

15  
2ojr



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO**  
**FACULTAD DE QUIMICA**

**EFFECTOS DEL LUBRICANTE EN LA POROSIDAD DE  
PIEZAS DE ALUMINIO POR PULVIMETALURGIA**



EXAMENES 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**

**ALFONSO DE LA MORA PEREZ**



MEXICO, D. F.

1992

**FALLA DE ORIGEN**



## **UNAM – Dirección General de Bibliotecas Tesis Digitales Restricciones de uso**

### **DERECHOS RESERVADOS © PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

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

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

## INDICE

CAPITULO	PAGINA
I.- INTRODUCCION.	1
I.1.- ANTECEDENTES.	3
I.2.- OPERACIONES SECUNDARIAS.	6
I.3.- VENTAJAS Y DESVENTAJAS DE LA PULVIMETALURGIA.	8
II.- PULVIMETALURGIA DEL Al.	10
II.1.- MANUFACTURA DEL POLVO.	13
II.1A.- CONDICIONES SUPERFICIALES PARA EL USO DEL POLVO.	14
II.2.- COMPACTACION.	15
II.3.- SINTERIZACION.	18
II.4.- TRABAJOS POSTERIORES.	20
II.4A.- RE-PRENSADO.	20
II.4B.- TRATAMIENTO TERMICO.	20
II.4C.- MAQUINADO.	21
II.4D.- PROCESOS DE ACABADO.	21
III.- EXPERIMENTACION.	22
III.1.- DESCRIPCION GENERAL DEL POLVO UTILIZADO.	23
III.2.- MEZCLADO DEL POLVO.	27
III.3.- COMPACTACION.	29
III.4.- CALCULO DE LA DENSIDAD EN VERDE.	37
III.5.- SINTERIZADO.	37
III.6.- DETERMINACION DE LA DENSIDAD FINAL.	41
III.7.- MEDICION DEL % DE POROSIDAD EN VOLUMEN.	41
III.8.- MEDICION DE LA DUREZA DE LAS PROBETAS.	41

CAPITULO	PAGINA
III.9.- ANALISIS METALOGRAFICO.	42
IV.- RESULTADOS EXPERIMENTALES.	44
IV.1.- OBSERVACION DE LAS MUESTRAS CON LUBRICANTE TIPO A (ACIDO ESTEARICO).	44
IV.2.- OBSERVACION DE LAS MUESTRAS CON LUBRICANTE TIPO B (ESTEARATO DE Zn).	47
IV.3.- OBSERVACION DE LAS MUESTRAS CON LUBRICANTE TIPO C (ESTEARATO DE Al).	47
IV.4.- OBSERVACIONES DE LAS MUESTRAS SIN LUBRICANTE.	49
IV.5.- TABLAS DE RESULTADOS. GRAFICAS.	50 54
FOTOGRAFIAS.	58
V.- DISCUSION Y CONCLUSIONES.	65
VI.- BIBLIOGRAFIA.	67

## I.- INTRODUCCION.

El proceso de PULVIMETALURGIA, consiste en compactar polvos metálicos, previamente mezclados con lubricante, para darles una forma determinada. El compactado se hace con prensas similares a las de los procesos normales de conformado. Pero, en la metalurgia de polvos se utilizan matrices complejas y los polvos prensados se deben introducir en un horno para sinterizar y poder usarlos como un producto terminado.

Durante el proceso existen variables que es necesario controlar para obtener las características deseadas en la pieza final. Una de estas variables es el porcentaje de lubricante que se mezcla con el polvo metálico, ya que la adición del lubricante al polvo dá lugar a las siguientes observaciones :

- 1.- Existe una cantidad óptima de lubricante para la cual la fluidez del polvo es máxima.
- 2.- En general la resistencia en verde y en sinterizado se ven disminuidas, al aumentar el porcentaje de lubricante.
- 3.- A mayor cantidad de lubricante, menor presión de eyección.
- 4.- El tipo de lubricante puede provocar variaciones en las dimensiones de las piezas, y en algunos casos los residuos interfieren en la sinterización.

Aunado a estos factores está el efecto que tiene el lubricante en la porosidad de las piezas, por lo que se requiere de un estudio cuidadoso para la selección del lubricante.

Por esto, el presente trabajo pretende identificar los efectos que tienen los lubricantes en la porosidad de piezas de aluminio obtenidas mediante el proceso de

pulvimetalurgia a nivel laboratorio, para que de esta manera se evite en lo posible los inconvenientes y se obtengan los beneficios de la lubricación.

Los lubricantes utilizados son : Estearato de zinc, Estearato de aluminio y Acido esteárico, los cuales son usados a nivel industrial.

### I.1.- ANTECEDENTES.

La metalurgia de polvos tiene un uso muy difundido en la industria para la manufactura de una gran cantidad de piezas pequeñas. La primera aplicación industrial moderna fué la formación de alambres con materiales en polvo que eran muy duros para trabajarlos o fundirlos con los procesos convencionales.

Existen tres procesos principales para producir el metal base y, luego, reducirlo a polvo. Estos son : Atomización, trituración y electrólisis. Normalmente, los polvos se hacen con metales que ya han sido procesados para pulverizarlos.

El cuidado necesario para mantener la pureza y las aleaciones específicas dictan el tipo de proceso que se puede utilizar para producir el metal base. El tratamiento en hornos convencionales de fusión, debido al calor, los gases y la oxidación que siempre ocurre, suele dejar mayor cantidad de impurezas que en los metales producidos por electrólisis o en hornos de inducción.

La forma del polvo indica la geometría de la partícula. Dicha geometría depende del método empleado para obtener el polvo. La forma puede determinarse directamente por observación microscópica óptica o bien electrónica. Dado que la forma de las partículas incide en las características secundarias del polvo (velocidad de derrame, compresibilidad, consolidabilidad) su conocimiento cuantitativo es interesante desde el punto de vista práctico.

El tamaño de la partícula queda definido por sus dimensiones.

En el caso de partículas esféricas, el tamaño se expresa mediante su diámetro. Cuando se trata de partículas no esféricas, se aplica el concepto de diámetro medio dependiendo del método elegido para su determinación.

Es poco común encontrar polvos que tengan un tamaño de partícula uniforme, por ello se hace necesario introducir la distribución, que define la desviación de tamaños del conjunto y repercute en las características secundarias del polvo. La determinación de la distribución y del tamaño suelen hacerse simultáneamente.

El conformado de la pieza es un proceso consecutivo que incluye hasta seis operaciones específicas.

Una de estas operaciones es el mezclado del polvo, la cual debe hacerse de acuerdo con las especificaciones de pureza, aleaciones y tamaño de partículas.

Los propósitos del mezclado pueden ser :

Obtener una distribución uniforme del tamaño y forma de la partícula. Y también cambiar propiedades como la densidad aparente, la fluidez o suministrar lubricantes al polvo, o polvos de materiales diferentes.

Después de mezclar, se prensa el polvo para conformarlo, en la etapa de compactación.

Se puede lograr prensado simple con una matriz de acción sencilla para compactar. Las matrices compactadoras de doble acción producen mejor estructura granular para partes de diferente tamaño seccional.



Después de conformar la pieza, se puede someter el llamado COMPACTO VERDE a sinterización previa, para facilitar el manejo y almacenamiento.

La dureza final se logra por sinterización durante un tiempo predeterminado a temperaturas de 70 a 80% de la temperatura de fusión del metal o aleación particular, por lo que existe suficiente temperatura para quemar o evaporar los lubricantes utilizados en la compactación.

Durante la etapa de sinterización se utilizan atmósferas controladas para evitar la oxidación.

## 1.2.- OPERACIONES SECUNDARIAS.

A las piezas obtenidas por pulvimetalurgia es posible someterlas a operaciones secundarias, ya sea para ajustar sus dimensiones o mejorar el acabado u otras propiedades físicas.

Las operaciones secundarias incluyen la impregnación con aceite, grafito, cera y otros lubricantes para usarlos como cojinetes. También incluyen infiltración, electrodeposición, tratamiento térmico, reprensado y maquinado.

La impregnación permite lograr un cojinete autolubricado, libre de mantenimiento, con el lubricante ya integrado, de modo que no necesitan lubricación desde el exterior. Estos productos tienen uso extenso en bujes, productos automotrices como bombas de agua, alternadores, motores de arranque y equipo similar.

La infiltración es un proceso para reforzar la pieza hecha con polvo y hacerla más densa. Esto incluye colocar una pieza metálica sólida sobre la pieza formada con polvo ya sinterizada, para luego volver a sinterizar ambas piezas. La pieza sólida se funde y la absorbe la pieza porosa. Este proceso imparte cualidades de tenacidad, dureza, resistencia mecánica y densidad al producto hecho con polvo metálico.

Los procesos de tratamiento térmico se emplean para los mismos fines que con otros metales, solo que aquí el calentamiento se debe hacer con mucho cuidado, porque los productos conducen el calor con menos rapidez y uniformidad que los metales densos. Por tanto, el periodo de calentamiento debe ser más largo, pero el enfriamiento más rápido. Para evitar la oxidación dentro de la estructura porosa el

tratamiento se hace en una atmósfera inerte, ya que la oxidación puede disminuir la resistencia mecánica y producir puntos débiles e impurezas en la pieza final. (2)

Las piezas de polvos metálicos que se han compactado y sinterizado para darles su forma y resistencia física, se pueden trabajar con operaciones similares al punzonado y acuffado. Las piezas se pueden dimensionar por punzonado o se les puede variar ligeramente la forma con acuffado.

Aunque el fin principal del uso de los procesos con metales en polvo es reducir el maquinado, se pueden maquinar sin problemas. El maquinado suele hacerse con métodos convencionales. No se acostumbra usar aceites para corte, debido a la porosidad de los objetos. El proceso de maquinado se suele limitar a cortes de acabado o ajuste de la superficie y normalmente no se emplea para eliminar partes grandes de la pieza conformada.

### 1.3.- 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 conformado reduce mucho el maquinado posterior, aún cuando la forma sea compleja.

2.- Adaptabilidad para el uso. El tipo de productos que se hacen con polvos metálicos incluyen imanes, herramientas de corte de materiales muy duros y tenaces, filtros para gasolina y otros líquidos, engranes, piezas de máquinas y otras aplicaciones.

3.- Economía de producción. Una característica importante es el bajo costo de producción, gracias a las dimensiones precisas y a que las formas complejas requieren poco o ningún maquinado. En la producción de cojinetes y bujes impregnados con aceite, no se requiere maquinado y el costo de producción es más o menos la quinta parte del de un cojinete obtenido por algún proceso convencional, ya sea fusión o forja.

4.- Obtención de materiales duros. Los materiales de gran dureza se pueden conformar cuando están en polvo, como es el caso del Carburo de Tungsteno.

