Al₂O₃ malla 250; Temp. de sinterizado = 610 °C y 10.7 ton. de presión de compactación.



Fotografía 14 .- Compósito con 10% vol. de α -Al₂O₃ malla 250; Temp. de sinterizado = 610 °C y 10.7 ton. de presión de compactación.



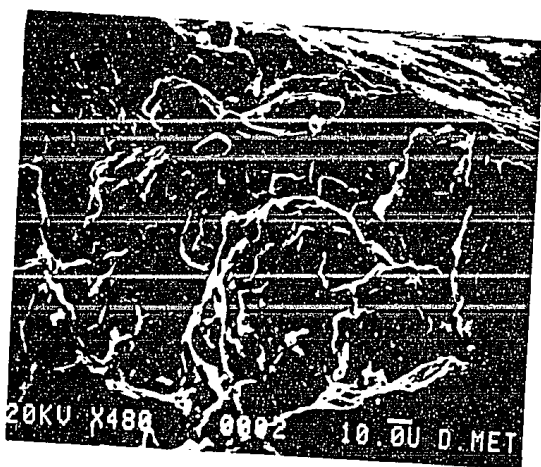
Fotografía 15 .- Compósito con 15% vol. de α -Al₂O₃ malla 250; Temp. de sinterizado = 610 °C y 10.7 ton. de presión de compactación.



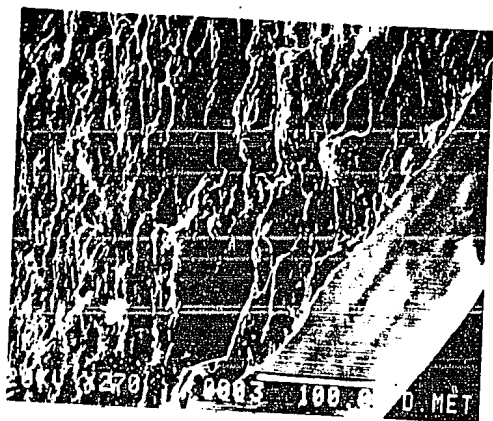
Fotografía 16 .- Compósito con 20% vol. de α -Al₂O₃ malla 250; Temp. de sinterizado = 610 °C y 10.7 ton. de presión de compactación.



Fotografía 17 .- Compósito con 15% vol. de C(grafito) malla 200 tomada en el microscopio electrónico de barrido para observar la adherencia de las partículas en la matriz.



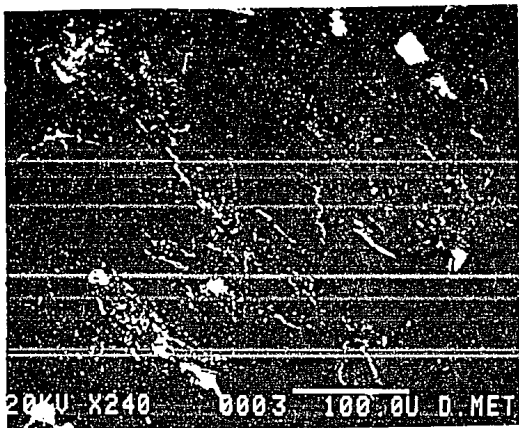
Fotografía 18 .- Superficie desgastada del compósito antes mencionado. Obsérvese el desprendimiento de partículas en los bordes de la probeta.



Fotografía 19 .- Superficie desgastada del compuesto de C(grafito) con 15% vol. malla 200 rotada 60°.



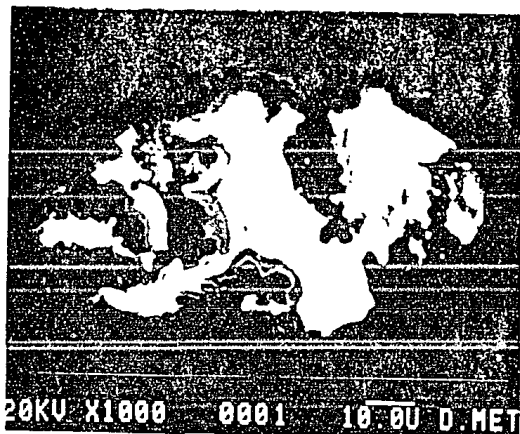
Fotografía 20 .- Compósito con 15% vol. de C(grafito) malla 250. Obsérvese que existe una buena adherencia.



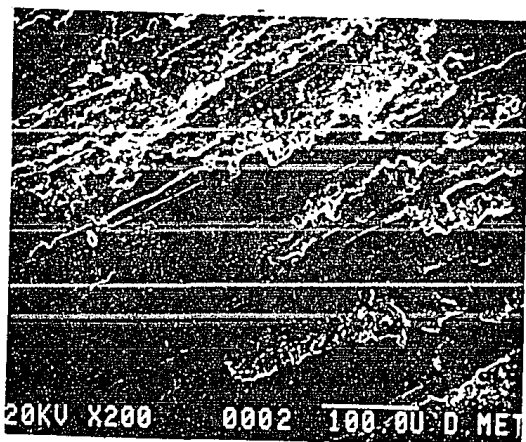
Fotografía 21 .- Superficie desgastada del compuesto anterior con 15% vol. malla 250, sin rotación.



