

2/115



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

Facultad de Química



EXAMENES PROFESIONALES
FACULTAD DE QUÍMICA

METALURGIA DE POLVOS DEL COBRE, BRONCE, LATON
Y ALUMINIO

T E S I S

Que para obtener el título de

INGENIERO QUIMICO METALURGICO

presenta

Arturo Ortega Rodríguez



México, D. F.

1986



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

Capítulo	Pag.
I.- Introducción.	1
II.- Generalidades.	3
III.- Análisis de procesos para pulvimetalurgia	5
IV.- Aplicaciones y propiedades de partes ne ferrosas por metalurgia de polvos.	10
IV.A.- Análisis del mercado nacional.	16
4.A.1) Mercado nacional de polvos metálicos.	16
4.A.2) Mercado nacional de piezas a partir de polvos metálicos.	17
V.- Aspectos fundamentales de la compactación.	19
5.1) Diseño y materiales para matrices en compactación.	23
5.2) Influencia de las características del polvo durante la compactación.	24
VI.- Aspectos fundamentales del sinterizado.	28
6.1) Consideraciones termodinámicas.	28
6.2) Etapas del sinterizado.	30
6.3) Mecanismos de la sinterización.	31
6.4) Factores que influyen durante el sinterizado.	37
6.5) Porosidad durante sinterizado.	38
VII.- Experimentación.	40
7.1) Descripción general del polvo a utilizar.	42
7.2) Mezclado del polvo.	48
7.3) Compactación.	49
a) Diseño de la matriz para compactación.	50

II

b) Condiciones experimentales.	52
7.4) Cálculo de la densidad en verde.	54
7.5) Sinterizado.	54
a) Descripción del equipo utilizado.	55
b) Condiciones experimentales.	58
7.6) Determinación de la densidad del producto.	59
7.7) Medición de dureza a las muestras obtenidas.	60
7.8) Análisis metalográfico.	61
VIII.- Resultados experimentales.	61
IX.- Discusión y conclusiones.	85
X.- Bibliografía.	89

I.- INTRODUCCION.

La metalurgia de polvos es una de las actividades que se ha desarrollado grandemente a nivel mundial; esto es debido a la utilidad que presta al progreso humano, dado que ofrece ciertas ventajas en la fabricación de partes metálicas de alta precisión, abarcando una gran variedad de tamaños y la técnica es adecuada para la producción en masa.

Las etapas principales en la producción de piezas metálicas por este método se enumerán de la siguiente manera: 1) prensado del polvo metálico (generalmente lo suficiente fino como para que pase una red de cien mallas ó más fino) a una forma deseada en un dado de acero y 2) consolidado ó densificado (sinterizado) del compacto a una temperatura muy por encima de la temperatura de recristalización, a menudo proxima al punto de fusión.

En algunos casos se pueden realizar las dos etapas simultáneamente, llamándose para esto proceso de prensado en caliente. Bajo condiciones adecuadas, la parte prensada resultante puede tener una densidad muy cercana a la teórica que corresponde al metal ó aleación usada. Aunque en algunos productos se les da un acabado final, como es el calibrado, acunado o estampado; esta operación aumenta la densidad y añade mayor resistencia a la pieza, además de que la precisión aumenta considerablemente.

Para cualquiera de las dos técnicas antes mencionadas en la producción de piezas (prensado en caliente ó prensado en frío), se debe tomar muy en cuenta la construcción de la matriz que tendrá la forma final, ya que de esto depende la

precisión del producto.

Durante el transcurso del sinterizado existen una serie de variables que se deben controlar para obtener buenos resultados, como son: Temperatura, velocidad de calentamiento, tiempo de sinterizado, tipo de atmósfera (reductora, neutra ó vacío) y velocidad de enfriamiento. Según su uso y metal serán las condiciones adecuadas para obtener un buen producto final.

Por lo que en el presente trabajo se pretende encontrar las condiciones adecuadas para la obtención de piezas metálicas a partir de polvos. Los polvos que se utilizarán para dicho estudio son: Cobre, bronce, latón y aluminio; dado que tienen una gran importancia y aplicación en el campo metalúrgico.

II.- GENERALIDADES.

La metalurgia de polvos de metales no ferrosos es de gran importancia a nivel mundial, por lo que su estudio a nivel nacional resulta un tanto interesante.

Dentro del ambito nacional contamos prácticamente con tres compañías que producen el grueso del polvo metálico para piezas por este método, y ellas son: Estano Electro, S.A., Polvos Metálicos Mexicanos, S.A. y Alcan Aluminio, S.A.

Hasta el momento las piezas metálicas que mayor uso tienen a nivel nacional son los bronce porosos; estos se aplican principalmente dentro de la industria automotriz y en refacciones de línea blanca, y el 95% de la producción esta a cargo de Bintermetal, S.A. y Sintermex.

La porosidad de las piezas se puede controlar y suele tener valores de hasta 40% del volumen para piezas autolubrificantes y para filtros metálicos puede llegar al 80%, pero utilizando polvos esférico u otra forma de partícula que produzca alta porosidad.

En general después del sinterizado, las piezas se someten a un calibrado ó reprensado para darle las dimensiones finales; además da una apariencia brillante a la pieza. A las piezas porosas se les impregna con aceite por un tratamiento al vacío.

La metalurgia de polvos del cobre, bronce, latón y aluminio (caso que nos ocupa), es de mucha importancia por sus aplicaciones y su resistencia a la corrosión; lo que deriva ventajas en el uso de estos materiales, aunque a nivel nacional las piezas de bronce son las que se producen en gran

escala, dejando en menor término las piezas de cobre, latón y aluminio. Esto es debido a que el latón y el aluminio en polvo es difícil de manejar por su tendencia a oxidarse rápidamente; además que para encontrar las condiciones óptimas de trabajo se requiere de mucho estudio y tiempo.

El polvo de latón y aluminio tiene grandes aplicaciones a nivel industrial, por lo que se requiere de un estudio profundo con materia prima nacional. Además que la calidad del polvo nacional varía con el polvo extranjero, así las condiciones de trabajo deberán ser diferentes.

III.- ANALISIS DE PROCESOS PARA METALURGIA DE POLVOS.

Actualmente se dispone de muchos metales para usarse en partes fabricadas de polvos metálicos y el número de productos manufacturados por este procedimiento aumenta firmemente.

La metalurgia de polvos en general, comprende el procedimiento para la fabricación de polvos metálicos que se usarán como materia prima, así como los métodos que se utilizan para producir partes metálicas.

3.1) Fabricación de polvos metálicos.

Dentro de las técnicas más apropiadas para producir polvos no ferrosos en el uso de partes metálicas, es el método de atomización; dado que resulta más fácil obtener partículas de formas definidas y que son utilizadas en casos especiales.

La atomización consiste, en general, en proyectar un chorro de metal o de aleación fundido contra un fluido (aire, agua ó gas inerte). Debido a la súbita solidificación que tiene lugar, el metal aparece en forma pulverulenta; a continuación se reduce la masa así formada en atmósfera reductora, a fin de eliminar el óxido superficial que se haya formado. En este método cabe tener en cuenta, como variables importantes del proceso, a la temperatura y régimen del metal fundido, la naturaleza y presión del fluido y otros factores procedentes del diseño, como las dimensiones de la tobera, la altura de la caída, etc.

La atomización ha sido aplicada a la producción de polvos de estaño, plomo, cinc, cobre, bronce, etc. . Es interesante señalar que las partículas esféricas de bronce, destinadas a la fabricación de filtros metálicos sinterizados, no puede obtenerse de otro modo; la fabricación de estas esferas requiere la adición de fósforo al bronce, con la cual se obtiene las formas esféricas lo más perfectas posible, ya que el fósforo incrementa la tensión superficial del bronce.

3.2) Fabricación de piezas metálicas.

El único método práctico para preparar metales y aleaciones de una porosidad definida consiste en las técnicas de polvos, ejemplo de los cuales son los filtros metálicos y los cojinetes autolubricantes. En esta última técnica se prepara una estructura porosa de bronce o de acero, eliminando una sustancia volátil de la mezcla de polvos durante el sinterizado. La sustancia volátil deja tras de sí, poros que pueden llenarse más tarde con aceite y, por consiguiente, produce un cojinete con lubricación permanente en sí mismo. No siempre es necesario usar sustancias volátiles para la producción de cuerpos porosos, ya que si se escoge apropiadamente el tamaño y la forma de las partículas del polvo y si se vigilan cuidadosamente las operaciones de prensado y sinterizado, se producirá a menudo la estructura deseada.

3.3) Acondicionamiento del polvo metálico para su uso.

Para asegurarse de resultados satisfactorios en la preparación de compactos de polvo de densidad alta y propiedades reproducibles, la superficie del polvo deberá estar lo más

libre posible de óxido ó de otros contaminantes. Generalmente, la principal contaminación superficial es el óxido, la cual se puede eliminar a menudo mediante la reducción con hidrógeno. En esta operación se deben emplear temperaturas más bien bajas pues de otra manera ocurrirá una sinterización y se obtendrá una masa esponjosa en lugar de un polvo suelto. Como una regla empírica, se puede decir que la temperatura usada para la limpieza con hidrógeno no debiera ser mayor a la tercera parte o la mitad que la temperatura de fusión en grados centigrados, pero será necesario un tanto de la prueba y error, para determinar la temperatura y el tiempo apropiados. Después del tratamiento con hidrógeno (el cual se deberá efectuar con hidrógeno muy seco), de preferencia, se debería utilizar el polvo inmediatamente, ó, si es necesario almacenarlo, se deberá poner bajo gas inerte, para evitar reoxidación.

No es recomendable fundir dos polvos metálicos A y B para formar una aleación, ya que pueden producir un material muy frágil, inadecuada para el uso a que se destine. Pero si se usan polvos y con el control de las condiciones de sinterizado, se puede obtener una estructura sintética, de no equilibrio, en la cual no ha ocurrido una difusión suficiente para formar una amplia fase frágil.

3.4) Diagrama de flujo general para metalurgia de polvos.

El diagrama de flujo de la figura 3.1, reúne los diferentes procesos y operaciones utilizados en la fabricación de partes con polvos metálicos. Esta gráfica muestra en una secuencia correcta, las operaciones desde la materia prima hasta las partes terminadas. Las partes terminadas podrán requerir otras varias operaciones que no se muestran en la gráfica. En ellas quedan incluidas la frotación, soldadura, latonado, estirado, tratamiento con vapor, impregnado de aceite o algunas veces un sinterizado adicional. Las tolerancias mostradas se aplican a partes pequeñas y uniformes.

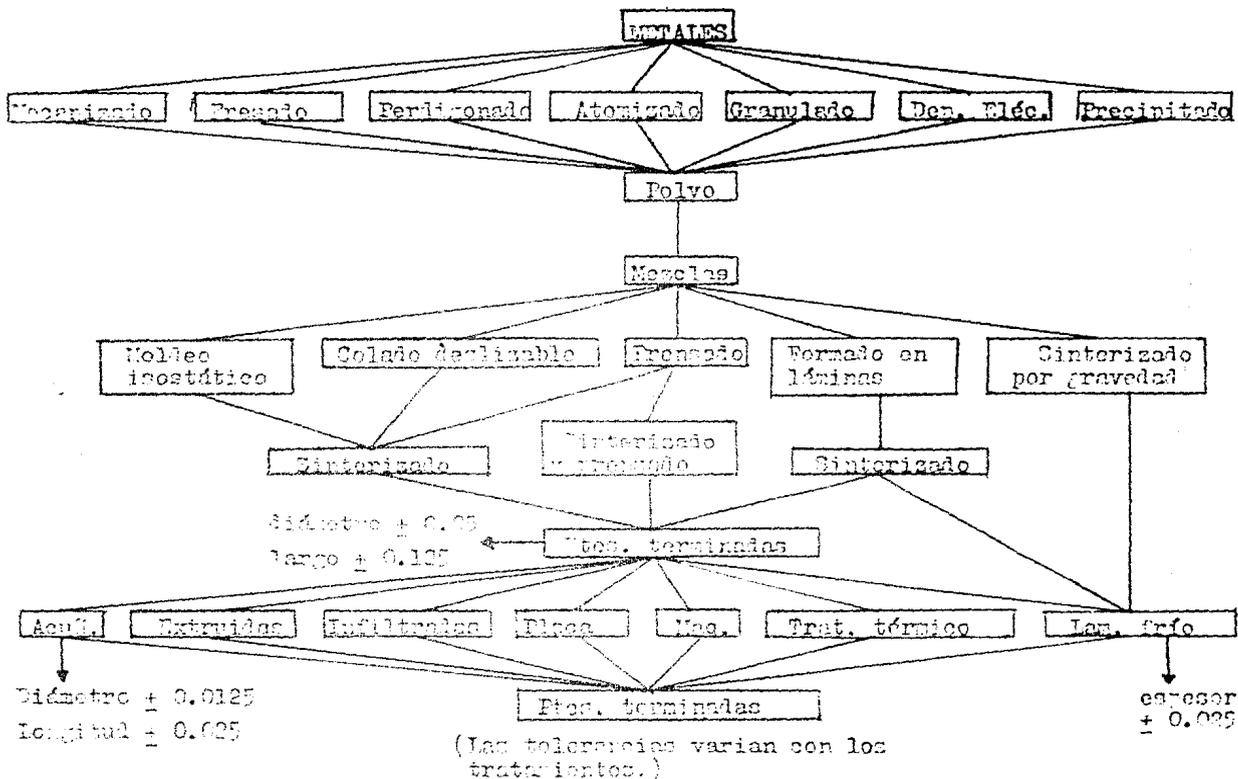


Fig.3.1 Diagrama de flujo en la fabricación de partes con polvos metálicos.
 Las tolerancias son para piezas uniformes, que no excedan de 50 mm. de diámetro o de longitud.

IV.- Aplicaciones de la metalurgia de polvos de metales no ferrosos.

La metalurgia de polvos en primera instancia fué una técnica desarrollada para solventar los problemas inherentes en el tratamiento convencional de los metales de alto punto de fusión. Su posterior desarrollo, sin embargo, dio pauta a su empleo como una técnica simple de amplia aplicación, a un sin número de materiales con propiedades muy particulares y finalmente, a la elaboración de productos de diversos metales comunes, cuyos requerimientos estructurales pueden ser satisfechos económicamente, de ésta manera.

Hoy en día hay un sin número de aplicaciones en lo que se refiere a los metales no ferrosos y principalmente a las aleaciones de cobre y aluminio. En la tabla 4.1 se muestran las principales aplicaciones y propiedades de las piezas por metalurgia de polvos. En dicha tabla se utilizan los siguientes símbolos:

ρ = densidad.

R.T. = resistencia a la tracción.

R.C. = resistencia a la fluencia en compresión.

R.F. = resistencia a la fluencia.

H = dureza.

Y = modulo de Young.

R.I. = resistencia al impacto.

E = elongación en 25.4 mm.

TABLA: 4.1. Propiedades y aplicaciones de partes no ferrosas por metalurgia de polvos.