Pero así como existen ventajas, la metalurgia de polvos tiene algunas desventajas, que incluyen baja resistencia a la tracción y a la compresión. Así como distribución del calor irregular, también se requiere un manejo muy cuidadoso por la relativa fragilidad de las piezas antes de sinterizarlas. Igualmente se cuentan el costo de producción de las matrices

para prensar los polvos. Estas son muy costosas debido a que se hacen con acero de herramientas de alta calidad y endurecido. Debido al costo de las matrices, los procesos de metalurgia de polvos están limitados a artículos para producción en grandes cantidades, a fin de amortizar el costo inicial por herramental. No obstante es muy costeable en industrias muy grandes como lo son la aeronáutica y espacial ya que, en este caso, el Aluminio les ofrece características en el material que son primordiales para el uso que se le va a dar a la pieza conformada de polvos (fuselajes, hélices, turbinas, engranes, etc.). En este caso las piezas de Aluminio, además de proveer una densidad menor comparada con el acero, ofrecen una mayor resistencia a la corrosión.(4)

## II.- PULVIMETALURGIA DEL ALUMINIO.

Además de las ventajas obvias de las piezas de polvo de Al : ligereza, excelente resistencia a la corrosión y buenas propiedades de acabado, las piezas de Al ofrecen:

- a) Resistencias nominales iguales o mejores que la mayoría de las piezas con densidad media hechas de Fe, siendo compactadas con menores presiones a mayores densidades. Esto dá como resultado la buena resistencia en verde de la pieza, lo que facilita el manejo de la misma.
- b) Ser mas económicas que las piezas infiltradas de Cu.
- c) Menor energía usada en la producción, ya que sinterizan rápido y a temperaturas bajas. <sup>10</sup>

Existen en el mercado algunas mezclas basadas en polvo de aluminio atomizado con polvos de elementos de aleación, ya sea en forma pura o como aleaciones maestras. La mayoría de estos polvos son susceptibles al temple, mediante un tratamiento térmico, y esos polvos son los siguientes:

- 1) Polvos con un alto contenido de Cu (4.4%) con Mg, Si y Mn adicional, los cuales presentan buenas propiedades mecánicas y una moderada resistencia a la corrosión.
- 2) Polvos con alto contenido de Mg (1%) con Cu y Si adicional, los cuales tienen propiedades mecánicas regulares y buena resistencia a la corrosión.
- 3) Polvos con alto contenido de Ca (1.6%), Mg (2.5%) y Zn (5.6%) con Cr adicional y que presentan muy buenas propiedades mecánicas, además de una buena resistencia a la corrosión. <sup>10</sup>

Una gran ventaja de los polvos de aluminio comparados con los polvos de Fe es que los de Al requieren presiones de compactación mucho menores que las utilizadas con Fe, ya que mientras el rango de compactación para Al está entre 760 - 3,042 kg/cm<sup>2</sup> para el Fe esta cantidad se duplica.

Debido a esto y a que el Al responde mejor al compactado, se pueden obtener piezas con formas más complejas que con el polvo de Fe; lo cual compensa a la pulvimetalurgia de Al frente al hecho de que la energía usada para obtener polvos de Aluminio es 40% mayor que la utilizada para obtener polvos de Fe.

Los usos del polvo de Al son variados e interesantes, estos incluyen:

- La industria química, como catalizador y agente exotérmico.
- La industria metalúrgica, para la reducción aluminotérmica de óxidos metálicos como el Cr, además del campo de la soldadura y en la fabricación de filtros metálicos porosos.
- La industria del acero y la fundición, como agente exotérmico para lingoteras y en la reparación de los fondos de los hornos.
- En la manufactura de moldes tipográficos de imprentas, para lo cual primero se transforma a hojuelas.
- En la industria minera, particularmente para explosivos.
- En la industria aeronáutica y espacial, para fabricar piezas como hélices, fuselajes, turbinas, etc.
- En la industria automotriz, ya que actualmente un auto consta de por lo menos 100 piezas producidas con polvos metálicos.

El desarrollo de piezas a partir de polvos de Al se ve limitado básicamente por tres factores:

- 1) La fuerte competencia de los procesos alternos como fundición, extrusión, forja, etc. de aleaciones ligeras. Así como la fuerte competencia, desde el punto de vista económico, de piezas sinterizadas de Fe.
- 2) El cierto grado de dificultad en la tecnología usada en el proceso, particularmente en la etapa del sinterizado.
- 3) El alto costo de los polvos de Al.

Con estas limitantes se puede hacer una clasificación. Las piezas estructurales para las cuales es posible la aplicación de Al se pueden dividir en 2 grupos principales:

- El primero, donde se requiere de las propiedades especiales de este material, como ligereza, propiedades no-magnéticas, resistencia a la corrosión y conductividad. En este caso es indudable la atracción tanto técnica como económica que presenta el Al.

- El segundo, que consiste de piezas que pueden ser hechas con Fe o acero de media resistencia. En este caso la comparación debe ser del tipo económico, teniendo gran competencia el Al en el área de piezas grandes y de gran precisión.

Estas aseveraciones son válidas bajo la suposición de que los polvos de Al y los hornos de sinterizado no cambien súbitamente de precio, lo cual no se puede dar por hecho, debido a lo cambiante que resulta el mercado.



## II.1.- MANUFACTURA DEL POLVO.

Dentro de las técnicas más apropiadas para producir polvos de Al se encuentra la atomización, con la que resulta más fácil obtener partículas de forma definida que pueden ser utilizadas en casos especiales.

Esta atomización consiste en proyectar un chorro de metal o aleación de Al fundido contra un fluido (aire o gas inerte).

Debido a la súbita solidificación que ocurre, el metal aparece en forma pulverulenta. Posteriormente, a fin de eliminar el óxido superficial que se haya formado, el metal se reduce en una atmósfera reductora. Durante la atomización se debe tener en cuenta como variables importantes del proceso la temperatura y régimen del metal fundido, naturaleza y presión del fluido y otros factores procedentes del diseño, como las dimensiones de la tobera, altura de la caída, etc.

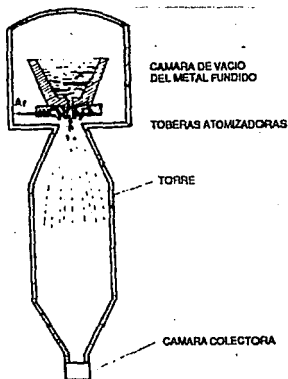


FIG. 2.1-OBTENCION DE POLVOS DE Al MEDIANTE ATOMIZACION.

Para el caso del Aluminio cabe mencionar que el proceso debe ser muy controlado, ya que este metal reacciona violentamente con el agua (humedad); además de que se oxida fácilmente. Tal vez esta sea una de las grandes limitantes para la producción de polvo de Aluminio ya que el producto se encarece y plantas como ALMEXA lo han dejado de producir en México.

#### II.1.A.- CONDICIONES SUPERFICIALES PARA EL USO DEL POLVO.

Es necesario que la superficie del polvo se encuentre lo más libre de óxido o contaminantes que puedan interferir en las propiedades del mismo, disminuyendo con esto la reproducibilidad de las piezas a obtener.

Debido a que el Aluminio es un metal muy reactivo, que tiende a formar óxido en su superficie de una manera inmediata, es necesario hacer una reducción con hidrógeno (muy seco) para eliminar dicha capa de óxido.

Esta operación se debe hacer a temperaturas preferentemente bajas para evitar una sinterización previa.

Esta temperatura debe ser menor a una tercera parte o la mitad de la temperatura de fusión, determinando previamente esta temperatura y tiempo apropiados.

Existe también otra técnica que es la desgasificación al vacío, en la cual el polvo se somete a un vacío para eliminar los posibles gases atrapados que puedan disminuir sus propiedades al formar compuestos con el metal. Es recomendable usar los polvos enseguida de haberles hecho cualquiera de estos tratamientos, o bien, guardarlos herméticamente, al vacío. (7)

## II.2.- COMPACTACION.

Durante la compactación se somete al polvo a una presión determinada, dentro de un molde que dará la forma final de la pieza. Existen diversos métodos para consolidar los polvos de Aluminio, los cuales pueden ser:

- 1.- Aplicando presión.
- 2.- Sin aplicar presión.

Los métodos en los cuales se aplica presión son los siguientes:

- a) Prensado unidireccional.- Pudiendo ser de acción simple o de doble acción.
- b) Prensado isostático.
- c) Prensado explosivo.
- d) Prensado para rolado, forja y extrusión.

Los métodos sin aplicar presión son:

- a) Compactado vibracional.
- b) Sinterizado en moldes con polvo suelto.

En la etapa de compactación, el proceso más importante es la formación de áreas de contacto, las cuales pueden surgir ya sea por difusión, entrelazamiento de partículas o adhesión.

Se puede considerar que en el proceso de compactación se involucran todas estas formas.

El entrelazamiento de partículas ocurre bajo la aplicación de una fuerza externa sobre las partículas, las cuales se deslizan entre sí formando varios puntos de contacto partícula-partícula, de manera que al relevar el esfuerzo

aplicado, la pieza conformada posee una alta compactabilidad.

La unión por fricción resulta de la compresión del polvo dentro de un molde al generarse fuerzas de fricción provocadas por el deslizamiento entre los diferentes materiales que intervienen en el proceso. Las fuerzas de fricción pueden ser :

- Entre partículas.
- Entre partículas y paredes de la matriz.
- Entre el punzón móvil y las paredes de la matriz.
- Entre las partículas durante la deformación.

Estas fricciones provocan la fusión del borde de grano y, en estas zonas de mayor temperatura, las partículas se adhieren.

La adhesión entre partículas es más notoria en aquellas que se encuentran finamente divididas, existiendo una distancia menor de 50 nanómetros entre una y otra; esto dá como resultado la captura de valencias de superficie libres y fuerzas electrostáticas de Van Der Waals, provocando la adhesión entre partículas.

El Al tiene gran tendencia a adherirse en las paredes de las herramientas con las que se compacta, lo cual aumenta el riesgo de formar asperezas en la pieza, aún cuando las presiones utilizadas son bajas; y por esta razón es obligatorio el uso de matrices hechas con metales muy duros, además de requerir de punzones de gran precisión, comparados con los usados para polvos de Fe, debido a la necesidad de cerrar los espacios libres entre las herramientas (punzón-matriz).

Por esta razón, para reducir las fuerzas de fricción se usan lubricantes que se añaden del 0.5 al 1.5% del peso total

del polvo, el cual aumenta un poco la compactabilidad del polvo, reduce la presión necesaria para expulsar la pieza del molde, ayuda a eliminar grietas y densidad heterogénea del compacto en verde. Estos lubricantes suelen ser compuestos orgánicos que se queman en las etapas primarias del sinterizado. Sin embargo, en algunos casos los lubricantes penetran parcialmente en la masa del polvo y producen residuos carbonosos, gases contaminantes, compuestos oxidados que afectan las propiedades químicas, físicas y mecánicas del compacto.

Actualmente, también se puede lubricar la superficie de los punzones, con lo cual es posible obtener piezas de polvo de Al sin rayar y debilitar la superficie, especialmente para piezas mayores de media pulgada de grueso, donde debido al problema de adherencia del polvo a las paredes de la matriz la producción tenía que ser parada para poder limpiar la superficie de la herramienta y poder continuar con el proceso. Con esta técnica de recubrimiento de lubricante de grafito sobre la matriz se facilita la expulsión de la pieza sin perjudicarla, además de que casi cualquier pieza de espesor razonable mayor de media pulgada puede ser hecha con la densidad requerida. Proporcionando con esto una mayor uniformidad en propiedades.

La limitación básica para la altura de la pieza es la matriz y la presión usada.

En general, debido a que el polvo de Aluminio responde mejor al compactado en la matriz que otros polvos metálicos, se pueden producir piezas de forma más compleja.

### I.3.- SINTERIZACION.

El sinterizado es un proceso que reduce el área superficial de las partículas de polvo. Esto ocurre cuando los polvos compactados en frío son calentados a una temperatura cercana a su punto de fusión y las partículas de polvo se sueldan unas con otras, con lo cual la densidad del compacto cambia con respecto al tiempo, pudiendo aumentar o disminuir.

Los posibles mecanismos de la sinterización pueden darse de la siguiente forma.

Sin transferencia de masa :

- Por adherencia.

Con transferencia de masa :

- Por evaporación y condensación.

- Por difusión de la red a través de vacancias.

- Por difusión de la red a través de átomos intersticiales.

- Por difusión en límites de grano.

- Por fluencia plástica.

