

41126
108

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA
DE MEXICO

ESCUELA NACIONAL DE ESTUDIOS PROFESIONALES
CAMPUS ARAGON

LA METALURGIA DE POLVOS (M/P) COMO
UNA ALTERNATIVA EN LA MANUFACTURA
DE PARTES METALICAS

T E S I S
QUE PARA OBTENER EL TITULO DE:
INGENIERO MECANICO ELECTRICISTA
P R E S E N T A N :
ISRAEL SANTOYO CARRILLO
MARGARITO RAMOS SANCHEZ

ASESOR: M.EN I. ALBERTO REYES SOLIS

MEXICO

2003

1

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN



Universidad Nacional
Autónoma de México



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.

**TESIS
CON
FALLA DE
ORIGEN**

Esto es para mis padres, que gracias a ellos,
a su amor y todo el apoyo que me han
brindado he completado mis metas....
me siento orgulloso de ser su hijo, gracias.

A toda mi familia, que siempre me dio todo
su apoyo, mis hermanas, Naty y Nelly,
a todo mis tíos, Alex y Tony que siempre me ayudaron,
a mis abuelos, (angué, ya por fin!), mis seres queridos
que ya no están con migo.....
abuelo lamento que no puedas verlo.

Al M. En I Alberto Reyes, gracias por su ayuda y su paciencia.

Gracias a todos.
Israel.

2

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

AGRADECIMIENTOS

A MIS PADRES, POR SUS PRINCIPIOS Y SU BUEN EJEMPLO

*A **SOFI** Y TERE, POR TODOS SUS ESFUERZOS, POR CADA GOTA DE SUDOR DERRAMADA, POR TODO SU APOYO, POR HABER SIDO MIS PIES GUIAS EN ESTE DIFÍCIL CAMINO DE LA VIDA. POR AYUDARME A CABALGAR Y CUMPLIR ESTE SUEÑO, Y LO MAS IMPORTANTE POR ESTAR AHÍ Y SER MIS HERMANAS.*

*A EL LIC. **LUIS SALDAÑA BAZAN**, POR SER MAS QUE UN AMIGO, POR SER SIEMPRE UN EJEMPLO. POR SU PACIENCIA Y APOYO INCONDICIONAL EN TODO MOMENTO.*

*A EL M. EN I. **ALBERTO REYES SOLIS** POR SU CONOCIMIENTO, POR SU GRAN ACTITUD Y DISPOSICIÓN PARA LA ENSEÑANZA. POR SER EL PRINCIPIO Y FIN DE ESTE PROYECTO.*

*A **ISRAEL** POR SER UN GRAN COMPAÑERO Y AMIGO, POR ESTAR CONMIGO HOMBRO CON HOMBRO ALENTANDO, POR SU PERSISTENCIA Y SU FIRMEZA A TODA PRUEBA.*

GRACIAS A DIOS, A TODOS LOS QUE NOS APOYARON Y CREYERON EN NOSOSTROS.

MARGARITO

I N D I C E

INTRODUCCION	1
DEFINICIONES	4
HISTORIA	5
RAZONES PARA USAR METALURGIA DE POLVOS	7
EL FUTURO DE LA METALURGIA DE POLVOS	7
<u>CAPITULO 1</u>	
LOS POLVOS METALICOS Y SU PRODUCCION	9
1.1. GENERAL	9
1.2. CARACTERIZACION DE LOS POLVOS EN INGENIERIA	11
1.2.1. Características geométricas	11
Tamaño de las partículas y su distribución	12
a) Forma de las partículas y estructura interna	17
b) Área superficial	18
1.2.2. Otras características.	19
a) Fricción entre partículas y características de flujo	19
b) Compactado, densidad y porosidad	20
c) Composición química y películas superficiales	23
1.1. METODOS DE OBTENCION24	
1.3.1. La reducción	24
1.3.2. La atomización	25
1.3.3. El método electrolítico	27
1.3.4. La trituración	29
1.3.5. La pirólisis	29
1.3.6. La corrosión	31
1.3.7. La condensación	31
1.3.8. La amalgamación	31
1.3.9. La liofilización	32
1.3.10. La precipitación	32
1.3.11. A partir de chatarras	33

CAPITULO 2

TRATAMIENTOS DE LOS POLVOS	34
2.1. GENERAL	34
2.2. DENSIFICADO	34
2.3. RECOCIDO	35
2.4. ALEACION	35
2.5. ELRECUBRIMIENTO	37
2.6. LA MEZCLA	38
2.7. LA LUBRICACION	38

CAPITULO 3

EL PROCESO DE COMPACTACIÓN	45
3.1. CONCEPTO DE LA COMPACTACIÓN	45
3.2. FASES DE LA COMPACTACIÓN	49
3.3. LAS MATRICES	51
3.3.1 La fabricación de matrices	52
3.3.2. El hechurado	52
3.4. TRATAMIENTOS TERMICOS	53
3.5. ACABADOS	54
3.6. METODOS DE COMPACTACION	55
3.6.1. Compactación cíclica	55
3.6.2. Compactación por vibración	56
3.6.3. Compactación explosiva	56
3.6.4. Compactación en caliente	56
3.6.5. Sinterizado por Chispa (Spark sintering)	57
3.6.6. Presión isostática	57
3.6.7. Laminación de polvos	58
3.7. TEORIA DE LA COMPACTACION	59
3.8. EQUIPO UTILIZADO EN LA COMPACTACION	60

CAPITULO 4

SINTERIZADO

4.1. CONCEPTO DE LA SINTERIZACION	61
4.2. VARIABLES DE LA SINTERIZACION	64
4.3. LOS HORNOS	64
4.3.1. Tipo de hornos	64
4.3.2. Los hornos según tipo de calentamiento	65
4.3.3. Los hornos según su atmósfera	66
4.4. TEORIA DE LA SINTERIZACION	68
4.4.1. Etapa de la sinterización	68
4.4.2. Mecanismos de la sinterización	70

CAPITULO 5

ACABADO DE LAS PIEZAS

5.1. EL CALIBRADO	76
5.2. EL MECANIZADO	76
5.3. TRATAMIENTOS TERMICOS	77
5.3.1. El Recocido	78
5.3.2. Normalizado	78
5.3.3. El temple	78
5.3.4. El revenido	78
5.4. CORROSION	78
5.5. PAVONADO	80
5.6. RECUBRIMIENTO ELECTROLITICO	84
5.7. RECUBRIMIENTO MECANICO	84
5.8. SOLDADURA	85
5.9. IMPREGNACION	85
5.10. INFILTRACION	85

CAPITULO 6

<i>APLICACIONES DE LAS PIEZAS</i>	87
6.1. MATERIALES PARA LA METALURGIA DE POLVOS	87
6.2. PRODUCTOS DE LA METALURGIA DE POLVOS	88
6.3. EL FUTURO DE LA METALURGIA DE POLVOS	90
6.4. EJEMPLOS DE PIEZAS FABRICADAS CON M/P.	91

CAPITULO 7.

<i>CONSIDERACIONES DE DISEÑO EN LA METALURGIA DE POLVOS</i>	93
7.1. CONSIDERACIONES DE DISEÑO EN LA METALURGIA DE POLVOS	93
7.2. VENTAJAS QUE SE OBTIENEN AL EMPLEAR LA METALURGIA DE POLVOS	96
7.3. SISTEMA DE CLASIFICACION DE PARTES	97
7.4. LINEAMIENTOS PARA EL DISEÑO DE PARTES EN LA METALURGIA DE POLVOS	98

CAPITULO 8.

<i>ALEACIONES POROSAS</i>	101
8.1 LA POROSIDAD METALICA	101
8.2 SELLADO DE POROSIDADES	104
8.3 IMPREGNACION COMO HERRAMIENTA DE DISEÑO	105
8.4 IMPREGNACION DE PIEZAS DE METAL SINTERIZADO	107
8.4.1. Cuando impregnar	108
8.5 PRODUCTOS DE IMPREGNACION LOCTITE	109
8.5.1. La ventaja anaerobica	109
8.5.2. Curado a temperaturas elevadas	110
8.5.3. Propiedades de los sellados curados	111
8.5.4. Selección de productos de impregnación loctite	111

8.6	TECNOLOGIA DE PROCESO	112
8.7	BRONCES AUTOLUBRICANTES	113
8.8	NIQUEL POROSO	114
8.9	IMPLANTES	115
8.10	ALEACIONES ANTIFRICCION	115
8.11	FILTROS METALICOS	116
8.11.1.	Aplicaciones de los filtros metálicos	117

CAPITULO 9.

<i>ACEROS ALEADOS</i>		119
9.1	MÉTODO DE OBTENCIÓN DE LOS ACEROS ALEADOS	119
9.2	CARACTERÍSTICAS DE LOS ACEROS ALEADOS	121
9.3	DIVISIÓN DE LOS ACEROS ALEADOS	122
9.4	ACEROS AL NIQUEL	126
9.5	ACEROS RAPIDOS	127
	9.5.1. Composición de los aceros aleados	127
	9.5.2. Métodos convencionales de obtención	129
	9.5.3. Producción de aceros rápidos por pulvimetalurgia	131
9.6	ACEROS INOXIDABLES	134
9.7	ACEROS MARANGING	135
	9.7.1. Propiedades de los aceros maranging	136
	9.7.2. Elementos aleantes	136
	9.7.3. Fabricación	136
CONCLUSIONES		137
BIBLIOGRAFIA		138

INTRODUCCION.

Dentro de las variadas tecnologías para trabajar el metal, la Pulvimetalurgia o metalurgia de polvos es la más diversa dentro de éstas.

La pulvimetalurgia es un procedimiento de conformación metálica, como la forja, el estampado en frío, el moldeo, etc. Su competidor más directo es el moldeo por fundición de precisión o fundición a la cera perdida. En el ámbito industrial esta rama de la metalurgia está adquiriendo tanta importancia que en la actualidad la técnica está más desarrollada que la ciencia de esta especialidad y es por este motivo que también se llama Pulvimetalotecnía.

Uno de los principales problemas es la falta de información de esta rama de la metalurgia, existen muy pocos libros enfocados totalmente a este tema y en otros libros esto se trata muy superficialmente, por lo consiguiente el acceso a este tipo de tecnología es muy limitado y poco explorado por estudiantes.

El objetivo del presente trabajo es, recopilar en forma de manual la información esparcida en diferentes fuentes de información, abarcando los principales puntos del proceso de la Metalurgia de Polvos, para que esta a su vez sirva de consulta para todos los estudiosos de la materia y mostrar una alternativa para el trabajo de piezas metálicas.

En resumen, la M/P toma polvos metálicos con ciertas características como tamaño, forma y empaquetamiento para luego crear una pieza de alta dureza y precisión. Los pasos claves incluye la compactación del polvo y la subsecuente unión por calor de las partículas por medio de la sinterización. El proceso utiliza operaciones automatizadas con un consumo relativamente bajo de energía, alto uso de materiales y bajo costo de capital. Estas características hacen que la M/P se preocupe de la productividad, energía y materias primas. Consecuentemente, el área está creciendo y reemplazando métodos tradicionales de formar metales. Además, M/P es un proceso de manufactura flexible capaz de entregar un rango amplio de nuevos materiales, microestructuras y propiedades. Todo esto crea un nicho único de aplicaciones para la M/P, como por ejemplo compuestos resistentes al desgaste.

El proceso de la M/P se visualiza dentro de una filosofía distinta a aquellas en la fabricación tradicional de componentes metálicos. Específicamente, la versatilidad de la M/P da un horizonte expandido en el procesamiento de materiales: química, tratamiento térmico y microestructuras son variables y la distribución de las fases y los microconstituyentes son controlados.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Las aplicaciones de la M/P son bastante extensivas. Algunos ejemplos del uso de polvos metálicos son: filamentos de tungsteno para lámparas, restauraciones dentales, rodamientos auto-lubricantes, engranes de transmisión de automóviles, contactos eléctricos, implantes ortopédicos, filtros de alta temperatura, pilas recargables, y componentes para aeronaves.

No obstante la pulvimetalurgia se ha desarrollado recientemente debido a factores técnicos (conformado de metales de difícil moldeo y forja) y económicos (elimina etapas de fabricación y pérdidas de materia prima). La pulvimetalurgia abarca las etapas comprendidas desde la obtención de polvos metálicos hasta las piezas acabadas, es decir, producción de polvos, mezcla, compactación, sinterización y acabados.

El atractivo mayor de la Pulvimetalurgia (M/P) es la habilidad de fabricar piezas de formas complejas con excelentes tolerancias y de alta calidad, a un costo relativamente barato.

La tabla 1.1 provee una colección de usos típicos de componentes provenientes de la M/P. A pesar de que ésta diversidad de crecimiento es de gran ayuda, el estudio para desarrollar esta tecnología se hace difícil.

En este trabajo de Tesis veremos primeramente las definiciones e historia de la M/P, posteriormente en el capítulo 1 comenzaremos a ver los diferentes métodos de obtención de los polvos metálicos, en el capítulo 2 se analizan los tratamientos que se les aplican a los polvos metálicos.

Continuando con el proceso y una vez que tenemos la materia para este proceso en el capítulo 3 se describe el proceso de compactación con las diferentes fases y métodos empleados en este paso, en el capítulo 4 se define el sinterizado y los diferentes tipos de hornos utilizados en este proceso, así como las etapas y mecanismos de sinterización. Una ves obtenidas las piezas, en el capítulo 5 se explican la diversidad de acabados que se pueden dar para las piezas. En el capítulo 6 se describen las aplicaciones que tienen las piezas obtenidas por M/P. Algunas consideraciones que se deben tomar en cuenta para la fabricación de piezas por M/P son explicadas en el capítulo 7. En el capítulo 8 se trata el tema de la porosidad metálica que se presenta en algunas piezas fabricadas por M/P y también como evitarla, finalmente en el capítulo 9 hablaremos acerca de los metales aleados, de su método de obtención, de los aceros rápidos y aceros inoxidables entre otros.

APLICACIÓN	EJEMPLOS DE USO
abrasivos	ruedas pulidoras metálicas, equipos de molinenda
agricultura	covertores de semillas, equipos de jardín y pasto
aeroespacio	motores de jet, escudos de calor, boquillas de turbina
automóviles	válvulas, engranes, varillas
químicos	colorantes, filtros, catalíticos
construcción	techado de asfalto, calafatear
eléctrico	contactos, conectores
electrónico	tintas, paquetes microelectrónicos, lavatorios de calor
herramientas	candados, herramientas, herramientas de corte
tratamiento de calor	calderas, termopares, bandejas de correa
industrial	absorción de sonido, herramientas de corte
uniones	soldadores, electrodos, llenado de soldadura
lubricación	grasas
magnético	relevadores, imanes, núcleos
manufactura	moldes, herramientas, rodamientos
medicina/dental	implantes de cadera, fórceps, amalgamas
metalúrgico	recubrimiento metálico, aleaciones
nuclear	escudos, filtros, reflectores
equipos de oficina	copiadores, cámaras, fotocopiadores
artillería	fusiles, munición, penetradores
personal	vitaminas, cosméticos, jabones, lápices
petroquímico	catalíticos, brocas
plásticos	herramientas, moldes, llenadores, cemento, superficies de desgaste
imprensa	tintas, laminates
pirotécnicos	explosivos, combustible, colorantes, bengalas

Tabla 1.1 Ejemplos de usos de Polvos Metálicos

DEFINICIONES

Algunos términos deberán ser entendidos antes de comenzar con la M/P. Primero, un polvo está definido como un sólido finamente dividido más pequeño que 1mm. En muchos casos el polvo será metálico, a pesar de instancias en que sean combinados con otros elementos como cerámicos o polímeros. Una característica importante del polvo es la alta relación entre el área de superficie y el volumen. Las partículas muestran un comportamiento entre aquella del metal y de un líquido. Los polvos fluirán bajo el efecto de la gravedad para llenar un molde o contenedor, por lo tanto, en este caso se comporta como un fluido. Son compresibles como un gas, pero la compresión del polvo metálico es esencialmente irreversible, así como la deformación plástica de un metal. Por ende, los polvos metálicos son fácilmente formados a semejanza del comportamiento de un metal luego de ser procesado.

La M/P es el estudio del procesamiento de polvos metálicos, incluyendo la fabricación, caracterización y conversión de polvos metálicos en componentes ingenieriles útiles. Las secuencias de procesamiento involucran la aplicación de leyes básicas de calor, trabajo y deformación. Es el procesamiento el que cambiará la forma, propiedades y estructura del polvo para obtener el producto final.

PROCESAMIENTO DE PULVIMETALURGIA

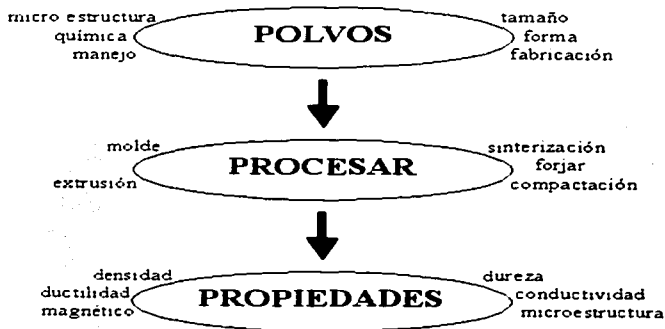


Figura 1 el flujo conceptual de la PM del polvo durante el proceso hasta el producto final. Se ejemplifica cada paso

Primero se encuentra el área etiquetada como "POLVOS" la que concierne con la naturaleza de los polvos. Se pone énfasis a la fabricación, clasificación, caracterización y manejo de los polvos. El segundo punto concierne con el muestreo, seguridad, empaquetamiento y transporte. El examen de tamaños y formas de los polvos son actividades comunes e importantes en el área de las tecnologías de polvos. Las actividades de consolidación tradicional de polvos incluye compactación y sinterización. Las preocupaciones en esta etapa son la formación y densificación de los polvos. Finalmente, el diagrama termina haciendo énfasis en las propiedades finales, haciendo hincapié en la microestructura del producto.

Decisiones concernientes con el tipo de polvo y su fabricación influyen en cuan fácil será la compactación y sinterización. De esta misma manera, el tipo de secuencia de compactación aplicada al polvo afectará las propiedades del compacto final así como ciertas metas específicas de algunas propiedades requieren que se ponga suma atención en el polvo, procesamiento y química.

HISTORIA

Los primeros usos de polvos metálicos han sido rastreados hacia varios lugares. Por ejemplo, polvos de oro fueron fusionados sobre joyas por los Incas, y los Egipcios utilizaron polvos de acero en el año 3000 AC. Otro ejemplo de uso temprano es la Columna de Delhi en la India la que data al año 300 DC. Esta columna fue hecha de 6.5 toneladas de acero en polvo, durante el siglo XIX se inicio el uso serio de técnicas de Pulvimetalurgia. La necesidad de aparatos de platino de laboratorio llevaron al desarrollo de precipitación química de polvos y nuevas rutas de fabricación sin el uso de altas temperaturas. Tales actividades ocurrieron en Rusia e Inglaterra donde polvos precipitados fueron trabajados en caliente para superar la incapacidad de obtener las altas temperaturas para recubrir platino. Al mismo tiempo, se fabricaron monedas de polvos de cobre, plata y plomo acuñadas y sinterizadas. La época moderna de la PM es rastreado hasta Coolidge quien utilizó polvos de tungsteno para desarrollar un filamento durable para lámparas solicitado por Edison. Subsecuentemente, rodamientos porosos de bronce y contactos eléctricos de grafito-cobre fueron desarrollados en los años 30. Al llegar a los cuarentas, M/P estaba involucrado en la fabricación de nuevas aleaciones de tungsteno, aleaciones estructurales de hierro y metales refractarios. El interés inicial de la M/P creció desde una base de materiales, formando elementos comunes como el cobre y hierro por medios de una tecnología de menor costo. Desde los años cuarenta, varios materiales menos comunes han sido procesados desde polvos incluyendo metales refractarios y sus aleaciones (Nb, W, Mo, Zr, Ti y Re). Adicionalmente, el crecimiento de metales estructurales ha avanzado igual en el periodo. La mayoría de las piezas estructurales producidos de polvos son basadas en hierro.

Igual de emocionante ha sido la evolución de las aplicaciones. Inicialmente, componentes basados en polvos fueron seleccionados simplemente por su bajo costo. Más recientemente, la principal razón de seleccionar una ruta de M/P ha sido asociada con el mejoramiento de la calidad, homogeneidad o propiedades en conjunto de costo atractivo y productividad. Las superaleaciones de altas temperaturas de níquel, la dureza específica de aleaciones de aluminio para aeronaves y compuestos de aluminio con expansión térmica controlada son algunos buenos ejemplos de esta evolución. No sólo podrán ser fabricados con mejor economía de material por medio de polvos, sino también por nuevas y mejores composiciones que están siendo desarrolladas, aprovechando así el control químico y de la microestructura. La expansión de los procesos de PM en las áreas que requieren materiales de alta calidad y propiedades únicas crearán más oportunidades para el futuro.

RAZONES PARA USAR METALURGIA DE POLVOS.

Muchos atributos contribuyen al éxito de la M/P. Hay tres categorías que dominan y proveen un concepto introductorio para el uso de la M/P. Primero están las variadas aplicaciones que confían en la economía de producción de piezas complejas. Componentes para la industria automotriz representan buenos ejemplos para esta área y su producción es una inmensa actividad para la M/P. Dentro del área de economía de producción de piezas viene la preocupación de la productividad, tolerancias y automatización. Tanto la precisión como los costos son bastante atractivos. Polvos de aleaciones permiten la fabricación a temperaturas bajo el punto de fusión del metal. Esto elimina la segregación y otros defectos asociados con la fundición.

También hay propiedades únicas o justificaciones de micro estructura para el uso de M/P. Algunos ejemplos incluye metales porosos, aleaciones endurecidas por dispersión de óxidos y compuestos de metal-cerámica. La imposibilidad de poder fabricar estas microestructuras por medio de otras técnicas ha contribuido bastante al crecimiento de la M/P. Por último se menciona aplicaciones cautivas. Estos son los materiales que son bastante complicados de procesar utilizando otras técnicas. Ejemplos ideales son los metales reactivos y refractarios, en los que la fundición no es práctica. Otro grupo emergente son los metales amorfos. En muchos casos es deseable poder formar un polvo y desarrollar procesos a bajas temperaturas para evitar daños a la microestructura. Las técnicas de la M/P son atractivas dado que todo el procesamiento se logra en el estado sólido.

EL FUTURO DE LA METALURGIA DE POLVOS.

Los éxitos del pasado de la M/P han sido atribuidos a los beneficios económicos. Una comparación relativa de las cantidades de producción de polvos se indica en la figura 2. Esta figura normalizada muestra que el área ingenieril constituye el segmento de mayor uso, apoyándose en el bajo costo de los materiales. Más recientemente, los materiales exclusivos y difícil de procesar han contribuido a la expansión de la tecnología de la M/P. Hay seis ingredientes necesarios para lograr un crecimiento continuo:

1. Alto volumen de producción de piezas estructurales de alta precisión y calidad de aleaciones ferrosas
2. Fabricación de materiales de alto desempeño, donde la densidad total y confiabilidad son las preocupaciones primordiales
3. Fabricación de materiales difíciles de procesar, donde aleaciones de alto desempeño y alta densidad se pueden fabricar con microestructuras uniformes
4. Fabricación económica de aleaciones especiales, típicamente compuestos que contienen fases mixtas
5. Sintetización de materiales no equilibrados como amorfos, micro cristales o aleaciones metaestables
6. Procesamiento de piezas complejas con ingredientes exclusivos o formas poco comunes

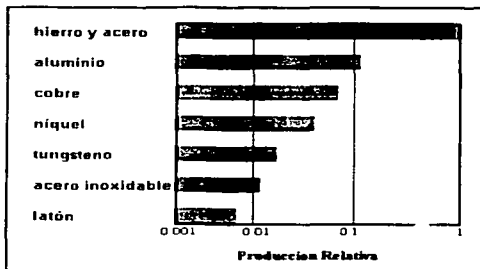


Figura 2. comparación de la producción relativa para algunos de los polvos metálicos más comunes.

La Pulvimetalurgia está creciendo día a día. El uso de polvos metálicos continua expandiéndose y el rubro está creciendo más rápido que cualquier otro método de trabajar metales. Además, la necesidad de personal calificado está creciendo más rápido dado la diversidad y dificultad de las aplicaciones que están siendo desarrolladas por la M/P. Está claro que a medida que los conocimientos de esta materia aumentan, aparecerán muchas aplicaciones más para ella. La mayoría de los usos actuales se basan en la economía de los procesos. El futuro promete más desafíos con la combinación de ahorrar costos y ciertos factores como la confiabilidad, calidad, dureza, control dimensional y la capacidad de formar piezas exclusivas. La apreciación abierta de estas ventajas proveerán oportunidades de crecimiento económico y tecnológico. Investigaciones del uso de polvos metálicos ofrecen esperanza para aplicaciones aun más diversas, incluyendo aleaciones magnéticas de alta solidificación, aleaciones nuevas para aeronaves y estructuras de alta dureza involucrando microestructuras a escalas muy pequeñas.

**TEMAS CON
FALLA DE ORIGEN**

CAPITULO I.- LOS POLVOS METALICOS Y SU PRODUCCION.

1.1. GENERAL

La metalurgia de polvos o pulvimetalurgia, es una tecnología de procesamiento de metales en la que se producen partes a partir de polvos metálicos. En la secuencia usual de producción de la metalurgia de polvos, los polvos se comprimen para darles la forma deseada y luego se calientan para ocasionar la unión por difusión de las partículas en una masa dura y rígida. La compresión, llamada *pressedo* o *compactación*, se realiza en una máquina tipo prensa cuyas herramientas se diseñan específicamente para la parte a producir. Las herramientas, que consisten generalmente en un dado y uno o más punzones, pueden ser costosas y es por eso que la metalurgia de polvos es más adecuada para niveles medios o altos de producción. El tratamiento térmico, llamado *sinterizado* se realiza a una temperatura por debajo del punto de fusión del metal. Las consideraciones que hacen de la metalurgia de polvos un proceso importante desde el punto de vista comercial y tecnológico son las siguientes:

- Las partes de M/P se pueden producir masivamente, eliminando o reduciendo la necesidad de procesos posteriores.
- Los procesos de la M/P implican muy poco desperdicio de material, cerca del 97% de los polvos iniciales se convierten en producto. Esto se compara favorablemente con los procesos de fundición en los cuales las coladas, los alimentadores de las coladas son material de desperdicio en cada ciclo de producción.
- Debido a la naturaleza del material inicial en la M/P, se pueden hacer partes con un nivel específico de porosidad. Esta característica se presta a la producción de partes de metal poroso, como rodamientos y engranes impregnables con aceite, así como filtros.
- Ciertos metales que son difíciles de fabricar por otros métodos, se pueden formar por metalurgia de polvos. El tungsteno es un ejemplo; los filamentos de tungsteno que se usan en las lámparas incandescentes se manufacturan con tecnología de M/P.
- Ciertas combinaciones de aleaciones metálicas y cermetes que no se pueden producir por otros métodos se pueden hacer por M/P.
- La M/P se compara favorablemente con la mayoría de los procesos de fundición en lo que se refiere al control dimensional de los productos. Las tolerancias rutinarias que se pueden lograr son de $\pm 0.13\text{mm}$ (± 0.005 pulg)
- Los métodos de producción de la M/P se pueden automatizar para hacer más económica la operación.

**TESIS CON
FALLA DE ORIGEN**

Hay limitaciones y desventajas asociadas con el procesamiento de la M/P, estas incluyen:

- 1) Alto costo del equipo y de las herramientas
- 2) Alto costo de los polvos metálicos
- 3) Dificultades en el almacenamiento y manejo de los polvos (como degradación del metal a través del tiempo y riesgos de incendio del metal en polvo fino)
- 4) Limitaciones en la forma de las partes, debido a que los polvos metálicos no fluyen fácilmente en dirección lateral dentro del dado durante la compactación, y las tolerancias deben permitir que la parte pueda expulsarse del dado después del prensado
- 5) Las variaciones en la densidad del material a través de la parte pueden ser un problema, especialmente para partes de geometría compleja.

Aunque se pueden producir partes grandes hasta de 22 Kg (50 lb), la mayoría de los componentes hechos por M/P son menores de 2.2 Kg (5 lb).

Las aleaciones de hierro, acero y aluminio constituyen el mayor tonelaje de metales que se usan en la M/P. Otros metales incluyen cobre, níquel y metales refractarios como el molibdeno y tungsteno. Los carburos metálicos como el carburo de tungsteno se incluyen frecuentemente dentro del campo de la metalurgia de polvos.

