Universidad Nacional Autónoma de México

FACULTAD DE QUIMICA

ASPECTOS GENERALES DE LA METALURGIA DE POLVOS

T E S I S

Que Para Obtener el Título de:

Ingeniero Químico Metalúrgico

P r e s e n t a

BENITO BECERRIL ORTEGA

México, D. F. 1978

Universidad Nacional Autónoma de México
UNAM
Biblioteca Central
Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

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 esta 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.

CLAS. TESIS
ADQ 1978
FECHA M.V. 57
PROC.

JURADO ASIGNADO ORIGINALMENTE SEGUN EL TEMA :

Presidente : PROF. MANUEL F. GUERRERO FERNANDEZ

Vocal : PROF. JULIO GARCIA STAHL

Secretario : PROF. FERNANDO MALDONADO MENDOZA

1°Suplente : PROF. ALEJANDRO ESPRIU MANRIQUE DE LARA

2°Suplente : PROF. MARIA EUGENIA NOGUEZ AMAYA

SITIO DONDE SE DESARROLLO EL TEMA :

FACULTAD DE QUIMICA DE LA U.N.A.M.

NOMBRE DEL SUSTENTANTE

BENITO BECERRIL ORTEGA

ASESOR DEL TEMA

PROF. JULIO GARCIA STAHL

I N D I C E

Capítulo I	Introducción	
I	Características y Producción de los Polvos Metálicos	5
1.1	Características	5
1.2	Producción de Polvos Metálicos	21
1.2.1	Métodos de Producción	21
1.3	Métodos Mecánicos	21
1.3.1	Pulverización Mecánica de Metales Sólidos	21
1.3.2	Pulverización Mecánica de Metales Fundidos	32
1.3.2.1	Granulación	32
1.3.2.2	Choque Térmico	32
1.3.2.3	Atomización	32
1.3.2.4	Proceso del Electrodo Rotatorio	34
1.3.2.5	Otros Métodos	38
1.4	Métodos Físico Químicos	44
1.4.1	Reducción Directa de Compuestos Metálicos	44
1.4.2	Precipitación Electrolítica	44
1.4.3	Procesos Hidrometalúrgicos	47
1.4.4	Descomposición Térmica	47
Capítulo II		
II	Compactación de los Polvos Metálicos	54
II.1	Mezclado	54
II.2	Lubricación	54
II.3	Compactación, Definición y Métodos	61
II.3.1	Compactación con Presión	61
II.3.1.1	Compactación Unidireccional	68
II.3.1.1.2	Propiedades de las Piezas Prensadas	74
II.3.1.1.3	Defectos de las Piezas Prensadas	74
II.3.1.1.4	Prensas	74
II.3.1.2	Compactación Isostática	86
II.3.1.3	Compactación Contínua	92
II.3.1.4	Laminación de Polvos	94
II.3.1.5	Extrusión de Polvos	98
II.3.1.6	Compactación de Alta Energía	102
II.3.1.7	Forja de Polvos Metálicos	105
II.3.1.8	Compactación Vibratoria	105
II.3.2	Compactación sin Presión	110
II.3.2.1	Sinterización de los Polvos en Molde	110
II.3.2.2	Colada en Barbotine.	112
II.3.2.3	Compactación Vibratoria	115
Capítulo III		
III	Sinterización	118
III.1	Aspectos Teóricos	118
III.2	Transformaciones durante la Sinterización	121

III.3	Sinterización con Fase Líquida	123
III.4	Aspectos Prácticos de la Sinterización	126
III.5	Atmósferas de Sinterización	129
III.6	Hornos de Sinterización	134
III.7	Control en la Sinterización	134
III.8	Propiedades de las Piezas Sinterizadas	137
Capítulo IV		
IV.	Tratamientos. Post - Sinterización	140
IV.1	Operaciones de Calibrado y Conformado	140
IV.1.1	Extrusión y Forja	140
IV.1.2	Maquinados	143
IV.2	Tratamientos Térmicos	143
IV.3	Tratamientos Superficiales y de Acabado	143
IV.4	Control de Calidad	148
IV.4.1	Control de los Polvos Metálicos	148
IV.4.2	Control de Proceso	148
IV.4.3	Control de Calidad de Producto Terminado	148
Capítulo V		
V	Aplicaciones	149
V.1	Empleo Directo de los Polvos Metálicos	149
V.2	Materiales Ferrosos	149
V.3	Materiales no ferrosos	155
V.3.1	Metales de Bajo Punto de Fusión	155
V.3.2	Materiales Refractarios	155
V.4	Otros Materiales	161
V.5	Conclusiones	166
	Bibliografía	168

INTRODUCCION

ASPECTOS HISTORICOS

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

Las raíces de la pulvimetalurgia se pueden remontar hasta 5000 - años atrás, a las técnicas empleadas por los egipcios 3000 años A. C.; y por los incas para producir objetos de hierro y platino respectivamente. Un ejemplo notable del avance obtenido por las culturas antiguas, lo constituye la Columna de Delhi, fabricada de hierro reducido y forjado de una altura de 7.25 metros, 40 cm. de diámetro y un peso de 6 toneladas. El - uso de polvos metálicos para fines decorativos fué común durante la edad media.

Sin embargo, los fundamentos de los procesos actuales se desarrollaron simultáneamente en Rusia e Inglaterra, correspondiendo al sabio ruso Sobolevsky en 1827 hacer la primera aplicación industrial, utilizando - polvo de platino, prensado, sinterizado y forjado para la fabricación de - monedas.

El primer trabajo científico así considerado sobre pulvimetalurgia fué publicado en 1829 por el físico inglés H.W. Wollaston, describiendo la obtención de esponja de platino y su tratamiento posterior hasta obtener la forma final deseada.

En 1841 Osann publicó un método para producir medallas y otros - objetos partiendo de polvos de cobre y con la aparición de la lámpara incandescente, la búsqueda de materiales para el filamento volvió a centrar el interés en la pulvimetalurgia.

En 1898 Auer Von Wesbach patentó los filamentos de osmio a partir de polvo, también se empleó el tantalio y el wolframio pero con resultados no satisfactorios y fué hasta 1911 que William D. Coolidge logró - producir wolframio dúctil por metalurgia de polvos con técnicas hasta hoy empleadas.

Por otra parte los cojinetes sinterizados y las escobillas de cobre grafito habían seguido un desarrollo independiente pero no fué sino hasta 1920 que dichos productos se fabricaron en cantidad apreciable. Con la - aparición hacia el año de 1927 de los carburos de wolframio (metal duro) se revolucionó la industria metalúrgica hasta el punto de que las máquinas

entonces existentes no podían adaptarse a las exigencias de las nuevas he-- rramientas de metal duro.

Hacia 1930 se desarrolló la producción de piezas a partir de pol-- vos obtenidos de la disociación de carbonilos metálicos, sin embargo, aún se consideraba a la pulvimetalurgia como una rama enfocada a la fabrica-- ción de materiales exóticos más que a materiales comunes. Durante la - segunda guerra el metal duro adquiere un extraordinario desarrollo y dá lugar a la creación de grandes industrias exclusivas; creando con ello - las primeras industrias orientadas de lleno a la pulvimetalurgia.

Es también durante esta época que se modifican los procesos de - atomización ya empleados desde la década de los treinta para metales de bajo punto de fusión para atomizar hierro. Alemania desarrolla el pro- ceso DPG en sustitución del polvo de hierro hecho a partir de la molien- da de alambre de hierro recortado (polvo Hametag) demasiado costoso. Finalmente aparece el primer método comercial para producir hierro, - evitando el problema de la oxidación, en grandes cantidades al término de los cuarenta, también desarrollado en Alemania; el proceso Mannesmann (RZ) de atomización con aire.

Sin embargo, aún en los años cincuentas su aplicación era reduci- da a aplicaciones especiales y requirió un inmenso trabajo experimental - en muchos países y además estudios tecnológicos para aprovechar las pro- piedades de los materiales sinterizados.

Con el desarrollo de técnicas revolucionarias como el prensado - caliente, isostático, extrusión, forja, etc., en la actualidad ha entrado en una nueva etapa que ha conducido a notables mejoras en materiales y - procesos. Se está presentando una optimización del proceso básico, jun- to con un mayor control de calidad de los productos; debido a la acepta-- ción creciente de la pulvimetalurgia como proceso común de una amplia gama de materiales y productos en casi todas las industrias.

Uno de los mayores obstáculos a la utilización creciente de esta técnica es el desconocimiento por parte de ingenieros y ejecutivos, de - los cambios acaecidos dentro de esta tecnología en años recientes y que siguen ocurriendo a base de programas de investigación bien definidos. - Y que han permitido subsanar algunas de las deficiencias notables en los inicios de esta rama, permitiendo un incremento en su calidad y competi- vidad con productos fabricados tradicionalmente.

Lo que pueda suceder a la pulvimetalurgia y a la industria que pue- de beneficiarse con ella, depende en última instancia de la iniciativa y - creatividad de los individuos que sepan aprovechar las posibilidades de es- ta nueva tecnología.

La figura 1 muestra un esquema general de las técnicas usuales - en la pulvimetalurgia.

Figura No. 1

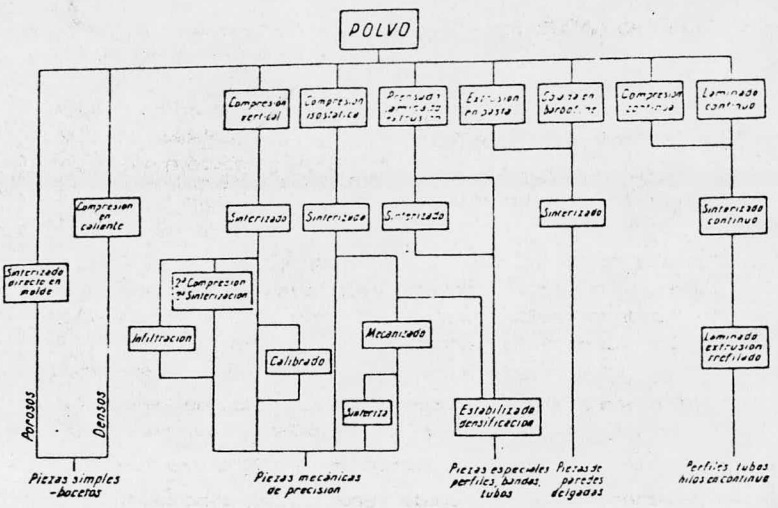
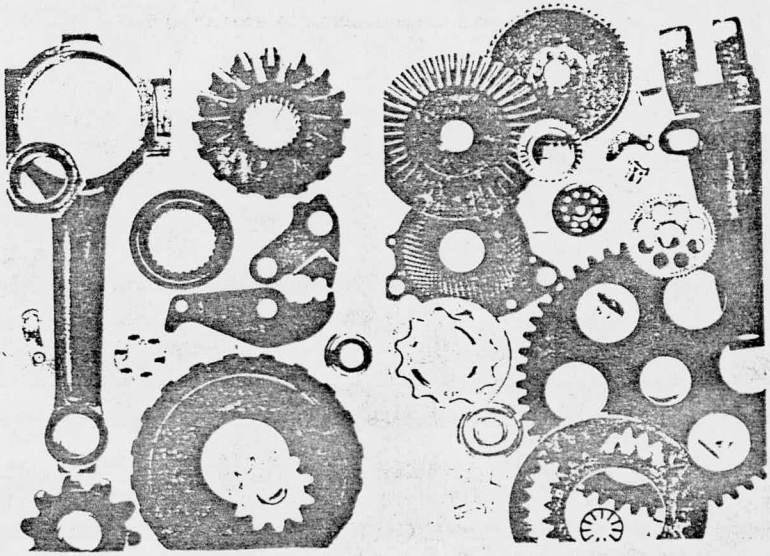


Figura No. 2



Un breve resumen de los campos de aplicación de la pulvimetalurgia se puede esbozar en la forma siguiente:

1. Piezas de hierro, aleaciones de hierro, cobre, níquel; aceros inoxidables, aleados, etc., cuyos factores técnicos y económicos aconsejan dicho método.
2. Elementos mecánicos y estructurales de metales no ferrosos como - Cu, Al, Zn y sus aleaciones.
3. Materiales porosos, estos materiales tienen amplia aplicación en filtros hechos de materiales anticorrosivos como bronce, níquel, - aceros inoxidables, etc. Cojinetes autolubricantes hechos de bronce, Fe-Pb, Fe-Cu, aluminio, con un contenido de 20% en volumen de aceite.
4. Aleaciones con puntos de fusión muy dispares como 95 W-3 Ni-2 Cu, Ag-W, Ag-Mo, W-Co, etc.
5. Carburos cementados, carburos de W, Ti, Ta, etc.
6. Materiales para aplicaciones eléctricas y electrónicas, Ag-Ni, Ag-C, Cu-W, Cu-C, Mo-Ag, W-Ag, Fe, etc.
7. Aleaciones magnéticas como alnico, cunife, cunico, etc.
8. Metales refractarios como W, Rh, Ta, Mo. Nb, Zr, Hf, etc.
9. Aplicaciones espaciales.
10. Aplicaciones nucleares.
11. Materiales de fricción y anti-fricción.

La figura 2 presenta algunas piezas producidas por pulvimetalurgia.

Olán Suárez Hermenegildo
Pérez Sandoval Felipe

1. CARACTERISTICAS Y PRODUCCION DE LOS POLVOS METALICOS

1.1. CARÀCTERISTICAS

Los polvos metálicos son aleaciones o metales puros finamente divi didos en partículas, producidas por diferentes métodos, cada uno de los - cuales les confiere características propias muy particulares. En la Tabla I se resumen las principales características a tomar en cuenta (1).

Enumerando algunas de estas propiedades, se tienen (2) :

1. Forma .- La cual depende básicamente del método de fabricación, obteniéndose formas esféricas, aciculares, irregulares, dendríticas, fragmentadas, en forma de escama, etc., teniendo influencia en la - densidad, área superficial, permeabilidad, fluidez, etc.

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

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

4. Area Superficial .- Es una característica que depende de la forma y porosidad, teniendo una partícula irregular mayor área que una esférica de igual tamaño.

5. Actividad (reactividad) . - Es una propiedad que determina la - velocidad de difusión, la velocidad de absorción y reacciones similares; es incrementada por la disminuación de tamaño y depende de la forma, rugosidad, porosidad, etc.

6. Pureza . - Los polvos comerciales están disponibles en varios - grados de pureza; pero generalmente el metal base tiene una pureza mínima de 97.5% y para la mayoría de las aplicaciones los rangos van desde 98.5% hasta 99.5% ó más.

Entre las propiedades de masa se pueden ver:

a. Tamaño medio de partícula . - Considerado como el promedio estadístico del tamaño de las partículas en la masa.

b. Superficie específica . - Se define como el área superficial de - un gramo de polvo.

c. Fluidez . - Es un factor que afecta la uniformidad de llenado del - molde, la velocidad de producción y la densidad de la pieza y es función del tamaño y forma de la partícula.

d. Densidad aparente . - Es el peso por unidad de volumen del pol-

TABLA I

PROPIEDADES DE LOS POLVOS METALICOS

1. Características del Material

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

2. Características debidas al proceso de Fabricación

a) Densidad (porosidad)
b) Tamaño de partícula
c) Forma
d) Area superficial
e) Condición superficial
f) Microestructura
g) Reactividad
h) Tipo y cantidad de defectos de red
i) Contenido de gas dentro de la partícula
j) Capa gaseosa adsorbida
k) Cantidad de superficie oxidada

3. Características de masa

a) Tamaño medio de partícula
b) Distribución de tamaños
c) Forma promedio de partícula
d) Distribución de las formas
e) Superficie específica
f) Densidad aparente
g) Densidad semi-compactada
h) Fluidez
i) Compresibilidad

vo suelto. Los espacios vacios entre partículas pueden variar ampliamente y son un factor importante en la compactación.

e. Compresibilidad . - Es una característica muy importante en la compactación, aunque su utilidad está limitada por la complejidad de los factores que la determinan, sin embargo, es deseable la mayor compresibilidad.

En las gráficas de las figuras 3 a 5 se pueden observar algunas relaciones de las características mencionadas.

Cuando se va a escoger un tipo de polvo para una aplicación específica, se deben considerar las características antes mencionadas para lograr una selección adecuada a los requerimientos exigidos y aunque se pueden emplear mezclas de polvos producidos por diferentes métodos, generalmente - las especificaciones se pueden satisfacer por un polvo obtenido en alguno de- los métodos simples de producción.

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

1) TAMAÑO DE PARTICULA. La caracterización del tamaño de partículas es un problema (3) difícil de resolver, pues está influenciado por muchos factores; se han desarrollado muchas técnicas, las cuales se enlistan en la Tabla II, con sus respectivos rangos de aplicación.

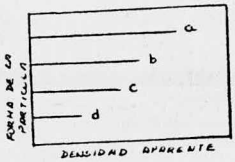
2) FORMA DE LA PARTICULA. El conocimiento de la forma de la - partículas es de vital importancia para la selección adecuada del método de medición del tamaño. Y debido a las diferentes formas que de - acuerdo a los procesos de fabricación presentan las partículas, Tabla III y figura 6, los criterios son diversos, (4) sin embargo, lo mejor es la inspección visual con luz normal ó microscopio electrónico y el uso de fotomicrografías.

3) AREA SUPERFICIAL ESPECIFICA. Debido a que las reacciones en la sinterización se inician en las superficies de las partículas, es- importante considerarla. Se expresa en cantidad de área por unidad de peso (cm^2 / gm) y varía con el tamaño de partícula, empleándose métodos experimentales de permeabilidad y adsorción; por su precisión se usan más los de adsorción de gases. En la Tabla IV se dan los datos típicos de área específica para polvos producidos por va-- rios procesos.

4) DENSIDAD SEMI-COMPACTADA Y DENSIDAD APARENTE. Desde un punto de vista práctico, estas características representan un - aspecto básico para el diseño del equipo. La densidad aparente, definida anteriormente como el peso de una unidad de volumen de polvo - suelto expresado en gm/cc, determina el tamaño de la herramienta

Figura No. 3

EFECTO DEL TAMAÑO DE PARTICULA SOBRE LA DENSIDAD
a) DENSIDAD APARENTE
b) DENSIDAD SEMI COMPACTADA



a) ESFERICA
b) REDONDEADA
c) IRREGULAR
d) DENDRITICA

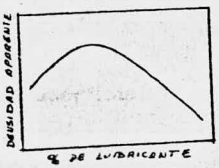
Figura No. 4

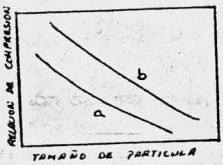
a) FORMA ESFERICA
b) FORMA IRREGULAR
c) FORMA DENDRITICA

a) PARTICULA OXIDADA
b) PARTICULA NO OXIDADA

a) HUMEDAD
b) TEMPERATURA

Figura No. 5





a) PARTICULA NO OXIDADA
b) PARTICULA OXIDADA

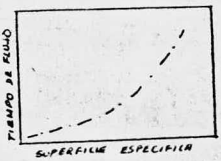


TABLA II

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

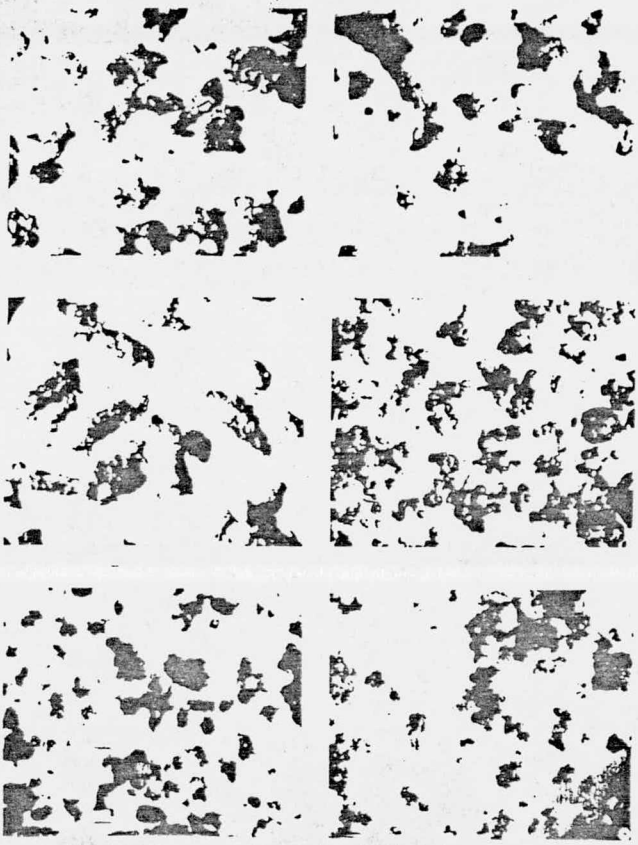
CLASE	METODO:	RANGO (u)
1) Mallas	Malleo con agitación mecánica	44 – 800
	Micro mallas	5 – 50
2) Microscopio	Luz visible	0.2 – 100
	Electrónico	0.001 – 5
3) Sedimentación	Gravitacional	1 – 250
	Centrífuga	0.05 – 60
4) Turbidimetria	Turbidimetria (medición de la atenuación de la intensidad de la luz)	0.05 – 500
5) Elutriacion	Elutriación	5 – 50
6) Resistividad Electrolitica	Contador coulter	0.5 – 800
7) Permeabilidad	Medidor Fisher	0.2 – 50
8) Area Superficial	Adsorción de una fase Gaseosa	0.01 – 20
	Adsorción de ua fase líquida	0.01 – 50

TABLA III

FORMA DE LA PARTICULA DE ACUERDO CON EL METODO DE FABRICACION

FORMA:		PROCESO:
a)	Acicular	Descomposición química
b)	Dendritica	Electrolisis
c)	Esférica	Descomposición de Carbonilo
d)	Angular	Desintegración mecánica, descomposición de $Ni(CO)_4$.
e)	Irregular	Atomización, descomposición química
f)	Irregular alargada	Descomposición química, desintegración mecánica
g)	Escama	Desintegración mecánica
h)	Redondeada	Atomización, descomposición química.
j)	Porosa	Reducción de óxidos

FIGURA No. 6



FORMAS DIFERENTES DE POLVOS METALICOS

TABLA IV

AREAS SUPERFICIALES ESPECIFICAS DE POLVOS COMERCIALES

	POLVO	A.S.E. (cm^2/ gm)
1.	Fe REDUCIDO	
	Fino, 79% - 325 mallas	5160
	Mezclado normal	1500
	Grueso, 1% - 325 mallas	516
2.	Fe ESPONJA	
	Mezclado normal	800
3.	Fe ATOMIZADO	
	Mezclado normal	525
4.	Fe ELECTROLITICO	
	Mezclado normal	400
5.	Fe DE CARBONILO	
	7 Micrones de tamaño	3460
6.	W REDUCIDO	
	0.6 Micrones de tamaño	5000
7.	Ni PRECIPITADO	
	6 Micrones de tamaño	3000

de compactación y la magnitud de desplazamiento de la prensa para lograr la densificación adecuada. Algunas variables que afectan la densidad aparente son :

a) La densidad aparente decrece :

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

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

La densidad semi-compactada (tap-density) es aquella que se obtiene sometiendo a la masa de polvo a una compactación que puede ser manual ó mecánica por medio de vibraciones ó golpeando el recipiente para asentar el polvo. Los métodos son variados, pero se reconoce la necesidad de una buena reproducibilidad (5) y es importante cuando los polvos se ven sometidos a almacenaje y transporte.

La Tabla V muestra las densidades aparentes de varios polvos y la Tabla VI compara las diferencias entre las densidades aparente y semicompactada debido a la compactación.

5) FLUIDEZ DEL POLVO. La rapidez de alimentación del polvo y el llenado del molde es fundamental para obtener altas velocidades de producción. Una expresión que dá la velocidad del polvo es :

$$U = Kc/pSR \quad \text{-------} \quad (1)$$

donde :

U = Velocidad de polvo .
K = Constante de proporcionalidad .
c = Cte que representa el tamaño y forma del orificio .
p = Densidad de la partícula .
S = Area superficial específica .
R = Factor dependiente de la rugosidad de la partícula .

Para la práctica con polvos reales, el factor importante es la densidad aparente que influye : a mayor densidad aparente menor tiempo de flujo.

6) COMPRESIBILIDAD . Debido a la dificultad de cuantificar el valor de compresibilidad para un polvo dado, es de manejo limitado. Expresa la cantidad de polvo que se comprimirá con la aplicación de presión. J.S. Hirschhorn (3) ha propuesto la definición siguiente de la compresibilidad en términos de un parámetro de densificación dado por :

$$P.D. = \frac{D.P. - D.A.}{D.T. - D.A.} \quad \text{----} \quad (2)$$

donde :

P.D. = parámetro de densificación

TABLA V

DENSIDADES APARENTES PARA VARIOS POLVOS

	MATERIAL	DIAMETRO PROMEDIO DE PARTICULA (μ)	DENSIDAD APARENTE (g / cc)
1.	ALUMINIO ATOMIZADO	5.8	0.62
		6.8	0.75
		15.5	0.98
		17.0	1.04
		18.0	1.09
	60% ARRIBA DE:	44.0	1.22
	70% ARRIBA DE:	44.0	1.25
2.	NIQUEL DE CARBONILO	3.2	0.61
	PRECIPITADO	3.5	1.80
	PRECIPITADO		3.60
	MALLA - 40 + 325	-	
3.	WOLFRAMIO	1.20	2.16
		2.47	2.52
		3.88	3.67
		26.00	10.20
4.	HIERRO		
	REDUCIDO	6.0	0.97
	DE CARBONILO	7.0	3.40
	ELECTROLITICO	53.0	2.05

TABLA VI

COMPARACION ENTRE LA DENSIDAD APARENTE Y SEMICOMPACTADA

MATERIAL	D.A. (g/cc)	D.S. (g/cc)	INCREMENTO (%)
a) COBRE			
ESFERICO	4.5	5.3	18
IRREGULAR	2.3	3.14	35
ESCAMA	0.4	0.7	75
b) HIERRO			
ELECTROLITICO	3.31	3.75	13
ATOMIZADO	2.66	3.26	23
ESPONJA	2.29	2.73	19
c) ALUMINIO			
ATOMIZADO	0.98	1.46	49

D.P. = densidad en prensado
D.A. = densidad aparente
D.T. = densidad teórica

Este parámetro representa la densidad fraccional obtenida con respecto a la máxima posible. La Tabla VII relaciona la densidad en prensado y aparente con el parámetro de densificación para polvos de hierro. Se ha observado que la compresibilidad se incrementa al aumentar la densidad aparente.

Otro aspecto importante de la compresibilidad es el factor conocido como : RAZON DE COMPRESION, definido así :

$$R.C. = \frac{\text{VOLUMEN DEL POLVO SUELTO}}{\text{VOLUMEN DEL COMPACTO}} \quad \text{---(3)}$$

es conveniente tener un R.C. bajo porque :

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

7) PIROFORICIDAD. Debido a la elevada superficie presentada por los polvos, respecto a su volumen, se puede presentar el problema de piroforicidad, es decir una ignición u oxidación espontánea sumamente exotérmica hasta niveles de explosión; ésto representa un inconveniente en el manejo de los polvos y requiere de medidas de seguridad adecuadas. La Tabla VIII resume las características de piroforicidad para varios polvos comerciales.

8) TOXICIDAD. La toxicidad de algunos metales ha sido reconocida y estudiada ampliamente, pero ahora con el empleo masivo de los polvos metálicos, esta característica cobra una mayor importancia. No sólo afecta la naturaleza tóxica del metal, sino también su estado físico; ya que las partículas finas tienen la habilidad de quedar suspendidas en la atmósfera, principalmente partículas menores de 2 micrones no se asientan. En la Tabla IX se muestran las velocidades de asentamiento en función del tamaño de las partículas (6). Este hecho manifiesta la necesidad de un control estricto de la atmósfera de trabajo, porque el efecto de algunos polvos es acumulativo. La Tabla IX-A muestra los niveles máximos permisibles de polvo a los que se puede exponer el personal durante una jornada de trabajo de 8 horas.

Los metales pueden dividirse (7) en tres grupos, dependiendo del grado de afección de varios órganos y por proceso patológico:

Grado uno: Aerosoles metálicos que causan fenómenos patológicos primero en los órganos respiratorios : Fe, W, Nb, Sn, etc.

Grupo dos : Metales que afectan los órganos respiratorios y causan

TABLA VII

COMPRESIBILIDAD DE POLVOS DE HIERRO COMERCIALES

TIPO	D.A. (g/cc)	D.P. (g/cc) (4.65 t/cm^2)	P.D.
REDUCIDO	2.35	6.10	0.679
REDUCIDO	2.35	6.35	0.725
ESPONJA	2.40	6.20	0.695
ATOMIZADO Y REDUCIDO	2.45	6.45	0.738
ESPONJA ATOMIZADO	2.47	6.55	0.755
REDUCIDO	2.50	6.50	0.745
ESPONJA	2.60	6.60	0.759
ATOMIZADO	2.90	6.70	0.764

NOTA: LA DENSIDAD TEORICA PARA EL CALCULO DEL PARAMETRO DE DENSIFICACION SE TOMO COMO: 7.87 g/cc

10

TABLA VIII

CARACTERISTICAS DE IGNICION Y EXPLOSION DE VARIOS POLVOS

MATERIAL	TAMAÑO (μ)	TEMP. IGNICION (°C)	CONC. MINIMA DE EXPLOSION (Kg/m^3)
ALUMINIO ATOMIZADO	- 44	760	0.045
ALEACION A1 - Mg	- 44	480	0.020
MAGNESIO	- 74	490	0.040
ZIRCONIO	3	190	0.045
TITANIO	10	510	0.045
URANIO	10	100	0.060
TORIO	7	280	0.075
BORO	- 44	400	- 0.100
CROMO	- 44 (98%)	400	0.230
MANGANESO	- 44	240	0.125
TANTALIO	- 44	300	- 0.200
ESTAÑO	- 53 (96%)	430	0.190
PLOMO	- 53	270	-
MOLIBDENO	- 74	360	-
COBALTO	- 44	370	-
WOLFRAMIO	- 74 (99%)	470	-
BERILIO	1	540	-
COBRE	- 44 (98%)	-	-

NOTA: LA TEMPERATURA DE IGNICION ES PARA UNA CAPA DE POLVO, YA QUE TAMBIEN HAY OTRA PARA POLVO EN FORMA DE NIEBLA. NO ES VALIDA PARA POLVOS SUB-MICRONICOS.

Tabla 7

TABLA IX

VELOCIDAD DE ASENTAMIENTO DEL POLVO EN FUNCION DE SU TAMAÑO (1)

TAMAÑO (μ)	VELOCIDAD DE ASENTAMIENTO (Por segundo)	(Por Hora)
100	78.6 cm.	2830 m
10	7.86 mm.	28.3 m
1	0.078 mm.	0.283 m

Tabla 8

TABLA IX - A

(2)

CONCENTRACION MAXIMA PARA UNA EXPOSICION DE 8 HORAS

MATERIAL	CONCENTRACION (MICROGRAMOS/M^3)
PLUTONIO	0.0001
BERILIO	2.0
CARBONILO DE NIQUEL	7.0
URANIO	80.0
CADMIO	100.0
OXIDO DE CROMO	100.0
MERCURIO	100.0
TELURIO	100.0
TORIO	110.0
PLOMO	150.0
ARSENICO	500.0
OXIDO DE ZIRCONIO	5000.0
OXIDO DE HIERRO	15000.0
OXIDO DE TITANIO	15000.0
OXIDO DE ZINC	15000.0

defectos funcionales de los órganos internos: Cr, Mo, V, Ni, Co, Cu, Ag, Cd, etc.

Grupo tres: Metales que causan un efecto tóxico que puede provocar envenenamiento crónico ó agudo: Hg, Pb, As, Mn, Be, etc.

1.2 PRODUCCION DE POLVOS METALICOS

Cada uno de los métodos de producción de polvos tiene peculiaridades propias tales como: economía, limpieza, flexibilidad, propiedades fisicoquímicas, etc., que lo hacen adecuado para diferentes propósitos; sin embargo, es posible delinear algunos principios generales, aplicables a la producción de polvos metálicos (8).

1. Los polvos (para usos metalúrgicos) deben ser comparativamente baratos. Su costo de manufactura debe compararse - más o menos favorablemente con el del material convencional. Por supuesto, esta regla no se puede aplicar a materiales preciosos o exóticos tales como: plata, oro, platino, -- wolframio, berilio, etc.
2. El rendimiento del proceso no deberá ser menor del 75% de polvo de grado comercial.
3. El método debe de ser de tal manera que pueda fácilmente - mantener la composición química, análisis de mallas, densidad aparente, compresibilidad, fluidez, etc., dentro de los límites estipulados.

1.2.1 METODOS DE PRODUCCION

Los métodos empleados en la producción de polvos se pueden dividir en dos grandes grupos:

A) Métodos mecánicos:
   1. Pulverización mecánica de metales sólidos.
   2. Pulverización mecánica de metales fundidos.

B) Métodos fisicoquímicos:
   1. Reducción directa de compuestos metálicos.
   2. Depositación electrolítica.
   3. Hidrometalúrgicos.
   4. Descomposición térmica.

1.3 METODOS MECANICOS

El principio básico de estos métodos, es suministrar energía por - medios mecánicos, para producir la separación del metal en partículas.

1.3.1 PULVERIZACION MECANICA DE METALES SOLIDOS

Es importante aclarar que la reducción mecánica de sólidos, es comúnmente empleada para la obtención de granulometrías específicas como - etapa secundaria; por otros procesos de producción de polvos metálicos.

El metal a molturar, puede tener una naturaleza frágil ó dúctil; —

generalmente cuando se trata de metales dúctiles el propósito más que una reducción, es un cambio de forma como es la producción de escamas de - Au, Zn, Ni, Ag, Sn, Al, Cu, Pd, Er, etc. (9). La fig. 7 muestra el esquema de proceso para escama de Al.

Actualmente la aplicación de la pulverización mecánica de sólidos como método primario, es muy específica a metales que no pueden ser - granulados de otra manera; ya sea por motivos económicos ó técnicos - tales como:

a) Metales puros fácilmente fracturables, Cr, Sb, Bi, Mn, - Si; aleaciones duras, materiales cerámicos, etc.

b) Materiales reactivos como Be, Hidruros metálicos preparados en ausencia de oxígeno, Mg, etc.

El método más común es la molienda, el cual de acuerdo a la granulometría de trabajo se puede dividir en molienda gruesa, media y fina (10).

Gruesa: alimentación desde 5 a 250 cm. ó más.
Media: alimentación de 2 a 8 cm.
Fina: alimentación de 0.5 a 1.5 cm.

En la molienda gruesa dependiendo si el material es duro ó blando se tiene; para duros (dureza Mohs mayor de 4): Quebrantadoras de -- mandíbulas, giratorios. Para materiales blandos (dureza Mohs menor - de 4): se emplean: Desintegrador centrífugo, de rodillo dentado, de -- martillos.

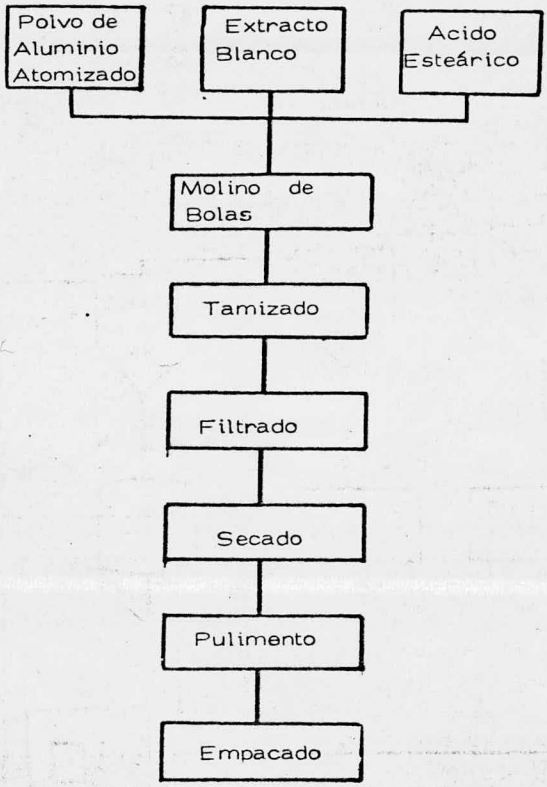
En la molienda media se emplean: Trituradores de cono, de rodillos, molinos de mazos.

La molienda fina se realiza con: Molino chileno, molino de corona trituradora, de bolsas, de barras, molino giratorio, molino jet.