- Por cizallamiento de los límites de grano.

- Por recristalización.

El sinterizado es la etapa más importante del proceso, ya que de esta dependen las propiedades finales de la pieza.

Este proceso se realiza a temperaturas cercanas al punto de fusión donde la movilidad atómica aumenta y los procesos difusivos se vuelven más rápidos.

En la pulvimetalurgia del aluminio, el sinterizado es la etapa crítica del proceso, ya que como es sabido, el Al tiene gran afinidad por el oxígeno, por lo que resulta complicado encontrar una atmósfera industrial que, si no es

realmente reductora, por lo menos no sea oxidante en contacto con el material a sinterizar. Sólo cuando se utiliza una atmósfera muy seca y tiempos de sinterizado cortos es posible limitar el grado de oxidación y prevenir el óxido formado por los mecanismos de difusión en estado sólido.

Es posible usar atmosferas como hidrógeno, amoniaco, vacío o atmósfera inerte. Pero el que es usado casi de manera mundial es el nitrógeno, con un contenido de humedad muy bajo (el límite es del orden de 200 ppm).

También existe un proceso adicional, patentado en E.U.A por Storchheimos, el cual consiste en el sinterizado de polvos de Aluminio en aire para tiempos extremadamente cortos.

También se usa la lubricación de las paredes de la matriz, ya que si no se hiciera esto sería muy difícil retirar la pieza sin dañarla. El proceso ha tenido aceptación, aunque en realidad no se presenta como una alternativa competitiva para el proceso tradicional.

De todas formas, la necesidad de tiempos cortos de sinterización aumenta la relación de Taint-Tsue entre 90-95% contra 72-78% en el caso del Fe; y por esta razón el control de temperatura es crítico, ya que mientras que un pequeño exceso en la temperatura significaría fusión a micro-escala, una pequeña baja de temperatura daría lugar a un mal sinterizado. Por esto, la temperatura tiene que ser controlada dentro de un rango de  $\pm 5$  grados centígrados.

De acuerdo con ALCOA y ALCAN, las piezas manufacturadas con aleación de Al son sinterizadas entre 550 y 621  $\pm 5$  grados centígrados durante 30 minutos, la mitad de lo que se

utiliza para polvos de Fe y dos terceras partes para polvos de Cu.(s)

De acuerdo a estos requerimientos, químicos y térmicos, es deseable utilizar una planta especialmente diseñada y construida para tener un mayor control sobre los parámetros del proceso de sinterizado de piezas de Aluminio.

#### II.4.- TRABAJOS POSTERIORES.

Una vez obtenidas las piezas de Al, estas pueden requerir algún trabajo posterior, ya sea para darles las dimensiones finales o para darles las propiedades requeridas.

##### II.4.A.- RE-PRENSADO.

Debido a la dificultad que presenta la etapa del sinterizado, las operaciones de RE-PRENSADO son inevitables.

Esto se hace para aumentar las propiedades mecánicas, que de otra manera serían menores, y más aún, se hace para mejorar o alcanzar las dimensiones toleradas de la pieza debido a la complejidad de la misma. Es por esto que el Al puede ser RE-PRENSADO utilizando prensas pequeñas, siempre y cuando se haya llevado a cabo correctamente el sinterizado.

##### II.4.B.- TRATAMIENTO TERMICO.

Las aleaciones de Al pueden ser tratadas térmicamente por un temple y envejecido, natural o artificial, el cual incrementa la resistencia entre 1.5 y 2 veces.



#### II.4.C.- MAQUINADO.

El maquinado de aleaciones de Al sinterizado es bueno, y mejor comparado con los de Fe. Esto es resultado en parte por la naturaleza del material, y en parte por la baja porosidad (el Al es normalmente compactado con una densidad relativa mayor que el Fe).

#### II.4.D.- PROCESOS DE ACABADO.

A las piezas sinterizadas de Al se les puede realizar los mismos tratamientos que a una pieza de material sólido.

Estos tratamientos son pulido químico o mecánico, plateado superficial, laqueado y anodización. Obviamente esto debe hacerse tomando en cuenta la presencia de porosidades en la pieza.

### III.- EXPERIMENTACION.

Debido a que en este trabajo lo que se buscó fué identificar el efecto que tiene el lubricante en piezas de Aluminio, se hizo una revisión bibliográfica para tratar de obtener algunos datos que se hubieran reportado al respecto.

De los datos reportados se eligieron tres tipos de lubricante : ESTERATO DE ZINC, ACIDO ESTEARICO Y ESTEARATO DE ALUMINIO.

Estos lubricantes, además de ser recomendados en la bibliografía, se encuentran disponibles en el país.

De la revisión bibliográfica también se obtuvo el criterio más adecuado para obtener muestras de laboratorio que serían utilizadas en el estudio; además del equipo y las condiciones iniciales. De este análisis se determinó que las probetas a obtener serían cilíndricas, debido a su fácil obtención y manipulación en el laboratorio.

Las dimensiones de las probetas se obtuvieron bajo la consideración de los siguiente parámetros: capacidad de la prensa hidráulica y forma de prensado. Puesto que si conocemos la capacidad de la prensa y las condiciones de prensado del polvo, entonces obtenemos el área y así, las dimensiones máximas para trabajar.

La forma de prensado elegida fué unidireccional de acción simple. Para este caso el soporte de la matriz se desplaza, con lo cual el punzón superior realiza la compresión del polvo; se emplea para piezas con espesores menores de 6mm.

Posteriormente se diseñó la matriz para compactar.

Para el estudio experimental se tomaron en cuenta los siguientes datos obtenidos de la bibliografía :

<u>POLVO</u>	<u>PRESTION</u>	<u>REL. COMP.</u>	<u>T. SINT.</u>	<u>t. SINT.</u>
	kg/cm <sup>2</sup>	polv/pieza	C	min
Al	760 - 3042	1.5-1.9:1	0.8-0.85Tf	15-30

La relación de compresión se obtuvo de los datos presentados, con lo que pudimos conocer el volúmen que ocupa el polvo en relación al volúmen de la pieza compactada.

### III.1.- DESCRIPCION GENERAL DEL POLVO UTILIZADO.

Los polvos utilizados en la experimentación se obtuvieron de la compañía ALMEXA, los cuales son utilizados por otras empresas para diferentes usos.

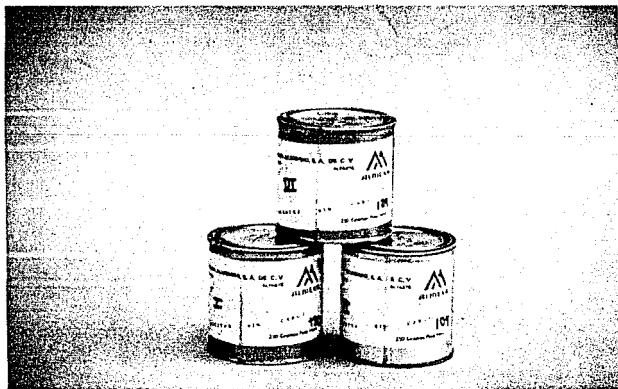


FIGURA 3.1-PRESENTACION COMERCIAL DE LOS POLVOS UTILIZADOS.

Los polvos utilizados en la experimentación se clasificaron en tres tipos, como se muestra a continuación.

CLASIFICACION EN LAS PRUEBAS	POLVO	TAMAÑO DE PARTICULA	FORMA DE PARTICULA	DENSIDAD APARENTE
I	104	45-75 $\mu\text{m}$	SEMI ESFERICA	1.1 - 1.5g/cc
II	129	75-150 $\mu\text{m}$	IRREGULAR	1.1 - 1.2g/cc
III	130	150-425 $\mu\text{m}$	IRREGULAR	1.1 - 1.3g/cc

TABLA 3.1-CARACTERISTICAS DE LOS POLVOS UTILIZADOS.

Con la siguiente composición química :

Zn	Fe	Ni	Cu	Mn	Mg	Pb	Al
.0051	.1070	.0026	.0130	.0310	.0017	.0035	99.8361

En las siguientes figuras se muestra la forma de la partícula y algunas especificaciones de los diferentes tipos de polvos utilizados.

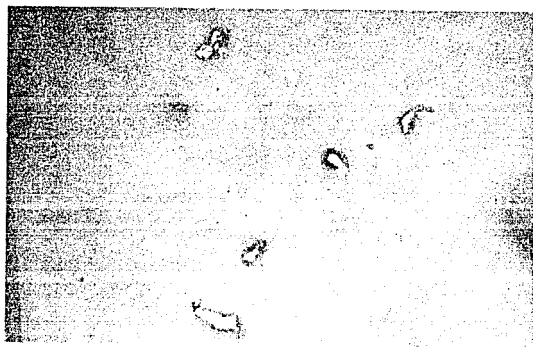


FIG. 2. DENDRITISMO DE UN NEURON EN UN CULTIVO DE NEURONAS CIBARIAS. TENDENCIA ESPECIFICA EN LA FORMACION DE UN DENDRITISMO APICAL EN LA FACETA DEL POLIO. MAGNIFICACION:  $\times 1,100$ .

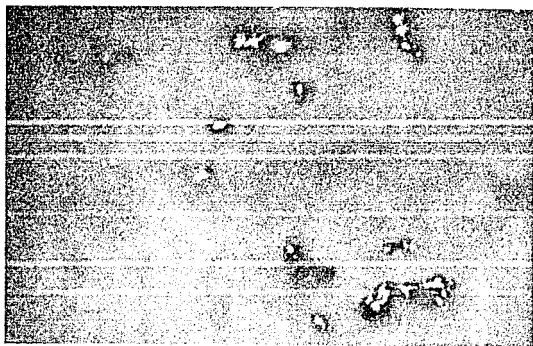


FIG. 3. DENDRITISMO DE UN NEURON EN UN CULTIVO DE NEURONAS CIBARIAS CON UNO POSTERIO RECONSTRUIDO. UN DENDRITISMO COMPLEJO EN LA FACETA DEL POLIO. MAGNIFICACION:  $\times 1,100$ .



FIG. 26. — FORMA DE UNO DE LOS GRANULOS DE UNO DE LOS GRUPOS DE LA FASE B EN OBTENCION DEL POLIETILENO DE ALTA DENSIDAD POR EL METODO DE LA POLIMERIZACION EN SOLUCION. (MAGNIFICACION: 1000X).

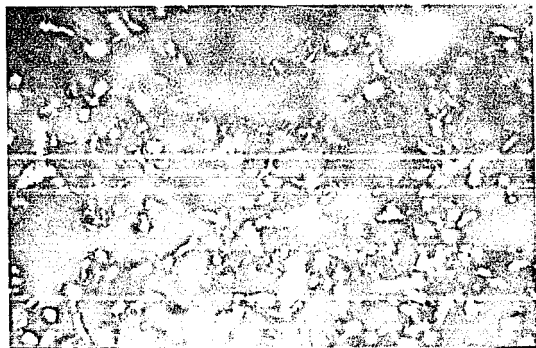


FIG. 27. — FORMA DE LOS GRANULOS DE UNO DE LOS GRUPOS OBTENIDOS EN OBTENCION DE UN POLIETILENO DE ALTA DENSIDAD POR EL METODO DE LA POLIMERIZACION EN SOLUCION. LA FORMA DE LAS PARTICULAS PARECE SER HONOR AQUELLAS QUE SE PUEDEN ENCONTRAR EN EL POLIETILENO DE ALTA DENSIDAD OBTENIDO POR EL METODO DE LA POLIMERIZACION EN SOLUCION.

### III.2.- MEZCLADO DEL POLVO.

El mezclado se realiza para asegurar homogeneidad entre el polvo y el lubricante, en una proporción tal que aumente la fluidez del polvo en la matriz, ya que de esto depende, a nivel industrial, la velocidad de producción en piezas.