En este proceso no siempre se utiliza el calor, pero cuando se utiliza éste debe mantenerse debajo de la temperatura de fusión de los metales a trabajar. Cuando se aplica calor en el proceso subsecuente de la metalurgia de polvos se le conoce como sinterizado, este proceso genera la unión de partículas finas con lo que se mejora la resistencia de los productos y otras de sus propiedades. Las piezas metálicas producto de los procesos de la metalurgia de los polvos son producto de la mezcla de diversos polvos de metales que se complementan en sus características. Así se pueden obtener metales con cobalto, tungsteno o grafito según para qué va a ser utilizado el material que se fabrica.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

El proceso de manera general consiste en:

1. Producción de polvo de los metales que serán utilizados en la pieza
2. Mezclado de los metales participantes
3. Conformado de las piezas por medio de prensas (compactación)
4. Sinterizado de las piezas
5. Tratamientos térmicos



1.2. CARACTERIZACION DE LOS POLVOS EN INGENIERIA

Un polvo se puede definir como un sólido dividido en partículas finas.

1.2.1 CARACTERÍSTICAS GEOMÉTRICAS.

La geometría de los polvos individuales se puede definir mediante los siguientes atributos:

- a) tamaño de las partículas y su distribución
- b) forma y estructura interna de las partículas
- c) área superficial



a) Tamaño de las partículas y su distribución.

El tamaño de las partículas se refiere a las dimensiones de los polvos individuales. Si la forma de la partícula es esférica, una sola dimensión es adecuada. Para otras formas, se necesitan dos o más dimensiones. Se dispone de varios métodos para obtener datos sobre el tamaño de las partículas. El método más común usa cribas de diferentes tamaños de malla o también llamado tamices. Se usa el término de *número de malla* para referirse al número de aberturas por pulgada lineal. Un número de malla 200 significa que hay 200 aberturas por pulgada lineal. Como la malla es cuadrada, la cuenta es la misma en ambas direcciones, y el número total de aberturas por pulg² es $200^2 = 40,000$. En consecuencia, un número alto de malla indica menor tamaño de partícula.

Las partículas se separan haciéndolas pasar a través de una serie de cribas de tamaños progresivamente menores de malla. Los polvos se colocan sobre una criba de un cierto número de malla y ésta se hace vibrar para que las partículas pequeñas que caben en las aberturas caigan a la siguiente criba. La segunda criba se vacía en la tercera y así sucesivamente, de manera que las partículas se seleccionen de acuerdo a su tamaño. Se puede designar a un cierto tamaño de polvo 230 por 200, indicando que los polvos han pasado por la malla 200, pero no por la 230. Para simplificar la especificación, se dice que el tamaño de partícula es 200. El procedimiento para seleccionar los polvos por su tamaño se llama *clasificación*.

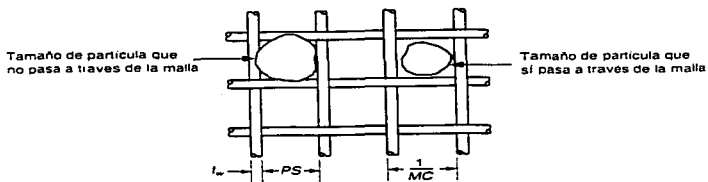


FIGURA 1.1. Malla de criba para seleccionar tamaños de partícula

La figura 1.1 muestra cómo pasarían las partículas pequeñas a través de las aberturas, mientras que las grandes se quedarían retenidas. Las variaciones que ocurren en la selección de tamaños de partículas mediante cribado se deben a las diferencias de la forma de las partículas y al rango de tamaños entre los números sucesivos de malla.

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

Entre los métodos aplicados a la determinación del tamaño de las partículas se puede diferenciar entre los que necesitan medio húmedo de los que no lo necesitan:

- Medio húmedo: sedimentación, centrifugación, microscopía y modulación del flujo eléctrico (Contador Coulter).
- Medio seco: tamizado, elutriación, microscopía y permeabilidad (Fisher).

A continuación se analizan los métodos por medio húmedo.

- a) La sedimentación se basa en la ley de Stokes: cuando un sólido cae en el seno de un fluido aparece una fuerza de rozamiento F_R que se opone al movimiento. Se ha comprobado experimentalmente que la fuerza de rozamiento depende de la viscosidad del fluido μ , del tamaño del sólido y de su velocidad de caída v_0 .

$$F_R = 6\pi\mu r v_0$$

Las medidas de las partículas se realizan en unos aparatos que consisten básicamente en un tubo de aluminio vertical, lleno de líquido o gas, provisto en su parte superior de un sistema de alimentación de polvo y la parte inferior de un sistema destinado a medir la velocidad de sedimentación. Estas medidas de velocidad pueden hacerse por análisis químico (pipeta de Andreasen), por turbimetría, por pesada automática de los polvos sedimentados, por medidas de densidad, de presión, etc. Este aparato proporciona el diámetro medio de las distintas fracciones sedimentadas a lo largo del tiempo de operación, es decir, indica el tamaño y la distribución de las partículas de polvo metálico.

- b) La centrifugación es la combinación de la sedimentación con la fuerza centrífuga aplicada a las partículas, cuya acción equivale a aumentar considerablemente el peso de las mismas. En la sedimentación libre, el peso de una partícula de masa m situada en un campo de gravedad g , vale

$$w=mg$$



La separación se realiza en ciclones, en separadores centrífugos y separadores en vía húmeda. En los ciclones, aire cargado de polvo entra a velocidad elevada en forma tangencial, en un cuerpo cilíndrico. El polvo choca contra las paredes y, por roce, va perdiendo velocidad y se recoge en el fondo, saliendo el gas por la parte superior.

En los separadores centrífugos el movimiento rotacional se logra mediante el giro de un disco y de un rodete de paletas cuya misión es crear una corriente de aire que clasifica los polvos. La sedimentación en medio húmedo utiliza centrifugas de fondo filtrante.

- c) Las microscopías óptica y electrónica contribuyen ambas al estudio del tamaño y distribución de las partículas de polvo. El microscopio más empleado para este fin es el microscopio óptico. Consta de una fuente luminosa que genera un haz de rayos, el cual llega a un espejo plano que lo refleja enviándolo a través de las lentes que constituyen el objetivo, a la superficie de la muestra. Aquí parte del haz incidente se absorbe y parte se refleja, de modo que una fracción importante del haz reflejado vuelva a pasar a través de las lentes del objetivo, donde la imagen se amplía, vuelve a pasar por el espejo plano y llega al conjunto de lentes que forman el ocular, donde la imagen se vuelve a ampliar. Los aumentos alcanzados por el microscopio vienen dados por la fórmula:

$$L = \frac{T}{f} n$$

donde T es la longitud del tubo del microscopio, desde el ocular al objetivo, f es la distancia focal del objetivo y n es la potencia de ampliación del ocular. Los microscopios ópticos comunes consiguen los 2000 aumentos. No obstante, la calidad de la imagen de la muestra está influenciada por el poder resolutivo, definido como la mínima distancia entre dos puntos del objeto que produce imágenes diferenciadas.

La longitud de onda asociada a un electrón es mucho menor que la longitud de onda de las radiaciones visibles, y es por esta razón que con el microscopio electrónico de reflexión (SEM) se consiguen más aumentos (20 000) y mayor profundidad de foco, lo que posibilita observar los polvos sin previa preparación en las tres dimensiones. El aparato consiste en un sistema que genera electrones, los acelera y enfoca mediante dos lentes electromagnéticas y los hace incidir sobre la muestra que actúa como anticátodo: En este choque se arrancan electrones secundarios superficiales e internos, fotones, rayos X, etc., utilizándose los electrones secundarios superficiales para formar la imagen topográfica de la superficie de la muestra.

- d) La modulación de flujo eléctrico aplica medidas de variación de potencial eléctrico a la determinación del volumen de las partículas. El aparato utilizado (figura 1.2) consta de un tubo (A) dividido longitudinalmente en dos compartimientos y con un agujero (B) en la parte inferior. En cada compartimiento se colocan sendos electrodos (C) a ambos lados del agujero, cuyo diámetro es mayor que la partícula de polvo de mayor tamaño. El tubo se llena de un líquido conductor y los polvos, cuyo tamaño y distribución se quiere determinar, se introducen en el líquido, por el interior del cual descienden. La concentración de partículas se ajusta de manera que sólo pase por el agujero en un período de tiempo determinado. Cuando ello ocurre, la resistencia eléctrica del líquido cambia momentáneamente de forma proporcional al volumen del líquido desplazado por la partícula, es decir, a su tamaño. Estos cambios producen una pulsación de potencial de corta duración cuya magnitud es proporcional al volumen de la partícula. Calibrando el aparato y conectándolo a un sistema electrónico automático puede obtenerse la distribución de los tamaños.

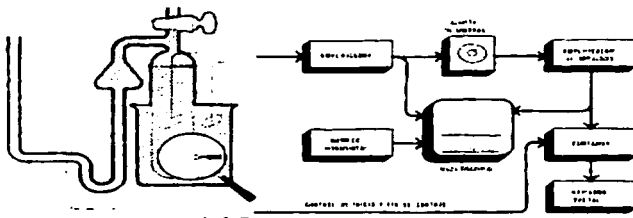


Figura 1.2 Esquema de un aparato de modulación de flujo eléctrico

Dentro de los métodos de medio seco se tienen:

- a) La determinación del tamaño del grano en las masas de polvos realizada en el aparato de Fisher, se basa en la permeabilidad. Esencialmente el cálculo de la superficie esférica de la partícula se realiza midiendo la resistencia que una columna llena de polvo opone al paso del aire (figura 1.3).

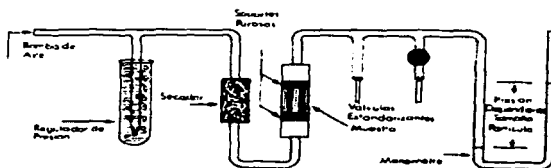


Figura 1.3 Aspecto de un aparato para determinar el tamaño de partícula

- b) El tamizado consiste en la separación de partículas mediante método más empleado para determinar la granulometría de las partículas y se aplica también para preparar fracciones destinadas a la mezcla de polvos con distribución de tamaños previamente programada. Los tamices más divulgados son los que se adaptan a la escala de Tyler, recomendada por las normas ASTM. Se trata de tamices de malla de tejido de alambre, cuyo número Tyler indica la cantidad de mallas por pulgada lineal. Como cabe esperar este número varía inversamente respecto al que expresa la abertura de malla en micras.

El tamizado suele realizarse colocando unos 100 g de polvo en una tamizadora automática provista de un juego de tamices de distinta abertura y que se deja sacudir durante unos 15 minutos. El resultado se expresa como porcentaje de polvo retenido en cada tamiz. Por ejemplo «40 por ciento menor que 140 y mayor que 120» significa que el 40 por ciento, en peso, del polvo pasa por el tamiz Tyler 140 pero es retenido por el 120. De esta forma se determina el diámetro máximo, en lugar del medio, de cada fracción que pasa por un tamiz o el mínimo de la fracción retenida.

b) Forma de las partículas y estructura interna.

La forma de los polvos metálicos puede catalogarse en varios tipos, algunos se ilustran en la figura 1.4 Existen variaciones en la forma de las partículas de una colección de polvos como en sus tamaños. Una forma simple y útil de medir la forma es la relación del aspecto, entre la dimensión máxima y mínima de una partícula dada. La relación del aspecto para una partícula esférica es 1.0, pero para un grano acicular puede ser 2 o 4.

Se requieren técnicas microscópicas para determinar las características de la forma.

Cualquier volumen de polvos sueltos contiene poros entre las partículas. Estos se llaman *poros abiertos*, por que son externos a las partículas individuales. Los poros abiertos son espacios dentro de los cuales puede penetrar un fluido como agua, aceite o un metal fundido. Además hay *poros cerrados*, que son huecos internos en la estructura de una partícula individual.

La existencia de estos poros internos generalmente es mínima, y sus efectos, cuando existen, son menores; no obstante pueden influir en las medidas de la densidad.

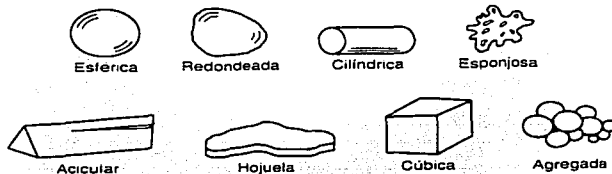


Figura 1.4. Varias formas posibles de partícula en metalurgia de polvos

c) **Area superficial.**

Suponiendo que la forma de la partícula sea una esfera perfecta, su área A y su volumen V están dados por:

$$A = \pi D^2$$

$$V = \frac{\pi D^3}{6}$$

donde D = diámetro de la partícula esférica. La relación de área a volumen A/V para una esfera se determina entonces por:

$$\frac{A}{V} = \frac{6}{D}$$

En general, la relación de área a volumen puede expresarse para cualquier forma de partícula, esférica o no esférica como sigue:

$$\frac{A}{V} = \frac{K_s}{D} \quad \text{o} \quad K_s = \frac{AD}{V}$$

Donde K_s = factor de forma y D en el caso general = diámetro de una esfera o volumen equivalente al de una partícula no esférica, entonces $K_s = 6.0$ para una esfera. Para formas de partícula diferentes a la esférica, $K_s > 6$.

De estas ecuaciones se puede inferir lo siguiente: a tamaños menores de partícula y factores de forma (K_s) más altos el área superficial será más alta para el mismo peso total del polvo metálico.

Esto significa una mayor área donde puede ocurrir la oxidación. El tamaño más pequeño del polvo también conduce a una mayor aglomeración de las partículas, lo cual es una desventaja para la alimentación automática de los polvos. La razón para usar tamaños más pequeños de partículas es que suministran una contracción más uniforme y mejores propiedades mecánicas en los productos finales de la M/P.

1.2.2. OTRAS CARACTERÍSTICAS.

Otras características de los polvos de ingeniería incluyen fricción entre partículas, características de flujo, compactado, densidad, porosidad, composición química y películas superficiales.

a) *Fricción entre partículas y características de flujo.*

La fricción entre las partículas afecta la disposición del polvo a fluir fácilmente y a compactarse firmemente. Una medida común de la fricción entre partículas es el ángulo de reposo, el cual es el ángulo formado por un montón de polvo cuando este se vacía a través de un embudo angosto, tal como se muestra en la figura 1.5.

Los ángulos más grandes indican mayor fricción entre partículas. Los tamaños de partículas más pequeños generalmente muestran mayor fricción y un aumento en el ángulo de reposo. Las formas esféricas producen la menor fricción entre partículas, por que al desviarse de la forma esférica, se incrementa la fricción entre partículas.

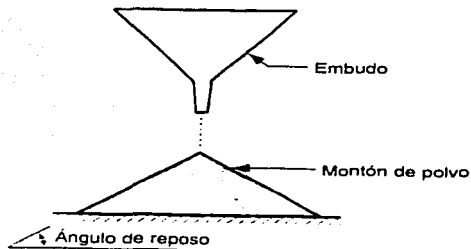


Figura 1.5 Fricción entre partículas indicada por el ángulo de reposo de un montón de polvo vaciado desde un embudo angosto. A mayor ángulo, mayor fricción entre partículas.

Las características de flujo son importantes durante el llenado del dado y el prensado. El llenado automático del dado depende de un flujo fácil y consistente de los polvos. En el prensado, la resistencia a fluir incrementa las variaciones de densidad en la parte compactada; estos gradientes de densidad son generalmente indeseables.

Una medida común del flujo es el tiempo requerido para que una cierta cantidad de polvo fluya a través de un embudo de tamaño estándar. Los tiempos menores de flujo indican mayor facilidad de flujo y menor fricción entre partículas. Para reducir la fricción y facilitar el flujo durante el prensado, frecuentemente se añaden a los polvos pequeñas cantidades de lubricantes.

b) Compactado, densidad y porosidad.

Las características del compactado dependen de dos medidas de densidad. Primero, la *densidad real*, que es la densidad del volumen verdadero del material. Esta podría ser la densidad del material si los polvos se fundieran en una masa sólida. Segundo, la *densidad volumétrica* es la densidad de los polvos en el estado suelto después de vaciado; esta incluye el efecto de los poros entre las partículas.

Debido a los poros, la densidad volumétrica es menor que la densidad real.

El *factor de empaquetamiento* es la densidad volumétrica dividida entre la densidad real. Los valores típicos para los polvos sueltos fluctúan entre 0.5 y 0.7.

El compactado puede aumentarse haciendo vibrar los polvos, lo que ocasiona que se asienten más firmemente. También se debe observar que la presión externa que se aplica durante la compactación, incrementa en gran medida el empaquetamiento de los polvos a través del arreglo y deformación de las partículas.

Porosidad

La porosidad representa un camino alternativo para considerar las características de compactación de un polvo. La porosidad se define como la relación del volumen de los poros (huecos) en el polvo, con respecto al volumen total. En principio,

$$\text{Porosidad} + \text{factor de empaquetamiento} = 1.0$$

La porosidad indica el grado de compactación de la partícula de polvo. Podemos distinguir dos tipos de porosidad, según si el poro se encuentra en la superficie o en el interior de las partículas de polvo, y que se denominarán porosidad externa y porosidad interna, respectivamente. Los polvos de hierro obtenidos por reducción de sus óxidos presentan micro porosidad interna. En cambio, los polvos de acero atomizados, previa reducción de los óxidos formados, presentan cierta porosidad superficial, siendo sus núcleos compactos. Los polvos de procedencia electrolítica presentan características semejantes a estos últimos

A su vez, en la porosidad interna pueden distinguirse dos tipos de poros: el tipo esponja, en el cual los poros se presentan como un conjunto de huecos aislados, y el tipo erizo, en el cual los poros están interconectados. La porosidad interna se detecta mediante observación al microscopio o por medida de densidad. La porosidad de tipo erizo, así como la porosidad superficial, producen elevados valores de superficie específica, fáciles de detectar.

Densidad

En este tipo de medidas es preciso hacer la distinción entre la densidad aparente y la densidad de polvo vibrado. La primera se define como la relación entre el peso en gramos y el volumen en centímetros cúbicos de una masa pulverizada. La densidad de polvo vibrado es esta misma relación, pero tras someter la masa pulverizada a sacudidas de intensidad y duración normalizadas, en un recipiente de dimensiones fijas. Esta densidad de polvo vibrado sólo tiene un reducido interés práctico.

La medida de la densidad aparente se efectúa pesando un recipiente de volumen conocido enrasado con el polvo problema. Esta medida depende de la forma de las partículas, de su tamaño y distribución, así como de su porosidad. Su interés reside en el hecho de que las matrices normalmente se llenan con un volumen fijo de polvos, por lo que la densidad indica la profundidad con la cual deben diseñarse.

Velocidad de derrame.

Se define la velocidad de derrame a partir del tiempo necesario para que se derrame una cantidad fija de polvo a través de un orificio de dimensiones normalizadas practicado en un recipiente igualmente normalizado figura 1.6. La velocidad de derrame depende de la forma, del tamaño y de la distribución de las partículas de polvo y de los fenómenos de superficie (absorción) que puedan presentarse. El interés práctico de esta característica reside en que proporciona una orientación acerca del tiempo de llenado de los moldes.

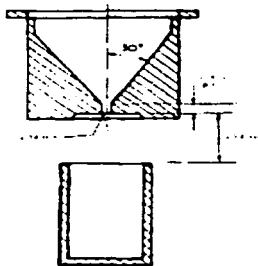


FIGURA 1.6. Dispositivo para medir velocidad de derrame

Solidificación.

La solidificación del polvo es la presión mínima necesaria para producir un compacto de resistencia en verde satisfactoria. Se entiende por resistencia en verde la resistencia mecánica necesaria para que el polvo compactado, pero aún no sinterizado, pueda manipularse sin deterioro durante las operaciones mecánicas que van del prensado al sinterizado, es decir, durante la expulsión de la pieza de la matriz y el traslado al horno.

Plasticidad.

La plasticidad es la cualidad de ser fácilmente deformable con carácter permanente que poseen los polvos. Cuanto mayor es la plasticidad, mayor es el aumento de la superficie de contacto de los polvos durante la compactación. En este caso, la resistencia en verde y la densidad aumentan considerablemente. La plasticidad es función de la composición química del polvo, de su forma y de su microestructura.

Acritud.

La acritud es la capacidad que posee el polvo de endurecerse por el trabajo. El endurecimiento por trabajo o por deformación plástica se lleva a cabo como un deslizamiento entre planos compactos o planos de mayor densidad de empaquetamiento, lo cual es debido al movimiento de las dislocaciones que son defectos que poseen los metales y cuyo número aumenta debido al proceso de deformación plástica, llevando esto a un aumento en la dureza y en el Límite Elástico del material. Este fenómeno altera la distribución de tamaños en el polvo e incrementa la densidad en la etapa de la compactación.

a) Composición química y películas superficiales.

La caracterización del polvo no sería completa sin una identificación de su composición química. Los polvos metálicos se clasifican como elementales, esto significa que consisten de un metal puro o prealeado, en donde cada partícula es una aleación.

Las películas superficiales son un problema en la metalurgia de polvos debido a la gran área por unidad de peso del polvo metálico. Las posibles películas incluyen óxidos, sílice, materiales orgánicos absorbidos y humedad. Por lo general estas películas deben removerse antes de llevar el polvo a la forma requerida.

1.3. METODOS DE OBTENCION.

En general, los productores de polvos metálicos no son las mismas compañías que hacen las partes de M/P. Los productores de polvo son los proveedores y la plantas que manufacturan los componentes a partir de polvos metálicos son los consumidores. Por lo tanto, es adecuado separar la producción de polvos de los procesos que se usan para hacer productos a partir de ellos por medio de la M/P.

Prácticamente cualquier metal puede reducirse a la forma de polvo, los métodos de obtención son los siguientes: la reducción, la atomización, el método electrofítico, la trituración, la pirolisis, la corrosión, la condensación, la liofilización, la precipitación y a partir de chatarra.

1.3.1 La reducción.

La obtención de polvos de metal por reducción se basa en la eliminación del oxígeno de los óxidos metálicos mediante un agente reductor. El polvo obtenido por este método es esponjoso y sus granos son de forma esférica irregular. El control de las características del polvo reducido, dentro de límites amplios, se realiza variando la forma de los óxidos, su tamaño y su naturaleza, o bien variando la temperatura de la reacción, la naturaleza del agente reductor, y, si se trata de un gas, su presión y su régimen de flujo. Así el tamaño del polvo metálico y su forma dependen del tamaño y la forma de los óxidos de partida, dependiendo su tamaño también de la temperatura de reducción; en efecto, una disminución de dicha temperatura da lugar a la formación de partículas de polvo más pequeñas.

La empresa sueca Hoganas comienza el tratamiento pulverizando el mineral de hierro (magnetita), concentrándolo después magnéticamente para reducirlo luego en lecho de carbono, calentando a 1200 °C en presencia de caliza y dolomita, que actúan como desulfurantes. Con este tratamiento se obtiene una esponja que contiene todavía cierta cantidad de óxido y de carbono, para eliminarlos se recuece la esponja en un horno con atmósfera de hidrógeno, suprimiéndose al mismo tiempo las tensiones introducidas en la molienda. Los polvos, una vez tamizados, se clasifican por su tamaño.

1.3.2. La atomización.

La atomización consiste, en general, en proyectar un chorro de metal o de aleación fundido contra un fluido (aire o agua). Debido a la súbita solidificación que tiene lugar, el metal aparece en forma de pequeñas partículas. A continuación se recuece la masa así formada en una atmósfera reductora, a fin de eliminar el óxido superficial que se haya formado. Este procedimiento se aplica para obtener polvos de hierro y acero que suelen estar libres de inclusiones no metálicas. En la atomización se debe tener en cuenta como variables importantes del proceso, la temperatura y régimen del metal fundido, la naturaleza y presión del fluido y otros factores procedentes del diseño, como las dimensiones de la tobera, la altura de la caída, etc.

Si se quiere aumentar la rugosidad superficial del polvo de acero, se debe partir de un lingote de fundición blanca, que se descarbura dentro de un horno, añadiendo polvo de óxido de hierro; a continuación, se lleva a cabo la eliminación del carbono, por formación de óxido, lo que conduce a la formación de un polvo de ligera porosidad superficial.

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

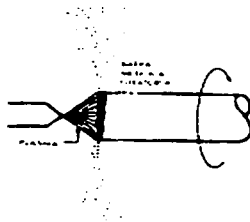


Figura 1.7. Esquema del método del electrodo giratorio para obtener polvos metálicos.

Recientemente, ha adquirido importancia la técnica del electrodo giratorio, destinada a la atomización de aleaciones. Esta técnica consiste, esquemáticamente, en conectar el lingote que se quiere atomizar a un borne de la corriente eléctrica de manera que pueda girar sobre su propio eje a velocidad variable. El otro extremo es un electrodo de Tungsteno (wolframio). Entre ambos electrodos se aplica un potencial eléctrico tan elevado como sea preciso para que salte la chispa y provoque la fusión del lingote. La fuerza centrífuga del electrodo giratorio es suficiente para expulsar gotas de metal líquido que se solidifican después en forma de polvos esféricos. En la figura 1.7 se reproduce un diagrama e la técnica que se acaba de describir.

La atomización es en la actualidad el método más versátil y popular para producir polvos metálicos, y aplicable a casi todos los metales, aleaciones o metales puros. Hay muchas otras maneras de crear el rocío del metal fundido, varias de ellas se ilustran en la figura 1.8.

Dos métodos se basan en la *atomización con gas*, en los cuales se utiliza una corriente de gas a alta velocidad (aire o gas inerte) para atomizar el metal líquido.

En la parte (a) de la figura el gas fluye a través de una boquilla de expansión, succionando el metal líquido de la fusión que se encuentra debajo y rociándolo en un recipiente. Las gotitas se solidifican en forma de pequeñas partículas formando así el polvo.

En un método parecido que se muestra en la parte (b), el metal fundido fluye a través de una boquilla y se atomiza inmediatamente por los chorros de aire que inciden sobre él. Los polvos metálicos resultantes se recolectan en una cámara situada debajo.

El método que se ilustra en la parte (c) es similar al (b), excepto que se utiliza una corriente de agua a alta velocidad en lugar de aire. Este se conoce como *atomizado por agua* y es el más común de los métodos de atomizado, particularmente apropiado para metales que se funden por arriba de 1600 °C.

El enfriamiento es más rápido y la forma de polvo resultante es más irregular que esférica. La desventaja de usar agua es la oxidación en la superficie de las partículas. Una reciente innovación usa aceite sintético en lugar de agua para reducir la oxidación. En ambos procesos de atomizado con aire o con agua, el tamaño de las partículas se controla en gran parte por la velocidad de la corriente del fluido; el tamaño de partícula está en relación inversa con la velocidad.

El *atomizado centrifugo*, es una versión del disco rotatorio, mostrado en la parte (d) de la figura, donde se vacía una corriente de metal líquido en un disco que gira rápidamente y rocía el metal en todas direcciones, pulverizándolo.

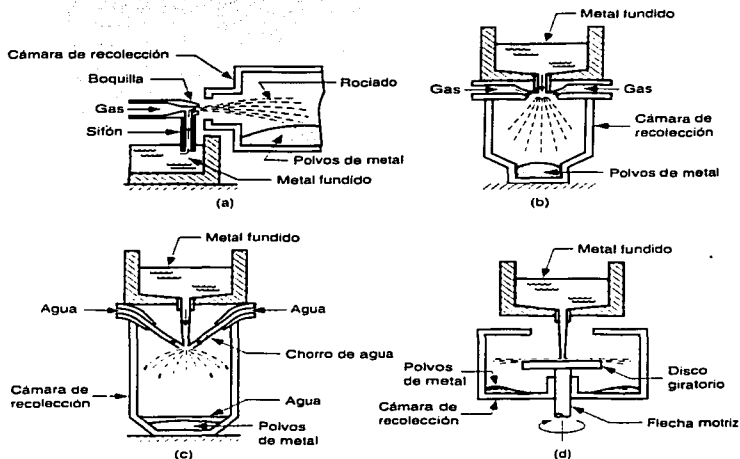


Figura 1.8 Varios métodos de atomización para producir polvos metálicos: (a) y (b) dos métodos de atomización por gas, (c) atomización con agua y (d) atomización centrífuga o el método de disco giratorio.

1.3.3. El método electrolítico.

El método electrolítico es un proceso relativamente sencillo y fácil de controlar. Consiste en una electrólisis practicada ordinariamente con un ánodo soluble y un cátodo de acero inoxidable. Controlando convenientemente las variables electrolíticas, se consigue formar un depósito esponjoso, el cual, tras las operaciones de lavado y secado, es triturado, pulverizado y tamizado, recojiéndose finalmente la masa porosa resultante en una atmósfera reductora. El proceso se muestra en forma esquemática en la figura 1.9.

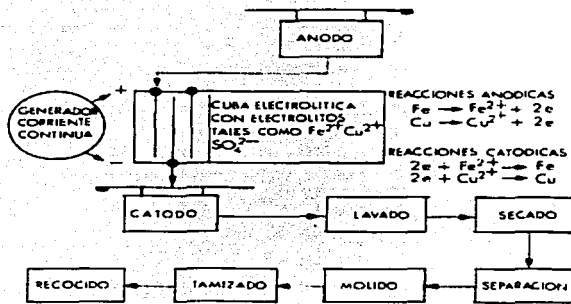


Figura 1.9. Esquema del método electrolítico para obtención de polvos metálicos.