En la pulverización moderna se está empleando con éxito comercial el proceso denominado de "Corriente fría " (11). en el cual el - material ya de ciertos tamaños, se fluidiza en una corriente de aire a - una presión de 70.30 kg/cm^2 y se introduce a una cámara donde sufre una expansión adiabática, lo que mantiene baja la temperatura y evita la - oxidación, el material se pulveriza entre sí o contra una placa de igual - composición para evitar contaminación. Una gran ventaja de este método es que el material puede ser dúctil ó quebradizo: se producen polvos de acero inoxidable. Fig. 8

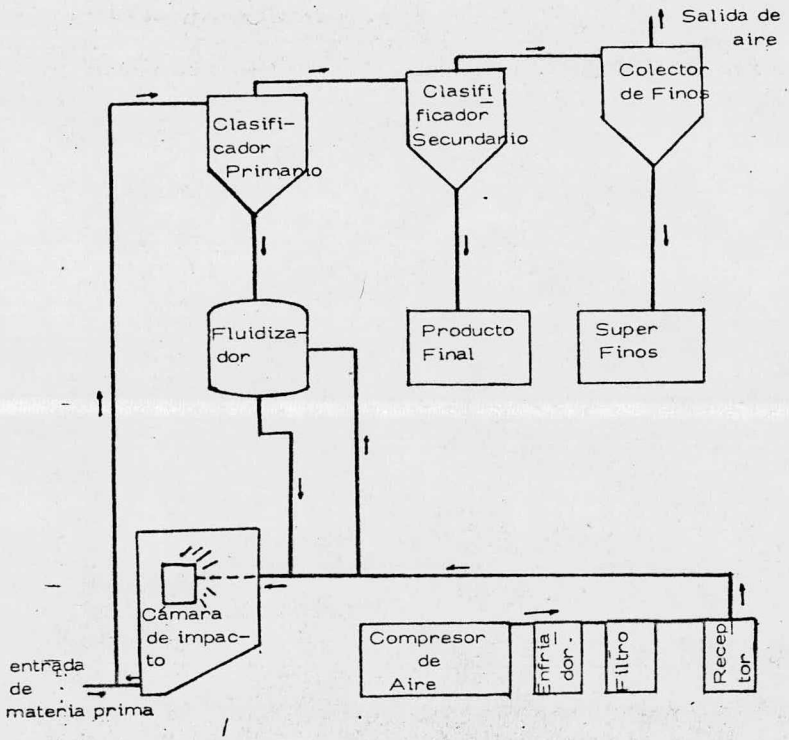
Se ha mencionado el empleo de la molienda en otros procesos de producción de polvos, lo que es de hecho una etapa normal en la mayoría de ellos como, atomización, reducción, polvos electrolíticos, etc. Sin embargo, se debe mencionar el uso de la molienda para otros fines

FIGURA No. 7



ESQUEMA DEL PROCESO PARA PRODUCIR POLVO DE ALUMINIO EN ESCAMAS

Figura No. 8



PROCESO DE "CORRIENTE FRIA"

más específicos, como son:

a) Para producir partículas duras recubiertas de un metal suave, por ejemplo: W con Co, WC con Co, etc.

b) Producción de "aleaciones mecánicas"; éste es un proceso reciente (12, 13) para producir polvos metálicos compuestos, con una estructura uniforme e íntimamente dispersada. Por medio de un atritor, Fig. 9.

En las tablas X, XI se dan algunas variables de la molienda con bolas y algunos datos obtenidos para aluminio y en las figuras 10, 11, se esquematizan algunas relaciones.

También se muestran en las figuras 12, 13, 14, algunos tipos de molinos.

FIGURA No. 9

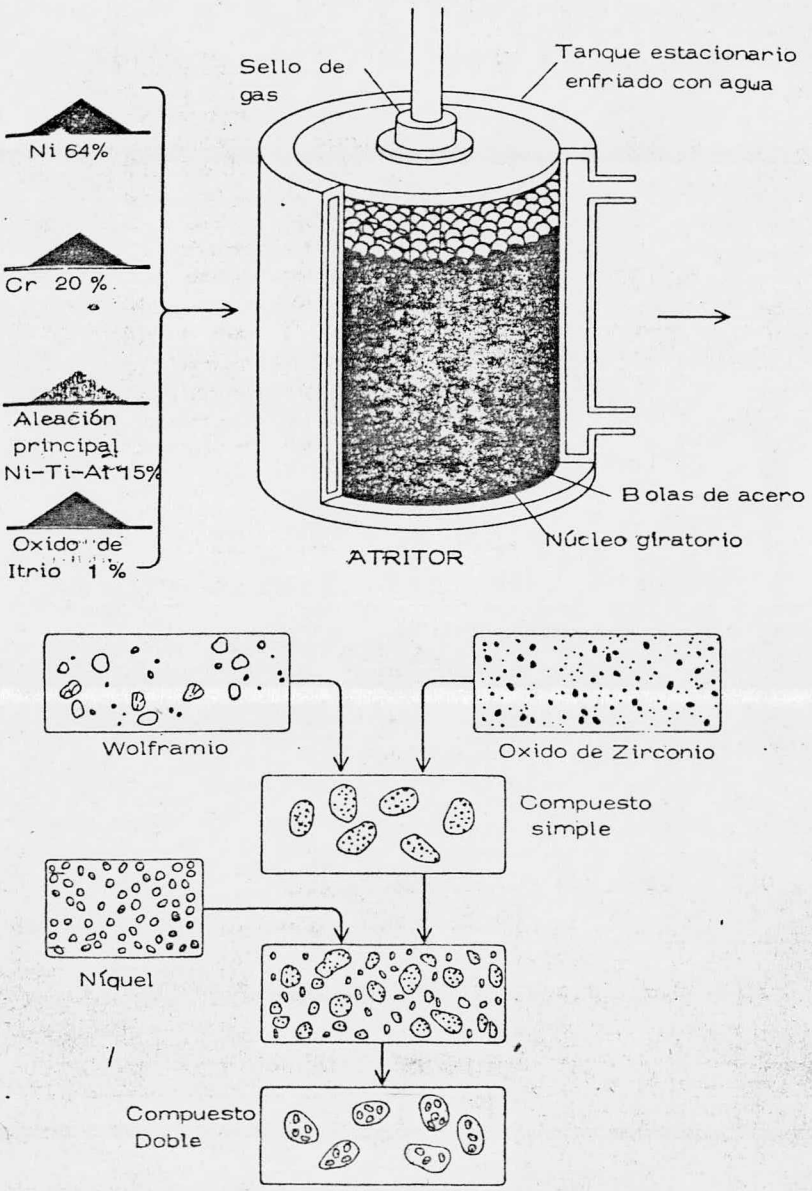


DIAGRAMA DEL MECANISMO DE PRODUCCION DE ALEACIONES MECANICAS.

TABLA X

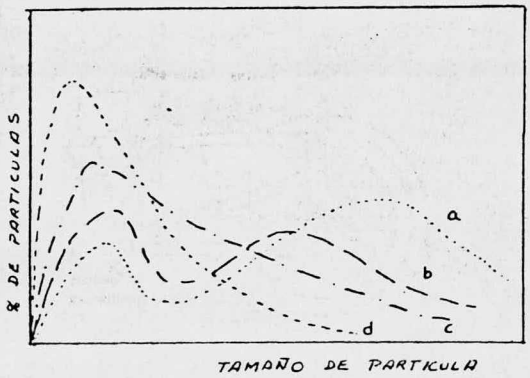
ALGUNAS VARIABLES PARA EL PROCESO CON MOLINO DE BOLAS

1. Tamaño del molino .
2. Velocidad del molino (RPM)
3. Tiempo de molienda .
4. Material de las bolas .
5. Cantidad de bolas .
6. Tamaño de las bolas .
7. Cantidad de material a moler.
8. Medio de la molienda:
   a) En seco (tipo y pureza de la atmósfera)
   b) En húmedo (tipo y pureza del medio)
9. Tamaño original del material .
10. Cociente de cantidad de material a volumen del molino.
11. Cantidad de material a cantidad de bolas.

TABLA XI

	TIEMPO DE MOLIENDA (HORAS)						
	0	25	50	100	150	200	250
Tamaño promedio de partícula	5.8	4.5	3.4	2.3	2.1	2.0	1.8
Contenido de Oxido (%)	0.8	2.3	3.4	4.1	6.0	7.0	8.0

Figura No. 10



MOLTURACION MECANICA DE POLVOS

a) DISTRIBUCION ORIGINAL DEL TAMAÑO DE PARTICULA

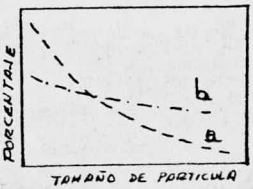
b, c, d) REPRESENTAN TIEMPOS CRECIENTES DE MOLIENDA

Figura No. 11

$t_1 > t_2 > t_3$

a) VELOCIDAD ALTA DE MOLIENDA

b) VELOCIDAD BAJA DE MOLIENDA

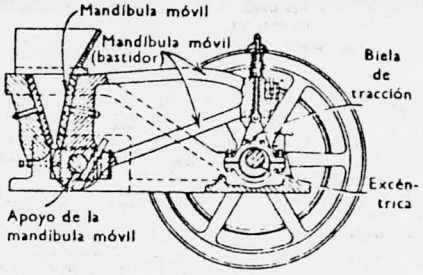


a) PESO TOTAL ALTO DE BOLAS

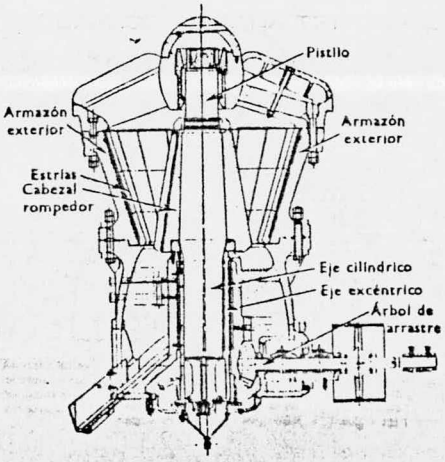
b) PESO TOTAL BAJO DE BOLAS

(Nº BOLAS CTE.)

FIGURA No. 12

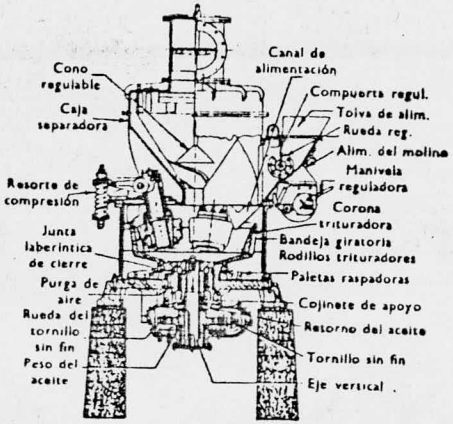


QUEBRADORA DE MANDIBULAS

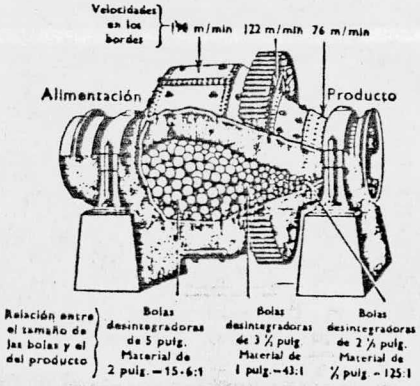


TRITURADOR DE CONO

FIGURA No. 13

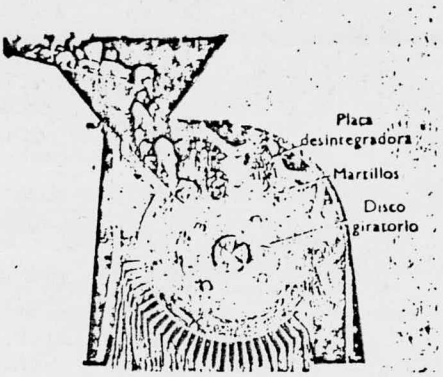


MOLINO DE CORONA TRITURADORA

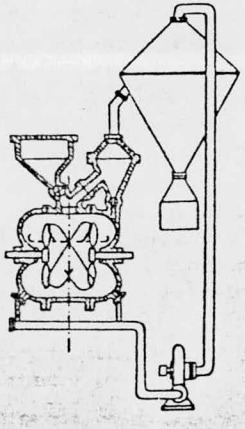


MOLINO DE BOLAS

FIGURA No. 14



MOLINO DE MARTILLOS



MOLINO DE HELICE

1.3.2 PULVERIZACION MECANICA DE METALES FUNDIDOS

La desintegración mecánica del material en estado líquido, se ha aplicado con éxito a una gran variedad de metales y aleaciones. Los métodos usados son:

1. Granulación
2. Choque Térmico
3. Atomización
   a) Líquido
   b) Gas
4. Electrodo Rotatorio
5. Otros

1.3.2.1 GRANULACION :

Consiste en agitar continuamente por medio de un dispositivo mecánico el baño metálico, mientras éste se enfría. Las condiciones de agitación determinan la granulometría; se emplea para metales de bajo punto de fusión, actualmente no es usado en la producción masiva de polvos.

1.3.2.2 CHOQUE TERMICO

Se puede considerar como el antecedente de la atomización, ya que tiene ciertas similitudes. La desintegración de un chorro de metal al entrar en contacto con agua contenida en un recipiente. Este método fué estudiado por A.E. Smith (14), abarcando Cu, Zn, Ni, Au, Ag, latón y aleaciones de níquel. Tampoco se emplea comercialmente.

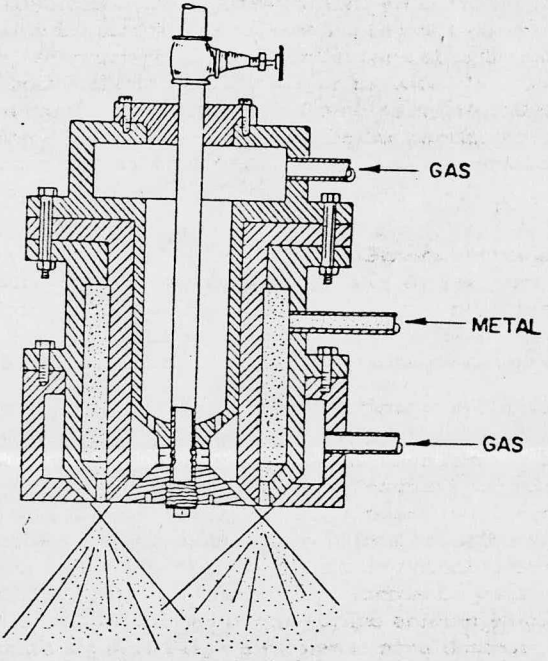
1.3.2.3 ATOMIZACION :

Este es un método que en recientes años ha ido ganando terreno en la producción de polvos, principalmente de hierro (15), aceros, aceros inoxidables, altamente aleados, aleaciones especiales, de níquel, cobalto, etc., (16 a 23). Además de metales no ferrosos, Al, Cu, Zn, Cd, Pb, Sn y sus aleaciones (24 a 30). Fig. 15

Las principales ventajas y facilidades (15) que han hecho de la atomización un proceso común son:

1. Composición uniforme, cada una de las partículas tiene una composición similar, eliminando los problemas de segregación y de variación del tamaño de grano.
2. Facilidad para producir aleaciones, prácticamente cualquier tipo de aleación se puede hacer con esta técnica.
3. Control de la forma, tamaño y estructura de las partículas por medio de un razonable control de las variables de proceso.
4. Mayor pureza; es un método limpio que reduce la cantidad de inclusiones no metálicas, mejorando las propiedades de los

Figura No. 15



EQUIPO PARA ATOMIZAR

polvos.

5. Economía, la gran capacidad de producción y el hecho de que la atomización es un simple añadido al proceso convencional de fusión de metales, le dan esta característica.

Se han realizado amplios estudios (15, 31 a 34) sobre atomización que han permitido comprender mejor las relaciones de las variables con las características de los polvos; la Tabla XII sumariza los principales parámetros de la atomización, en la figura 16 se muestran los resultados obtenidos por Small y Bruce (35); en atomización con gas, se requiere menor presión para obtener partículas menores y con sobrecalentamiento y mayor presión, la atomización con agua produce partículas más finas. Como se ha mencionado anteriormente, la forma, tamaño y estructura de las partículas, son características básicas; en la Tabla XIII se dan algunas variables que influyen sobre ellas.

A) ATOMIZACIÓN CON LIQUIDOS : Generalmente el agente atomizador es agua, aunque A. Domsa (31) sugiere el uso de líquidos inertes para evitar la oxidación, por ejemplo kerosene. En la práctica es agua y se emplea la atomización con gas inerte para lograr bajos contenidos de oxígeno.

Debido al rápido enfriamiento, se producen partículas sólidas irregulares, pero incrementando el sobrecalentamiento y reduciendo la presión es posible obtener formas casi esféricas. Las partículas tienen poca ó nada de porosidad y están formadas de granos muy finos. A pesar de su economía sólo se puede aplicar a metales con óxidos reducibles, ya que posterior a la atomización se realiza un recocido en atmósfera reductora, eliminando los óxidos formados y suavizando las partículas endurecidas por el rápido enfriamiento, generalmente se sigue una ligera molienda para destruir las masas sinterizadas producidas en el recocido.

B) ATOMIZACIÓN CON GASES : Los gases empleados pueden ser: argón, nitrógeno ó aire. Para materiales altamente aleados, se usa el gas inerte, por ejemplo : super aleaciones a base de níquel, aceros inoxidables, etc.; el aire se emplea para atomizar aluminio, hierro (proceso RZ) etc., la forma de las partículas es esférica.

1.3.2.4 PROCESO DEL ELECTRODO ROTATORIO :

El material al ser pulverizado, se encuentra en forma de una barra, la cual se hace rotar, siendo fundida en el frente por un arco de plasma, el metal fundido es dispersado dentro de una cámara llena de helio, las partículas son esféricas, libres de porosidad y defectos superficiales, el rango de tamaños es de 30 a 500 micrones, bajo

9

TABLA XII

PRINCIPALES PARAMETROS EN LA ATOMIZACION

1. METAL
   a) Química del metal
   b) Viscosidad
   c) Tensión superficial
   d) Rango de temperaturas de fusión
   e) Velocidad de alimentación
   f) Geometría del orificio de salida

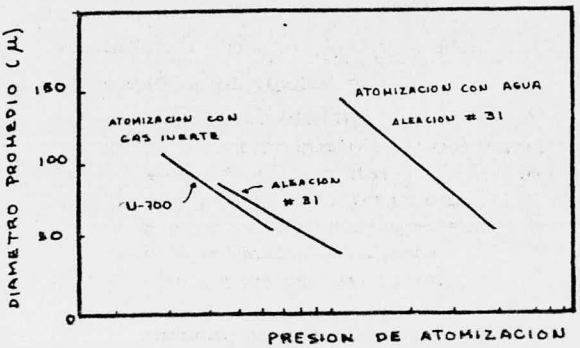
2. AGENTE ATOMIZADOR
   a) Gas ó líquido
   b) Presión
   c) Flujo
   d) Velocidad
   e) Viscosidad

3. GEOMETRIA DEL JET
   a) Dispersión
   b) Distancia recorrida hasta impactar el chorro de metal
   c) Longitud del chorro de metal hasta el impacto
   d) Angulo de los jets.

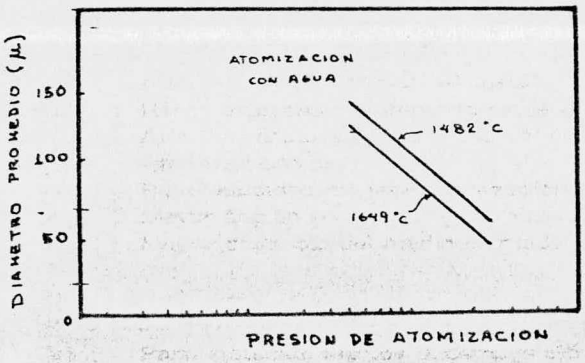
4. MEDIO ENFRIADOR
   Distancia del impacto al medio enfriador

5. ATMOSFERA EN EL METAL Y EN LA CAMARA DE ATOMIZACION

Figura No. 16



EFECTO DE LA PRESION DE ATOMIZACION SOBRE EL TAMAÑO DE PARTICULA, PARA ALEACIONES DE NIQUEL



EFECTO DE LA TEMPERATURA DE ATOMIZACION SOBRE EL TAMAÑO DE PARTICULA, PARA ALEACIONES DE NIQUEL

10

TABLA XIII

VARIABLES QUE INFLUYEN EN EL TAMAÑO, FORMA Y ESTRUCTURA DE LAS PARTICULAS EN LA ATOMIZACION

1. TAMAÑO

Para obtener partículas más finas :

a) Baja viscosidad del metal
b) Baja tensión superficial del metal
c) Menor flujo de metal
d) Alta presión de atomización
e) Elevado volumen de agente atomizador
f) Alta velocidad del agente
g) Alta viscosidad del agente
h) Distancia corta entre el chorro de metal y la boquilla atomizadora
i) Longitud pequeña del chorro de metal entre la boquilla de salida y el impacto con el jet
j) Angulo óptimo de los jets

2. FORMA

La esfericidad es favorecida por:

a) Alta tensión superficial del metal
b) Rango estrecho de temperatura de solidificación
c) Alta temperatura de atomización (atomización con agua)
d) Atomizar con gas
e) Baja velocidad del jet (atomización con agua)
f) Mayor ángulo entre jets (atomización con agua)
g) Mayor distancia del medio enfriador

3. MICROESTRUCTURA

a) Para sistemas inertes la composición es independiente del tamaño de partícula, pero en sistemas no inertes, pueden producirse reacciones entre el agente atomizador y/o el medio enfriador.
b) La segregación es prácticamente evitada
c) Se producen más cambios con:
   - Más altas temperaturas
   - Enfriamientos más lentos
   - Más altas presiones de atomización
d) La microestructura es función de la velocidad de solidificación
e) La atomización con agua produce más finas microestructuras.

contenido de oxígeno (hasta 30 ppm), se emplea para aleaciones - especiales, la pureza depende de la barra original. Fig. 17.

1.3.2.5 OTROS METODOS :

Se han desarrollado otros procesos, pero su aplicación es todavía - muy reducida y/O están bajo estudio, sin embargo, tienen potencial para su explotación comercial (36).

A) DESINTEGRACION ULTRASONICA : La adición de dispositivos ultrasónicos que ayuden a la atomización, se están investigando para producir polvos más finos y de formas controlables. Por ejemplo, esferas de diámetro promedio de 4 — micrones. En Suecia se ha diseñado un generador ultrasónico que no toca el chorro de metal y es capaz de operar en un rango de 60,000 - 120,000 cps.

B) ATOMIZACION POR CENTRIFUGACION: Esta técnica por - razones prácticas está restringida a materiales de bajo punto de fusión, Pb, Sn, Al, etc.

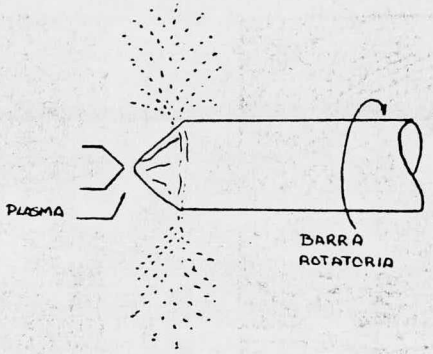
C) ATOMIZACION POR GASES SOLUBLES (Atomización por evolución de hidrógeno) : Consiste en utilizar un gas soluble en el metal líquido, el cual es vaciado en una cámara a vacío, el gas se dispersa y produce la desintegración del metal. El contenido de oxígeno es muy bajo. La forma no es controlable. Se emplea para aleaciones muy especiales.

D) PRODUCCION DE ESCAMAS POR ATOMIZACION Y ESTAMPADO (Splat-Cooled Atomized Foils) : Partículas finas — (menos de un micrón a 100 micrones), son impulsadas a - gran velocidad contra un sustrato metálico enfriador, logrando velocidades de enfriamiento del orden de 10^3 - 10^8 °C/ seg., produciendo estructuras de granos y dendritas, casi sin segregación y con espesores desde 1 a 50 micrones. La Tabla XIV// compara las propiedades de una aleación de aluminio preparado con este polvo, con resultados muy interesantes.

Las figuras 18 a 21 muestran las diferentes partículas producidas por algunos de los métodos presentados.

La Tabla XV// resume las composiciones químicas de polvos de hierro atomizados.

Figura No. 17



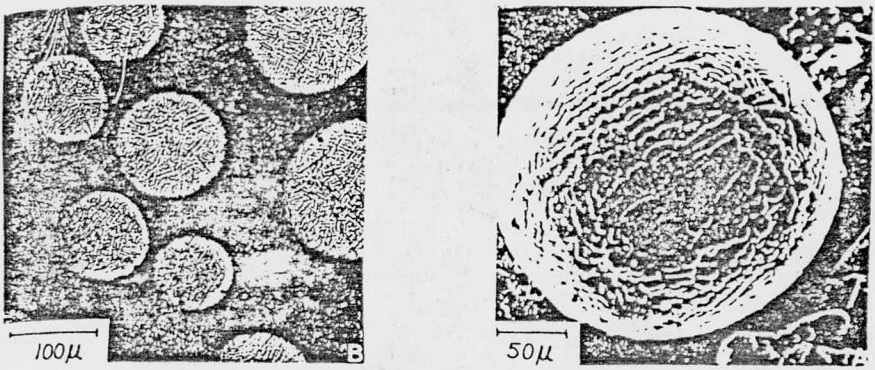
PROCESO DEL ELECTRODO ROTATORIO

TABLA XIV

PROPIEDADES DE RESISTENCIA A LA TRACCION Y FATIGA PARA LA ALEACION DE ALUMINIO 2024 TRATADA Y ENVEJECIDA EN FUNCION DE LA VELOCIDAD DE ENFRIAMIENTO DEL METAL LIQUIDO.

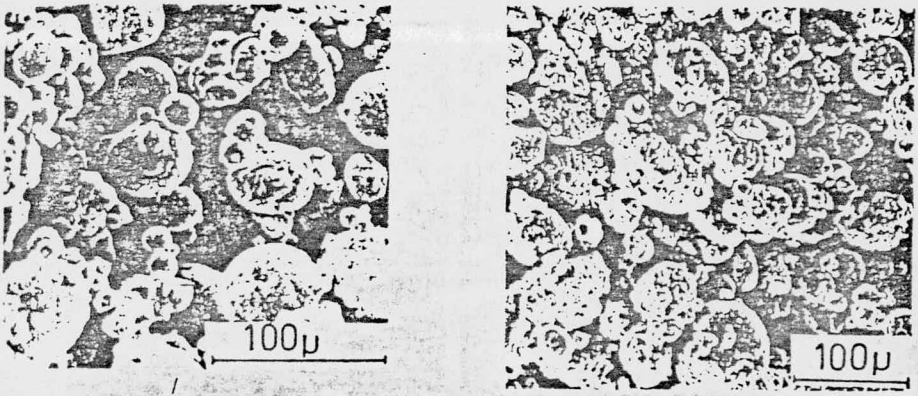
Proceso	Vel. Enf. °C / Seg.	Resist. a la Fluen. (0.2 %) Kg/mm^2	Resist. Máxi. Kg/mm^2	Elongación (%)	R.A. (%)	Fatíga (24.6 kg/mm^2 # Ciclos
Lingote	10^{-1}	28.26	47.24	23	37	100,000
Atom. por Centrif.	10^{2}	29.52	49.21	26	39	300,000
Atom. por Aplastamiento	10^{5}	33.04	53.43	22	34	700,000

FIGURA No. 18



SUPER ALEACION ATOMIZADA CON GAS INERTE

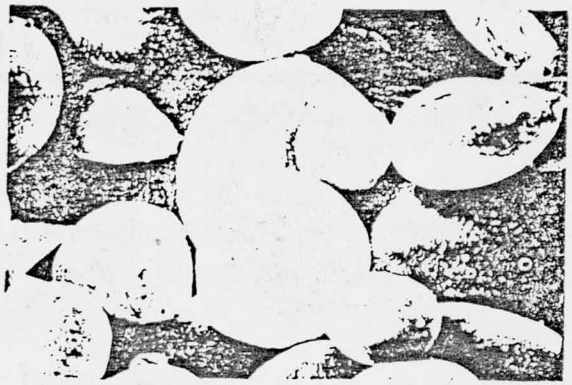
FIGURA No. 19



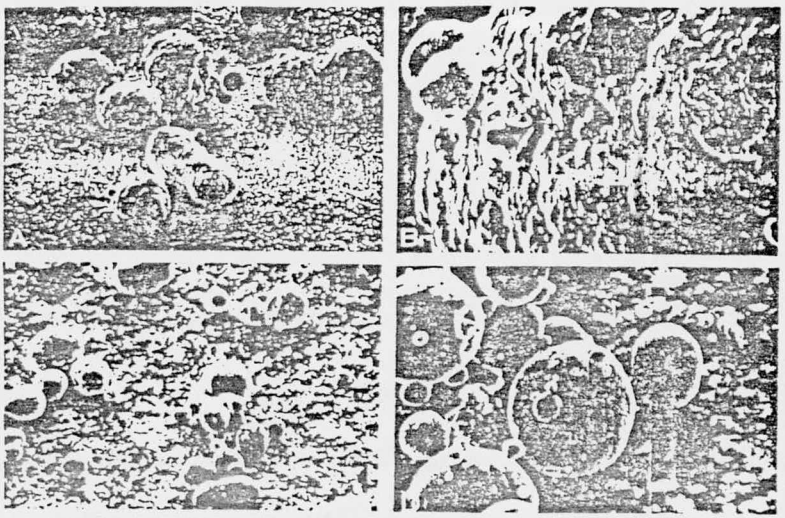
POLVO Ni-Fe ATOMIZADO CON AGUA

Fe ATOMIZADO CON AIRE

FIGURA No. 20 3

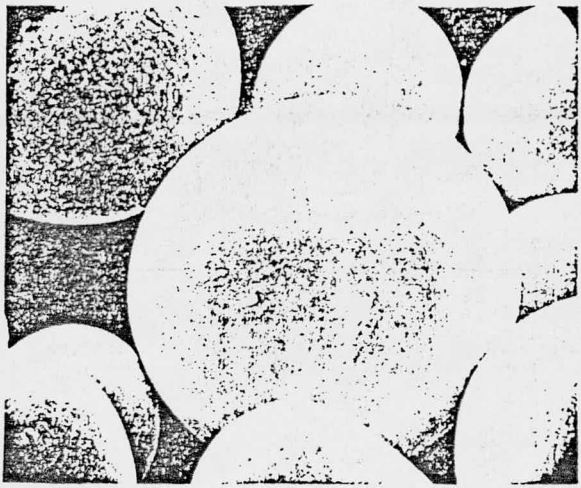


ALEACION ATOMIZADA CON GAS INERTE

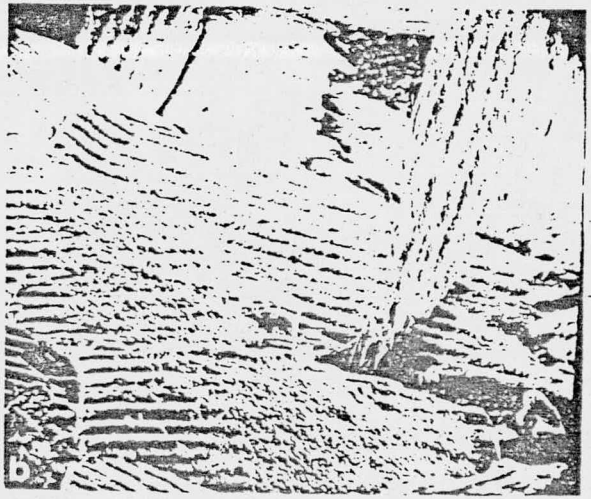


COBRE ATOMIZADO CON OXIGENO

FIGURA No. 21 4



ATOMIZACION CON ELECTRODO ROTATORIO



ESCAMAS PRODUCIDAS POR ATOMIZACION Y ESTAMPADO.

TABLA XV 12

COMPOSICIONES TIPICAS DE ALGUNOS POLVOS DE HIERRO ATOMIZADOS.

	Esponja	Esponja Recocido	Sólido Recocido
Hierro Total	98.7 %	99.2 %	99.7 %
Pérdidas por Higrógeno	0.80	0.45	0.11
Carbón	0.06	0.05	0.01
Fósforo	0.03	0.03	0.005
Azufre	0.03	0.03	0.01
Manganeso	0.14	0.14	0.14
Silicio	0.24	0.10	0.25

1.4 METODOS FISICOQUIMICOS

Son procesos que de una ú otra manera involucran cambios fisicoquímicos, reacciones, descomposiciones, etc., para producir polvos ó productos transformables a ellos mediante molienda ú otros medios. Se pueden clasificar de la siguiente forma:

a) Reducción directa de compuestos metálicos
b) Precipitación electrolítica
c) Procesos hidrometalúrgicos
d) Descomposición térmica

1.4.1 REDUCCION DIRECTA DE COMPUESTOS METALICOS

La reducción de compuestos metálicos, generalmente óxidos puede realizarse con un agente reductor sólido ó gaseoso. La reducción de óxidos de hierro para producir hierro esponja es una técnica muy antigua; Hoeganaes fué la primera empresa en suministrar polvos de hierro con este método. En la actualidad ha renacido el interés por estas técnicas (procesos de reducción directa), en la metalurgia convencional (37).

Los reductores empleados son gas natural reformado y carbón; y cuando el producto lo justifique hidrógeno.

Los polvos producidos, presentan un aspecto poroso típico, ya que las reacciones se llevan a cabo por difusión a través del sólido. Se pueden producir polvos de hierro, cobre (aunque no es el más empleado), wolframio, molibdeno.

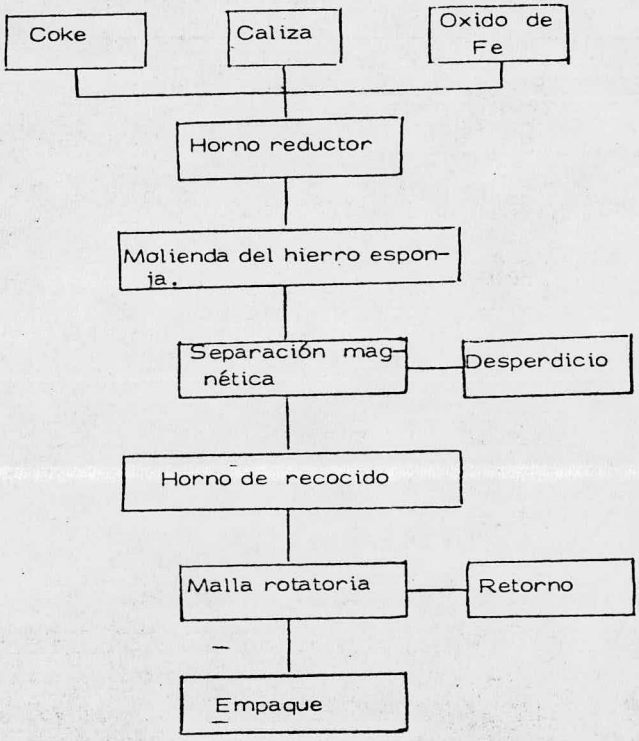
Una aplicación específica es el empleo de reductores metálicos como Ca y Mg para reducir óxidos que no se pueden con reductores comúnes, por ejemplo: óxidos de cromo, torio, uranio. Controlando las condiciones termodinámicas es posible la reducción selectiva de metales, produciendo partículas compuestas de metal-óxido. La figura 22 muestra el diagrama para reducción de óxidos de hierro con carbón.

En algunos procesos de atomización que emplean agua ó aire, se requiere una etapa de reducción de los óxidos formados, pero puede ó no requerirse reductor extra, ya que algunos de esos polvos llevan el reductor consigo (proceso Mannesmann, Domptar). En la Tabla XVI se dán las composiciones típicas de diferentes tipos de polvos de hierro. Una desventaja de estos métodos, es que su pureza está determinada por la de la materia prima. Su ventaja es materia prima barata (óxidos y carbón).

1.4.2 PRECIPITACION ELECTROLITICA

La depositación electrolítica es empleada para producir polvos de Fe, Cu, Be, Ni, Ag. Los procesos de depositación de metales en el cátodo de

FIGURA No. 22



REDUCCION DE OXIDOS DE HIERRO CON CARBON

TABLA XVI 13

COMPOSICIONES TIPICAS DE POLVOS DE HIERRO PRODUCIDOS POR TECNICAS DE REDUCCION QUIMICA.

	Esponja	Reducción con H_2	Atomizado Reducido	Lecho Fluido
Hierro Total	98.8 %	98.0 %	98.7 %	98.8 %
Pérdidas por Hidrogeno	0.30	0.95	0.53	0.6
Carbón	0.04	0.02	0.06	0.06
Fósforo	0.01	0.012	0.011	0.01
Azufre	0.007	0.005	0.022	0.02
Manganeso	-	0.55	0.15	0.33
Insoluble	-	0.33	0.12	-
Sílice	0.10	-	-	0.20
Silicio	-	-	0.04	-

de una celda electrolítica son más o menos fáciles de controlar, pero más costosos. Se desea un depósito poroso, fácilmente desprendible; ésto se propicicia con alta densidad de corriente, concentraciones bajas de catión alta concentración de ácido, adición de coloides, bajas temperaturas, altas viscosidades, eliminar la agitación y la convección. El polvo depositado se extrae y se lava para eliminar el electrolito; es recocido en atmósfera reductora, alimentado a molinos de impacto de alta velocidad para desintegrar aglomerados y clasificado. El polvo obtenido es de alta pureza y adecuado para la pulvimetalurgia, su estructura es dendrítica. Sin embargo, es un proceso largo y costoso. (Fig. 23.)

1.4.3 PROCESOS HIDROMETALURGICOS

La hidrometalurgia ha ido en constante aumento de importancia (38) en la recuperación de metales ó materiales de los que sean fácilmente extraibles. Por su naturaleza, abre un extenso campo para la producción de una gran variedad de polvos metálicos, económicamente. Se han propuesto técnicas basadas en sus métodos para producir polvos metálicos, Cu, Co, Fe, etc., (39 a 43).

Un típico proceso es la fabricación de polvos de Co y Ni desarrollado por la Sherritt Gordon Mines Limited (44), cuyo esquema se dá en la figura 24.

La precipitación selectiva ha permitido producir partículas con una capa finamente depositada de otro material. Se han hecho recubrimientos de Fe, Cu, Cr, Al, grafito, TiB_2, Al_2O_3, Cr_2O_3, ThO_2, WC, etc., con níquel; la partícula que sirve de núcleo de precipitación puede ser desde menor de uno hasta 100 micrones de diámetro.