La cantidad de lubricante adicionado varía de un 0.5-1.5% del total del polvo utilizado por pieza, dependiendo del tipo de aleación.

Para el propósito experimental, el mezclado fué manual, obteniendo que para cada pieza se utilizarían 5.814 g de Al más el % indicado de lubricante, obtenido por la relación vol.polvo/vol.pieza, pudiendo ser Estearato de Aluminio, Estearato de Zinc o Acido Esteárico, que fueron los lubricantes de fácil manejo y disponibles en México.

Asignándole al Acido Esteárico la clasificación A, al Estearato de Zinc la clasificación B y al Estearato de Aluminio la clasificación C se prepararon mezclas dentro de recipientes de plástico con tapa conteniendo cada uno 20 g de polvo + %lubricante, obteniendose así 27 recipientes con la siguiente distribución :

IA0	IIA0	IIIA0	IB0	IIB0	IIIB0	IC0	IIC0	IIIC0
IA1	IIA1	IIIA1	IB1	IIB1	IIIB1	IC1	IIC1	IIIC1
IA2	IIA2	IIIA2	IB2	IIB2	IIIB2	IC2	IIC2	IIIC2
IA3	IIA3	IIIA3	IB3	IIB3	IIIB3	IC3	IIC3	IIIC3

Donde :

A, B Y C son los diferentes tipos de lubricante.

I, II Y III son los diferentes polvos utilizados.

0, 1, 2 Y 3 son los porcentajes de lubricante adicionado.

Posteriormente se mezcló el polvo por medio de agitación continua por 10 min aproximadamente. A nivel industrial se realiza la mezcla con mezcladores de tipo "Y" y de doble cono, dado que se utilizan grandes cantidades de polvo.

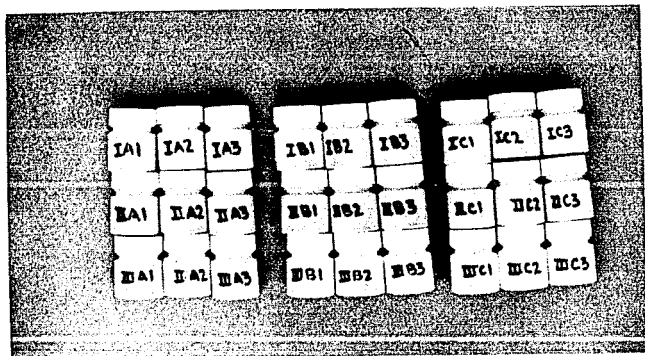


FIG. 3.6-RECIPIENTES CON LAS DIFERENTES MEZCLAS DE POLVO Y LUBRICANTE.



### III.3.- COMPACTACION.

La compactación se realizó en una prensa hidráulica Mohr and Federhaff con una capacidad de 20 t.

La prensa cumplió con los requisitos para las condiciones iniciales; ya que se compactó bajo una fuerza de 6,7 t.

En la FIGURA 3.7.A. se observa la prensa utilizada, mientras que la FIGURA 3.7.B. muestra el pistón inferior de avance.

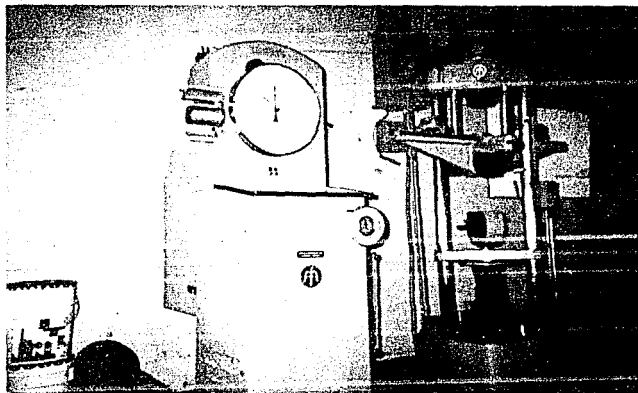


FIG. 3.7.A.-Prensa hidráulica MOHR AND FEDERHAFF,  
CAPACIDAD 20 t.

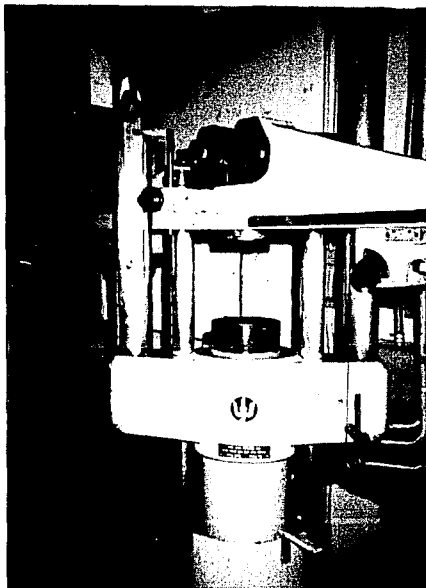


FIGURA 3.7.B.-PISTON DE AVANCE DE LA PRENSA UTILIZADA.

#### A) SISTEMA DE COMPACTACION.

La matriz para compactar se fabricó de acero grado herramienta tipo O1, el cual se incrustó en un anillo de acero comercial. El acero O1 fué sometido a un tratamiento térmico, primero templándolo y luego aplicándole un relevado de esfuerzos, para alcanzar una dureza máxima de 58 Rc.

En la FIGURA 3.8.A. se muestra el sistema de compactación, y en la FIGURA 3.8.B. se observa el sistema ya montado en el equipo de compactación.



FIGURE 3.6.A.—SYSTEM OF CONNECTED PIPES.

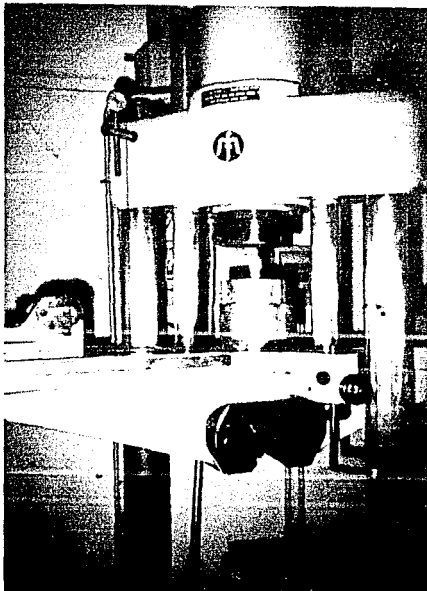
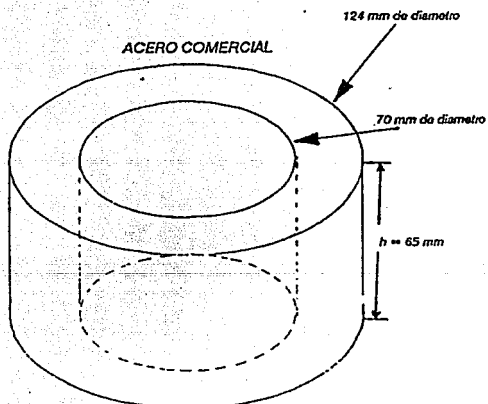
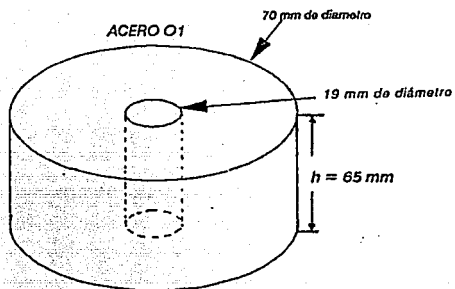


FIGURE 3.6.B.—SYSTEM OF CONNECTED PIPES FOR PRESS.

El diseño del sistema de compactación fué tomado teniendo como base el A.S.T.M. B 312-76, cuyo estandar se utiliza para determinar la resistencia en verde de polvos metálicos.

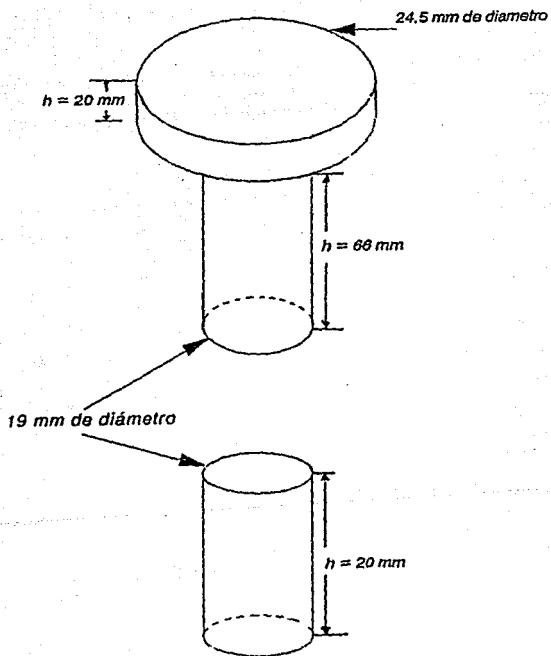
A continuación se muestra el diseño del sistema de compactación.

*Pieza de acero O1*



*Acero comercial. Acabado espejo.*

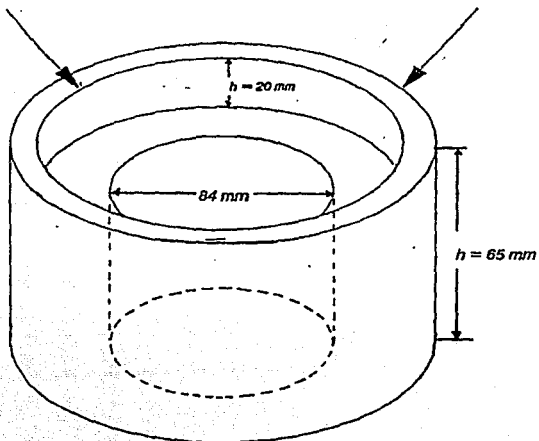
*Piñas de acero O1.*



**SOPORTE DE LA MATRIZ**  
**(acero comercial)**

125 mm de diametro

147 mm de diametro



**Acero comercial. Acabado espejo.**

## B) CONDICIONES EXPERIMENTALES.

Las condiciones experimentales que se utilizaron fueron similares a las recomendadas en la literatura.

La presión a la cual se trabajó fue la misma para todas las mezclas obtenidas y la velocidad de desplazamiento durante la compactación fue controlada manualmente.

La presión máxima se obtuvo de las dimensiones requeridas de la pieza, con un diámetro de 19mm y 6mm de altura.

Las mezclas se fueron compactando por tamaño de partícula en forma sucesiva hasta tenerlas todas compactadas.

En la FIGURA 3.9 se muestran las probetas ya compactadas.

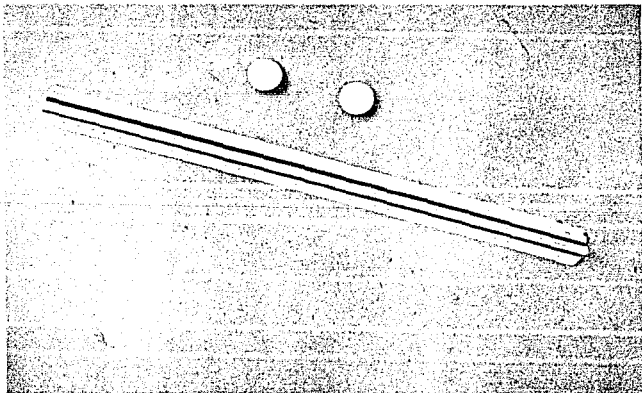


FIG. 3.9-PROBETAS OBTENIDAS DE POLVO DE ALUMINIO.