Material y especificaciones	TIPO MP IF	Condición	ρ g/cc	R.T psi	R.C psi	H	γ 10^4 psi	R.I ft.lb	E %	Aplicaciones
ALEACIONES DE COBRE										
Bronce (90/10) 86.3-90.5 % Cu, 9.5-10.5 % Sn, 1.7 % Cmax. 1 % Fe max.	H	Sinterizado e impregnado de aceite.	5.8	8000	7000	-	-	-	1.0	Partes autolubrican tes ó cojinetes res- istentes a la Cor- rosión atmosférica. Filtros de diferen- tes tipos.
	R	Sinterizado e impregnado de aceite.	5.6	14000	11000	-	-	-	1.0	
	S	Sinterizado e impregnado de aceite.	7.0	18000	17500	-	-	-	2.5	
Latón 88-91% Cu, 8.3-12% Zn, 0-0.3% Fe.	T	Sinterizado	7.4	20000	9000	Rh57	-	-	13	Componentes mecáni- cas que requieren resistencia a la co- rrosión y aparien- cia agradable.
	U	Sinterizado	7.8	27000	10000	Rh70	-	-	10	
Latón (al plomo) 88-91%Cu, 1-2% Pb, resto Zn.	T	Sinterizado	7.4	18000	7000	Rh46	-	-	14	Calidad de maquina- do libre.
	U	Sinterizado	7.8	25500	8000	Rh60	-	-	20	
Latón (al plomo) 77-80% Cu, 1-2% Pb, 0.3 Fe max., 0.1% Sn max, res- to Zn.	T	Sinterizado	7.4	24000	12000	Rh55	12.0	10.0	13	Componentes mecáni- cas resistentes a la Corrosión atmos- férica, ferreteria para constructores, mecanismos caseros, piezas para cerro- jo, bombas domésti- cas, engranes y tuerca.
	U	Sinterizado	7.3	28000	14000	Rh68	13.0	15.0	19	
	U	Sinterizado	8.2	32000	16000	Rh75	14.0	21.0	23	

Continuación

Material y especificaciones.	Tipo MII E	Condición	ρ g/cc	R.T psi	R.C psi	H	Y 10 ⁴ psi	R.I ft.lb	E %	
Latón 68.5-71.5% Cu, 27.8-31.5% Zn, 0-0.3% Fe.	T	Sinterizado	7.4	31000	13000	Rh76	-	-	20	Componentes mecánicas que requieren resistencia a la Corrosión y de apariencia agradable.
	U	Sinterizado	7.8	37000	15000	Rh85	-	-	26	
Latón (al plomo) 68.5-71.5% Cu, 1.0-2.0% Pb, resto Zn.	T	Sinterizado	7.4	28000	11000	Rh65	-	-	22	Calidad de maquinado libre.
	U	Sinterizado	7.8	34000	13000	Rh76	-	-	27	
Plata alemana 62.5-65.0% Cu, 16.5-19.5% Ni, resto Zn.	U	Sinterizado	7.8	30000	16000	Rh75	14	10	10	Componentes mecánicos resistentes a la Corrosión, engranes, mordazas de cuña, palancas, componentes eléctricos y piezas para exposición marina.
	W	Sinterizado	8.2	37000	18000	Rh85	14	13	12	
Plata alemana (al plomo) 62.5-65.5% Cu, 16.5-19.5% Ni, 1.0-2.0% Pb, resto Zn.	U	Sinterizado	7.8	29000	16000	Rh75	13	9.0	10	Calidad de maquinado libre.
	W	Sinterizado	8.2	35000	17000	Rh85	14	12	12	

Continuación:

Material y especificaciones	Tratamiento	ρ g/cc	R.T psi	R.F psi	Dureza	E %	Aplicaciones
ALEACIONES DE ALUMINIO							
601AB (Alcoa) 0.25% Cu, 0.6% Si, 1.0% Mg, resto al 1202. 1.5% lub.	Sinterizado	2.55	21000	13700	Rh65-70	6.0	Similar a la aleación 6061 forjada, resistente a la corrosión y ductil.
	Tratado termicamente	2.55	30500	35000	Re 80-85	2.0	
2014B (Alcoa) 4.4% Cu, 0.3% Si, 0.5% Mg, resto Al 1202. 1.5% lub.	Sinterizado	2.64	30300	26200	Re 70-75	3.0	Similar a la aleación 2014 pero con manganeso. Buenas propiedades de resistencia.
	Tratado termicamente	2.64	42100	47500	Re 70-75	2.0	
2024B (Alcoa) 4.0% Cu, resto Al 1202. 1.5% lub.	Sinterizado	2.56	23200	10000	Rh 55-60	10	Buena ductilidad. Aleación propia para piezas conformadas en frío.
	Tratado termicamente	2.56	33000	21300	Re 45-50	7.3	
6024B (Alcoa) 0.4% Si, 0.6% Mg, resto Al 1202. 1.5% lub.	Sinterizado	2.55	19000	9000	Rh 55-60	9.0	Buena conductibilidad eléctrica (de 42 a 48.5% IACS, dependiendo del tratamiento), ductil y acabado fino.
	Tratado termicamente	2.55	27000	25000	Re 65-70	3.0	
601AC (Alcoa) 0.25% Cu, 0.6% Si, 1.0% Mg, resto Al 1202.	Sinterizado	2.55	19400	7700	-	10.7	Igual a 601AB con lubricante. Para compactación isostática.
	Tratado termicamente	2.55	39000	37900	-	2.0	

Continuación:

Material y especificaciones	Tratamiento	ρ g/cc	R.T psi	R.F psi	Dureza	E %	Aplicaciones
201AC (Alcoa) 4.4% Cu, 0.8% Si, 0.5% Mg, resto Al 1202.	Sinterizado	2.54	29700	21300	-	4.0	Igual a 201AB con lu bricante. Para compa tación isostática.
	Tratado térmi camente	2.64	55400	53500	-	2.0	
22 (Alcan) 2.0% Cu, 1.0% Mg, 0.3% Sn, res to Al	Sinterizado	2.53	24000	16000	Rh 83	5.0	Diene buenas propie dades mecánicas en piezas sinterizadas o tratadas térmicame te.
	Tratado térmi camente	2.53	38000	29000	Re 74	3.0	
24 (Alcan) (2 Cl4) 4.4% Cu, 0.5% Mg, 0.9% Si, 0.4% Mn, resto Al.	Sinterizado	2.54	24000	14000	Rh 80	5.0	Propiedades parecidas a la aleación 201A forjada. Buenas pro piedades mecánicas.
	Tratado térmi camente	2.54	35000	28000	Re 72	3.0	
67 (Alcan) 0.5% Cu, res to Al.	Sinterizado	2.52	15000	8000	Rh 60	12	Alta conductividad e léctrica (48% IACS) y ductilidad. Similar a la aleación 1100 forjada.
68 (Alcan) 0.6% Mg, 0.4% Sn, res to Al.	Sinterizado	2.52	17000	9000	Rh 64	9.0	Buen acabado superfi cial, alta ductili dad y conductividad (42% IACS). Similar a la aleación 6101 for jada.

Continuación:

Material y especificaciones.	Tratamiento	ρ g/cc	R.T psi	R.F psi	Dureza	E %	Aplicaciones
69 (Alcan) (60 61) 0.25% Cu, 1.0% Mg, 0.6% Si, 0.1% Cr, resto Al.	Sinterizado	2.50	18500	10000	Rh 66	1.0	Sus propiedades son similares a la aleación 6061, buena resistencia a la corrosión, alta ductilidad y conductividad (40% IACS).
	Tratada térmicamente	2.50	30000	28000	Re 71	2.0	
76 (Alcan) (70 75) 1.6% Cu, 2.5% Mg, 0.2% Zn, resto Al.	Sinterizado	2.51	30000	22000	Rh 90	3.0	Sus propiedades son similares a la aleación 7075, alta resistencia y dureza.
	Tratada térmicamente	2.51	45000	40000	Re 80	3.0	
91 (Alcan) 26.3 Tribaloy	Sinterizado	2.05	13500	-	-	2.0	Excelente en alambros para resistencia.
	Tratada térmicamente	2.05	15400	-	-	1.0	
4040 (Alcan) 1.0% Cu, 1.0% Zn, resto Al - 30 + 150 #/4090 (Alcan) 1.0% Cu, 1.0% Si, resto Al - 150 + 335 # 4160 (Alcan) 1.0% Cu, 1.0% Si, resto Al - 30 + 60 #	Sinterizado poroso	1.35	100	-	-	-	Piezas con alta porosidad para controlar contaminación, le, presión, sonido, reacciones catalíticas, etc.
	Sinterizado poroso	1.40	100	-	-	-	
	Sinterizado poroso	1.30	100	-	-	-	

Nota: La aleación 1202 de Al tiene la siguiente composición: 99.4 Al, 0.3 Al₂O₃, 0.15 Fe, 0.07 Si y el resto otras impurezas.

IV.A. Análisis del mercado nacional.

El objeto de este análisis de mercado es para presentar un panorama de la metalurgia de polvos no ferrosos en México.

De alguna manera es importante saber lo que ocurre en el ambiente metalúrgico nacional; la metalurgia tiene mucho futuro en sus distintas ramas (metalurgia física, metalurgia extractiva y procesos metalúrgicos): por tal razón debemos contribuir al desarrollo tecnológico de México, estudiando los nuevos procesos y encontrar las ventajas que estos proporcionan.

También se pretende motivar a las industrias productoras y consumidoras de este tipo de polvos, para que de alguna manera contribuyan al mejoramiento en el manejo de la información; dado que en la actualidad no existen estadísticas concretas en la producción y uso de polvos metálicos, así como la producción de piezas en sus diferentes tipos.

4.A.1) Mercado nacional de polvos metálicos.

La producción de polvo atomizado de aleaciones de cobre se encuentra distribuida en la siguiente manera: cobre atomizado 35 tn/mes, latón atomizado 2 tn/mes, bronce 90/10 (mezcla física entre cobre atomizado y estaño atomizado) 10 tn/mes, estaño atomizado 13 tn/mes.

Algunas industrias prefieren hacer su propia mezcla para bronce, por lo que consumen por separado el polvo de cobre y el polvo de estado; haciendo caso omiso a la mezcla de bronce existente en el mercado.

La mayor parte de polvo atomizado de aleaciones de cobre se utilizan para componentes mecánicas autolubrificantes, contactos y piezas para cerraduras.

La producción de polvo atomizado de aluminio es de 67 tn/mes y se encuentra en el mercado desde 20 a 325 mallas. Es utilizado como fundente para soldadura, catalizador, explosivos, impermeabilizante, recubrimientos, concretos aligerados y piezas de esmeril.

4.A.2) Mercado nacional de piezas a partir de polvos metálicos.

El crecimiento del mercado de piezas por metalurgia de polvos en México se estima entre el 17% y el 18% anual.

La distribución del mercado nacional de piezas viene dado de la siguiente manera:

partes metálicas para línea blanca.....	50%
refacciones para línea blanca.....	10%
partes metálicas para automóvil.....	15%
refacciones.....	25%

Dentro de las diferentes formas y tamaños de piezas que se fabrican en México, las podemos observar en la figura 4.1.

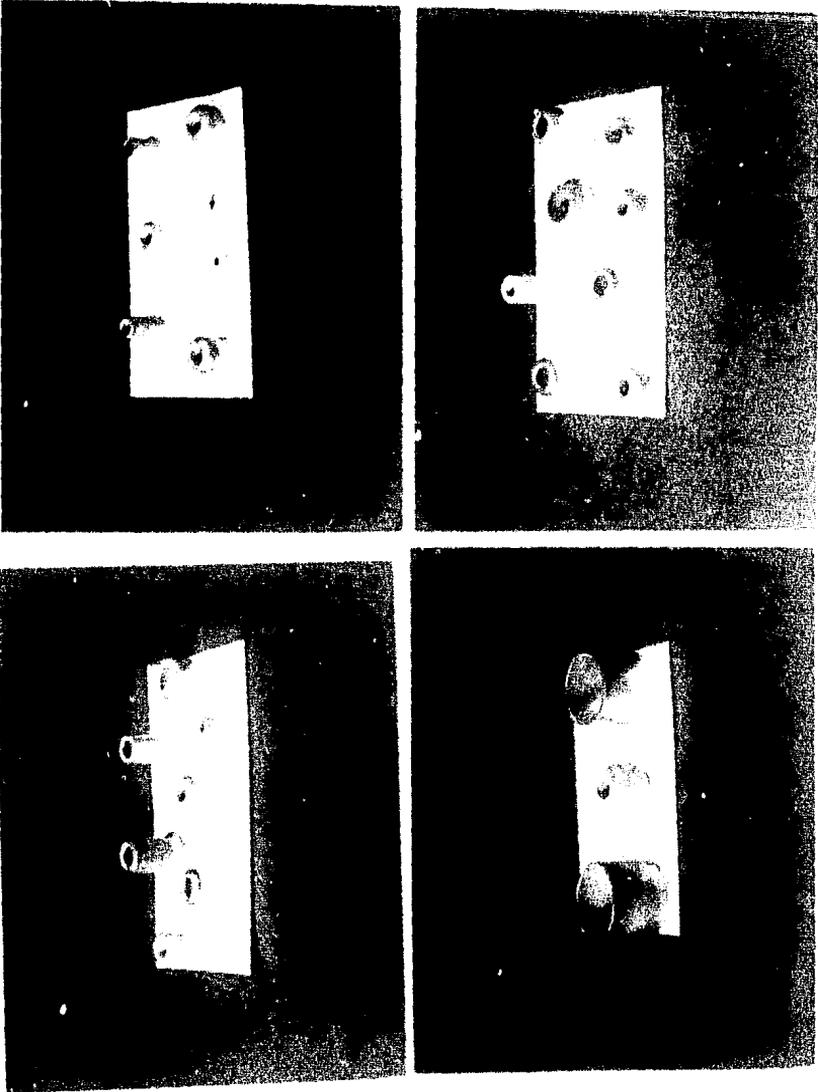


Fig. 4.1. Piezas de bronce de fabricación nacional.

V.- ASPECTOS FUNDAMENTALES DE LA COMPACTACION.

La compactación es la técnica mediante la cual se somete una masa de polvo a una presión determinada, dentro de un molde que contendrá la forma final de la pieza y que tendrá la resistencia suficiente para la manipulación en los pasos subsiguientes.

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

- | | | | |
|------------------------------------|--|--|--|
| Métodos aplicando presión. | $\left\{ \begin{array}{l} 1.- \text{ prensado unidireccional.} \\ 2.- \text{ prensado isostático.} \\ 3.- \text{ prensado explosivo.} \\ 4.- \text{ prensado para rolado, forja y extrusión.} \end{array} \right.$ | $\left\{ \begin{array}{l} a) \text{ prensado de acción simple.} \\ b) \text{ prensado de doble acción.} \end{array} \right.$ | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |
| Métodos sin aplicación de presión. | $\left\{ \begin{array}{l} 1.- \text{ compactado vibracional.} \\ 2.- \text{ sinterizado en moldes con polvo suelto.} \end{array} \right.$ | | |
| | | | |

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, las cuales pueden surgir ya sea por difusión, entrelazamiento de partículas o adhesión. Si bien estas teorías se

han separado para su estudio, se puede considerar que en los procesos se involucran todas.