Los polvos de hierro y de cobre pueden fabricarse también por este método. El polvo de hierro electrolítico puede prepararse a partir de una disolución acuosa de sulfatos ferroso y amoníaco, cuyo pH se halla entre 5 y 6, empleando como ánodo un lingote de hierro Armco y como cátodo chapas de acero inoxidable 430. La densidad de corriente es de 250 A m^{-2} y la temperatura de 55°C . Los depósitos catódicos así obtenidos son frágiles debido al hidrógeno adsorbido.

La mayor parte del polvo de cobre empleado en la industria pulvimetalúrgica se obtiene electrolíticamente. Se parte de una solución diluida de sulfato de cobre y se emplea como cátodo una plancha de cobre, aluminio o plomo, sobre la cual se deposita una capa dendrítica; la densidad de corriente debe ser elevada. El depósito se tritura y se recuece en una atmósfera de amoníaco disociado. El control de la temperatura de recocido y las condiciones de trituración permiten preparar el tamaño de polvo deseado.

También se obtienen electrolíticamente polvos de plata, cinc, estaño y antimonio. Asimismo es posible depositar dos metales formando una aleación, como la aleación Ni/Cu en la proporción 75/25 obtenida electrolíticamente.

No obstante, debe tenerse en cuenta que en todos los procesos electrolíticos se requiere un lavado profundo, lo cual encarece el proceso.

1.3.4. La trituración.

La trituración consiste en el desmenuzamiento del metal por medios mecánicos. El método de la trituración sólo puede aplicarse de forma apropiada a la fabricación de polvos de manganeso y cobre, pues los metales dúctiles se aglutinan sobre los martillos o en los dientes de los trituradores. Sin embargo, es importante señalar que es posible fragilizar un metal dúctil, bien mediante el hidrógeno de los depósitos catódicos, bien por aleación, como en los casos del hierro-silicio, hierro-cromo o hierro-aluminio.

Un triturador muy empleado es el triturador Hametag, que se compone de dos hélices opuestas que trituran el polvo suspendido en una corriente de aire. Este es un procedimiento muy caro por el mantenimiento que se tiene que dar al equipo y por este motivo suele emplearse solamente como medio complementario para obtener polvos.

El procedimiento Pyron utiliza como materia prima batiduras de laminados, desputes y chatarra de hierro seleccionada. El material se calcina a 900 °C, se tritura y se separa magnéticamente, reduciéndose finalmente en horno continuo a unos 1000 °C. Se obtiene entonces una esponja que debe ser molida y recocida nuevamente a fin de obtener el polvo.

1.3.5. La pirólisis.

La pirólisis consiste en la descomposición térmica del material de partida: se obtiene un polvo esférico que se purifica eficazmente por formación de compuestos volátiles, como $\text{Fe}(\text{CO})_5$ o $\text{Ni}(\text{CO})_4$. La obtención del polvo de hierro, por ejemplo, se inicia con la trituración del hierro y el tamizado; a continuación, se reduce el hierro con hidrógeno y se lleva a un reactor más frío (150 °C), en el cual se inyecta monóxido de carbono a presión. La reacción que tiene lugar es



El hierro pentacarbonilo es un líquido de color ligeramente amarillo a 103 °C. En el reactor se obtiene en fase vapor, de manera que hay que trasladarlo a un tanque de mayor capacidad para que condense. Entonces se purifica el producto por evaporación del condensado, conduciendo el vapor a un reactor que se halla a 400 °C y a la presión atmosférica.

En estas condiciones, el hierro pentacarbonilo se descompone en monóxido de carbono gaseoso y en hierro, que adopta la forma de diminutas esferas. La eliminación de los últimos vestigios de carbono se efectúa, después de un tamizado, figura 1.10. El producto comercial se presenta empaquetado al vacío o con un gas inerte a fin de prevenir la corrosión.

Un procedimiento muy parecido se aplica a la obtención de polvos de níquel a través de la formación de níquel tetracarbonilo, $Ni(CO)_4$, que hierve a $43\text{ }^{\circ}\text{C}$.

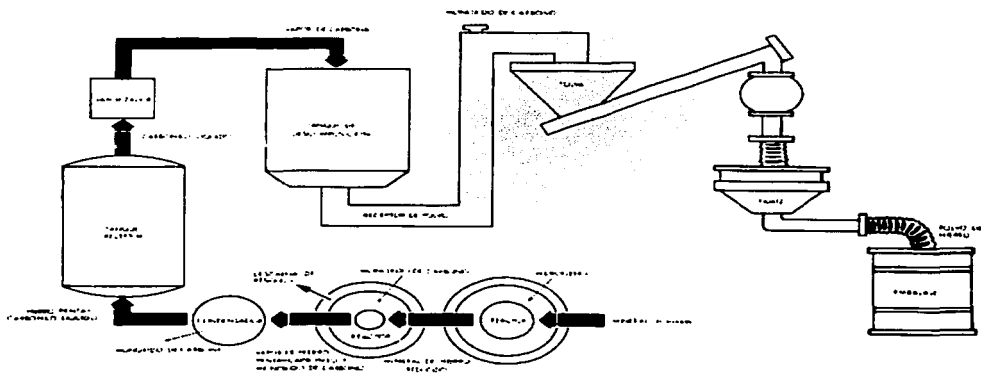


Figura 1 10. Esquema del metodo pirolítico para la obtención de polvos metálicos.

1.3.6. La corrosión.

La preparación de algunos tipos de polvos no esféricos, como los de acero inoxidable que se aplican a la fabricación de piezas sinterizadas de acero al cromo, se realiza aprovechando fenómenos de corrosión; en el caso citado, a partir de chatarra de acero inoxidable. Esta chatarra se calienta a temperaturas de 500-700 °C, a fin de precipitar carburos en los límites de grano, y se la introduce después en un medio corrosivo drástico, como una solución de sulfato de cobre en ácido sulfúrico en ebullición, atacándose así las zonas sensibilizadas del acero inoxidable. La trituración del producto resultante es fácil .

1.3.7. La condensación.

El método de la condensación consiste básicamente en provocar la volatilización o sublimación del metal, a fin de separarlo de sus impurezas y condensarlo a continuación en forma sólida pura. Este método se aplica con mucha frecuencia al cinc, pero ha sido utilizado también para producir polvo de magnesio, de cadmio y de plomo. Las partículas obtenidas por medio de la condensación son de forma esférica y muy finas.

1.3.8. La amalgamación.

Este método se aplica en el caso de que los metales sean susceptibles de sufrir amalgamación, consiguiéndose polvos extremadamente finos. Tras realizar la amalgama, es preciso descomponer térmicamente los compuestos intermetálicos formados y evaporar el mercurio. Se obtienen por ejemplo, polvos de hierro, de granulometría muy pequeña y de gran pureza, así como polvos aleados de hierro-níquel.

1.3.9. La liofilización.

La liofilización es un método de desarrollo muy reciente, con el cual se consiguen polvos aleados muy homogéneos. Consiste, fundamentalmente en la solidificación rápida de una solución líquida de los elementos metálicos, eliminando a continuación el disolvente del sólido obtenido por sublimación, sin que varíe el volumen aparente del sólido, es decir, liofilizándolo. De esta manera las partículas conservan sus formas y dimensiones. Entonces se pulveriza el producto sólido. Las etapas en que suele dividirse este procedimiento son las siguientes:

- 1) Disolución. - Frecuentemente la disolución de sulfatos, nitratos, cloratos, oxalatos, hidróxidos, etc., se realiza en medio acuoso. Es condición necesaria que las sales a las cuales va a aplicarse el tratamiento se descompongan, durante el proceso termoquímico sin llegar a fundirse ni a volatilizarse.
- 2) Solidificación rápida. - Esta etapa debe realizarse lo más rápidamente posible, a fin de evitar la precipitación de algún componente. Por lo tanto, conviene trabajar a composiciones próximas a la del eutéctico. Si se trabaja a pequeña escala, puede enfriarse la solución en un baño de nitrógeno líquido.
- 3) Liofilización. - Se trata de llevar a cabo la sublimación del solvente manteniendo la cámara de liofilización a muy baja temperatura (-70 °C, por ejemplo); es decir, en condiciones a las cuales la presión de vapor del solvente es muy baja. La liofilización debe realizarse en estado sólido a fin de evitar las precipitaciones. La velocidad del proceso de liofilización depende de la presión de vapor del producto, de la temperatura y composición del sólido, del estado de división y de la superficie de cambio con la atmósfera, factores todos ellos que deben tenerse en cuenta.

1.3.10. La precipitación.

Los metales que ocupan las posiciones inferiores de las series de fuerzas electromotrices de los metales frente a sus iones, precipitan a partir de sus soluciones cuando coexisten en equilibrio con metales más activos. El cloruro de titanio, cuyo punto de fusión es de -30 °C, por ejemplo, da lugar, frente al magnesio, a un precipitado de titanio. Por lo tanto, esta propiedad puede servir de fundamento para obtener polvo metálico por precipitación de una sal metálica haciendo intervenir en el proceso un metal activo.

1.3.11. A partir de chatarras.

Un ejemplo de precipitación que cada día tiene mayor interés es la obtención de polvos de hierro a partir de las soluciones procedentes de la lixiviación de chatarras.

La obtención de polvos a partir de chatarras puede realizarse según varios procedimientos. Básicamente el método consiste en llevar a cabo un ataque de la chatarra mediante ácido clorhídrico, filtrar a continuación para eliminar los residuos sólidos, evaporar la solución y realizar una cristalización, separando los cristales por centrifugación. Después se secan, obteniéndose polvo de cloruro ferroso hidratado, que debe ser compactado antes de reducirlo con hidrógeno caliente. Se forma entonces una torta que hay que moler.

CAPITULO 2.- TRATAMIENTOS DE LOS POLVOS.

2.1. GENERAL.

La manipulación de los polvos, una vez estos se han obtenidos, está encaminada a facilitar las etapas de la compactación y de la sinterización y a mejorar las propiedades del componente acabado. No hay que olvidar que los polvos tienen una naturaleza metálica y que es fácil que reaccionen con el medio ambiente a través de su superficie. No es casualidad el hecho de que los metales se encuentren en la naturaleza en forma de compuestos. Es una exigencia termodinámica, pues en este estado la entalpía libre es menor. Por otra parte es preciso tener en cuenta que debido a la viscosidad de la masa de polvos, ésta no cumple con el principio de Pascal propio de los fluidos.

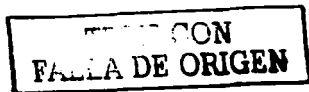
Debido a la gran afinidad metal-oxígeno, al trabajar con polvos metálicos es preciso tomar una serie de precauciones destinadas a evitar la oxidación, como son: el embalaje en recipientes herméticos, cerrados al vacío o con gas inerte; el almacenaje en locales climatizados con humedad controlada, etc.

Los polvos, antes de compactarlos se tratan química, mecánica o térmicamente, según los casos, en las operaciones de purificación, recubrimiento, densificado, mezclado y recocido.

2.2. DENSIFICADO.

Cuando interesa conseguir polvos más densos que los obtenidos por los métodos apuntados en el capítulo anterior, o cuando en la masa de polvos se ha formado agregados voluminosos de partículas, los polvos se someten a un proceso de molido. El efecto mecánico de las bolas o rodillos es un redondeo de las partículas y un aumento de la acritud. Debido a que se consigue una mayor compresibilidad con polvos esféricos no porosos, interesa, en algunos casos, el redondeo de estos para el prensado, y más aún para la sinterización. No obstante, en los polvos es más común la operación de recocido que la introducción de acritud.

El prensado también es un método empleado para densificar. Se ha observado que los componentes que salen defectuosos del prensado y se desmenuzan y vuelven a pensar, necesitan menor tiempo de molido que los polvos recién obtenidos, para el mismo grado de densificado.



2.3. RECOCIDO

El recocido es un tratamiento térmico encaminado a eliminar la acritud introducida en el polvo. Como suele realizarse en atmósfera reductora, también actúa como desoxidante. La temperatura de trabajo es función de la naturaleza del polvo y de la finalidad perseguida en la operación. Se acostumbra distinguir en el recocido cuatro etapas: la recuperación, la poligonización, la recristalización y el crecimiento de grano. Se realizan todas ellas o sólo una parte, según el fin propuesto.

Los polvos metálicos se someten al recocido a fin de aumentar su plasticidad eliminando la acritud, lo que se consigue llegando hasta la etapa de recristalización. Así con igual presión de compactación se conseguirá mayor área de contacto lo cual facilita el sinterizado. En el caso de polvo de hierro el recocido se realiza, fundamentalmente, en dos ocasiones. Una de ellas tiene lugar al mezclarlo con polvo de acero inoxidable, de ferrosilicio, o de ferromanganeso, ya que si tuviera óxidos, el oxígeno se combinaría con los aleantes que tienen mayor afinidad por él que el hierro. La otra se lleva a cabo cuando se hace la aleación con polvo elemental de cobre, ya que en este estado se reduce el aumento dimensional.

Generalmente, después de recocer los polvos aparecen masas débilmente compactadas que deben desmenuzarse.

2.4. ALEACION.

Las aleaciones suelen tener propiedades distintas que los metales elementales y por este motivo se fabrican componentes aleados. Cuando interesa conseguirlos pulvimetalúrgicamente, se opera de tres maneras:

- 1) Mezclando los polvos elementales.
- 2) Utilizando polvos semialeados.
- 3) Empleando polvos atomizados de un lingote de aleación.

El último caso corresponde al método de atomizado ya estudiado. Tiene la ventaja de ser el procedimiento que logra una distribución más homogénea de la aleación, pero resultan unos polvos endurecidos y de elevado costo y las pérdidas de material son considerables.

Cuando se opera con polvos elementales normalmente se consigue una elevada solidificación, sobre todo si son de procedencia electrolítica; pero los fenómenos de difusión necesarios para lograr la aleación homogénea suelen ser deficientes.

Los polvos semialeados, entendiéndolo por tales los conseguidos después de permanecer la mezcla de polvos elementales cierto tiempo a la temperatura de trabajo en el horno de sinterizar, conservan, en parte, las ventajas de los polvos elementales y adquieren alguna de los polvos atomizados. Es éste, por lo tanto, un procedimiento muy importante para sinterizar aceros al níquel y al molibdeno.

La microestructura de las piezas obtenidas a partir de polvos semialeados aparece con mejor distribución de aleantes que la de las obtenidas con mezcla de polvos elementales. Es decir, las propiedades mecánicas más elevadas se obtienen partiendo de polvos aleados y semialeados. Como ejemplo, en la figura 2.1, se aprecia un polvo de hierro recubierto parcialmente por una capa de molibdeno.

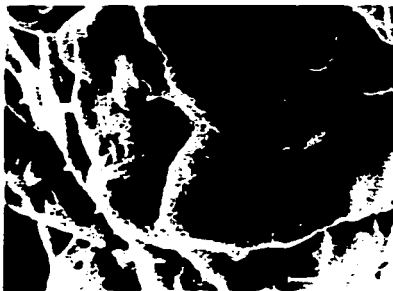


Figura 2 1 Polvo de hierro recubierto parcialmente por una capa de molibdeno.

2.5. EL RECUBRIMIENTO.

Se facilita el sinterizado si se consigue el máximo contacto entre polvos de distinta naturaleza. Este máximo contacto se logra cuando un tipo de polvo recubre enteramente al polvo de naturaleza distinta. Es la mezcla más perfecta y en ello consiste el recubrimiento.

El recubrimiento puede llevarse a cabo mecánica, química y electroquímicamente. El recubrimiento mecánico exige como condición necesaria que los componentes de la mezcla posean una plasticidad muy distinta, pues el más blando recubre al duro. Un buen ejemplo lo constituye el wolframio cobreado obtenido a base de mezclar ambos polvos durante cierto tiempo en un molino de bolas.

Para conseguir el recubrimiento químico se aprovecha la tendencia a la precipitación propia de los iones metálicos más nobles en contacto con metales más activos. Por ejemplo, al sinterizar hierro mezclado con cobre se puede aprovechar la mayor plasticidad del cobre efectuando el recubrimiento por inmersión del polvo de hierro en una solución de sal de cobre. El hierro tiende a pasar a la solución y el cobre a depositarse encima del hierro, según las reacciones:



El equilibrio está desplazado en el sentido de la formación de iones ferrosos y cobre metálico. Otros ejemplos de recubrimiento químico son el cobreado de plomo y el niquelado de hierro. En el primer caso, mezclando acetato de plomo y acetato de cobre en ácido acético se deposita plomo recubierto de cobre. En el niquelado químico del hierro o niquelado Kaningen se sumerge el polvo de hierro en un baño electrolítico y se mantiene a 90 °C durante unas horas. La composición del baño es 30 g/l de cloruro de níquel, 10 g/l de hipofosfito, 50 g/l de cloruro amónico, 10 g/l de citrato sódico y amoniaco hasta un pH = 8,9.

El recubrimiento electroquímico necesita el concurso de la corriente eléctrica. El metal que debe actuar de recubridor se conecta al ánodo de una cuba electrolítica con solución iónica de la misma naturaleza. La masa de polvos a recubrir se conecta al cátodo.

2.6. LA MEZCLA.

El recubrimiento de polvos es el sistema más perfecto para mezclar dos metales. No obstante, muchas veces no hace falta tanta perfección y el mezclado mecánico es suficiente para poner en contacto íntimo polvos de distinta naturaleza y lubricante.

Los elementos que con más frecuencia se suelen añadir al polvo de hierro son: el grafito para formar acero; el cobre para endurecer el hierro y el acero; el fósforo para endurecer o, en ciertas proporciones, para fragilizar al acero y aumentar la tensión superficial; el azufre para facilitar el mecanizado formando sulfuro de hierro; el níquel para endurecer al hierro y acero; el trióxido de wolframio para reducir los cambios dimensionales que tienen lugar en la sinterización de las mezclas hierro-cobre.

2.7. LA LUBRICACION.

El componente más importante en la mezcla de polvos es el lubricante, cuya finalidad es incrementar la fluidez del sistema para que la densidad del componente acabado sea elevada y homogénea.

Representando gráficamente la densidad en verde (que poco varía con la sinterización) y la presión de expulsión del compacto de la matriz en función del porcentaje de estearato de cinc, para hierro reducido, se observa la existencia de un valor mínimo de densidad en verde, como aparece en la figura 2.2. En cambio, la presión de expulsión tiende asintóticamente a un mínimo localizado para un porcentaje (3 %) del estearato. En la práctica se suele trabajar con contenidos de estearato de cinc del orden del 0,8 a 1 por ciento en peso.

La masa de polvo, debido a la fricción, no cumple el principio de Pascal, pero añadiendo lubricante se reduce la fricción entre las paredes de la matriz y el punzón, entre las partículas de polvo, entre las partículas y las paredes, entre las partículas durante la deformación y entre el compacto y las paredes de la matriz.

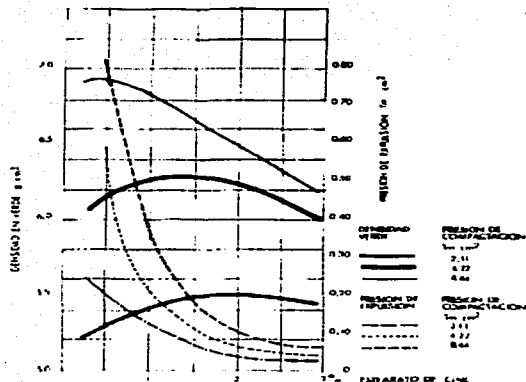


Figura 2.2. Representación de la densidad y de la presión de expulsión del compacto (polvo de hierro reducido, pH0.20%, C=0.01 % y densidad aparente = 2.45 g/cm³) de la matriz en función de la densidad del mismo.

Estas fricciones son las causantes de la distribución y pérdidas de presión que se originan en la compactación. En la práctica, la pérdida de presión mencionada se determina midiendo la presión aplicada (PA) y la presión transmitida (PT), en la figura 2.3, se muestra el aparato utilizado para medir la presión aplicada. Por consiguiente se define la fricción por el factor K, cociente entre la presión transmitida y la presión aplicada

$$K = P_T / P_A$$

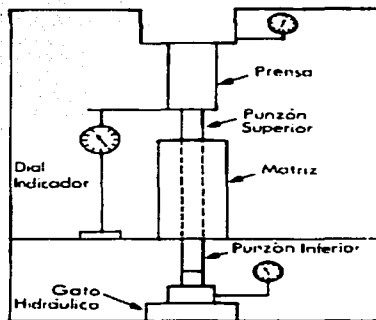


Figura 2.3. Esquema del aparato para determinar la presión aplicada y la presión transmitida.

En la práctica éste es el dato más utilizado para expresar la fricción, cuya cuantía interesa conocer ya que afecta a la densidad y al gradiente de densidad en el compacto, a la resistencia del compacto, a la eliminación del compacto de la matriz y al desgaste de la matriz.

Es decir, la fricción afecta a la calidad de la pieza acabada y el tiempo de vida útil. Por otra parte, la fricción depende de la relación entre la pared axial de la matriz y la pared radial del punzón, del tamaño de la pieza a obtener o de la cantidad de polvo que lleva la matriz, de la presión ejercida y de la naturaleza del lubricante y molde.

Las variables que hay que tener en cuenta al escoger los lubricantes, además de su naturaleza, son las siguientes:

- 1) El punto de fusión. Que depende de la naturaleza del lubricante, debe ser lo suficientemente alto para que el lubricante no funda por el calor generado durante la mezcla, ya que se producirían terrones. Por otro lado, debe ser lo bastante bajo para que éste pueda ser eliminado en el horno de sinterizado antes de que tengan lugar los fenómenos de soldadura de los polvos.
- 2) La densidad. Para un mismo lubricante, la densidad depende del método de obtención. Por ejemplo, el estearato de cinc se puede obtener por precipitado o por fusión. Por precipitación se obtiene mezclando estearato sódico (ácido esteárico e hidróxido sódico) con una sal de cinc. El precipitado se filtra, seca y muele. El otro procedimiento de obtención del estearato de cinc consiste en hacer reaccionar el óxido de cinc con ácido esteárico fundidos, formándose una torta de estearato de cinc, que por trituración da lugar a un polvo de mayor densidad y mayor tamaño de partícula que el descrito anteriormente.

Ahora bien, representando la velocidad de derrame de una mezcla de polvo de hierro reducido y 1,0 % de estearato de cinc, con 0 % y 1 % de grafito, se aprecia (figura 2.4) un aumento en la facilidad de derrame conforme aumenta la densidad aparente del polvo. Es decir, dadas dos mezclas de polvos de la misma densidad, a una de las cuales se le haya añadido grafito, la mezcla carente de grafito presentará mayor velocidad de derrame.

También se observa, al estudiar la velocidad de derrame del estearato de cinc en función del tamaño de la partícula, como se representa en la figura 2.5, un aumento en la velocidad al incrementar dicho tamaño. Por otra parte, si se representa gráficamente la presión de expulsión del compacto en función de la densidad aparente de la mezcla, para la misma cantidad de estearato de cinc y diferentes presiones de compactación del polvo de hierro reducido, se aprecia mayor facilidad de expulsión para una densidad aparente del polvo mayor, como puede observarse en la figura. 2.6. A su vez, la densidad aparente de una mezcla de composición constante depende del tiempo de mezclado y del tiempo transcurrido entre la mezcla y la compactación.

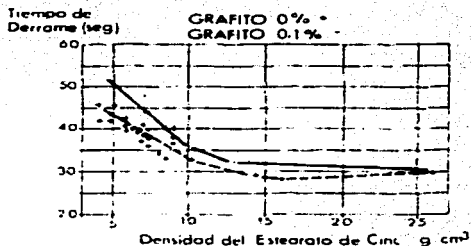


Figura 2.4. Velocidad de derrame de una mezcla de polvo de hierro reducido ($pH_2 = 0.20\%$, $C = 0.010\%$ y densidad aparente 2.45 g/cm^3) y 1% de estearato de zinc en función de la densidad del estearato, con y sin grafito.

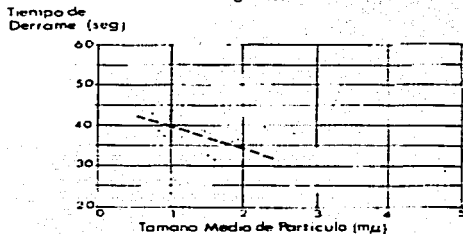


Figura 2.5. Velocidad de derrame de una mezcla de polvo de hierro reducido ($Fe=98\%$, $C=0.03\%$, $O_2=0.30\%$, $SiO_2=0.10\%$, $Mn=0.05\%$) y 1% de estearato de zinc en función del tamaño medio de las partículas de estearato.

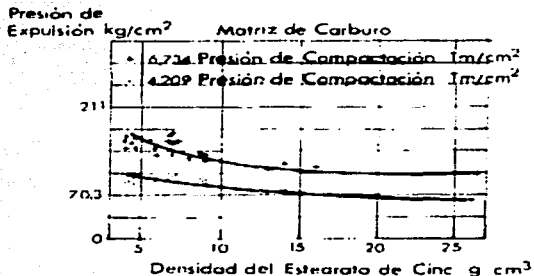


Figura 2.6. Presión de expulsión del compacto de la matriz en función de la presión de compactación aplicada y de la densidad del estearato de zinc utilizado.

La operación de mezcla se lleva a término con mezcladores en forma de doble cono o de V. Los tiempos de mezclado suelen ser del orden de una hora para los polvos de hierro y estearato y del orden de un día para la mezcla de carburo de tungsteno con cobalto, parafina y acetona.

Si la mezcla se realiza en fase líquida, se separa el solvente por volatilización o mediante separadores que proyectan la mezcla en una especie de embudo invertido y por diferencias de densidad separan el solvente.

Es necesario señalar que el empleo de lubricante presenta ciertas desventajas. En efecto, hay un aumento de los costos debido a su adición al proceso; por otra parte, si se adiciona en solución, es preciso eliminar el solvente, con el consiguiente encarecimiento del proceso. En cuanto a la cantidad de lubricante, es mayor la que se necesita si se mezcla con el polvo que si se aplica a las paredes, pero en el primer caso el procedimiento es más eficaz. Se ha observado que ordinariamente el lubricante reduce la velocidad de derrame del polvo y dificulta la alimentación y el llenado del molde, que la película de lubricante tiende a reducir el contacto metal-metal, dificultando la soldadura en frío, y que la eliminación del lubricante en la etapa de sinterizado puede contaminar la atmósfera del horno, siendo todos ellos inconvenientes importantes del uso de lubricantes en el tratamiento de los polvos.

Finalmente debe añadirse que existe la posibilidad de que el lubricante reaccione con el metal, modificando las propiedades de la pieza sinterizada.

Si bien es verdad que se intenta eliminar el empleo de lubricantes por las dificultades apuntadas, no es menos cierto que en la práctica industrial pulvimetalúrgica continúan aplicándose con gran profusión. El más utilizado es el estearato de cinc en las proporciones de 0,8 a 1,0 por ciento en peso.

CAPITULO 3.- EL PROCESO DE COMPACTACIÓN.

3.1. CONCEPTO DE COMPACTACIÓN.

La compactación es una etapa de la pulvimetalurgia que tiene por objeto dar forma y consistencia a la masa de polvo para su manipulación, con cuidado, desde su expulsión de la matriz hasta el paso por el horno de sinterización. En esencia consiste en aplicar una presión suficiente a la masa de polvo (previamente tratada según aconseje la naturaleza de la misma y las propiedades a conseguir) colocada en una matriz que es el negativo de la forma acabada.

En la compactación se aplica alta presión a los polvos para darles la forma requerida. El método convencional de compactación es el *pressado*, en el cual punzones opuestos aprietan el polvo contenido en un dado.

Los pasos en el ciclo de pressado se muestran en la figura 3.1. A la parte después de pressado se le llama compacto verde, el término verde significa que la parte no está completamente procesada. Como resultado del pressado, la densidad de la parte, llamada densidad verde, es mucho más grande que la densidad volumétrica inicial. La resistencia verde de la parte cuando es pressada es adecuada para el manejo, pero mucho menor que la que se logra después del sinterizado.

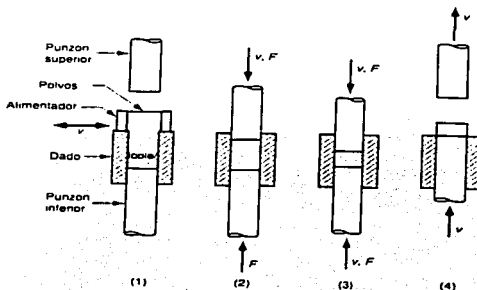


Figura 3.1 Pressado, método convencional de compactación de polvos metálicos en metalurgia de polvos: 1) llenado de la cavidad por alimentación automática, 2) posición final, 3) final de los punzones durante la compactación y 4) remoción de la parte

La presión que se aplica en la compactación produce inicialmente un reempacado de los polvos en un arreglo más eficiente, elimina los puentes que se forman durante el llenado, reduce el espacio de los poros e incrementa el número de puntos de contacto entre las partículas. Al incrementarse la presión, las partículas se deforman plásticamente, ocasionando que el área de contacto entre partículas aumente y entren en contacto partículas adicionales. Esto viene acompañado de una reducción del volumen de los poros. La progresión se ilustra en la figura 3.2 para partículas iniciales de forma esférica. También se muestra la densidad asociada, representada para las tres vistas como función de la presión aplicada.