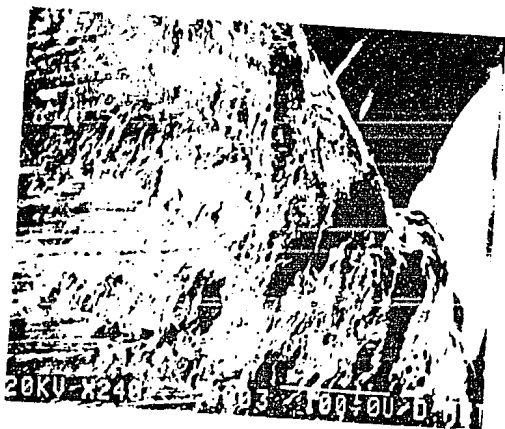
Fotografía 22 .- Superficie desgastada del compuesto con 15% vol. malla 250, rotada 60°.



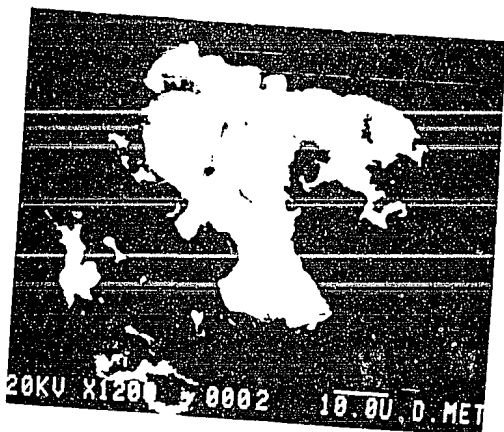
Fotografía 23 .- Compósito de α - Al_2O_3 con 15% vol. malla 200, partícula porosa; por lo que no hay una buena adherencia.



Fotografía 24 .- Superficie desgastada del compósito anterior, sin rotación.



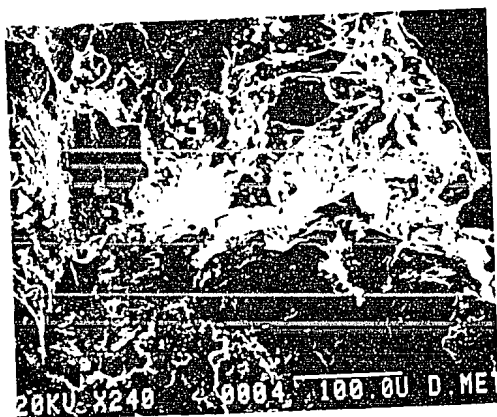
Fotografía 25 .- Superficie rotada 60° del compuesto de α -Al₂O₃ con 15% en vol.



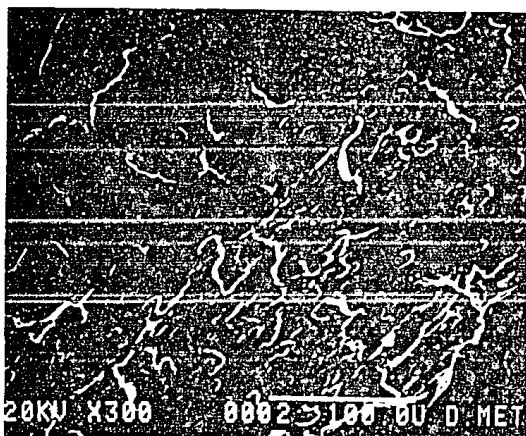
Fotografía 26 .- Compósito con 15% vol. de α -Al₂O₃ malla 250, también de partícula porosa



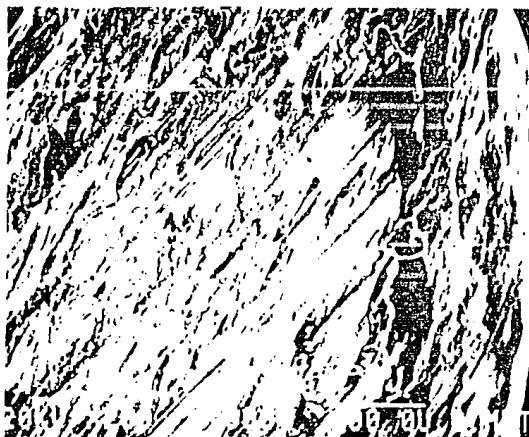
Fotografía 27.- Superficie del compuesto antes mencionado, sin rotación.