### III.4.- CALCULO DE LA DENSIDAD EN VERDE.

La densidad que presenta la mezcla de polvo después del compactado, es conocida como densidad en verde.

La siguiente fórmula se obtuvo de la bibliografía y sólo es válida para probetas cilíndricas :  $\rho = 1273 (m/d^2xh)$

Donde :  $\rho$  = Dens. Verde (g/cc)      d = Diam. Comp.(mm)  
m = Masa Compacto (g)      h = Altura Comp.(mm)

### III.5.- SINTERIZADO.

El sinterizado se realizó en un horno de resistencias en forma de tubo. Dentro de este horno se introdujo un tubo de cuarzo donde se colocaron las probetas para ser calentadas por convección y conducción.

La atmósfera dentro del tubo de cuarzo utilizada durante la sinterización fué He, el cual circulaba con un flujo de 0.283 m<sup>3</sup>/h.

Se fabricó una base de Al, por ser del mismo material al de las probetas, para colocar las muestras e introducirías en el horno (como se muestra en la FIGURA 3.12.A).

El registro de la temperatura se realizó con un termopar para determinar la temperatura de la base metálica, y un registrador automático del horno, el cual registró la temperatura de las paredes. Con estos dos indicadores se calculó el rango de temperatura en el cual debía llevarse a cabo el sinterizado, presentando una diferencia de 5 grados Centígrados de más en el registrador del horno que en el termopar, existiendo una variación de  $\pm 5$  C en las lecturas.

Para conservar la temperatura constante dentro del horno

se adaptaron tapones de goma en las boquillas del tubo de cuarzo, con pequeños orificios tanto para la entrada como para la salida del gas (como se muestra en la FIGURA 3.10).

#### A) DESCRIPCION DEL EQUIPO UTILIZADO.

Horno utilizado : Lindberg tipo tubo con un rango de temperatura de 200-1200 C, con dimensiones 65cm x 50cm y un diámetro de la cámara de 6cm.

El tubo de cuarzo con una longitud de 90cm con diámetro interno de 5,3cm.

En las FIGURAS 3.10 Y 3.11 se muestra el equipo utilizado, así como el aditamento para introducir las probetas.

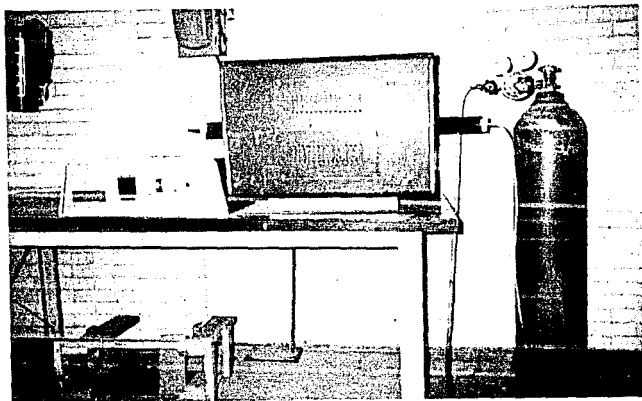


FIG. 3.10



Fig. 11

#### B) CONDICIONES EXPERIMENTALES.

Las condiciones utilizadas estuvieron basadas en la literatura, trabajando con algunas muestras a diferentes tiempos y temperatura para obtener los mejores valores cuando estos 550 grados C. a un tiempo de 30 min.

Los valores óptimos dependen de varios factores, como son: Acabado superficial de la pieza, tipo y cantidad de lubricante y atmósfera utilizada.

El tiempo de sinterizado empieza a contar a partir del momento en que se introducen las probetas hasta que se retiran de la base metálica.

Además el gas comienza a circular dentro del tubo antes de introducir las piezas para crear una atmósfera adecuada.

Las FIGURAS 3.12.A Y 3.12.B muestran algunas piezas sinterizadas.

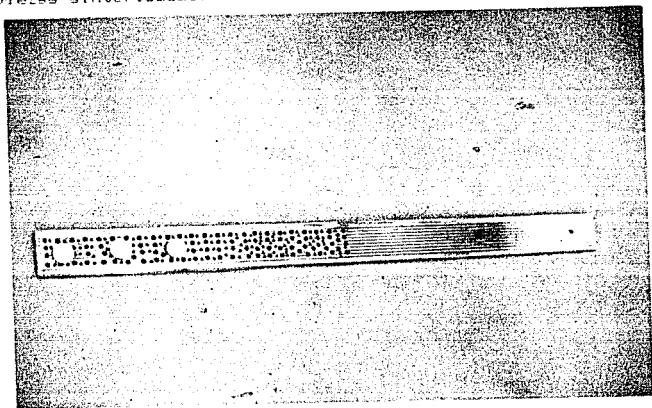


FIGURA 3.12.A

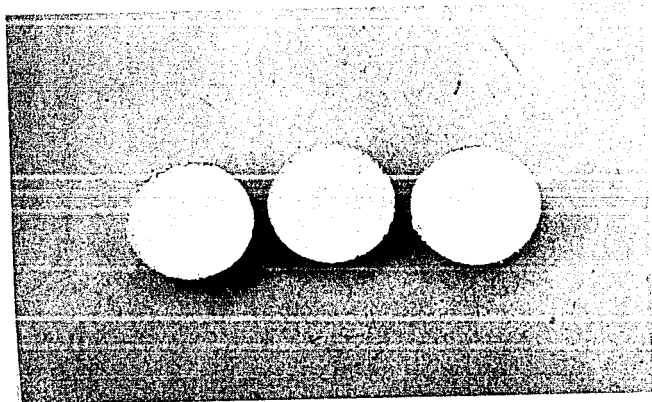


FIGURA 3.12.B

La diferencia superficial de las piezas compactadas hasta que finaliza la sinterización radica en el color amarillento de las probetas sinterizadas, debido a la evaporación y/o quemado del lubricante residual, lo cual se presentó al utilizar Acido Esteárico así como Estearato de Aluminio.

### III.6 DETERMINACION DE LA DENSIDAD FINAL.

Para esta determinación se empleó una balanza analítica digital Oertling NA 164 en la cual se determinó el peso de la probeta ya sinterizada, y se determinó su volúmen desplazado en agua, con lo cual se utilizó la formula :  $\rho = m/V$

Donde :  $\rho$  = Densidad (g/cc)    m = Peso Prob.(g)    V = V.Desp.(ml)

Cabe mencionar que para corroborar los datos obtenidos de las piezas porosas, se maquinó una pieza de Al sólido (obtenido por fundición) hasta alcanzar las siguientes dimensiones :

Diámetro : 19 mm

Altura : 6 mm

Posteriormente se le determinó una densidad de 3.1 g/cc mediante el procedimiento utilizado para las piezas porosas.

### III.7.- MEDICION DEL % DE POROSIDAD EN VOLUMEN.

Se obtuvo por medio del método de prueba estandar con designación B 328 - 73 del A.S.T.M. 11

Del cual se obtiene la siguiente formulación :

$$P = (d-D)/d \times 100$$

Donde : P = Porosidad en Volúmen, %.

d = Dens. Pieza Impregnada en agua, g/cm<sup>3</sup>.

D = Dens. Pieza Seca, g/cm<sup>3</sup>.

### III.8.- MEDICION DE LA DUREZA DE LAS PIEZAS OBTENIDAS.

Antes de determinar la dureza, las piezas se desbastaron hasta lija 600 y posteriormente se les aplicó un pulido fino.

En el durómetro se les determinó la dureza Brinell, con una carga de 300 kg y el indentador de bola de 10 mm de diámetro, ya que las probetas no soportaron una carga mayor.

El tiempo de aplicación de carga fué de 15 segundos. La dureza Brinell se obtuvo al aplicar la siguiente formulación :

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

Donde :

P = Carga aplicada, kg

D = Diámetro del indentador, mm

d = Diámetro de la impresión medida, mm

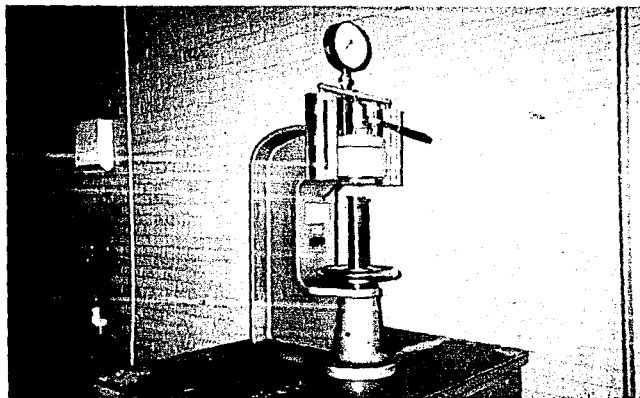


FIGURA 3.13-EQUIPO PARA DETERMINAR DUREZA BRINELL.

### III.9.- ANALISIS METALOGRAFICO.

Todas las probetas se prepararon para análisis metalográfico superficial al microscopio, de las cuales se escogieron 4 para partir las a la mitad y realizar observaciones posteriores.

En la FIGURA 3.14 se observan algunas probetas preparadas para ser observadas al microscopio.



FIGURA 3.14-PROBETAS PULIDAS A ESPEJO.

Después de haber sido pulidas a espejo se atacaron con el reactivo HF al 0.5%. En las FIGURAS 4.1 a 4.5 se observan las metalografías de algunas probetas.

#### IV.- RESULTADOS EXPERIMENTALES.

A continuación se presentan en forma de tablas los resultados obtenidos del estudio experimental y fotografías obtenidas en el microscopio metalográfico de las muestras preparadas, así como observaciones hechas al microscopio sobre cada una de las piezas. Se denomina macroporos a las porosidades apreciables a simple vista, mientras que a los microporos es necesario observarlos por medio del microscopio.

Todas las muestras se obtuvieron con las mismas condiciones de  $T_{SINT} = 550$  grados C,  $t_{SINT} = 30$  min y  $P_{COMP} = 1825$  kg/cm<sup>2</sup> con una atmósfera de He controlada de 0.283 m<sup>3</sup>/h.

#### IV.1.- OBSERVACIONES DE LAS MUESTRAS CON TIPO DE LUBRICANTE A (ACIDO ESTEARICO).

MUESTRA	OBSERVACIONES
IA1	EN ESTA MUESTRA LOS MICROPOROS SON MUY PEQUEÑOS (0.03-0.06mm) ABARCANDO APROXIMADAMENTE 20%. NO TIENEN FORMA DEFINIDA NI TAMAÑO HOMOGENEO. LOS MACROPOROS (0.5mm) REPRESENTAN DE UN 10 A UN 15% DEL AREA TOTAL OBSERVADA.
IA2	EN ESTA MUESTRA LOS MICROPOROS SON MAS GRANDES QUE EN IA1 (0.08mm) Y LA CANTIDAD DE LOS MISMOS DISMINUYE AL 15% HABIENDO MAYOR DISTANCIA ENTRE ELLOS. LA FORMA DE LOS MICROPOROS ES HETEROGENEA. LOS MACROPOROS (0.5-1.0mm) ABARCAN DE UN 20 A UN 25% DEL AREA TOTAL.