Entrelazamiento de partículas.- Se consideran partículas de superficie rugosa y forma irregular, como caso ideal, sometidas a una presión y confinadas dentro de un molde. Bajo esta fuerza externa las partículas se deslizan entre 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.

Unión por fricción.- Al aplicar un esfuerzo mecánico a una masa de polvo dentro de un molde, se generan fuerzas de fricción provocadas por el deslizamiento entre los diferentes materiales que se involucran en el proceso; estas fricciones provocan la fusión del borde de grano y en estas zonas calientes las partículas se adhieren.

Adhesión.- Cuando las partículas se acercan a una distancia menor de 50 nanómetros una de otra, ocurre adhesión debido a la captura de valencias de superficie libres y fuerzas electrostáticas de Van der Waals. Este efecto es más notorio en partículas que se encuentran 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 estas fuerzas.

a) Etapas de compactación.

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

1^a) 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 ó bóvedas.

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.

b) Fuerzas de fricción durante la compactación.

El caracter 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 fuerzas 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 $3/4$ partes de la presión aplicada. Estos factores son:

- Coeficiente 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.

Para reducir las fuerzas de fricción se usan lubricantes que se añaden del 0.5 a 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. También se puede lubricar la superficie de los punzones y matriz, y el efecto es más notorio. Estos lubricantes suelen ser compuestos orgánicos que se queman en las etapas primarias del sinterizado y se condensan en las partes frías

del horno. Sin embargo, los lubricantes penetran parcialmente en la masa del polvo y producen residuos carbonosos, gases contaminantes, compuestos oxidados que afectan las propiedades químicas, físicas y mecánicas del compacto.

5.1.- Diseño y materiales para matrices de compactación.

Para lograr dimensiones finales adecuadas es necesario tomar en cuenta el diseño de las cavidades que conforman las matrices, así como los materiales de los que se fabrican. Un dado de prensado en frío debe construirse con un acero de herramienta endurecido en aceite y del tipo no deformable.

En el diseño se debe considerar un espacio libre entre el punzón y la pared del molde, el cual debe ser lo suficiente reducido para evitar la expulsión del polvo, pero debe permitir el escape del aire al comprimir. Estos espacios son generalmente de 0.05 mm. y varía en función del diámetro del pistón; los dados con diámetros mayores trabajan mejor con claros más grandes. Todas las superficies en contacto con el polvo deben estar pulidas a espejo con objeto de reducir el frotamiento de las partículas con las paredes.

Las tolerancias más aceptadas para objetos producidos mediante metalurgia de polvos después de sinterizado se limitan a 0.25% por pulgada de longitud en dirección perpendicular, y de 0.3 a 0.5% en dirección paralela a la dirección de prensado.

Estas tolerancias son fáciles de alcanzar gracias al equipo y técnicas desarrolladas a lo largo de la experien-

cia aplicada en este campo. Y es por estas razones que las técnicas aplicadas a la metalurgia de polvos justifica el aparente mayor costo de producción. Además es importante hacer notar que las operaciones de maquinado se reducen o eliminan completamente y no se requiere de técnicos especializados para la operación del equipo. Aunque sí, un ingeniero en el diseño y selección de materiales y formas.

5.2) Influencia de las características del polvo durante la compactación.

La resistencia de los compactos en verde resulta principalmente de la unión de las irregularidades sobre las superficies de las partículas. Para partículas con superficie específica grande, es decir pequeñas o de superficie rugosa se obtiene buena compactabilidad, sin embargo en el primer caso aumentan las fuerzas de fricción y en 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. El efecto en fluidez es similar. Aunque en algunos casos los compactos se expanden durante el sinterizado; tal comportamiento se ha atribuido normalmente a la expansión del aire atrapado durante la operación de prensado ó a otros gases que

se forma durante la sinterización. Se hace notar que ni las partículas más pequeñas pueden ocupar todo el espacio disponible y dependiendo de la fluidez del polvo estos pueden acomodarse en forma uniforme o no fluir creando bóvedas y puentes origen de las porosidades.

La densidad aparente y la fluidez de un polvo es en orden decreciente según su forma, para a) partículas esféricas, b) partículas redondeadas, c) irregulares y d) dendríticas. Esto se debe a que las fuerzas de fricción son menores en partículas esféricas. Las partículas pequeñas fluyen más rápido que las grandes hasta una medida en la cual por fuerzas electrostáticas no fluyen.

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 las características de un polvo en la transmisión de presión, considerando su dureza, 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 mejor prensabilidad.

La compactabilidad de una masa de polvo depende fuertemente de la plasticidad de las partículas, la cual va aumentando a medida que la aplicación de presión aumenta. Bajo la acción de un esfuerzo, las partículas se deforman y ocurre

un endurecimiento, además de la creación de tensiones en el volumen total impidiendo la densificación.

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

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 pero los puntos de contacto son menores, lo cual influye al momento de sintetizar, 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.

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

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 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 tiende a dilatarse, mientras que el resto aún está retenido dentro del molde; por esta razón en el

transcurso de la expulsión se producen grietas. Por esto se recomienda sacar el compacto en un solo paso. Existe un proceso secundario de densificación que consiste en prensar dos veces el compacto, que puede ser con aplicación subsiguiente de presión ó reprensado después de sinterizar. En esto se deberán tomar en cuenta las dilataciones y concentraciones del material en todas las etapas anteriores.

a) Porosidad durante la compactación.

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 estos procesos 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 controlar, 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. De estudios empíricos se sabe que la formación de las porosidades dependen fuertemente de los procesos de fabricación del polvo de los cuales resulta el tamaño y forma de las partículas; por consiguiente podemos distinguir dos tipos de poros, aquellos que están interconectados mediante canales llamados poros abiertos y aquellos que están encerrados en el interior de un material llamados cerrados.

VI.- ASPECTOS FUNDAMENTALES DEL SINTERIZADO.

A pesar de que se han realizado numerosas investigaciones sobre el mecanismo de sinterizado se debe admitir que su conocimiento no está entendido completamente hasta ahora.

El sinterizado es un proceso que reduce el área superficial de las partículas de polvo y la fuerza promotora en este caso se realiza a partir del exceso en energía libre de la superficie del polvo sobre la del material sólido. El problema fundamental del sinterizado es explicar por cuales mecanismos ocurre esta reducción en energía.

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

Se entiende por sinterizado al tratamiento térmico de un sistema de partículas individuales o de un cuerpo poroso con o sin aplicación de presión externa en donde algunas o todas las propiedades del sistema cambian con la reducción de la energía libre en la dirección del sistema libre de poros o compacto.

6.1) Consideraciones termodinámicas.

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 todos los mecanismos de transporte concernientes al sinterizado; el exceso de energía libre existe en el compacto en forma de energía superficial de todas las interfases, ambas con la atmósfera y entre los granos individuales (energía en borde de grano) y como una energía de red 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 o diferencia entre la energía superficial con la geoméricamente dependiente energía de red es muy pequeña, aun con los polvos muy finos; mientras la energía superficial alcanza solo 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 estén animados de 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, tiene lugar fenómenos de aleación

al propio tiempo que se produce la unión de las partículas.

6.2) Etapas del sinterizado.

En el proceso de sinterizado de compactos se distinguen tres etapas, que son:

1) Etapa de crecimiento de coeclio. En este paso, las partículas de polvo permanecen como individuales. 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 entre partículas sobre el plano de contacto.

2) Etapa de la densificación y crecimiento de grano; que tiene lugar cuando la relación r_n/r (figura 6.1, a) sobrepasa un determinado valor, 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.

6.3) Mecanismos de la sinterización.

Los posibles mecanismos de la sinterización podemos esquematizarlos de la forma siguiente:

Sin transferencia de materia: -

Por adherencia.

Con transferencia de materia

{ 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.

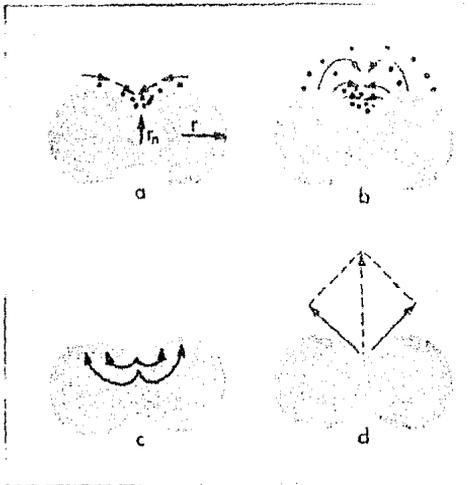


Fig. 6.1 - Mecanismos de la sinterización. Etapa de los poros interconectados.

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) Fluencia. Deformación a lo largo del puente de enlace como resultado de la tensión superficial.

El mecanismo de la adherencia tiene lugar al poner en contacto dos partículas bajo presión, lo cual ocurre en la compactación. Se trata de un enlace débil.

La difusión superficial es un mecanismo de sinterización que ocurre cuando el compactado alcanza temperaturas del orden de $0.3 T_p$. 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 6.2) de dos partículas de polvo que están sinterizándose. El resultado de este mecanismo es un aumento en

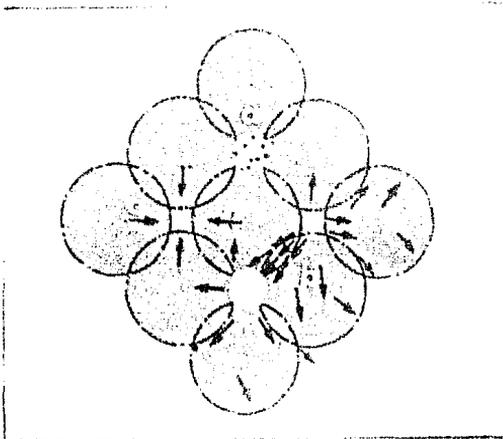


Fig. 6.2. Mecanismos de la sinterización. Etapa de los poros aislados.

- a) Difusión superficial y evaporación-condensación. Ocurren simultáneamente. Los polvos 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) Fluencia. Los poros se reducen por el peso del metal vecino.

el 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 o menos convexa. Por esta razón se produce una disminución de las superficies convexas y un aumento en las cóncavas. No existe en este mecanismo acercamiento de los centros de las partículas.

Cuando la temperatura de sinterización es la mitad de la temperatura de fusión de los polvos, el mecanismo que adquiere mayor relevancia es la difusión a través de la red. Esta difusión es posible por las imperfecciones térmicas (vacancias y dislocaciones) existentes en los polvos metálicos o generadas en las etapas de mezcla, compactación y sinterización. Las trayectorias de la difusión de vacancias van desde zonas de máxima concentración de defectos a las zonas donde hay menor concentración, es decir, de las fuentes de vacancias a los sumideros. De la tabla 6.1. En la figura 6.3 están representadas las trayectorias de las vacancias en la

sinterización de dos partículas esféricas.

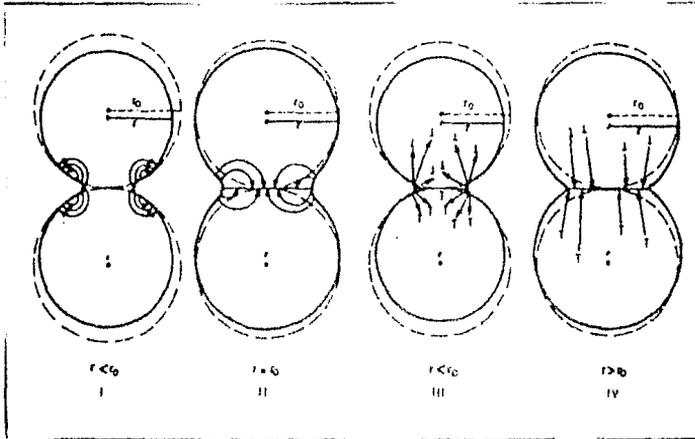


Fig. 6.3. Probables trayectorias de difusión a través de las vacancias de la red en el experimento de modelos esféricos.

La difusión de vacancias aumenta el espesor del puente de enlace y redondean los poros. Este último efecto se explica por el tránsito de vacancias que existen entre los vértices y los centros de los lados del triángulo curvilíneo representado por tres esferas cuyo esquema aparece en la figura 6.4.

Tabla 6.1 Dirección y efecto del desplazamiento de vacancias en la difusión de volumen.

FUENTE	SUMIDERO	EFFECTO
Superficie puente enlace	superficie partícula	crece rn
identico	límite de grano	id. y disminuye d
identico	dislocación	crece rn
dislocación	límite de grano	id. y disminuye d

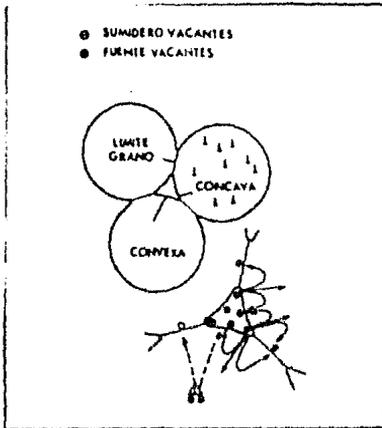


Fig. 6.4 Esquema del mecanismo de la difusión de volumen en torno a un poro

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

$$J = -DA \frac{dc}{dx}$$

donde J es el flujo del metal, D el coeficiente de difusión, A la superficie donde tiene lugar el flujo y dc/dx el gradiente de concentración.

El coeficiente de difusión depende de la temperatura según la fórmula de Arrhenius:

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

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

La difusión es más rápida a lo largo de los límites de grano que en el interior de los cristales y más lenta en dichos límites que en las superficies libres, pero el área de

límite de grano es, en un metal, inversamente proporcional al tamaño del grano y muy superior al área de superficie. Además, los límites de grano forman una red que pasa a través de todo el metal, favoreciendo la homogeneidad cuando la difusión tiene lugar a través de los límites de grano.

La fluencia es la deformación plástica que experimenta con el tiempo un metal sometido a un esfuerzo y a una temperatura constante. La difusión de lugares vacantes produce fluencia si se lleva el material desde los límites de grano que están sometidos a un esfuerzo de tracción. La velocidad de deformación de este mecanismo es inversamente proporcional al cuadrado del diámetro del grano.

El deslizamiento de dos granos en contacto, a modo de cizallamiento, es un mecanismo de transferencia de materia, motivado por un esfuerzo, que tiene importancia a altas temperaturas. La existencia de este mecanismo se pone de manifiesto grabando una regilla ó red de líneas sobre la superficie de una probeta; pulida y atacada, donde exista un límite de grano se somete a un esfuerzo, a temperatura constante, y se aprecia que las líneas de la regilla se cizallan donde cruzan a los límites de grano.

La recristalización es el fenómeno que se produce al ca lentar un metal deformado. Consiste en eliminar la mayoría de los defectos reticulares introducidos, a base de formar, una nueva red cristalina con mucho menos defectos a partir de la red con acritud.

6.4) Factores que influyen en el sinterizado.