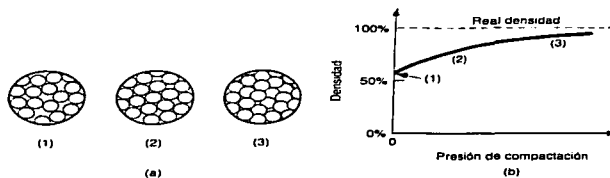


Figura 3.2. a) efecto de la presión aplicada durante la compactación: 1) polvos sueltos iniciales después del llenado, 2) reempacado y 3) deformación de las partículas; y b) densidad de los polvos en función de la presión. La secuencia corresponde a los pasos 1), 2) y 3)

El comportamiento de una masa de polvo al aumentar la presión se traduce en un aumento en la densidad. En la figura 3.3, se representa la densidad frente a la presión para un tipo comercial de polvo de hierro reducido. En (a) la matriz está llena de polvo de densidad $2,4 \text{ g/cm}^3$. En (b) ambos punzones se han desplazado una corta distancia en cada extremo, el polvo se ha compactado ligeramente ($0,1 \text{ Tm/cm}^2$) y la densidad ha llegado a $2,9 \text{ g/cm}^3$.

Todavía no tienen lugar fenómenos de deformación de las partículas individuales y no aparecen fuerzas de adhesión entre ellas. Al aumentar la presión tiene lugar la deformación plástica, según el tipo de polvo. La adhesión suficiente para este tipo de polvo se consigue con una densidad de $3,2 \text{ g/cm}^3$, que requiere una presión de $0,16 \text{ Tm/cm}^2$. En (c) la presión de compactación es $1,2 \text{ Tm/cm}^2$, lo que se traduce en una densidad de $4,8 \text{ g/cm}^3$, doble que la del polvo. En (d) se ha aplicado una presión de $3,3 \text{ Tm/cm}^2$ y se ha conseguido una densidad de $6,0 \text{ g/cm}^3$, y en (e) la razón de compresión o relación entre la densidad en verde y la densidad del polvo es de 3.

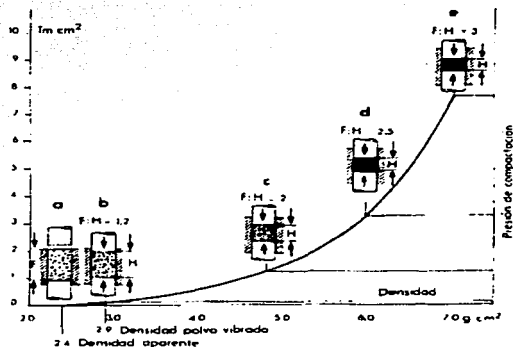


Figura 3.3 Curva de compresibilidad (densidad vs presión) para polvo de hierro reducido ($PH_2 = 0.20\%$, $C = 0.01\%$ y velocidad de derrame = 31 seg/50 g)

Señalemos que en la fabricación de bronce autolubrificantes se llega a una razón de compresión inferior de 2.5. La mínima densidad a que se compactan las piezas de hierro para fines prácticos de aplicación es de 5.5 g/cm^3 .

Otras curvas de interés práctico utilizadas para describir la compresibilidad de los polvos son: la curva de porcentaje de la porosidad del polvo metálico compactado en función de la presión de compresión (figura 3.4.), la curva de razón de la compresión en función de la presión (figura 3.5) y la curva de porcentaje del movimiento del punzón (hasta que alcance la densidad de 7.2 g/cm^3 que es la densidad en verde máxima de este tipo de polvo de hierro reducido) en función de la presión de compactación.

El valor de la densidad en verde es de gran importancia para predecir las características mecánicas de la pieza acabada, ya que en la etapa de la sinterización dicha densidad apenas varía. Por este motivo suele ser objeto de control rutinario en las industrias de la especialidad.

TRABAJO CON
FALLA DE ORIGEN

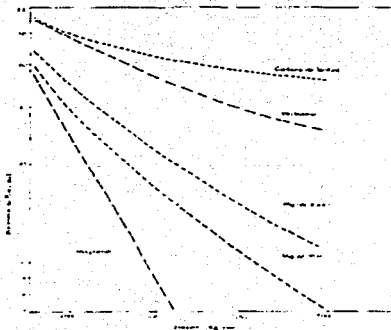


Figura 3.4. Curvas de compresión (porcentaje de porosidad vs presión) de varios tipos metálicos: elementales, compuestos y mezclas

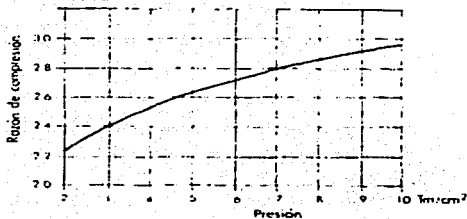


Figura 3.5. Relación de compresión del polvo de hierro reducido ($pH_2 = 0.20\%$, $C = 0.01\%$ y velocidad de derrame = 31 seg/50g en función de la presión de compactación)

3.2. FASES DE LA COMPACTACIÓN.

En la compactación se distinguen claramente tres fases: el llenado del molde, la compresión y la expulsión. En la fase de llenado, la cavidad de la matriz, que es el negativo de la pieza acabada, se llena de polvo previamente mezclado. La cantidad de polvo se determina por volumen o por peso. En el primer caso se trata de llenar la cavidad hasta que rebosa y se enrasa entonces a nivel con la cara inferior de la matriz. Esta operación suele efectuarse automáticamente por medio de una tolva de alimentación de forma cónica conectada a un tubo vertical terminado en una zapata giratoria; al principio de cada ciclo de compresión, el dispositivo de alimentación se coloca sobre la cavidad de la matriz para permitir la entrada del polvo a la misma, lo que se realiza moviendo hacia atrás y adelante la zapata de alimentación. La rotación de la zapata de alimentación detiene la salida del polvo y a su vez el borde inferior elimina el polvo en exceso enrasando la cavidad. Luego, el dispositivo se separa de la matriz para dejar actuar los punzones superior e inferior que comprimen la masa de polvos y dejan el compacto encima de la mesa de la matriz. Después, el dispositivo de alimentación vuelve a la posición de llenado, expulsando el compacto de la mesa de la matriz.

También se puede llenar la matriz con un peso fijo de polvo. En este caso se acopla al sistema de alimentación un dispositivo de pesada automática.

En la segunda fase, la presión se ejerce con prensas mecánicas o hidráulicas. Las segundas suelen ser de mayor potencia, aunque más lentas (dos piezas/minuto) que las primeras (30 piezas/minuto). La presión se transmite a la masa de polvos de cuatro maneras distintas (figura 3.6.):

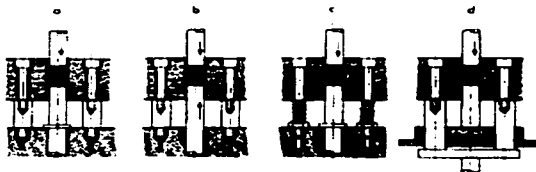


Figura 3.6 Distintos procedimientos de transmisión de la presión a la matriz:

- presión aplicada por un solo lado
- Presión aplicada simultáneamente por los dos lados
- Matriz flotante
- Presión aplicada por la matriz y por el punzón superior

- a) Presión aplicada por un solo lado. La presión de compactación sólo se aplica a la masa de polvos por el punzón inferior. La distribución de la densidad en el compacto no es homogénea, debido a que la masa de polvos no cumple las propiedades hidrodinámicas (principio de Pascal), como se aprecia en la figura 3.7.
- b) Presión aplicada simultáneamente por los dos extremos. La matriz está equipada con dos punzones móviles, uno inferior y otro superior. Se consigue una densidad más homogénea que en el caso anterior. Éste es el método ideal, pero en la práctica es el más difícil de conseguir.
- c) Matriz flotante. En este caso la matriz está unida a la base por un muelle. La presión se aplica por el punzón superior de manera que la fuerza de fricción de la masa de polvo con las paredes de la matriz obligan al desplazamiento de ésta hacia abajo. El efecto resultante es parecido al del caso anterior, en el que dos punzones actuaban simultáneamente por los dos extremos.
- d) Presión aplicada por la matriz y por el punzón superior. La presión se aplica simultáneamente, en el mismo sentido, pero con distinta velocidad, al punzón y a la matriz, de manera que una vez finalizada la carrera deja al descubierto el compacto. La expulsión del compacto, sea presionando con el punzón inferior o por desplazamiento de la matriz, es la última fase de la compactación.

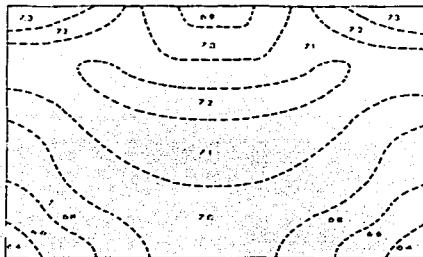


Figura 3.7. Distribución de la densidad en verde en un compacto de polvo de níquel compactado aplicando 7.2 Tm/cm² por un solo lado de la matriz cilíndrica de 2 cm de diámetro y 1.7 cm de largo.

3.3. Las matrices.

La producción pulvimetalúrgica se desarrolla en base a las grandes series. Para ello necesita de matrices fáciles de fabricar y de gran resistencia al desgaste. La primera condición es difícil de conseguir, pero no la segunda. Las matrices se fabrican fundamentalmente de aceros indeformables y de carburos cementados. El elevado precio del equipo incide de forma singular en el costo de las piezas pulvimetalúrgicas.

La operación más laboriosa en la fabricación de matrices es el desbaste y pulido de las mismas. La pulvimetalurgia tiene a gala el ser la técnica que ofrece el mejor control dimensional. Por este motivo el equipo destinado al compactado y calibrado deben tener gran precisión, con tolerancias muy limitadas. Esta precisión de la matriz se consigue en el pulido de la misma.

El primer problema que se plantea en la fabricación de matrices es la elección del material. La matriz tiene distintos componentes que desempeñan distinta función y, por lo tanto, las propiedades son diferentes. Es necesario considerar cuidadosamente la función a desempeñar por la matriz y por cada uno de los componentes antes de diseñarla. Si interesa que la tenacidad sea la principal propiedad del componente de la matriz, ésta se construirá de acero aleado; si, por el contrario, interesa un componente duro y barato, se escogerá un acero al carbono para construirla. Por otra parte la resistencia al desgaste y la precisión dimensional que se consigue con los carburos cementados no tiene competencia posible, aunque éstos resultan mucho más caros que las otras aleaciones. Las propiedades de una misma pieza de la matriz muchas veces son distintas a lo largo de la misma pieza, aumentando la dureza donde hay rozamiento y aumentando la tenacidad en su núcleo. Estas variaciones de las propiedades de los componentes de la matriz pueden obtenerse aplicando convenientemente los conocimientos existentes sobre los tratamientos térmicos de los metales empleados.

Algunas veces, para compactar polvos de hierro; se emplean punzones con cabeza de bronce. La gran ventaja del empleo del bronce, aparte de la facilidad del mecanizado, radica en la eliminación del riesgo de magnetización del punzón y consiguiente atracción del polvo en su movimiento descendente. Este defecto se agudiza al compactar polvos de hierro y cobre enriqueciendo en hierro las zonas más cercanas al punzón magnetizado. Dicho problema no existe en el calibrado.

En matricería el bronce tiene aplicación en fase experimental, antes de proceder a la fabricación de una matriz más cara de carburos cementados. A veces se construyen de bronce para saber exactamente las dimensiones que deben tener cuando se desconocen los cambios dimensionados de la mezcla de polvos.

3.3.1 Fabricación de matrices.

La fabricación de matrices con finalidades pulvimetalúrgicas comprende tres etapas: el hechurado, los tratamientos térmicos y los acabados. Los procesos a seguir en cada etapa dependen del material escogido y de la finalidad perseguida.

3.3.2. El hechurado.

La conformación de la matriz, o en caso de tratarse de matrices complejas de sus componentes, se realiza de acuerdo con la naturaleza de los mismos. Si se trata de acero al carbono o, lo que es más probable, de acero aleado, se deforma en caliente (forja) o se aplica deformación en frío y decoletaje después de haber realizado un tratamiento térmico de recocido. Las piezas de metal duro se hechuran después de presinterizar y se ajustan, después de la sinterización, por electroerosión, lo cual consiste en conectar dentro de un baño conductor la pieza con el ánodo de una batería y situarla frente a un negativo de grafito o cobre conectado al cátodo. En las zonas en las cuales la densidad de corriente sea mayor, habrá mayor velocidad de disolución de la matriz.

El diseño de las posibles piezas a fabricar por el procedimiento pulvimetalúrgico está condicionado por una serie de servidumbres propias de la técnica pulvimetalúrgica, como se observa en la figura 3.8. Las formas prohibidas o difíciles de fabricar suelen figurar en los catálogos que las empresas del ramo distribuyen a sus clientes

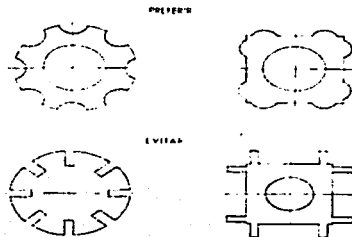


Figura 3.8 Diseños no recomendables (entrantes y salientes muy agudos) y diseños preferidos de piezas a obtener por medio de la metalurgia de polvos.

3.4. Tratamientos térmicos.

El primer tratamiento térmico a aplicar en matricería es el recocido que precede al hechurado y tiene por objeto ablandar el material. Se consigue calentando la pieza para situarla dentro del diagrama de equilibrio, en el campo austenítico, y luego enfriándola dentro del horno (recocido total), al aire (normalizado), o enfriándola alternativamente (globulizado). También se aplica, en algunos casos, el recocido de eliminación de tensiones, que se realiza calentando hasta la parte superior de la zona perlítica.

El endurecimiento, una vez finalizada la operación de conformación de la pieza, se consigue por:

- a) Transformación martensítica. El endurecimiento martensítico se obtiene enfriando rápidamente desde la zona austenítica (temple) o transformando isotérmicamente, procesos conocidos como martempering y austempering, que dan lugar a microestructuras martensítica y bainítica, respectivamente.
- b) Nitruración. La nitruración se consigue a base de calentar el acero a 550 °C durante unas 70 horas en presencia de NH_3 , produciéndose un endurecimiento superficial por formarse los nitruros de los elementos aleantes (Al, Cr, Mo, V).
- c) Cromado. Se deposita electrolíticamente una capa de cromo directamente sobre el acero. La dificultad de este procedimiento de endurecimiento superficial reside en la relativamente débil adherencia del cromo con el acero para soportar las grandes presiones a que están sometidas las matrices durante el servicio.
- d) Deposición en fase vapor. El tetrafluoruro de titanio se produce en atmósfera de hidrógeno y metano; en contacto con la superficie del acero se deposita sobre la misma formando carburos de titanio. En la superficie se alcanzan durezas de 1800 a 2000 HV y la resistencia al desgaste es elevada.
- e) Metalizado. El metalizado se realiza depositando en la superficie de la matriz carburo de tungsteno (wolframio) líquido obtenido con una pistola de soldar, con lo cual se consigue que la varilla del material elegido pase a través de un arco eléctrico que alcanza temperaturas suficientes para fundir. Un chorro de aire proyecta el líquido recién formado sobre la superficie a metalizar.

3.6. METODOS DE COMPACTACIÓN.

Los métodos de compactación que trataremos con mayor detalle a continuación, indicando en qué condiciones se aplican, son los siguientes: la compactación cíclica, la compactación por vibración, la compactación explosiva. La compactación en caliente, el sinterizado por chispa (spark sintering), el método de la presión isostática y la laminación de polvos.

3.6.1. Compactación cíclica.

La fabricación directa de chapas, redondos y alambres a partir de polvos por compactación cíclica tiene aplicación para los metales que se obtienen corrientemente en forma de polvo: níquel y titanio. Así se evita la fusión y el moldeo de los mismos.

La técnica de la compactación cíclica posibilita la obtención de redondos y alambre a partir de polvos metálicos según un sistema desarrollado por la Westinghouse Electric Co. El dispositivo empleado consiste en un canal en forma de U que contiene el polvo y la presión se aplica de modo discontinuo (cíclico) mediante un punzón llamado suela (ver figura 3.10). Así se produce un desbaste de sección rectangular cuya altura viene limitada por la fricción de la pared y la anchura por la capacidad de la prensa.

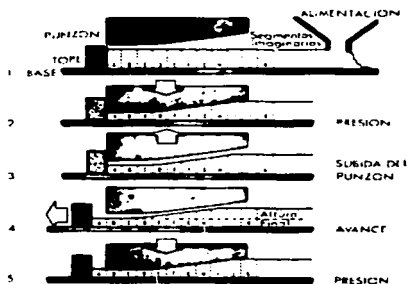


Figura 3.10 Compactación cíclica

3.6.2. Compactación por vibración.

La introducción de la vibración en la etapa de la compactación de los polvos metálicos reduce considerablemente la presión necesaria para obtener piezas de una determinada densidad. Se emplea en este caso tanto la baja frecuencia y alta amplitud, como la baja amplitud y alta frecuencia.

La ventaja inherente a la reducción de presión es el incremento de la vida de las matrices ya que se reducen las sobre-expansiones de las mismas, se eliminan las tensiones internas y se reduce el riesgo de rotura de piezas en el desmoldeo o durante la sinterización. Mediante la compactación por vibración se pueden conseguir piezas de diseño más complicado que las obtenidas por el método convencional y de mayor tamaño, aunque la velocidad de obtención es algo menor.

3.6.3. Compactación explosiva.

La presión en este método se produce por explosión y se transmite a la masa de polvos por medio de un líquido, generalmente el agua. La compactación explosiva es una técnica adecuada para obtener chapas metálicas, que necesitan altas presiones y gran velocidad, y esto sólo se logra con el empleo de explosivos.

3.6.4. Compactación en caliente.

La compactación a temperatura ambiente, que es el método convencional, limita la densificación de los polvos debido a la acritud que el trabajo en frío introduce en los mismos. Este inconveniente se elimina compactando en una matriz que se calienta a temperaturas cercanas a la de recristalización de los polvos metálicos. Por otra parte, en caliente se pueden densificar polvos que a temperatura ambiente no tienen o tienen poca plasticidad. Este método ha sido empleado para compactar piezas de diamante y algunos carburos cementados.

Las principales desventajas de la compactación en caliente son:

- 1) La facilidad de oxidación del polvo, lo que se previene, en parte, empleando una atmósfera controlada hasta que la pieza esté a temperatura ambiente
- 2) el control dimensional es difícil dada la expansión térmica del metal, y
- 3) la velocidad de compactación es muy lenta.

La naturaleza de la matriz depende de la temperatura de compactación. Hasta los 500 °C se emplean matrices de acero rápido, pero por encima de esta temperatura se necesitan superaleaciones base níquel o cobalto, como la stelita y nimonic.

y Ni 76 %). Por encima de 1000 °C se emplea el grafito, óxidos, nitruros y boruros. En estas condiciones, el grafito es el metal más empleado hasta llegar a 3000 °C. Para que no se sude se pinta con nitruro de boro y la presión de trabajo está limitada a 4,32 Tm/cm².

También se emplea la compactación por laminación en caliente del polvo y la presión isostática en caliente.

3.6.5. Sinterizado por chispa (Spark sintering).

Este método de compactación, económicamente competitivo, combina la presión con aplicación de corriente continua y alterna. Normalmente se emplea 25 por ciento de corriente alterna y 75 por ciento de corriente continua. La finalidad de la aplicación de electricidad es doble. Por una parte produce un calentamiento por efecto Joule en los contactos entre partículas y por otra elimina las cargas eléctricas de la superficie de los polvos.

3.6.6. La presión isostática.

La presión isostática es una técnica que permite compactar uniformemente y en todas direcciones materiales pulverulentos (cerámicos, metálicos o sintéticos). Así se puede obtener una pieza compactada en verde de mayor densidad y más homogénea que con las otras técnicas gracias a la eliminación de fricciones entre el polvo y las paredes de la matriz. Este método se llama también de la presión hidrostática porque emplea generalmente agua como fluido. El procedimiento es como sigue:

El polvo a prensar se coloca en un molde de plástico de material sintético, que se introduce en el interior de la cámara de presión. El molde y la cámara se cierran herméticamente, comprimiendo el polvo, y se aumenta progresivamente la presión hidráulica hasta un valor prefijado. El desmoldeo se logra fácilmente.

La principal desventaja es la tolerancia dimensional, ya que las paredes del material sintético no calibran bien. Este inconveniente se reduce, en parte, adicionando un tubo metálico poroso como soporte exterior.

3.6.7. La laminación de los polvos.

El método de compactación por laminación de polvos consiste en forzar los polvos a pasar a través de dos cilindros que les aplican cierta presión. El sistema de alimentación está constituido por un tubo dentro del cual gira un cilindro con acanaladuras en espiral, que empuja a la masa de polvos, como muestra la figura 3.11.

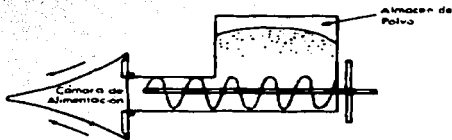


Figura 3.11. Sistema de alimentación en la compactación por la laminación de polvos.

Las variables más importantes de este proceso son la velocidad angular de los cilindros y el ángulo de ataque. La velocidad angular de los cilindros, que suele ser del orden de 10 rpm, es función, sobre todo, del tamaño del polvo: cuanto menor es el tamaño del polvo, mayor velocidad angular se puede aplicar a los cilindros. El ángulo de ataque definido esquemáticamente en la figura 3.12, indica la reducción de espesor conseguida y depende de la naturaleza del polvo. Para el polvo de cobre electrolítico el ángulo de ataque puede llegar a valer 6° ; para el polvo de cobre atomizado en agua 3° y para el polvo de cobre atomizado en aire 1° .

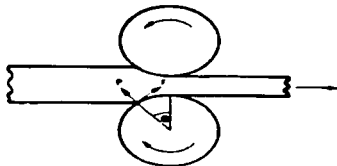


Figura 3.12. Compactación por laminación de polvos. Se forma esquemática el ángulo de ataque

3.7. TEORIA DE LA COMPACTACION.

La cohesión de polvos metálicos en verde se puede considerar como una verdadera soldadura en frío de los puntos de contacto entre dos partículas de polvo debido:

1. a la rotura de la película gaseosa que envuelve la partícula de polvo,
2. al ensamblaje metálico causado por la irregularidad de la superficie de los polvos
3. a los calentamientos locales provocados por la presión, que se pueden traducir en verdaderas soldaduras en caliente, y
4. a la unión (por soldadura) en frío, debido a la captura de las valencias superficiales libres y a las fuerzas de Van de Waals lo cual constituye la adherencia.

3.8. EQUIPO UTILIZADO PARA LA COMPACTACION.

Las prensas usadas en la compactación convencional en la metalurgia de polvos son mecánicas, hidráulicas o una combinación de las dos. En la figura 3.13. se muestra una unidad hidráulica de 50 toneladas. Debido a diferencias en la complejidad de las partes asociadas a los requerimientos de prensado, las prensas se pueden clasificar en:

1. prensado en una dirección, con prensas de acción simple;
2. prensado en dos direcciones, con prensas de varios tipos, incluyendo las de punzones opuestos, de doble acción o de múltiple acción.

La tecnología de las prensas comúnmente disponibles puede suministrar hasta diez acciones de control separadas para producir partes de forma bastante compleja.



Figura 3.13. Prensa hidráulica de 50 ton para compactación de componentes de metalurgia de polvos. Esta prensa tiene la capacidad de actuar en niveles múltiples para producir piezas de formas complejas en metalurgia de polvos

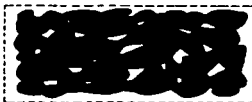
CAPITULO 4.- SINTERIZADO.

4.1. CONCEPTO DE SINTERIZACIÓN.

La masa de polvo metálico, que se ha compactado mediante presión, resulta frágil debido al débil enlace entre las partículas. Para remediarlo se recurre a la sinterización, que consiste en calentar la masa de polvo a temperatura inferior a su punto de fusión (temperatura de sinterizado, T_sK , = 2/3 a 4/5 de temperatura de fusión, T_fK) durante el tiempo suficiente para que las partículas se suelden y el componente resultante, muchas veces poroso, adquiera resistencia mecánica, como se indica en la figura 4.1.



Antes de la sinterización



1ª fase de la sinterización



2ª fase de la sinterización

Figura 4.1. Etapas de la sinterización.

- 1) Crecimiento de los puentes de enlace y densificación, poros interconectados.
- 2) Coalescencia, poros aislados

Dado que las aplicaciones de la M/P involucran generalmente producciones medianas o altas, la mayoría de los hornos de sinterizado se diseñan con dispositivos mecanizados para el traslado de las partes de trabajo durante el proceso. El tratamiento térmico consiste en tres pasos realizados en tres cámaras de hornos continuos: 1) precalentado, en el cual se queman los lubricantes y el aglutinante, 2) sinterizado y 3) enfriado. El tratamiento se ilustra en la figura 4.2.

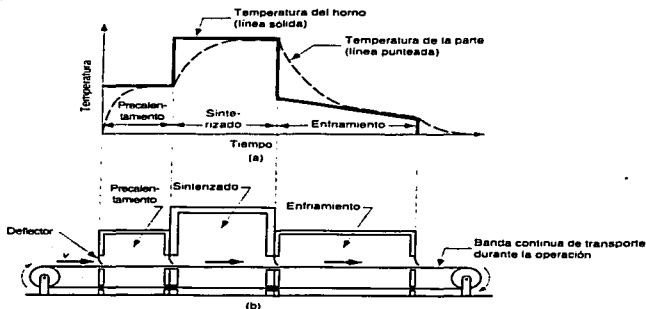


Figura 4.2 a) ciclo típico de tratamiento térmico durante el sinterizado y b) sección transversal esquemática de un horno continuo de sinterizado.

Termodinámicamente es lógico que el sistema evolucione hacia un sistema compacto, ya que la masa de polvo, debido a la gran cantidad de intercaras, tiene exceso de energía libre, la cual tenderá a eliminarse cuando las condiciones lo permitan. Estas condiciones se presentan precisamente en el proceso de sinterización. Por otra parte, desde el punto de vista cinético, la movilidad atómica en estado sólido es función de la temperatura. Por lo tanto, para que las partículas de polvo puestas en contacto se sintericen es necesario que los átomos estén animados de cierta movilidad, lo que se consigue aumentando la temperatura del sistema, produciéndose así más zonas de contacto. Además, si la masa de polvos está formada por distintos elementos químicos, tienen lugar fenómenos de aleación al propio tiempo que se produce la unión de las partículas.

Por ejemplo, los fenómenos macroscópicos que se observan al sinterizar, a distintas temperaturas, polvos de hierro aglomerados a distintas densidades están representados en la figura 4.3. y son los siguientes:

- La densidad permanece prácticamente constante y al variar la temperatura depende de la presión de compactación.
- El cambio dimensional (contracción), la resistencia y la elongación aumentan con la temperatura y presentan un cambio brusco a 910 °C, que coincide precisamente con el punto de transformación alotrópica del hierro.
- La recompresibilidad, $Rec = A-B / B$ (siendo A y B las densidades antes y después del calibrado), pasa por un máximo entre 700 y 800 °C.
- Existe coincidencia de los máximos valores de la densidad en verde, de la resistencia y de la elongación.

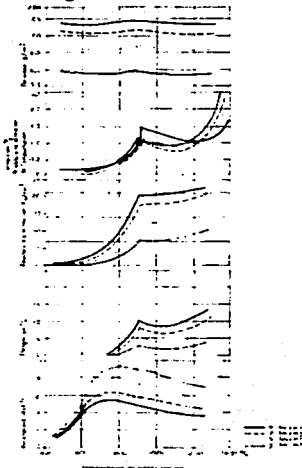


Figura 4.3 Evolución de las propiedades mecánicas (densidad, contracción, resistencia y elongación) en función de la temperatura de sinterización y de la presión de compactación del polvo de hierro reducido. Duración de la sinterización una hora.

Otras características metalúrgicas que varían con la sinterización y cuya determinación se puede utilizar para estudiar la evolución de este fenómeno son la resistividad, la dureza, la porosidad y la microestructura.

4.2. LAS VARIABLES DE LA SINTERIZACION.

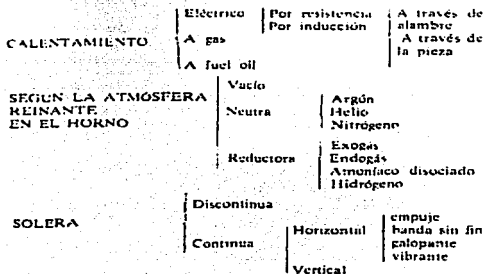
Las variables de la etapa de la sinterización, dejando aparte la naturaleza de la mezcla y la presión de compactación, son las siguientes: la temperatura, el tiempo, la atmósfera del horno y las graficas de calentamiento y de enfriamiento. Por lo tanto, en el proceso de sinterización, una vez elegida la aleación, se compactan los polvos escogidos y se calientan en un horno en el que se controlan las variables mencionadas.