1.4.4 DESCOMPOSICION TERMICA

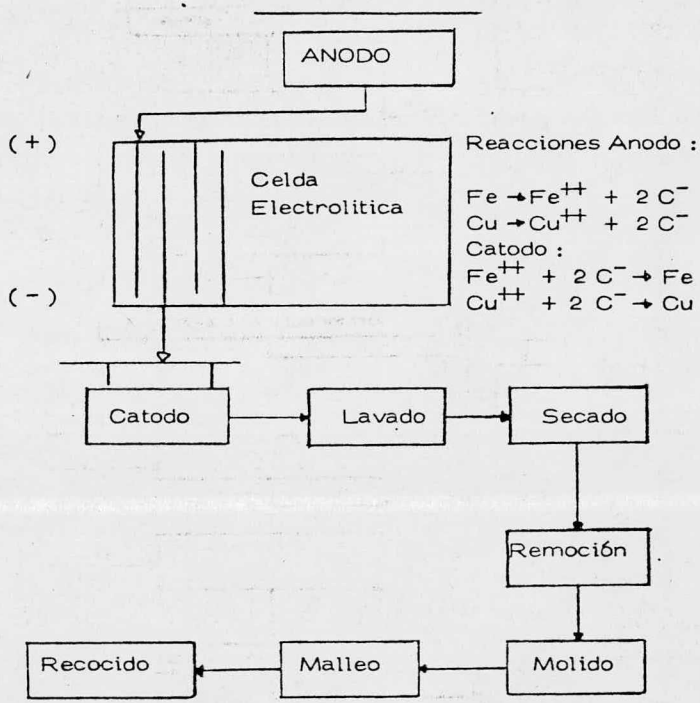
Se pueden agrupar bajo este título, diferentes técnicas como son:

a) Evaporación y condensación
b) Descomposición de carbonilos
c) Precipitación desde sales fundidas
d) Descomposición de hidruros metálicos
e) Precipitación desde gases.

a) EVAPORACION Y CONDENSACION : Con el principio de evaporación y condensación se pueden producir polvos metálicos, en condiciones de vacío para incrementar la velocidad de evaporación, el problema es condensar el metal en forma de polvo y evitar su aglomeración. Así se hacen polvos de Zn y Cd, esféricos, hasta menos de 500 angstroms de diámetro.

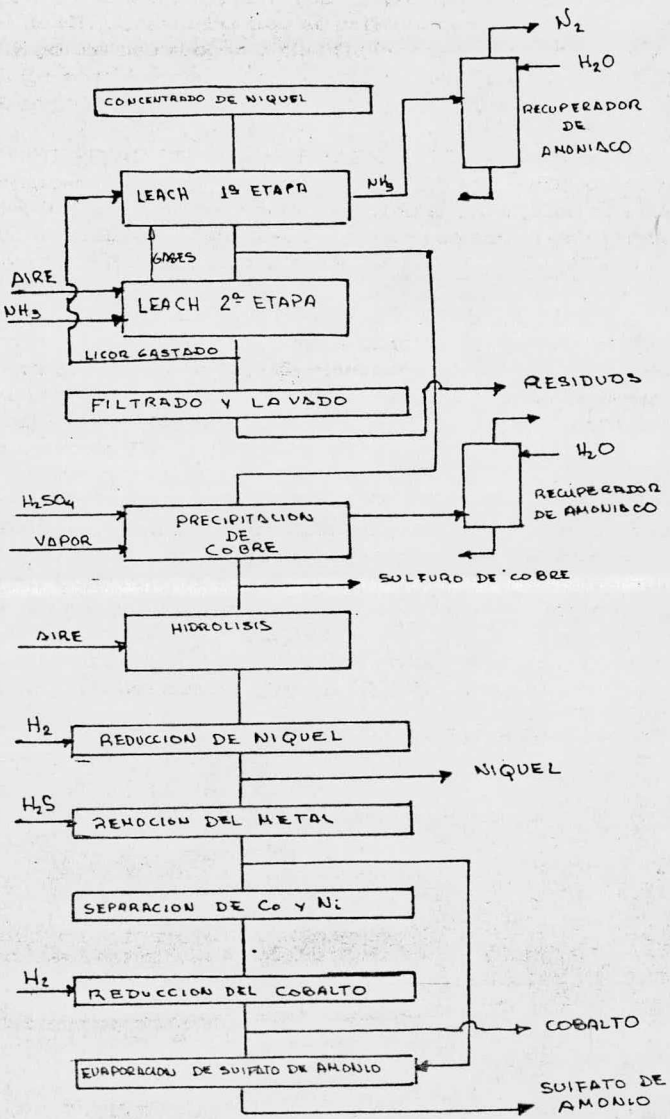
b) DESCOMPOSICION DE CARBONILOS : La figura 25 tiene el

FIGURA No. 23



PROCESO ELECTROLITICO PARA PRODUCIR POLVOS

Figura No. 24



PROCESO SHERRITT GORDON PARA PRODUCCION DE NIQUEL Y COBALTO

diagrama de proceso del polvo de níquel a partir de su carbonilo. También se produce Fe ; el proceso es pasar CO a presión sobre los metales calientes, produciendo los carbonilos : $Fe(CO)_5$, $Ni(CO)_4$, que son condensados. Los puntos de ebullición son 103° C para el de Fe y 43°C para el de Ni. Los carbonilos se calientan en cámaras especiales los polvos se recogen y clasifican, pueden ser molidos y recocidos en hidrógeno. La pureza es muy elevada (+ 99.5%) y el tamaño muy controlado hasta menos de 10 micrones.

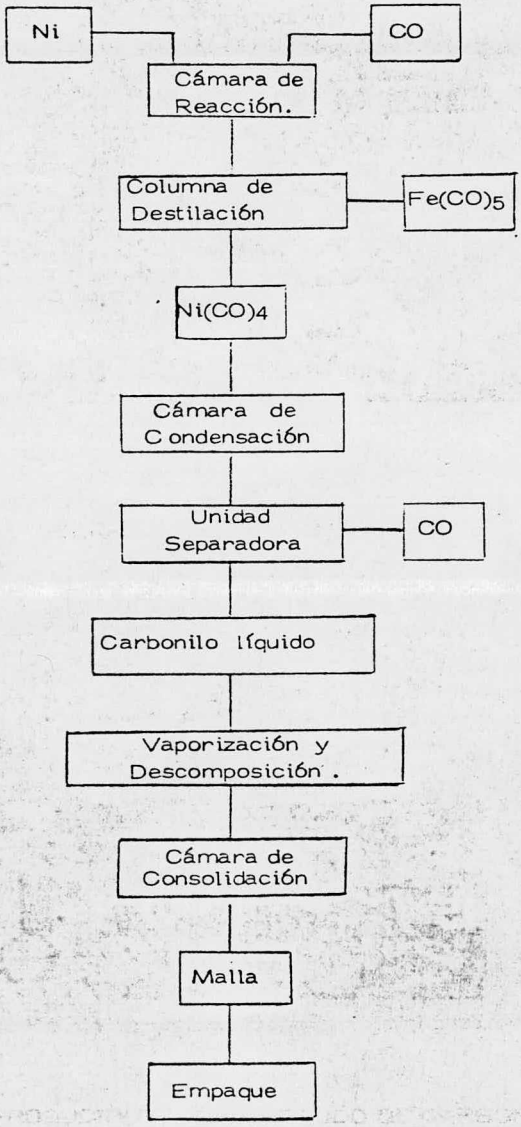
c) PRECIPITACION DESDE SALES FUNDIDAS : Es un método empleado para producir polvos de metales reactivos como -- Zr, Th, Be. Se calientan las sales a fusión, con reductor como Mg, el cual a ciertas temperaturas sustituye al metal deseado y éste se precipita en el fondo.

d) DESCOMPOSICION DE HIDRUROS METALICOS : Un metal importante producido así es el titanio. El metal fundido se - expone a una corriente de hidrógeno, produciendo un hidruro quebradizo, fácilmente pulverizable a los tamaños deseados. Posteriormente, se calienta en cámaras a vacío para producir el polvo de Ti.

e) PRECIPITACION DESDE GASES : Consiste en la reducción de cloruros gaseosos anhidros por agentes reductores como Na y Mg, los materiales esponjosos producidos se pulverizan. Las precauciones a tomar son; evitar la contaminación de las materias primas con elementos como oxígeno, etc. Se pueden producir metales como : Zr, Ti, Hf y V. También, se pueden fabricar partículas compuestas. Ej.: partículas ferrosas con Cr, Al, B, Ti, Cb, Mn, etc.

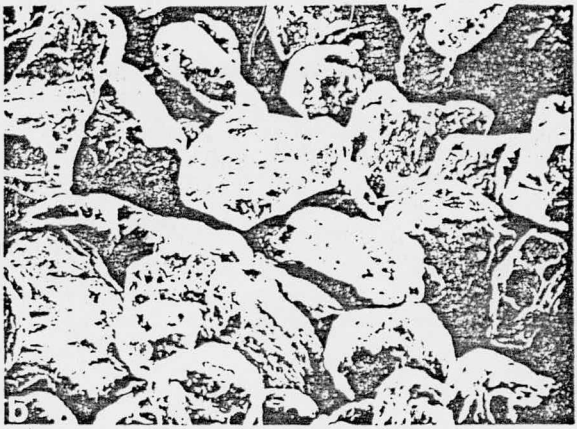
En las figuras 26 y 27 se muestran polvos producidos por algunas de estas técnicas.

FIGURA No. 25

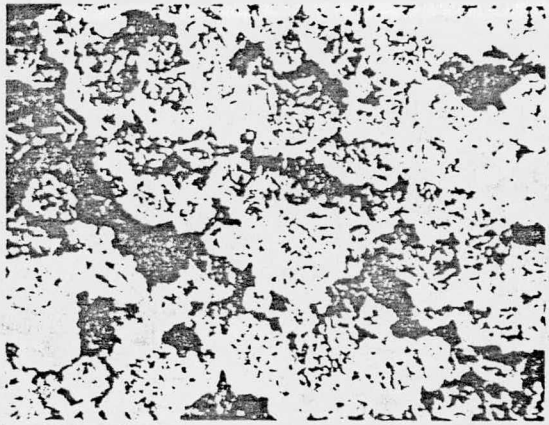


PRODUCCION DE POLVO DE NIQUEL A PARTIR DE SU CARBONILO .

Figura No. 26

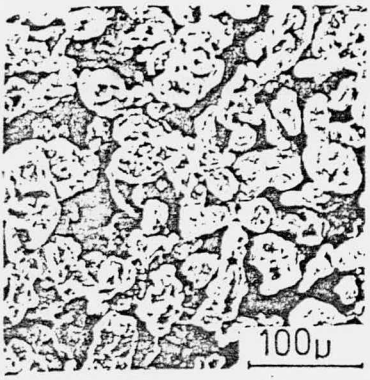


HIERRO ELECTROLITICO

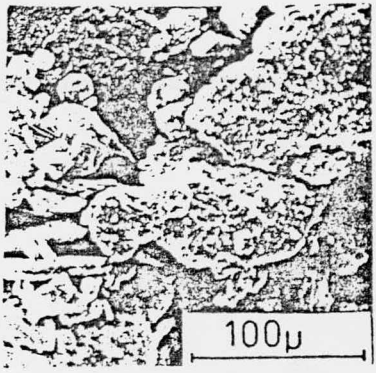


NIQUEL PRODUCIDO POR EL METODO DE CARBONILO

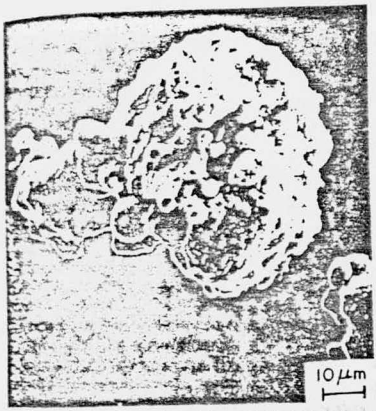
Figura No. 27



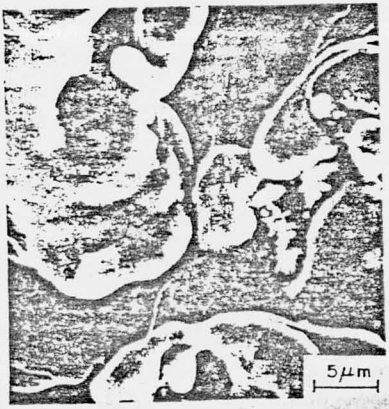
'Fe Reducido



Ni Electrolítico



Fe Producido de Carbonilo



Fe Esponja Reducido

CAPITULO II COMPACTACION DE LOS POLVOS METALICOS

II.1 MEZCLADO

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

Las condiciones del mezclado deben ser tales que permitan la obtención de las características deseadas sin detrimento de otras. El estudio del mezclado (45, 46) ha permitido su mejor aplicación práctica. Los propósitos del mezclado pueden ser :

a) Obtener una distribución uniforme del tamaño y forma de la partícula

b) Cambiar propiedades como : la densidad aparente, la fluidez

c) administrar lubricantes al polvo

d) Mezclar polvos de materiales diferentes, por ejemplo : Fe - Cu - grafito, Fe - Ni, etc.

Los principales defectos que se deben evitar son :

1. Un mezclado insuficiente
2. Mezclado excesivo, que produce :
   a) Segregación de los componentes
   b) Endurecimiento de las partículas
   c) Degradación de las partículas
   d) Pegajosidad del lubricante
   e) Recubrimiento de partículas duras por finas
   f) Elevación de los costos

El equipo usualmente empleado en esta operación, son mezcladores del tipo " y " y de doble cono. Figura 28.

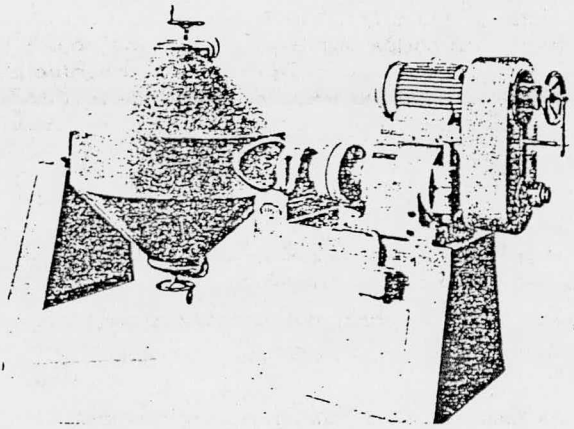
II.2 LUBRICACION

En la compactación convencional de prensado unidireccional en molde rígido, a temperatura ambiente, las condiciones de fricción juegan un papel muy importante en la compresibilidad de los polvos, desgaste de la herramienta (47) y eficiencia del prensado; por tanto se desea una lubricación adecuada.

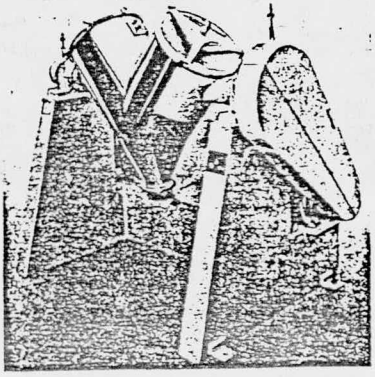
La lubricación se puede realizar de dos maneras :

1. LUBRICACION DEL MOLDE : Aunque se han propuesto (48, 49) sistemas de lubricación del molde para su aplicación a escala comercial, todavía se requiere un estudio más extenso en esta área,

Figura No. 28



MEZCLADOR DE DOBLE CONO



MEZCLADOR TIPO "Y"

para obtener un sistema óptimo que se adapte a las exigencias de la producción comercial.

2. ADICION DE LUBRICANTES AL POLVO : El sistema usual, es el mezclado de lubricantes en estado sólido con los polvos. La tabla XVII clasifica los lubricantes más comunes. Se ha estudiado mucho (50 a 55) el efecto de los lubricantes sobre las propiedades de las piezas en verde y sinterizadas y se pueden hacer las siguientes observaciones:

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

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

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

d) La presión de eyección aumenta al incrementar la presión aplicada.

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

f) El tipo de lubricante puede provocar grandes variaciones en las dimensiones de las piezas.

g) La naturaleza de los residuos puede interferir en la sinterización.

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

Debido a los factores mencionados, se requiere un estudio cuidadoso en la selección del lubricante para evitar en lo posible, los inconvenientes y obtener los beneficios de la lubricación. En las Tablas XVIII a XX se detallan los factores que influyen en el desgaste del molde y el efecto del lubricante en la densidad y resistencia. En la fig. 29 se esquematizan las variaciones de las propiedades comunes de los polvos con la lubricación.

Normalmente la cantidad de lubricante empleado varía entre 0.5 % a 1.5 % .

14

TABLA XVII

VARIOS TIPOS DE LUBRICANTES EMPLEADOS EN LA COMPACTACION DE LOS POLVOS.

	NOMBRE DEL LUBRICANTE	TEMPERATURA DE FUSION (°C)
1.	Estearato de Zinc	130
2.	Estearato de Calcio	180
3.	Estearato de Aluminio	103
4.	Estearato de Magnesio	88
5.	Estearato de Plomo	116
6.	Estearato de Litio	221
7.	Acido Estearico	69.4
8.	Acido Oleico	
9.	Acido Benzoico	122
10.	Parafina	40 – 60
11.	Disulfuro de Molibdeno	1185
12.	Disulfuro de Wolframio	1250 (descompone)
13.	Acido Caproico	101
14.	Grafito	
15.	Melamina	Menor de 250
16.	Amelida	Descompone
17.	Amelina	Descompone
18.	Anhidrido Molibdenico	795

También existe una gran variedad de marcas comerciales como:

ACRAWAX C, HOECHST WAX C, NOPCO 22DSM, ETC.

15

TABLA XVIII

FACTORES QUE INFLUYEN EN EL DESGASTE DE LA HERRAMIENTA

I. PROPIEDADES DEL POLVO

a) Dureza
b) Abrasividad
c) Tendencia a recubrirse
d) Granulometría y comportamiento reológico

II. PROPIEDADES DEL LUBRICANTE

a) Mezclabilidad
b) Adhesividad
c) Resistencia de la película recubridora

III. PROPIEDADES FISICAS Y GEOMETRICAS DE LA HERRAMIENTA

a) Macrodureza
b) Microestructura
c) Esfuerzos residuales
d) Comportamiento elástico del molde y los punzones
e) Acabado superficial del interior del molde y caras adyacentes de los punzones.
f) Paraleismo del interior del molde y conicidad de salida
g) Tolerancia entre molde y punzón
h) Alineación del molde y punzón
i) Radios de las esquinas y extremos del molde y los punzones
j) Otros factores geométricos

IV. CONDICIONES DE COMPACTACION

a) Presión de compactación
b) Velocidad de compactación
c) Rigidez de la prensa y construcción del utilaje

V. FACTORES HUMANOS

a) Defectos en el material de la matriz que pasan desapercibidos
b) Errores cometidos en el montaje del molde ó herramientas - mal fabricadas
c) Operación descuidada de la presnsa
d) Descuidos en la preparación de los polvos
e) Otros

16

TABLA XIX

EFECTO DEL LUBRICANTE SOBRE LA DENSIDAD Y LA RESISTENCIA EN VERDE.

MATERIAL	LUBRICANTE (%)	DENSIDAD (g/ cc)	RESISTENCIA (Kg/ cm^2)
Fe REDUCIDO	NADA	6.47	323
	1	6.57	232
COBRE ELECTROLITICO	NADA	7.97	681
	1	8.11	358

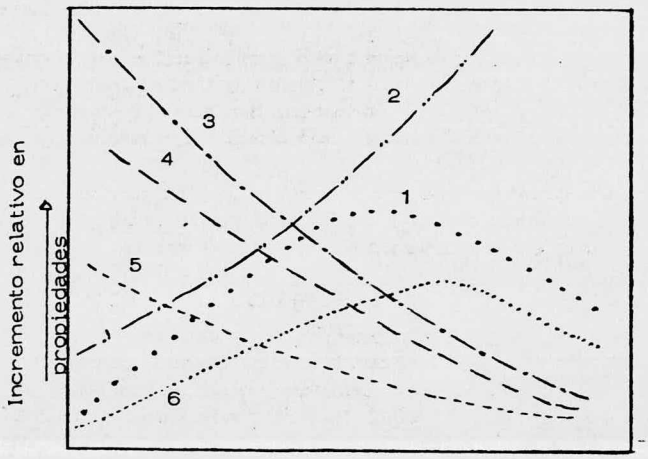
17

TABLA XX

EFECTO DEL LUBRICANTE SOBRE LA RESISTENCIA EN SINTERIZADO DE Fe.

LUBRICANTE	Densidad en Verde (g/cc)	Resistencia a la ruptura (kg/mm^2) Sin lubricante	1% lubricante
Acido Estearico	6.6	49.21	38.66
Estear. de Litio	6.2	37.96	33.74
	6.6	49.21	41.48
			1.5 % Lub.
Estear. de Zinc	6.6	49.21	43.59
	6.8	55.54	49.21
Estear. de Calcio	6.2	37.96	28.12
	6.6	49.21	32.34

FIGURA No. 29



ESQUEMA DE LA VARIACION DE LAS PROPIEDADES EN FUNCION DEL % DE LUBRICANTE

1. Densidad en verde
2. Crecimiento después de la expulsión
3. Presión de expulsión
4. Resistencia a la ruptura transversal
5. Fluidéz
6. Resistencia a la compresión

II.3 COMPACTACION, DEFINICION Y METODOS

La aparición de nuevas técnicas de compactación, hizo necesario buscar una definición de la compactación, que siendo concisa, abarque todos los métodos. Así, entonces se le define como : "Un proceso para conformar polvos metálicos en formas bien definidas, dimensiones deseadas y durante el cual la densidad y/ó la resistencia de la masa de polvo se incrementa". (56).

De la definición anterior, se pueden extraer los objetivos básicos de la compactación :

1. Consolidar los polvos en la forma deseada
2. Impartir, lo más preciso, las dimensiones requeridas
3. Obtener la porosidad adecuada
4. Lograr una resistencia aceptable

Un criterio útil, que permite diferenciar los distintos métodos de compactación, es el de empleo ó no de presión para compactar los polvos.- En base a ésto, se tiene la siguiente clasificación :

a) COMPACTACION CON PRESION

1. Compactación unidireccional
2. Compactación isostática
3. Compactación continua
4. Laminación
5. Extrusión
6. Compactación de alta energía (compactación explosiva)
7. Forja
8. Compactación vibratoria

b) COMPACTACION SIN PRESION

1. Sinterización de los polvos en molde
2. Colada en suspensión
3. Compactación vibratoria

Otro aspecto importante en la actualidad, es la temperatura de los polvos durante la compactación ; pero la alusión a esta característica, se hará dentro de la técnica que lo requiera.

II.3.1 COMPACTACION CON PRESION

Se han propuesto diferentes modelos Tabla XXI, para describir el comportamiento de los polvos en condiciones de presión ; observando las variaciones de la densidad ó porosidad, con la presión aplicada. Aún ahora se siguen realizando estudios (57 a 63) para comprender mejor los complejos fenómenos de la compactación.

TABLA XXI

MODELOS PROPUESTOS PARA DESCRIBIR EL FENOMENO DE LA COMPACTACION.

Autor	Año	Fórmula	Material Investigado
Walker	1923	$1-U=\frac{1}{A-B\ln P}$	Sales y Polvos de Pb.
Athy	1930	$U = U_o e^{-kx}$	Densidad, porosidad de rocas sedimentarias a profundidad X
Balshin	1938	$1 - U = \frac{1}{A - B\ln P}$	Polvos metálicos y cerami
Shapiro y Kolthoff	1947	$U = U_o e^{-kp}$	Polvos de bromuro de plata.
Smith	1948	$U_f - U = \frac{C}{P^{1/3}}$	Sin datos experimentales.
Balshin	1948	$1 - U = \frac{P}{}^{1/a}$	Polvos metálicos y ceramicos.
Konopicky	1948	$P = A \operatorname{Ln} \frac{U_o}{U}$	Polvos de hierro, acero, cuarzo, magnecita
Torre	1948	$U = U_o e^{-(2/35_o) P}$	Modelo matemático de la esfera hueca
Ballhausen	1951	$U = \frac{Uf}{1 - A(1-U_f) P}$	Polvos de hierro, cobre
Heckel	1961	$U = U_f e^{-B} e^{-kp}$	Polvos de hierro, cobre, níquel, grafito, wolframio.

CONTINUACION DE LA TABLA XXI

Autor	Año	Fórmula	Material Investigado
Nikolaev	1962	$\frac{U}{1-U} = e^{1-\frac{U}{}} - (c/\ )\ P$	Polvos de hierro, acero, cobre, aluminio
Cooper y Eaton	1962	$U - U = a_1 e^{(-k_1/p)} + a_2 e^{-(k_2/p)} + \ldots$	Polvos de Aluminia
Burr y Donachie	1962	$1-U = f_1(P) + f_2(P) + f_3(P) + A$	Polvos de cobre
Shapiro	1963	$U = a_1 e^{-k1/p} + a_2 e^{-k_2/p} + \ldots.$	Polvos de aluminio, óxido de Torio.
Kawakita	1963	$C = \frac{V_o - V}{V_o} = \frac{a\ b\ P}{1 + bP}$	- - - -
Bockstiegel	1966	$U = U\ \text{erfc}\ \log\frac{Do}{Dmax\ (P)}$	- Polvos de hierro
Domsa	1976	$\log D = (1 + x_1 + x_c)(\log P - \log P_t) - \log(Em + E_1 + Ec)$	Polvos de hierro cobre, grafito, alumina, carburo de silicio.

APENDICE DE LA TABLA XXI

DEFINICION DE LOS TERMINOS

U	=	Porosidad a la presión P
U_f	=	Porosidad del polvo suelto
U_o	=	Porosidad extrapolada a presión cero
	=	Tensiones de fluencia
	=	Densidad teórica
$A, B, C, K, K_1, K_2, a_1, a_2$	=	Factores constantes
f_1, f_2, f_3	=	Funciones indefinidas
D_o	=	Diámetro de los poros mayores a presión cero
D_{max}	=	Diámetro de los poros mayores a presión P
V_o	=	Volumen inicial
V	=	Volumen a la presión P
b	=	Constante
	=	Coeficientes
X_I	=	Contenido de lubricante
X_c	=	Contenido de componente cerámico
P_T	=	Presión requerida para obtener la densidad precompactada de la mezcla
Em, E_l, Ec	=	Coeficientes para el metal, el lubricante y la cerámica
D	=	Densidad obtenida a la presión P

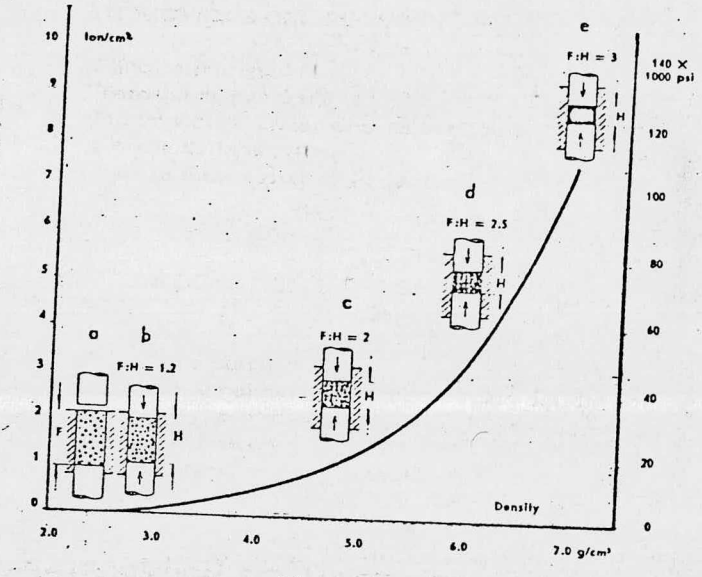
Generalmente se considera que ocurren dos etapas básicas:

1. Un movimiento masivo de las partículas, sin deformación ni interacciones entre ellas, que sucede a bajas presiones. Fig. 30, a y b.

2. La deformación y fractura de las partículas, con el incremento de presión. Fig. 30, c y d.

Las condiciones de fricción varían ampliamente en los distintos procedimientos de compactación, siendo las fuerzas de fricción entre partículas y entre partículas y molde, factores determinantes. En la Tabla XXII, se enumeran algunas variables que afectan las condiciones de fricción.

Figura No. 30



PROCESO DE COMPACTACION

TABLA XXII

VARIABLES QUE AFECTAN LAS CONDICIONES DE FRICCION DURANTE LA COMPACTACION DE POLVOS.

A) CARACTERISTICAS DEL POLVO

1. Tipo de material
2. Tamaño de partícula
3. Distribución del tamaño de partícula
4. Forma de la partícula
5. Estado superficial de la partícula

B) CARACTERISTICAS DEL DISPOSITIVO DE COMPACTACION

1. Método de compactación
2. Material empleado en la fabricación del dispositivo
3. Acabado superficial
4. Atmósfera de compactación
5. Temperatura de compactación

C) CARACTERISTICAS DEL LUBRICANTE

1. Tipo de lubricante
2. Cantidad de lubricante
3. Método de aplicación:
   a. Mezclado con el polvo
   b. Aplicado a la superficie interior del molde

11.3.1.1 COMPACTACION UNIDIRECCIONAL

Este procedimiento de compactar los polvos, consiste en la aplicación de presión por medio de prensas mecánicas ó hidráulicas al polvo contenido en un molde rígido. La compactación se puede realizar a temperatura ambiente ó a temperatura elevada; la compactación convencional por medio de la cual se producen la mayoría de las piezas estructurales comunes, se lleva a cabo a temperatura ambiente. La fig. 31 muestra las partes generales de la herramienta.

La fricción entre partículas y paredes del molde es la fuente principal de pérdidas, por lo que una medida de la eficiencia de la lubricación, es el denominador factor "K" que es el cociente entre la presión recibida en el punzón inferior y la presión aplicada. La Tabla XXIII muestra algunos coeficientes experimentales para determinar la presión disipada en las paredes.

La existencia de la fricción no permite una distribución uniforme de la densidad a través de la pieza compactada, como se puede ver en la fig. 32. El rango aceptable de variación de la densidad, en la pieza, determina la relación de altura a diámetro (A/D), que limita el modo de prensado.

Los modos de prensado se pueden clasificar :

a) Prensado de acción simple
b) Prensado de doble acción
c) Prensado con molde de movimiento relativo

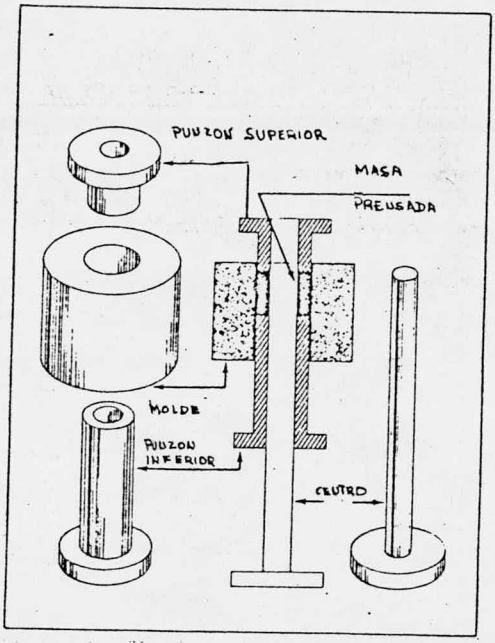
Hay otros modos, pero son en realidad variaciones más ó menos sofisticadas de los tres anteriores (3).

a) PRENSADO DE ACCION SIMPLE : En este caso todo permanece estacionario, siendo el punzón superior el que realiza la compresión del polvo, fig. 33. Se emplea para piezas con una relación A/D menor de 0.5 y en la práctica espesores menores de 6.3 mm; de un sólo nivel, clasificadas como piezas de clase I. En la fig. 34 se dán unos ejemplos.

b) PRENSADO DE DOBLE ACCION : Con el fin de evitar variaciones notables en la densidad, se emplea el prensado por ambos lados, fig. 35, las piezas que se pueden realizar son de clase II, III, IV, fig. 36, aunque estrictamente hablando, las piezas de clase III y IV, que presentan más de un nivel (actualmente máximo 8) requieren mecanismos más sofisticados, con punzones independientes para controlar la densidad de cada nivel.

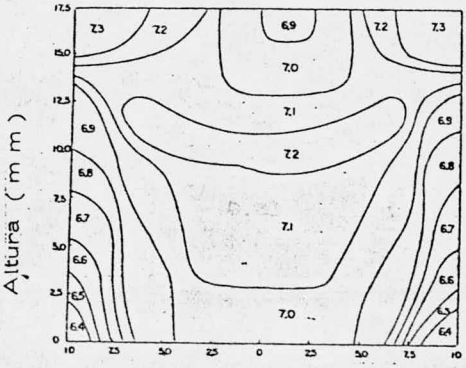
c) PRENSADO CON MOLDE MOVIL : Para disminuir los efectos de la fricción, la matriz va bajando conforme se aplica la presión por -

Fig. 31



Piezas esenciales para el prensado

Fig. 32



Variaciones de densidad dentro de una pieza prensado con acción simple
(d = g/cm^3)

TABLA XXIII

PRESION LATERAL EN EL PRENSADO DE ACCION SIMPLE

P = Presión aplicada en el extremo superior

P_1 = Presión aplicada en el extremo inferior

P_2 = Presión sobre las paredes del molde

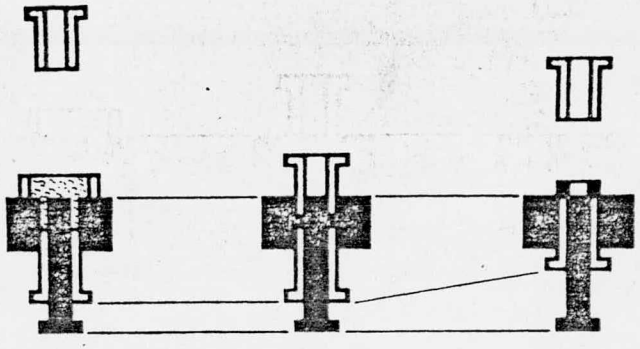
Condiciones de fricción : $P_1 / P_2 = K$

Condiciones de presión: $P_2 = X P$

VALORES DE X

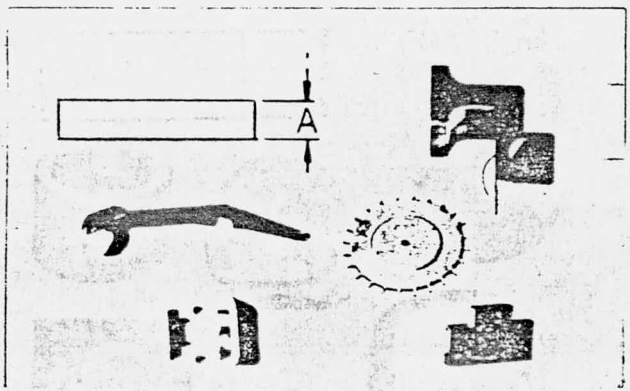
Material	Densidades (%) 40	60	80
Wolframio	0.08	0.12	0.16
Hierro	0.16	0.23	0.31
Estaño	0.20	0.30	0.39
Cobre	0.22	0.32	0.43
Plomo	0.32	0.47	0.63

Fig. No. 33



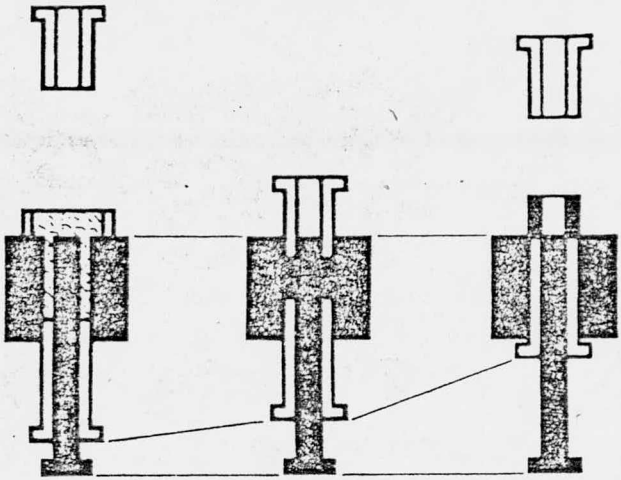
PRENSADO DE ACCION SIMPLE

Fig. No. 34



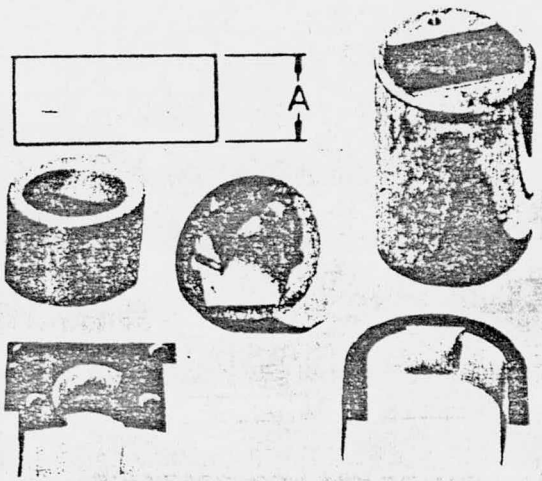
PIEZAS DE CLASE I

Fig. No. 35



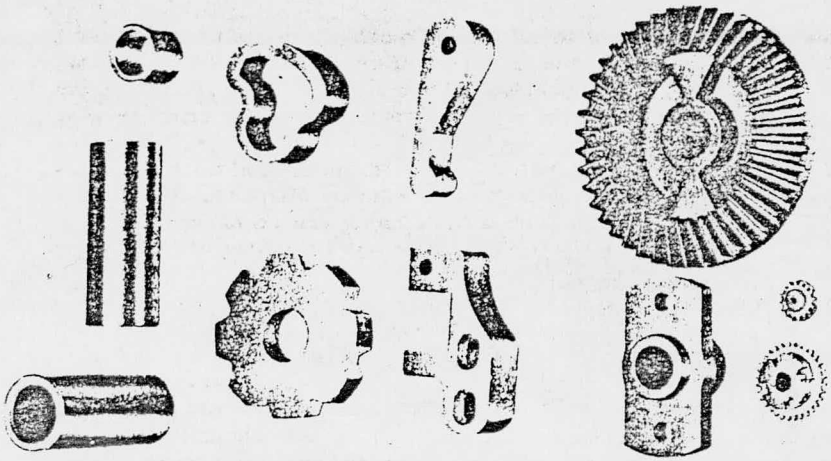
PRENSADO DE DOBLE ACCION

Fig. No. 36



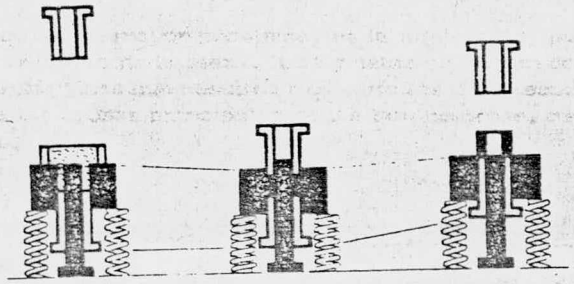
PIEZAS DE CLASE II

Fig. No. 36



PIEZAS DE CLASE III Y IV

Fig. No. 37



PRENSADO CON MOLDE MOVIL

efecto de la fricción, para mejorar este efecto se puede aplicar una fuerza externa que ayude a bajar al molde. Fig. 37.