- IA3        LOS MICROPOROS SON APROXIMADAMENTE IGUALES EN TAMAÑO A LOS DE IA2 (0.08mm) CONSERVANDO UNA DISTANCIA REGULAR ENTRE ELLOS. LA CANTIDAD DE MICROPOROS ES MAYOR A IA2, ABARCANDO UN 25% DEL AREA TOTAL. LOS MACROPOROS VAN DE 0.7-1.0mm ABARCANDO DE UN 30 A 35% DEL AREA TOTAL Y LA DISTANCIA ENTRE ELLOS ES HETEROGENEA.
- IIA1       LA CANTIDAD DE MICROPOROS ES POCA EN COMPARACION CON LAS DOS MUESTRAS DE ESTA SERIE (II), APROXIMADAMENTE 30%. LOS MICROPOROS (0.12mm) SE ENCUENTRAN DISTRIBUIDOS EN FORMA DISPERSA. EL TAMAÑO DE LOS MACROPOROS VA DE 0.2-0.4mm ABARCANDO UN 15% DEL AREA.
- IIA2       LOS MICROPOROS (0.14mm) SE INCREMENTAN HASTA 40%. HAY MACROPOROS DE APROXIMADAMENTE 1 - 1.5 mm ABARCANDO HASTA 20%.
- IIA3       LA CANTIDAD DE MICROPOROS (0.162mm) SE INCREMENTA A UN 45%, PERO LA CANTIDAD DE MACROPOROS (1-1.5mm) SE ELEVA DEMASIADO HASTA UN 40%.
- IIIA1      LA CANTIDAD DE MICROPOROS (0.12mm) ES DE ALREDEDOR DEL 10%, DE FORMA POCO CIRCULAR Y PARA LOS MACROPOROS (0.5mm) ES APROXIMADAMENTE EL 5% DEL AREA TOTAL. LA SINTERIZACION ES INSUFICIENTE PARA LA PERFECTA UNION DE LAS PARTICULAS.
- IIIA2      LA CANTIDAD DE MICROPOROS (0.162) ES DE APROXIMADAMENTE 5% DE FORMA POCO CIRCULAR Y PARA LOS MACROPOROS (0.7mm) ES DE UN VALOR SIMILAR A LA MUESTRA IIIA1. PRESENTA SINTERIZACION INSUFICIENTE.

**MUESTRA OBSERVACIONES**

**IIIA3 LA CANTIDAD DE MICROPOROS (0.19mm)  
AUMENTA AL 10% Y LA CANTIDAD DE MACROPOROS  
ENTRE EL 10 Y 15% DEL AREA TOTAL Y DE TAMAÑO  
TOTALMENTE HETEROGENEO (0.4-1.5mm).  
LA SINTERIZACION FUE PESIMA.**

**IV.2.- OBSERVACIONES DE LAS MUESTRAS CON TIPO DE LUBRICANTE  
B (ESTEARATO DE ZINC).**

**MUESTRA OBSERVACIONES**

**IB1 EXCELENTE APARIENCIA SUPERFICIAL Y ADECUADA  
SINTERIZACION. LA CANTIDAD DE MACROPOROS (0.32mm)  
ES DE 1% DEL AREA TOTAL. LOS MICROPOROS (0.03mm)  
ABARCAN UN 10%.**

**IB2 BUENA APARIENCIA SUPERFICIAL Y BUENA SINTERIZACION.  
LA CANTIDAD DE MACROPOROS (0.3-0.4mm)  
ES DE UN 2%. LOS MICROPOROS (0.08mm) ABARCAN UN  
20% DEL AREA TOTAL.**

**IB3 BUENA APARIENCIA SUPERFICIAL Y BUENA SINTERIZACION.  
LA CANTIDAD DE MACROPOROS ES 5% DEL AREA TOTAL CON  
UN TAMAÑO ENTRE 0.3-0.4mm. LOS MICROPOROS ABARCAN  
UN 25% DEL AREA, CON UN TAMAÑO DE 0.04mm.**

**IIB1 BUENA APARIENCIA SUPERFICIAL Y SINTERIZACION,  
LA CANTIDAD DE MACROPOROS (0.4mm)  
ES APROXIMADAMENTE 1%. LOS MICROPOROS (0.04mm)  
ABARCAN UN 10%.**

MUESTRA	OBSERVACIONES
IIB2	BUENA APARIENCIA SUPERFICIAL Y SINTERIZACION. LA UNION ENTRE PARTICULAS ES MUY BUENA Y LA CANTIDAD DE MACROPOROS (0.4mm) MENOR AL 1%. LOS MICROPOROS (0.11mm) SE INCREMENTAN A UN 30%.
IIB3	PESIMA APARIENCIA, REGULAR SINTERIZADO Y APROXIMADAMENTE 30% DE MACROPOROS (0.4mm). LOS MICROPOROS (0.16mm) AUMENTAN A UN 45%.
IIIB1	PRESENTA UN ACABADO SUPERFICIAL REGULAR Y UN MAL SINTERIZADO. EXISTE DESPRENDIMIENTO DE PARTICULAS. LOS MACROPOROS VAN DE 0.3-0.4mm.
IIIB2	NO SE OBSERVO AL MICROSCOPIO, DEBIDO A QUE LA UNION ENTRE PARTICULAS POR COMPACTACION FUE MALA.
IIIB3	MISMO CASO QUE IIIB2.

IV.3.- OBSERVACIONES DE LAS MUESTRAS CON TIPO DE LUBRICANTE C (ESTEARATO DE ALUMINIO).

MUESTRA	OBSERVACIONES
IC1	EXCELENTE APARIENCIA SUPERFICIAL. LOS POROS SON REDONDOS, PERO CON DISTRIBUCION Y TAMAÑO HETEROGENEO (0.016-0.03mm). LA POROSIDAD ESTA PRESENTE EN FORMA DE MICROPOROS, LOS MAS GRANDES ABARCANDO UN 10% DEL AREA TOTAL.
IC2	EXCELENTE APARIENCIA SUPERFICIAL. LOS POROS (0.03-0.04mm) ESTAN DISPERSOS DE MANERA HETEROGENEA. LA POROSIDAD DE MAYOR TAMAÑO AUMENTA A UN 15%.

MUESTRA	OBSERVACIONES
IC9	EXCELENTE APARIENCIA. LOS POROS DE MAYOR TAMAÑO (0.04mm) SE INCREMENTAN Y LOS DE MENOR TAMAÑO (0.03mm) SE ENCUENTRAN MAS DISPERSOS QUE EN IC1 Y IC2.
IIIC1	EXCELENTE APARIENCIA. LOS POROS (0.016-0.03mm) SE ENCUENTRAN MUY DISPERSOS Y DE FORMA REDONDEADA. HAY UN 10% DE POROS DE MAYOR TAMAÑO.
IIIC2	EXCELENTE APARIENCIA. LOS POROS (0.03-0.04mm) ESTAN DISTRIBUIDOS DE MANERA HETEROGENEA, SON REDONDOS Y LOS DE MAYOR TAMAÑO DISMINUYEN EN UN 5%.
IIIC3	EXCELENTE APARIENCIA. AUMENTAN DRASTICAMENTE LOS POROS A UN 30% TENIENDO UNA DISTANCIA MENOR ENTRE ELLOS Y UN TAMAÑO ENTRE 0.03-0.04mm. LOS DE MAYOR TAMAÑO DISMINUYEN CASI EN SU TOTALIDAD.
IIIC1	LA APARIENCIA SUPERFICIAL ES MUY BUENA. LOS POROS SON PEQUEÑOS (0.03mm), REDONDOS Y DISTRIBUIDOS DE MANERA IRREGULAR. LOS POROS ABARCAN UN 20%.
IIIC2	LA APARIENCIA SUPERFICIAL ES MUY BUENA. LOS POROS AUMENTAN DE TAMAÑO (0.04mm) CON DISTRIBUCION IRREGULAR. AUMENTAN LOS POROS EN UN 30%.
IIIC3	BUENA APARIENCIA. DISMINUYE LA DISTANCIA ENTRE LOS POROS QUE TIENEN UN TAMAÑO APROXIMADO DE 0.06mm, LOS CUALES AUMENTAN HASTA UN 40% Y TIENEN FORMA REDONDA.

NOTA : CON EL TIPO DE LUBRICANTE C (ESTEARATO DE Al) NO SE FORMAN MACROPOROS.

#### IV.4.- OBSERVACIONES DE LAS MUESTRAS SIN LUBRICANTE.

MUESTRA	OBSERVACIONES
I	APARIENCIA REGULAR DEBIDO A LA AUSENCIA DE LUBRICANTE. PRESENTA POROSIDAD DISPERSA DE MANERA HETEROGENEA Y TAMAÑO MAS O MENOS UNIFORME (0.016-0.03mm).
II	APARIENCIA REGULAR. LOS POROS AUMENTAN DE TAMAÑO (0.06mm) SIENDO DE FORMA IRREGULAR. ESTA MUESTRA PRESENTO MENOR COMPACTABILIDAD.
III	APARIENCIA REGULAR. LA DISTRIBUCION DE POROS ES MAS HOMOGENEA QUE EN I Y II, ASI COMO EL TAMAÑO (0.03mm) Y FORMA DE LOS POROS.

NOTA : EN ESTA SERIE DE PROBETAS NO SE FORMARON MACROPOROS.

IV.5.- TABLAS DE RESULTADOS.

MUESTRA	PRESION (kg/cm <sup>2</sup> )	$\rho$ VERDE (g/cc)	%POROSIDAD EN VOLUMEN	$\rho$ FINAL (g/cc)	HB
IA0	1825	2.59	0.68	2.79	28.48
IA1	1825	2.50	1.63	2.85	26.17
IA2	1825	2.43	2.41	2.77	20.65
IA3	1825	2.47	2.71	2.80	20.14
IIA0	1825	2.49	0.83	2.82	26.91
IIA1	1825	2.48	1.72	2.78	26.17
IIA2	1825	2.44	2.45	2.78	25.46
IIA3	1825	2.39	2.82	2.77	21.72
IIIA0	1825	2.62	0.65	2.86	20.14
IIIA1	1825	2.56	0.82	2.88	17.85
IIIA2	1825	2.57	1.78	2.89	17.03
IIIA3	1825	2.49	2.14	2.74	16.27

TABLA 4.1.- RESULTADOS OBTENIDOS CON ACIDO ESTEARICO.

En esta tabla podemos observar que los valores de porosidad mayores se presentan en las muestras con mayor contenido de lubricante. También la dureza de las muestras se ve afectada por el contenido de lubricante, ya que de las muestras se observa que a mayor contenido de lubricante es menor la dureza.

MUESTRA	PRESION (kg/cm <sup>2</sup> )	$\rho_{VERDE}$ (g/cc)	%POROSIDAD EN VOLUMEN	$\rho_{FINAL}$ (g/cc)	HB
IB0	1825	2.59	0.68	2.79	28.48
IB1	1825	2.67	1.36	2.85	27.68
IB2	1825	2.61	1.56	2.80	17.85
IB3	1825	2.56	2.38	2.84	16.27
IIB0	1825	2.49	0.83	2.82	26.91
IIB1	1825	2.52	0.99	2.84	25.46
IIB2	1825	2.52	2.48	2.81	24.11
IIB3	1825	2.50	2.93	2.78	21.72
IIIB0	1825	2.62	0.65	2.86	20.14
IIIB1	1825	2.68	1.24	2.91	18.72
IIIB2	1825	2.61	2.43	2.89	-----
IIIB3	1825	2.54	2.81	2.88	-----

TABLA 4.2.- RESULTADOS OBTENIDOS CON ESTEARATO DE ZINC.

En esta tabla, al igual que en la TABLA 4.1 se observa que a mayor contenido de lubricante mayor es la porosidad en la muestra y menor es la dureza.