4.3. LOS HORNOS

El horno es el elemento principal de la sinterización. Es un artefacto constituido por una caja susceptible de calentamiento y que permite el control y la regulación del tiempo, de la temperatura, de la atmósfera y de las velocidades de calentamiento y de enfriamiento.

4.3.1. Tipos de hornos.

Los hornos se pueden dividir en varios tipos según el criterio de clasificación que se adopte, a saber, a partir del procedimiento de calentamiento, por la atmósfera o por la solera del horno. Esquemáticamente puede hacerse la división siguiente:



4.3.2. Los hornos según el tipo de calentamiento.

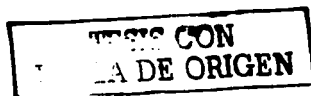
En esta clase de hornos el sistema de calentamiento que se acopla al horno depende de la temperatura a conseguir y ésta es función de la naturaleza del compacto a sinterizar. En la tabla 4.1 se indican las temperaturas y los tiempos de trabajo correspondientes a cada tipo de material

Material	Temperatura °C	Tiempo en minutos
Bronce	825	15
Cobre	850	25
Latón	850	25
Hierro-grafito	1050	25
Níquel	1100	35
Ferritas	1400	60
Metal duro	1450	30
Molibdeno	2050	120
Tungsteno	2350	480
Tántalo	2400	480

Tabla 4.1

El calentamiento por gas tiene como ventaja la economía y como inconveniente la dificultad del control de la temperatura. La temperatura alcanzada por el horno suele llegar a 1100 °C y por ello apenas se emplea este sistema de calentamiento para sinterizar. El método de calentamiento más utilizado para hornos de sinterizar es por el sistema de la resistencia eléctrica, que aprovecha el calor generado según la ley de Joule. La disposición de las resistencias da nombre a los hornos, que son de tipo mufia o caja. Los hornos tipo mufia tienen las resistencias enrolladas alrededor de la cavidad tubular que es la mufia; los hornos tipo caja tienen las resistencias instaladas a lo largo de las paredes interiores y por lo tanto en contacto con la atmósfera del horno.

El material de las resistencias suele ser nicrom (níquel 70 %, cromo 30 %), que alcanza temperaturas de 1100 °C, y aleación Kanthal o carburo de silicio, que alcanza temperaturas algo superiores (1300 °C). Las resistencias de carburo de silicio tienen la ventaja de presentar una gran resistencia a los gases de la atmósfera y a la termofluencia (creep), pero en contrapartida poseen el inconveniente, para los hornos discontinuos, de estar dotados de una gran velocidad de calentamiento.



Para lograr temperaturas superiores se utilizan resistencias de molibdeno (1800 °C), de tungsteno (wolframio) (2500 °C) y de grafito (2700 °C). Para temperaturas aún mayores, se utilizan los hornos de inducción (3000 °C). Finalmente, otro método de calentamiento consiste en hacer pasar directamente la corriente eléctrica a través del componente a sinterizar. Es así que se sinterizan los compactos de polvos de tungsteno (wolframio), de polvos de molibdeno y de polvos de tántalo.

El control de la temperatura de los hornos se realiza mediante termopares. Éstos consisten en sendas varillas metálicas que tienen un extremo soldado y el otro unido a una unión fría conectada a un milivoltímetro. Se genera fuerza electromotriz por efecto Peltier y por efecto Thomson. Dado que el potencial es función de la temperatura a que se encuentra la unión soldada, la lectura de potencial se traduce fácilmente en grados de temperatura.

4.3.3. Los hornos según su atmósfera.

En los tratamientos térmicos se entiende por atmósfera la masa gaseosa encerrada dentro del horno, que está en contacto con las piezas a tratar. Las atmósferas pueden tener carácter neutro, oxidante o reductor. El papel desempeñado por la atmósfera controlada es doble. En efecto, por una parte evita que se produzcan reacciones perjudiciales, como son la oxidación y la descarbonación de las piezas que se están tratando. Por otra parte, permite realizar las reacciones previstas, a saber, la reducción de óxidos superficiales y la eliminación de gases adsorbidos.

El vacío que se utiliza para sinterizar carburos cementados y aceros aleados se consigue mediante bombas mecánicas y de difusión de aceite o mercurio, como aparece en la figura 4.4.

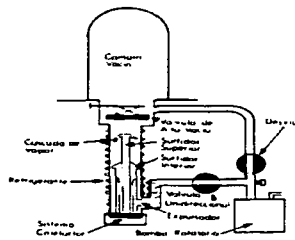


Figura 4.4 Esquema de una bomba de difusión para producir el vacío

Las atmósferas neutras de argón, helio y nitrógeno apenas se emplean, debido al precio de estos gases y a las trazas de oxígeno que suelen contener. Más interesantes son, desde el punto de vista pulvimetalúrgico, las atmósferas carburantes o descarburantes obtenidas por combustión o disociación de mezclas de hidrocarburos (metano, propano, butano, gas natural) con aire. Éstas suelen contener N_2 , CO , H_2 , CO_2 y pequeñas cantidades de vapor de agua.

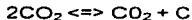
La composición de la atmósfera del horno depende del tipo de generador utilizado, que puede ser exotérmico o endotérmico. En el generador exotérmico se introducen hidrocarburos y aire seco y limpio, convenientemente dosificados; se queman en la cámara de combustión, se filtran y se separa el agua. El gas seco resultante se introduce al horno de sinterización.

La mezcla que se introduce al generador exotérmico es parecida a la que se inyecta en el endotérmico, pero el generador endotérmico no tiene quemador sino que los gases reaccionan entre sí en un catalizador calentado externamente.

Otra atmósfera que sirve para sinterizar es la que se obtiene por disociación del metanol entre 300-350 °C en presencia de catalizador, o entre 900-1000 °C en ausencia de éste, según la reacción .

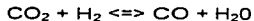


Al metanol se le suele añadir agua para evitar la reacción que tiene lugar entre 400 y 800 °C (3).

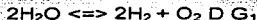


El control de la atmósfera se suele realizar analizando automáticamente mediante espectrofotometría de infrarrojos las proporciones de algunos de los elementos de la reacción y midiendo el punto de rocío (presión de vapor de agua) en una célula de litio. Así se determina el potencial de carbono de la atmósfera.

Entre los gases del horno se puede suponer la reacción



El potencial de oxígeno se deduce conociendo la entalpia libre de formación del CO_2 y del H_2O y las constantes de equilibrio de las reacciones



Es decir, la concentración en vapor de agua es inversa a la concentración en monóxido de carbono. Cuanto menor sea $[\text{H}_2\text{O}]$, mayor será el poder reductor de la atmósfera, lo que se mide con el punto de rocío, o sea la temperatura a la que se condensa el vapor de agua que hay en la atmósfera. Si hay mucha presión el vapor de agua condensará a una temperatura más elevada que si hay poca presión.

Los hornos de amoníaco disociado se emplean para sinterizar bronce. El catalizador es un conjunto de esferas de níquel a la temperatura de 500°C y a la presión atmosférica. La composición del gas es 75 % en H_2 y 25 % en N_2 .

Se señala para terminar que atmósferas más ricas en hidrógeno se obtienen descomponiendo electrolíticamente el agua y eliminando la humedad del hidrógeno formado.

4.4. TEORIAS DE LA SINTERIZACION.

Teorías que intentan explicar el fenómeno de la sinterización, separando las etapas de los mecanismos

4.4.1. Etapas de la sinterización.

En la sinterización se distinguen tres etapas:

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

- 2) En la etapa de la densificación y crecimiento de grano, que tiene lugar cuando la relación r_n/r (figura 4.5) sobrepasa un determinado valor, las partículas independientes empiezan a perder su identidad aumentando la densidad y los cambios dimensionales de la pieza.
- 3) En la etapa final aparecen los poros aislados debido a la coalescencia de las partículas. Los poros se redondean y desaparecen los pequeños, en tanto que los mayores crecen.

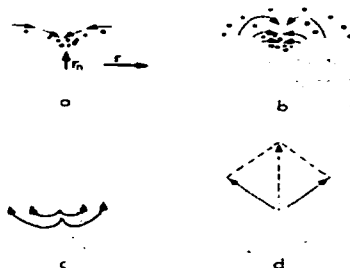


Figura 4.5. Mecanismos de la sinterización. Etapa de los poros interconectados:

- a) Difusión superficial. Los átomos se mueven a lo largo de la superficie y se reúnen en los puntos de contacto entre partículas aumentando el radio de los puentes de enlace.
- b) Evaporación-condensación. En las zonas de contacto entre partículas donde hay mayor presión de vapor del metal, crece el radio de los puentes de enlace.
- c) Difusión a través de la red. Difusión de volumen.
- d) Fluencia. Deformación a lo largo del puente de enlace como resultado de la tensión superficial.

Los cambios dimensionales y de densidad apenas son perceptibles

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

4.4.2. Mecanismos de la sinterización.

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

Sin transferencia de materia -

Por adherencia

Por evaporación y condensación

Por difusión en la red a través de vacantes

Por difusión en la red a través de átomos intersticiales

Por difusión en los límites de granos

Con transferencia de materia

Por fluencia plástica

Por cizallamiento de los límites de grano

Por recristalización

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

La difusión superficial es un mecanismo de sinterizado que ocurre cuando el compactado alcanza temperaturas del orden de $0,3 T_f$. En estas condiciones los átomos superficiales tienen suficiente movilidad para desplazarse, dirigidos por la tensión superficial, desde la zona convexa a la zona cóncava (figura 4.6) de dos partículas de polvo que están sinterizándose. El resultado de este mecanismo es un aumento del espesor del puente de enlace sin que ocurra acercamiento de los centros de las partículas.

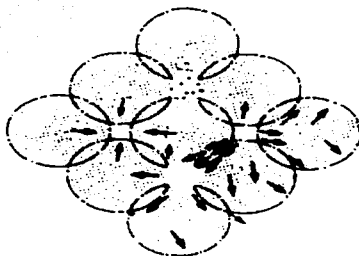


Figura 4.6. Mecanismos de la sinterización. Etapa de los poros aislados.

- Difusión superficial y evaporación-condensación. Ocurren simultáneamente. Los polvos se redondean pero no tiene lugar el acercamiento de los centros de las partículas. No hay contracción
- Difusión de volumen. Se reduce la porosidad total incrementándose el tamaño medio de los poros.
- Fluencia. Los poros se reducen por el peso del metal vecino.

A temperaturas más elevadas que las necesarias para la difusión superficial, se produce, simultáneamente, la evaporación y la condensación del metal. El cambio de fase predominante depende de la presión de vapor, que es mayor encima de una superficie cóncava o menos convexa. Por esta razón se produce una disminución de las superficies convexas y un aumento de las superficies cóncavas. No existe en este mecanismo acercamiento de los centros de las partículas

Cuando la temperatura de sinterizado en escala absoluta es la mitad de la temperatura de fusión de los polvos, el mecanismo que adquiere mayor relevancia es la difusión a través de la red. Esta difusión es posible por las imperfecciones térmicas (vacancias o sitios vacantes y dislocaciones) existentes en los polvos metálicos o generadas en las etapas de mezcla, compactación y sinterización. Las trayectorias de la difusión de vacancias van desde zonas de máxima concentración de defectos a las zonas donde hay menor concentración, es decir, de las fuentes de vacancias a los sumideros de la tabla 4.2. En la figura 4.7. están representadas las trayectorias de las vacancias en la sinterización de dos partículas esféricas.

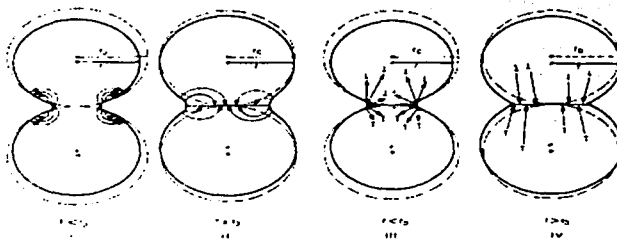


Figura 4.7. Probables trayectorias de difusión a través de los sitios vacantes o vacancias de la red en el experimento de modelos esféricos.

La difusión de vacancias aumenta el espesor del puente de enlace y redondea los poros. Este último efecto se explica por el tránsito de sitios vacantes que existe entre los vértices y los centros de los lados del triángulo curvilíneo representado por tres esferas cuyo esquema aparece en la figura 4.8.

FUENTE
Superficie puente enlace
id.
id.
dislocación

SUMIDERO
Superficie partícula
Limite grano
Dislocación
limite grano

EFFECTO
crece r_n
id. Y disminuye d
crece r_n
id. Y disminuye d

Tabla 4.2

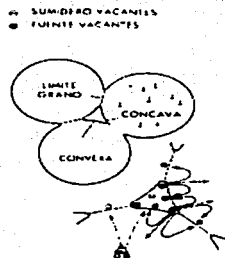


Figura 4.8. Esquema del mecanismo de la difusión de volumen en torno a un poro: Sección transversal de un conjunto de alambres de cobre de 5 mm de diámetro sinterizados a 1075°C en atmósfera de hidrogeno durante: a) 4 horas, b) 8 horas, c) 16 horas y d) 96 horas.

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

$$J = -DA \times d_c / dx$$

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

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

$$D = D_0 e^{-\frac{Q}{RT}}$$

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

La difusión es más rápida a lo largo de los límites de grano que en el interior de los cristales y más lenta en dichos límites que en las superficies libres, pero el área de límite de grano es, en un metal, inversamente proporcional al tamaño del grano y muy superior al área de superficie. Además, los límites de grano forman una red que pasa a través de todo el metal, favoreciendo la homogeneidad cuando la difusión tiene lugar a través de los límites de grano.

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

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

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

En la etapa de sinterización generalmente ocurren varios de los mecanismos apuntados. La contribución de cada uno de ellos depende de la naturaleza del polvo y de la temperatura de la operación. Kuczynsky, en una serie de estudios del fenómeno mediante modelos sencillos esfera-esfera, esfera-plano y barra-alambre arrollado en espiral, llegó a la conclusión de que el crecimiento de los puentes de enlace (r_n) depende de la temperatura (T) y del tiempo (t) de sinterización, según la ecuación

$$r^n / r_0^n = F(T)t$$

Los valores de p y m dependen del mecanismo de difusión. Estos valores los recogemos en la tabla 4-3.

TABLA 4.3 Valores de los índices p y m de Kuczynsky para diferentes mecanismos de sinterización

MECANISMO	p	m .
Fluencia	2	1
Evaporación-condensación	3	1
Difusión red	5	2
Difusión superficial	7	3

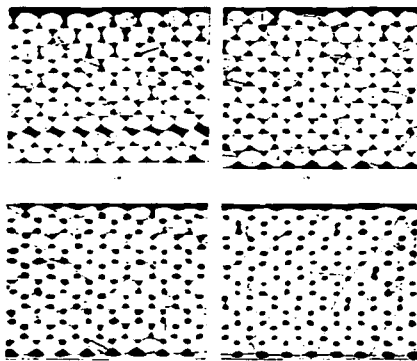


Figura 4.9 Sección transversal de un conjunto de alambres de cobre de 5 mm de diámetro sinterizados a 1075°C en atmósfera de hidrógeno durante: a) 4 horas, b) 8 horas, c) 16 horas y d) 96 horas.

CAPITULO 5. ACABADO DE LAS PIEZAS.

Raramente se emplean las piezas obtenidas pulvimetalúrgicamente sin efectuar un tratamiento posterior a la sinterización. Existen una serie de tratamientos mecánicos, físicos y químicos del sinterizado, así como el control dimensional y el aspecto estético, como se describen a continuación.

5.1. El calibrado.

Consiste en aplicar una presión a la pieza sinterizada mediante una matriz de dimensiones más precisas, de forma idéntica a la empleada en la compactación. Esta operación normalmente se realiza a temperatura ambiente, lubricando las paredes de la matriz con aceite grafitado o disulfuro de molibdeno. La presión empleada es superior a la de compactación.

La finalidad del calibrado o acuñado, consiste en corregir los cambios dimensionales que ocurren en el sinterizado. Un aspecto inherente al calibrado lo constituye el endurecimiento por acritud, como es habitual en un trabajo en frío. Esta operación aumenta la dureza, el límite elástico y la resistencia al tiempo que disminuye la elongación y la tenacidad.

Existen dos tipos de calibrado: el positivo y el negativo. El primero es el que sufre la pieza sinterizada que tiene unas dimensiones superiores a la matriz de calibrado y en la operación se reducirá el diámetro. El segundo tipo de calibrado es aquel en el que la pieza tubular sinterizada entra con holgura en la matriz de calibrar y se ajustan las dimensiones introduciendo un punzón de diámetro algo superior al diámetro interior de la pieza tubular.

5.2. El mecanizado.

La pulvimetalurgia se ha desarrollado principalmente porque permite la fabricación de piezas de formas complejas de modo más económico que otros procedimientos. Si a esta ventaja se le añade la que conlleva el mecanizado final, la complejidad de los componentes aumenta considerablemente y, por lo tanto, su utilidad en cuanto a diseños difíciles. No obstante, el mecanizado se aplica relativamente poco en este campo, las razones de ello hay buscarlas en la objeción instintiva de que la pulvimetalurgia y el mecanizado son dos métodos competitivos y, por lo tanto, la pulvimetalurgia se aplica para evitar mecanizar. Así mismo las industrias pulvimetalúrgicas se basan en la producción de una gran cantidad de piezas en series, en las cuales el costo del mecanizado, por pequeño que sea, repercute decisivamente en el costo del producto sinterizado. Por este motivo las industrias pulvimetalúrgicas dedican poca atención al mecanizado.

Sin embargo, el mecanizado, además de ampliar considerablemente la posibilidad de diseño, incide favorablemente en la pulvimetalurgia aumentando la densidad y mejorando el aspecto superficial en el sentido de eliminar la porosidad, factor importante como fase previa al recubrimiento electroquímico.

Se considera por otra parte que el proceso de mecanizado de los componentes sinterizados suele ser más fácil que el mecanizado de los componentes obtenidos convencionalmente, ya que los poros actúan como discontinuidades, ayudando al mecanizado.

5.3. Tratamientos térmicos.

En la pulvimetalurgia se aplican los mismos tratamientos térmicos que en la metalurgia convencional. En general un tratamiento térmico consiste en un proceso de calentamiento hasta una temperatura dada, manteniendo la pieza a esa temperatura durante un cierto tiempo y un proceso de enfriamiento a una velocidad determinada y dentro de un medio seleccionado. En este caso rigen los mismos principios que en aquellos procesos, pero hay algunos matices que los diferencian. Limitándonos al caso de los aceros al carbono, el diagrama transformación, temperatura, tiempo (TTT), como se muestra en la figura 5.1, está influenciado por la microestructura, por el tamaño de la pieza y por la severidad del medio, pues la microestructura de los aceros convencionales, en principio, es distinta de los aceros pulvimetalúrgicos y la posición de las curvas de transformación queda afectada por ese detalle.

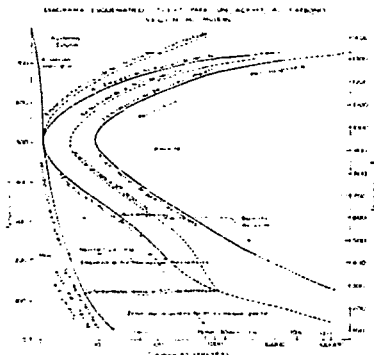


Figura 5.1 diagrama de transformación de un acero al carbono de composición correspondiente a la de un eutéctico

Los tratamientos térmicos del acero se basan en la aplicación de las transformaciones estructurales que el acero experimenta bajo la influencia de las transformaciones alotrópicas y de los procedimientos de recristalización y de difusión. Estos tratamientos térmicos pueden ser clasificados en cuatro grupos principales:

5.3.1. *El recocido.* Los procedimientos de recocido pueden ser clasificados de la siguiente forma: recocido completo y recocido de ablandamiento.

- a) Recocido completo. Esta definido como el recocido de una aleación ferrosa austenitizada y luego enfriada lentamente a través del rango de transformación.
- b) Recocido de ablandamiento. El propósito de este recocido es el de obtener una estructura de acero que corresponda a la dureza mínima (matriz ferrítica), la dureza mínima corresponde a la óptima deformabilidad en procesos de conformado.

5.3.2. *Normalizado.* (a veces llamada perlitización) tiene como propósito obtener una estructura perlítica de grano fino y distribución homogénea, la cual corresponde a las propiedades mecánicas óptimas de un acero perlítico. Consiste en un calentamiento, seguido de un enfriamiento al aire quieto.

5.3.3. *El temple.* El temple involucra un enfriamiento rápido y continuo desde la temperatura de austenitización, hasta el rango de temperaturas de transformación martensítica, a una velocidad de enfriamiento tan grande (mayor que la crítica) que la transformación a perlita o bainita se inhibe y el producto obtenido será martensita. El propósito del temple es el de obtener, para cada composición de acero, la dureza máxima.

5.3.4. *El revenido.* El revenido del acero comprende el calentamiento del acero endurecido o a veces normalizado a una temperatura debajo de la crítica o de transformación y enfriándolo a una velocidad conveniente, principalmente para aumentar la ductilidad y la tenacidad.

También hay diferencias en la práctica del tratamiento térmico; por ejemplo, la porosidad superficial de las piezas sinterizadas impide emplear baños de sales, ya que estas se introducen dentro de los poros y ocasionan fenómenos corrosivos.

5.4. Corrosión.

Se entiende por corrosión metálica la degradación de un metal por reacción con el medio ambiente. Según las características de esta reacción, la corrosión se clasifica en química o electroquímica, en ambos casos es de gran importancia la porosidad de los metales sinterizados, ya que ofrece mayor superficie específica (corrosión química) y distinto potencial electroquímico (corrosión electroquímica), lo que se traducen un comportamiento más activo que el de los metales convencionales frente al ambiente.

Los métodos empleados para estudiar la resistencia a la corrosión de los componentes obtenidos por procedimientos pulvimetalúrgicos son los siguientes:

- 1) Medida de la pérdida de peso
- 2) Observación del aspecto superficial después de una exposición normalizada al aire o en niebla salina
- 3) Observación metalográfica
- 4) Estudio de las curvas de polarización

Este último método, que está incluido entre los llamados ensayos acelerados, se practica suspendiendo la probeta sometida a ensayo, sumergida en el electrolito correspondiente, frente a un contraelectrodo de platino y tomando como referencia un electrodo de calomelanos (protocloruro de mercurio). Cuando se trata de un acero inoxidable 316 L (AISI) laminado, sumergido en el electrolito de ácido sulfúrico 1N, el potencial generado es de aproximadamente +400 mV. Cuando se trata de un acero inoxidable 316 L sinterizado en hidrógeno, el potencial alcanzado es de aproximadamente -300mV, potencial distinto al que se alcanza cuando el mismo polvo de acero se ha sinterizado en atmósfera de amoníaco disociado, en cuyo caso, después de 200 horas de exposición en la célula de ensayo, se alcanza el valor de +200 mV.

Se observa que, aunque las piezas de acero inoxidable obtenidas pulvimetalúrgicamente poseen carácter inoxidable, ofrecen menos resistencia a la corrosión que los aceros obtenidos por los procedimientos convencionales y que la resistencia a la corrosión de los aceros sinterizados varía considerablemente con la naturaleza de la atmósfera del horno.

**TESIS CON
FALLA DE ORIGEN**

79 ESTA TESIS NO SALE
DE LA BIBLIOTECA

5.5. El pavonado.

El pavonado es una operación de protección que tiene por objeto producir la oxidación superficial del componente metálico por calentamiento en atmósfera oxidante. La formación de dicha película de óxido puede interpretarse estructuralmente. En efecto, los óxidos, tienen una estructura reticular con oxígeno y iones metálicos distribuidos ordenadamente, con lugares vacantes, como los metales. Los iones pueden moverse a través de los óxidos por estas vacancias. En el caso del óxido cuproso (CuO_2), puede interpretarse su estructura como una red catiónica con doble cantidad de iones cuprosos (Cu^+) que iones oxígeno (O_2^-). Sin embargo, es un hecho experimental, como se ha podido comprobar por análisis, que el contenido en cobre es inferior al indicado por su fórmula, lo que se explica a partir de la hipótesis de las vacancias catiónicas.

Dado que el óxido es eléctricamente neutro, la carga positiva asociada a cada ion ausente está compensada por la transformación de un ion cuproso en un ion cúprico, por lo tanto, el número de vacancias catiónicas y iones cúpricos deben concordar, como aparece esquematizado en la figura 5.2. los iones de la red están dotados de movilidad y pueden ocupar las vacancias adyacentes dejando su sitio vacío, provocando un desplazamiento de vacancias de la superficie exterior de la capa de óxido a la interior; en realidad, ello representa un movimiento de los iones metálicos hacia la fase gaseosa donde podrán reaccionar con el oxígeno. La velocidad de la emigración iónica es proporcional a la temperatura, lo que justifica la mayor corrosión a alta temperatura.

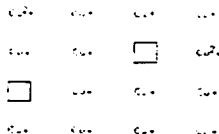


Figura 5.2 red catiónica de óxido cuproso consistente en iones cuprosos, dos vacancias y dos iones cúpricos

Las moléculas de oxígeno absorbidas en la superficie del óxido, se convierten en iones captando electrones que han llegado del metal a través de la capa de óxido por intercambio entre los iones cúpricos y cuprosos. Dos átomos de oxígeno más cuatro electrones producen dos iones de oxígeno ($O_2 + 4e = 2 O_2^-$).

Los electrones del metal son recogidos por los iones cúpricos del óxido transformándose en iones cuprosos que reaccionan con el oxígeno del aire convirtiéndose en cúpricos. Es decir, la interfase óxido / gas es una fuente de iones cúpricos y la interfase metal/óxido una fuente de iones cuprosos. Este mecanismo explica el paso de las vacancias desde el metal hasta el oxígeno, a través de la capa de óxido, como se esquematiza en la figura 5.3.

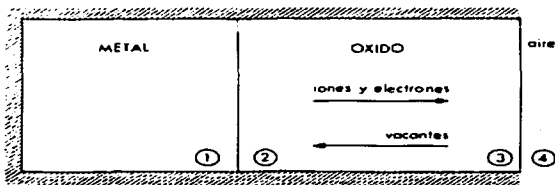


Figura 5.3 Esquema del movimiento de vacancias, iones y electrones en una película de óxido cuproso

El carácter protector de la capa de óxido depende no sólo de su coeficiente de difusión, si no también de su resistencia a la corrosión, plasticidad, deformabilidad, adherencia, coeficiente de dilatación. Según los valores de todas estas magnitudes, la protección de la película de óxido será más o menos eficaz.

El pavonado produce un recubrimiento de magnetita, óxido ferroso - férrico de color negro, que forma una capa impermeable y adherente al metal base, con un coeficiente de dilatación muy parecido al del acero. Se realiza el pavonado sumergiendo el componente que hay que proteger en baños alcalinos oxidantes, en vapor de agua sobrecalentado o en anhídrido

carbónico. El primer procedimiento no se puede aplicar en piezas pulvimetalúrgicas, ya que se introducen sales en los poros que luego exudan.

El procedimiento más corriente para pavonar piezas pulvimetalúrgicas consiste en inyectar vapor de agua sobrecalentado (555 °C) en un tanque que contenga las piezas que se quiere proteger. Las reacciones que tienen lugar comienzan con la formación del óxido de hierro.

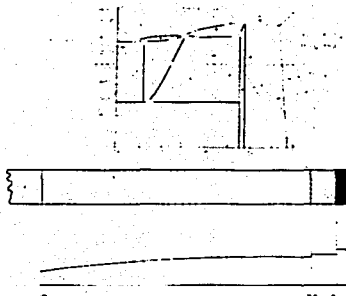
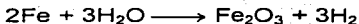


Figura 5.4 Diagrama de equilibrio del sistema hierro-oxígeno

Al aumentar la concentración de hidrógeno, el óxido rojo se convierte en óxido negro.



El diagrama de equilibrio hierro – oxígeno de la figura. 5.4 indica que cuando hay poco oxígeno se forma una mezcla de hierro más Fe_3O_4 y si hay mucho oxígeno se forma Fe_2O_3 este último óxido de color rojo no protege, sino que es una capa permeable. Con el pavonado se intenta formar el Fe_3O_4 , cuya composición en peso es de 72.4 % en hierro. El FeO a temperatura ambiente es termodinámicamente inestable.

Otro procedimiento de pavonado en fase vapor y por lo tanto adecuado para aplicar a las piezas obtenidas pulvimetalúrgicamente, consiste en oxidar hierro en atmósfera de anhídrido carbónico con un pequeño porcentaje de monóxido de carbono, calentando a unos 600 °C. Este procedimiento se justifica teóricamente en los diagramas hierro – temperatura – composición CO_2 – CO , de Baurdour – Chaudron (figura. 5.5) en los que están representadas las zonas de estabilidad del hierro, del óxido ferroso y de la magnetita.