- A. Propiedades dependientes de la temperatura (incluyendo estructura y estado de mezcla).
- Superficie libre y energía interfacial, incluyendo las superficies de poro.
 - Coeficientes de difusión (red, bordes de grano, superficies).
 - Coeficientes de viscosidad (con sustancias amorfas).
 - Tensión cortante crítica (combinada con la acción de flujo plástico).
 - Presión del vapor y velocidad de vaporización (combinada con la acción de vaporización y condensación).
 - Estructura cristalina y estado de mezcla.
- B. Propiedades de polvo, pre-tratamiento, y condiciones de sinterizado.
- Área efectiva integral de contacto.
 - Actividad superficial (estructura real superficial).
 - Actividad de red (trabajado en frío, esfuerzos de tensión y compresión, defectos de red gobernada por condiciones de manufactura, tamaño del cristal).
- C. Constituyentes exteriores (incluyendo los introducidos por las condiciones de sinterizado).
- Soluble (homogénea o heterogéneamente).
 - Insoluble.
 - Como capas superficiales (ejemplo: película de óxido, solubles o insolubles, reducidas y no reducidas, disociadas y no disociadas bajo condiciones de sinterizado).

- Gases (absorbidos, ocluidos, y disueltos, y efectos de la atmósfera de sinterizado).

6.5) Porosidad durante sinterizado.

Esta es la etapa más importante del proceso, ya que de ésta 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. De los modelos establecidos anteriormente se concluye que la densificación ocurre cuando las vacancias que llegan a los límites de grano se acumulan, colapsan y se reemplazan por planos de átomos. La difusión de vacancias hacia las regiones intergranulares se promueve por el gradiente de concentración de vacancias, debido a que existe una alta densidad de estas en la red cristalina alrededor del poro cerrado.

Cuando se usan tiempos cortos de sinterizado en materiales de partículas pequeñas resultan cristales de menor tamaño que los formados por partículas mayores, pero para tiempos de sinterizado largos la esferoidización de poros pequeños en los materiales de partículas finas se realiza más rápido y la efectividad de los poros en llegar al límite de grano disminuye, provocando un crecimiento excesivo de los poros.

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 o microporosas como las producidas por reducción de óxidos y variedades electro-líticas recocidas, las cuales sinterizan con mayores densidades que las formas redondeadas y angulares fabricadas por los procesos de atomización y fragmentación mecánica.

VII.- EXPERIMENTACION.

rara encontrar las condiciones optimas de sinterizado en probetas obtenidas por metalurgia de polvos, primeramente se partió de una revisión bibliográfica por si se encontraba algún trabajo ya escrito.

De esta búsqueda se obtuvo el criterio de cual sería la forma más adecuada para obtener muestras de laboratorio que serían utilizadas en el estudio; además del equipo y las condiciones de que se partiría. Tomando como base el análisis, se determinó que las piezas o probetas a obtener serían cilíndricas, dado que es más fácil su obtención y manipulación a nivel laboratorío.

Las dimensiones de las probetas fueron obtenidas tomando en cuenta los siguientes parametros: Capacidad de la prensa hidráulica y la forma de prensado.

Capacidad de la prensa hidráulica.- La capacidad de la prensa viene dada en toneladas generalmente y la literatura reporta para muchos polvos, las condiciones de prensado que son recomendables; las unidades reportadas en la literatura para muchos polvos son toneladas por pulgada cuadrada. De aquí que si sabemos cual es la capacidad de la prensa con la que se cuenta y las condiciones de prensado del polvo, entonces obtenemos el área; de esta forma las dimensiones máximas para trabajar.

Forma de prensado.- Dentro de las formas diferentes de prensado para piezas, tenemos el prensado unidireccional de acción simple. En este caso todo permanece estacionario,

siendo el punzón superior el que realiza la compresión del polvo; se emplea para piezas con una relación A/D < 0.5 y en la práctica espesores menores de 6.3 mm clasificado como piezas de clase I (2).

Una vez que se obtuvo la información necesaria se procedió al diseño de la matriz para compactar y así obtener las probetas requeridas. De la misma forma se diseñó la pequeña cámara de sinterizado; esto fue en función del tamaño de las probetas y el tamaño del horno disponible.

Los datos obtenidos de la literatura que se utilizarán como referencia en el estudio experimental, están enlistados en la siguiente tabla:

Polvo	presión para compactar (Tn/in ²)	relación de compresión (polvo/pieza)	Temperatura, sinterizado (°C)	tiempo, sinterizado (min.)
Cobre	25-30	2.0 a 3.0 : 1	843-899	12-45
Bronce	15-20	2.5 a 2.7 : 1	760-871	10-12
Latón	30-50	2.4 a 2.6 : 1	843-900	10-45
Aluminio	5-20	1.5 a 1.9 : 1	590-621	15-30

La relación de compresión es importante tomarla en cuenta; por medio de ella se puede saber la cantidad de polvo a utilizar y las dimensiones de la matriz para que el polvo no se derrame.

La relación de compresión nos indica el volumen que ocupa una cantidad de polvo en relación al volumen final de la pieza compacta.

7.1) Descripción general de polvo a utilizar.

Los polvos utilizados para la obtención de las muestras experimentales son de calidad comercial. Industrialmente son utilizados por diferentes empresas, para usos variados; solo que el interes primordial es el sinterizado de piezas y esto lo hacen empresas contadas.

La cantidad de polvo utilizado en los diferentes materiales, fue proporcionada gratuitamente por las empresas productoras de polvos. En la siguiente tabla se muestra el tipo de polvo y la empresa productora que proporcionó la materia prima.

Polvo	Empresa productora
Cobre	Estaño Electro, S.A y Polvos Metálicos Mexicanos, S.A.
Estaño	Estaño Electro, S.A
Bronce	Polvos Metálicos Mexicanos, S.A.
Latón	Estaño Electro, S.A.
Aluminio	Alcan Aluminio, S.A (División alpaste).

Estas empresas también producen otros tipos de polvo; de diferente forma de partícula y granulometría.

En las figuras 7.1 a 7.5 se muestra la forma de la partícula y especificaciones de los diferentes polvos utilizados en el estudio experimental.

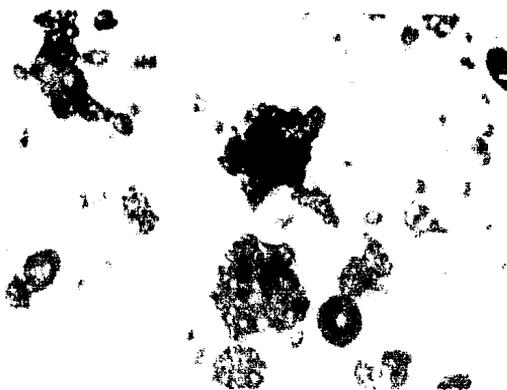


Fig. 7.1 polvo de cobre atomizado. dentro de la forma irregular de la partícula también encontramos formas esféricas y redondeadas. 150X.

POLVO DE COBRE ATOMIZADO

(Estado Electro, S.A)

Análisis granulométrico:

	+ 150 #	.....	3%
- 150	+ 200 #	.....	11%
- 200	+ 325 #	.....	41.7%
	- 325 #	.....	43.8%

densidad aparente = 3.0 g/cc Fluidez = 28 segundos

Análisis aproximado: 99.5% Cu, 0.06% Fe, 0.01% Pb y 0.03%
otros.

Resistencia en verde = 850 g

perdida de Hidrógeno = 0.15%

(se hace pasar hidrógeno a una muestra de polvo para determinar el grado de oxidación)

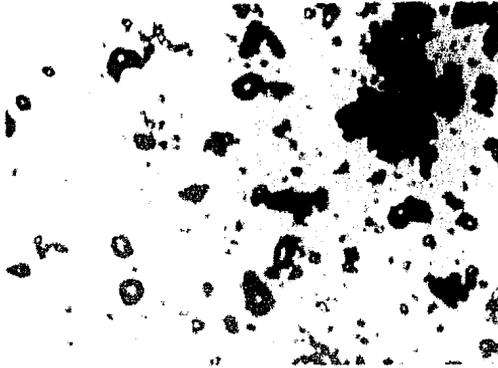


Fig. 7.2 Polvo atomizado de estaño. Dado su bajo punto de fusión podemos obtener partículas más redondeadas y esféricas, como se puede observar. 150X.

POLVO ATOMIZADO DE ESTAÑO
(Estaño Electro, S.A)

Análisis granulométrico:

	+ 200#	.....	0.03%
- 200	+ 325#	.....	3.5%
	- 324#	.....	96.1%

densidad aparente = 3.9 g/cc

Análisis aproximado: 99.7% Sn, 0.06% Sb, 0.05% Fe, 0.04% Pb,
0.03% Cu, 0.08% otros.

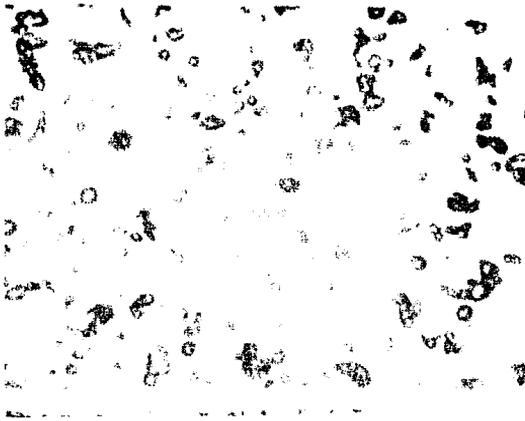


Fig. 7.3 Polvo atomizado de latón. Se puede observar la forma redondeada y esférica de la partícula, característica de un polvo atomizado con gns. 1500.

FOLVO ATOMIZADO DE LATÓN

(Estano Electro, S.A)

Análisis granulométrico:

	+ 100 #	.....	0.06%
- 100	+ 150 #	.....	10.90%
- 150	+ 200 #	.....	27.50%
- 200	+ 325 #	.....	37.30%
	- 325 #	.....	24.10%

Densidad aparente = 3.59 g/cc

Fluidez = 40 segundos.

Análisis: 79.8-80.5 Cu, 17.5-18.5 Zn y 1.2-1.6 Pb.



Fig. 7.4 Polvo de bronce. Mezcla física entre polvo atomizado de cobre, polvo atomizado de estaño y lubricante. Aquí se puede observar la forma irregular del cobre y la forma esférica del estaño. 150X.

POLVOS DE BRONCE

(Polvos Metalicos Mexicanos, S.A.)

Análisis granulométrico:

	+ 150#	.....	5.5%
- 150	+ 200#	.....	19.5%
-200	+ 325#	.....	32.0%
	- 325#	.....	43.0%

Densidad aparente = 3.15 g/cc

Fluidez = 15 segundos

lubricante = 0.5%

Clave: BR-1MX/ 90/10.



Fig. 7.5 Polvo atomizado de aluminio. La partícula en la ma yoría de la muestra esta en forma de gota y aquí lo podemos observar. Esto puede ser por la forma pastosa que presenta el aluminio al solidificarse y así se deforma la partícula esférica. 150X.

FOLVO ATOMIZADO DE ALUMINIO
(Alcan Aluminio, S.A ; División Alpaste)

Análisis granulométrico:

de - 150 a - 325 #	.....	100%
fondo	.....	70%

Clave: Polvo de aluminio atomizado SA-23.

7.2) Mezclado del polvo.

El mezclado de polvo se hace antes del prensado, para asegurar uniformidad en el compactado, las condiciones de mezclado deben ser tales que permitan la obtención de características deseadas sin detrimento de otras, como son la densidad aparente y la fluidez.

En esta etapa es donde se agrega lubricante al polvo, - en una proporción tal que aumente la fluidez principalmente. Es muy importante a nivel industrial tener una fluidez alta, pues de ello depende la velocidad en producción de piezas; la fluidez es la rapidez de alimentación del polvo y el llenado del molde es fundamental.

Normalmente la cantidad de lubricante varia entre 0.5% a 1.5%.

La cantidad de lubricante utilizado en el estudio experimental fue de 0.75% para todos los casos y el tipo de lubricante fue el estearato de zinc; generalmente es lo más recomendado.

Dado que la cantidad de polvo a utilizar era pequeña, - el mezclado fue manual. Se pesaron por separado 100 gramos de polvo y 0.75 gramos de lubricante, para cada uno se mezclo en un frasco de vidrio tapado herméticamente; la agitación fue continua durante 10 minutos.

Para el pronco como ya contenia 0.5% de lubricante, solo se agrego 0.25 gramos.

En la figura 7.6 se muestran diversas cantidades de polvos ya mezclado dispuestos para compactar.

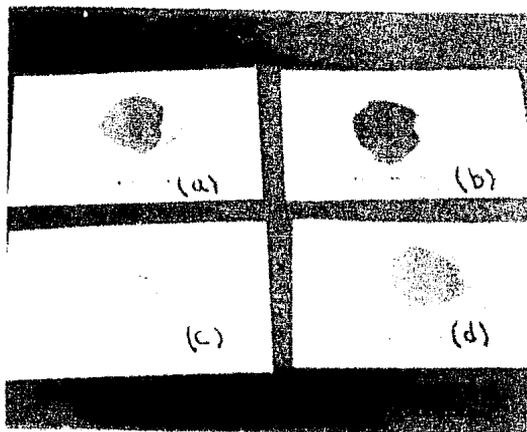


Fig. 7.6 Aquí se muestra una cantidad de los diferentes polvos ya mezclados con lubricante. (a) polvo de bronce, (b) polvo de latón, (c) polvo de aluminio y (d) polvo de cobre.

7.3) Compactación.

La compactación se realizó en una prensa hidráulica E. ENERPAC, con un avance del émbolo de 21 cm y un diámetro del mismo de 5 cm. La capacidad máxima de la prensa es de 25 toneladas, aunque como no estaba debidamente purgada y con el aceite adecuado, solo llegaba a 5 toneladas. Por lo que se tuvo que recurrir a otra prensa fuera de la universidad, cuya capacidad máxima era de 20 toneladas.

La compactación de polvos de bronce y aluminio se hicieron en la primer prensa, ya que se requerían de 5 toneladas como máximo, y los polvos de cobre y latón se compactaron en

la segunda prensa ya que se requerían de 12 toneladas como máximo.

a) Diseño de la matriz.

El dado para la compactación de polvos se fabrico de acero indeformable grado herramienta, el cual se incrusto en un anillo de acero comercial, como se muestra en la figura 7.7. El acero de grado herramienta fue templado alcanzando una dureza máxima de 58 Rc.



Fig. 7.7 Sistema de compactación.

En el dibujo de la figura 7.8 se muestra como fue diseñado el sistema de compactación, tomando como base el ASTM B312-76 (en este estandar nos muestra un sistema de compactación, cuyas probetas obtenidas son utilizadas para determinar la resistencia en verde de polvos metálicos).