1.3.1.1.2 PROPIEDADES DE LAS PIEZAS PRENSADAS

Son de interés especial, dos propiedades de las piezas; la densidad y la resistencia, la primera por su importancia en el sinterizado y las dimensiones obtenidas. Y la segunda por las calidades suficientes para un manejo seguro; ésta se puede incrementar por los siguientes factores :

1. Incrementando la presión de compactación
2. Aumentando el tamaño de partícula
3. Disminuyendo la dureza y resistencia de las partículas
4. Reduciendo la velocidad de compactación

Otro aspecto importante es la distribución de densidad, la cual puede minimizarse con los siguientes procedimientos :

a. Uso de altas presiones
b. Uso de relaciones pequeñas A/D
c. Empleo de lubricantes
d. Uso del principio de molde móvil
e. Reprensado de la pieza
f. Precompactando alguna parte crítica de la pieza

1.3.1.1.3 DEFECTOS DE LAS PIEZAS PRENSADAS

Los defectos más comunes encontrados son :

1. Protuberancias superficiales, por efecto de los gases atrapados durante el prensado.
2. Fisuras, denominadas laminaciones, que generalmente son perpendiculares a la dirección de prensado.

De los cuales el mayor problema, es la laminación, pues su aparición provoca el rechazo de la pieza. Las grietas se pueden observar a simple vista, ó ser tan finas que resulten muy difíciles de detectar. La Tabla XXIV enumera las causas principales de las laminaciones, así como las posibles soluciones.

1.3.1.1.4 PRENSAS

El tipo de prensas empleadas comunmente se pueden clasificar en las siguientes clases:

a. Prensas mecánicas
b. Prensas hidráulicas

TABLA XXIV

CAUSAS PRINCIPALES DE LAMINACION DE COMPACTOS

1. Recuperación de las tensiones elásticas
2. Esfuerzos inducidos durante la expulsión de la pieza
3. Esfuerzos inducidos en la pieza dentro del molde, después de eliminada la carga ; por un mal diseño del mismo
4. Zonas en el compacto con cambios bruscos de densidad
5. Presiones de compactación elevadas
6. Adición excesiva de lubricantes
7. Bolsas de aire atrapado

METODOS EMPLEADOS PARA MINIMIZAR LAS LAMINACIONES

a. Empleo de un polvo con una mayor resistencia en verde
b. Disminuación de los esfuerzos en la expulsión :
   1. Reduciendo la presión de compactación
   2. Mejorando la lubricación de la matriz
c. Uso de polvos con mayor compresibilidad
d. Cambio de lubricante ó de la cantidad empleada
e. Cambio en el diseño del molde, para permitir una ligera expansión radial.
f. Evitar en el molde la expansión elástica en el prensado

c. Prensas mixtas

A. Las prensas mecánicas, emplean dispositivos mecánicos para aplicar la presión sobre el polvo; se emplean para grandes volumenes de producción y se encuentran hasta capacidades de 500 toneladas. Para capacidades más altas, se prefiere utilizar prensas — hidráulicas. Un tipo especial de prensas mecánicas, para producciones muy elevadas, son las prensas rotatorias, que fluctúan entre 4 y 100 toneladas de capacidad y con producciones que van de unas pocas piezas por minuto, hasta cientos.

B. Las prensas hidráulicas se pueden encontrar de 10 a 3000 toneladas de capacidad, su principal desventaja es su menor velocidad de producción que puede ser hasta de la mitad de una prensa — mecánica similar; pero presentan la ventaja de permitir un control estricto de la carga aplicada.

Las figuras 38 a 40 muestran ilustraciones de las diferentes prensas. En las Tablas XXV y XXVI muestran las presiones y relaciones de compresión para varios productos y los rangos de presión comunes en pulvimetalurgia, respectivamente.

Se requiere un conocimiento profundo de las variables de la compactación, para lograr un diseño adecuado de las herramientas empleadas, (64 a 66). Así como también para la selección correcta de los materiales usados en su construcción. Normalmente para el molde se emplean carburos cementados, cuando se desean grandes producciones; en tanto que para producción media, aceros aleados del tipo D y M. Los punzones se fabrican con aceros del tipo A y L.

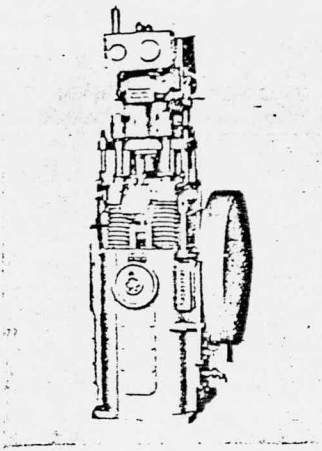
En el diseño de las piezas (67), el prensado impone una serie de restricciones, que deben ser respetadas apara evitar piezas con secciones críticas ó piezas imposibles de prensar. Las figuras 41 a 44 indican las modificaciones recomendables a diferentes clases de piezas.

1.3.1.1.5 PRENSADO EN CALIENTE

Desde tiempo atrás (15) se conocen las ventajas del prensado en caliente y ha sido ampliamente usado en el campo de los metales refractarios y aquellos materiales que por su naturaleza, no se compactan adecuadamente con el prensado convencional.

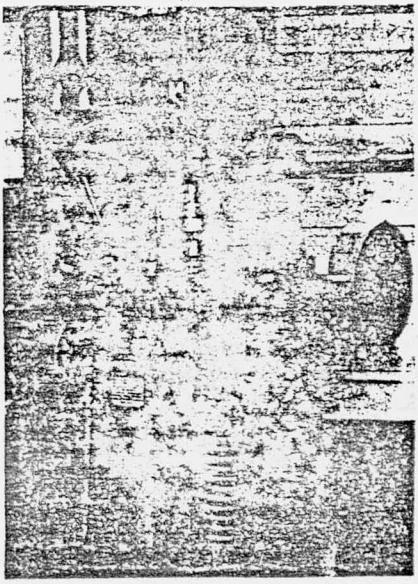
Hay gran interés (68 a 74) por desarrollar esta técnica en su aplicación y aprovechar sus ventajas; en la Tabla XXVII se compara el prensado en caliente y el convencional. La figura 45 muestra dos tipos de prensado en caliente.

Fig. No. 38



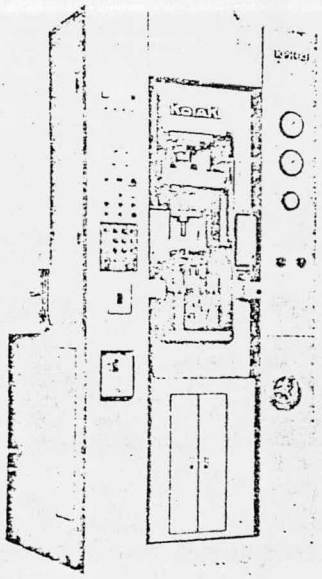
PRENSAS MECANICAS

Fig. No. 39



Prensa Rotatoria

Fig. No. 40



Prensa Hidráulica

TABLA XXV

PRESIONES REQUERIDAS Y RELACIONES DE COMPRESION PARA VARIOS PRODUCTOS.

	Tipo de pieza	Presión (ton/cm^2)	Relación de compresión (polvo/pieza)
a.	Partes de latón	30 - 50	2.4 a 2.6 : 1
b.	Cojinetes de bronce	15 - 20	2.5 a 2.7 : 1
c.	Productos de carbón	10 - 12	3.0 : 1
d.	Escobillas de Cu-C	25 - 30	2.0 a 3.0 : 1
e.	Carburos	10 - 30	2.0 a 3.1 : 1
f.	Cojinetes de hierro	15 - 25	2.2 : 1
g.	Partes de hierro:		
	1) Baja densidad	25 - 35	2.0 a 2.4 : 1
	2) Densidad media	35 - 40	2.1 a 2.5 : 1
	3) Alta densidad	35 - 60	2.4 a 2.8 : 1
h.	Wolframio	5 - 10	2.5 : 1
i.	Tantalio	5 - 10	2.5 : 1

TABLA XXVI

ANGOS DE PRESION USADOS EN PULVIMETALURGIA

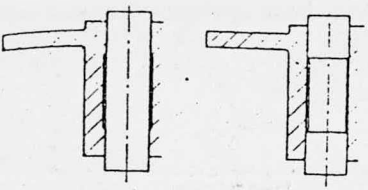
Materiales porosos y filtros	4.64 - 7.73 Kg/mm^2
Metales refractarios y carburos	7.73 - 23.21 Kg/mm^2
Cojinetes porosos	15.47 - 38.69 Kg/mm^2
Partes de máquinas	30.95 - 77.39 Kg/mm^2
Partes de alta densidad de hierro y acero	77.39 - 185.74 Kg/mm^2

FACULTAD DE QUIMICA - D.E.P. - U.N.A.M. - BIBLIOTECA -

Fig. No. 41

Consejos para el proyecto de piezas para pulvimetalurgia

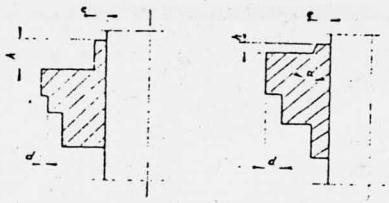
AGUJEROS DE GRAN LONGITUD



No aconsejable *Aconsejable*

EVITAR: Rebajes en el agujero.
Motivo: Imposibilidad de realización.
PREVER: Un rebaje en el eje.
(Rebaje hecho durante el torneado del eje).

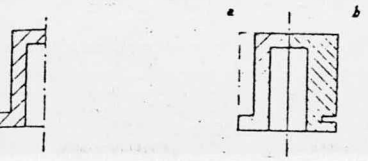
PIEZAS CON REBAJES SUCESIVOS



No aconsejable *Aconsejable*

LIMITAR: El número de rebajes.
Motivo: Fragilidad y precio del utillaje.
PREVER: Una salida en el botón superior.
$d > 3 - 4$ mm; $h < 1.2\,e$; $\alpha > 7°$
Una salida en un rebaje puede también reducir el precio del utillaje.

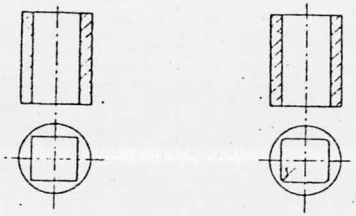
PERFILES EN FORMA DE Z



No aconsejable *Aconsejable*

EVITAR: Los perfiles en Z.
Motivo: Imposibilidad de realización.
PREVER: Cambio de concepción, por ejemplo,
a) Refrentado por torneado.
b) Apoyo sobre una arandela «clip».

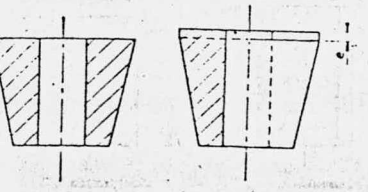
PIEZAS CON AGUJERO POLIGONAL



No aconsejable *Aconsejable*

EVITAR: Los ángulos vivos.
Motivo: Piezas frágiles.
PREVER: Un radio, $r \geq 0.5$ a 1.

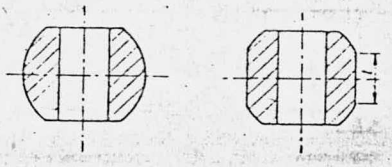
PIEZAS CÓNICAS



No aconsejable *Aconsejable*

EVITAR: Terminación del cono con ángulo vivo.
Motivo: Imposibilidad de realización.
PREVER: Una parte cilíndrica - $e \geq 0.5$ mm.

ROTULAS

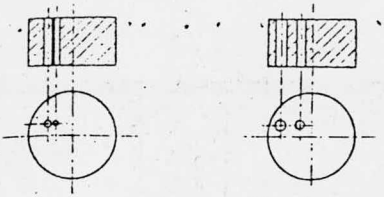


No aconsejable *Aconsejable*

EVITAR: Esfera completa.
Motivo: Imposibilidad de realización.
PREVER: Una parte cilíndrica central de $l \geq 2$ mm.

Fig. No. 42

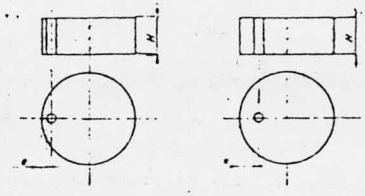
PIEZAS TALADRADAS



No aconsejable *Aconsejable*

EVITAR: Agujeros de diámetro demasiado pequeño. Agujeros demasiado juntos.
Motivo: Dificultades de realización del utillaje.
PREVER: Distancia mínima de dos agujeros, de 3 a 4 mm.
Diámetro de un agujero: 2 a 3 mm.

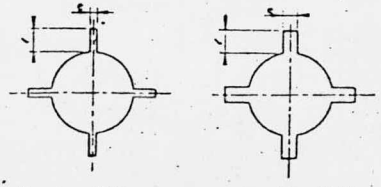
AGUJEROS



No aconsejable *Aconsejable*

EVITAR: Agujeros demasiado cerca de las paredes
Motivo: Dificultades de realización del utillaje
PREVER: El agujero a una distancia e de la pared más próxima $e \geq H/10$ y $e \geq 2$

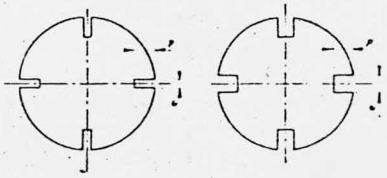
SALIENTES DELGADOS



No aconsejable *Aconsejable*

EVITAR: Los salientes demasiado delgados.
Motivo: Fragilidad de las piezas.
PREVER: $e \geq 1/2$ y $e \geq 2$ a 3 mm.

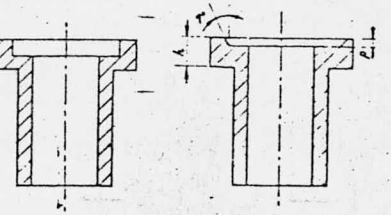
RANURAS



No aconsejable *Aconsejable*

EVITAR: Las ranuras muy estrechas y frágiles
Motivo: Utillaje demasiado frágil.
PREVER: $e \geq P/3$ y $e \geq 2$ a 3 mm.

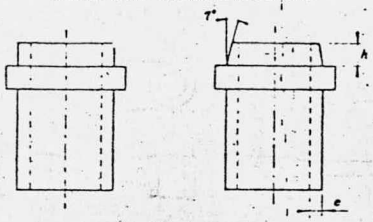
PIEZAS DE VALONA CON REBAJE INTERIOR



No aconsejable *Aconsejable*

EVITAR: Rebaje profundo y cilíndrico.
Motivo: Pieza muy difícil de realizar.
PREVER: Una salida de 7° mínimo.
$r < h/4$.

PIEZA CON VALONA CENTRAL

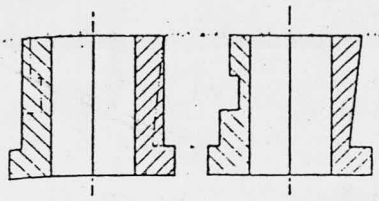


No aconsejable *Aconsejable*

EVITAR: Parte cilíndrica en el botón extremo.
Motivo: Pieza muy difícil de realizar.
PREVER: Una salida de 7° aproximadamente $h/1.2\,e$.

Fig. No. 43

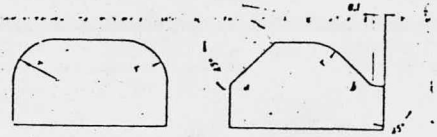
CONICIDAD INVERSA



aconsejable *NO Aconsejable*

EVITAR: La conicidad inversa y las ranuras.
Motivo: El funcionamiento de los utillajes no permite la extracción de la pieza.
PREVER: Un mecanizado posterior.

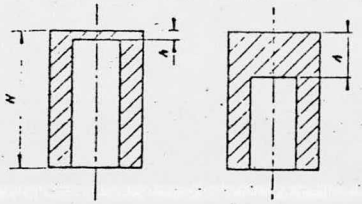
REDONDEADOS Y CHAFLANES



No aconsejable *Aconsejable*

EVITAR: El redondeo clásico.
Motivo: Punzón de arista cortante demasiado frágil.
PREVER: *a*) Chaflán a 45°.
b) Chaflán seguido de un redondeado y acabando preferentemente por un plano de 0,1.

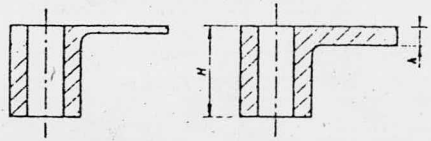
AGUJEROS CIEGOS



No aconsejable *Aconsejable*

EVITAR: Pared del fondo demasiado delgada.
Motivo: Fragilidad. Densidad desigual.
PREVER: $h \geq H/5$ a condición de que $h \geq 2$ a 3 mm

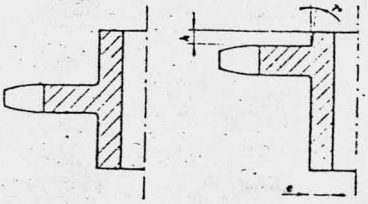
PLETINAS



No aconsejable *Aconsejable*

EVITAR: Las pletinas demasiado delgadas.
Motivo: Piezas frágiles en la unión con el tubo.
PREVER: $h \geq H/10$ pero $h \geq 2$ a 3 mm.

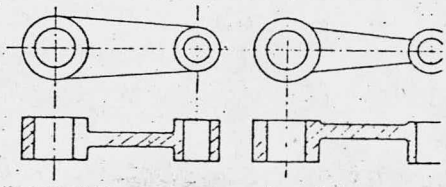
PLETINA CENTRADA



No aconsejable *Aconsejable*

EVITAR: Pletina hacia el centro de la pieza.
Motivo: Dificultad de compresión. Pieza muy heterogénea en densidad.
PREVER: La pletina en un extremo de la pieza con una salida de 7° $h < 1.2\,e$.

PALANCAS

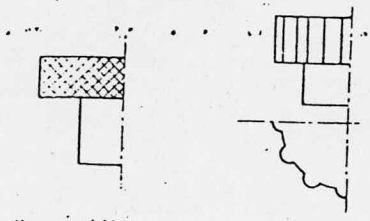


No aconsejable *Aconsejable*

EVITAR: 1) Brazo en el centro de los botones.
2) Un trazado tangente a los dos botones
Motivo: Dificultades de compresión y punzones demasiado frágiles.
PREVER: 1) El desplazamiento de la pletina hacia un extremo.
2) El brazo debe estar unido a los botones por una parte secante.

Fig. No. 44

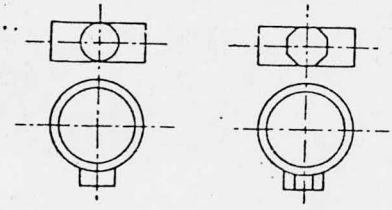
MOLETEADO



No aconsejable *Aconsejable*

EVITAR: Moleteado cruzado.
Motivo: Imposibilidad de realización.
PREVER: Un perfil recto con el mínimo de dientes posible.
(Repercusión sobre el precio del utillaje)

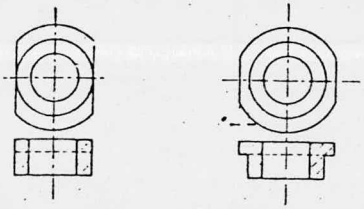
CILINDROS CON EJES NORMALES



No aconsejable *Aconsejable*

EVITAR: Un botón cilíndrico al eje normal.
Motivo: Imposibilidad de realización.
PREVER: Un botón de sección poligonal.

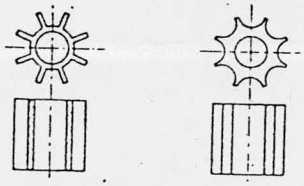
VALONA CORTADA



No aconsejable *Aconsejable*

EVITAR: Un corte tangencial al diámetro del tubo
Motivo: Utillaje imposible de realizar.
PREVER: Un espesor $e \geq 1.5$ a 2 mm.

FORMAS COMPLEJAS



No aconsejable *Aconsejable*

EVITAR: Piezas de excesiva superficie lateral.
Motivo: Dificultad de extracción. Peligro de rotura.
PREVER: Una forma apropiada para evitar este defecto.

TABLA XXVII

DATOS COMPARATIVOS ENTRE PRENSADO CONVENCIONAL Y EN CALIENTE.

Presión (kg/cm^2)	Temperatura (°C)	Densidad Teórica (%)
2812	621	83
4218	621	88
5624	621	93
7030	621	97

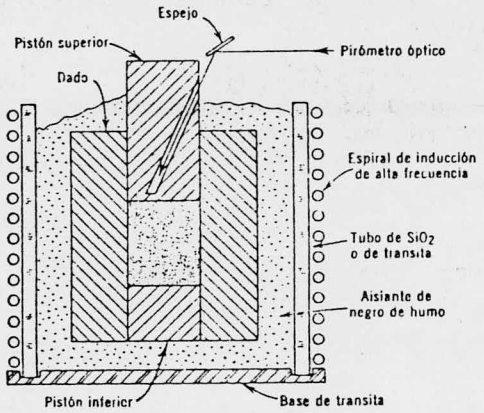
CILINDROS PEQUEÑOS COMPACTADOS EN SIMPLE ACCION Y SINTERIZADOS EN AIRE POR UNA HORA

Presión (kg/cm^2)	Temperatura (°C)	Densidad Teórica (%)
58	593	67
	621	69
	649	86
	655	96
123	593	82
	621	85
	649	92
	655	98

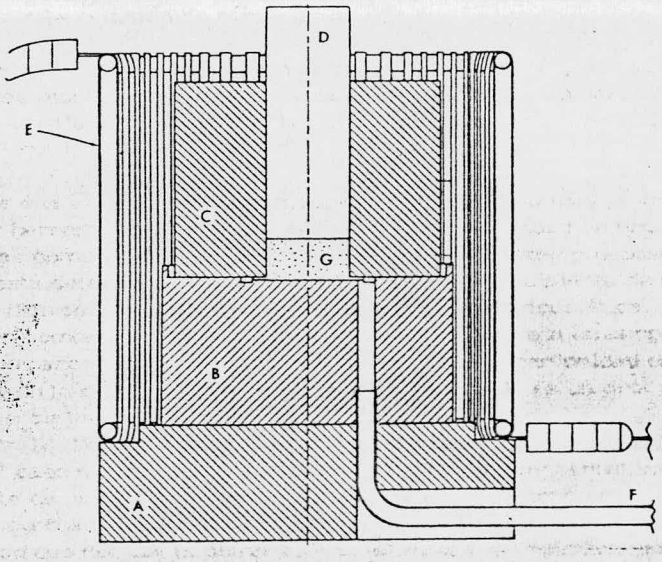
CILINDROS SIMILARES PRENSADOS EN CALIENTE EN MOLDE DE GRAFITO CON ACCION SIMPLE DURANTE UNA HORA, SIN ATMOSFERA PROTECTORA

Nota : Se considera como densidad teórica, la densidad del metal convencional.

Fig. No. 45



Prensado con molde de grafito



Prensado en caliente con argón

11.3.1.2 COMPACTACION ISOSTATICA

El término prensado isostático, es el nombre dado a cualquier proceso que aplica igual presión, simultáneamente en todas direcciones, a una masa de polvo. Figura 46.

Cuando el medio transmisor es líquido, lo cual es usual en la compactación isostática a temperatura ambiente, se emplea la palabra hidrostático y el medio generalmente es agua con inhibidores ó aceite hidráulico. La Tabla XXVIII indica algunos polvos utilizados y productos hechos de esta manera.

Hay dos tipos de moldes empleados normalmente:

a. El molde libre

b. Molde fijo

a) En el proceso del molde libre, éste es llenado fuera del recipiente - presión; el molde es de un material flexible como caucho u otros elastómeros y generalmente se evacúa el aire antes de sellarlo, con el objeto de :

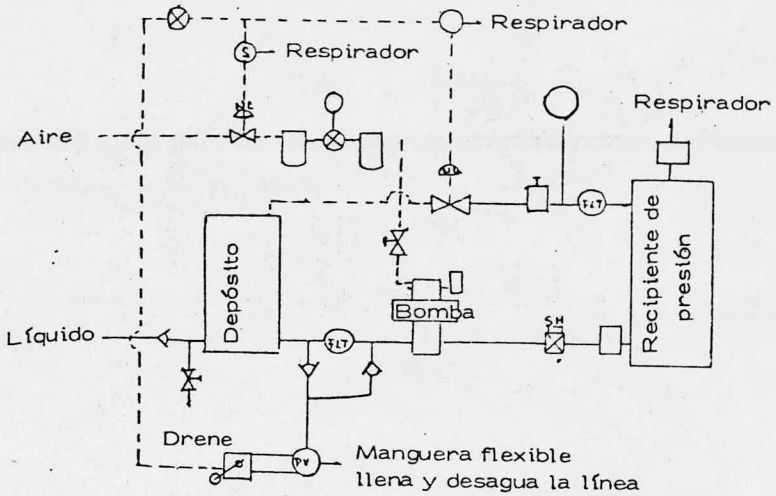
1. Mantener un prensado uniforme y recto
2. Evitar combaduras
3. Eviatar un ligero pegamiento del molde con la pieza al relevar la — presión.
4. Reducir la relación de compresión

Ya sellado, se introduce en el recipiente de presión, el cual contiene el medio transmisor de la presión. Una vez realizada la compresión, el molde debe ser extraído y la pieza de él. El molde puede volverse a usar ó desecharse. Figura 47.

Entre sus ventajas se pueden considerar : Costos más bajos de mantenimiento y herramienta con una mayor duración, facilidad de producir piezas de formas complicadas, la cantidad de formas y piezas posibles de hacer en un ciclo está determinada por las dimensiones del recipiente de presión; su principal desventaja y en general de la compactación isostática, es su baja producción comparada con el prensado convencional; sin embargo, en la - fig. 48 se comparan ambos métodos y es evidente la superioridad del prensado isostático en la densidad en verde y en la actualidad, es un proceso competitivo comercialmente.

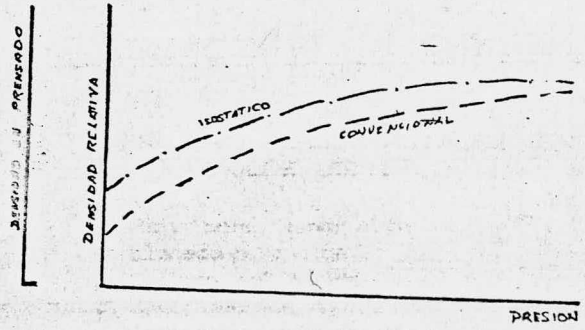
b) En el caso del molde fijo, éste se encuentra permanentemente dentro del recipiente de presión, sostenido por un soporte perforado con una pestaña que sella contra la pared del recipiente y deja un especio por donde introducir el fluído que realiza la compresión; el molde es relativamente rígido, hecho de caucho, cloruro de polivinilo, uretano, etc. El polvo es alimentado

FIGURA No. 46



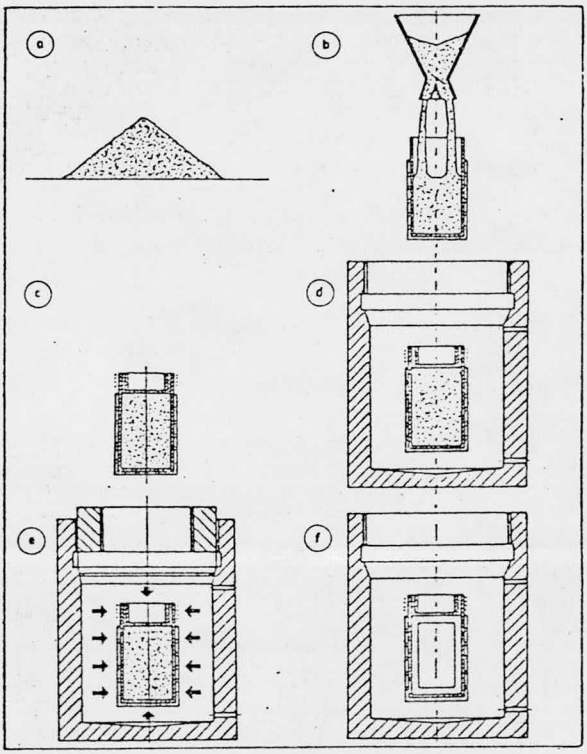
SISTEMA TIPICO SEMIAUTOMATICO PARA PRENSADO ISOSTATICO

FIGURA No. 48



COMPARACION ENTRE COMPACTACION ISOSTATICA Y CONVENCIONAL.

Figura No. 47



PROCESO DE COMPACTACION EN MOLDE LIBRE

a) Polvo para llenar el molde
b) Llenado del molde
c) Sellado del molde
d) Colocación del molde en el recipiente de presión
e) Aplicación de la presión
f) Despresurización del recipiente

TABLA XXVIII

MATERIALES ISOSTATICAMENTE PRENSADOS :

ALUMINIO
OXIDO DE ALUMINIO
BERILIO
OXIDO DE BERILIO
CARBUROS
CERAMICAS
METAL/CERAMICOS
HIERRO
MAGNESIO
MOLIBDENO
ACEROS ESPECIALES
NIQUEL
ACEROS INOXIDABLES
TANTALIO
COMBUSTIBLES SOLIDOS
TITANIO
WOLFRAMIO
ZIRCONIO
ACEROS PARA HERRAMIENTA
ALEACIONES BASE NIQUEL
ALEACIONES BASE COBALTO
NIOBIO

PRODUCTOS PRENSADOS ISOSTATICAMENTE :

BOLAS PARA VALVULAS CHECK
ASPAS PARA TURBINAS
HERRAMIENTAS DE CARBUROS
BARRAS PARA TALADRAR, TUBOS
RODILLOS
HERRAMIENTAS DE METAL/CERAMICO
CRISOLES
AISLADORES
CONOS PARA PROYECTILES
ESFERAS REFRACTARIAS
PREFORMAS PARA FORJA
PREFORMAS PARA LAMINACION

al molde, desgasificado y sellado; ordinariamente se prensa una pieza por ciclo y la forma no es muy compleja, generalmente, barras, tubos, pero - también es posible prensar varias piezas a la vez. Fig. 49.

La expulsión de la pieza se lleva a cabo por medio del punzón superior ó inferior, fig. 50. Por sus características, permite una producción mayor, menor manejo de utilaje, pero mayor costo y una presión máxima - de trabajo limitada.

Los rangos de presión pueden variar entre 2,100 a 7,000 kg/cm^2 siendo común entre 2,100 y 3,500 kg/cm^2. La compactación isostática ha sido motivo de interés (75 a 79), pues entre sus características únicas - están las de lograr una densidad homogénea elevada, poder prensar piezas con relaciones altas de altura a diámetro ó de grandes dimensiones, tam-- bién cuando el costo del molde para prensado convencional no se justifica- por el número de piezas a producir.

COMPACTACION ISOSTATICA EN CALIENTE :

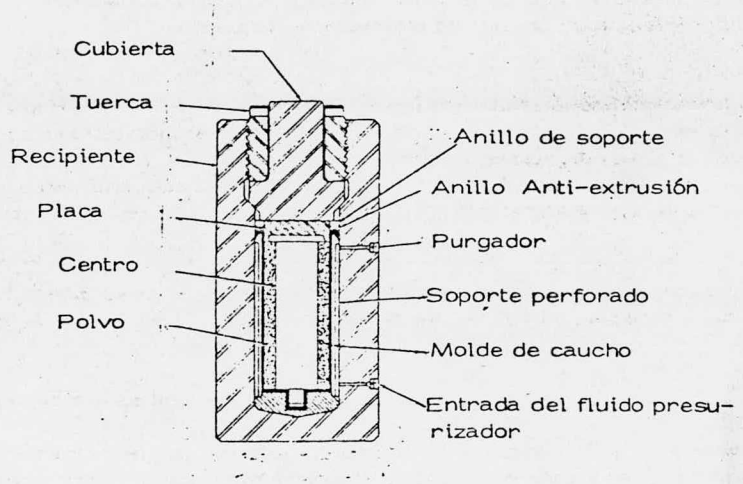
Con el objeto de incrementar las ventajas de la compactación isostática, ésta se puede realizar a temperaturas elevadas, para facilitar la densificación del material, debido a los fenómenos metalúrgicos que se producen. Las temperaturas pueden variar entre 538 - 1650° C y usualmente 982, 1260, 1427 y 1650° C.

Como materiales para el molde se emplean metales ó vidrio, siendo el medio transmisor de presión, generalmente un gas. Y el sistema - más adecuado es el de molde libre.

Un ciclo clásico se puede esquematizar como sigue :

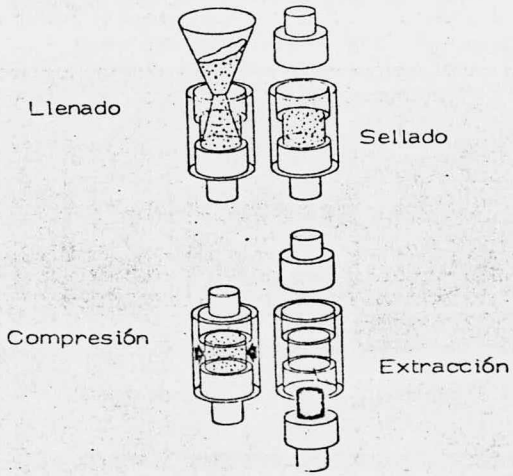
1. Colocación del polvo en el molde (acero dulce), sellado, con una - conexión para eliminación de gases.
2. Evacuación de los gases. Para aceros y super aleaciones, a una - temperatura de 425 - 650° C en un horno de precalentamiento; por medio de una bomba de vacío.
3. Uno ó varios moldes (de acuerdo a las dimensiones de la prensa), son colocados dentro de la unidad, soportados adecuadamente.
4. La unidad es cerrada y se desgasifica, para evitar la contaminación del gas presurizador y se aplican presión y temperatura simultáneamente, en el caso de molde vidrio, la temperatura es llevada hasta niveles que ablanden el molde.
5. Una vez alcanzado el nivel de presión y temperatura indicado se - mantiene para asegurar una homogenización total.
6. Finalmente, se comienzan a reducir presión y temperatura de acuerdo a la práctica establecida para ese material.
7. El recipiente es abierto y descargado y preparado para el siguiente ciclo.

FIGURA No. 49



RECIPIENTE DE PRESION CON MOLDE FIJO

Figura No. 50



PROCESO DE COMPACTACION CON EL MOLDE FIJO

II.3.1.3 COMPACTACION CONTINUA

Este proceso desarrollado por investigadores de la Westing House - Electric Corp., (80) permite el prensado de barras de cualquier longitud. La fig. 51 ilustra el proceso :

Los polvos son alimentados en forma constante sobre un carril rectangular; a cierta distancia, son comprimidos parcialmente por medio de - un punzón de forma tal, que mientras comprime una porción de la masa a - una densidad máxima, las porciones adyacentes, van siendo gradualmente - comprimidas. El avance adecuado del carril permite una continuidad en la barra.

Por medio de este proceso se pueden fabricar barras de espesores - que pueden variar entre algunas décimas de milímetro hasta varios centímetros.

Algunas de las aplicaciones de este proceso pueden ser :

1. Fabricación hojas, barras, placas de grandes tamaños; de metales como : molibdeno, wolframio, tantalio y de metales más comunes : Fe y aleaciones, Ni, Cu, etc.

2. Fabricación contínua de filamentos metálicos.

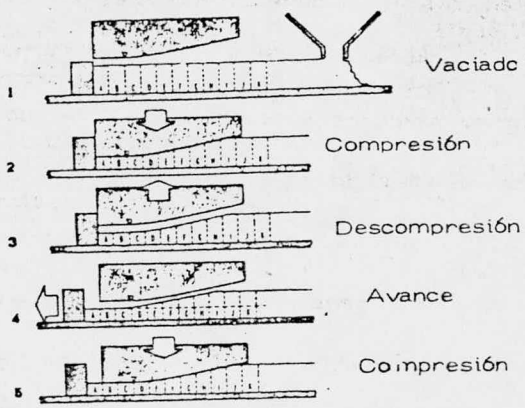
3. Fabricación de barras con estricto control de composición, para — aplicaciones especiales.

4. Producir una preforma para trabajo posterior.

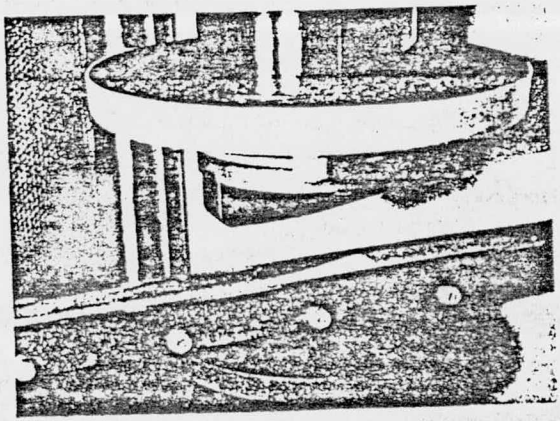
5. Producción de barras compuestas.

Se pueden encontrar otras muchas aplicaciones de este proceso de - compactación y qué sean económicamente factibles.

Figura No. 51



Proceso de compactación contínua



COMPACTACION CONTINUA

II. 3. 1. 4 LAMINACION DE POLVOS

Desde mucho tiempo atrás, se ha buscado la manera de producir láminas metálicas por medio de la laminación directa de los polvos (81 a 89) y en la actualidad es una realidad comercial (90).