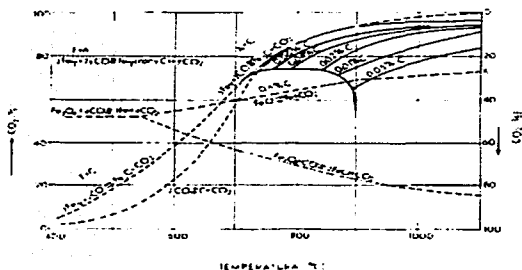


Figura 5.5. Diagrama de equilibrio del sistema hierro – óxido de carburo / dióxido de carburo

El pavonado aumenta la densidad de las piezas pulvimetalúrgicas y sirve como técnica de acabado superficial. La capa de pavón formado tiene un color negro de gran valor estético. También se aplica para tapan los poros y facilitar el recubrimiento electrolítico (cobreado, níquelado y cromado).

5.6. El recubrimiento electrolítico.

Este acabado presenta un inconveniente; a saber, la dificultad que las piezas pulvimetalúrgicas ofrecen al recubrimiento electrolítico, lo cual deriva de su porosidad. La solución está en la oxidación controlada de los poros o en la impregnación con silicona o con resinas termoendurecibles. La silicona actúa por su efecto repelente del agua.

Es por este motivo que las disoluciones iónicas de los baños galvánicos no mojan al poro tapado con silicona y que no se recubre al aplicar las condiciones de deposición electroquímica. El tratamiento superficial previo al recubrimiento consiste en disolver 1 % de silicona en White spirit (solución). Después de impregnar el componente, se seca a 120 °C durante una hora. Luego se muele el componente junto con arena pura (99.7% de peso) y 0.3% de polvos finos de óxido cuproso durante 15 minutos en un tambor giratorio, hasta que se tapen los poros.

Los poros también pueden taparse por tratamiento al vacío con resinas termoendurecibles, lavado con detergente y secado al horno a 180 °C. El tratamiento posterior es el propio de las aleaciones macizas: cobreado, níquelado y cromado, o bien cincado. Sin embargo, hay que tener en cuenta que las piezas sinterizadas tienen menor conductividad eléctrica que las piezas convencionales.

5.7. El recubrimiento mecánico.

El peen planting consiste en recubrir de cinc los componentes de acero.

El proceso se realiza por la combinación de una técnica de acabado ya conocida, el molido, y el principio de la soldadura en frío. Las piezas deben ser de formas sencillas.

La condición previa al recubrimiento es el de desengrase, que se consigue sumergiendo las piezas en tricloroetileno. En el caso de los aceros se deposita primero una capa delgada de cobre por inmersión en solución cobreada, por ejemplo, sulfato de cobre diluido en medio ácido.

5.8. Soldadura .

En la soldadura de componentes pulvimetalúrgicas se aplican los dos aforismos clásicos de la soldadura en general:

- 1) Soldar es bueno, pero no soldar es mejor
- 2) Lo igual se suelda con lo igual

Es decir se soldara sólo cuando no haya otra solución y se sueldan aleaciones de la misma naturaleza.

Algunas técnicas de soldadura utilizadas con éxito para la unión de piezas convencionales fracasan cuando se trata de soldar piezas pulvimetalúrgicas. Por ejemplo las soldaduras blanda y dura fracasan en la unión de piezas sinterizadas debido a la infiltración de la aleación soldante en las piezas porosas, perjudicando las propiedades mecánicas. Sin embargo, dos componentes se pueden soldar, sinterizándolas en contacto con una lámina de ferrofósforo. Pero el método de soldar que ha dado mejores resultados en este campo ha sido la soldadura por protuberancias (elemento que sobresale en una superficie), la cual consiste en diseñar salientes en una de las dos piezas a unir, poner las piezas en contacto a presión y aplicar cierto voltaje de modo que por efecto Joule se funda la protuberancia. Las consecuencias son las mismas que en las piezas macizas: baño de fusión y zona afectada por el calor.

5.9. Impregnación.

Una amplia variedad de cojinetes autolubricados están hechos de compactos porosos impregnados con algún tipo de lubricante, casi siempre de aceite. El compacto, que se produce con una porosidad de 25 a 35%, se sumerge en aceite caliente o se trata al vacío, de tal manera que la red de poros se llena de aceite. El lubricante es liberado durante el servicio a un ritmo que depende de la carga y de la temperatura.

Los materiales generalmente tienen una base de hierro o bronce.

La impregnación de compactos con plásticos, por ejemplo, se puede llevar a cabo para conseguir componentes a presión o herméticos, cerrando los poros antes de aplicar el revestimiento metálico o de producir otras propiedades deseadas.

5.10. Infiltración.

En este proceso, los poros de compacto se cierran llenándolos con un metal fundido cuyo punto de fusión sea más bajo que el del constituyente principal del compacto. La infiltración se puede llevar a cabo ya sea en un proceso especial de pre sinterización o durante la sinterización normal. El material de infiltración puede aplicarse encima o debajo del compacto como un sólido que se funde a la temperatura real de sinterización, o puede aplicarse como líquido. El metal fundido se introduce en el compacto por acción capilar.

La resistencia de un componente puede ser incrementada por infiltración entre 70 y 100%. Un ejemplo típico es un compacto de hierro infiltrado con cobre.

CAPITULO 6. APLICACIONES DE LAS PIEZAS.

6.1 Materiales para la metalurgia de polvos.

Desde un punto de vista químico, los polvos metálicos se pueden clasificar en elementales y prealeados. Los polvos *elementales* consisten en un metal puro y se usan en aplicaciones donde la alta pureza es importante. Por ejemplo, el hierro puro puede usarse donde importan sus propiedades magnéticas. Los polvos elementales más comunes son de hierro, de aluminio y de cobre.

Los polvos elementales se mezclan también con otros polvos metálicos para producir aleaciones especiales que son difíciles de formular por métodos convencionales. Las herramientas de acero son un ejemplo, la metalurgia de polvos permite combinar ingredientes que son difíciles o imposibles por las técnicas tradicionales de aleación. El uso de mezcla de polvos elementales facilita el procesamiento para formar una aleación, aun cuando no involucre aleaciones especiales. Siendo los polvos metales puros, no son tan fuertes como los metales prealeados. Por tanto se deforman más fácilmente durante el prensado, así que la densidad y la resistencia verde son más altas que los compactados prealeados.

En los polvos *prealeados*, cada partícula es una aleación que tiene la composición química deseada. Los polvos prealeados se usan cuando la aleación no puede formularse mediante la mezcla de polvos elementales, el acero inoxidable es un ejemplo importante. Los polvos prealeados más comunes son ciertas aleaciones de cobre, acero inoxidable y acero grado herramienta de alta velocidad.

Los polvos elementales y prealeados de uso más común, en orden aproximado de tonelaje, son:

- 1) El hierro, con mucho el metal más usado en M/P, mezclado frecuentemente con grafito para hacer partes de acero,
- 2) El aluminio,
- 3) El cobre y sus aleaciones
- 4) El níquel,
- 5) El acero inoxidable,
- 6) El acero grado herramienta de alta velocidad, y
- 7) Otros materiales de metalurgia de polvos como el tungsteno, el molibdeno, el titanio, el estaño y los metales preciosos.

6.2. Productos de la metalurgia de polvos.

La ventaja sustancial de la tecnología de polvos es que las partes se hacen de forma completa o casi en su totalidad, requieren poco o ningún formado adicional después de procesarse en metalurgia de polvos. Algunos de los componentes más comúnmente manufacturados mediante metalurgia de polvos son: engranes, rodamientos, catarinas, sujetadores, contactos eléctricos, herramientas de corte y varias partes de maquinaria.

La producción en grandes cantidades de engranes y rodamientos se adapta particularmente bien a la metalurgia de polvos por dos razones.

- 1) Tienen geometría definida principalmente en dos dimensiones (la superficie superior tiene cierta forma y hay pocas o ninguna forma lateral);
- 2) Se necesita porosidad en el material para servir como depósito de lubricantes.

Mediante la metalurgia de polvos también se pueden hacer partes más complejas con geometría tridimensional, añadiendo operaciones secundarias como maquinado para completar la forma de las partes prensadas y sinterizadas y observando ciertos lineamientos de diseño.

La industria automotriz es la principal consumidora de partes fabricadas por metalurgia de polvos. El 70% del mercado de las partes de M/P son destinadas a esta industria, en 1990 el típico vehículo familiar contenía cerca de 10.9 Kg de partes de M/P, para 1999 se incrementó a 15.9 Kg, algunos modelos utilizan 27.2 Kg de estas partes, actualmente los vehículos tienen aproximadamente 23 Kg en partes.

Conforme la resistencia y la tolerancia de las partes fabricadas por M/P mejore, el uso de estos productos incrementará. Los ingenieros de la industria automotriz están considerando seriamente el uso de la metalurgia de polvos en las transmisiones automáticas para mejorar la exactitud dimensional y reducir los costos de manufactura. Se estima que este mercado se abra en los próximos dos años y puede ser la aplicación más importante para la metalurgia de polvos durante la siguiente década.

El mercado para las partes de metalurgia de polvos incluye: partes para podadoras, partes para transmisiones y motores automotrices, sistemas de freno, lavadoras, herramientas, partes para fotocopiadoras, navajas, ensambles hidráulicos, protección contra rayos x, componentes para bombas de aceite y gasolina, accesorios para pesca y extensibles para relojes.

6.3. El futuro de la metalurgia de polvos.

Debido al gran éxito que se ha tenido con la metalurgia de polvos, se espera que continúe creciendo en los próximos años, el éxito del proceso de la metalurgia de polvos ha impulsado la industria a nivel mundial a expandirse en nuevos mercados y aplicaciones.

El mercado de los polvos de cobre, aleaciones a base de cobre, aluminio y acero inoxidable tuvieron un crecimiento significativo en 1998.

Las aplicaciones para los polvos de aluminio incluyen pinturas y revestimientos, productos químicos, como elemento de aleación, combustible sólido para misiles, explosivos y pirotecnia y existe un gran interés en aplicar la M/P del aluminio en la industria automotriz.

Las aplicaciones incluyen rodamientos sellados, soportes para espejos, partes para absorber impactos, bombas y barras de conexión.

Gran parte del crecimiento del uso de los polvos de acero inoxidable se ha debido a la gran demanda de bridas y sensores de anillos en el sistema de frenos ABS.

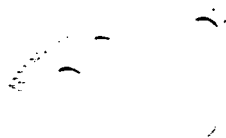
La industria europea de M/P también esta experimentando un crecimiento en el mercado. La industria se esta convirtiendo en un mercado global, consistentemente con el crecimiento del mercado automotriz.

Las mayores oportunidades de crecimiento para la metalurgia de polvos en la industria automotriz, incluyen motores, transmisiones y sistemas de frenos ABS. A medida de que mejore la resistencia y tolerancias, habrá más oportunidad para la M/P.

6.4. Ejemplos de piezas fabricadas con metalurgia de polvos.



Pistón de compensación: es utilizado en la transmisión de un tractor, su función es permitir el paso del aceite en ambos lados del clutch, como resultado se tiene un clutch más suave y consistente.



Marcha de sector de transmisión, es usado en transmisiones y trabaja con otras partes para controlar la flecha, originalmente era producido de acero maquinado.



Anillo guía del motor: es usado como parte del mecanismo de avance para la bomba de inyección de combustible.



Reten de válvula hidráulica: el reten es parte de un grupo de válvulas utilizadas en aplicaciones hidráulicas, originalmente fabricado de acero maquinado.

CAPITULO 7. CONSIDERACIONES DE DISEÑO EN LA METALURGIA DE POLVOS.

7.1. Consideraciones de diseño en la metalurgia de polvos.

El uso de técnicas en la metalurgia de polvos es generalmente apropiado para cierta clase de situaciones, de productos y diseños de partes. En esta sección se definen las aplicaciones donde la metalurgia de polvos es más apropiada. Se verá primero un sistema de clasificación en partes para metalurgia de polvos y luego algunos lineamientos sobre los componentes.

Cuando se fabrican partes con el proceso de compactación en frío y en matriz simple, se deben observar varios elementos de diseño. Uno de ellos es considerar evitar las secciones delgadas y los bordes agudos, como se muestra en la figura. 7.1.



Figura 7.1 Los polvos metálicos no llenan bien los dados que tienen bordes agudos. Deben preferirse diseños con aristas redondeadas.

Las matrices deben tener radios de curvatura grandes como se muestra en la figura 7.2.



Figura 7.2 Se deben evitar esquinas agudas en los ensanchamientos. Se debe tener un radio de curvatura en los cambios de sección.

Los agujeros internos deben tener esquinas redondeadas, figura. 7.3.

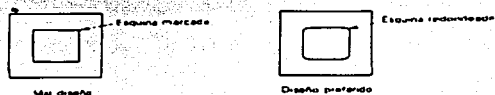


Figura 7.3 Evitense las esquinas pronunciadas. Las formas interiores deben tener esquinas redondeadas

Las aristas externas deben biselarse como se muestra en la figura 7.4.



Figura 7.4 Se emplean ambas clases de bisel, pero el ángulo de 30° es preferible.

Además de evitar ranuras profundas y estrechas (figura 7.5), las salientes de estriados y los chaveteros deben tener bases redondeadas.



Figura 7.5 las ranuras profundas no se hacen fácilmente con los procesos de pulvimetalurgia. Las ranuras de poca profundidad y con fondo redondeado son mejores.

La utilización de procesos de maquinado secundario es práctica común en la fabricación de partes de precisión procesados por pulvimetalurgia. Los barrenos, conicidad, ángulos de salida, avellanados, roscas, moleteados y rebajos se tienen que maquinar, por lo general, después de sinterizar las partes. Los barrenos o agujeros abiertos en la dirección de la compresión se producen con facilidad. Los agujeros redondos son los más fáciles de producir, pero también se hacen con facilidad agujeros de formas especiales, como chaveteros, estrias, perforaciones hexagonales, cuadradas y agujeros de cualquier forma.

Los agujeros que no van en la dirección de la compresión generalmente se tienen que maquinar posteriormente. Mediante diseño se puede eliminar el maquinado secundario (figura. 7.6.1 y 7.6.2), debe mantenerse presente el propósito del rebajo. En este caso, es simplemente un alivio para un casquillo cuyo borde interno no debe hacer contacto con ningún radio de la brida. En la figura 7.6.1 se ilustra un arreglo preferible que cumple con los requisitos y es todavía más fuerte. Los moleteados verticales (rectos) y los estriados se pueden hacer en la dirección de la compresión, pero los moleteados en diamante o angulares no se pueden formar por presión porque dificultarían la extracción de la parte.

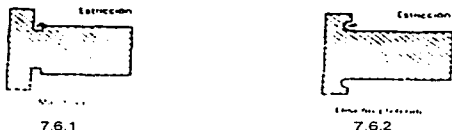


Figura 7.6 Las reducciones como la que se ilustra en 7.6.1) son difíciles de hacer, y requieren de matrices especiales costosas. El diseño de una reducción como en 7.6.2) sirve para el mismo propósito y se hace fácilmente con dados simples de compresión.

La metalurgia de polvos es el método para fabricar levas y engranes. Los trenes de engranes (o grupos de engranes) o de engranes y levas juntos se producen fácilmente por compactación en matrices. Los engranes con esquinas ciegas, tanto internas como externas, son muy difíciles de hacer por medio de procedimientos como maquinado o conformación, sin embargo, se producen fácilmente por procesos de pulvimetalurgia. Los engranes helicoidales con ángulos hasta de 45° se pueden fabricar teóricamente, aunque son más comunes los engranes con ángulos hasta de 30°. Los mamelones de los engranes y catarinas, deben situarse lo más lejos posible de los diámetros característicos del engrane; es decir, el mamelón debe ser tan pequeño como sea posible, mientras mantenga la resistencia mecánica adecuada.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Probablemente la mayor ventaja que tiene el preferir algún proceso de pulvimetalurgia a otros métodos de manufactura es que éste permite el rediseño, con lo que se hace uso de la gran versatilidad de los procesos de metalurgia de polvos. Muchos mecanismos pequeños como los que se encuentran en perforadoras neumáticas, impresoras electrónicas y secuenciadoras, cerraduras para puerta, armas de fuego y máquinas de coser tienen partes pequeñas que a menudo se pueden combinar en una pieza rediseñándolas para usar los procesos de metalurgia de polvos. Por supuesto se puede lograr una reducción en los costos de producción a la vez que se simplifica el mecanismo. La pulvimetalurgia no es adecuada para todo producto metálico, pero siempre se debe investigar su posible aplicación al tomar una decisión para diseñar una parte por fabricar.

7.2 Ventajas que se obtienen al emplear la pulvimetalurgia

La industria pulvimetalúrgica ha crecido a un ritmo de 15 a 20 por ciento anual durante las últimas décadas y se espera que continúe esta tendencia. Las razones residen en las siguientes particularidades del proceso:

- reduce al mínimo las pérdidas de materia prima, puesto que sólo se usa la cantidad de polvo requerida para alcanzar el peso final
- se facilita el control exacto de los límites de composición
- se pueden eliminar o reducir en gran parte las operaciones de mecanizado
- las operaciones pulvimetalúrgicas son susceptibles de automatización
- es posible lograr buenos acabados superficiales, sin rebabas ni líneas de partición propias del moldeo.
- Evita las segregaciones.

Las principales limitaciones que se pueden anotar a esta técnica son debidas a las características siguientes:

- a) La forma de la pieza, la cual debe poder extraerse fácilmente de la matriz, con lo que se elimina una serie de posibilidades de diseño.
- b) Las dimensiones. En efecto, las prensas normales no suelen sobrepasar las 500 Tm; lo cual limita la superficie de las piezas.
- c) Las características mecánicas, pues a las piezas sinterizadas no se les puede exigir las mismas cualidades de alargamiento y resistencia que a las obtenidas por métodos convencionales

- d) La economía, ya que las matrices utilizadas en pulvimetalurgia se fabrican de acero aleado o de carburo de tungsteno, que mejora el control dimensional, y sus acabados son muy difíciles de conseguir. En ambos casos resultan relativamente caras, incidiendo en el precio de los componentes obtenidos pulvimetalúrgicamente. Por esta razón se calcula la amortización de las matrices en la producción de grandes series.

7.3. Sistema de clasificación de partes.

La Metal Powder Industries Federation (MPIF) define cuatro clases de diseño de partes de metalurgia de polvos, atendiendo al nivel de dificultad en el prensado convencional. El sistema es útil por que indica algunas de las limitaciones que deben hacerse en las formas cuando se usan los procesamientos convencionales de metalurgia de polvos. Las cuatro clases de partes se ilustran en la figura. 7.7.

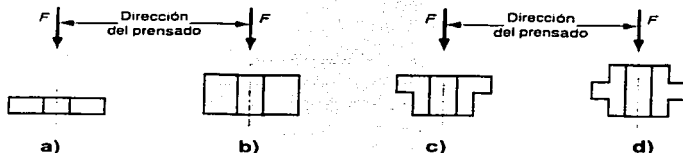


Figura 7.7 Cuatro clases de metalurgia de polvos (vista lateral, la sección transversal es circular): a) clase I, formas delgadas simples que se pueden presionar en una dirección; b) clase II, formas simples, pero más gruesas que requieren presión en dos direcciones; c) clase III, dos niveles de espesor presionados en dos direcciones, y d) clase IV, múltiples niveles de espesor presionados en dos direcciones, con controles separados para cada nivel a fin de lograr una densificación apropiada a través de la compactación

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

7.4. Lineamientos para el diseño de partes en la metalurgia de polvos.

El sistema de clasificación MPIF suministra algunos lineamientos aplicables a la geometría de las partes, apropiada a las técnicas de prensado convencional en la metalurgia de polvos. En los siguientes lineamientos se ofrecen sugerencias de diseño adicionales:

- La economía de los procesamientos mediante metalurgia de polvos requiere grandes cantidades de partes para justificar el costo del equipo y las herramientas especiales necesarias. Se sugieren cantidades mínimas de 10 00 unidades, aun cuando hay excepciones.
- La capacidad de fabricar partes con un nivel controlado de porosidad es una característica única de la metalurgia de polvos. Se pueden tener porosidades hasta de un 50%.
- La metalurgia de polvos se puede usar para hacer partes de metales y aleaciones que no son usuales, o en materiales que podrían ser difíciles o imposibles de producir por otros medios.
- La forma de la parte debe permitir su remoción del dado después del prensado; esto significa en términos generales que la parte debe tener lados verticales o casi verticales, aunque se pueden hacer escalonados como sugiere el sistema de clasificación MPIF (figura. 7.8). Deben evitarse características de diseño como muescas y perforaciones laterales como las que se muestran en la figura. 7.9. Son permisibles las muescas y perforaciones verticales, como las de la figura. 7.10, por que no interfieren con la remoción. Las perforaciones verticales pueden hacerse de sección transversal no redonda (cuadradas o estriadas) sin aumentar significativamente las herramientas o las dificultades de procesamiento.
- Las cuerdas roscadas no se pueden fabricar en metalurgia de polvos, si se necesitan, deben maquinarse en la parte ya sinterizada.
- Los chafanes y las esquinas redondeadas son posibles en el prensado de metalurgia de polvos, como se muestra en la figura 7.10, cuando los ángulos son muy agudos se encuentran problemas con la rigidez de los punzones.
- El espesor de la pared debe tener un mínimo de 0.060 pulg. (1.5 mm) entre dos perforaciones o entre una perforación y la pared exterior de la parte, como se indica en la figura 7.11, el diámetro mínimo recomendado de la perforación es de 0.060 pulg (1.5 mm).

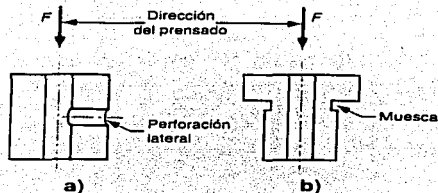


Figura 7.8 Formas de las partes que deben evitarse en la metalurgia de polvos, a) perforaciones laterales y b) muescas laterales. La remoción de la parte es imposible.

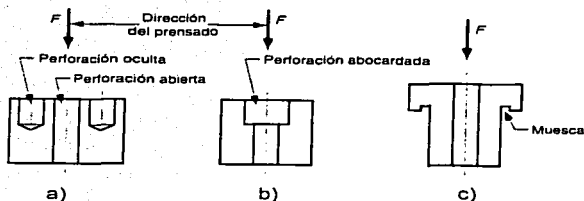


Figura 7.9 Formas permisibles de las partes en metalurgia de polvos: a) perforaciones verticales ocultas y abiertas, b) perforaciones verticales abocardadas y c) muescas en dirección vertical. Estas formas permiten la remoción.

ANÁLISIS CON
FALLA DE ORIGEN

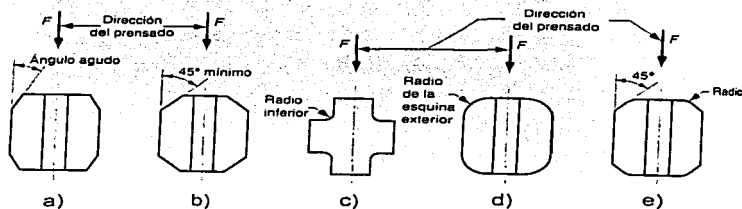


Figura 7.10. Se pueden lograr chaflanes y esquinas redondeadas pero deben observarse ciertas reglas: a) evitense ángulos agudos del chaflán, b) son preferibles ángulos mayores para rigidez del punzonado, c) son deseables los radios interiores pequeños, d) los radios completos en las esquinas exteriores son difíciles por que el punzonado es frágil en los bordes de las esquinas, e) los problemas en las esquinas pueden solucionarse combinando radios y chaflanes.

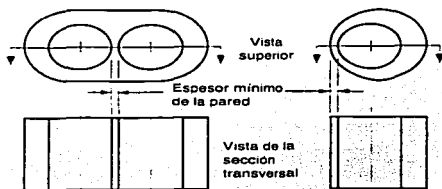


Figura 7.11. El espesor mínimo recomendado para las paredes, a) entre perforaciones, b) entre una perforación y la pared debe ser de 0.060 pulg (1.5 mm).

TRES CON FALLA DE ORIGEN

CAPITULO 8. ALEACIONES POROSAS.

8.1 Porosidad metálica.

Los métodos convencionales de manufactura no sólo no son capaces de fabricar piezas con porosidad controlada prevista, sino que la porosidad normalmente aparece en forma incontrolada como defecto de la técnica de moldeo. No obstante, las aleaciones porosas tienen interés práctico, por que se pueden llenar los poros de aceite, que actúa de lubricante cuando la pieza aleada se emplea como cojinete, o se pueden utilizar como filtro en las operaciones de filtrado, o como absorbentes de ruido. Evidentemente la resistencia mecánica de las piezas porosas es inferior a la de las piezas macizas, de modo que una pieza que tiene un 30 por ciento de porosidad ofrece una resistencia que es la mitad de la que tendría la misma pieza si no tuviera porosidad.

La porosidad indica el grado de compactación de la partícula de polvo. Se puede distinguir dos tipos de porosidad, según el poro se encuentre en la superficie o interior de las partículas de polvo, y que se denomina como porosidad externa y porosidad interna respectivamente. Los polvos de hierro obtenidos por reducción de sus óxidos presenta microporosidad interna. En cambio, los polvos de acero atomizados previa reducción de sus óxidos formados presenta cierta porosidad superficial, siendo sus núcleos compactos, los polvos de procedencia electrolítica presentan características semejantes a estos últimos.

A su vez en la porosidad interna pueden distinguirse dos tipos de poros; el tipo esponja en el cual los poros se presentan como un conjunto de huecos aislados, y el tipo erizo, en el cual los poros están interconectados. La porosidad interna se detecta mediante observación al microscopio o por medio de mediciones de densidad. La porosidad de tipo erizo, así como la porosidad superficial, producen elevados valores de superficie específica, fáciles de detectar.

La parte llena de una masa de polvos, a la que no se haya aplicado ninguna presión, representa el 50 por ciento del volumen de la misma y el resto es porosidad. Compactando esta masa mediante presión, se cambia su forma, pero permanece constante la cantidad de materia sólida, es decir, cambia la porosidad total.



En un sistema poroso conviene distinguir una serie de conceptos relacionados con la porosidad, tales como:

1) Porosidad total o volumen total de poros, P .

La porosidad total indica, conocida la naturaleza del polvo, la presión de compactación y/o las condiciones de sinterización. La porosidad total se determina experimentalmente por medidas de densidad.

2) Número de poros, n .

El número de poros está relacionado con el tamaño de las partículas de polvos de partida y con las condiciones de la operación de sinterización. Este número es tanto mayor cuanto menor es el tamaño de las partículas de partida y cuanto más baja es la temperatura de sinterización. Si el compacto en verde se sinteriza a alta temperatura se obtienen pocos poros de gran tamaño.

3) Volumen de los poros cerrados, P_c .

La presencia de poros cerrados en una pieza pulvimetalúrgica es indicio de que ha estado sometida a la etapa de sinterización.

4) Volumen de los poros interconectados, P_i .

Los poros interconectados son los presentes en el polvo (100 %) antes de sinterizarlo, en cuyo proceso van desapareciendo.

5) Tamaño y distribución de los poros.

El tamaño de los poros se suele expresar por su diámetro. En una masa de polvo, en un compacto en verde y en una pieza sinterizada, normalmente no existe un tamaño único de poro, sino una distribución en torno a un tamaño medio más o menos cuantiosa.

6) Tamaño medio de los polvos.

Aunque el dato de la distribución de poros es de gran interés práctico también es de utilidad considerar el tamaño medio de los poros. Este diámetro se obtiene a partir de la porosidad total, P , y del número de poros n , cumpliéndose la siguiente ecuación:

$$\frac{\pi d_{pm}^3}{6} = \frac{P}{n}$$

Donde d_{pm} es el diámetro medio de los poros.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

7) Forma y factor de forma de los poros.

Una característica de capital importancia para definir la porosidad es la forma de los poros. Fundamentalmente, se distinguen los poros cerrados y los poros abiertos. El factor de tamaño se define como la relación entre el perímetro de la sección del poro dividido por la longitud de la circunferencia del círculo de área equivalente. La presencia de poros circulares en una pieza de procedencia pulvimetalúrgica indica que se han alcanzado las condiciones óptimas de sinterización.

8) Orientación de los poros.

Los poros, como las partículas de fase dispersa dentro de una matriz metálica, se orientan en dirección perpendicular a la presión aplicada.

9) Contenido gaseoso de los poros.

La naturaleza del gas que llena los poros repercute decisivamente en el comportamiento del poro durante la sinterización.

10) Actividad de los poros.

La actividad de la superficie del poro es función de la naturaleza del metal que forma la superficie, del gas que llena el poro, de la presión aplicada al poro y de la concentración de vacantes que existe en la zona vecina a la superficie del poro.

11) Relación poro-límite de grano.

La posición de los poros con respecto a la posición de los límites de grano influye en las propiedades mecánicas de las piezas porosas, las cuales disminuyen a medida que se hace mayor el número de poros situados en los límites de grano.