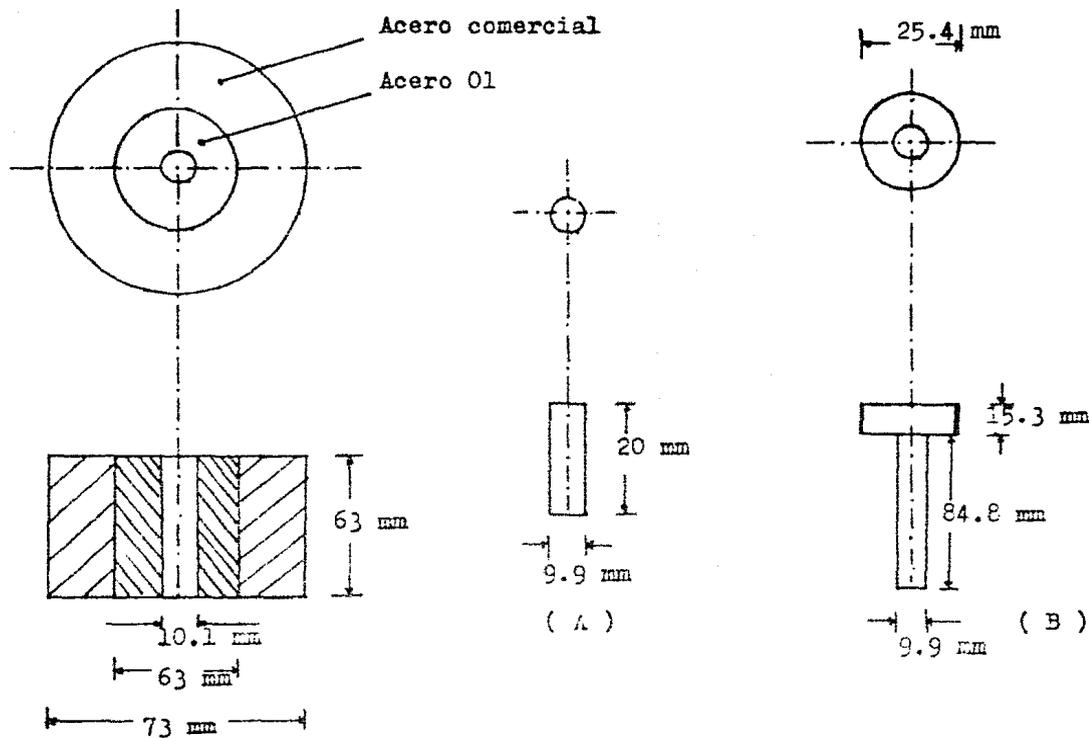


Fig. 7.8. Sistema de Compactación; Las Partes A y B son de Acero 01.

b) Condiciones experimentales.

Las condiciones experimentales que se utilizarón para compactar los diferentes polvos, fuerón en base a los datos teóricos que reporta la literatura. En estos se indican intervalos de presión, así como de relación de compresión.

Se optó por trabajar a 3 diferentes presiones, cubriendo el intervalo ya reportado; para de esta forma encontrar la presión más adecuada de compactación. La presión optima sera aquella que al final de las pruebas arroje mejores resultados, tanto en densidad como en dureza.

En la figura 7.9, se muestra un dibujo del tipo de prensa hidráulica que se utilizó para compactar los diferentes polvos.

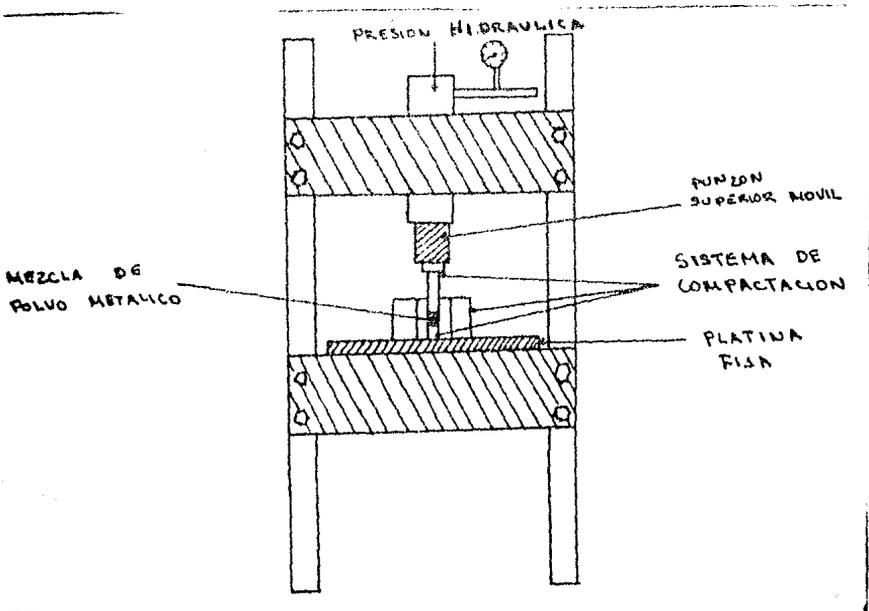


Fig. 7.9 Prensa hidráulica.

La relación de compresión que se utilizó fue la máxima que aparece reportada en la literatura. Esto fué utilizando el criterio de obtener una pequeña probeta cilíndrica de 10 milímetros de diámetro y 5 milímetros de espesor aproximadamente; haciendo los calculos necesarios se puede obtener la cantidad de polvo que se requiere. De aquí se obtuvo el peso aproximado de cada muestra y fué como sigue:

Bronce:	3.36 g,	27 muestras
Cobre:	3.60 g,	27 muestras
Latón:	3.67 g,	27 muestras
Aluminio:	1.50 g,	27 muestras

En los resultados finales se muestran las tablas de como fueron distribuidas estas muestras, así como sus propiedades. Primeramente se trato un polvo hasta obtener las probetas necesarias para el estudio y así uno a uno sucesivamente.

En la figura 7.10 se muestran, el sistema de compactación y algunas muestras obtenidas.

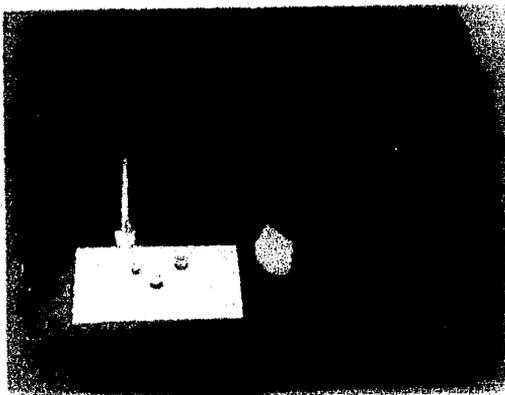


Fig. 7.10 Sistema de compactación y muestras obtenidas. Se puede observar el tamaño de las probetas.

7.4) Cálculo de la densidad en verde.

La densidad en verde es aquella que presenta el compacto después del prensado.

Para el cálculo de esta densidad se utilizó la fórmula siguiente. Esta fórmula solo es válida para probetas cilíndricas.

$$\rho = 1273 \left(\frac{M}{d^2 \times h} \right) \dots\dots\dots (1)$$

Donde:

ρ = densidad en verde (g/cc)

M = masa del compacto en gramos.

d = diámetro del compacto en milímetros

h = altura del compacto en milímetros

7.5) Sinterizado.

El sinterizado se realizó en un horno de resistencia, cuyas dimensiones son: 30 cm de diámetro y 34 cm de altura; la máxima temperatura alcanzada es de 1200°C. La atmósfera que se utilizó fue nitrógeno.

Dentro del proceso de sinterizado es importante controlar la temperatura, y resulta un poco difícil dado el sistema que se utiliza para este fin.

En el estudio experimental resulta que se tienen diferentes temperaturas en el sistema; una temperatura registrada con un termopar proveniente del horno y la otra es la registrada dentro de la cámara, donde se lleva a cabo la sinterización.

Dentro de la cámara esta circulando gas nitrógeno a temperatura ambiente y se encuentra cerrada; por lo que el gradiente de temperatura es diferente al registrado fuera de la cámara.

Para mantener la temperatura lo más estable posible cada termopar debería enviar una señal a un galvanometro, el cual nos serviría como instrumento de control. Como no se disponía de dos aparatos para controlar la temperatura, entonces lo que se hizo fue calibrar al sistema de sinterizado.

A diferentes temperaturas registradas provenientes del horno, se determinó la temperatura dentro de la cámara; para esto se introdujo un termopar a la cámara y con un milivoltímetro se midió la diferencia de potencial, proporcionada por el termopar; y con la ayuda de tablas se determinó la temperatura. De estos ensayos resultó que la temperatura dentro de la cámara era 50°C arriba de la registrada en el horno y la precisión de la lectura que proporcionó el horno fue de $\pm 10^{\circ}\text{C}$.

a) Descripción del equipo utilizado.

En las figuras 7.11 a la 7.14 se muestra el equipo utilizado durante el proceso de sinterizado. La pequeña cámara donde se sinterizaron las muestras fue construida de acero inoxidable, en la figura 7.14 se describe como se diseñó la cámara de sinterizado; a partir de un recipiente cilíndrico.



Fig. 7.11 Horno y cámara de sinterizado.



Fig. 7.12 Aquí se observa la conexión del horno con el instrumento de control de la temperatura.



Fig. 7.13 Conexión general del sistema de sinterizado durante el transcurso del trabajo.

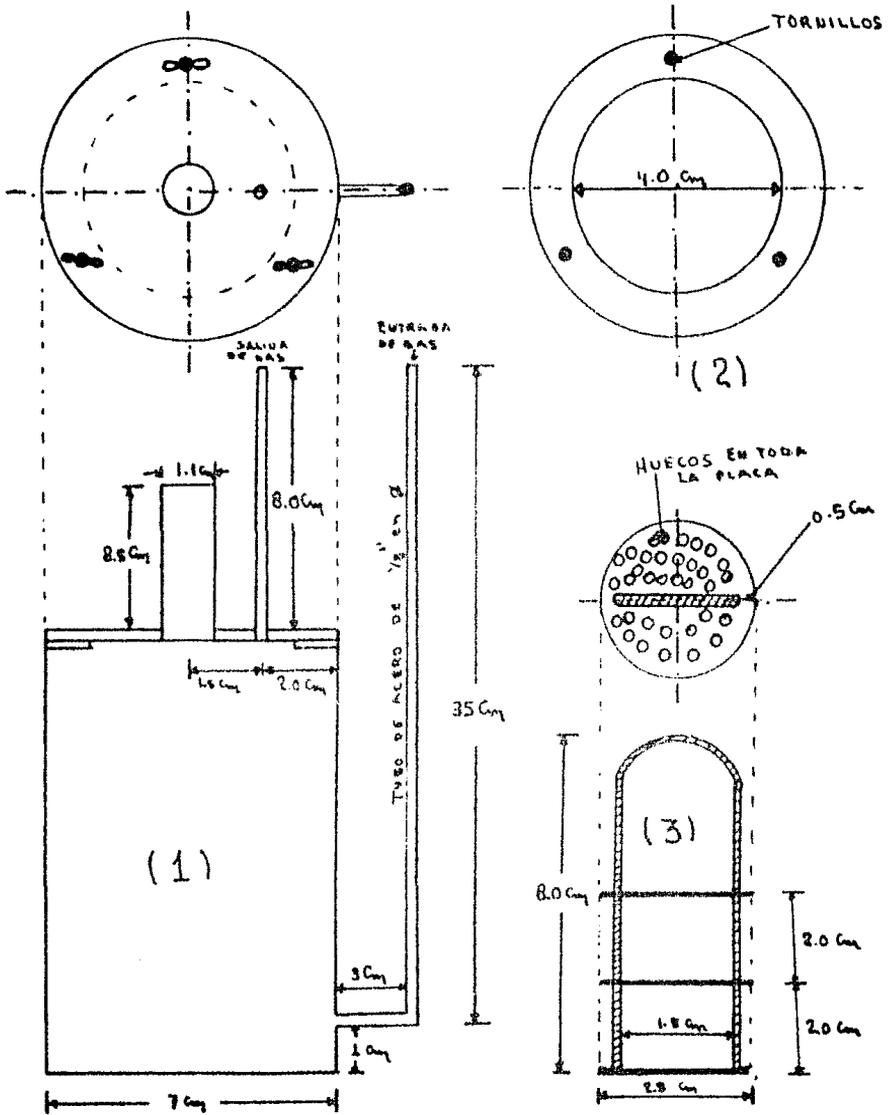


Fig. 7.14- Cámara de acero inoxidable utilizada en el sintetizado de las probetas obtenidas por metalurgia de polvos.

En la figura 7.14 se observa en (1) la cámara de sinterización, el tubo de la entrada y salida de gas es de 1/8" en diámetro; el tubo central sirvió como entrada de los termopares, una vez calibrado el sistema se selló. (2) Anillo de acero que va soldado en el recipiente cilíndrico, el cual lleva los tornillos donde entra la tapa y fué atornillada con tuercas de mariposa. (3) Dispositivo donde se colocarán las muestras para sinterizar, contiene tres pequeñas placas circulares que están llenas de huecos para que pueda circular el gas correctamente.

b) Condiciones experimentales.

Las condiciones utilizadas experimentalmente fueron en base a la literatura, esto fué cubriendo el intervalo de temperatura y tiempo de sinterizado. De los resultados obtenidos se buscaba encontrar las mejores condiciones de trabajo.

Estas condiciones de trabajo pueden variar por muchos factores; entre los más importantes tenemos: la calidad del polvo, el lubricante y el tipo de atmósfera utilizada.

El tiempo utilizado experimentalmente cuenta desde el momento en que se introduce la muestra a la cámara de sinterizado hasta cuando se saca de la misma.

La circulación del gas comienza minutos antes de introducir la muestra.

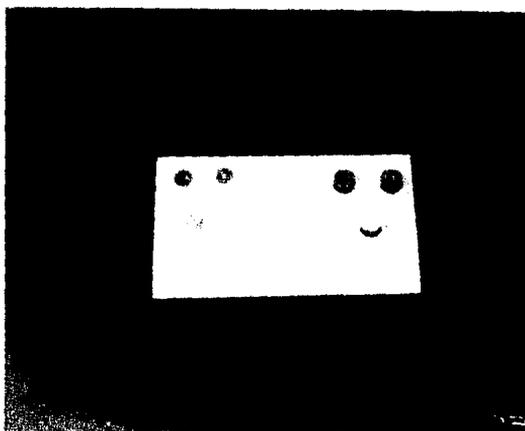


Fig. 7.15- Muestras compactadas y muestras sinterizadas. A la izquierda tenemos las probetas compactadas y presentan una apariencia superficial brillante; a la derecha las probetas ya sinterizadas presentan una superficie opaca y oscura en las probetas superiores; esto es debido a la oxidación superficial ocurrida durante el sinterizado.

7.6) Determinación de la densidad del producto.

Para la determinación de la densidad se empleó una balanza analítica y se aplicó el método de densidad por diferencia de peso. El método consiste en obtener dos pesos para efectuar el cálculo; el primero se obtiene colgando la probeta en el interior de la balanza efectuando la medición correspondiente, para obtener el segundo peso, la muestra es

sujetada y se sumerge en agua destilada procurando que quede totalmente cubierta por el líquido y sin burbujas en el momento de efectuar la medición. La densidad se calcula con la expresión siguiente:

$$\rho = m/v; \text{ donde: } v = \frac{W_1 - W_2}{\rho_{H_2O} (g)} (A)$$

W_1 = peso de la probeta al aire (gr-f)

W_2 = peso de la probeta sumergida en agua (gr-f)

A = factor de conversión = 974.7538 dinas/gr-f

g = constante de aceleración gravitacional

m = masa de la probeta (gramos)

$\rho_{H_2O} = 0.9968 \text{ g/cc (a } 26^{\circ}\text{C)}$

7.7) Medición de la dureza a las muestras obtenidas.