Acerca del proceso se pueden hacer las siguientes observaciones :

a. Para una abertura dada entre rodillos, el espesor de la lámina aumenta, aumentando el diámetro de los rodillos.

b. La densidad aumenta ligeramente al disminuir la velocidad de los rodillos.

c. La resistencia y la densidad aumentan con la disminución de la abertura entre rodillos.

d. Polvos con una densidad aparente alta, producen una densidad mayor en la lámina.

e. La velocidad de los rodillos debe ajustarse de acuerdo a la fluidez - del polvo.

f. La adición de lubricantes, disminuye la fluidez y hace necesario su remoción en la sinterización.

g. La dureza ó suavidad de las partículas puede ocasionar una unión - pobre ó el pegamiento a los rodillos, respectivamente.

Desde el punto de vista de la sinterización, se tiene :

1. Altas temperaturas, favorecen la resistencia y ductilidad de la lámina y disminuyen el tiempo de sinterización.
2. Para cada meterial existe un tiempo mínimo de sinterización.
3. Una atmósfera seca y reductora, incrementa la sinterización.
4. De acuerdo al tipo de material, existen condiciones óptimas de temperatura, tiempo y atmósfera adecuada.
5. Se obtienen mejores propiedades, recociendo la lámina, sin producir crecimiento excesivo del grano y re-laminando.

La figura 52 ilustra el proceso de laminación y la figura 53 muestra - algunas secuencias. La Tabla XXIX compara las propiedades de láminas - hechas por pulvimetalurgia y convencionalmente.

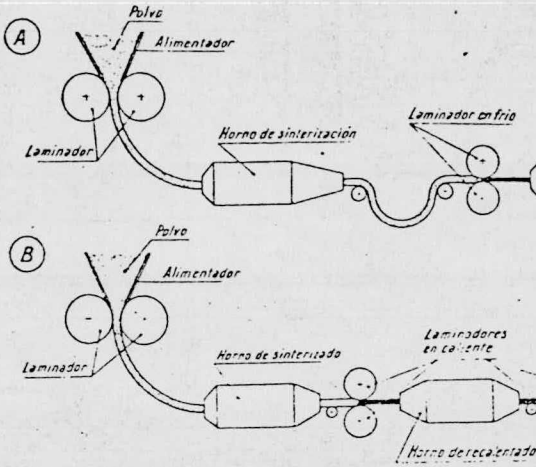
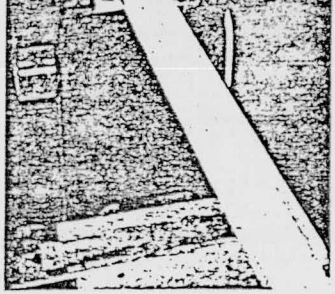


FIG. 6. — Principio de la fabricación de bandas continuas por lam
y sinterizado. (A) laminado en frío, y (B) laminado en

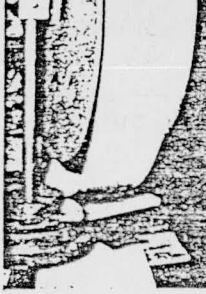
LAMINACION DE POLVOS

a) Laminación en frío

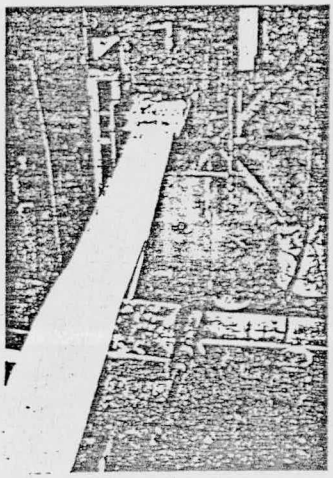
b) Laminación en caliente



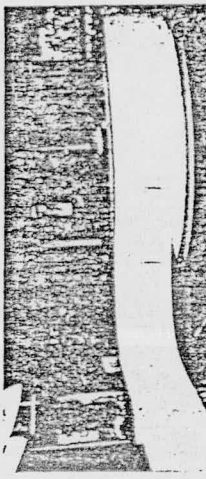
Laminación en frío



Enrollad



Sinterización



Enrolla

TABLA XXIX

COMPARACION DE LAS PROPIEDADES DE LAMINAS PRODUCIDAS POR PULVIMETALURGIA Y CONVENCIONALMENTE.

PROPIEDAD	Lámina Conven. Laminada en frío	Lámina por Pulvimetalurgia Laminada en caliente .	Laminada en frío .
Contenido de C	0.08 %	0.03 %	0.03 %
Espesor	0.46 mm	0.71 mm	0.25 mm
Resistencia a la Fluencia	24.7 kg/mm^2	44.3 kg/mm^2	35.2 kg/mm^2
Resistencia a la Tracción	32.7 kg/mm^2	45.3 kg/mm^2	36.3 kg/mm^2
Elongacion	37	20	31.5
Dureza DPH	132	176	129

II. 3. 1. 5 EXTRUSION DE POLVOS

Una forma adecuada para obtener productos altamente densificados a partir de polvos es la extrusión. Aunque su aplicación es limitada, y aún presenta problemas técnicos que resolver para convertirse en un modo atractivo de consolidación, permite un producto con propiedades iguales ó superiores a los similares hechos convencionalmente; principalmente por la ausencia de segregaciones y con grano muy fino. Fig 54.

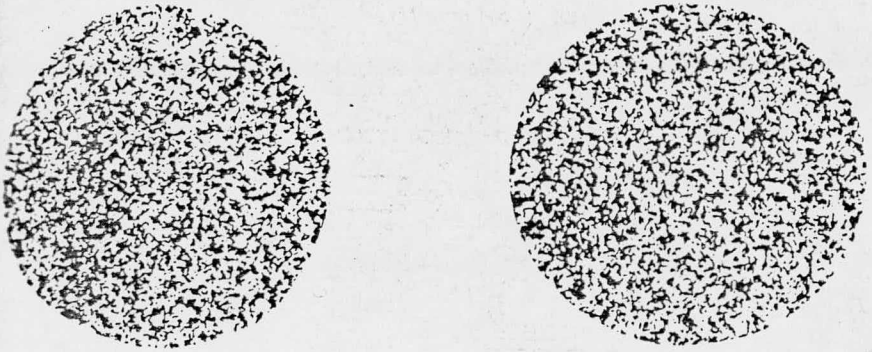
Se han indicado (91 a 93) métodos adecuados para consolidar polvos metálicos, aunque la tendencia es la extrusión de preformas (billetes, barras, etc.) compactadas con otro método como por ejemplo : prensado isostático. De ello se hablará más adelante.

Algunos materiales permiten su manejo directo sin protección, pero la mayoría, requiere su confinamiento en un recipiente, su desgasificación y sellado antes de extruir.

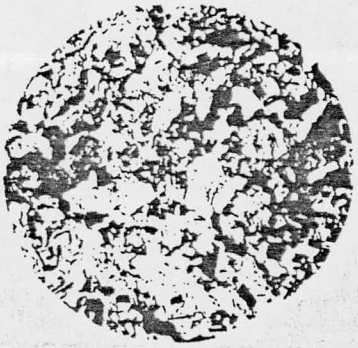
La extrusión se puede realizar en frío ó en caliente, llevando en el último caso el recipiente a la temperatura de extrusión. La figura 55 -- ilustra este proceso y la Tabla XXX compara las propiedades de magnesio extruido a partir de polvo, con magnesio extruido de una barra colada.

También se puede realizar la extrusión de pasta, en la cual el polvo es mezclado con un aglutinante, dando una mezcla plástica.

Figura No. 54



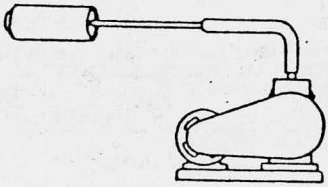
MICROESTRUCTURAS DE POLVO DE COBRE EXTRUIDO



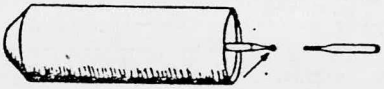
MICROESTRUCTURA DE COBRE CONVENCIONAL EXTRUIDO

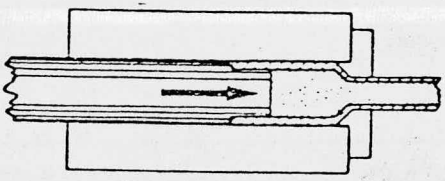
Figura No. 55

DESGASIFICACION DEL RECIPIENTE



Sellado





Pistón modificado para evitar el plegamiento del recipiente.

PROCESO DE EXTRUSION DE LOS POLVOS METALICOS

TABLA XXX

COMPARACION ENTRE MAGNESIO EXTRUIDO A PARTIR DE POLVO Y MAGNESIO EXTRUIDO A PARTIR DE UNA BARRA COLADA.

Extrusión de Magnesio en polvo : a 427° C, 30.48 m/min.

Tratamiento Térmico	Prueba de Tensión al 0.1 %	Resistencia a a la tracción	Elongación
Extruido solamente	15.74 kg/mm^2	26.1 kg/mm^2	5 %
8 hr. a 249° C	15.4 kg/mm^2	26.4 kg/mm^2	8
8 hr a 349° C	- - -	28.8 kg/mm^2	10
24 hr a 449 °C	18.1 kg/mm^2	28.2 kg/mm^2	6

Extrusión de Magnesio en barra colada : a 427° C, 4.6 m/min.

Tratamiento Térmico	Prueba de Tensión al 0.1 %	Resistencia a la tracción	Elongación
Extruido solamente	7.2 kg/mm^2	19.5 kg/mm^2	9 %
8 hr. a 249° C	- - -	- - -	- -
8 hr. a 349° C	6.4 kg/mm^2	18.8 kg/mm^2	8
24 hr. a 449° C	7.8 kg/mm^2	14.7 kg/mm^2	4

II.3.1.6 COMPACTACION DE ALTA ENERGIA (COMPACTACION EXPLOSIVA)

En los últimos años, se ha despertado un gran interés en la conformación de materiales con técnicas de alta velocidad (94 y 95) y en forma particular, se ha estudiado su aplicación en la pulvimetalurgia (96 a 101). Sus características relevantes son :

a. Un tiempo muy corto de aplicación de la presión que varía en un rango de 50 milisegundos a 50 microsegundos.

b. Una elevada energía, transmitida al material.

c. Una presión máxima que varía entre 700 a 1100 kg/mm^2

Algunas de las ventajas que se consiguen son :

1. Compactos con dimensiones grandes, pueden alcanzar densidades -- muy próximas al valor teórico, en la totalidad del material.

2. Posibilidad de compactar materiales poco adecuados para compactar tradicionalmente.

3. Obtención de materiales especiales, por combinación de materiales disimilares.

4. La compactación a gran velocidad ocasiona que algunos materiales — se comporten diferente a lo ordinario y es posible controlar estructura y propiedades.

5. Se pueden emplear polvos más baratos y de menor grado de calidad.

6. Algunas partes se podrían usar sin pasar por la sinterización.

7. Se pueden producir piezas con dimensiones mayores.

Este método presenta algunas desventajas que tienen que ser superadas, antes de lograr una aplicación comercial amplia :

a. Desgaste excesivo del molde y punzones, debido a las altas velocidades y presiones.

b. Poco control dimensional.

c. Necesidad de automatizar el proceso para lograr una velocidad de producción adecuada.

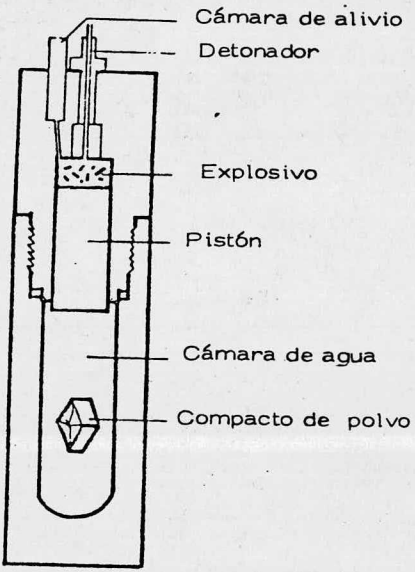
d. Gastos excesivos en mantenimiento y seguridad.

e. Construcción de moldes, centros y punzones, con materiales resistentes.

Los mecanismos empleados para producir la energía requerida pueden ser neumo-mecánicos, por explosivos etc., y se pueden aplicar a compactación convencional e isostática.

La figura 56 ilustra este método y la Tabla XXXI muestra las densidades por compactación explosiva.

Figura No. 56



COMPACTACION EXPLOSIVA

TABLA XXXI

MATERIALES EN POLVO COMPACTADOS EXPLOSIVAMENTE

MATERIAL	DENSIDAD EN VERDE (%)
WOLFRAMIO	98
CARBURO DE WOLFRAMIO	92
CARBURO DE WOLFRAMIO Y TITANIO	70
CARBURO DE TITANIO	95
OXIDO DE TANTALIO	98
OXIDO DE ZIRCONIO	90
CARBURO DE ZIRCONIO	90
CARBURO DE HAFNIO	90
OXIDO DE ALUMINIO	90
BERILIO	93
OXIDO DE BERILIO	94
CARBURO DE BORO	90
MOLIBDENO	97
LATON	95
ACERO INOXIDABLE 316 L	95
INCONEL 713 C	99

II.3.1.7 FORJA DE POLVOS METALICOS

La forja de polvos fué desarrollada para consolidar elementos combustibles para reactores y tiene una aplicación muy limitada. De hecho la forja como tal, se aplica extensivamente en la actualidad a preformas consolidades por algún otro método.

Consiste básicamente en colocar el polvo dentro de un recipiente -- donde puede ser calentado ó evacuado y el recipiente tratado en una prensa- de forja convencional. Después de la operación el recipiente es eliminado- por medios mecánicos ó químicos.

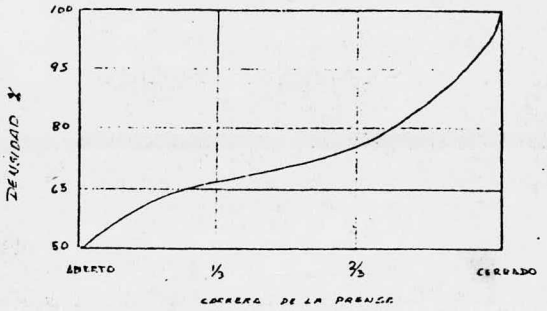
La densificación es rápidamente lograda, en la figura 57 se puede- observar que prácticamente en un ciclo de la prensa, se obtiene una com-- pleta densificación.

Se ha desarrollado un proceso (103) llamado proceso Osprey, - figura 58 que permite la forja de un molde, lenado directamente con polvo atomizado con nitrógeno. La Tabla XXXII compara las propiedades de los productos con la forja convencional.

II.3.1.8 COMPACTACION VIBRATORIA

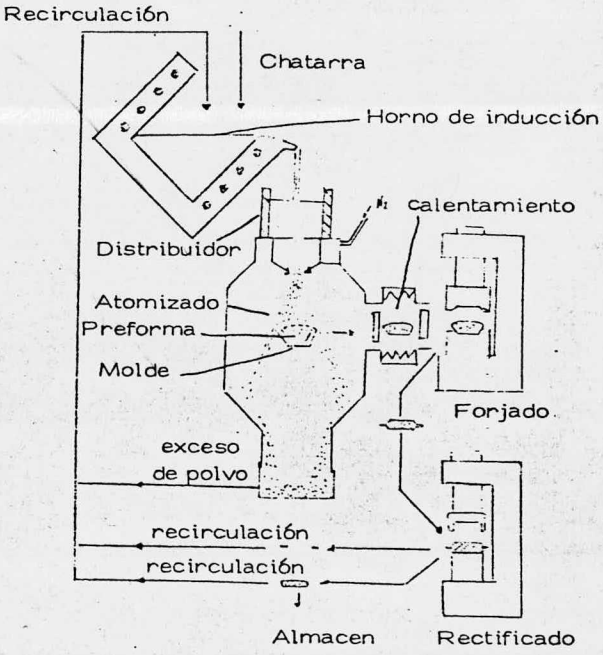
Este método se encuentra en estudio (104) y entre las dificultades para su total aplicación comercial, esta´ la necesidad de acoplar el - equipo necesario a las prensas convencionales, para producir la vibración. Pero como todo método, presenta ventajas que lo hacen atractivo. La -- Tabla XXXIII indica algunas variables a considerar y la figura 59 muestra una máquina para vibro-compactar.

Figura No. 57



En esta figura se puede observar que prac_ ticamente en un ciclo de la prensa, se ob_ tiene una densificación completa

Figura No. 58



PROCESO OSPREY

TABLA XXXII

COMPARACION ENTRE EL PROCESO OSPREY Y LA FORJA CONVENCIONAL.

Acero Inoxidable 304	Proceso OSPREY	Forja Convencional
Prueba de tensión 0.2 %	16 tsi	15.6 tsi
Resistencia a la ruptura	40 tsi	38 tsi
Elongación	65 % (1 pulg.)	55 % (2 pulg.)
Reducción en área	65 %	65 %
Dureza (DPH)	157	150

Acero en 24	Proceso OSPREY	Forja Convencional Long.	Trans.
Resistencia a la ruptura	63 tsi	65 tsi	62 tsi
Elongación (%)	19	25	16
Prueba Izod (FT. Lb)	50	66	36
Resistencia a la fluencia	56 tsi	56 tsi	52 tsi

TABLA XXXIII

VARIABLES QUE AFECTAN EL PROCESO DE VIBROCOMPACTACION

CARACTERISTICAS DEL POLVO :

- DENSIDAD DEL MATERIAL EN POLVO
- TAMAÑO PROMEDIO DE PARTICULA
- DISTRIBUCION DEL TAMAÑO DE PARTICULA
- FORMA DE LA PARTICULA
- CONDICION SUPERFICIAL
- PESO TOTAL DEL POLVO

CARACTERISTICAS DE LA VIBRACION :

- FRECUENCIA
- AMPLITUD
- POSICION DE LOS VIBRADORES
- NUMERO DE VIBRADORES

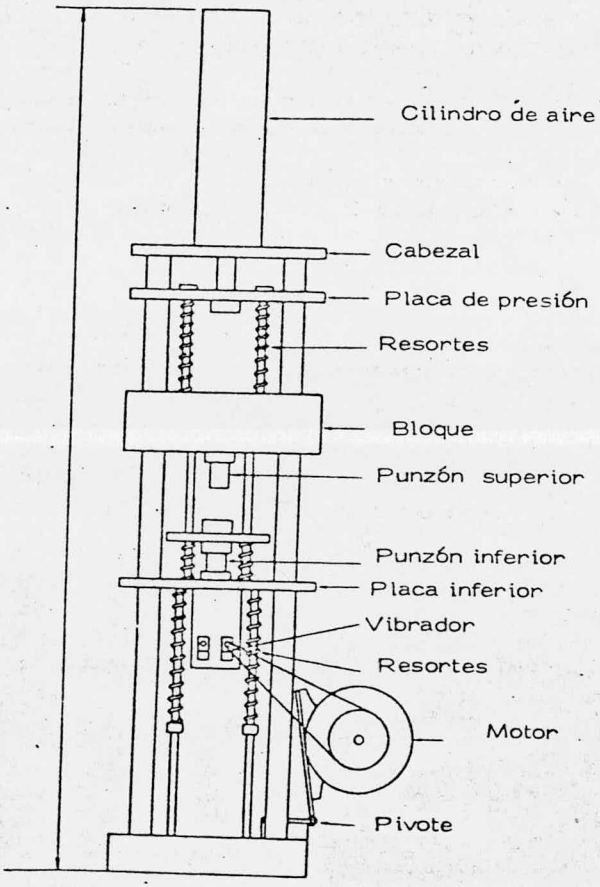
CARACTERISTICAS DEL MOLDE :

- FORMA, TAMAÑO Y ESPESOR DE LAS PAREDES
- MATERIAL DEL MOLDE
- DIRECCION CON RESPECTO A LOS VIBRADORES

CARACTERISTICAS DEL PROCESO :

- ATMOSFERA, HUMEDAD Y TEMPERATURA EN EL MOLDE
- PRESION APLICADA
- TIEMPO TOTAL DE VIBRACION

Figura No. 59



PRENSA PARA VIBRO - COMPACTAR

II.3.2 COMPACTACION SIN PRESION

Con el desarrollo de la pulvimetalurgia, nuevas ideas y métodos que se empleaban en otros campos, principalmente en la cerámica, se introdujeron a prueba. El aprovechamiento de la característica principal de la pulvimetalurgia, la porosidad dió a luz a varios procesos que sin la aplicación de presión permiten la consolidación de los polvos, en productos útiles.

II.3.2.1 SINTERIZACION DE LOS POLVOS EN MOLDE (COMPACTACION POR GRAVEDAD)

Consiste en llenar un molde de la forma requerida, con el polvo de características seleccionadas y sinterizarlo.

Su aplicación principal es en la fabricación de piezas porosas, principalmente para filtros (105). El control preciso del proceso, permite la obtención de las propiedades adecuadas y una alta calidad.

Entre las desventajas más sobresalientes se encuentran :

a. Necesidad de moldes químicamente inertes a elevadas temperaturas para ello se emplean usualmente grafito, óxidos, carburos, cerámicas.

b. Dificultad en la remoción de la pieza después de la sinterización.

c. Un elevado grado de encogimiento.

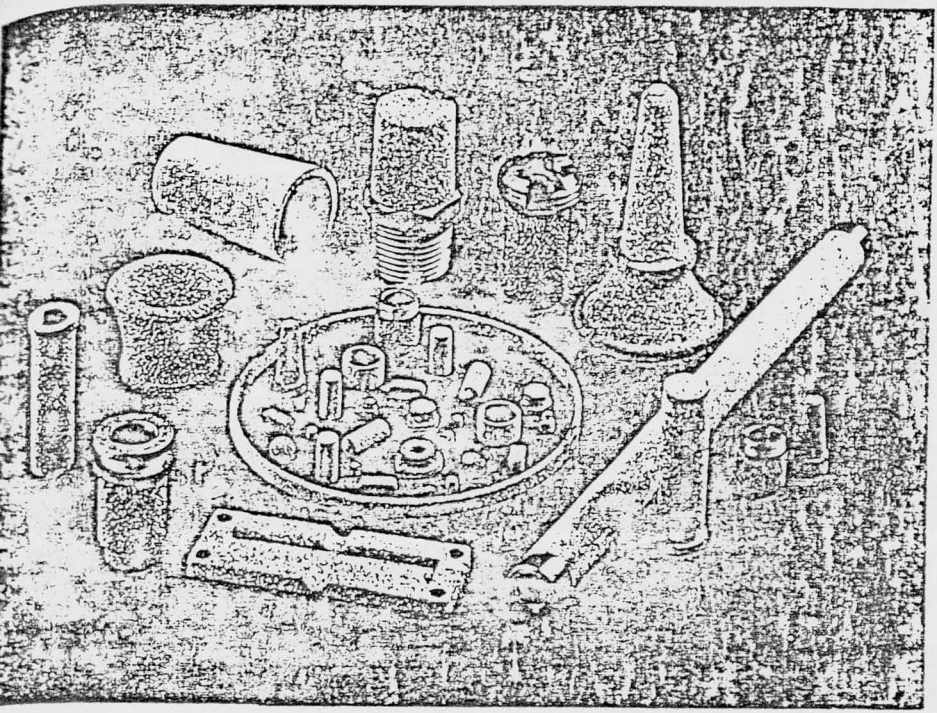
d. Llenado adecuado de moldes complejos.

e. Sensitividad del polvo a las vibraciones.

f. Necesidad de grandes cantidades de moldes para tener alta producción.

La figura 60 muestra algunos productos hechos por esta técnica.

Figura No. 60



FILTROS PRODUCIDOS POR COMPACTACION POR GRAVEDAD

11.3.2.2 COLADA EN BARBOTINE

Esta técnica, ampliamente usada en el campo de la cerámica, ha sido considerada (106, 107) para su aplicación en la pulvimetalurgia y se emplea en forma limitada.

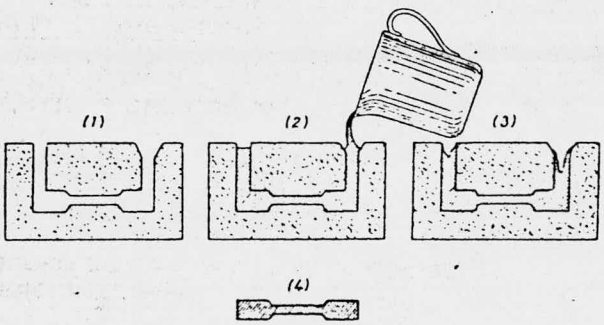
El proceso consiste en preparar una suspensión de polvo en un líquido que sirve como transportador y con aditivos; una vez preparada, se traspasa al molde, el cual está hecho de un material absorbente, por ejemplo yeso de parís, se deja reposar hasta obtener las condiciones deseadas, con este proceso es posible obtener formas de paredes delgadas, dejando formar la capa del espesor indicado y vaciando inmediatamente el resto de la suspensión. Se remueve la pieza y se seca, para su posterior sinterización. Por un proceso similar (108) se puede producir láminas de un sólo material ó combinaciones de diferentes materiales, así como de la porosidad que se requiera.

La mezcla debe ser cuidadosamente preparada para obtener la viscosidad y el pH óptimo para una buena colada, de importancia vital es el defloculante añadido; entre los mejores se encuentran las sales de amonio y sodio de los ácidos algénicos. El pH se ajusta con ácido clorhídrico y el medio empleado normalmente es agua; también se usan alcoholes y compuestos orgánicos.

Por su naturaleza, este método no permite una gran producción, debido al largo tiempo necesario para la remoción del fluido, sin embargo, es empleado con materiales incompresibles por las técnicas convencionales.

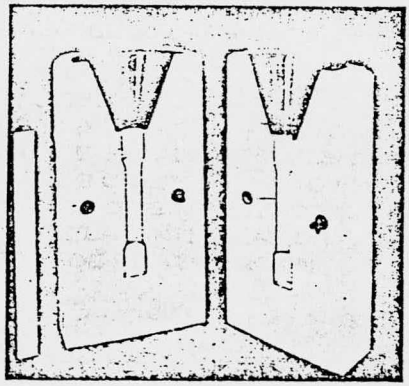
La figura 61 indica este proceso y en la Tabla XXXIV indica algunas variables a considerar.

Figura No. 61



PROCESO DE COLADA EN SUSPENSION

1. Molde
2. Vaciado de la suspensión
3. Permanencia
4. Pieza



MOLDE PARA COLADA EN SUSPENSION

TABLA XXXIV

ALGUNAS VARIABLES IMPORTANTES EN EL PROCESO DE COLADA EN SUSPENSION.

CARACTERISTICAS DEL POLVO METALICO :

- ESTRUCTURA CRISTALINA
- DENSIDAD DEL MATERIAL
- FORMA DE LA PARTICULA
- DIAMETRO DE LA PARTICULA
- PROCESO DE PRODUCCION DEL POLVO
- CONDICIONES SUPERFICIALES

CARACTERISTICAS DE LA SUSPENSION :

- DENSIDAD DEL LIQUIDO
- VISCOSIDAD DEL LIQUIDO
- RELACION SOLIDO A LIQUIDO
- REACCION DEL SOLIDO CON EL LIQUIDO
- CANTIDAD DE AIRE ATRAPADO EN LA SUSPENSION
- TIPO Y CANTIDAD DE DEFLOCULANTE
- VALOR DE pH

CARACTERISTICAS DEL TRATAMIENTO TERMICO :

- MATERIAL DEL MOLDE
- POROSIDAD DEL MOLDE
- VELOCIDAD DE SECADO EN EL MOLDE
- VELOCIDAD DE SECADO DESPUES DEL DESMOLDEO
- VELOCIDAD DE CALENTAMIENTO EN LA SINTERIZACION
- TEMPERATURA DE SINTERIZACION
- DURACION DE LA SINTERIZACION
- ATMOSFERA DE SINTERIZACION

II.3.2.3 COMPACTACION VIBRATORIA

La técnica de vibrocompactación, es la aplicación de vibraciones - a una masa de polvo contenida en un recipiente.

Las variables que influyen, son las mismas que en la vibrocompactación con presión, exceptuando por supuesto, la influencia de la presión.

El objeto es conseguir una densificación del material para su posterior sinterización ú otro proceso.

La Tabla XXXV muestra el aumento en densidad, conforme pasa el tiempo de vibración.

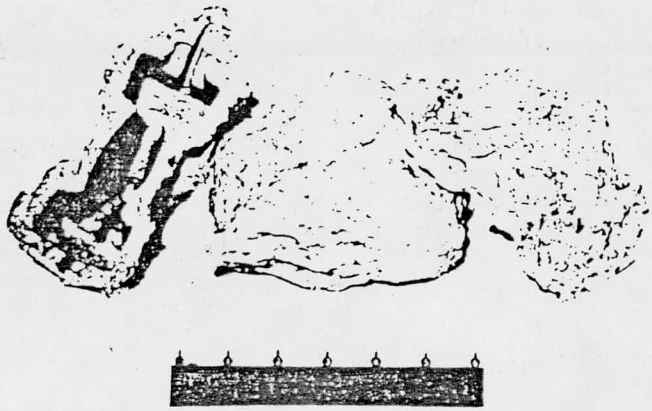
La empresa U.S. Steel, ha patentado (109) un proceso, en el - cual, el polvo con un aglutinante es vibrado en un molde desechable, consumible. Calentado rápidamert e a temperatura adecuada y forjado a la - forma requerida . Fig. 62

TABLA XXXV

DENSIFICACION OBTENIDA CONFORME SE INCREMENTA EL TIEMPO DE VIBRACION.

Tiempo de Vibración (Min.)	0	0.5	1	2	3	5	10
Densidad g/cc	5.1	5.34	6.05	6.15	6.19	6.21	6.25

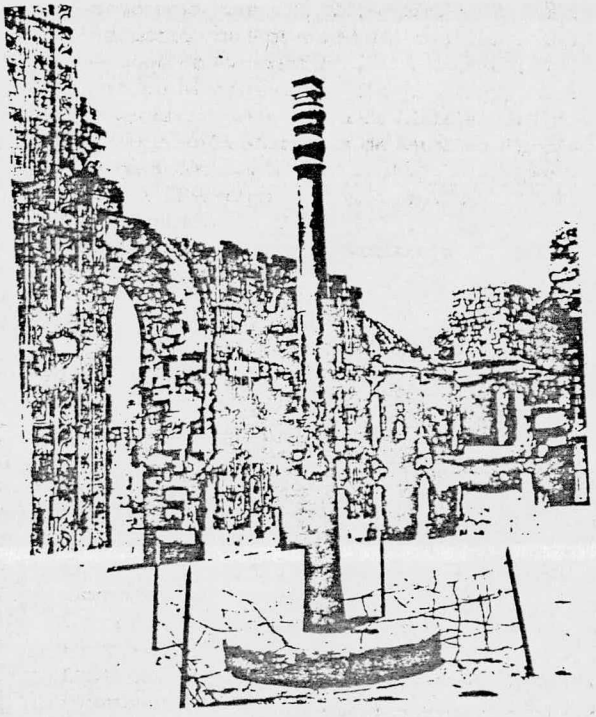
Figura No. 62



MOLDE DESECHABLE

A B C D

A - Polvo
B - Preforma prensada
C - Preforma sinterizada
D - Producto forjado



COLUMNA DE DELHI

III. SINTERIZACION

La sinterización se puede definir como la etapa en dónde : "Un conjunto de partículas, compactadas por presión ó simplemente confinadas en un molde, se unen químicamente entre ellas para formar un cuerpo coherente, bajo la influencia de una temperatura elevada " (3) .

III.1 ASPECTOS TEORICOS

Desde los trabajos de F. Sauerwald (14), que se pueden considerar como los primeros estudios sistemáticos de los fenómenos de la sinterización, hasta nuestros días (110 y 111), la sinterización ha sido motivo de estudio (112 a 133) y controversia. Gran parte debido a la existencia de cinco mecanismos que se presume intervienen y que son difíciles de cuantificar en cuanto a su importancia en el proceso; a pesar de las nuevas técnicas (134) empleadas para ello.

Al respecto vale citar las palabras del investigar R.L. Coble : — " . . . También se ha llegado a reconocer que es básicamente imposible, obtener conclusiones firmes del análisis de la cinética de sinterización. Esto surge, y particularmente en la etapa inicial del proceso, del hecho de — que hay cinco mecanismos, los cuales presumimos pueden operar : difusión superficial, difusión por borde de grano, difusión en volúmen, evaporación y condensación y flujo plástico . . . " Para algunas combinaciones de temperatura y dominio relativo de los mecanismos independientes y ausencia completa de otros, podemos hacer firmes inferencias acerca de los mecanismos de transporte pero no conclusiones abosolutas" . (130)

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

$$\frac{X^n}{a} = \frac{F(T)}{a^m} t \quad \ldots\ldots (4)$$

Dónde :

X	=	Radio del cuello entre esferas
a	=	Radio de la esfera
F (T)	=	Es una función exclusiva de la temperatura que contiene el coeficiente que caracteriza al mecanimsmo operante por ejemplo, cuando predomina la difusión, el coeficiente de difusión correspondiente, etc.
t	=	Tiempo
n y m	=	Exponentes determinados por el mecanismo operante, para los cuales se tiene :

n = 2	m = 1	Flujo viscoso Newtoniano
n = 3	m = 2	Evaporación y condensación

n = 5	m = 3	Difusión en volúmen
n = 6	m = 4	Difusión por borde de grano
n = 7	m = 4	Difusión superficial

Hay sin embargo, discusión acerca de los valores de estos exponen— es, Bockstegiel (126) ha determinado la existencia de un factor de forma - c), que relaciona al exponente (n) con otro factor (b) determinado por - el mecanismo operante :

$$n = cb + 1 \quad - - - \quad (5)$$

Y mostró, que las desviaciones del modelo esférico, hacen cambiar - el valor de n.

Conviene en estos casos recordar las palabras de Stuijts, citadas por R. L. Coble (130) :

" Los modelos son una guía para tus pensamientos y experimentos - y no deben ser tomados como un evangelio " .

Desde el punto de vista práctico, la aplicación de estos modelos es — limitada y los problemas técnicos de la sinterización han sido más o menos sobrellevados.

Para una explicación descriptiva del proceso, se puede dividir en 6 e- tapas :

1. Unión inicial de las partículas
2. Crecimiento del cuello
3. Oclusión de los canales entre poros
4. Redondeamiento de los poros
5. Densificación ó encogimiento de los poros
6. Crecimiento de los poros

1. La formación de uniones entre las partículas, se presenta en los ini— cios del proceso (135), sin cambio dimensional, pero promoviendo en el material un incremento de la resistencia y la coherencia. Fig. 63

2. Por medio del transporte de material, se produce un engrosamiento de los cuellos entre partículas. Fig. 64.

3. En esta etapa la porosidad sufre cambios significativos, al cerrarse - los canales entre poros. Fig. 65 .

4. Por efecto del crecimiento de los cuellos, los poros se redondean; es ta etapa es importante por la influencia de la porosidad sobre las pro- piedades mecánicas del material.

Figura No. 63

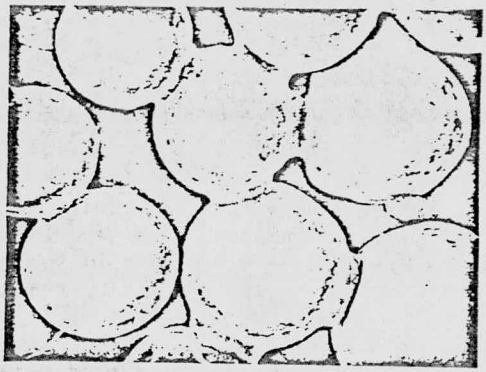


Figura No. 64

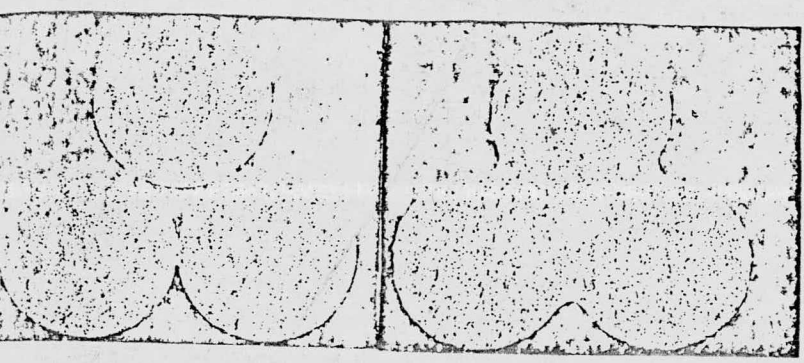
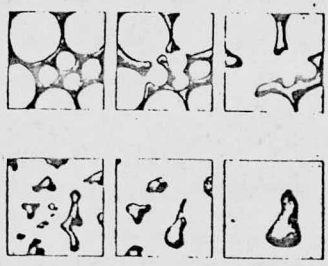


Figura No. 65



5. La densificación producida por el encogimiento de los poros, no siempre se produce, debido a otros efectos como expansiones, que la neutralizan. Es importante destacar que el encogimiento de los poros involucra un desplazamiento del material y la eliminación de gases, reduciendo el volúmen de la masa sinterizada. Sin embargo, la eliminación de la porosidad, requiere de tiempos y temperaturas, que en la práctica no son económicas.

6. Una vez realizadas las etapas anteriores, se tiene un engrosamiento de los poros a expensas de otros, pero manteniendo la misma porosidad total; desde el punto de vista comercial de la operación, no es de consecuencias.

Las dos variables más importantes que controlan el proceso de sinterización son la temperatura y el tiempo.

La temperatura : El proceso de sinterización tiene una gran dependencia de la temperatura, a groso modo se puede indicar que un aumento de 10 grados, duplica la velocidad de sinterización y aumenta los cambios que ocurren. Las figuras 66 y 67 indican algunos efectos de la temperatura sobre distintas propiedades. Se ha encontrado que hay una temperatura óptima abajo y arriba de la cual las propiedades de resistencia son inferiores. Fig. 68.