En el proyecto de fabricación de una pieza hay que tener en cuenta que la granulometría y la razón de compresión están relacionadas con el nivel de porosidad requerido. Este nivel es inversamente proporcional a la resistencia mecánica de la pieza y suele ser un compromiso entre la resistencia mecánica y la impregnabilidad de la pieza.

8.2 Sellado de porosidades

La microporosidad de las piezas de fundición y de metal sinterizado puede abrir vías de fuga a presión y degradar la calidad de los acabados superficiales. La impregnación de estas piezas porosas incrementa potencialmente su potencial de diseño, creando nuevas oportunidades de producto.



Figura 8 1 obtención de piezas impregnadas con resina para garantizar la ausencia de fugas

Los diseños de productos avanzados y las nuevas técnicas de fabricación requieren métodos modernos para el sellado de microporosidades en piezas de metal fundido, en piezas de metal sinterizado, soldaduras y otros sustratos porosos. El conocimiento cada vez mayor de las ventajas de los modernos selladores de porosidades y de sus métodos de aplicación, junto con unos requisitos de calidad más estrictos, han impulsado los recientes avances de esta tecnología de fabricación. La impregnación al vacío como medio fiable de sellado de porosidades en diversos sustratos goza actualmente de alta prioridad. La capacidad de sellar poros de modo permanente y rentable ha elevado lo que antes era una intervención de reparación a la categoría de operación de fabricación fiable e importante herramienta de diseño.

Los antiguos materiales de impregnación con resina no convencían a los fabricantes porque ensuciaban las piezas con residuos pegajosos, produciendo un sellado inconsistente, eran poco fiables a largo plazo y se tenían problemas ambientales. La impregnación se consideraba una operación de recuperación de dudoso valor.

El cambio de actitud ha sido total. Actualmente, los diseñadores están creando nuevas piezas de fundición a presión, de paredes finas y de escaso peso, de uso en aplicaciones con fluidos a alta presión, que no serían posibles sin nuevos y complejos selladores y sistemas de impregnación al vacío.

La industria pulvimetalúrgica también ha desarrollado una revolución considerable gracias al desarrollo de métodos de sellado fiables. Las porosidades inherentes a las piezas de metal sinterizado se sellan ahora de manera fiable y permanente, de manera que pueden utilizarse en sistemas hidráulicos e incluso en sistemas con gases inflamables sin temor de fugas.

Además el sellado con resina de los poros del metal sinterizado es actualmente un importante paso preparatorio para el revestimiento electroquímico, para el pintado y para otras operaciones de acabado, y mejora en gran medida sus propiedades de mecanización. Los mismos selladores y métodos de aplicación que sellan las porosidades de un metal evitan además las fugas derivadas de las porosidades microscópicas en los compuestos plásticos y en otros sustratos no metálicos. La demanda de productos y servicios de impregnación se ha multiplicado varias veces en los últimos años, como se muestra en la figura 8.2

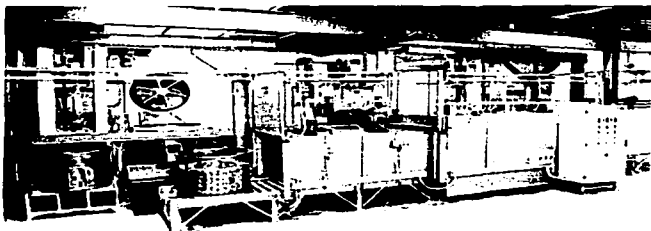


Figura 8.2 Sistema de impregnación completamente automatizado y controlado por ordenador. Funciona por el principio de vacío seco / presión

8.3 Impregnación como herramienta de diseño

Los diseñadores que intentar disminuir el peso o el costo de los montajes han encontrado un nuevo aliado en la impregnación, que les permite diseñar piezas de fundición a presión con paredes más finas o cambiar a métodos de menor costo. Los modernos sistemas de impregnación están tan aceptados en la actualidad y han demostrado ser tan efectivos y económicos, que se ha abandonado el tradicional ensayo de fugas de las piezas de fundición intensamente mecanizadas a favor de la impregnación de las piezas al cien por ciento. Por ello, con las piezas de fundición, el metal sinterizado y con sustratos de otros materiales, la moderna impregnación con resina se ha convertido en una herramienta de diseño y fabricación avanzada. En la figura. 8.3 se muestra algunas piezas impregnadas.



Figura. 8.3 Ejemplo de obtención de piezas impregnadas que incluyen piezas hidráulicas

Existen dos tipos de porosidades: macroporosidades y microporosidades. Las macroporosidades suelen requerir un segundo proceso, porque los huecos de la pieza son de tamaño suficiente para afectar a la integridad estructural. Las microporosidades no afectan a la resistencia estructural y son el resultado de dos fenómenos físicos que ocurren cuando el metal trabajado se solidifica:

- formación de cristales y contracción
- absorción de gases

los defectos superficiales visibles no suelen mejorar con el sellado por impregnación. El sellador desaparece de estos defectos durante el proceso, dejándolos inalterados. Las porosidades de menor tamaño, de escala microscópica, tanto si se deben a inclusiones de gases como a la contracción, pueden sellarse fácilmente con la impregnación. El poro puede sellarse incluso si es de tamaño relativamente grande en la pieza mecanizada.

La mayoría de las aplicaciones de impregnación afectan a piezas con porosidades muy pequeñas. Suele ser posible demostrar la presencia de porosidades sometiéndola a la pieza terminada a presión con aire comprimido u otros gases, con la pieza sumergida en agua para ver salir burbujas de aire del metal.

Suelen plantearse dudas acerca del tamaño de los poros que pueden sellarse de manera consistente, pero no existe una respuesta definitiva a esta cuestión. Cada caso se ve afectado por diversas variables, así que no sería realista formular una norma general relativa a los tamaños concretos de las fugas que es posible sellar. Por ejemplo, un poro de un tamaño que podría sellarse fácilmente en una pieza de paredes gruesas podría ser muy difícil de sellar en una pieza de paredes muy finas. Esto es debido a que la acción de arrastre del aclarado de la impregnación podría tener más posibilidades de eliminar el sellador del poro de la pared fina.

La única manera útil de determinar la capacidad del proceso de sellado para una determinada configuración de piezas es impregnar muestras de piezas con tasas de fuga conocidas y ensayar los resultados. Este tipo de trabajo se realiza en los laboratorios de impregnación de Loctite (como se muestra más adelante).

La razón por la que suele procederse a la impregnación de partes, es que éstas sean capaces de retener fluidos a presión. Como ejemplo tenemos:

- componentes de bombas
- bombas de sistema de combustible
- reguladores
- filtros
- distribuidores
- carburadores
- bombas de refrigerante
- cajas de engranajes

Impregnadas adecuadamente, estas piezas sellan permanentemente y pueden mantener presiones significativas.

El método de impregnación para sellar porosidades, también se utiliza como preparativo para operaciones de acabado de metales, tales como el pintado o el revestimiento electroquímico. Si no se sellan los poros, pueden absorberse los fluidos durante las operaciones de acabado. Estos fluidos atrapados pueden emerger posteriormente, atacando el revestimiento de acabado desde dentro y causando en el mismo picaduras u otros defectos. Las erupciones que aparecen en los hornos de curado de pintura suelen ser causadas por gases o líquidos que emergen de los poros. Algunos defectos de las porosidades pueden no aparecer en el acabado superficial hasta bastante tiempo después de haberse completado todo el proceso, quizás ya durante la vida útil del producto.

8.4 Impregnación de piezas de metal sinterizado

Las porosidades inherentes, que son un resultado natural de la producción de piezas sinterizadas, han convertido la impregnación con resina en el compañero perfecto de esta tecnología de producción única. La impregnación al vacío con resinas anaeróbicas de Loctite se utiliza mucho para sellar los poros de las piezas sinterizadas. De hecho, las porosidades son tan extensas en este tipo de piezas que los productos anaeróbicos de Loctite que curan a temperatura ambiente son el método más utilizado para el sellado de piezas sinterizadas.

**TESIS CON
FALLA DE ORIGEN**

Los selladores de curado por calor no ser suelen adecuados para las piezas sinterizadas debido a los problemas relacionados con el inevitable sangrado durante el curado por calor.

Muchos de los programas de producción de piezas sinterizadas que han tenido éxito no serían posibles sin la alta fiabilidad de los sistemas de impregnación de Loctite. Cada año se producen millones de piezas sinterizadas para sistemas hidráulicos. El aceite hidráulico a alta presión podría pasar fácilmente a través de piezas sinterizadas no impregnadas con resina.

Al igual que las piezas fundidas, las piezas sinterizadas también suelen impregnarse para evitar que las soluciones penetren por las porosidades y aparezcan en algún momento posterior, después de aplicada la pintura de acabado. Este tipo de defecto de los acabados aplicados suele tomar la forma de picaduras o ampollas en la pintura.

Una aplicación de la impregnación de piezas sinterizadas cuya demanda está creciendo rápidamente es la mejora de las propiedades de mecanización de piezas taladradas, atarrajadas, mandrinadas, fresadas o sometidas a otro tipo de mecanizado con herramientas de corte después del sinterizado.

La resina de impregnación endurecida dentro de los poros contribuye a amortiguar el filo cortante de la herramienta cuando atraviesa la estructura del metal, prolongando en gran medida la vida útil de la herramienta.

Sin impregnación, el filo de la herramienta nota interrupciones al cortar el metal. Esto crea vibración y reduce drásticamente la vida útil de la herramienta de corte. Además, genera grandes alteraciones de las tolerancias de mecanizado. Con una pieza impregnada, la herramienta de corte nota una carga más constante al cortar el metal. En ensayos controlados, la vida de la herramienta se alargó varios cientos de veces en algunos casos y el mecanizado pudo realizarse a velocidades muy superiores con sólo impregnar las piezas sinterizadas. El control dimensional de las piezas mejora de manera importante, de modo que los métodos de control de proceso estadístico son más efectivos. Actualmente, muchas piezas sinterizadas se impregnan exclusivamente por las ventajas que representa para el mecanizado.

8.4.1 Cuando impregnar

Las piezas deben mecanizarse, limpiarse y secarse por completo antes de la impregnación. Al mecanizarse las piezas, puede que se ponga de manifiesto más porosidad interna y el sellador de impregnación sólo podrá alcanzar todas las áreas que debe sellar una vez finalizado el mecanizado.



Es importante que las piezas estén limpias y secas, de modo que los poros no queden bloqueados por materiales extraños que puedan impedir la plena penetración del sellador de impregnación. Las piezas deben estar a temperatura ambiente en el momento de la impregnación.

Las piezas sinterizadas deben impregnarse después del sinterizado y antes de cualquier operación secundaria. Normalmente las porosidades están totalmente abiertas en ese momento y el sellador de impregnación pueden llenar por completo. Además, este proceso sirve para mejorar posteriores operaciones de mecanizado o de acabado.

El revestimiento electroquímico, el pintado y demás operaciones de acabado de piezas de fundición o sinterizadas deberán realizarse cuando la impregnación se haya completada y el sellador haya curado plenamente. El sellador curado de las piezas impregnadas no se ve afectado por las diversas operaciones de limpieza y decapado que suelen darse en el proceso de acabado. Incluso si se utilizan soluciones muy ácidas en el acabado, el sellador no se verá afectado por una breve exposición a estos fluidos.

8.5 Productos de impregnación de Loctite

8.5.1 La ventaja anaeróbica

La capacidad de autocurado exclusiva del sellador anaeróbico RTC de Loctite, junto con la capacidad de regular la velocidad de curado, ha hecho de éste el más fiable de los materiales para sellar porosidades en piezas metálicas y no metálicas. Se impide que el sellador líquido polimerice de manera natural aireándolo ligeramente y manteniéndolo a una temperatura baja y constante. Cuando se impregna una pieza, el producto deja de recibir el aire que lo estabiliza y comienza a solidificar químicamente. El contacto con el metal contribuye a promover el curado, al igual que la aplicación de curado y ciertos catalizadores químicos. El calor, los metales y los catalizadores no son esenciales para el proceso de curado, pero pueden utilizarse para regular la velocidad de la reacción de curado. Controlando la velocidad de curado, o reactividad, es posible sintonizar el sistema sellador para obtener resultados óptimos en cada aplicación. En el proceso de sellado también puede utilizarse un enjuague con activador opcional para agilizar el curado del sellador en los poros de mayor tamaño.

La capacidad de curar sin calentar las piezas, combinada con el uso de enjuague con activador, proporciona al sellador anaeróbico una capacidad muy superior para sellar poros de muy diversos tamaños, especialmente los más grandes.

Con RTC, el sellador no sangra, de modo que las piezas no se ensucian y el sellado alcanza un alto rendimiento constante.

La fiabilidad del autocurado por medio de selladores anaeróbicos garantiza el correcto sellado de las piezas impregnadas. El proceso de curado no depende del operario.

8.5.2 Curado a temperaturas elevadas

Los sistemas de impregnación que utilizan el curado con agua caliente para polimerizar el sellador dentro de las piezas, ofrecen ventajas en la medida que quieren equipos más sencillos y un mantenimiento ligeramente menos laborioso. El resinol 90° de Loctite se desarrollo específicamente para satisfacer las exigencias de los fabricantes, que necesitan un método de sellado de porosidades mejor que el rociado, pero sin las exigencias de mantenimiento de un sistema anaeróbico.

El resinol 90° de curado con agua caliente es el producto de impregnación más simple que existe en la actualidad, sin embargo, ofrece excelentes resultados en una gran variedad de aplicaciones de sellado de porosidades. A diferencia de otros selladores de curado por calor, el resinol 90° c es un producto sellador de un solo componente: no requiere catalizadores, detergentes ni agentes de curado.

Lo único que se utiliza en el proceso es el sellador resinol 90°c y agua. Como no necesita mezclarse con un catalizador, no existe la posibilidad de que el operario cometa un error que origine problemas de proceso por falta o exceso de catalizador. Por lo tanto, este material producirá resultados constantes. El exceso de material se elimina fácilmente lavando las piezas con agua corriente, logrando una limpieza excelente incluso en las piezas más difíciles. El curado final tiene lugar en un tanque de agua caliente a 90°c. A esta temperatura, el sellador cura en ocho o diez minutos.

Cuando se introducen las piezas impregnadas en el tanque de agua caliente para que curen, suele producirse cierto sangrado del sellador. Este sangrado se produce cuando se calientan las piezas y, al dilatarse la resina con más rapidez que el metal, se produce una expansión térmica. La consecuencia es cierta reducción de la calidad del sellado y el posible ensuciamiento de las superficies de las piezas. La agitación de las piezas durante la inmersión en agua caliente puede reducir su ensuciamiento con el sangrado, aunque puede persistir dentro de los alojamientos de los tornillos y en otras pequeñas cavidades.

Los operarios que trabajan cerca de los tanques de agua caliente deben tener cuidado porque el agua alcanza una temperatura próxima al punto de ebullición. Cada vez que se abra el tanque de agua saldrá vapor y puede ser conveniente utilizar ventilación.

Los calentadores de los tanques de agua caliente deben tener capacidad suficiente para mantener la temperatura específica del agua para lograr el correcto curado del sellador.

La operación debe controlarse para garantizar que las piezas permanezcan en agua caliente durante tiempo suficiente para curar el sellador por completo. Si no se cumplen los requisitos de tiempo y temperatura, puede ocurrir que las piezas salgan de la operación de sellado sin curar o con un curado incompleto.

8.5.3. Propiedades de los selladores curados

En términos generales, los selladores curados son adecuados para un servicio continuo de hasta 200° C. Una breve exposición a temperaturas más altas, como puede ocurrir en los hornos de pintura, no acarreará normalmente ninguna dificultad.

Estos selladores pueden utilizarse con éxito en ambientes de altas temperaturas tales como bloques de motores de automoviles, culatas de cilindros y bombas de refrigerante. El sellador curado es un plástico termoestable que no se funde, ni se licua, ni fluye fuera de las piezas a temperaturas elevadas. Si se opera fuera de los límites de temperatura recomendados durante largo tiempo el sellador curado perderá lentamente peso y se convertirá en ceniza.

Los selladores de impregnación de Loctite se han ensayado ampliamente para determinar su resistencia a combustibles, lubricantes, refrigerantes, limpiadores y otros productos químicos que pueden encontrarse en ambientes de automoción, aeroespaciales, electrónicos y de la industria en general.

8.5.4. Selección de productos de impregnación de Loctite

La impregnación anaeróbica suele recomendarse para situaciones de producción de gran volumen, donde se requieren altísimos porcentajes de éxito en el sellado de las piezas (rendimiento del 99%). La impregnación con RTC (curado a temperatura ambiente) suele emplearse como un proceso de fabricación en línea, tratando cada pieza, en lugar se sólo aquellas que fugan.

Los productos de impregnación anaeróbica siempre se recomiendan para la impregnación de piezas sinterizadas. La gran porosidad típica del metal sinterizado provoca problemas de sangrado cuando se utilizan selladores de curado por calor. Los anaeróbicos de curado a temperatura ambiente, sin sangrado, dan resultados de calidad superior.

El resino. 90°C (curado a temperaturas elevadas). Recomendado para impregnaciones de recuperación, para impregnaciones de bajo a medio volumen de producción, para todo servicio de impregnación en el que la sencillez y la facilidad de mantenimiento sean prioritarias o cuando el sistema de impregnación vaya a utilizarse de manera ocasional o intermitente.

Es ideal para sustituir productos de impregnación más antiguos en equipos de proceso existentes sin realizar grandes modificaciones. Está completamente exento de problemas de higiene y seguridad.

8.6. Tecnología del proceso

Pueden utilizarse diversos métodos para impregnar piezas. El método seleccionado dependerá del sellador a utilizar y de las necesidades de las piezas.

Vacío en seco / presión: este método de impregnación al vacío es el más lento y el más complicado.

El ciclo de impregnación al vacío, descrito a continuación, necesita dos tanques, uno que contiene el sellador y otro en el que se procesan las piezas:

- Se aplica vacío en el tanque de proceso para eliminar el aire de los poros de las piezas
- Se transfiere el sellador del tanque de almacenamiento al tanque de proceso y sumerja las piezas, todavía en vacío.
- Se elimina el vacío y presuriza el tanque de proceso con aire comprimido
- Se anula la presión y vuelva a transferir el sellador al tanque de almacenamiento
- Por último se retiran las piezas. Límpielas y ejecute los demás pasos del proceso.

El proceso de vacío en seco / presión se ha utilizado tradicionalmente con selladores de alta viscosidad. Este método de aplicación se especifica a veces con selladores modernos cuando las porosidades son muy pequeñas y los requisitos de sellado son especialmente estrictos.

Vacío húmedo / presión: este método de proceso sólo necesita un tanque. Las piezas se sumergen en el sellador, que permanece en el tanque de proceso en todo momento. El vacío se aplica a las piezas y al sellador en conjunto, seguido de presurización con aire comprimido:

**TESIS CON
FALLA DE ORIGEN**

- Se aplica vacío en el tanque de proceso para eliminar el aire de los poros de las piezas
- Se elimina el vacío y presuriza el tanque con aire comprimido
- Se elimina la presión
- Por último se retiran las piezas, limpielas y ejecute los demás pasos del proceso

El proceso de vacío húmedo / presión se recomienda a veces para el proceso de producción de piezas de fundición con porosidades muy finas y para piezas sinterizadas de alta densidad.

Vacío húmedo: éste es el más sencillo y rápido de los métodos de impregnación al vacío. Es parecido al método de vacío húmedo / presión, excepto que no se presuriza el tanque. En lugar de ello, simplemente se ventila el tanque con el aire atmosférico después de la fase de vacío.

La penetración del sellador en las piezas se produce a presión atmosférica. La resina fluye llenando el vacío creado de las porosidades de las piezas:

- Se aplica vacío para eliminar el aire de las porosidades
- Se elimina el vacío y ventila el tanque a presión atmosférica
- Es necesario dejar las piezas en remojo brevemente, mientras penetra el sellador
- Por último retirar las piezas, limpiarlas y ejecutar los demás pasos del proceso

La impregnación al vacío húmedo, es por mucho, el método más utilizado. La sencillez y rapidez del proceso, junto con el menor costo de equipo, hacen que sea el método preferido en la mayoría de instalaciones de impregnación.

8.7 Bronces autolubricantes.

En el campo de las aleaciones porosas, las piezas más abundantemente fabricadas son los cojinetes de bronce autolubricantes. La mayoría de ellos se obtienen mezclando polvos de cobre y polvos de estaño en la proporción 90:10, que se aglomeran a una razón de compresión de aproximadamente 2.5, se sinterizan calentando durante media hora a 850°C en atmósfera de amoníaco disociado, se calibran para ajustar las tolerancias y se impregnan de aceite al vacío.

El proceso de la sinterización de piezas de bronce autolubrificantes origina grandes cambios dimensionales. Permaneciendo la temperatura fija, a medida que aumenta el tiempo de sinterización, se pueden seguir los cambios registrados en la figura 8.3. En primer lugar la pieza se dilata y luego se contrae un poco; seguidamente vuelve a dilatarse mucho más y se vuelve a contraer. La contracción final se explica porque los límites de grano actúan de sumidero.

En la fabricación de cojinetes de bronce autolubrificantes, a veces a la mezcla de polvos de cobre y estaño se añade níquel, fósforo o hierro, que aumentan la resistencia mecánica, o bien se añade grafito o plomo que reemplazan la impregnación de aceite.



Figura 8.3 Cambios dimensionales que ocurren en la sinterización de compactos de polvos elementales (90% Cu y 10% Sn) vs tiempo de permanencia a la temperatura de sinterización.

8.8 Níquel poroso.

Actualmente han adquirido gran importancia las placas de níquel porosas destinadas a ser utilizadas como electrodos en los acumuladores de níquel-cadmio. En estos acumuladores el ánodo es de níquel poroso impregnado de hidróxido de cadmio y el cátodo es también una placa porosa de níquel, que almacena hidróxido de níquel. Se fabrican con un soporte central que suele consistir en una tela de níquel. Los polvos de níquel excarbonilo se colocan a ambos lados de la tela metálica y, sin compresión se sinterizan calentando en atmósfera de hidrógeno-nitrógeno a temperaturas comprendidas entre 800-1000°C con lo cual se obtienen una porosidad del 75 % y un tamaño de poro comprendido entre 5 y 50 μ .

8.9 Implantes.

La porosidad de las piezas pivmetalúrgicas encuentra aplicación en medicina, con preferencia a las piezas macizas, cuando se trata de aplicaciones internas en forma de implantes para reparar huesos rotos. La porosidad superficial de los implantes metálicos ayuda al crecimiento del tejido óseo que está en contacto con ella, consiguiéndose uniones más perfectas que con las piezas macizas. Por otra parte, la porosidad superficial de los implantes puede actuar de almacén de antibióticos, disminuyendo los riesgos de infección. Los implantes se fabrican de acero inoxidable, cobalto y titanio.

8.10 Aleaciones antifricción.

Los primeros intentos de fabricar aleaciones que ofrecieran poco rozamiento a los ejes se deben a Hopkins, que construía cojinetes de bronce y los recubría con una capa de metal más plástico, fuere por estañado o por emplomado, lo cual facilitaba el rozamiento y el montaje. El inconveniente principal de este procedimiento residía en la excesiva plasticidad del plomo.

Las propiedades idóneas que deben presentar los materiales para minimizar las pérdidas de energía por rozamiento tienen carácter opuesto: resistencia al desgaste y plasticidad. Interesa que los metales que rozan tengan gran dureza para ofrecer resistencia al desgaste y también interesa que los metales que rozan tengan plasticidad para ajustarse entre sí.

Las soluciones a estas exigencias pueden consistir en:

- a) Obtener una aleación que aporte las dos propiedades antes mencionadas. Por ejemplo, un material que contenga partículas de gran dureza incrustadas en una matriz plástica, como es la formada por estaño, antimonio o cadmio.
- b) O bien preparando un metal plástico embebido en una matriz más dura, como por ejemplo, 30% de plomo distribuido en un 70% de cobre.
- c) Estando en servicio una pieza de esta aleación, el metal plástico y de bajo punto de fusión exuda de la matriz debido al calor generado por el roce y actúa como una película intercalada entre el eje y el soporte. Las aleaciones que tienen estas propiedades se utilizan cuando se trabaja a presiones más severas que las requeridas en la solución apuntada anteriormente.

Las aleaciones cobre-plomo, debido a la total insolubilidad de uno en otro en estado sólido y debido a la limitada solubilidad en estado líquido, sólo se pueden fabricar desde el punto de vista pulvimetalúrgico. Se suelen fabricar comenzando por un cobreado químico, sumergido en una plancha de acero dulce en una disolución de iones de cobre. Se distribuye a continuación la mezcla de polvos metálicos encima de la plancha, que se introduce dentro del horno de sinterización con atmósfera de amoníaco.

Después, la plancha con la aleación sinterizada se lamina con un ángulo de ataque permitido y se vuelve a sinterizar.

Las piezas de bronce al plomo, utilizadas como cojinetes, también se pueden fabricar a partir de polvos aleados de cobre-plomo, en la proporción 70/30. Estas piezas, además de sus propiedades antifricción, se caracterizan por su resistencia a la fatiga mecánica.

8.11 Filtros metálicos.

Se entiende por filtración la operación por la cual se separan los sólidos finamente divididos de los fluidos, en cuyo seno están suspendidos, utilizando una superficie permeable a los fluidos, es decir, un filtro.

Esta operación constituye una operación unitaria muy utilizada en el ámbito industrial.

De la amplia gama de filtros ofrecida por el comercio, el diseñador debe elegir, por lo general, los que satisfagan en mayor grado las siguientes exigencias:

Tener una porosidad uniforme y una permeabilidad elevada; presentar propiedades mecánicas favorables, estabilidad a los cambios térmicos y resistencia a los medios agresivos, ser de fácil mantenimiento, es decir, fácil de desobstruir y de montar y ajustar en la mayoría de los materiales.

El problema que suele presentarse en la industria es encontrar un filtro que tenga gran resistencia mecánica, porosidad controlada, resistencia química y que no sea afectado por cambios bruscos de temperatura.

Algunos tipos de filtros metálicos son:

1. Filtros fabricados con materiales cerámicos, de gran resistencia a la corrosión, pero no a los cambios bruscos de temperatura.
2. Filtros fabricados con tejidos (lana, algodón, nylon, papel) de porosidad muy uniforme, pero de utilización muy limitada por su poca resistencia a la presión y a la temperatura, y que presentan dificultades de acoplamiento mecánico.
3. Filtros de arena, carbón, tierras absorbentes, empleados solamente cuando la cantidad de sólidos a filtrar es pequeña.

La ingeniería metalúrgica está fabricando filtros metálicos, estos filtros ofrecen las características propias del estado metálico y las inherentes al proceso de fabricación.

La ventaja de los filtros metálicos, obtenidos por pulvimetalurgia, residen en su largo periodo de utilización y simplicidad de mantenimiento; sólo requieren ser lavados o que se les infundiera aire de vez en cuando. Además, pueden funcionar eficazmente en un gran intervalo de temperaturas, los filtros metálicos obtenidos pulvimetalúrgicamente aventajan a todos los demás tipos de filtros.

8.10.1. Aplicaciones de los filtros metálicos.

Los filtros metálicos, debido a sus singulares características mecánicas, encuentran gran aplicación en la industria química, petroquímica y metalúrgica. Se emplean como filtros de aceite para bombas de inyección de los motores diesel, como filtros de freón empleados en los refrigeradores; como fondo poroso en los montajes de lechos fluidificados, en la separación de isótopos; como silenciadores de doble expansión, placas de acumuladores, pantallas en instalaciones de gases inflamables, etc. Es decir, donde se necesite un medio filtrante sometido a desfavorables condiciones mecánicas, químicas y térmicas.

El rendimiento de un filtro metálico será función del material elegido para cada empleo determinado. Los materiales más utilizados son: bronce, acero inoxidable, titanio, aleaciones base níquel y titanio.

a) Bronce.

Se utiliza la aleación 90/10, que resiste perfectamente hasta los 200 °C en condiciones oxidantes o 350 °C en condiciones no oxidantes. Económicamente resultan aconsejables por su relativo bajo costo.

b) Acero inoxidable.

Se emplean los tipos AISI 316 y 304, que resisten temperaturas superiores a 350°C, en presencia de ácidos oxidantes y ausencia de cloruros. En condiciones menos agresivas, la temperatura de trabajo puede elevarse sustancialmente sin riesgo de corrosión.

c) Aleaciones base níquel.

Los filtros de metal monel resisten en condiciones reductoras con carácter ácido, incluso en presencia de cloruros; aunque en estas condiciones se prefieren los filtros de níquel-molibdeno y circonio.

d) Titanio.

Bajo severas condiciones corrosivas los filtros fabricados con titanio son ampliamente utilizados. Son indicados en analizadores de flujo con problemas de muestras difíciles. Por ejemplo, han sido empleados como filtros en analizadores de muestras relativamente depuradas, para impedir obstrucciones en las finas aberturas de ciertos analizadores de líquidos, y para mantener gotitas de líquido apartadas de ciertos analizadores de gases que, de otra forma, resultarían dañados.