MUESTRA	PRESION (kg/cm <sup>2</sup> )	$\rho_{VERDE}$ (g/cc)	%POROSIDAD EN VOLUMEN	$\rho_{FINAL}$ (g/cc)	HB
IC0	1825	2.59	0.68	2.79	28.48
IC1	1825	2.63	1.77	2.84	25.46
IC2	1825	2.62	3.07	2.85	24.11
IC3	1825	2.58	4.36	2.85	22.87
IIC0	1825	2.49	0.83	2.82	26.91
IIC1	1825	2.55	1.98	2.83	25.46
IIC2	1825	2.51	3.18	2.80	24.77
IIC3	1825	2.54	4.31	2.83	24.11
IIIC0	1825	2.62	0.65	2.86	20.14
IIIC1	1825	2.62	1.44	2.88	19.65
IIIC2	1825	2.59	2.03	2.89	18.72
IIIC3	1825	2.60	2.74	2.89	17.85

TABLA 4.3.- RESULTADOS OBTENIDOS CON ESTEARATO DE ALUMINIO.

Al igual que con el Acido Esteárico y el Estearato de Zinc, los resultados demuestran que a mayor contenido de lubricante mayor porosidad en las muestras.

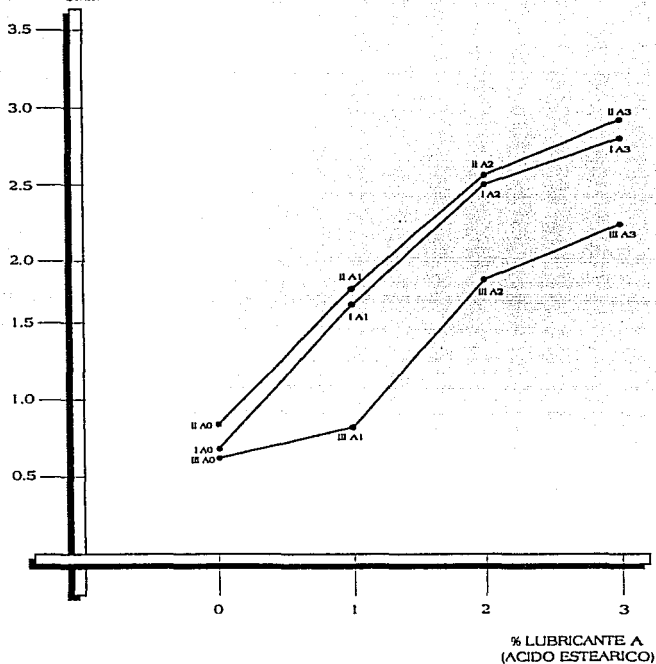
La dureza de las muestras disminuye conforme se aumenta el contenido de lubricante.



De las tres tablas obtenidas se analiza lo siguiente :

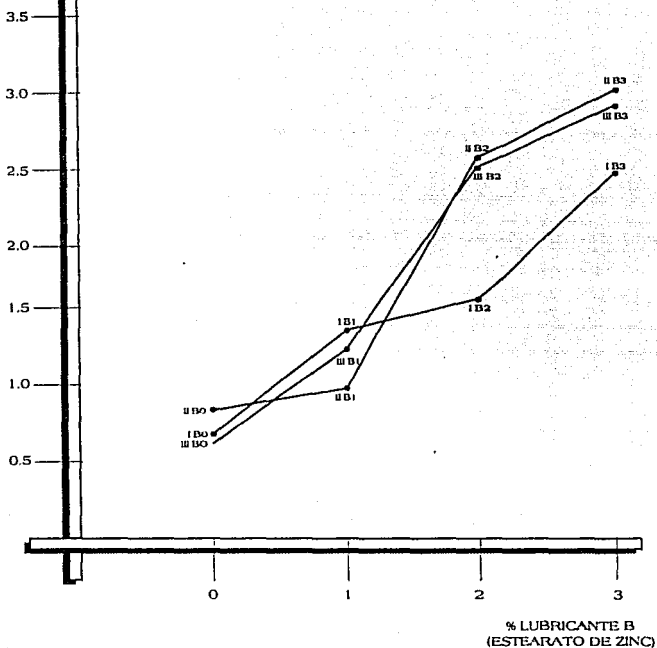
- En todas las muestras el % porosidad aumenta conforme aumenta la cantidad de lubricante. En todos los casos.
- El % de porosidad se controla con más facilidad utilizando Estearato de Aluminio, debido a que la forma de los poros es circular.
- La dureza de las muestras disminuye conforme se aumenta la cantidad de lubricante. En todos los casos. Con el uso de Estearato de Aluminio se obtienen las menores diferencias de dureza entre probetas de un mismo tipo de polvo con diferentes % de lubricante.
- Los valores de la densidad en verde fueron menores para las muestras obtenidas con polvo tipo II, ya que la menor compactabilidad que presenta este polvo se ve reflejada en la altura de las muestras, la cual es mayor que para las muestras obtenidas con polvo I y III.
- Prácticamente no hay variación en la densidad final de todas las muestras, ya que para todas las piezas se utilizó la misma cantidad de polvo de Al y los cambios en volumen de las piezas es mínimo. Además debe considerarse el hecho de que pueden existir residuos de lubricante en las piezas sinterizadas. De aquí la importancia del método para determinar el % de porosidad en volumen.

% POROSIDAD  
EN VOLUMEN



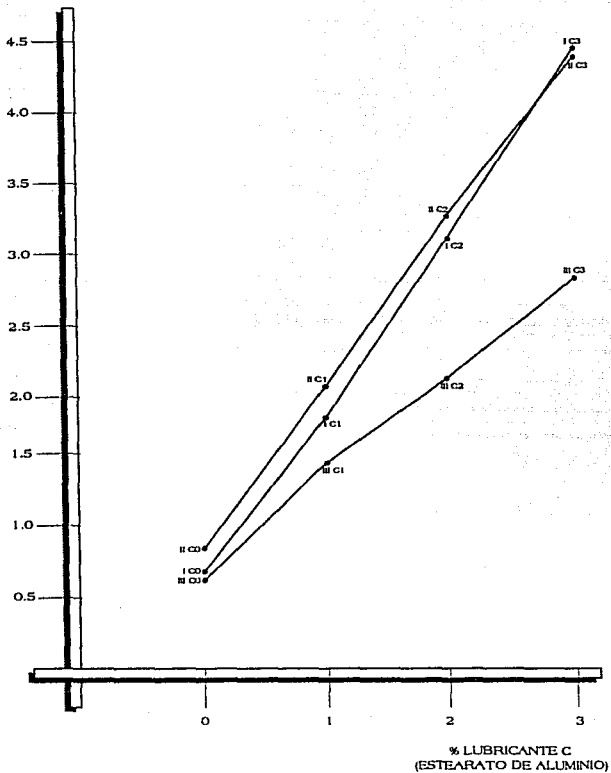
GRAFICA 1.- EN LA GRAFICA SE OBSERVA COMO AUMENTA EL  
% POROSIDAD CONFORME AUMENTA EL CONTENIDO DE LUBRICANTE A  
(ACIDO ESTEARICO) PARA LOS TRES TIPOS DE POLVO. DE LAS  
MUESTRAS SIN LUBRICANTE LA MAS POROSA FUE LA OBTENIDA CON POLVO  
TIPO II, SIENDO TAMBIEN LA QUE PRESENTO MENDR COMPACTABILIDAD.

% POROSIDAD  
EN VOLUMEN

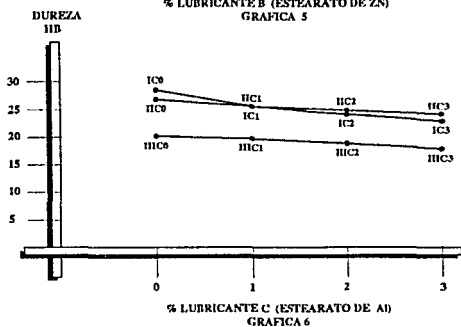
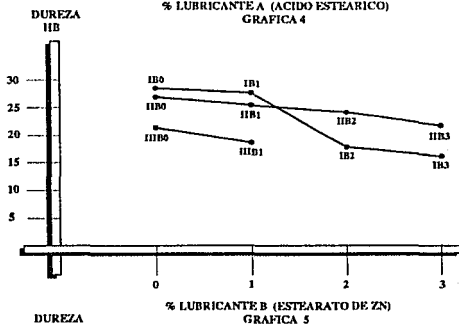
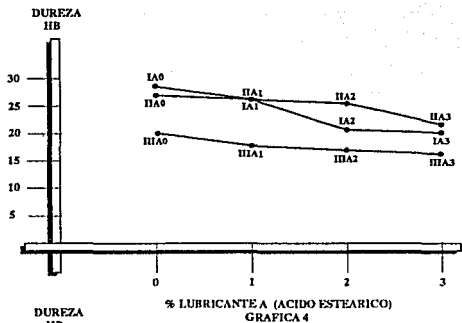


GRAFICA 2.- PODEMOS VER EL AUMENTO DE POROSIDAD CONFORME AUMENTA EL CONTENIDODE LUBRICANTE B (ESTEARATO DE ZINC) PARA LOS TRES DIFERENTES POLVOS, AL IGUAL QUE EN LA GRAFICA 1.

% POROSIDAD  
EN VOLUMEN



GRAFICA 3.- SE MANTIENE LA RELACION MAYOR CONTENIDO DE LUBRICANTE - MAYOR POROSIDAD PARA TODAS LAS MUESTRAS.



EN LAS GRAFICAS 4, 5 y 6 PODEMOS OBSERVAR QUE AL AUMENTAR EN LAS MUESTRAS EL CONTENIDO DE LUBRICANTE, LA DUREZA DISMINUYE.

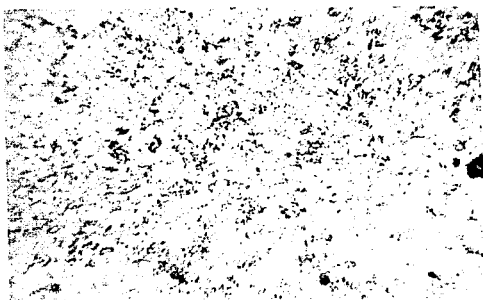


FIG. 4.1-PROBETA DE AL TIPO II SIN LUBRICANTE. SE OBSERVAN LOS MICROPOROS CON TAMANO Y FORMA MAS O MENOS UNIFORME. LOS POROS SE ENCUENTRAN DISPERSOS. SE OBSERVAN ALGUNOS POROS DE MAYOR TAMANO, DEBIDO A LA MALA FLUIDEZ DEL POLVO EN LA MATRIZ, YA QUE ESTE POLVO FUE EL QUE PRESENTO MENOR COMPACTABILIDAD, ADHIRIENDOSE A LAS PAREDES DE LA MATRIZ MAS QUE LOS POLVOS I Y II SIN LUBRICANTE. DEBIDO A ESTO PRESENTO EL MAYOR % DE POROSIDAD EN LA MUESTRA COMPARADO CON EL POLVO I Y II SIN LUBRICANTE. ATAQUE CON HF AL 0.5%. 400X.



FIG. 4.2-PROBETA DE AL CON CLASIFICACION 161, DONDE SE OBSERVA UNA ESTRUCTURA CARACTERISTICA DE PROBETAS OBTENIDAS POR PULVINETALURGIA.

LA UNION ENTRE PARTICULAS ES BUENA, Y LA POROSIDAD SE OBSERVA INTERCONECTADA ENTRE LOS LIMITES DE GRANO. ATACADA CON HF AL 0.5%. 400X.