El tiempo : Aunque el grado de sinterización aumenta con el tiempo, su efecto es marcadamente menor comparado con el de la temperatura, la figura 69 muestra que los efectos son mayores al principio del proceso; se ha encontrado que cualquier cambio tiene una relación con el tiempo, de la forma t^n dónde n es menor que la unidad.

Entre otras variables, se encuentran aquellas relacionadas con las partículas como, su estructura, forma, composición, área y condición superficial y también la densidad en verde del compacto.

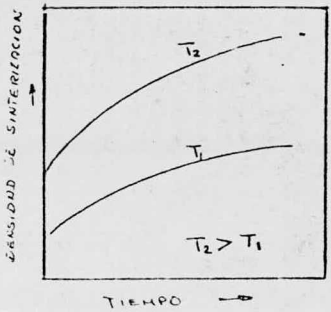
III.2 TRANSFORMACIONES DURANTE LA SINTERIZACION

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

A las temperaturas de sinterización, como ya se ha indicado, ocurren fenómenos de difusión, los cuales son de suma importancia, cuando se pretende obtener una aleación homogénea, a partir de una mezcla mecánica de dos ó más polvos elementales. Entre los factores influyentes se encuentran, la forma, tamaño de la partícula, la porosidad, el tiempo y la temperatura.

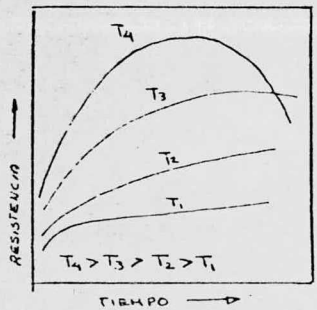
Figura No. 66

Figura No. 67



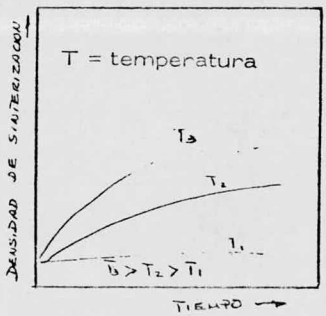
EFECTO DE LA TEMPERATURA SOBRE COMPACTOS DE IGUAL DENSIDAD EN VERDE.

Figura No. 68



T = temperatura

Figura No. 69



EFECTO DEL TIEMPO SOBRE LA DENSIDAD DE SINTERIZACION A TRES TEMPERATURAS DIFERENTES

Nota : La figura No. 67 representa el efecto de una temperatura mayor sobre compactos de igual densidad en verde y la figura No. 69 el efecto del tiempo sobre el incremento en densidad a tres temperaturas diferentes.

Otros fenómenos que pueden suceder, son transformaciones de fases, debido a las propiedades naturales de los metales, por ejemplo : la transformación alfa - gama en el hierro; al respecto se han realizado estudios (136 y 137) para observar el efecto de las transformaciones de fase en la velocidad de sinterización en tratamientos cíclicos entre ambas fases y se ha observado un incremento de la misma.

También se producen reacciones químicas, tales como oxidación, descarburación, etc., que afectan las condiciones superficiales e internas de las piezas, así como sus propiedades, además de las interacciones de la atmósfera con el refractario y elementos calentadores de los hornos. [Figs. 70 y 71 NO]

Como una consecuencia de los cambios que suceden en la sinterización, se producen variaciones en la densidad y en las dimensiones de las piezas y siendo una de las ventajas de la pulvimetalurgia la producción masiva de piezas que no requieren un trabajo posterior, es importante tener un control adecuado. Un método para controlar la densidad es empleando un parámetro de densificación dado por :

$$P.D. = \frac{\text{Den Sinterizada} - \text{Den en Verde}}{\text{Den Teórica} - \text{Den en Verde}} \quad --- \quad (6)$$

Una forma de evitar cambios dimensionales en las piezas, es tener una mezcla de polvos del mismo componente, pero con propiedades opuestas de expansión y contracción ó en el caso de mezclas, la adición adecuada de aleantes, [(138, 139, 140) La fig. 72 ilustra el cambio dimensional en el sistema Fe - grafito, respecto al tiempo de sinterización; en la práctica, el diseñador de la herramienta cuenta con factores para compensar este crecimiento ó encogimiento y mantener la pieza dentro de especificaciones (141, 143) NO]

III.3 SINTERIZACION CON FASE LIQUIDA

La presencia de una fase líquida, dá a la sinterización una característica particular y su estudio es más complejo (143 a 146); en la práctica se realiza de dos maneras :

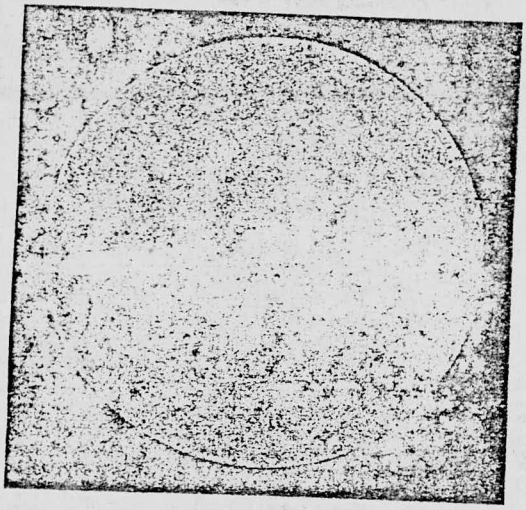
1. Cuando la fase líquida es producida por uno ó más de los componentes contenidos en el compacto original.

2. Infiltración de un esqueleto presinterizado ó cuando el infiltrante se coloca en el compacto, al mismo tiempo que éste sinteriza.

En el primer caso, se considera la existencia de la fase líquida desde las primeras etapas de la sinterización. Se han establecido tres etapas :

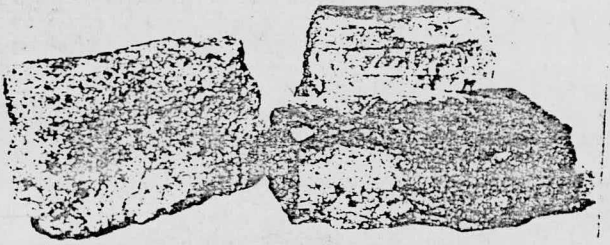
a. Flujo líquido : Sucede un movimiento masivo de partículas en la fase

Figura No. 70



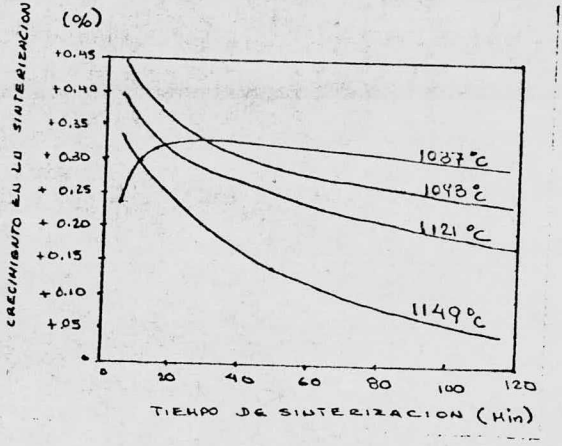
PIEZA OXIDADA

Figura No. 71



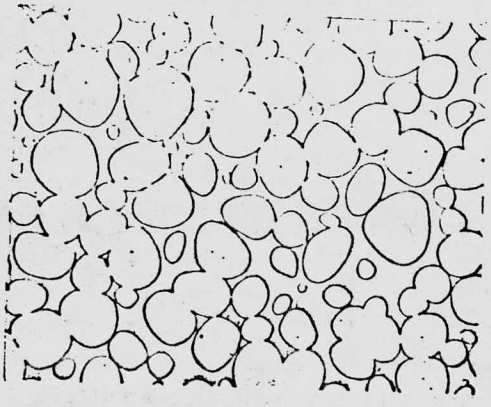
REFRACTARIO DAÑADO

Figura No. 72



SISTEMA F_e - GRAFITO

Figura No. 73



SISTEMA CON FASE LIQUIDA

líquida, que produce una densificación, la cual se considera completa para porcentajes de fase líquida mayores de 35% en volúmen.

b. Disolución y reprecipitación : Sólo ocurre cuando hay una solubilidad limitada entre las fases, las partículas pequeñas se disuelven y las mayores crecen y redondean.

c. Coalescencia : Las partículas sólidas que se encuentran en contacto forman un esqueleto en la pieza. Cuando la fase líquida no moja bien al sólido, tiende a salir del compacto, dando lugar al fenómeno de exudación.

Los sistemas de sinterización en fase líquida requieren los aspectos siguientes :

1. Presencia de una fase líquida.
2. Solubilidad limitada de las fases.
3. Porcentajes de fases tales, que mantengan la integridad del compacto.
4. Un tamaño de partícula fino del sólido, para una rápida densificación.
5. Un producto tal, que las partículas sólidas estén rodeadas de fase líquida. [Figura No. 73.]

En el segundo caso, también se pretende con el material infiltrante, obtener una completa densificación de la pieza. Las prácticas de infiltración son variadas [(147 a 149), la fig. 74 dá un esquema del proceso.] El rango de temperatura usual para infiltración de hierro con cobre es de 1100 a 1150° C. [La fig. 75 muestra el efecto del porcentaje de infiltración sobre las propiedades mecánicas para un material de hierro infiltrado con cobre.]

III.4 ASPECTOS PRACTICOS DE LA SINTERIZACION

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

a. Calentamiento y remoción de lubricantes.
b. Permanencia a la temperatura de sinterización.
c. Enfriamiento.

a. Calentamiento y remoción de lubricantes : Es práctica usual, remover los lubricantes empleados en la compactación en un paso anterior al de la sinterización, tanto para evitar posibles daños a los elementos calefactores del horno, como al refractario; también es posible que en la zona de sinterización, por las condiciones, no haya eliminación completa del lubricante con el consiguiente deterioro en las propiedades de las piezas y/o en su aspecto [fig. 76] y en las dimensiones [fig. 77.] Dependiendo del tipo de horno, esta remoción se puede realizar en forma independiente de la sinterización ó en el mismo

Figura No. 74

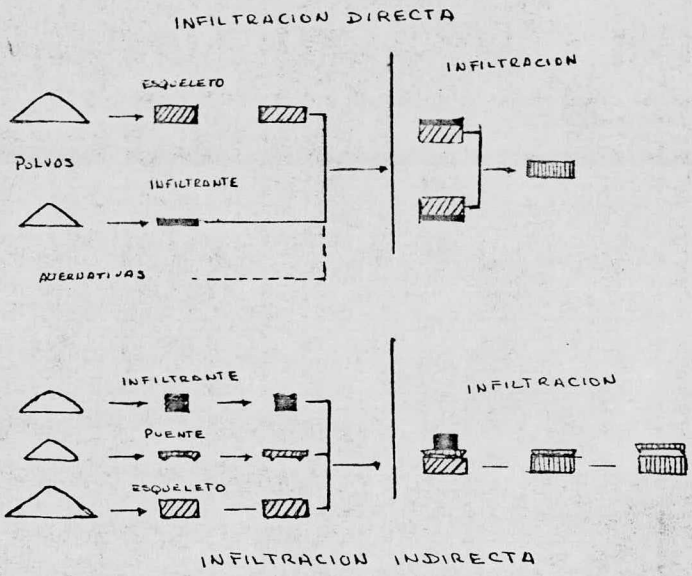


Figura No. 75

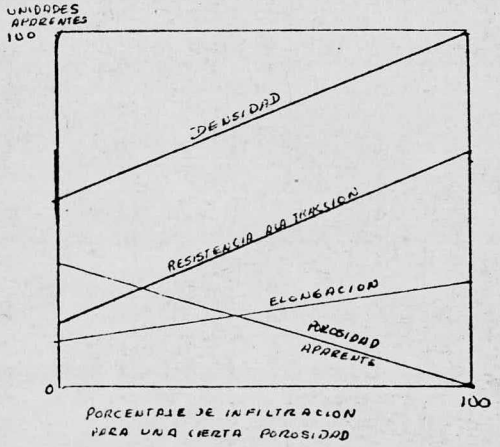
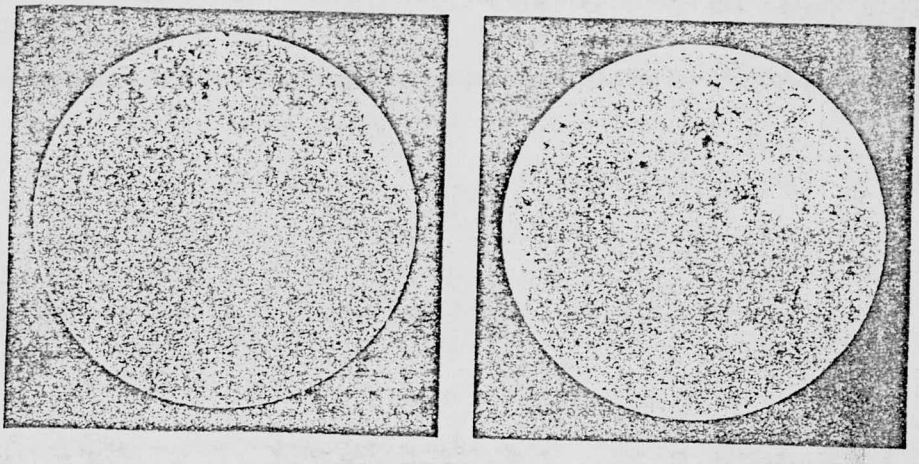


Figura No. 76



SUPERFICIE DAÑADA POR EL LUBRICANTE

Figura No. 77

DEFORMACION EN UNA PIEZA SINTERIZADA

horno, aún en este caso puede ser en cámaras independientes ó continuas, dependiendo del diseño del horno. El rango de temperaturas empleado en esta operación es de 430 a 816° C, con posibilidad de llegar hasta 870° C.

b. Permanencia a la temperatura de sinterización : Una vez realizada la eliminación del lubricante, evitando en lo posible una sinterización prematura, se lleva a la temperatura de sinterización requerida de acuerdo al material (Tabla XXXVI) donde es mantenido el tiempo necesario para una sinterización completa y evitar problemas de sinterizado insuficiente, fig. 78; con el consiguiente deterioro en las propiedades.

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

Una buena manera de controlar el ciclo de sinterización, es conocer la curva de temperatura a través del horno y determinar la correcta para cada tipo de pieza y material. La fig. 79 indica varios tipos de ciclos de sinterización.

desde aquí

III.5 ATMOSFERAS DE SINTERIZACION

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

a. Prevenir cualquier reacción química entre el ambiente y las piezas a sinterizar.
b. Limpieza y purificación de los compactos.
c. Activar la sinterización (150, 151).
d. Proveer uno ó más elementos que pueden alear con los compactos ó mantener condiciones de equilibrio para no modificar su composición.

La atmósfera puede ser neutra, oxidante, reductora ó realizarse la sinterización en vacio. Los tipos más comunes de atmósferas son:

a. Hidrógeno
b. Nitrógeno
c. Gas exotérmico
d. Gas endotérmico
e. Amoníaco disociado
f. Mezclas de H_2 - N_2
g. Gas inerte
h. Vacio

En la Tabla XXXVII se enlistan las características de algunas atmósferas de sinterización.

TABLA XXXVI

TEMPERATURAS TIPICAS DE SINTERIZACION, ATMOSFERAS Y TIEMPOS.

Material	Temp. (° C)	Tiempo (Min.)	Atmósfera
Bronce	760 - 871	10 - 12	H,A,X,D
Cobre	843 - 899	12 - 45	H,A,X,D
Hierro y Fe-C-Cu	1010 - 1150	8 - 45	H,A,X,D
Níquel	1010 - 1150	30 - 45	H,A,X,D
Acero Inoxidable	1093 - 1288	30 - 60	H,A,V
Wolframio	2343	480	H,A,V
Carburo de Wolframio	1427 - 1482	20 - 30	H,V
Tantalio	2400	480	V,N
Imanes Alnico	1200 - 1300	120 - 150	H
Latón	843 - 900	10 - 45	H,A,X,D

H = Hidrógeno

A = Amoniaco Disociado

X = Gas Exotérmico

D = Gas Endotérmico

V = Vacío

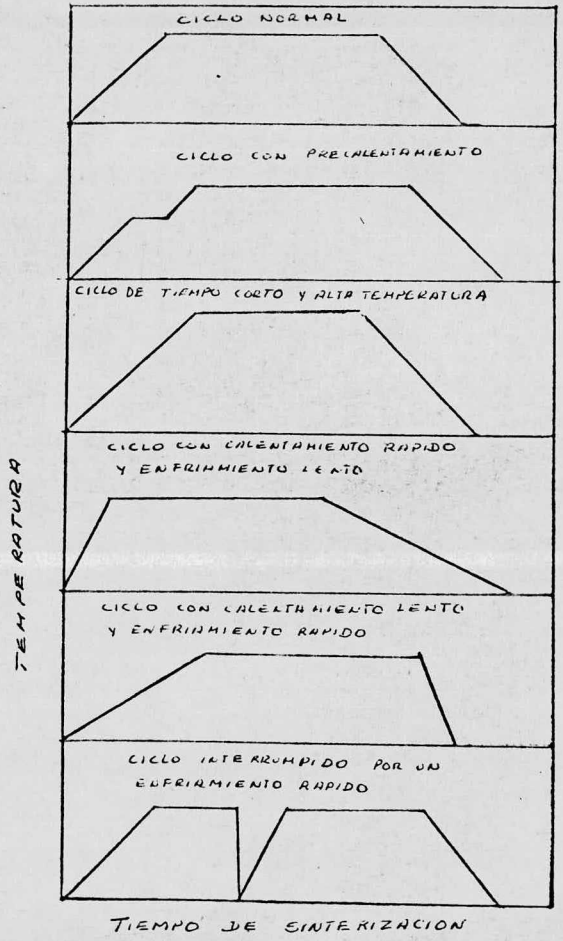
N = Gas inerte

Figura No. 78

A. Sinterización insuficiente

B. Sinterización Adecuada

Figura No. 79



DIFERENTES TIPOS DE CURVAS DE SINTERIZACION

TABLA XXXVII

PROPIEDADES Y NATURALEZA DE ALGUNAS ATOMOSFERAS DE SINTERIZACION

Gas	Punto de Rocio (°C)	Propiedades a alta tem.	COMPOSICION CO_2	CO	CH_4	O_2	H_2	N_2	A	He	Aire/Gas
1. Hidrógeno	-73 a -51	r,R,m	0.0	0.0	0.0	0.0	100.0	0.0	0.0	0.0	
2. Amoniaco Disociado, seco	-51 a -40	R,r,m	0.0	0.0	0.0	0.0	75.0	25.0	0.0	0.0	
a) Sat. Rico	21 a 32	R,r,D	5.0	10.0	1.0	0.0	14.0	70.0	0.0	0.0	6 : 1
b) Sat. Pobre	21 a 32	F,n,D	11.5	0.7	0.0	0.0	0.7	87.1	0.0	0.0	10.25 : 1
c) Rico Purificado	-40	R,r,C	0.0	10.8	1.0	0.0	15.0	73.2	0.0	0.0	6 : 1
3. Endotérmico											
a) Rico seco	-23 a -12	R,r,G	0.0	20.0	0.5	0.0	38.0	41.5	0.0	0.0	2.4 : 1
b) Pobre sat.	21 a 32	R,r,D	3.0	13.8	0.0	0.0	21.5	61.7	0.0	0.0	4.5 : 1
4. Argon	-51	N,n,m	0.0	0.0	0.0	-	-	-	99.0	0.0	
5. Helio	-51	N,n,m	0.0	0.0	0.0	-	0.01	-	99.99		
6. Aire normal	10	F,O,D	0.0	0.0	0.0	21.0	0.0	78.1	0.9	0.0	

R = Reduce Fe y sus óxidos
r = Reduce cobre y sus óxidos
N = Neutral a Fe y sus óxidos
F = Oxida Fe y sus óxidos
0 = Oxida Cu y sus óxidos

n = Neutral para Cu y sus óxidos
D = Fuerte descarburizante de Fe - C
C = Regular carburizante de Fe - C
G = Fuerte carburizante de Fe - C
m = Neutral para Fe - C

Nota: Los sub-índices indican variaciones de los gases 2 y 3 respectivamente.

III.6 HORNOS DE SINTERIZACION

Durante mucho tiempo, los hornos empleados, eran diseñados por los propios productores de las piezas sinterizadas (152) ó adaptaciones de hornos para otros usos. En la actualidad los fabricantes de hornos se han preocupado por satisfacer las condiciones particulares de la pulvimetalurgia, aspecto importante que requiere una íntima relación entre comprador y diseñador, para lograr el diseño óptimo. Los tipos de hornos más comunes son:

1. Hornos discontinuos
   - a. Tipo mufla
   - b. A vacío
   - c. Tipo campana
   - d. Tipo tubo
2. Hornos Continuos
   - a. De malla
   - b. De rodillos
   - c. Con empujador
   - d. De viga caminante

Cada uno de estos hornos, tiene características propias que lo hacen adecuado para determinadas condiciones de operación. Los hornos discontinuos son empleados con materiales en los que no importa la cantidad, sino la calidad y propiedades a obtener; para alta temperatura (1350 ° C) y producción, son comunes los hornos de empujador y de viga caminante, para temperaturas medias (1000 - 1150 ° C) son empleados los hornos de rodillos y de malla. Las figuras 80, 81 muestran algunos tipos de hornos.

III.7 CONTROL EN LA SINTERIZACION

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

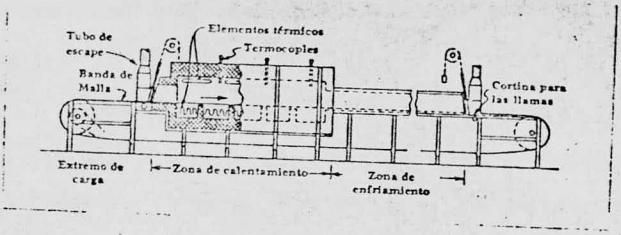
Los dos aspectos fundamentales que necesitan un chequeo continuo para mantenerlos dentro del rango establecido, son :

a. La temperatura
b. La atmósfera

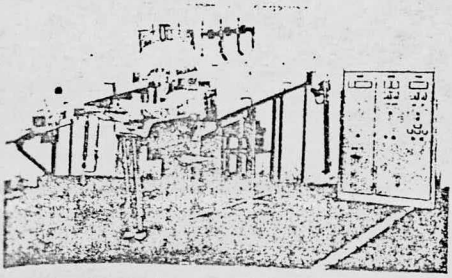
Para medir la temperatura, se utilizan termopares tipo Cromel-Alumel hasta temperaturas de 1090 ° C, Platino - Platino Rodio hasta 1530 ° C, pero generalmente para temperaturas superiores a 1370 ° C, son empleados pirómetros de radiación y termopares de Wolframio - Wolframio Renio.

Hay que tener en cuenta que la selección debe tomar en cuenta el tipo de atmósfera de trabajo, rango de temperatura y la disposición en el horno -

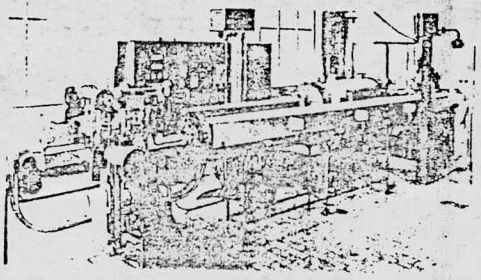
Figura No. 80



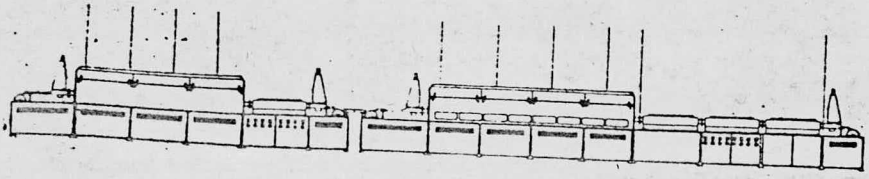
HORNO DE MALLA



TIPO DE EMPUJADOR

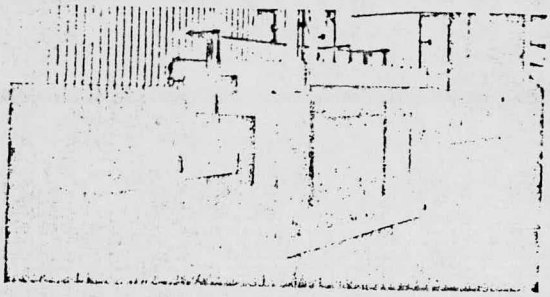


TIPO DE EMPUJADOR

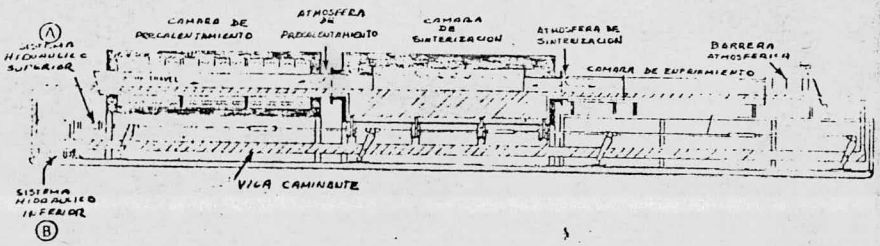


HORNO DE MALLA

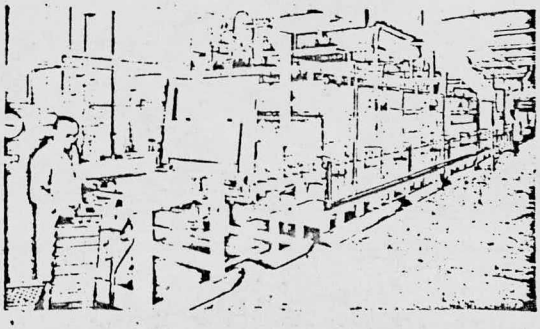
Figura No. 81



HORNO TIPO MUFLA



HORNO DE VIGA CAMINANTE



HORNO DE RODILLOS

debe ser tal, que la medición sea la correcta. Los medidores están conectados a controles de menor ó mayor grado de sofisticación que automáticamente mantienen la temperatura dentro de un rango cuya variación depende de la sensibilidad del control.

Para controlar la atmósfera se utilizan analizadores de gases, pero más comúnmente por la determinación del punto de rocío de la atmósfera, manteniendo una precisión de 0.05% para contenidos bajos de oxígeno.

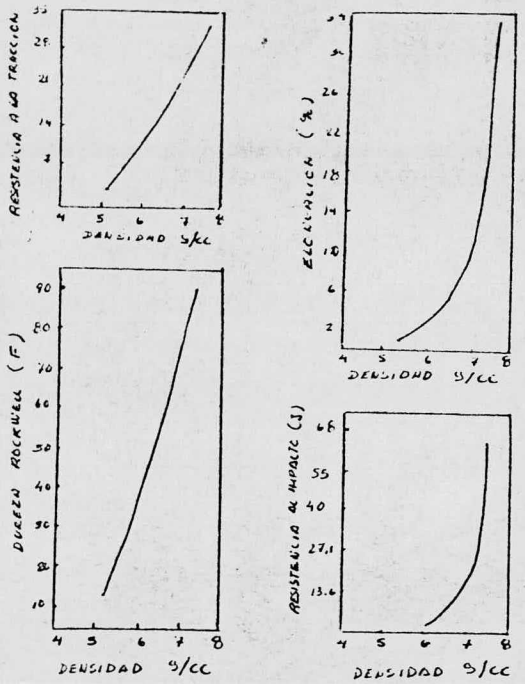
III:8 PROPIEDADES DE LAS PIEZAS SINTERIZADAS

Una característica particular de las piezas sinterizadas, es la porosidad residual, sólo con procesos y/o tratamientos avocados a ese fin, es posible eliminar completamente la porosidad, pero en la mayoría de los productos, existe en mayor ó menor cantidad.

La densidad, tiene una gran influencia en las propiedades mecánicas del material (153 - 155) como se puede observar en la fig. 82, donde se puede ver el mejoramiento de las propiedades conforme se tiene una mayor densidad.

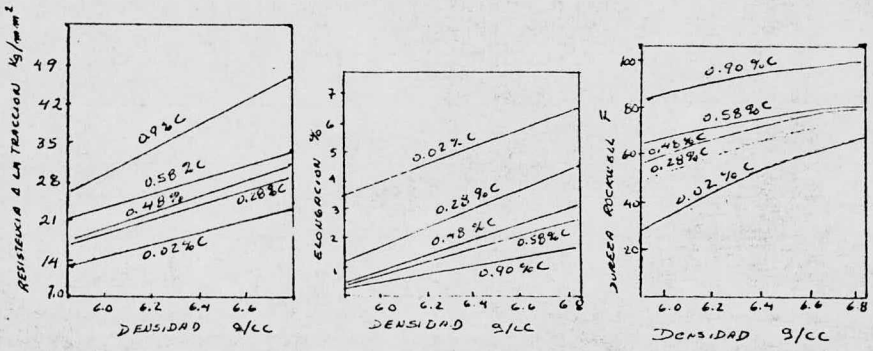
En general, no se puede hablar de valores precisos en las propiedades del material, se maneja preferentemente una banda de valores ó valores promedio; las gráficas de las figuras 83 a 85 presentan varias propiedades como resistencia a la tracción, elongación al impacto, conductividad, etc., de algunos materiales.

Figura No. 82



Incremento de las Propiedades Mecánicas Conforme se incrementa la densidad

Figura No. 83



Propiedades del Material F_e - C. con diferentes proporciones de Carbono con respecto a la densidad

Figura No. 84

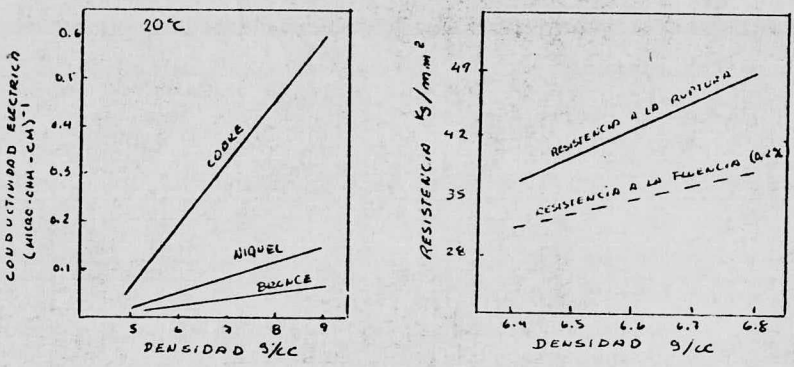
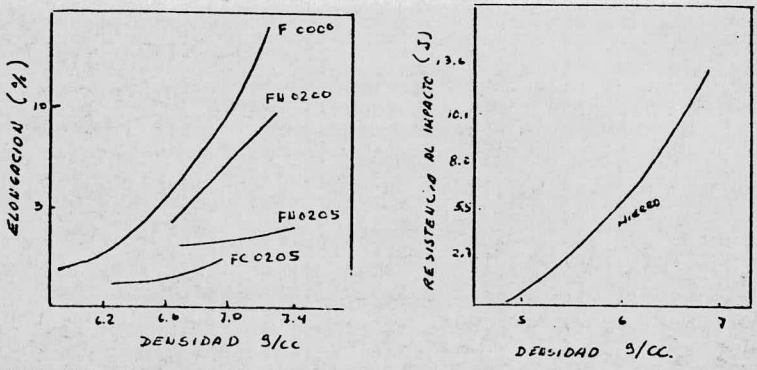


Figura No. 85



IV TRATAMIENTOS POST - SINTERIZACION

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

IV.1 OPERACIONES DE CALIBRADO Y CONFORMADO

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

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

b. Reprensado para dar a la pieza una precisión dimensional más riguro sa.

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

IV.1.1 EXTRUSION Y FORJA

Actualmente hay dos procesos de conformación de preformas sinterizadas, en productos con propiedades superiores a las normales en pulvimetalurgia, fig. 86. Estos procesos son la extrusión de tres barras y la forja, - dentro de la cual se pueden diferenciar modalidades. Fig. 87. Los cuales - están adquiriendo gran importancia tecnológica y comercial en la pulvimetalurgia hoy en día. (156 - 168).

Se ha prestado especial interés a la forja de preformas, por ser un - proceso competitivo tanto en economía como en propiedades con la forja convencional. H. A. Kuhn (169 - 172) ha desarrollado la teoría de la plasticidad para aplicarla a cuerpos porosos, con excelentes resultados. Consecuentemente se ha estudiado (173 - 174) el diseño preformas para una precisa - operación. Las figuras 88 y 89 muestran piezas forjadas.

Este proceso ofrece las siguientes ventajas :

1. Requiere menor energía
2. Reducción en las pérdidas de material

Figura No. 86

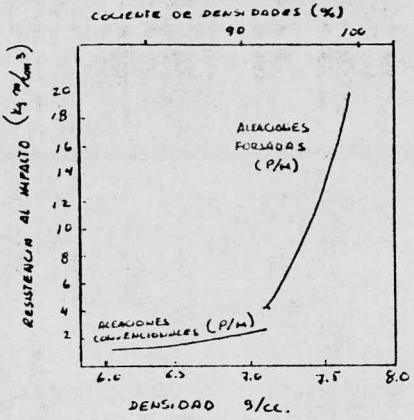
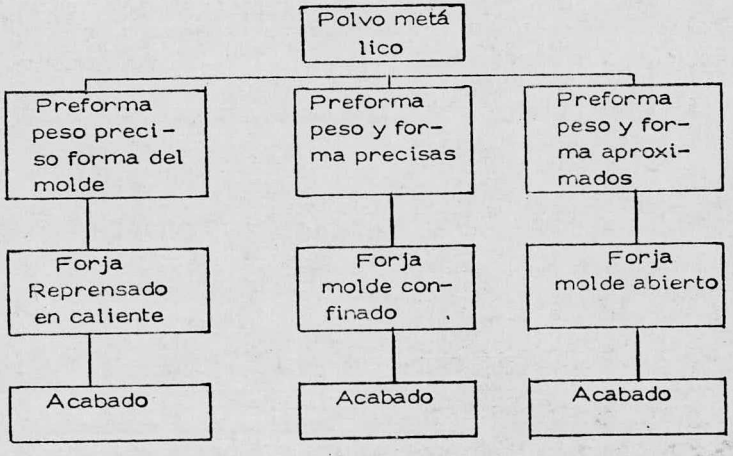
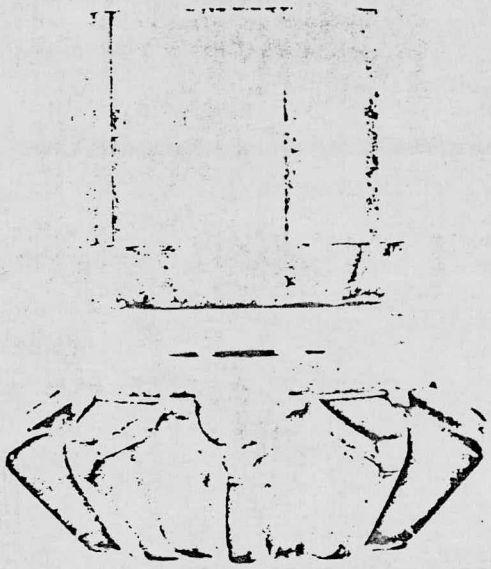


Figura No. 87



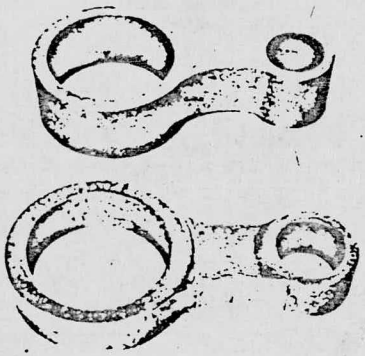
CLASES DE PROCESOS DE FORJADO

Figura No. 88



PIEZA FORJADA

Figura No. 89



PIEZA FORJADA

3. Mejora las propiedades
4. Permite la producción de piezas mayores
5. Permite producir compuestos y aleaciones, que no se pueden hacer convencionalmente.
6. Economía.

IV.1.2 MAQUINADOS

Algunas veces se requiere que la pieza sufra un maquinado y por su naturaleza, su comportamiento difiere del convencional y es preciso tomar algunas precauciones (175 - 176), para obtener un acabado correcto y la obtención de las características deseadas.

IV.2 TRATAMIENTOS TERMICOS

Una manera de incrementar las propiedades de las piezas, sinterizadas, es por medio de tratamientos térmicos (177 a 180). Las piezas de hierro y sus aleaciones, pueden someterse a los tratamientos comunes de piezas ferrosas, como: Recocido, normalizado, temple y revenido, esferoidización y otros tratamientos.

Las piezas no ferrosas, pueden tener tratamientos de endurecimiento por precipitación, recocidos, etc.

La Tabla XXXVIII muestra las propiedades de aceros sinterizados, tratados térmicamente. La fig. 90 ilustra el incremento y la fig. 91 indica el efecto de la temperatura de envejecimiento sobre la resistencia, elongación para un acero con cobre sinterizado.

IV.3 TRATAMIENTOS SUPERFICIALES Y DE ACABADO

En muchas de las aplicaciones, se requiere un acabado superficial que provea determinadas características; mecánicas, ambientales ó decorativas a la superficie de la pieza (177, 181 y 184).

Los tratamientos pueden ser :

Carburación, nitruración, carbonitruración, pavonado, tratamiento a vapor, etc. que forman una capa resistente y protectora. Fig. 92 . Tratamientos de limpieza, pulido, perdigoneado, etc. Recubrimientos metálicos, cerámicos y orgánicos.

Todo ello con el fin de producir una superficie adecuada a los requerimientos de utilización.