Para medir la dureza de las muestras primeramente se desbastarán cada una de ellas hasta lija 600 y se les aplico un pulido grueso. Se pasarón las muestras al durómetro para determinar dureza Rockwell B (Rb) y para aluminio solamente se midio dureza Rockwell F (Rf) dado que no soportaba la carga aplicada.

En la dureza Rb se aplica una carga de 100 kilogramos, y se utiliza un penetrador con bola de 1/16"; para Rf se utiliza el mismo penetrador, pero con una carga de 60 kilogramos.

7.8) Análisis metalográfico.

Con el fin de observar la estructura presente en algunas muestras escogidas de los diferentes materiales y la porosidad que se presenta; se preparó la metalografía de veinte muestras.

Las probetas fueron seccionadas a la mitad (en dirección al esfuerzo aplicado), desbastadas y pulidas a espejo; enseguida se les sometió a un ataque químico con un reactivo propio para cada aleación. En las figuras 8.1 a 8.20 se observa la metalografía de las muestras.

VIII.- RESULTADOS EXPERIMENTALES.

A continuación se presentan en tablas los resultados obtenidos del estudio experimental y fotografías obtenidas en el microscopio metalográfico de las muestras preparadas.

En las tablas se presentan algunos símbolos comunes como:

P = presión

D=d = diámetro

H=h = altura

T = temperatura

⊖ = tiempo

La porosidad es reportada como porcentaje del volumen total.

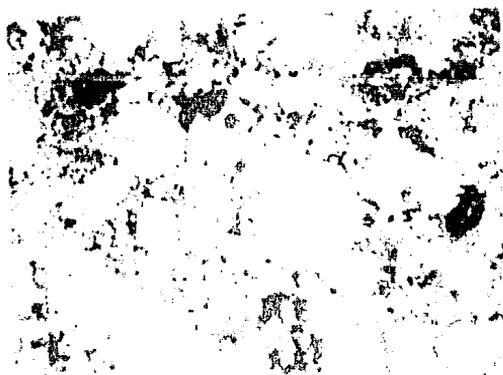


Fig. 8.1- Polvo de cobre compactado a una presión de 25 tsi. Se observan los huecos que han quedado por atrapamiento de aire y por la forma de la partícula. Ataque con $\text{NH}_4\text{OH} + \text{H}_2\text{O}_2$. 160X.

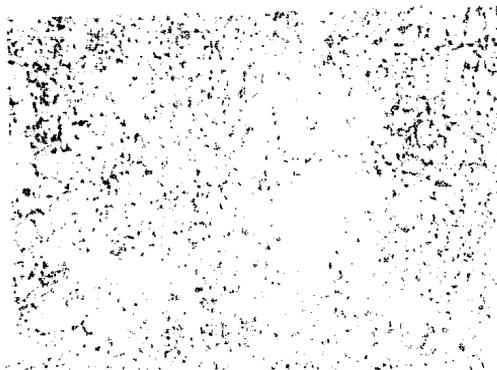


Fig. 8.2 - Sección transversal de una probeta de cobre puro prensada a 25 tsi, sinterizada a 840°C durante 12 minutos alcanzando una densidad de 8.07 g/cc ; la microporosidad (puntos negros) es el 9.93% del volumen total (muestra 1-A). Ataque con $\text{NH}_4\text{OH} + \text{H}_2\text{O}_2$. 160X.

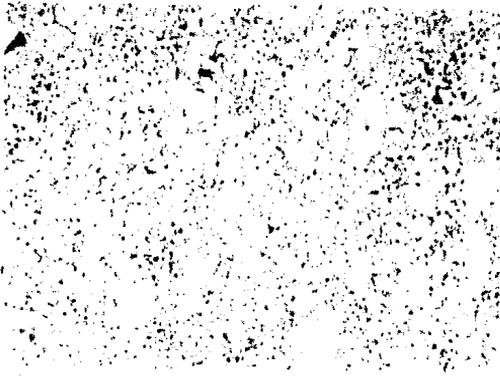


Fig. 8.3- Sección transversal de una probeta de cobre puro prensada a 27 tsi, sinterizada a 870°C durante 12 minutos alcanzando una densidad de 7.99 g/cc ; la microporosidad (puntos negros) es el 10.83% del volumen total (2-D).

Ataque con $\text{NH}_4\text{OH} + \text{H}_2\text{O}_2$. 160X.

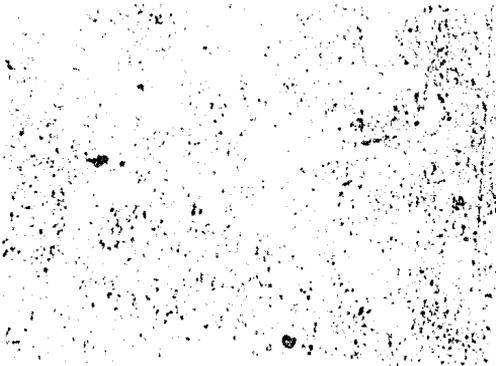


Fig. 8.4- Sección transversal de una probeta de cobre puro prensada a 30 tsi, sinterizada a 900°C durante 12 minutos y con densidad de 7.91 g/cc ; la microporosidad (puntos negros) es 11.72% del volumen total (3-G).

Ataque con $\text{NH}_4\text{OH} + \text{H}_2\text{O}_2$. 160X.

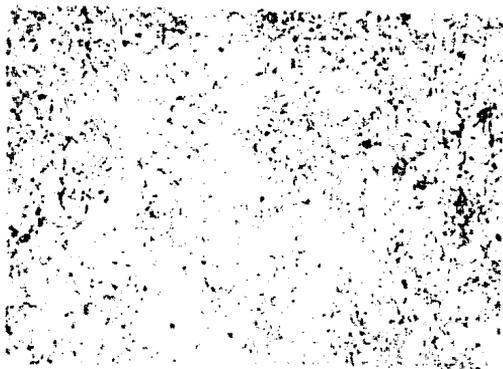


Fig. 8.5. Sección transversal de un espécimen de cobre que se oxidó en un horno a 350°C y posteriormente alcalinizado una vez con NaOH (1-5), se sometió a un procesamiento con una presión de 20 ton. Se observa el material tierno de un cobre, así como la porosidad (puntos negros) resultante que es de 1.1% del volumen total. Ataque con $\text{HNO}_3 + \text{H}_2\text{O}$, 100%.

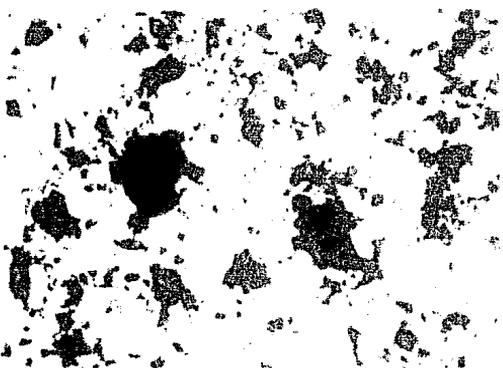


Fig. 8.6. Polvo de bronce compactado a una presión de 15 ton. Se observa que el tamaño del poro es mayor comparado con el concreto de cobre; esto es debido a que la aleación de bronce fue obtenida por mezcla física entre polvo de cobre y polvo de estaño; cada uno tiene promedios físicos diferentes. Ataque con HNO_3 diluido, 100%.

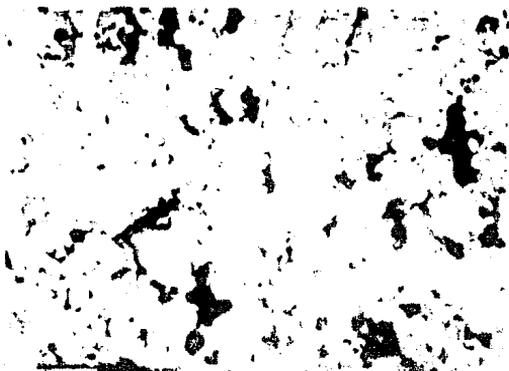


Fig. 3.7. Sección transversal de una probeta de bronce 90/10 prensada a 15 ton, sinterizada a 760°C durante 20 minutos y con un nivel de 6.4% p/po; la porosidad (partes negras) es el 7.1% del volumen total (1-5). Ataque con $(\text{NH}_4)_2\text{S}_2\text{O}_8$, 10%.



Fig. 3.8. Sección transversal de una probeta de bronce 90/10 prensada a 17 ton, sinterizada a 810°C durante 12 minutos y con un nivel de 7.03% p/po; la porosidad (partes negras) es el 8.3% del volumen total (2-F). Ataque con $(\text{NH}_4)_2\text{S}_2\text{O}_8$, 10%.



Fig. 88. Síntesis de un cemento de tipo 90/10
 reimpreso a 20 tsi. El cemento es de 7 mi-
 nutos, con densidad de 6.27 g/cm³ la porosidad (par-
 tes negras) es el 29.7% del volumen total (3-I).
 Ataque con HNO_3 diluido. 160x.

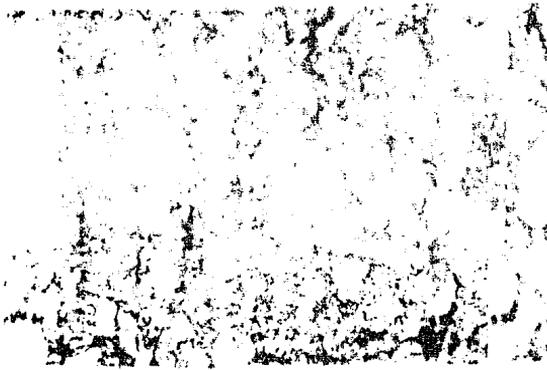


Fig. 89. Síntesis de un cemento de tipo 90/10,
 que después de ser reimpreso a 15 tsi y deshidratada
 alcanzamos una densidad de 6.10 g/cm³ (3-I), se ceme-
 ntó a un reimpreso con una presión de 30 tsi. Se ob-
 serva que aplicando una alta presión de reimpreso
 disminuye la porosidad considerablemente. La porosi-
 dad (partes negras) resultante es 1.82% del volu-
 men total. Ataque con HNO_3 diluido. 160x.

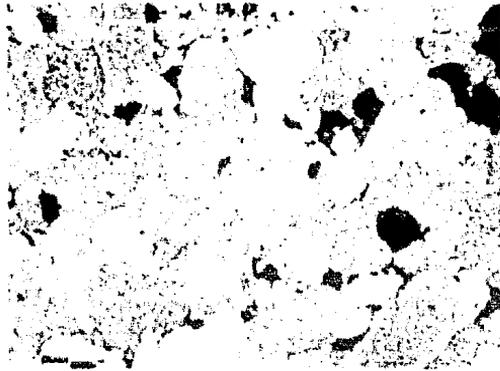


Fig. 8.11 Polvo de latón compactado a una presión de 30 ton. Se observa la porosidad (partes negras) resultante por atrapamiento de aire, además del que deja la forma de la partícula. Ataque con $\text{NH}_4\text{OH} + \text{H}_2\text{O}_2$. 160X.

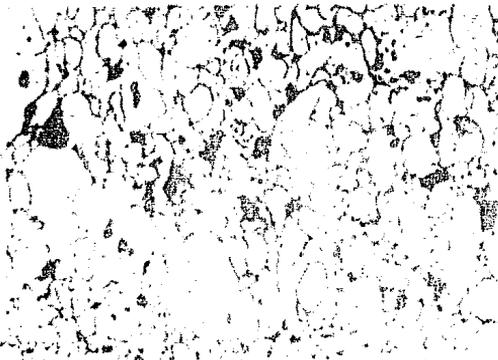


Fig. 8.12 Sección transversal de una probeta de latón prensada a 20 ton, sinterizada a 500°C durante 15 minutos alcanzando una densidad de 7.47 g/cc ; la porosidad (partes negras) es el 15.04% del volumen total. Ataque con $\text{NH}_4\text{OH} + \text{H}_2\text{O}_2$. 100X.

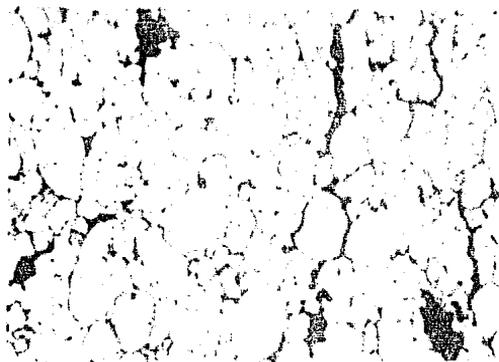


Fig. 8.13 Sección transversal de una probeta de latón prensada a 40 tsi, sinterizada a 640°C durante 15 minutos alcanzando una densidad de 7.69 g/cc; la porosidad (partes negras) es el 11.10% del volumen total. Ataque con $\text{NH}_4\text{OH} + \text{H}_2\text{O}_2$. 160X. (2-B)

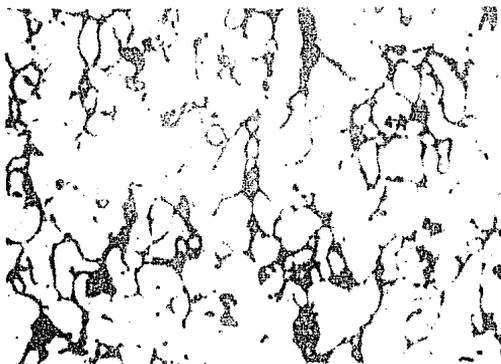


Fig. 8.14 Sección transversal de una probeta de latón prensada a 50 tsi, sinterizada a 670°C durante 5 minutos alcanzando una densidad de 7.40 g/cc; la porosidad (partes negras) es el 14.65% del volumen total. Ataque con $\text{NH}_4\text{OH} + \text{H}_2\text{O}_2$. 160X. (3-F)

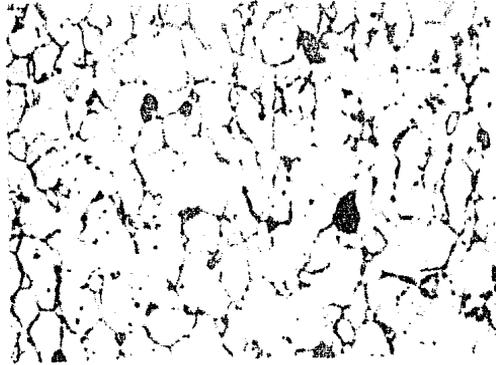


Fig. 8.15 Sección transversal de una probeta de latón, que después de ser prensada a 30 tsi y sinterizada alcanzando una densidad de 7.46 g/cc (1-F), se sometió a un reprensado con una presión de 50 tsi. Se observa como han aumentado las macías por deformación en el reprensado, la porosidad resultante (partes negras) es el 1.15% del volumen total. Ataque con $\text{NH}_4\text{OH} + \text{H}_2\text{O}_2$. 160X.