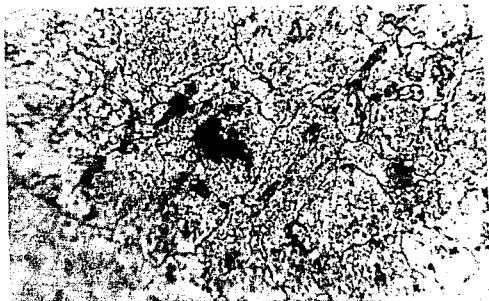


FIG. 4.3-PROBETA DE AL CON CLASIFICACION IB2. LOS POROS QUE PRESENTA SON DE TAMAÑO MAYOR QUE LOS PRESENTES EN LA PROBETA IB1 Y LA CANTIDAD DE MICROPOROS AUMENTA. DEBIDO A QUE CONTIENE MAS LUBRICANTE QUE IB1. LA UNION ENTRE PARTICULAS ES BUENA. ATACADA CON HF AL 0.5%. 400X.



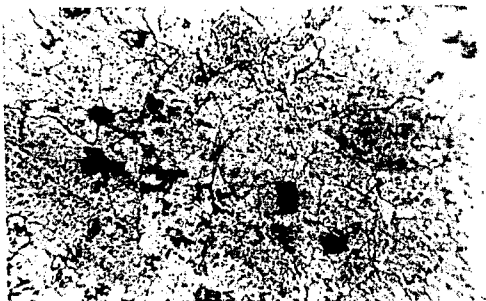


FIG. 4.4.- PROBETA DE AL CON CLASIFICACION 1B3. ESTA MUESTRA ES LA QUE CONTIENE MAYOR CONTENIDO DE LUBRICANTE DE LA SERIE I, LO CUAL SE VE REFLEJADO EN LOS MICROPOROS QUE SON DE GRAN TAMAÑO. LA DISTRIBUCION DE LOS POROS ES MAS HOMOGENEA QUE EN LAS PROBETAS 1B1 Y 1B2. ATAQUE CON HF AL 0.5%. 400X.

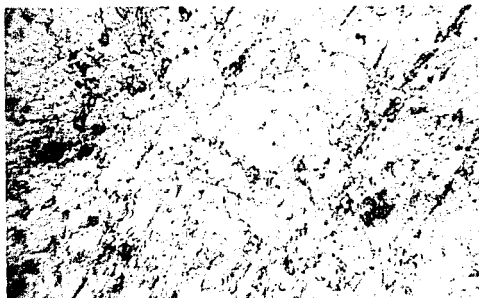


FIG. 4.5-PROBETA DE ALUMINIO ATACADA CON HCl 0.5% 400X. SE OBSERVA A LOS POROS REDONDEADOS, PERO CON DISTRIBUCION Y TAMAÑO HETEROGÉNEO. TODAS LAS PROBETAS CON LUBRICANTE C PRESENTAN POROS REDONDEADOS, ADEMÁS DE UNA EXCELENTE APARIENCIA SUPERFICIAL. AQUÍ SE OBSERVA UNA BUENA UNIÓN ENTRE PARTICULAS, DEBIDA EN PARTE A LA BUENA ACCIÓN QUE TIENE COMO LUBRICANTE EL ESTÉRRATO DE ALUMINIO. ATACADA CON HF AL 0.5% 400X.



FIG. 4.6.--PROBETA DE AL CON CLASIFICACION 1100, LA CUAL TIENE EL MAYOR TAMANO DE PARTICULA ASI COMO EL MAYOR CONTENIDO DE LUBRICANTE. PRESENTA LA MAYOR CANTIDAD DE POROS QUE CUALQUIER OTRA PROBETA, PERO TAMBIEN PRESENTA LA MEJOR DISTRIBUCION. EL TAMANO DE PORO MAS HOMOGENEO Y LA FORMA DE PORO MAS REGULAR. LA SINTERIZACION NO ES BUENA, YA QUE SE OBSERVA LA MALA UNION ENTRE PARTICULAS. EL ACOMODO DE LAS PARTICULAS SE DEBE AL ESTEARATO DE ALUMINIO QUE ACTUA EFICAZMENTE COMO LUBRICANTE, LOGRANDO LA UNION DE LAS PARTICULAS BASICAMENTE POR ADHESION. ATACADA CON HF AL 0.5%. 400X.

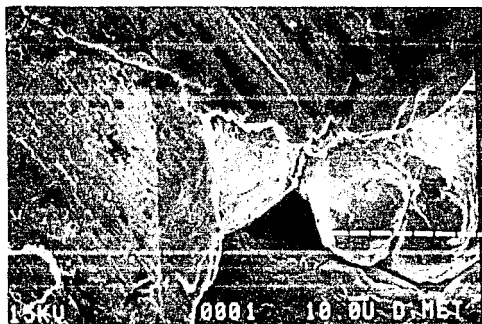


FIG. 4. a) FOTOMICROGRAFIA DE UNO DE LOS FILTROS DE POLVO III. EN ESTE FILTRO SE OBSERVA UNA ESTRUCTURA POROSA CON UNAS FIBRAS DE POLVO III QUE SE OBSERVA EN EL FILTRO DE POLVO I. b) FOTOMICROGRAFIA DE UNO DE LOS FILTROS DE POLVO III. EN ESTE FILTRO SE OBSERVA UNA ESTRUCTURA POROSA CON UNAS FIBRAS DE POLVO III. EN ESTE FILTRO SE OBSERVA UNA ESTRUCTURA POROSA CON UNAS FIBRAS DE POLVO III.

## V.- DISCUSION Y CONCLUSIONES.

1.- El porcentaje de porosidad se ve afectado por un aumento en el contenido de lubricante.

2.- Con el Estearato de Aluminio se obtiene un mejor acabado superficial, en comparación con el Acido Esteárico y el Estearato de Zinc, ya que aunque la cantidad de poros se incrementa al aumentar el contenido de Estearato de Aluminio, el tamaño de los mismos es homogéneo y de forma redondeada.

Características primordiales para la obtención de piezas con porosidad controlada como bujes, cojinetes o rotores autolubricantes.

3.- Con el Acido Esteárico se fomenta la aparición de macroporos, debido a que su tamaño de partícula es burda y heterogénea, lo que provoca que al evaporarse durante la sinterización deje microporos y macroporos de tamaño irregular.

4.- Con el polvo de tamaño de partícula menor se obtienen mejores resultados de sinterización en comparación del tamaño de partícula mayor. Esto se debe a que los puntos de contacto entre las partículas pequeñas son mayores.

5.- El Estearato de Aluminio resulto ser el mejor lubricante, ya que la pieza no se ve afectada durante el compactado, puesto que el polvo fluye de tal manera que no se presentan macroporos en las piezas.

6.- Aún cuando el Estearato de Aluminio es el lubricante más caro de los que se utilizaron (\$70,000.00/kg) las ventajas que ofrece frente al Estearato de Zinc (\$48,000.00/kg) y el Acido Esteárico (\$38,000.00/kg) lo hacen rentable en cuanto a producción de piezas por pulvimetalurgia. Aunque existen en el mercado internacional otros tipos de lubricantes, pero no se pueden conseguir fácilmente en el mercado nacional.

7.- En algunas muestras no se logró el sinterizado (como es el caso de las muestras con tipo de polvo III). Esto debido a que el área de la partícula es mayor, y el contacto con el aire aumenta la oxidación. El polvo de Aluminio tiende a formar una capa de  $Al_2O_3$  que es difícil de romper bajo las condiciones experimentales de sinterizado.

## VI.- BIBLIOGRAFIA.

- 1.- KAZANAS-BAKER-GREGOR. PROCESOS BASICOS DE MANUFACTURA. EDIT. Mc.GRAW-HILL, MEXICO 1983.
- 2.- MYRON L., BEGEMAN AND B.H. AMSTEAD. PROCESOS DE FABRICACION, pp 286-292, CECSA 1980.
- 3.- ANNUAL BOOK OF A.S.T.M. STANDARDS (1980), PART.9, pp 126-129 Y 159-161.
- 4.- HARRY E. CHANDLER. METAL PROGRESS. VOL 127 (1), JAN 1985, pp 87-88.
- 5.- SAMUEL BRADBURY. SOURCE BOOK ON P/M; AMERICAN SOCIETY FOR METALS, 1979, pp 74-81 Y 403-818.
- 6.- METAL POWDER REPORT. CURRENT STATUS OF SINTERED Al AND SOME COMPARISONS WITH SINTERED IRON; MAY 1980, 35(5), pp 193-198.
- 7.- P. MOLERA. INTRODUCCION A LA PULVIMETALURGIA; EDIC. BELLATERRA S.A. 1980.
- 8.- ORTEGA R., ARTURO. METALURGIA DE POLVOS DE COBRE, BRONCE, LATON Y ALUMINIO. TESIS DE LIC. DE I.Q.M., FACULTAD DE QUINICA, U.N.A.M., MEXICO 1986.

- 9.- V.A. TRACEY. POROUS MATERIALS : CURRENT AND FUTURE TRENDS; THE INTERNATIONAL JOURNAL OF P/M AND POWDER TECHNOLOGY, JAN 1976, 12(1), pp 25-34.
- 10.- M.J. COUPER, J.W. LUSTER, M. THUMANN. DEVELOPMENT OF ELEVATED TEMPERATURE METALLURGY ALUMINIUM ALLOYS. PMI VOL 23 (1), 1971, pp 7-14.
- 11.- A.V. SEYBOLT - J.E. BURKE. TECNICAS DE METALURGIA EXPERIMENTAL. CENTRO REGIONAL DE AYUDA TECNICA. MEXICO (1969).
- 12.- F.V. LENEL AND G.S. ANSELL. THE STATE OF THE SCIENCE AND ART OF P/M. JOURNAL OF METALS. FEB 1982, pp 17-29.
- 13.- HARRY E. CHANDLER AND DONALD F. BAXTER. TECHNOLOGY FORECAST 80s. METAL PROGRESS. VOL 117 (1), JAN 1980, pp 100-103.
- 14.- HARRY E. CHANDLER AND DONALD F. BAXTER. TECHNOLOGY FORECAST 83. METAL PROGRESS. VOL 123 (1), JAN 1983, pp 70-74.
- 15.- J.A. VIVAS, G. JANGG. PRODUCTION OF SINTERED POROUS ALUMINIUM MATERIALS; TECHNISCHE UNIVERSITAT, WIEN, AUSTRIA.
- 16.- L.G. ROY. INFLUENCE OF SINTERING ATMOSPHERES AND POWDER COMPOSITION ON MACHININGS GRADE COMPACTS; THE INTERNATIONAL JOURNAL OF P/M AND POWDER TECHNOLOGY, OCT. 1976, 12(4), pp 313-324.



EST. 1910  
SALIDA DE LA BIBLIOTECA

17.- MOSCA AND PINO. MECHANICAL AND THERMAL PROPERTIES OF  
SINTERED Al ALLOYS; OLIVETTI-SPA, CO.; ITALY.

18.- S. CHOI. A STUDY OF THE SINTERING MECHANISM OF METALS  
POWDERS; THE INTERNATIONAL JOURNAL OF POWDER METALLURGY AND  
POWDER TECHNOLOGY, JAN 1985, 21(1), pp 30-40.

19.- S. STORCHHEIM AND M.A.H. HOWES. ALUMINIUM COMPACTION  
PROBLEM SOLVED; METAL POWDER REPORT, MAY 1980, 35(5), pp  
193-198.

20.- S.W. MCGEE AND F.K. BURGESS. IDENTIFYING COST EFFECTIVE  
P/M APPLICATIONS; THE INTERNATIONAL JOURNAL OF P/M AND POWDER  
TECHNOLOGY, OCT 1976, 12(4), pp 313-324.

21.- W. ZOLKOWSKI - M. CZEPELAK. INFLUENCIA DEL TIPO DE  
LUBRICANTE SOBRE EL PROCESO DE COMPACTACION DE POLVO DE  
ALUMINIO. INSTITUTO DE METALES INDEPENDIENTE. GLIWICE, SILECIA.