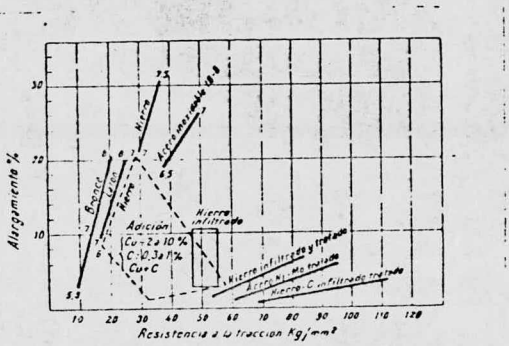
Como punto particular, los tratamientos de impregnación, (185 - 186)

TABLA XXXVIII

PROPIEDADES DE ALGUNOS ACEROS SINTERIZADOS Y TRATADOS TERMICAMENTE .

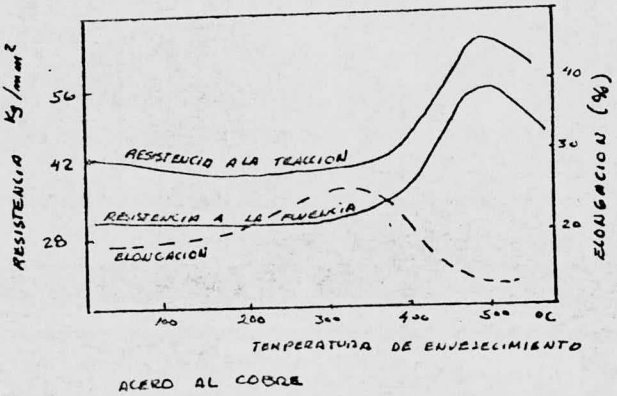
Aleación	Tratamiento Térmico		Densidad	Resistencia a la Tracción	Elongación	Dureza
	Temple en aceite	Revenido (°C)	g/cm^3	Kg/mm^2	%	H V
Fe,0.4 C	870	300	6.6	27.8	1.0	140
Fe,0.4 C	870	300	7.0	44.8	1.0	170
Fe,0.4 C	870	300	7.4	65.0	3.0	180
Fe,0.4 C,2.0Ni	870	300	6.6	57.2	0.5	170
Fe,0.4C,2.0Ni	870	300	7.0	69.6	1.0	190
Fe,0.4C,2.0Ni	870	300	7.4	96.0	2.0	230
Fe,0.8C,5.0Cu	870	300	6.2	48.0	0.3	330
Fe,0.8C,20.0Cu	870	300	7.4	86.6	0.3	420
Fe,0.45C,2.0Ni, 0.5Mo	900	310	7.3	129.0	0.4	390

Figura No. 90



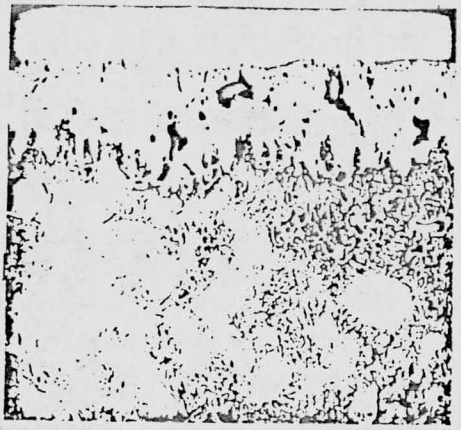
DIFERENTES TIPOS DE MATERIALES Y SUS PROPIEDADES MECANICAS

Figura No. 91



EFECTO DEL TRATAMIENTO TERMICO SOBRE LAS PROPIEDADES

Figura No. 92



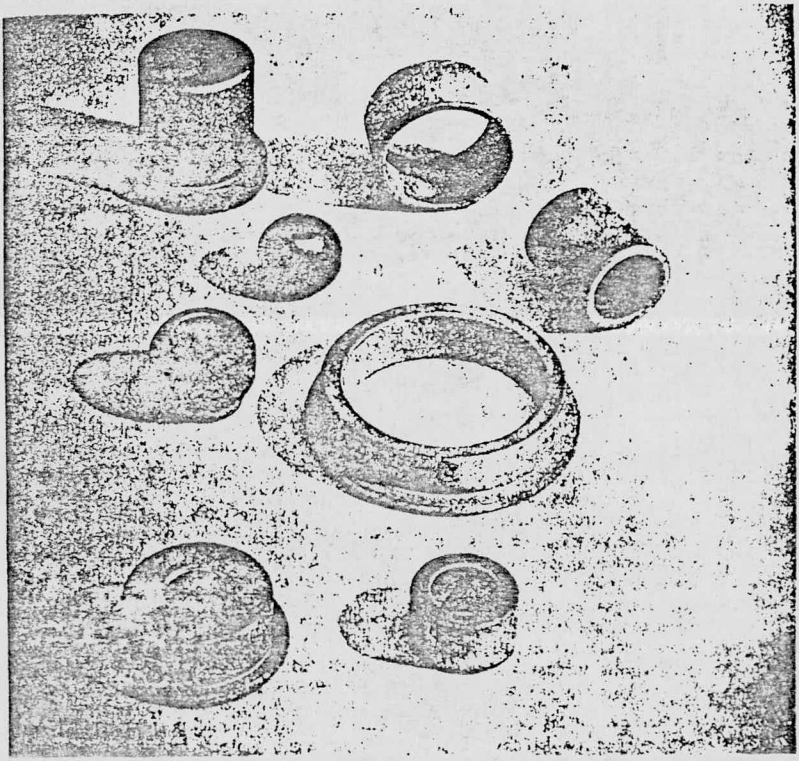
ACERO BORIZADO POR
DIFUSION

ACERO CARBONI-
TRURADO

constituyen un aspecto único de la pulvimetalurgia. Consisten en la satura - ción de un porcentaje de porosidad estipulado, de acuerdo al tipo de material con un elemento impregnante, que puede ser aceite con ciertas propiedades (187) y en algunos casos ceras, plásticos y resinas.

Es necesario que la porosidad sea interconectada para conducir el - impregnante hasta los poros más internos. De esta manera se tiene una — pieza con su propia lubricación; la figura 93 muestra varios tipos de cojine-- tes autolubricados.

Figura No. 93



DIFERENTES TIPOS DE COJINETES AUTO-LUBRICADOS

IV.4 CONTROL DE CALIDAD

Debido a las características masivas de producción de las piezas sinterizadas y a su particular naturaleza; los controles de calidad son indispensables iniciarlos desde la materia prima, el polvo.

IV.4.1 CONTROL DE LOS POLVOS METALICOS

En el capítulo I se expusieron las principales características de los polvos, que influyen en el proceso de forma evidente. Aunque existe información (188) sobre los polvos comerciales, los usuarios constatan las características físicas y químicas de sus materiales de acuerdo a los patrones establecidos por las asociaciones de pulvimetalurgia y/o dependencias gubernamentales (189 - 191).

IV.4.2 CONTROL DE PROCESO

Normalmente cada fabricante establece los controles que considera necesarios y de acuerdo a sus prácticas de operación, vigila aquellos pasos que son más críticos con controles más severos. Todo ésto queda bien establecido dentro de los manuales de procedimiento, que detalla para cada operación ; de acuerdo a las variables del proceso (192 - 195).

IV.4.3 CONTROL DE CALIDAD DE PRODUCTO TERMINADO

Los fabricantes de piezas sinterizadas, se ven obligados a imponer medidas particulares para controlar la calidad de sus productos, como son el muestreo estadístico y en casos en que las piezas lo requieran por su aplicación, un chequeo al 100%. Las condiciones mínimas de aceptación son generalmente establecidas por las asociaciones, así como el procedimiento de prueba del material (189, 190, 191, 196, 197).

Las pruebas realizadas son similares a las realizadas a productos convencionales, aunque en algunos casos difieren en apreciación; como es la prueba de dureza, la cual presenta la característica de la presencia de porosidad, lo cual hace que no sea representativo del material; la prueba convencional de dureza es conocida como dureza aparente, siendo necesario una prueba de microdureza para encontrar la dureza real del material.

La inspección por ultrasonido, corrientes eléctricas (198, 199) y rayos X han tenido gran aceptación por su facilidad para aplicarse a piezas pequeñas y por ser prueba no destructiva que permite detectar los parámetros más críticos de las piezas sinterizadas; la porosidad, su tamaño y distribución y grietas o laminaciones microscópicas.

V. APLICACIONES

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

V.1 EMPLEO DIRECTO DE LOS POLVOS METALICOS

Existe una gran variedad de industrias que utilizan los polvos metálicos como tales, en sus productos ó en sus procesos (2). Como casos que se pueden considerar intermedios entre la producción de piezas y el uso del polvo, están las técnicas de aspersión de los polvos en estado de fusión por medio de sopletes sobre moldes que después son eliminados mecánica ó químicamente, fig. 94. O sobre piezas desgastadas que son de esta manera reconstituídas (200, 201). Fig. 95. La Tabla XXXIX enumera algunas áreas de aplicación.

V.2 MATERIALES FERROSOS

Dentro de la pulvimetalurgia, el polvo de hierro y aleaciones ocupan un lugar preponderante y dentro de ellos, su aplicación en la fabricación de piezas estructurales ocupó el 82% de la producción total en el año de 1976 en E.U.A. En la actualidad hay una gama de materiales ferrosos que van desde hierro puro para aplicaciones electrónicas, hasta aleaciones para herramientas y aceros inoxidables y aceros maraging (202 - 205).

La Tabla XL indica las propiedades y usos de materiales ferrosos comerciales; clasificados por la Federación de Industrias de Pulvimetalurgia (MPIF) en su estándar # 35.

Se puede observar que se cubre un amplio campo dentro del cual las propiedades de los materiales satisfacen las condiciones mecánicas y ambientales exigidas en muchas aplicaciones. Además de que se realizan estudios completos para suministrar al usuario el material que cubriendo las especificaciones mecánicas y fisicoquímicas resulte atractivamente económico, con ésto se obtienen dos ventajas cuando menos: un conocimiento racional de las condiciones de trabajo del material y la selección precisa que permita la máxima economía.

Las figuras 96, 97 y 98 muestran algunas de las piezas de fabricación común.

Figura No. 94

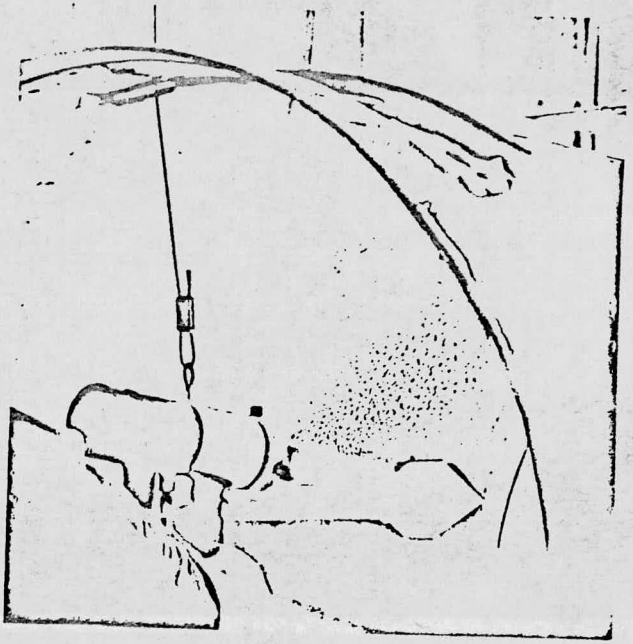
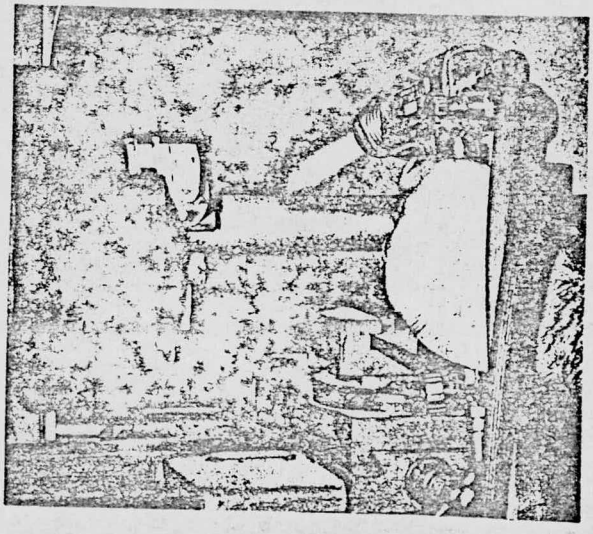


Figura No. 95



18

TABLA XXXIX

USO DE LOS POLVOS METALICOS

Aplicación	Polvo usado
Acabados de piezas, limpieza	Aluminio, acero, hierro, acero inoxidable.
Fabricación de polvos aleantes	Niquel, plomo, ferro-wolframio, ferro-silicio, ferro-molibdeno, aluminio, wolframio, selenio, etc.
En la agricultura : en alimentos, fertilizantes, medicamentos, fungicidas	hierro, cobalto, cobre
Combustibles, explosivos	Aluminio, magnesio
Concretos	Aluminio, hierro
Recubrimientos metálicos	Cobre, aluminio, plomo, zinc, acero - inoxidable, bronce, níquel, estaño
Tintas, pinturas	Plata, zinc, plomo, bronce, fierro, cobre, aluminio, latón aluminio, estaño
Soldadura cortar, recubrimientos de electrodos, "brazing" (bronceado) metalización, recubrimientos de piezas, circuitos impresos, núcleos electrónicos.	Hierro, cobre, plata, paladio, acero inoxidable

TABLA XL

PROPIEDADES Y APLICACIONES DE LAS PIEZAS FERROSAS DE PULVIMETALURGIA

Material y designación	Tipo ( )	Condición	Densidad g/cm.^{3}	Resistencia a la tracción kg/mm^2	Resistencia a la fluencia kg/cm^2	Dureza aparente	Módulo de Young kg/mm^2	Elongación % (en 254 cm)	Resistencia al impacto (Joules)	Resistencia a la fatiga kg/mm^2	Aplicación
Hierro P/M F-0000-	N R	Sinterizado Sinterizado	5.8 6.6	11.24 16.87	8.43 11.24	Rh-10 Rh-80	7.38×10^3 11.24×10^3	2.0 5.0	4.06 12.88	4.27 6.41	Engranes estructurales (de carga ligera); piezas polares de motores; cojinetes autolubricados.
Acero P/M	N	Sinterizado1	5.8	12.65	10.19	Rb-5	7.38×10^3	1.0	3.38	4.80	Piezas estructurales de cargas ligeras - Ejem.: engranes
Acero P/M F-0008	N N	Sinterizado Tratado térmicamente	5.8 5.8	20.38 29,52	17.57 -	Rb-35 Rb-90	7.38×10^3 7.38×10^3	0.5 0.5	2.71 -	7.74 11.22	Se requiere que posean resistencia al desgaste
Fe-Cu P/M	P	Sinterizado	6.2	16.17	11.95	Rh-80	9.13×10^3	2.5	7.45	6.14	Cojinetes ó componentes mecánicos
Acero-Cobre	P	Sinterizado	6.2	28.12	23.90	Rb-35	9.13×10^3	1.0	4.74	10.68	Cojinetes ó componentes mecánicos
Acero-Cobre Fc-0208	N N	Sinterizado Tratado térmicamente	5.8 5.8	29.20 30.23	21.09 -	Rb-45 Rb-95	7.38×10^3 7.38×10^3	0.5 0.5	3.38 -	8.81 11.47	Cojinetes ó componentes mecánicos.
Acero-Cobre Fc-0505	N N	Sinterizado Tratado térmicamente.	5.8 5.8	24.60 -	21.09 -	Rb-50 Rb-90	7.38×10^3 -	0.5 -	4.06 -	9.35 -	Componentes mecánicos
Acero-Cobre Fc-0508	N N	Sinterizado Tratado térmicamente	5.8 5.8	33.74 -	30.23 -	Rb-60 Rb-95	7.38×10^3 -	0.5 -	4.06 -	12.82 -	Aplicaciones en piezas estructurales Para cargas medianas con buena resistencia al desgaste con tratamiento térmico
Acero-Cobre	N	Sinterizado	5.8	25.31	-	Rb-55	-	0.5	-	-	Componentes mecánicos
Hierro-Cobre Fc-1000-N	N	Sinterizado	5.8	21.09	-	Rf-70	-	0.5	-	-	Cojinetes ó componentes mecánicos
Hierro-Níquel	R	Sinterizado	6.6	-	-	Rb-38	-	4.0	18.98	7.73	Componentes mecánicos(que pueden ser endurecidos superficialmente)
Acero-Níquel FN-0205	R R	Sinterizado Tratado térmicamente	6.6 6.6	- -	- -	Rb-50 Rc-32	- -	3.0 0,5	13.55 8.13	10.54 23.20	En estado sinterizado ; Estructurales - Tratados termicamente: estructurales resistentes al desgaste carga pesada,reprensados, resinterizados,-

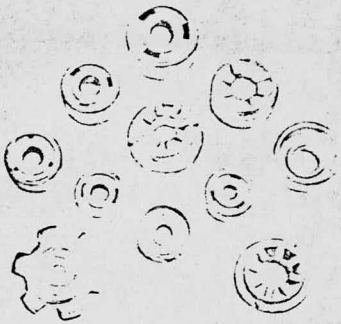
TABLA XL
Propiedades y Apl. de las pzas. de pulvimet.
Hoja No. 2

Material y designación	Tipo ( )	Condición	Densidad g/ cm.^{3}	Resistencia a la tracción kg/mm^2	Resistencia a la fluencia kg/cm^2	Dureza aparente	Módulo de Young kg/mm^2	Elongación % (en 254 cm)	Resistencia al impacto (Joules)	Resistencia a la fatiga Kg/mm^2	Aplicación
											y tratados térmicamente: Estructurales resistentes al desgaste e impacto.
Acero-Alníquel FN-0208	R R	Sinterizado Tratado térmicamente	6.6 6.6	33.74 70.30	21.09 66.08	Rb-62 Rc-34	- -	2.0 0.5	10.84 8.13	13.35 28.12	Componentes mecánicos
Hierro-Níquel	R	Sinterizado	6.6	25.31	15.46	Rb-40	-	5.0	21.68	9.84	Componentes mecánicos (pueden ser endurecidos superficialmente)
Acero-Alníquel FN-045	R R	Sinterizado Tratado térmicamente	6.6 6.6	31.63 78.74	18.27 66.08	Rb-63 Rc-27	- -	3.0 0.5	13.55 8.13	12.65 31.63	Componentes mecánicos
Acero-Alníquel	R	Sinterizado	6.6	40.07	29.52	Rb-72	-	1.5	8.13	16.17	Estructurales, resistencia al desgaste, altas tensiones pueden carbonitrorarse
Hierro-Níquel	R	Sinterizado	6.6	36.55	21.09	Rb-60	-	2.5	16.26	14.76	Componentes mecanicos.
MATERIALES INFILTRADOS											
Acero-Infiltrado	T	Sinterizado	7.4	58.35	44.99	Rb-75	-	4.0	18.97	-	Componentes mecánicos
Fx-1008-T	T	Sinterizado	7.4	63.27	52.73	Rb-80	-	2.5	16.26	-	Componentes mecánicos
Fx-2000-T 15-25 Cu	T	Sinterizado	7.4	45.69	-	Rb-60	-	1.0	20.32	-	Componentes mecánicos
Fx-2005-T	T	Sinterizado	7.4	52.73	35.15	Rb-80	-	1.5	12.87	-	Componentes mecánicos
Fx-2008-T	T	Sinterizado	7.4	59.76	52.73	Rb-80	-	1.0	13.55	-	Componentes mecánicos
ACEROS INOXIDABLES AUSTENITICOS											
SS-303-P	P	Sinterizado	6.2	24.60	22.49	-	-	1.0	-	-	Componentes mecánicos que requieren maquinación secundaria
SS-316-P	P	Sinteridado	6.2	26.71	22.49	-	-	2.0	-	-	Estructurales, piezas resistentes a la corrosión, no-magneticas, piezas expuestas a agua salada y acidos industriales
SS-410-M	M	Sinterizado	5.8	29.52	28.82	-	-	1.0	-	-	Estructurales, piezas resistentes a la corrosión, y que requieren tratamiento térmico para resistir el desgaste.

Notas: 1. La prueba Chargy se realiza en probeta sin marca
2. La resistencia ala fatiga se determinó para F-000-M a FC-0508-R de la resistencia a la tracción
Todas las demás, se determinaron a 10^7 ciclos E una máquina rotatoria de pruebas

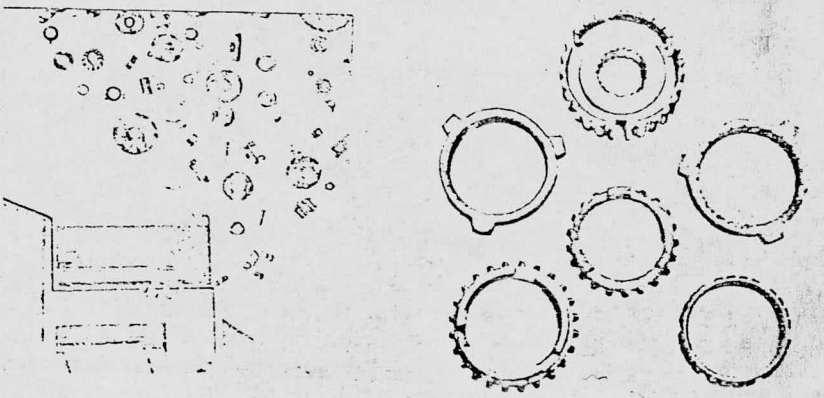
Figura No. 96

Figura No. 97



DIFERENTES PIEZAS DE MATERIALES FERROSOS

Figura No. 98



PIEZAS FABRICADAS CON MATERIALES FERROSOS.

V.3 MATERIALES NO FERROSOS

La pulvimetalurgia de los metales no ferrosos abarca diferentes metales tanto de bajo como de alto punto de fusión, Tabla XLI, muchas de cuyas aleaciones son ampliamente usadas; y casos como el wolframio, cuya tecnología es fundadora de la industria pulvimetalurgica.

V.3.1 METALES DE BAJO PUNTO DE FUSION

Si se considera que los metales de punto de fusión, elevado son aquellos que superan los 1700° C. Encontramos abajo de esta temperatura, una variada colección de metales con propiedades diferentes como Al, Fe, Zn, Ti, etc., que abarcan un gran número de campos de aplicación. En la Tabla XLII se mencionan algunos metales y aleaciones producidas por pulvimetalurgia de uso común. El titanio y el Berilio han resultado estratégicamente útiles en la industria aeronáutica (206 - 207) y son reconocidas por su resistencia, las llamadas superaleaciones, a base de níquel y cobalto empleadas en turbinas, motores de jets, piezas resistentes a la corrosión -- (208 - 209).

Muchas de estas aleaciones presentan características únicas como — son las piezas de aluminio que presentan una fina dispersión de alumina (alrededor del 10 - 13%) lo que le confiere una mayor estabilidad térmica y por tanto una temperatura mayor de trabajo que las piezas comunes de aluminio. También son usados metales refractarios finamente distribuidos principalmente en forma de óxidos, como el óxido de torio, tantalio, zirconio, etc., — (210 - 211). Los materiales pueden presentarse con una porosidad estipulada ó totalmente densos que les confieren propiedades similares a materiales producidos convencionalmente. En las figuras 99, 100, 101 y 102 se ven algunos productos fabricados con estos polvos.

V.3.2 MATERIALES REFRACTARIOS

Los metales de alto punto de fusión como W, Ta, No, Mo, Zr, Hf, Rh, etc., constituyen una rama importante en la pulvimetalurgia y su importancia. Actualmente la pulvimetalurgia compite con otras técnicas de fusión en el proceso de estos metales, no obstante, sigue siendo muy empleada por sus aspectos económicos con resultados mecánicos satisfactorios. Es indispensable mencionar el wolframio, sus compuestos y aleaciones por la importancia de ellos dentro de la industria metal mecánica : Los carburos de wolframio sinterizados, los carburos cementados que son partículas de carburo de wolframio mezclados, muchas veces otros carburos (Ti, Nb, Ta, etc.) finamente distribuidas en una matriz de cobalto que actúa como aglutinante. La Tabla XLIII indica algunos de estos productos. Las aleaciones pesadas empleadas en masas de

TABLA XLI

PUNTOS DE FUSION DE VARIOS METALES EMPLEADOS EN PULVIMETALURGIA .

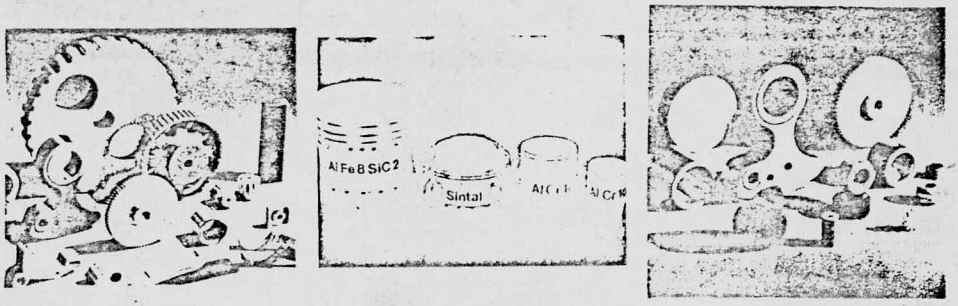
Metal	Punto de Fusión ° C
HIERRO	1530
COBRE	1083
ALUMINIO	659
NIQUEL	1452
COBALTO	1480
TITANIO	1668
CROMO	1520
BERILIO	1277
ESTAÑO	232
CADMIO	321
PLOMO	327
MAGNESIO	651
VANADIO	1900
PLATA	960
WOLFRAMIO	3410
MOLIBDENO	2610
TANTALIO	2996
TORIO	1750
ZIRCONIO	1852
HAFNIO	2222
NIOBIO	2468
RHENIO	3140
ZINC	419

T A B L A - VIII

ESPECIFICACIONES Y APLICACIONES DE LAS PIEZAS DE PULVIMETALURGIA NO FERROSAS

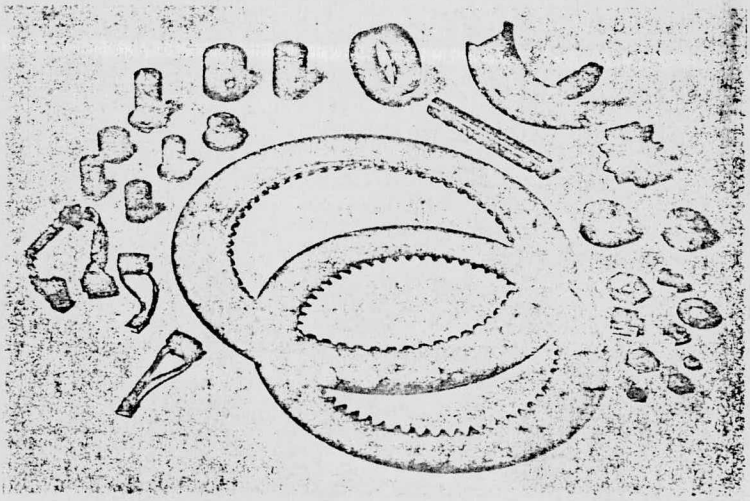
Material especificación designación	Tipo ( ) MPIF	Condición	Densidad g/cm^3	Resistencia a la tracción kg/mm^2	Resistencia a la fluencia en compresión kg/mm^2	Dureza aparente	Resistencia al impacto Joules	Elongación (en 2.54 cm) %	Aplicación
Bronce	N	Sinterizado	5.8	5.62	4.92	-	-	1.0	Cojinetes ó componentes mecánicos resistentes a la corrosión atmosférica
Latón	T	Sinterizado	7.4	14.06	6.32	Rh-57	-	13.0	Componentes mecánicos que requieren resistencia a lacorrosión y apariencia agradable.
Latón (al plomo)	T	Sinterizado	7.4	12.65	4.92	Rh-46	-	14.0	Componentes mecánicos, resistentes a la corrosión, apariencia agradable, fácil maquinabilidad.
Latón (al plomo)	T	Sinterizado	7.4	16.87	8.43	Rh-55	13.55	13.0	Componentes mecánicos, resistentes a la corrosión atmosférica.
Latón	T	Sinterizado	7.4	21.79	9.13	Rh-76	-	20.0	Componentes mecánicos, resistentes a la corrosión con apariencia agradable.
Latón (al plomo) 68.5-71.5 Cu	T	Sinterizado	7.4	19.68	7.73	Rh-65	-	22.0	Componentes mecánicos,resistentes a la corrosión, fácil maquinado.
Níquel-Plata 62.5-65.5 Cu	U	Sinterizado	7.8	21.09	11.24	Rh-75	13.55	10.0	Componentes mecánicos, resistentes a la corrosión.
Níquel-Plata (al plomo) 62.5-65.5 Cu,16.5-19.5 Ni	U	Sinterizado	7.8	21.09	11.24	Rh-75	12.19	10.0	Componentes mecánicos y eléctricos. Resistentes a la corrosión, piezas para exposición marina, grado maquinable.
ALEACIONES DE ALUMINIO									
0.25 Cu,0.6Si, 1.0 Mg		Sinterizado	2.55	14.76	9.63	Rb-65-70	-	-	Aplicaciones similares al material forjado,--resistente a la corrosión marina,estructuras.
4.4Cu,0.8Si,0.5 Mg		Sinterizado	2.64	21.30	18.42	Re-70-75	-	3.0	Piezas para aeronaútica, piezas maquinadas
4.0Cu, 1.5 Lub		Sinterizado	2.49	16.31	7.66	-	-	10.0	Adecuado para piezas conformadas.
0.4Si,0.6Mg 1.5 lub.		Sinterizado	2.55	13.35	6.32	-	-	9.0	Buena conductividad eléctrica,ductibilidad y acabado
0.25Cu,0.6Si,1.0 Mg.		Sinterizado	2.55	13.63	5.41	-	-	10.7	Adecuado para piezas producidas por prensado isostático
4.4Cu,0.85Si,0.5 Mg.		Sinterizado	2.64	20.88	14.97	-	-	4.0	Adecuado para prensado isostático

Figura No. 99



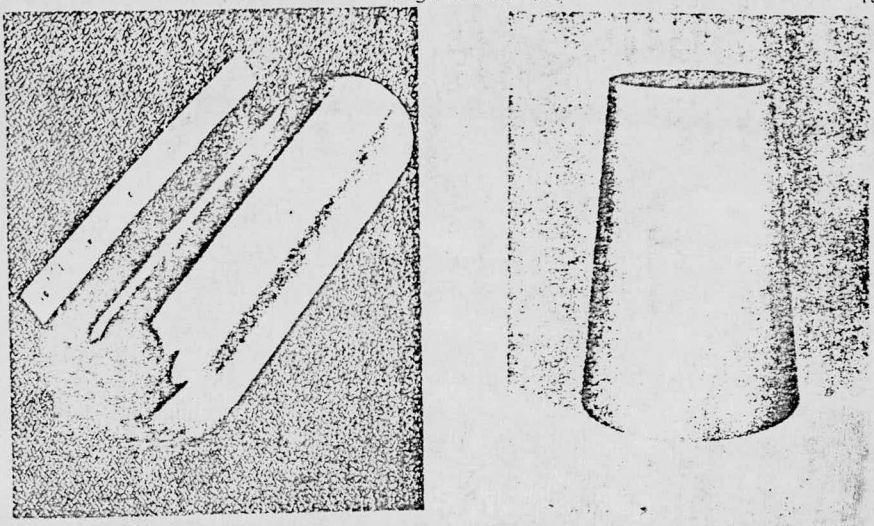
PIEZAS DE ALUMINIO Y SUS ALEACIONES

Figura No. 100



PIEZAS DE BRONCE

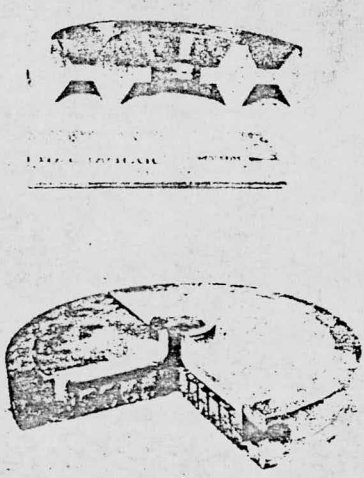
Figura No. 101



PIEZAS DE BERILIO

Figura No. 102

SECCIONES DE TITANIO



PIEZAS DE SUPERALEACION

TABLA XLIII

CARBUROS CEMENTADOS

lo.	% de aglutinante	Dureza RA	Kg./mm² Resistencia a la ruptura transversal	Kg./mm² Resistencia a la compresión
-4	3	92.3	124.44	562.45
-9	6	91.5	161.70	499.17
-10	6 - 9	90.6	196.85	459.99
-11	12 - 13	89.7	217.95	421.84
-12	14 - 15	88.5	239.04	407.78
-13	15 - 20	87.4	263.65	386.88
-14	20 - 30	82 - 86	256.62	330.44

inercia, contrabalanzas, protectores de radiación, etc., son hechos por - pulvimetalurgia (212, 213).

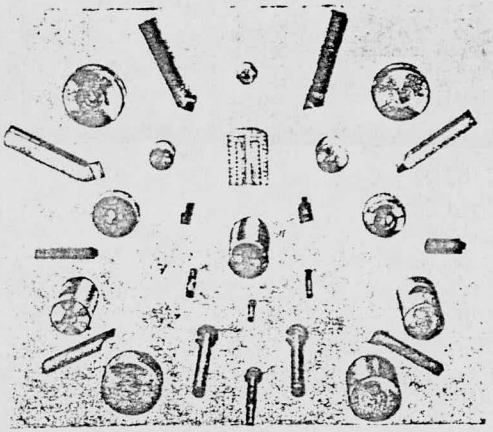
Existe también una gran variedad de productos refractarios (214 - 215) formados por compuestos químicos como nitruros, carburos, óxi— dos, boruros, etc., que asociados a los metales forman compuestos deno- minados cermets de gran aplicación en zonas críticas, así como compues tos intermetálicos como los beriliuros siliciuros, etc. Materiales de —— fricción que resisten altas temperaturas (216). [Figuras 103, 104, 105 y 106.]

V.4 OTROS MATERIALES

Se pueden enumerar gran diversidad de aplicaciones en las cuales - se pueden emplear diferentes tipos de materiales, producidos por pulvime- talurgia, como son los filtros muy usados en la industria química, los ma— teriales mixtos usados en los contactos eléctricos [(217, 218). Tabla —— XLIV. Los cojinetes autolubricados, ya mencionados, etc. Las figuras — 107, 108 y 109 dan ejemplos.]

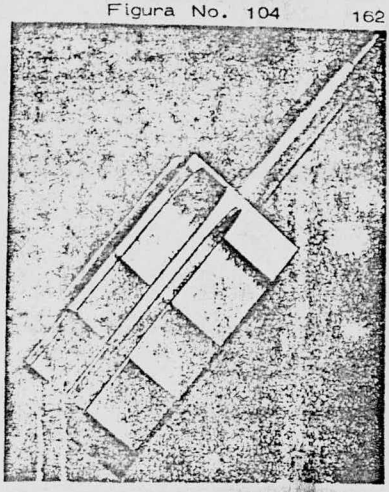
Hasta aquí

Figura No. 103



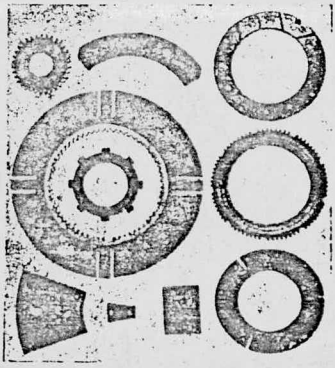
PIEZAS DE METAL DURO

Figura No. 104



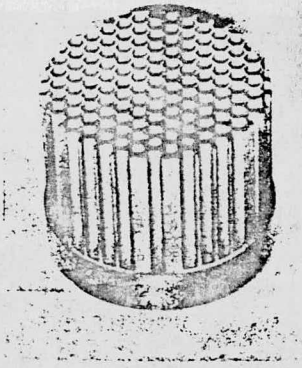
ELECTRODO

Figura No. 105



PIEZAS DE FRICCION

Figura No. 106



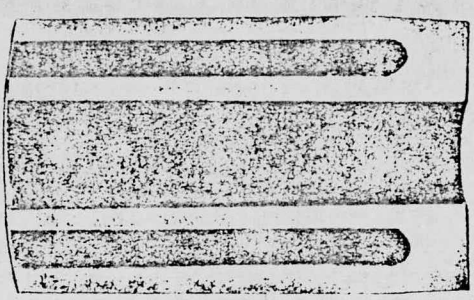
PIEZA DE MOLIBDENO

TABLA XLIV

PROPIEDADES DE ALGUNOS MATERIALES PARA CONTACTOS ELECTRICOS.