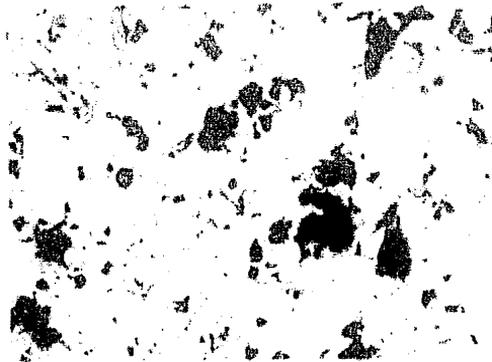


Fig. 8.16 Polvo de aluminio compactado a una presión de 12 tsi, la porosidad es más homogénea en tamaño, esto es debido a que se está trabajando con un polvo muy fino y hay mayor compactabilidad. Ataque con HPI al 0.5%. 250X.

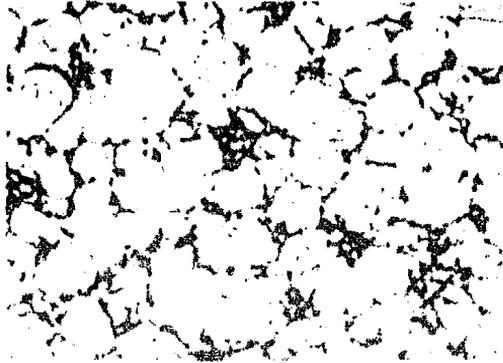


Fig. 8.17 Sección transversal de una probeta de aluminio prensada a 5 tsi, sinterizada a 590°C durante 15 minutos alcanzando una densidad de 2.53 g/cc ; la porosidad (partes negras) es el 5.95% del volumen total. Ataque con HFl al 0.5%. 250X. (1-A)

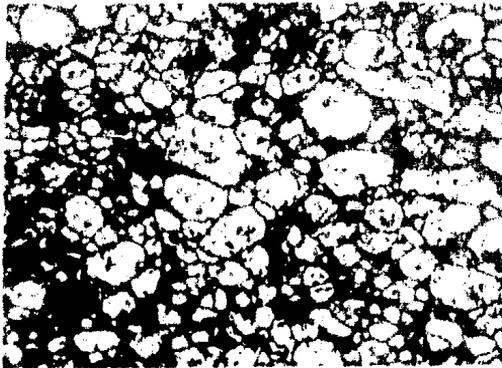


Fig. 8.18 Sección transversal de una probeta de aluminio prensada a 12 tsi, sinterizada a 590°C durante 10 minutos alcanzando una densidad de 2.56 g/cc ; la porosidad (partes negras) es el 4.83% del volumen total (2-C). Ataque con HFl al 0.5%. 250X.

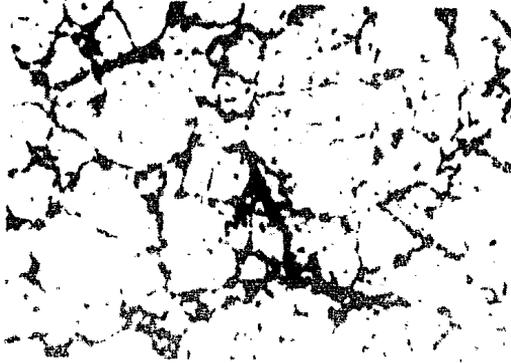


Fig. 8.19 Sección transversal de una probeta de aluminio prensada a 20 tsi, sinterizada a 590°C durante 15 minutos alcanzando una densidad de 2.50 g/cc ; la porosidad (partes negras) es el 4.83% del volumen total. Ataque con HFl al 0.5%. 250X. (J-A)

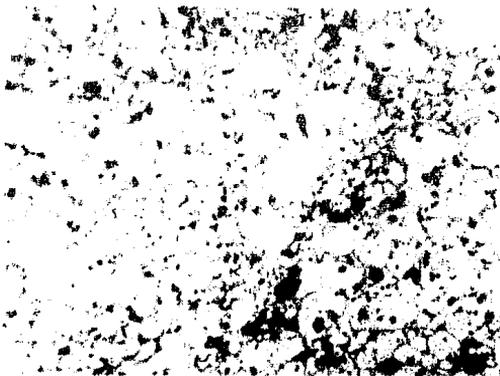


Fig. 8.20 Sección transversal de una probeta de aluminio, que después de ser prensada a 12 tsi y sinterizada alcanzando una densidad de 2.53 g/cc (2-B), se sometió a un reprensado con una presión de 20 tsi. Se observa la unión entre granos de diferente tamaño, esta es mayor dado que la porosidad disminuye. La porosidad resultante es 1.86% del volumen total. Ataque con HFl al 0.5%. 250X.

Tabla: 8.1 Propiedades obtenidas de piezas de Cobre.

muestra	Compacto				Sinterizado						
	P Tn/in ²	d mm	h mm	densidad g/cc	T ₀ °C	ε min.	D mm	H mm	densidad g/cc	dureza	porosidad %
1-A	25	10.12	5.41	8.06	840	12	10.17	5.47	8.07	Rb 72.8	9.93
1-B	25	10.12	5.42	8.07	840	15	10.17	5.47	7.93	Rb 72.2	11.90
1-C	25	10.12	5.42	8.07	840	20	10.15	5.46	8.00	Rb 74.2	10.71
1-D	25	10.12	5.43	8.06	870	12	10.14	5.47	7.95	Rb 73.3	11.27
1-E	25	10.12	5.43	8.08	870	15	10.14	5.47	8.00	Rb 71.3	10.49
1-F	25	10.12	5.44	8.07	870	20	10.13	5.47	7.89	Rb 73.8	12.05
1-G	25	10.12	5.44	8.04	900	12	10.13	5.48	7.96	Rb 72.6	11.16
1-H	25	10.12	5.42	8.07	900	15	10.13	5.45	7.84	Rb 72.3	12.50
1-I	25	10.12	5.41	8.06	900	20	10.13	5.46	7.86	Rb 70.2	12.28

Continuación para cobre.

muestra	Compacto				Sinterizado						
	T ₁ /in ²	d mm	h mm	densidad g/cc	T °C	t min.	D mm	H mm	densidad g/cc	dureza	porosidad
2-A	27	10.12	5.39	8.09	840	12	10.16	5.45	8.02	Rb 74.2	10.46
2-B	27	10.12	5.42	8.07	840	15	10.16	5.46	7.85	Rb 74.3	12.39
2-C	27	10.12	5.42	8.07	840	20	10.15	5.46	7.91	Rb 74.2	11.72
2-D	27	10.12	5.42	8.07	870	12	10.14	5.45	7.99	Rb 73.2	10.83
2-E	27	10.12	5.41	8.09	870	15	10.14	5.45	7.99	Rb 73.5	10.94
2-F	27	10.12	5.41	8.06	870	20	10.13	5.44	7.91	Rb 71.6	11.72
2-G	27	10.12	5.41	8.06	900	12	10.13	5.43	7.92	Rb 73.3	11.61
2-H	27	10.12	5.42	8.07	900	15	10.13	5.44	7.98	Rb 73.5	10.94
2-I	27	10.12	5.40	8.08	900	20	10.13	5.41	7.95	Rb 73.2	11.27

Continuación para cobre.

muestra	Compacto				Sinterizado						
	F Tn/in ²	d mm	h mm	densidad g/cc	T °C	φ min.	D min.	H mm	densidad g/cc	dureza	porosidad %
3-A	30	10.12	5.41	8.09	840	12	10.16	5.47	7.93	Rb 74.2	11.50
3-B	30	10.12	5.42	8.07	840	15	10.15	5.46	7.90	Rb 73.6	11.83
3-C	30	10.12	5.43	8.08	840	20	10.14	5.49	7.93	Rb 75.3	11.50
3-D	30	10.12	5.42	8.10	870	12	10.14	5.47	7.96	Rb 73.7	12.28
3-E	30	10.12	5.42	8.10	870	15	10.14	5.43	7.92	Rb 73.0	11.61
3-F	30	10.12	5.42	8.10	870	20	10.14	5.45	7.92	Rb 71.7	11.41
3-G	30	10.12	5.41	8.09	900	12	10.14	5.44	7.91	Rb 72.0	11.72
3-H	30	10.12	5.41	8.09	900	15	10.14	5.44	7.91	Rb 73.0	11.72
3-I	30	10.12	5.41	8.09	900	20	10.14	5.42	7.95	Rb 71.2	11.27

Tabla: 8.2. Propiedades obtenidas en piezas de bronce.

muestra	Compacto				Sinterizado						
	P lb/in ²	d mm	h mm	densidad g/cc	T °C	ϕ mm	D mm	H mm	densidad g/cc	dureza	porosidad
1-A	15	10.12	5.52	7.50	760	10	10.66	5.89	6.72	Rb 72	23.5
1-B	15	10.12	5.54	7.49	760	11	10.67	5.91	6.73	Rb 72	23.3
1-C	15	10.12	5.51	7.44	760	12	10.70	5.89	6.40	Rb 72.3	27.1
1-D	15	10.12	5.55	7.41	810	10	10.53	5.81	6.73	Rb 76.2	23.4
1-E	15	10.12	5.51	7.47	810	11	10.56	5.81	6.74	Rb 77.8	23.2
1-F	15	10.12	5.52	7.50	810	12	10.57	5.85	6.66	Rb 78.8	24.2
1-G	15	10.12	5.50	7.50	870	10	-	-	4.39	-	50.0
1-H	15	10.12	5.53	7.46	870	9	-	-	4.85	-	44.8
1-I	15	10.12	5.60	7.37	870	2	10.64	6.13	6.34	Rb 73.2	27.8

Continuación para bronce.

muestra	Compacto				Sinterizado						
	T lb/in ²	d mm	h mm	densidad g/cc	T °C	φ min.	D mm	H mm	densidad g/cc	dureza	porosidad %
2-A	17	10.12	5.50	7.48	760	10	10.70	5.86	6.39	Rb 71.5	27.2
2-B	17	10.12	5.52	7.48	760	11	10.73	5.87	6.36	Rb 72	27.6
2-C	17	10.12	5.51	7.49	760	12	10.75	5.89	6.27	Rb 71	28.6
2-D	17	10.12	5.53	7.46	810	10	10.71	5.94	6.37	Rb 72.7	27.5
2-E	17	10.12	5.52	7.48	810	11	10.70	5.80	6.43	Rb 74.8	26.3
2-F	17	10.12	5.51	7.49	810	12	10.60	5.85	6.63	Rb 77.2	24.5
2-G	17	10.12	5.50	7.48	890	10	-	-	4.31	-	50.9
2-H	17	10.12	5.50	7.48	870	5	-	-	4.61	-	47.5
2-I	17	10.12	5.50	7.46	870	2	10.73	5.88	6.29	Rb 74	28.4

Continuación para bronce.

muestra	Compacto				Sinterizado						
	P	d	h	densidad	T	ϕ	D	H	densidad	dureza	porosidad
	Tn/in ²	mm	mm	g/cc	°C	mm.	mm	mm	g/cc		%
3-A	20	10.12	5.49	7.54	760	10	10.73	5.89	6.38	Rc 72.5	27.3
3-B	20	10.12	5.45	7.50	760	11	10.74	5.84	6.30	Rc 72.2	28.3
3-C	20	10.12	5.46	7.54	760	12	10.77	5.86	6.26	Rc 72.0	28.7
3-D	20	10.12	5.43	7.55	810	10	10.74	5.86	6.35	Rc 73.5	27.7
3-E	20	10.12	5.47	7.54	810	11	10.78	5.90	6.35	Rc 71.3	27.7
3-F	20	10.12	5.49	7.49	810	12	10.67	5.86	6.48	Rc 74.0	26.2
3-G	20	10.12	5.47	7.54	870	10	-	-	4.33	-	51.0
3-H	20	10.12	5.46	7.54	870	5	-	-	4.51	-	48.6
3-I	20	10.12	5.49	7.54	870	2	10.81	6.08	6.17	Rc 71.2	29.7

Tabla 8.3 Propiedades obtenidas en piezas de latón.

Muestra	Compacto				Sinterizado						
	P Tn/in ²	d mm	h mm	densidad g/cc	T °C	ϕ mm	D mm	H mm	densidad g/cc	dureza	porosidad %
1-A	30	10.13	5.68	7.93	840	10	10.24	5.87	7.23	Rb 77.3	16.61
1-B	30	10.13	5.68	7.93	840	15	10.23	5.87	7.41	Rb 75.7	14.53
1-C	30	10.13	5.69	8.61	840	20	10.21	5.88	7.85	Rb 76.7	9.46
1-D	30	10.13	5.69	7.91	870	10	-	6.04	7.41	Rb 70.8	14.53
1-E	30	10.13	5.72	7.89	870	15	-	6.01	7.38	Rb 69.2	14.88
1-F	30	10.13	5.69	7.91	870	5	-	5.99	7.48	Rb 71.8	13.73
1-G	30	10.13	5.69	7.91	800	10	10.25	5.88	7.64	Rb 78.0	11.88
1-H	30	10.13	5.68	7.97	800	15	10.24	5.87	7.47	Rb 79.5	13.84
1-I	30	10.13	5.70	7.90	800	20	10.24	5.87	7.46	Rb 80.5	13.96

Continuación para latón.

Muestra	Compacto				Sinterizado							
	P Tn/in. ²	d mm	h mm	densidad g/cc	T °C	ϕ min.	D mm	H mm	densidad g/cc	dureza	porosidad %	
2-A	40	10.13	5.69	7.94	840	10	10.24	5.24	7.63	Rb 77.8	12.00	
2-B	40	10.13	5.69	7.91	840	15	10.21	5.64	7.69	Rb 77.0	11.30	
2-C	40	10.13	5.70	7.90	840	20	10.24	5.24	7.31	Rb 70.7	15.69	
2-D	40	10.13	5.67	7.94	870	10	-	6.13	7.25	Rb 70.7	16.38	
2-E	40	10.13	5.65	7.97	870	15	-	6.19	5.63	Rb 69.7	35.06	
2-F	40	10.13	5.70	7.90	870	5	-	6.12	7.39	Rb 72.0	14.76	
2-G	40	10.13	5.67	7.94	800	10	10.24	5.64	7.46	Rb 80.2	13.96	
2-H	40	10.13	5.69	7.94	800	20	10.25	5.85	7.51	Rb 76.3	13.36	
2-I	40	10.13	5.71	7.91	800	20	10.22	5.83	7.46	Rb 77.2	13.66	

Continuación para latón.

muestra	Compacto				Sinterizado						
	P T _o /in ²	d mm	h mm	densidad g/cc	T °C	ϕ min.	D mm	H mm	densidad g/cc	dureza	porosidad %
3-A	50	10.13	5.68	7.95	840	10	10.22	5.85	7.50	Rb 78.8	13.49
3-B	50	10.13	5.68	7.95	840	15	10.20	5.81	7.40	Rb 77.8	14.65
3-C	50	10.13	5.68	7.95	840	20	10.19	5.88	7.32	Rb 71.7	15.57
3-D	50	10.13	5.67	7.94	870	10	-	6.25	7.48	Rb 71.0	13.73
3-E	50	10.13	5.67	7.96	870	15	-	6.23	7.51	Rb 67.0	13.38
3-F	50	10.13	5.68	7.93	870	5	-	6.13	7.40	Rb 71.0	14.65
3-G	50	10.13	5.69	7.91	900	10	10.24	5.83	7.52	Rb 79.0	13.26
3-H	50	10.13	5.66	7.96	900	15	10.24	5.85	7.40	Rb 79.5	14.65
3-I	50	10.13	5.69	7.94	900	20	10.21	5.85	7.55	Rb 79.3	13.92

Tabla: 8.4 Propiedades obtenidas en piezas de aluminio.