Fotografía 28.- Superficie desgastada del compuesto con 15% vol. de α -Al₂O₃ malla 250, pero ahora con una rotación de 60°.



Fotografía 29 .- Superficie desgastada de la probeta de aluminio puro sin rotación.



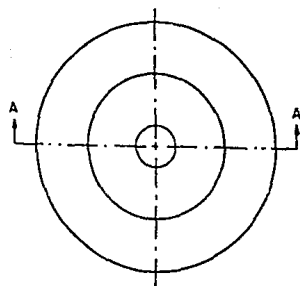
Fotografía 30 .- Superficie de la probeta con aluminio puro pero ahora con una rotación de 60°.

APENDICE

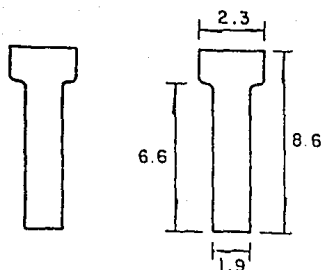
B

EQUIPO UTILIZADO

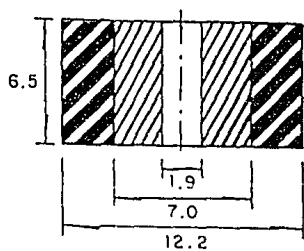
- 1) *Balanza analítica, Mettler.*
- 2) *Matriz y punzones de compactación (figura 29).*
- 3) *Máquina universal, Mohr & Federhaff A.G. (figura 30)*
- 4) *Calibrador vernier.*
- 5) *Tornillo micrométrico.*
- 6) *Horno tipo tubo, Lindberg (figura 31).*
- 7) *Termopar tipo K (chromel-Alumel).*
- 8) *Registrador de temperatura.*
- 9) *Máquina de dureza Brinell, Shmadzu (figura 32).*
- 10) *Equipo para preparación metalográfica.*
- 11) *Analizador de imágenes, Omnimet.*
- 12) *Equipo para la prueba de desgaste (figura 33).*



Planta

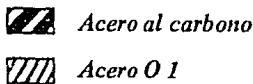


b) Punzones para compactar



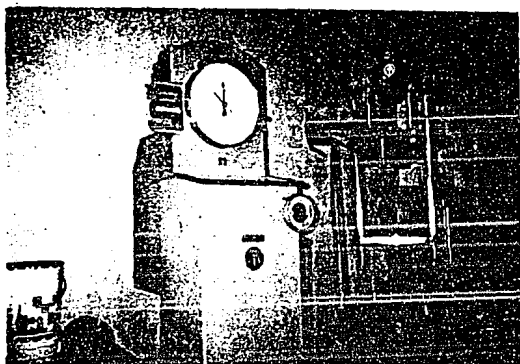
a) Matriz para compactación

Corte A - A



Dimensiones, en cm

Figura 29 . - Matriz y punzones de compactación



*Figura 30 .- Prensa hidráulica Mohr & Federhaff
con una capacidad de 20 toneladas.*



Figura 31 .- Horno de tubo marca Lindberg.

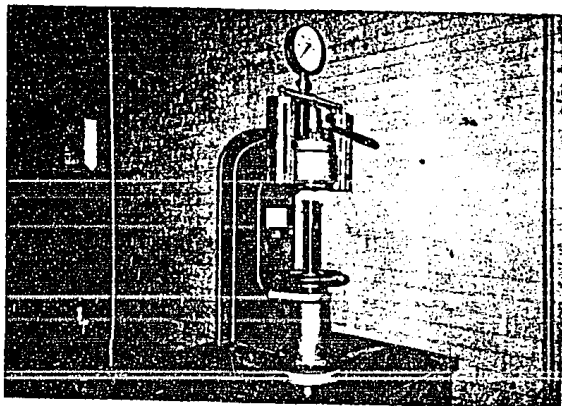


Figura 32 .- Equipo para determinar dureza Brinell.

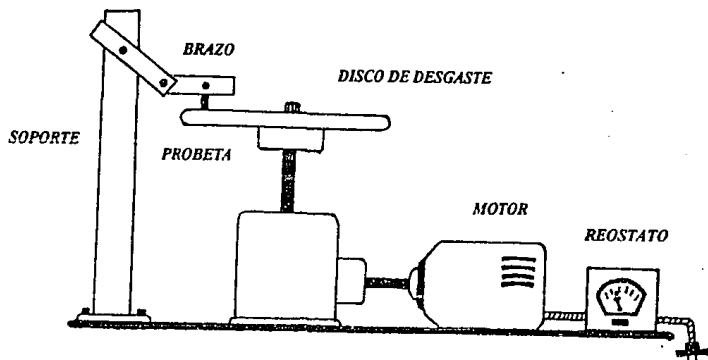


Figura 33 .- Aparato para la prueba de desgaste.