Material	Densidad g/cm^3	Resistencia a la tracción Kg/mm^2	Dureza (Rockwell)	Conductividad Eléctrica % IACS
W-27.5 Ag	15.6	0.10	90 B	49
W-35.0 Ag	14.8	0.07	85 B	51
W-49.0 Ag	13.5	0.05	55 B	65
W-15.0 Ag	17.0	0.10	26 C	38
W-13.0 Cu	16.7	0.13	26 C	33
W-26.0 Cu	14.7	0.13	98 B	46
W-45.0 Cu	12.6	0.09	79 B	55
W-50.0 Ag	12.4	0.06	91 B	47
W-44.0 Cu	11.6	0.11	99 B	43
Mo-39.0 Ag	10.2	0.09	82 B	47
Mo-50.0 Ag	10.2	-	75 B	52

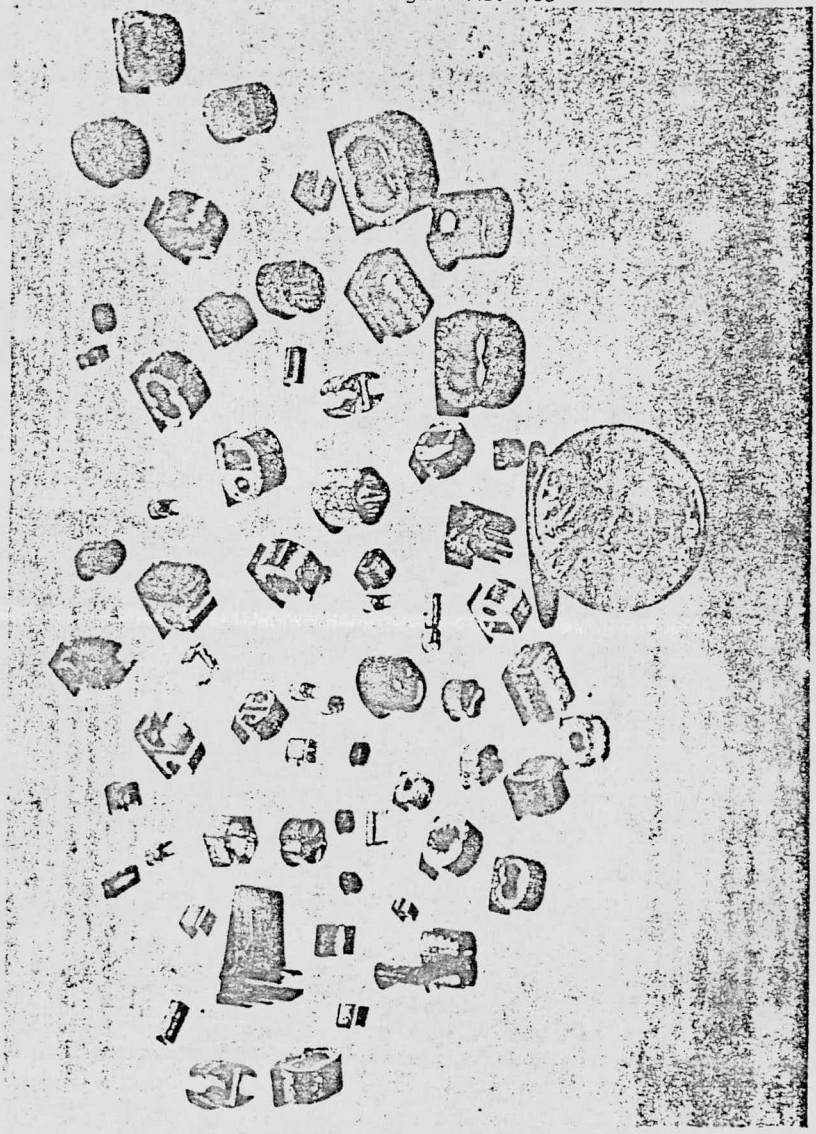
Figura No. 107



FILTRO DE ACERO INOXIDABLE

PIEZAS AUTO LUBRICADAS

Figura No. 108



CONTACTOS ELECTRICOS

V. 5 CONCLUSIONES

Con esta visión general de la pulvimetalurgia, su evolución y estado actual; se pretende mostrar una tecnología diferente que representa una alternativa dentro de los procesos convencionales para la manufactura de productos metálicos.

Su característica principal es la producción masiva rápida, relativamente fácil y normalmente económica de productos terminados dentro de tolerancias dimensionales aceptables ó que requieren un mínimo de rectificación.

Además, sin llegar a tener las propiedades mecánicas de productos convencionales, pueden sustituirlos en muchas aplicaciones, sin menoscabo de la calidad mecánica de la máquina total y si con un beneficio económico.

También se caracteriza por ser una ruta a veces única, para la fabricación de componentes con propiedades muy particulares y de procesamiento de metales especiales.

Por último cabe considerar que en la actualidad se pretende suministrar en ciertas áreas, materiales competitivos mecánicamente con los producidos convencionalmente, caso concreto, el proceso de sinter - forja; representa el camino a productos de calidad igual ó superior, aún con sacrificio de la economía.

Sin embargo, no se pretende dar la idea de que la pulvimetalurgia es la panacea esperada y la mejor ruta a seguir en adelante, pues desde muchos puntos de vista y como menciona acertadamente A.G. Dowson (219) se puede pensar y con razón que es una tontería "dividir un metal en pedacitos y después volverlos a pegar unos con otros " y en una crítica real y justa pone de manifiesto los puntos débiles de la economía en pulvimetalurgia como es el costo de la producción de polvos y el costo elevado del mismo; así como lo crítico de las características fisicoquímicas exigidas al polvo; y las constantes fluctuaciones en precios en el mercado internacional (220).

También hay que cuidar la limitación en la forma, que se imponen al proceso (aunque la compactación isostática abre nuevas perspectivas) todavía más del 90% se produce por prensado en frío y las dimensiones máximas tolerables para equipos de costo razonable. A todo ésto hay que aunar las exigencias cada vez más estrictas que obligan muchas veces a tratamientos posteriores que reducen los márgenes de economía.

Otro aspecto determinante en la mayoría de los casos es el número mínimo de piezas economicamente rentable a producir; para justificar las inversiones iniciales de producción (moldes, etc.) y además algunos otros factores (221) también involucrados.

En resumen se puede decir que es una tecnología competitiva en mu--

chos aspectos; pero que sus limitaciones deben tenerse en cuenta para no - exceder sus fronteras, con resultados lamentables.

Requiere de estudios profundos de dónde, cuando y a qué aplicarla, - de sus características particulares y sobre todo tener conciencia de su ori— gen, evolución y el porqué de su existencia. Pues su mismo carácter tecno lógico implica condiciones muy específicas para su desarrollo y aplicación.

BIBLIOGRAFIA

1. H.H. Hausner: Handbook of Powder Metallurgy, Chemical - Publishing Co. 1973.
2. MPIF: The many Uses of Metal Powders.
3. J.S. Hirschhorn: Introduction to Powder Metallurgy, APMI, 1969.
4. H.F. Fischmeister: Characterizarion of Porous Structures by - Stereological Measurements, PMI, Vol. 7 No. 4, 1975.
5. J.K. Beddow: On the Design of Metal Powders for Pressing Progress in P/M 1972, MPIF, Vol. 28, Pag. 61.
6. David Castro: Sistemas Extractores y Limpieza de Gases y Humos - de los Hornos Eléctricos, Apuntes XII Curso Panamericano de Metalugia.
7. I.T. Brakhnova: Enviromental Hazards of Metals, Consultants - Bureau, 1975.
8. Hoeganaes Co.: Hoeganaes Iron Powder Handbook, Sección A, Capítulo 10, pag. 2.
9. R. M. German y V. Ham: Production of Erbium and Palladium flakes with Submicron Thicknesses. Int. Journal of P/M and Vol. 11 No. 2, abr. 1975.
10. G.G. Brown: Operaciones Básicas de la Ingeniería Química, Marín, 1965, pag. 26.
11. Arthur Adler: Primary Methods for Production of Tonnage Iron & Steel Powders, I & S Eng. Sept. 1971, pag. 39.
12. J.S. Benjamin: Dispersion Strengthened Superalloys by Mechanical Alloying, Met. Trans. Vol. 1, Oct. 1970, pag. 2943.
13. J.S. Benjamin: Mechanical Alloying, Scientific American, May'76, pag. 40.
14. F. Skaupy: Cerámica de los Metales, Ed. Reverté 1955, pag. 62.
15. P.U. Gummenson: High Pressure Water Atomization, Powder Metallurgy for High Performance Applications, Syracuse University Press 1972, pag. 28.
16. R. Widmer: Coarse Powder Techniques, Powder Metallurgy for High Performance Applications, Syracuse University Press 1972, pag. 69.
17. P.B. Wallis: Atomizaed Powder- The Key to new Alloys, PMI, vol. 8 No. 4, Nov. 1976, pag. 167.
18. C. Moore: Use Argon & Nitrogen in the Powder Metallurgy of High-duty Alloys, Met. & Metal Forming, Jun. 1974, pag. 179.
19. P. Hellman, H. Larker, J. B. Pfeffer: The ASEA/STORA Process: A new Process of the Manufacture of Tool Steel & Other Alloy Steel from Powder. Modern Developments in P/M MPIF, 1971 - Vol. 4, pag. 573.

20. R.T. Holcomb: The Properties of Prealloyed Fe-Cu Powders - Produced from a Melt, Int. Journal of P/M & P/Tech. Vol. 10 No. 2 Abr. 1972, pag. 69.

21. E.W. Kelley: Powder Metallurgy & the Superalloys, Int. Journal of P/M & P/Tech., vol. 10 No. 1 Ene. 1974, pag. 53.

22. N. Dautzenberg & H. Gesell: Production Technique & Properties of Austenitic Cr-Ni Stainless Steel Powders, PMI, vol. 8 No. 1 Feb. 1976, pag. 14.

23. Yoshikazu Kondo et Al: Method for Producing High Density Steel - Powder, P/M Technology, vol. 5 No. 3, Mar. 1976, pag. 39.

24. S. Storchheim: Aluminium P/M Finally Made Commercially Practice, Progress in P/M 1962, vol. 8 pag. 124.

25. E. Klar & W.H. Shafer: Atomization in the Binary System Copper-Oxigen, Int. Journal of P/M & P/Tech., vol. 11 No. 4 Oct. 1975 pag. 247.

26. W. Rostoker, R.P. Dudek, C. Freda: Fast Freezing by Atomization for Al Alloy Development, Int. Journal of P/M & P/Tech. vol. 9, No. 4, Oct. 1973, pag. 139.

27. P.J.M. Chare & T. Sheppard: Densification & Properties of Extruded Al-Zn-Mg Atomized Powder, Int. Journal of P/M & P/Tech., Vol. 10 No. 3, Jul. 1974, pag. 203.

28. Gliden Metals: Ferrous, Non-Ferrous & Alloys Powders, Boletín de Información.

29. Pfizer: Tech. Report, TR-240-1, Pfizer 1976.

30. Gould Inc.: Gould Custom Metal Powder CG-107.

31. A. Domsa & S Berkovits: Contributions to the Atomization of Liquid Metals, Modern Developments in P/M, MPIF, 1971 vol. 4, pag. 63.

32. R.J. Grandzol & J.A. Tallmadge: Effect of Jet Angle on Water - Atomization, Int. Journal of P/M & P/Tech., vol. 11 No. 2, abr. - 1975, pag. 103.

33. P. Rao, J. Tallmadge: Change of Shape of Metal Droplets in Quench atomization 1971 Fall P/M Conference Proceedings, MPIF, pag. 251.

34. E. Klar & W.M. Shafer: High Pressure Gas Atomization of Metals, en Powder Metallurgy for High Performance Applications, Syracuse - University Press, 1972, pag. 57.

35. M.J. Koczak & H.A. Kuhn: Metal Powder Processing, en Treatise on Materials Science & Technology, Academic Press, 1974, vol.4 - pag. 261.

36. N.J. Grant: Specialty Methods of Powder Atomization, en Powder - Metallurgy for High Performance Applications, Syracuse Universtiy Press, 1972, pag. 85.

37. K.R. Bleimann: Direct Reduced Iron for Steelmaking, I & S Maker, - vol. 4, No. 4, Abr. 1977, pag. 47.

38. M.E. Wadsworth: Hydrometallurgy, Journal of Metals, vol.29, No. 3

Marzo 1977, pag. 8.

39. V.H. Ryan & H.J. Tschirner: Production and Characteristics of - Cemically Precipitated Copper Powder, Proceedings Thirteenth Annual Meeting MPA, 1957, vol. 1, pag. 25.

40. W. Kunda & D.J.I. Evans: Hidrogen Reduction of Copper to Powder - from the Ammine Carbonate System, Modern Developments in P/M, MPIF, 1971, vol. 4, pag. 49.

41. J.H. Grimes & K.T.B. Scott: Production of Ferrous Metal Powders by Gel Production, 1970 Fall P/M Conference Proceedings, MPIF - pag. 1.

42. R.I. Edwards: Refining of the Platinum Group Metals, Journal of - Metals, vol. 28, No. 3, agosto 1976, pag. 4.

43. R.H. Lindquist: Reduced Microgels - A new Form of Powdered Metals & Metal Oxides, Modern Development in P/M, MPIF, 1971, vol. 5, - pag. 289.

44. V.H. Ryan & H.J. Tschirner: Production & Characteristics of Chemically Precipitated Niquel Powder, Proceedings Thirteenth Annual - Meeting MPA, 1957, vol. 1, pag. 10.

45. J.J. Fisher: Solid-Solid Blending, Chemical Engineering Report, - Chemical Engineering.

46. F. Eisenkolb: Process Involved in Mixing & Segregation of Metal Powders, Modern Developments in P/M, MPIF, 1966, vol. 1, pag. 91 .

47. G. Bockstegiel & O. Svesson: The Influence of Lubrication, Die Material & Tool Design upon Die - Wear in the Compacting of Fe Powders Modern Developments in P/M, MPIF, 1971, vol. 4 pag. 87.

48. R.F. Halter & S.S. Rajan: Die-Wall Lubrication for P/M Parts Preforms, 1971 Fall Conference Proceedings, MPIF, pag. 83.

49. E.G. Schwartz & R. Goodwin: Feasibility of Lubrication Through a Porous Die in Powder Compacting, Int. Journal of P/M & P/Tech, - vol. 10, No. 3, Jul. 1974, pág. 18.

50. E.J. Geijer & R.S. Jamison: Lubricants for Powder Metallurgy -- Parts Manufacturing & Their Influence on Properties, Powder Metallurgy, W. Leszynski Editor, Interscience N.Y. 1960, pag. 585.

51. P.M. Leopold: The Effect of Die-Wall Lubrication & Admixed Lubricant on the Compaction of Sponge-Iron Powder, Perspectives in P/M MPIF, 1968, Vol. 3, pag. 184.

52. L.F. Pease III & R.L. Collette: Process Variables in the Production of P/M Parts, Progress in P/M 1974, MPIF, vol. 30, pag. 5.

53. D. Yarnton & D.R. Prosser: Effect of Lubricant Chain Length on compaction of copper powder, Int. Journal of P/M & P/Tech, vol. 11 No. 1, Enero 1975, pag. 43.

54. Hoeganaes Co: Hoeganaes Iron Powder Handbook, Sección 10 Cap. 10, pag. 1.

55. K.H. Moyer: The Burn-Off Characteristics of Common Lubricants in

316 L Powder Compacts, 1970 Fall P/M Conference Proceedings - MPIF, pag. 79.

56. H.H. Hausner: The compaction of Metals Powders, Perspectives in P/M, MPIF, 1967, vol. 1 pag. 2.

57. G. Bockstegiel: Relations Between Pore Structure & Densification - Mechanism in the Compacting of Iron Powders, Perspectives in P/M MPIF, 1968, vol. 3, pag. 54.

58. J. Lazović, V. Mikijelj, M.M. Ristić: Interdependence of Brittle - Powder Characteristics & Parameters in Powder Compacting, Mo-- dern Developments in P/M, MPIF, 1974, vol. 6, pag. 109.

59. B.O. Sundstrom & H.F. Fischmeister: A Continuum Mechanical - Model for Hot & Cold Compacting, Modern Developments in P/M, - MPIF, 1974, vol. 6, pag. 203.

60. J.K. Beddow: Initial Stage of Compacting Metals Powders, Int. - Journal of P/M & P/Tech, vol. 9, no. 4, oct. 1973, pag. 127.

61. R.L. Hewitt, W. Wallace & M.C. De Malherbe: Strain Hardening - Hollow Sphere Compaction Model Applied to Aluminium Int. Jour - nal of P/M & P/Tech, vol. 10, no. 2, abr. 1974 pag. 131.

62. N. Helliwell & P.J. James: Isostatic Compaction Behavior of Copper Powder, PMI, vol. 7, no. 1, Enero 1975, pag. 25.

63. S.B. Domsa: A New Equation Concerning Polynara Complex Powder Mixtures Compaction, PMI, vol. 8, no. 4, nov. 1976, pag. 179.

64. C.R. Lynham & D.C. Bailey: Tool Design & Toolmaker Relation-- ships as Factors in the Economics of Powder Metal Compacting -- Tooling, 1970 Fall Powder Metallurgy Conference Proceedings, MP IF, pag. 21.

65. R.N. Kunkel: Tooling Design for Powder Metallurgy Parts, Society of Manufacturing Engineers.

66. PMEA: Powder Metallurgy Equipment Manual, MPIF, 1977, pag.53.

67. MPIF: Powder Metallurgy Design Guidebook, 1974.

68. R.W. Boesel, M.I. Jacobson & I.S. Yoshicka: Spark Sintering -- Advances in P/M, 1969 Fall Powder Metallurgy Conference Proceed- dings, PMIF, pag. 75.

69. A. Blainey: Hoy Pressing Powders in England, Metal Progress, E- nero 1960, pag. 104.

70. R.W. Boesel: Spark Sintering: An Unusual Method, Metal Progress Abr. 1971, pag. 74.

71. C.G. Goetzel & V.S. deMarchi: Electrically Activaded Pressure- Sintering (Spark Sintering) of ti-Al-V Alloy Powder, Modern - Developments in P/M, MPIF, 1971, vol. 4, pag. 127.

72. P. Bosse, R. Tremblay & R. Angers: Hot Pressing of Iron Preforms Int. Journal of P/M & P/Tech, vol. 11, No. 4, oct. 1975, pag. 247.

73. R.D. Caligiuri, R.T. Whalen & O.D. Sherly: Superplastic Hot --

Pressing White Cast Iron, Int. Journal of P/M & P/Tech. vol. 12, - No. 1, Enero 1976, pag. 9.

74. T. Kimura, A. Majima & T. Kameoka: Supersolidus Hot Pressing of Ferrous P/M Alloys, Int. Journal of P/M & P/Tech. vol. 12, No. 1, enero 1976, pag. 19.

75. Jackson: Isostatic Pressing of Powdered Materials, Progress in - P/M 1964, MPIF, vol. 20, pag. 159.

76. H.C. Jackson: Isostatic Pressing for High-Volume Production, Modern Developments in P/M, MPIF, 1966, vol. 1 pag. 188.

77. Van Buren & Hirsch: Hydrostatic Pressing of Powders, Perspectives in P/M, MPIF, 1967, vol. 1, pag. 27.

78. H.O. Mc Intire, J.H. Peterson, H.R. Mc Curdy: Dry Bag Hydropressing for volume Production of P/M Parts, Modern Developments in P/M, MPIF, 1973, vol. 6, pag. 133.

79. R.H. Witt & O. Paul: Current Developments in Hot Isostatic Pressing (HIP) of Ti, Modern Developments in P/M, MPIF, 1978, vol. 8 pag. 315.

80. F. Emley & C. Deibel: Continuous Compaction: A new Method for Compacting Metal or Ceramic Powders into Continuous Sections, -- Perspectives in P/M, MPIF, 1967, vol. 1, pag. 83.

81. C. Goetzel: Treatise on Powder Metallurgy, Interscience Pub. 1949 vol. 1 pag. 88.

82. J.D. Shaw & W.V. Knopp: Currents Developments in the Rolling of both Ferrous & Non-Ferrous Powders, Proceedings Thirteenth -- Annual Meeting MPA, 1957, vol. 1, pag. 33.

83. W.E. Buescher: Rolling of Metal Powder Strip with Tailored Properties, Progress in P/M 1962, MPIF, vol. 18, pag. 42.

84. H.H. Hirsch: The Processing of High - Purity Copper Powder into Mill Shapes, Modern Developments in P/M, MPIF, 1966, vol. 1 -- pag. 209.

85. P.E. Evans: The Theoretical Optimun Rolling Speed in Powder Compaction, Modern Developments in P/M, MPIF, 1966, vol. 1, pag. 247.

86. P.E. Evans: The Mechanism of the Compaction of Metal Powders by Rolling, Perspectives in P/M, MPIF, 1967, vol. 1, pag. 99.

87. I. Crivelly Visconti: New Technology for Making Metal Composites - based on direct Rolling of Powders, Modern Developments in P/M, - MPIF, 1971, vol. 4, pag. 52.

88. R.A. Smucker: Perfected & Practical Methods of processing Powder into Commercial Strip, I & S Eng. Jul. 1959, pag. 118.

89. T. Sakai: Direct Hoy Rolling of Metal Powder By Resistance Sintering, Met & Metal Forming, Oct. 1974, pag. 310.

90. Report: Pfizer Introduces P/M Ni-Fe Alloy Strip, P/M Technology Mar. 1977, pag. 27.

91. N.R. Garden, A.D. Donaldson: The Extrusion of Metal Powders, —

Progress in P/M 1962, Vol. 19, pag. 135

92. E. Gregory : Extruding Metal Powders, Metal Progress, abr. 1959, pag. 113.

93. R.L. Hewitt, W. Wallace: Cold Consolidation of Powder by Hydrostatic Extrusion, Metal Powder Report, vol.31, no.4, abr.76, pag.127.

94. ASM: Metal Handbook 8th. Edition, vol.4: Forming, pag. 250.

95. ASTME: High-Velocity Forming of Metals, 1968.

96. R.A. Cooley: Explosive Forming of Metal & Its Potential Applicarion to Compacting Metal Powders, Powder Metallurgy, W. Leszynski - Editor, Interscience N.Y., 1960, pag. 525.

97. O.V. Roman: Some Theoretical & Practical Aspects of High Energy Rate Compacting, Modern Developments in P/M, MPIF, 1971, vol.4 pag. 513.

98. Geltman: Explosive Compacting of Metal Powders, Progress in P/M 1962, MPIF, vol. 18, pag. 7.

99. L.W. Garber, J.K. Beddow: The Effect of High Velocity Compacting on the Density of Three Iron - Copper Metal Powders Int. Journal of P/M & P/Tech, vol.6, No.2, May 1974, pag. 78.

100. V.G. Gorobtsov, O.V. Roman: Hot Explosive Pressing of Powders, Int. Journal of P/M & P/Tech, vol.11, No.1, Ene-1975, pag.55.

101. R.M. Rusnak: Energy Relationships in the High Velocity Compaction of Copper Powder, Int. Journal of P/M & P/Tech., vol.12 No.2 Abr. 1976, pag. 91.

102. R.G. Brooks: The Osprey Process, Met & Metal Forming, Dic. 1975 pag. 404.

103. R.G. Brooks C. Moore: The Osprey Process, Powder Metallurgy, vol.20, No.2, 1977, pag. 100.

104. J.L. Brackpool & L.A. Phelps: Vibratory Compaction of Metal Powders, Perspectives in P/M, MPIF, 1967, vol.1, pag. 289.

105. V.A. Tracey: Porous Materials: Current & Future Trends, Int. Journal of P/M & P/Tech, vol.12, No.1, ene.1976, pag. 25.

106. H.H. Hausner: Slip Casting Metal Powders: A Commercial Reality, Proceedings Fourteenth Annual Meeting MPA, 1958, pag. 79.

107. H.V. Sulinsky & S. Lipson: Slip Casting of Copper Powder, Modern Developments in P/M, MPIF, 1966, vol.1 pag. 266.

108. G.E. Wieland & E.M. Rudzki: Aslurry Process for Producing Thin-Gage Sheet from Metal Powder, Int. Journal of P/M & P/Tech, vol. 12 No.2, abr.1976, pag. 103.

109. R.L. Ruzicki: The Loose-Pack P/M Process, Progress in P/M - 1975, MPIF, vol. 31, pag. 23.

110. G. Matsumara, H.E. Exner: The role of Evaporation during Sintering of an Ultra-Fine Silver Powder PMI, vol. 10 No. feb.78, pag.27.

111. E.G. Zukas, P.S. Z Rogers: Unusual Spheroid Behavior during - liquid-phase sintering. Int. Jour. of P/M and P/Tech., vol. 13, No. 1, En. 1977, pag. 27.

112. C. Goetzel : Treatise on Powder Metallurgy, Interscience Pub.1949.

113. G.C. Kuczynsky : Fundamentals of Powder Metallurgy, Proceedings 13 th Annual Meeting M.P.A. 1957, vol. 1, pag. 25.

114. F.N. Rhines : A New View Pont on Sintering, Proceedings 14th -- Annual Meeting, M.P.A. 1958, pag. 91.

115. J.A. Lund : The Sintering and Alloying Behaviour of Ni-Coated Metal Powders, Progress in P/M 1960, M.P.I.F. Vol. 16, pag. 160.

116. H. H. Hausner : Basic Studies in Linear Shrinkage Behaviour --- during sintering, Progress in P/M, M.P.I.F. vol. 19 pag. 67.

117. F.V. Lenel y G.S. Ansell : Creep Mechanisms and their role in the sintering of metal powders, M.D. in P/M, MP.P.I.F, 1966, vol. 1 pag. 281.

118. M.H. Tikkanen : On the Mechanisms of Sintering, M.D. in P/M, MPIF, 1966, vol. 1 pag. 297.

119. R.T. Dehoff, R.A. Rummel : The Relationship between Surface Area and Density in the Second-Stage Sintering of Metals, M.D. in P/M MPIF, 1966, vol. 1 pag. 310.

120. F. Thummler & W. Thomma : Investigation of the Sintering Process during formation of solid solutions, M.D. in P/M, MPIF 1966, vol. 1, pag. 361.

121. F.N. Rhines L R.T. Dehoff : A Topological approach to the study of Sintering.

122. D.L. Johnson : Methods of Determining Sintering mechanisms M.D. in P/M, MPIF, 1971, vol. 4, pag. 199.

123. F.V. Lenel, G.S. Ansell : Theoretical considerations and experimental evidence for transport by plastic flow during sintering, M.D. in P/M, MPIF, 1971, vol. 4, pag. 199.

124. K.E. Easterling : The role of dislocations in sintering, M.D. in P/M, MPIF, 1971, vol. 4, pag. 221.

125. C.S. Morgan : Mechanistic interpretation of non-steady state sintering, M.D. in P/M, MPIF, 1971, vol. 4, pag. 231.

126. Hoganas Co. : Basic aspectos of sintering, Hoganas Iron Powder - Handbook, vol. 1 cap. 20, pag. 1.

127. G.C. Kuczynski : Fundamentals of Sintering theory, P/M for High - Performance applications, Syracuse University Press 1972, pag.101.

128. F.V. Lenel : The Early stages of the mechanism of sintering, P/M for high performance applications, Syracuse University Press, --- 1972, pag. 119.

129. D.L. Johnson : Recents developments in the analysis of sintering - kinetics, P/M for high performance applications, Syracuse University Press, 1972, pag. 139.

130. G.C. Kuczynski (Editor) : Sintering and related phenomena -- plenum Press 1973.

131. M.F. Ash by : A First report on sintering diagrams Acta Met., - vol. 22, mar. 1974, pag. 275.

132. F. Behar : A new approach to sintering kinetics , Int. Journ. of -- P/M and P/Tech., vol. 11 No. 2 abr. 1975, pag. 117.

133. R.M. German : Sintering by Simultaneous independent mechanisms Int.Jour. of P/M and P/Tech., vol. 12 No. 1 En.1976, pag. 37.

134. Advanced Experimental Techniques in P/M, Perspectives in P/M, - MPIF, vol. 5.

135. E. Dudrova, A. Salak : Formation and Growth of metal bridges -- between particles in Iron Compacts during short sintering periods. P.M.I., vol. 8 No. 3 agosto 1976, pag. 122.

136. Hyung Sup Choi : Efects of cyclic heating through phase - transformations during sintering, of Fe-Ni alloy powder compacts, Int. Journ. of P/M and P/Tech, vol.9 no. 1 enero 1973, pag. 28.

137. Shiro Kohara : Effect of repeated allotropic transformations on sintering of iron powder. Met. Trans. A, ASM-TMS, vol.7-A, No. 8 Agosto 1976, pag. 1239.

138. J. Heuberger : Shrinkage compesation by alloying powder metallurgy, W. Leszynski, Interscience 1961, pag. 611.

139. P.G. Arbstedt : Alloy systems developed for pressing and sintering in the ferrous field. Metals technology May-Jun-1976, pag. 214.

140. S.A. Kvist : Improved Tolerances of Sintered ferrous components containing copper, metal powder report, vol. 32 No.2 feb. 1977, pag. 28.

141. Hoganas : Sintering and Sintering practice, Iron Powder Handbook, Section E, cap. 30, pag. 1.

142. L.R. Hildebrand : Tolerance factors in P/M parts production. Progress in P/M 1968, MPIF, vol. 24.

143. C. Y. Ang : Sintering in the presence of liquid phase ; owder Metallurgy, W. Leszynski, Interscience 1961, pag. 75.

144. T. J. Whalen : Mechanisms and Microstructural aspects of liquid - phase sintering, progress in P/M 1962, MPIF, vol. 18, pag. 35.

145. R.B. Heady : An analysis of the capillary forces in liquid-phase sintering of spherical particles. Met. Trans. ASM-TMS, vol.1, ene 1970, pag, 185.

146. T.H. Courtney : A. Reanalysis of the binetics of neck Growth during liquid phase sintering. Met.Trans.ASM-TMS vol. 8-A No. 5, Mayo 1977, pag. 671.

147. P. Schwarzkopf : Infiltration of P/M compacts with liquid metal. - Metal Progress, enero 1950, pag. 64.

148. Hoganas : Sintering Practice : Copper Infiltration, Iron Powder Handbook, Section E, cap. 30, pag. 17.

149. M.V. Veidis : Selection of Protective Atmosphere for bottom infiltration of copper, Int. Journ. of P/M and P/M Tech. vol. 10 No. 2 abril 1974, pag. 101.

150. M. Audier : Activated Sintering, proceedings 13th Annual meeting - M.P.A. 1957, vol.1 pag. 5.

151. In - Hyung Moon : Activated Sintering of niokel doped W, in moist - hydrogen, Int.Journ of P/M and P/Tech., vol 11 No. 1 ene.1975, - pag. 27.

152. W.X. Burgess : Sintering furnace and development P.M.I., vol. 8 No. 1 Feb. 1976, pag. 28.

153. K. H. Moyer : The Effect of Preform density on the impact properties of atomized iron P/M forgings 1971, Fall P/M Conference Proceedings, MPIF, pag. 53.

154. S.M. Kaufman : The Effect of small amounts of residual porosity on the mechanical properties of P/M Forgings, 1971, Fall P/M Conference Proceedings MPIF, pag. 125.

155. R. Haynes : A study of the effect of porosity content on the ductility of sintered metals, powder metallurgy, vol. 20, No. 1 1977, pag. 17.

156. C.R. Shakespeare : Some characteristic of hot - extruded powder metal billets. M.D. in P/M vol. 1 1966, MPIF pag.253.

157. G.T. Brown : Experimental and practical aspects of the powder forging process. M.D. in P/M vol. 4 MPIF, 1971, pag. 369.

158. H. W. Antes : Cold Forging iron and steel powder preforms M. D. in P/M vol. 4, MPIF 1971, pag. 415.

159. G.W. Cull : Some practical aspects of the sinter forging process, Met and Metal forming Abril 1972 pag. 128.

160. MPIF : Forging of Powder Metallurgy preforms, New perspectives, in P/M, vol. 6, 1978.

161. MPIF : P/M forging & Copper P/M, M.D. in P/M vol. 7 1974.

162. J.P. Cook : Mn Steels for P/M Hot forming, Int. Journal of P/M and P/Tech., vol. 10, No. 1 enero 1974, pag. 15.

163. G.T. Brown : Development of alloy-systems for powder forging, metals Technology mayo-junio 1976, pag. 229.

164. J. J. Dunkley : The P/M extrusion of tool steel, Int Journal of P/M and P/Tech. vol. 13, No. 1 enero 1977, pag. 13.

165. P/M Conference looks to efficient use of resources metals and materials febrero 1977, pag. 35.

166. M. J. Woulds : The hot extrusion of sintered stainless steel billets, Progress in P/M 1972, vol. 28 pag. 261.

167. A.F. Hayes : Tje role of forging in P/M industry progress in P/M, - 1975, vol. 31, pag. 289.

168. T.T. Vollmer : The direct hot extrusion of tubes and bars from sponge iron powder billets Powder Metallurgy vol.20, No.2 1977,

169. H.A. Kuhn : Deformation characteristics and plasticity theory of sintered powder materials. Int.Journal of P/M and P/Tech, vol. - 7 No. 1, 1971.

170. H.A. Kuhn : Material behavior in powder preform forging Journal of Engineering materials and technology, ene.1973, pag. 41.

171. H.A. Kuhn : Three fracture modes and their prevention in forming P/M preforms, Report.

172. H.A. Kuhn : Metal flow studies for powder preform forging, Pro-- gress in P/M 1975, MPIF, vol.31, pag. 59.

173. B.G.A. Aren : Optimizing the preform shape in powder forging of a linear gear profile. PMI vo. 7 No. 1 ene. 1975, pag. 12.

174. C.L. Downey : Designing P/M preforms for forging axisymetric parts, Int. Journal of P/M and P/Tech. vol. 11 No. 4, oct.75, pag. 255.

175. A. Adler : Mechinability of sintered steels 1970, Fall P/M Confe-- rence Proceedings MPIF pag. 47.

176. A.P. Pignon : Secondary machining operations for P/M products, M.D. in P/M vol. 8 1973, pag. 163.

177. ASM : Metal Handbook No. 2, heat treating cleaning and finishing.

178. Bobo : Expanding the applications of P/M parts through heat treat- ment Progress in P/M, vol. 24, 1968, pag. 1.

179. Staff report : Practices for heat treating ferrous P/M parts Metal progress, julio 1971, pag. 74.

180. H. Ferguson : The heat treatment of P/M parts Progress in P/M, vol.30, 1974,

181. Feinberg : Surface finishing of P/M parts Progress in P/M, 24 1968.

182. M.E. Parsons : Characteristics of a flame sprayed nickel base alloy hardsurface overlay, 1970, Fall P/M Conference Proceedings, pag. 56

183. Matthews : Diffusion treatments for P/M parts Metal Progress, vol 19, 1968, pag. 103.

184. R. Chatterjee : The diffusion treatment of P/M parts with boron, si- licon, chromium and carbon, Powder Metallurgy vol 20, No.2 pag. 96

185. G.J. Caudron : P/M impregnacion techniques and materials, 1969 - Fall P/M Conference Proceedings MPIF, pag. 169.

186. B.A. Vakiener : Vacuum impregnation of P/M Components, Progress in P/M, vol. 31, 1975, MPIF pag. 53.

187. J. J. Scott : Selecting right lubricant for self-lubricating parts, Pro- gress in P/M, vol. 19, 1963, MPIF, pag. 127.

188. A. R. Poster : Handbook of Metal Powders Ed. Reinhold-Litton 1966.

189. MPIF Standards and specifications for metal powders and Powder Me- tallurgy products.

190 ASTM : Standards on Metal Powder and Products.

191. R. H.T. Dixon : Powder Metallurgy for Engineers, Machinery - - Publishing Co.

192. Anderson : Process Control for Quality and quantity in P/M, Progress in P/M vol. 16, 1960, MPIF, pag. 42.

193. Gray : Application of quality controls to powder metallurgy, Progress in P/M vol. 18, 1962, MPIF, pag. 58.

194. J.E. Brown : An examination of quality assurance in the P/M process Progress in P/M, vol. 30, 1974, MPIF, pag. 119.

195. L.F. Pease : Process variables in the production of P/M parts. Progress in P/M, vol. 30, 1974, MPIF, pag. 5.

196. MPIF : P/M Materials standards and specifications.

197. C. Monclús : La Pulvimetalurgia, Ediciones Cedel, 1986, pag. 32.

198. J.L. Rose : Ultrasonic determination of density variations in green and sintered powder metallurgy components. Progress in P/M, vol. 30, 1974, MPIF, pag. 131.

199. Kenton : Checking density variations in P/M Parts by means of Eddy Currents. Progress in P/M, vol.16, 1960, MPIF, pag. 50.

200. Report : Thermal spraying saves 75% of replacement cost for hydraulic press ram, Welding Journal, agosto 1977, pag. 41.

201. Report : Repairing ink transfer rollers with special hard-surfacing powder alloy, Industrial Heating agosto 1977, pag. 26.

202. MPIF : Iron Powder Metallurgy, Perspectives in P/M, vol. 3

203. MPIF : Ferrous P/M & Special materials, Modern Developments in P/M, vol. 8, 1973

204. J. G. Hirschhorn : A new approach for the production of [illegible] steel P/M parts M.D. in P/M, vol.5, MPIF, pag. 151.

205. R.H. Witt : Potential Airframe applications for High [illegible] applications, pag. 383.

206. H.A. Johnson : Advanced P/M Technology for [illegible] in P/M, vol.31, 1975, pag. 223.

207. M.M. Allen : Nickel - base superalloy P/M state of the art; [illegible] in P/M, vol.31, 1975, pag. 248.

208. S. H. Reichman : Low cost P/M superalloy applications to present and future turbines Progress in P/M, vol.31, 1975, pag. 269.

209. G. Jangg : Dispersin hardening of aluminum with Al_2O_3 PMI, vol.9 No. 1, febrero 1977, pag. 24.

210. R.C. [illegible] : Suitable oxides for dispersion strengthening of Ti - alloys Int. Journal of P/M and P/Tech., vol. 12, No.2 abril 1976, - pag. 93.

211. MPIF : High temperature materials M.D. in P/M, vol.3, 1965, pag.219.

212 MPIF : P/M refractory materials and specialty products, M.D. in P/M vol. 5, 1970, pag. 171.

213. I.B. Cutler : Silicon Nitride, PMI, vol.6,No.2 mayo1974, pag.92

214. Structured TaC : New supermaterial science News, vol.112, No. 2, julio 1977, pag. 25.

215. MPIF : Friction and antifriction materials, perspectives In P/M - vol. 4

216. Pedro Molera Solá : La Pulvimetalurgía presente y futuro, Afinidad, revista de química teórica y aplicada, diciembre 1974, No. 322 pag. 925.

217. Kirk Ohmner : Encyclopedia of Chemical Technology, vol.15, pag. 400

218. A.G. Dowson : Efficiency in the P/M Process Powder Metallurgy vol. 20, No. 2, 1977, pag. 104.

219. Metal Powder Report : Metal powder prices, vol. 32, No.2 feb. -- 1977, pag. 57.

220. F. Winterberg : Operations investment and economics of sintered parts manufacture PMI, vol.8, No. 3, agosto 1976. pag. 134.

221. P. de Sablet : Comparison between powder metallurgy and competitive processes for the mass production of structural parts. PMI, vol. 9 No. 3, agosto 1977, pag. 127.