Muestra	Compacto				Sinterizado						
	T Tn/in ²	d mm	h mm	densidad g/cc	T °C	ϕ min.	D mm	H mm	densidad g/cc	dureza	porosidad %
1-A	5	10.10	7.79	2.39	590	15	-	8.13	2.53	Rb 63.3	5.95
1-B	5	10.10	7.78	2.37	590	5	10.10	7.77	2.41	Rf 42.5	10.41
1-C	5	10.10	7.75	2.37	590	10	10.11	7.83	2.39	Rf 63.8	11.15
1-D	5	10.10	7.89	2.36	450	15	10.11	7.23	2.40	Rf 45.5	10.73
1-E	5	10.10	7.68	2.40	450	30	10.11	7.66	2.42	Rf 45.0	10.04
1-F	5	10.10	7.73	2.37	450	25	10.11	7.75	2.41	Rf 50.0	10.41
1-G	5	10.10	7.69	2.39	520	15	10.11	7.69	2.42	Rf 54.0	10.04
1-H	5	10.10	7.71	2.36	500	30	10.11	7.71	2.41	Rf 51.0	10.41
1-I	5	10.10	7.69	2.35	520	25	10.11	7.66	2.58	Rf 54.0	5.20

Continuación para aluminio.

muestra	Compacto				Sinterizado						
	F En/in ²	d mm	h mm	densidad g/cc	T °C	ϕ min.	D mm	H mm	densidad g/cc	dureza	porosidad %
2-A	12	10.10	7.23	2.52	500	15	-	7.41	2.63	Rf 70.8	2.23
2-B	12	10.10	7.16	2.53	500	5	10.11	7.22	2.53	Rf 57.3	5.95
2-C	12	10.10	7.08	2.54	500	10	10.11	7.26	2.56	Rf 63.2	4.53
2-D	12	10.10	7.37	2.51	450	15	10.11	7.43	2.54	Rf 56.5	5.58
2-E	12	10.10	7.22	2.52	450	20	10.12	7.30	2.51	Rf 56.0	6.60
2-F	12	10.10	7.09	2.53	450	25	10.12	7.13	2.51	Rf 58.5	6.60
2-G	12	10.10	7.35	2.51	500	15	10.12	7.41	2.53	Rf 56.0	5.95
2-H	12	10.10	7.21	2.54	500	20	10.12	7.31	2.53	Rf 57.0	5.95
2-I	12	10.10	7.40	2.51	520	25	10.12	7.47	2.53	Rf 56.0	5.05

Continuación para aluminio:

Muestra	Compacto				Sinterizado						
	P Tn/in ²	d mm	h mm	densidad g/cc	T °C	ϕ mm	D mm	H mm	densidad g/cc	dureza Rf	porosidad %
3-A	20	10.10	6.99	2.57	590	15	-	7.77	2.56	Rf 63.8	4.83
3-B	20	10.10	6.43	2.78	590	5	10.11	7.00	2.54	Rf 56.0	5.58
3-C	20	10.10	7.13	2.56	590	10	10.12	7.22	2.50	Rf 61.5	7.06
3-D	20	10.10	7.03	2.56	450	15	10.12	7.11	2.54	Rf 55.0	5.58
3-E	20	10.10	7.02	2.51	450	20	10.12	7.11	2.56	Rf 58.5	4.83
3-F	20	10.10	7.14	2.55	450	25	10.12	7.22	2.55	Rf 57.5	5.20
3-G	20	10.10	6.99	2.57	520	15	10.12	7.09	2.54	Rf 54.5	5.58
3-H	20	10.10	6.98	2.57	520	20	10.12	7.07	2.57	Rf 57.0	4.46
3-I	20	10.10	7.06	2.56	520	25	10.12	7.25	2.60	Rf 55.5	3.35

Nota: los datos que no aparecen es porque durante el sinterizado las muestras se deformaron y las medidas no son satisfactorias.

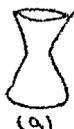
Tabla 8.5 Propiedades obtenidas del reprensado.

muestra	P tn/in ²	d mm	h mm	densidad g/cc	dureza	porosidad %
cobre (1-E)	30	10.11	4.91	8.86	Rb 48	1.12
bronce (1-I)	30	10.12	4.19	8.62	Rb 77	1.82
latón (1-P)	50	10.11	4.97	8.57	Rb 60	1.15
aluminio (2-B)	20	10.09	6.67	2.64	Rf 65	1.86

IX.- DISCUSION Y CONCLUSIONES.

- 1) La porosidad es más marcada en las probetas de bronce; el tipo de poro es mayor y heterogéneo. Esto es debido posiblemente a que la aleación se hizo por mezcla física entre dos polvos atomizados, mientras que en el cobre, latón y aluminio se utilizó polvo atomizado de la aleación.
- 2) El tamaño de poro aumenta directamente con la presión de prensado para bronce y en general así sucede para los materiales restantes. Solo que en bronce se observa mejor por el tamaño de poro que presenta. Esto es porque a altas presiones se acumula mayor tensión en las partículas de polvo y se libera cuando las muestras son sometidas a altas temperaturas; de esta forma el tamaño de poro aumenta y las dimensiones de las piezas también son afectadas. De otro modo lo podemos ver cuando a altas presiones de prensado la densidad en verde es mayor.
- 3) La forma y tamaño de poro es diferente para cada material, y es el resultado del grado de unión de las partículas de polvo, así como de su naturaleza y composición. Lo podemos observar en la figura 8.18, que muestra una probeta de aluminio, la cuál no alcanzó la unión entre partículas y hay una separación entre las mismas, esto en comparación con la figura 8.17.

- 4) La temperatura y el tiempo de sinterizado influye considerablemente para la obtención de una pieza libre de imperfecciones, como en el caso que presentó el bronce, latón y aluminio. Donde existen muestras que se deformaron, esto es debido a que la temperatura es alta y la superficie pequeña, que en algunos casos empezó la fusión de la pieza; y de otra forma el aire atrapado en el interior durante la compactación oxidó la pieza y provocó un aumento de volumen. A continuación se anexan los dibujos de piezas deformadas:



- (a) muestras deformadas por fusión del polvo, se presentó en aluminio y latón.
- (b) muestras deformadas por atrapamiento de aire en el interior, se presentó en bronce.
- 5) Se llegó a la conclusión de que ~~haca~~ por atrapamiento de aire porque al seccionar la probeta estaba hueca en el interior. En el caso de fusión, al seccionar la muestra se encontró que en el centro había mayor uniformidad y en el aluminio se observó al microscopio una estructura de fundición. Esto ocurre a altas temperaturas y tiempos de sinterizado altos.
- 6) El repsado ayuda a obtener la dimensionalidad requerida y disminuye la porosidad en todos los casos. Esta deformación mecánica provoca un aumento en la densidad y,

para cobre y latón un aumento en el maclaje.

- 7) En las tablas de resultados se observan valores obtenidos con las condiciones mencionadas anteriormente; estos pueden variar en función de la calidad del polvo, del tipo de atmósfera y lubricante.
- 8) Los valores encontrados experimentalmente, proporcionan un criterio para la obtención de piezas a nivel industrial. En la industria se deben tomar en cuenta el equipo con que se cuenta y las condiciones que reduzcan los costos de producción.
- 9) El polvo de aluminio es muy difícil de manipular, puesto que tiende a reaccionar con el oxígeno del aire; si no está almacenado correctamente conforme pasa el tiempo se va deteriorando y sus condiciones de sinterizado varían considerablemente. En este trabajo se encontró que a bajas presiones de prensado la resistencia en verde es muy baja y la pieza se rompe en la manipulación. Por esta razón es recomendable trabajar a presiones medias reportadas; la temperatura y el tiempo de sinterizado se deben elegir dependiendo de la aleación que se va a utilizar. Para el tipo de polvo utilizado en el presente trabajo es recomendable una temperatura no mayor de 590°C y en un intervalo de $550-590^{\circ}\text{C}$; el tiempo puede ser de 15 a 30 minutos; este tiempo puede variar según la temperatura y el tipo de atmósfera de sinterizado.

- 10) La apariencia superficial de las probetas no es buena, a excepto las probetas de aluminio. Esto esta relacionado directamente con el tipo de atmósfera utilizada y el nitrógeno comercial contiene pequeñas cantidades de oxígeno; este oxígeno reacciona con el material de la superficie de la probeta, formando una capa de óxido color negro dando un aspecto desagradable. En las probetas de aluminio no se presenta esta coloración y la superficie permanece constante durante todo el proceso.

X.- BIBLIOGRAFIA

- 1.- A. Bose and P.G. Mukunda. A novel method for producing light and heavy duty sintered bronze bearings; powder metallurgy international, may 1982, 14(2), p. 82-84.
- 2.- Alvarado de la Barrera E. y Ugalde Tinoco B.E. Reducción, compactación y sinterización de escamas de hierro; tesis UNAM facultad de química, México 1984.
- 3.- Annual book of ASTM standards (1980), part 9, p. 126-129 y 159-161.
- 4.- A.V. Seybolt and J.E. Burke. Técnicas de metalurgia experimental, cap. 10. Centro regional de ayuda técnica, México 1969.
- 5.- Becerril Ortega, Benito. Aspectos generales de la metalurgia de polvos; tesis UNAM facultad de química, México 1978.
- 6.- Claus G. Goetzel. Treatise on powder metallurgy vol. I y II; Interscience publisher inc. New York.
- 7.- Datos proporcionados por: Alcan Aluminio, S.A (división alpaste), via morelos # 347, Tulpetlac Edo. de Méx.
- 8.- Datos proporcionados por: Estaño Electro, S.A; Pdo. Montes de Oca # 14, esq. Henry Ford; Fracc. industrial Tlanepantla Edo. de Méx.
- 9.- Datos proporcionados por: Nafinsa; centro de información de bienes de capital, Venustiano Carranza # 25- 4^o piso.
- 10.- Datos proporcionados por: Polvos Metálicos Mexicanos, S.A. Toltecas # 139, col. Sn. Pedro de los pinos, C.P. 01180 Méx. D.F.

- 11.- Datos proporcionados por: Sintermetal, S.A; Lerma, Edo. de México. Tel: 91-728-2-00-82.
- 12.- D.W. Hall and S. MocarSKI. Update on P/M automotive applications; the international journal of powder metallurgy and powder technology, april 1985, 21(2), p.79-84.
- 13.- D. Yarnton and D.R. Prossen. Effect of lubricant chain lenght on the compaction of copper powder; the international journal of powder metallurgy and powder technology, january 1975, 11(1), p. 43-51.
- 14.- E. Arzt and H. Fischmeister. Fundamental aspects of the compaction of metal powder; memories scientifiques de rev. metallurgie, oct. 1979, 76(10), p. 573-580.
- 15.- F.V. Lenel. Powder metallurgy: principles and applications; Metal powder industries federation, princeton New Jersey (1980).
- 16.- Henry H. Hausner, D. Eng. . Handbook of powder metallurgy; chemical publishing co. inc. New York, N.Y. (1973).
- 17.- J.M. Hallen, L.L. Rosas Morales, J.G. Cabañas. Porosidad de piezas bajo presión; Memorias del V encuentro de investigación metalúrgica, Instituto tecnologico de Saltillo (1983), p. 477-487.
- 18.- J.M. Hallen, L.L. Rosas Morales, J.G. Cabañas, Y. Mitani N. . Análisis de la sinterización de polvos de cobre y zinc; Memorias del IV encuentro de investigación metalúrgica, instituto tecnologico de Saltillo (1982), p. 169-184.
- 19.- L.G. Roy. Influence of sintering atmospheres and powder composition on machinings grade compacts; the international journal of powder metallurgy and powder technology, october 1976, 12(4), p. 313-324.

- 20.- M. Moolchandani, G. Vellaikal, and P. Ramakrishnan. - Effect of sintering atmosphere on some properties of bronze filters; transaction powder metallurgy association of India, Sep. 1982, 9(), p.1-6.
- 21.- MPIF. Powder metallurgy equipment manual; powder metallurgy equipment association (1977).
- 22.- Metal progress. Trends in powder metallurgy technology; january 1980, 117(1), p. 100-103.
- 23.- Metal progress. Trends in powder metallurgy technology; january 1983, 123(1), p. 70-74.
- 24.- Metal progress. Properties and applications of nonferrous powder metallurgy parts; january 1982, 122(1),p.37-38.
- 25.- Metal progress. Trends in powder metallurgy technology; january 1985, 127(1), p. 87-88.
- 26.- Metal powder report. Sintering of brass and nickel-silver powder; aug. 1981, 36(8), p.377-380.
- 27.- Metal powder report. Current status of sintered aluminum and some comparisons with sintered iron; may 1980, 35(5), p.193-196.
- 28.- Myron L. Begeman and D.H. Amstead. Procesos de fabricación, p.286-292, CECSA (1980).
- 29.- P.K. Johnson. Design competition winners demonstrate P/M engineering trends; the international journal of powder metallurgy and powder technology, october 1975, 11(4), p.285-291.
- 30.- P. Molera. Introducción a la pulvimetalurgia; ediciones Bellaterra S.A. (1980).
- 31.- R.M. Rusnak. Energy relationships in the high velocity compaction of copper powder; the international journal of powder metallurgy and powder technology, april 1976, 12(2), p.91-98.

- 32.- Samuel Bradbury. Source book on powder metallurgy; American society for metals (1979), p.74-81 y 403-818.
- 33.- S. Choi. A study of the sintering mechanism of metals powders; the international journal of powder metallurgy and powder technology, january 1985, 21(1), p.39-40.
- 34.- S. Storchheim and M.A.H. Howes. Aluminium compaction problem solved; metal powder report, may 1980, 35(5), p.193-198.
- 35.- S.W. McGee and P.K. Burgess. Identifying cost effective P/M applications; the international journal of powder metallurgy and powder technology, october 1976, 12(4), p.313-324.
- 36.- T. Tabata, S. Masaki and K. Hosokawa. Effects of tipe of lubricant in cold extrusion of sintered preforms;- journal of engineering materials and technology, april 1983, 105(2), p.128-131.
- 37.- V.A. Tracey. Porous materials: current and future trends; the international journal of powder metallurgy and powder technology, january 1976, 12(1), p.25-34.
- 38.- V.T. Morgan. An introduction to powder metallurgy; Metalurgia, nov. 1981, p.523-527.