CAPITULO 9. ACEROS ALEADOS.

9.ACEROS ALEADOS.

9.1. Métodos de obtención de los aceros aleados.

Las aleaciones suelen tener propiedades distintas que los metales elementales, siendo las propiedades mecánicas de las aleaciones superiores a la de los metales elementales, por ese motivo se fabrican componentes aleados. Cuando interesa conseguirlos pulvimetalúrgicamente, se operan en tres maneras:

- 1) Mezclado de polvos elementales
- 2) Utilizando polvos semialeados
- 3) Utilizando polvos atomizados de un lingote de aleación

El atomizado tiene la ventaja de ser el procedimiento que logra una distribución más homogénea de la aleación, pero resultan unos polvos endurecidos y de elevado costo y las pérdidas de material son considerables.

Considerando los elementos aleantes, debe hacerse una distinción entre elementos aleantes metálicos y no metálicos, ya que contienen velocidades de difusión bastante diferentes, y por lo tanto, requieren tiempos de sinterizado distintos para obtener una estructura homogénea.

La aleación hecha mezclando el polvo con las cantidades correctas de elementos metálicos requiere un tiempo muy largo de sinterizado para lograr una estructura homogénea. Para reducir el tiempo requerido de sinterización se prefieren los polvos prealeados, ya que la presión de compresibilidad no es muy grande (como se muestra en la figura 9.1).

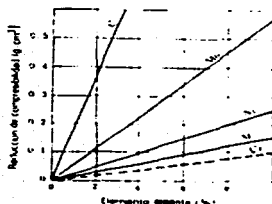


Figura 9.1 influencia de los elementos aleantes en la compresibilidad de los polvos de acero

En general el polvo de hierro debe contener cantidades muy pequeñas de carbono y otros elementos aleantes no metálicos, ya que estos incrementan la dureza y disminuyen la compresibilidad. La compresibilidad se mide como la densidad obtenida con una presión de compactación de 400 N/mm², el método preferido es mezclar el polvo con grafito (1% de grafito da como resultado un acero con 0.8% de C después de la sinterización) de tal manera que se conserve una buena compresibilidad.

Cuando se opera con polvos elementales normalmente se consigue una elevada compresibilidad, sobre todo si son de procedencia electrolítica; pero los fenómenos de difusión necesarios para lograr la aleación homogénea suelen ser deficientes.

Los polvos semialeados, entendiéndolos por tales, los conseguidos después de permanecer la mezcla de polvos elementales cierto tiempo a temperaturas de trabajo en el horno de sinterizar, conservan, en parte, las ventajas de los polvos elementales y adquieren alguna de los polvos atomizados. Es este, por tanto, un procedimiento muy interesante para sinterizar aceros al níquel y al molibdeno.

La microestructura de las piezas obtenidas a partir de polvos semialeados aparece con mejor distribución que la de las obtenidas con mezcla de polvos elementales. Es decir, las propiedades mecánicas elevadas se obtienen partiendo de polvos aleados y semialeados. Como se muestra en la figura 9.2.

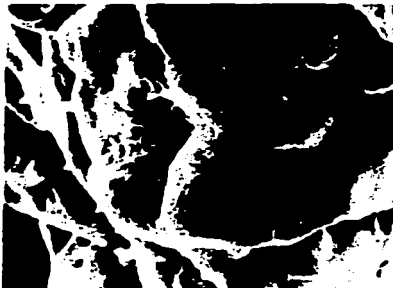


Figura 9.2 Polvo de hierro cubierto parcialmente de una capa de molibdeno

Si se utilizan polvos obtenidos por reducción, la aleación con elementos metálicos normalmente es parcial, lo cual requiere una etapa especial de aleación. El polvo puro se mezcla con los elementos aleantes y se somete a tratamientos térmicos, de tal manera que tenga lugar una difusión incompleta dentro del polvo básico. Durante la sinterización final después de la compactación se completa la difusión.

Si se usan polvos obtenidos por volatilización se obtiene una aleación verdadera o normal, ya que el polvo aleado se produce directamente a partir del estado líquido, tales polvos se llaman polvos prealeados.

Los elementos aleantes son esencialmente Cu, Ni, Mo y Mn. Los polvos de acero inoxidable se están empleando a un ritmo creciente.

El desarrollo de polvos que permiten obtener componentes de alta resistencia incrementa considerablemente el mercado potencial de los productos pulvimetalúrgicos. Pero debe enfatizarse que existe una amplia gama de polvos de metales no ferrosos que incluye polvos de latón, bronce, aluminio, níquel y cinc.

9.2. Características de los aceros aleados.

Los aceros aleados contienen característicamente los siguientes elementos:

Mn, que refuerza al acero y aumenta su dureza, el Mn forma una solución sólida con la ferrita, pero también puede unirse al azufre dañino para formar MnS, o estar en presencia como el carburo Mn_3C ; después del carbono, el Mn es el constituyente más importante de los materiales ferrosos empleados en ingeniería; Ni y Cr, que aumentan la rigidez y la resistencia a la corrosión formando óxidos complejos impermeables en la superficie (acero inoxidable).

Mo, que ayuda a mantener la solidez del acero a temperaturas elevadas.

W, que se emplea especialmente en los aceros para fabricar herramientas y matrices; forma carburos estables e inhibe el crecimiento de grano en los aceros sometidos a procesos térmicos.

Si, que refuerza la ferrita y provoca la grafitización de la cementita en aceros con alto contenido de carbono, produciendo aceros autolubricados. Sin embargo, en muchos casos la grafitización es un fenómeno inconveniente.

S, que en general es un componente nocivo, ya que los aceros que lo contienen tienden a agrietarse durante las operaciones de trabajo a altas temperaturas.

9.3. División de los aceros aleados.

Los aceros aleados pueden dividirse en aceros estructurales y aceros inoxidables. Estos últimos suelen contener Ni y Cr, y se clasifican en tres clases; los nombres indican sus estructuras:

1.- Aceros austeníticos, que contienen aproximadamente de 0.1 a 8% de Ni, y aproximadamente 18 de Cr. Se emplea en la construcción de plantas químicas, decoración y también para utensilios domésticos.

2.- Aceros martensíticos, contienen de 0.07% a 0.10% de carbono y el 13% de Cr. Se emplea para fabricar cuchillas de turbinas, remaches, pasadores de aleta, y también para cubiertos. Los aceros que contienen de 0.2 a 0.4% de C y el 13% de Cr se utilizan para manufacturar resortes, cojinetes de bolas e instrumentos quirúrgicos. También existen aceros martensíticos que contienen de 0.1% de C, 18% de Cr y 2% de Ni, y son empleados en la fabricación de ejes de transmisión de bombas, válvulas reguladoras, accesorios de aeronaves y cuchillas de turbinas.

3.- Aceros ferríticos, que contienen de 0.5% a 0.15% de C y de 16% a 30% de Cr; se emplean siempre que se necesita buena maleabilidad, por ejemplo en el revenido, y resistencia especial a la corrosión.

Los materiales metálicos no ferrosos se producen en cantidades mucho menores que los aceros y hierros, pero su importancia en la tecnología contemporánea es comparativamente mayor. En los metales y aleaciones no ferrosos se encuentran materiales con alta conductividad eléctrica, alta conductividad térmica, buena maleabilidad y buena resistencia a la corrosión.

El aluminio es muy ligero y tienen conductividad térmica y eléctrica elevada; presenta buena resistencia a la corrosión debido a la formación de una capa de óxido en la superficie. Esta capa sólida, que los metalúrgicos llaman óxido coherente, es bastante estable e impide que penetre más oxígeno. El aluminio está protegido contra la oxidación porque se oxida con gran facilidad.

Con base en el porcentaje en peso, el aluminio tiene mayor conductividad eléctrica que el cobre, y por tanto se emplean en los cables eléctricos (debido a la poca resistencia del aluminio, es necesario aplicarles un recubrimiento). Las aleaciones que contienen aluminio pueden dividirse en materiales vaciados y materiales forjados. Entre los últimos se citan los siguientes:

1. El duraluminio, que contiene 4.5% de Cu, 0.5% de Mg, 0.5% de Mn y 0.5% de Si; tiene muy buena maleabilidad antes del tratamiento térmico.
2. aleación de Mg + Si, que contiene 1.0% de Si, 0.5% de Mg, 0.5% de Fe; de todas las aleaciones forjadas, es la que tiene la mayor resistencia a la corrosión.
3. aleación de Cu + Mg + Zn, que contiene 2% de Cu, 3% de Mg y 5% de Zn. Adquiere gran resistencia después de un tratamiento térmico.

Las aleaciones vaciadas de Al suelen dividirse también en tres tipos:

1. Aleación con bajo contenido de Si, que contiene 5% de Si y menos de 0.5% Cu. Su principal ventaja es el punto de fusión relativamente bajo. Es necesario observar que el Al y el Si forman un eutéctico con aproximadamente 13% de Si, que se funde a aproximadamente los 657 °C (930° K.).
2. aleación con alto contenido de Si, que contiene de 12 a 13% de Si y 0.5% de Na. Presenta una excelente resistencia a la corrosión.
3. aleación con cobre, que contiene de 7 a 12% de Cu. La principal ventaja que presenta es el precio más bajo en comparación con las aleaciones anteriores ; sin embargo, es menos resistente a la corrosión.

El cobre tiene alta conductividad eléctrica y térmica, gran resistencia a la corrosión y es muy maleable. Se usa para fabricar alambres, cables, placas, tuberías y cañerías, las aleaciones del cobre pueden clasificarse como sigue:

1. Latones, que contienen de 10 a 50% de Zn. La aleación que contiene 10% de Zn se llama bronce rojo u oro francés y se emplea en joyería. El latón de cartucho, que se emplea para placas laminadas en frío, estirado de alambre, moldes y tubería, contiene 30% de Zn.

El metal Muntz, empleado en productos laminados en caliente, contiene 40% de Zn, y pequeñas cantidades de Al, Sn, Fe, Ni y Mg; se emplea en la fabricación de propulsores y ejes marinos, interruptores, autoclaves y piezas que deban ser muy resistentes.

2. bronce estañado, que contienen hasta 20% de Sn, suelen fabricarse para hacer montajes y cojinetes, y en especial, recipientes y reactores en procesos en que se emplea agua y vapor. Probablemente el más conocido en esta categoría sea el cobre de acuñación, empleado por las casas de moneda de muchos países; en realidad es un bronce estañado, que contiene aproximadamente 95% de Cu, 4% de Sn y 1% de Zn.
3. bronce fosforado, formado de Cu, Sn y pequeñas cantidades de P, se emplea para manufacturar alambres fuertemente estirados, resortes y cojinetes.
4. bronce de aluminio, que contienen hasta 10% de Al. Al igual que las aleaciones cuyo componente principal es Al, éstas pueden dividirse en aleaciones forjadas, que se emplean en las operaciones de moldeado en frío y en caliente, y aleaciones vaciadas.
5. aleaciones de Cu + Ni; de este grupo se conocen especialmente dos tipos : la plata niquelada (cupro níquel), que contiene de 20 a 30% de Ni; se emplea en la fabricación de monedas y también cuando es necesaria la resistencia al agua de mar; y el metal monel, que contiene sólo 30% de Cu, aproximadamente 70% de níquel y pequeñas cantidades de Fe y otros elementos; tiene un lustre plateado característico, se emplea en la fabricación de reactores químicos, cuchillas de turbinas, válvulas y tornillos resistentes a la corrosión, remaches, clavos y diversas partes de maquinaria de plantas químicas y alimenticias.

El cinc tiene gran resistencia a la corrosión y es muy bueno para galvanizar hierro y acero. Sus aleaciones se emplean para el vaciado a presión, por ejemplo para obtener troqueles de acero. El punto de fusión de cinc, 693 °K, es relativamente bajo; esto hace que sea muy conveniente emplear dicho metal; la importancia actual del vaciado a presión en metalurgia se debe principalmente a las aleaciones de Zn. Una aleación característica de este proceso contiene 4% de Al, 1.25% de Cu, 0.1 de Fe, 0.08% de Mg, 0.007% de Pb, Cd y Sn, y lo restante de Zn.

El plomo tiene un punto de fusión aún más bajo que el del cinc, 327°C (600°K). Se emplea en la fabricación de tuberías, pinturas, productos químicos. Es muy importante para los técnicos nucleares y los médicos la capacidad del plomo para absorber radiaciones como los rayos gamma o rayos X, aunque sean de elevada intensidad. Las aleaciones de plomo que contienen 9% de Sb se emplean para fabricar placas de acumuladores.

En la década pasada tuvo lugar un rápido incremento en el consumo de polvos parcialmente aleados (obtenidos por reducción) y de polvos prealeados (obtenidos por volatilización). Usando estos polvos se puede obtener excelentes propiedades mecánicas para los componentes, como resistencias a la tracción en el intervalo de 400 a 1000 N/mm^2 , e incluso se pueden alcanzar valores de $1,500\text{ N/mm}^2$, con polvos especiales y más costosos. Los elementos aleantes son principalmente Cu, Ni, Mo y Mn. Los polvos de acero inoxidable se están empleando a un ritmo creciente. El desarrollo de polvos que permiten obtener componentes de alta resistencia incrementa considerablemente el mercado potencial de los productos pulvimetalúrgicos.

9.4. Aceros al níquel.

La importancia de la introducción del níquel en el acero se debe a que aumenta de la templeabilidad, esto significa que enfriando desde la zona austenítica a menor velocidad que en los aceros al carbono se obtienen micro estructuras de temple. Por otra parte como se aprecia en la figura 9.3 para contenidos en níquel superiores a 8% se obtienen dos fases termodinámicamente estables; pero en la práctica ocurre lo que indica el diagrama metaestable de la figura 9.4 se obtiene martensita en forma masiva.

La martensita tiene una estructura cúbica centrada en las caras y presenta una dureza del orden de los 30 HRC. Microscópicamente aparece como una serie de listones o láminas alargadas, con gran densidad de dislocaciones. Es una microestructura propia de las piezas tenaces y mecanizables.

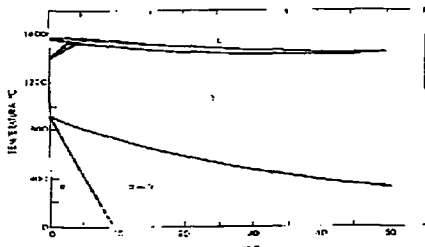


Figura 9.3. Parte del diagrama de equilibrio del sistema hierro-níquel

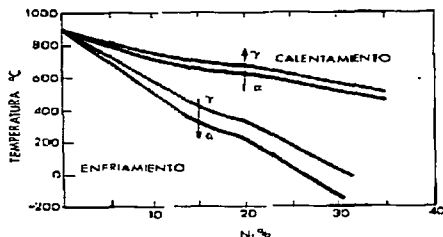


Figura 9.4. Diagrama de equilibrio metaestable del sistema hierro-níquel

Gran cantidad de piezas de acero se fabrican añadiendo 2 % de níquel. Los polvos elementales de níquel excarbonilo se mezcla con polvos de hierro, grafito natural y estearato.

Actualmente han adquirido gran aplicación los polvos de hierro semialeados, que contienen hasta un 4% de níquel. Con este tipo de polvos se evita el presinterizado, consiguiéndose las mismas características con un solo sinterizado a 1120 °C.

9.5. Aceros Rápidos.

Las grandes velocidades de corte utilizadas actualmente en la mecanización de piezas de serie obligaron, en su día, a encontrar unas herramientas cuyas propiedades mecánicas (resistencia, dureza, tenacidad, resistencia al desgaste, etc.) no estuvieran influidas por las temperaturas que se alcanzan en las zonas de corte. La tecnología se propuso como objetivo hallar unos materiales de considerable dureza y resistencia al desgaste, a la par que dotados de una cierta tenacidad, que supusiera un soporte apropiado y que estas condiciones, una vez alcanzadas, pudieran mantenerse a temperaturas lo más elevadas posibles. Estos materiales son los aceros rápidos.

9.5.1. Composición de los aceros rápidos

Los aceros rápidos son aceros aleados generalmente con 0.6-0.9 % de carbono, que templen fácilmente en toda su masa. En calidad de elementos aleantes intervienen el tungsteno o wolframio (2-20%), el cromo (0.3-5 %), el vanadio (1-2 %) y moderadamente el molibdeno (2-10 %) y el cobalto (2.5 – 16 %).

El Tungsteno (wolframio) forma carburos grandes – y de altísima dureza: 3000 HV- que conducen a una disminución de tenacidad en la masa del acero. Sin embargo, los aceros altos en tungsteno poseen menos riesgo de decarburación y de sobrecalentamiento en el tratamiento térmico.

El vanadio forma carburos que se pueden combinar con una gran cantidad de carbono. Los carburos de vanadio son extremadamente duros, de aproximadamente 2800 HV, aportando al acero, como los del tungsteno unas excelentes cualidades de resistencia al desgaste.

La gran afinidad por el carbono del elemento obliga a dosificar su contenido para evitar una matriz pobre en carbono que comunique una baja resistencia del material tras el tratamiento térmico.

El cromo forma carburos que se disuelven al austenizar. Por esto el cromo aumenta la templabilidad e influye decisivamente en la aparición de la dureza secundaria. Estos carburos llegan a alcanzar durezas de hasta 1300 HV.

Desde hace ya varios años se está imponiendo el molibdeno como elemento para sustituir al tungsteno. El molibdeno forma carburos MoC y Mo_2C de unos 2000 HV de dureza, afina el tamaño de grano e impide que éste crezca excesivamente al elevarse la temperatura. Históricamente se substituyó el tungsteno por molibdeno ante la dificultad de obtener el primero de ellos durante las dos guerras mundiales. Se observó que el 1% del molibdeno equivalía al 2% de tungsteno. Los aceros al molibdeno son más susceptibles de sufrir la descarburación a altas temperaturas y más sensibles a los sobrecalentamientos.

El cobalto es un elemento opcional cuyo efecto consiste en elevar la temperatura de fusión del acero al disolverse en la matriz, permitiendo aumentar la temperatura de temple, lo cual se traduce en una mayor dureza después del revenido. No forma carburos, estabiliza la austenita y favorece la precipitación de los otros carburos.

Los aceros al cobalto son utilizados en trabajos en los que intervengan altas temperaturas y en mecanizados a gran velocidad. Además, el cobalto disminuye la velocidad de difusión de los elementos de aleación, evitando las segregaciones de carburos secundarios y aumenta la conductividad térmica.

A todo ello cabe añadir que cierta cantidad de azufre favorece el mecanizado y que el nitrógeno evita el excesivo crecimiento de grano al aumentarse la temperatura.

Un contenido exagerado en elementos de aleación disminuye notablemente la tenacidad del núcleo, por lo tanto debe evitarse la utilización de superaleaciones en aplicaciones que precisen de cierta elasticidad. Últimamente, la aparición en el mercado de aceros de gran resistencia, empleados principalmente en la industria aeronáutica, ha conducido al desarrollo de una serie de aceros rápidos superaleados, obligando a compensar la mayor cantidad de aleación admitida con un mayor cuidado en la homogeneización de la estructura y afino de grano.

**TESIS CON
FALLA DE ORIGEN**

9.5.2. Métodos convencionales de obtención.

Básicamente, el método clásico de obtención consistía en fundir la masa en un horno eléctrico de crisol y el líquido se colaba en lingoteras. Los lingotes así obtenidos se forjaban o laminaban hasta alcanzar las dimensiones deseadas. Sin embargo, la estructura de colada comprendía grandes segregaciones que implicaban una heterogeneidad en la distribución de los elementos de aleación en la matriz, motivo que ha sido y es, a menudo, responsable de fallos en el uso .

Evitar estas segregaciones presenta especial interés para conseguir una mejor mecanización del acero y para lograr una respuesta correcta en el tratamiento térmico.

En los últimos años, el sistema de fusión del acero en el crisol de un horno eléctrico ha ido desapareciendo, substituyéndole el horno de alta frecuencia o el de arco, sobre todo en el caso de altas producciones. Los resultados en cuanto a estructuras son similares, apreciándose como en el caso del crisol, segregaciones de carburos. Se ha intentado mejorar estas estructuras mediante desgasificación del acero en la colada (colada en vacío), aunque los resultados no son espectaculares y sólo se ha apreciado una pequeña mejora en pequeños lingotes.

Hoyle ha descrito la influencia de una serie de factores sobre la estructura final obtenida en una colada de acero rápido. Así, actuando sobre la velocidad de enfriamiento del lingote se puede obtener una estructura homogénea. Si el enfriamiento es lento, se obtendrán unas transformaciones relativamente ajustadas al diagrama de equilibrio, evitándose de esta forma la aparición de zonas eutécticas. Una rápida velocidad de enfriamiento, que se consigue fácilmente en lingotes pequeños, no permite la macrosegregación ni el crecimiento exagerado de los carburos, obteniendo un acero en buenas condiciones.

La temperatura de fusión es otro factor que va íntimamente ligado con la velocidad de enfriamiento y se acostumbra definir a una y otra a la par. La forma de adición a la masa líquida de los elementos de aleación, el caudal de vertido, el tipo, el tamaño y diseño de los moldes, etc., son otros factores que se deben de tener en cuenta.

Con el fin de homogeneizar la distribución de fases y componentes, se ha probado con diferentes métodos como: la colada continua, la homogeneización por vibración, la fusión al vacío, el electroslag refining y un apropiado trabajo en caliente sobre el lingote solidificado sin obtener resultados satisfactorios.

CON
DE ORIGEN

TESIS CON
DE ORIGEN

En la colada continua se obtienen estructuras bastante indeseables. Si se utiliza la vibración del molde durante la solidificación del acero para forzar una homogeneización, se llega a obtener una distribución irregular de los elementos de aleación, en bandas de distinta concentración.

En cuanto a los métodos restantes, se discute la efectividad de la fusión al vacío, cuyo proceso da resultados excelentes en algunas composiciones aunque, como en el caso de la inoculación, no tiene una aplicación generalizada. El electroslag refining (ESR) es un método de afino secundario de los metales, que se inició en los Estados Unidos, Canadá y posteriormente en Europa, siendo un método versátil para producir aleaciones de bajo contenido en inclusiones no metálicas y libres de defectos de solidificación e imperfecciones superficiales, como puede apreciarse en la figura 9.5, se basa en una fusión del lingote a purificar, que actúa de electrodo consumible en un circuito de corriente alterna, en un crisol refrigerado y protegido con gas inerte. Los inconvenientes principales de este procedimiento son la necesidad de partir de lingotes de composición semejante a la deseada y a la conveniencia, para economizar el proceso, de obtener lingotes purificados del mayor tamaño posible.

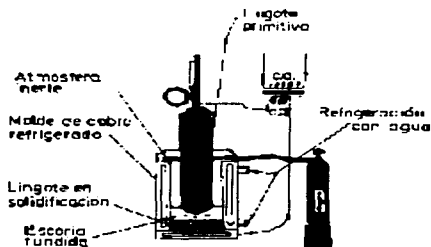


Figura 9.5 Esquema del procedimiento "electroslag refining" (ESR).

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

9.5.3 Producción de aceros rápidos por pulvimetalurgia.

El método convencional utilizado en pulvimetalurgia para compactar aceros, conduce a la obtención de un material poroso, por lo que las piezas manufacturadas de este modo tienen unas características mecánicas limitadas y se utilizan únicamente para determinadas aplicaciones.

Para conseguir un material totalmente compacto sería necesario repetir el proceso de compactación y sinterización varias veces hasta conseguir un cuerpo totalmente denso, lo cual resultaría muy caro, aunque existen algunos métodos que ayudan a mejorar este proceso, como son:

a) Método Asea stora

Este método parte de polvos atomizados. La compactación se efectúa en cápsulas mediante la aplicación de una presión isostática en frío. Los polvos se calientan en hornos de inducción a 1000 °C. El esquema de este proceso esta representado en la figura 9.6. De esta forma se produce un lingote totalmente sinterizado, que al ser aún algo poroso, se puede forjar o laminar fácilmente, compactándose totalmente en estas operaciones. Se obtiene por este procedimiento una estructura fina y uniforme que confiere al acero una serie de ventajas que se traducen en un aumento de la vida media de la herramienta.

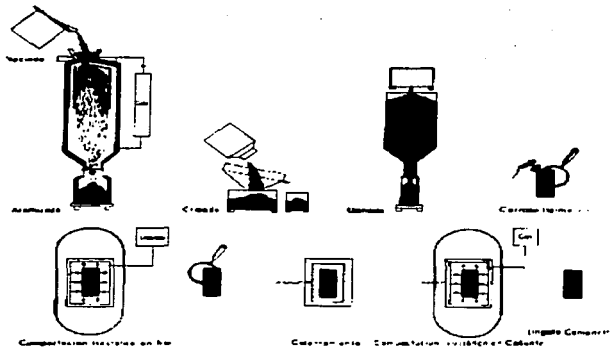


Figura 9.6 Esquema del procedimiento Asea Stora para la obtención de aceros rápidos pulvimetalúrgicos.

b) Método de la Universidad de Bradford.

Un polvo, cuya composición se somete previamente a su compactación, a un recocido en las siguientes condiciones:

1. se aplica al polvo, durante 20 minutos, una temperatura de 870 °C en atmósfera de hidrógeno, enfriado en la cámara del horno;
2. O a los polvos se les mantiene durante 60 minutos en un horno e vacío a 900 °C, enfriado también en cámara.

Las probetas empleadas tienen unas dimensiones finales de 19.05 mm de diámetro por 5.08 mm de altura, y se habían obtenido por prensado, aplicando presiones que variaban entre 10.8 y 15.5 Tm/cm². Se einterizan en horno de vacío a temperaturas que varían entre 1230 y 1300 °C durante un espacio de tiempo que oscila entre ½ y 6 horas, el experimento conduce a las siguientes conclusiones:

- I. El recocido previo de los polvos les confiere mayor compresibilidad.
- II. Algunos polvos son difíciles de sinterizar, ya que a las temperaturas necesarias para alcanzar la máxima densidad del grano el tamaño del grano resulta excesivo y los carburos se encuentran formando redes en los límites del grano.
- III. Algunos polvos se pueden sinterizar al 97% de su densidad, con una microestructura que contiene carburos angulares aislados de 13 µm de tamaño.

La fabricación de los aceros rápidos por el procedimiento pulvimetalúrgico necesita, por lo general, partir de polvos metálicos con singulares propiedades y aplicar condiciones de compactación y sinterización muy exigentes.

c) Método crucible.

Las etapas del método desarrollado por *Crucible Metrial Research Center* consisten en.

- a. El atomizado;
- b. La compactación isostática.
- c. La deformación en caliente.

En una probeta obtenida por el procedimiento descrito, catalogada como M25, se obtiene una regular distribución de los carburos.

d) Método del Instituto de Investigación de Illinois (IITRI)

En este procedimiento se obtiene el polvo por atomización. La solidificación se efectúa por compactación seguida por forja y laminación convencional.

e) Método Vasco-A Teledyne.

Se prepararon por el método del electrodo giratorio, estos polvos fueron consolidados en molde de acero dulce y extruidos a 950 °C con una reducción de radio. Las probetas sinterizadas fueron objeto de una serie de pruebas de respuesta al tratamiento térmico, de resiliencia y de resistencia a la tracción.

De toda la exposición anterior se deduce que los métodos pulvimetalúrgicos consiguen, con respecto a los métodos convencionales de obtención de acero rápido, una mayor uniformidad en el tamaño, forma y distribución de los carburos de aleación. De igual forma ha sido posible manufacturar, por un sistema pulvimetalúrgico, una serie de nuevas composiciones superaleadas, con las cuales se fabrican herramientas de gran dureza; esta dureza imposible de obtener de otra forma.

La razón de esta importante mejora tecnológica se debe en que cada partícula de polvo a sinterizar se considera como un diminuto lingote en donde ha ocurrido los mismos fenómenos de segregaciones, aunque en escala microscópica, después, al sinterizar bloques mayores, el tamaño de estas segregaciones permanece constante, significando para la pieza final, una excelente distribución.

Esta singular microestructura confiere al acero rápido singulares ventajas de tipo práctico, resumidas en:

- a. La homogeneidad total, puesto que se consigue, tras el tratamiento térmico, una uniformidad de durezas y la eliminación de deformaciones.
- b. La reducción del tiempo en el tratamiento térmico, pues al aumentar la proporción de interface carburo/matriz se favorece considerablemente el proceso de disolución de elementos aleantes de los carburos a la matriz.
- c. Una mayor vida útil de la herramienta.
- d. Un tamaño de grano muy fino.
- e. Mejor maquinabilidad.

Sin embargo, cabe mencionar las desventajas potenciales de estos procedimientos, que son:

- a. Un costo más elevado que el proceso convencional, debido a la adición de nuevas etapas.
- b. Una mayor posibilidad de introducir inclusiones (óxidos), motivada por la mayor relación superficie/volumen.
- c. La porosidad.

9.6. Aceros inoxidables.

Las características más importantes que presentan los aceros inoxidables son su facilidad para la oxidación, la tenacidad, la ductilidad y la susceptibilidad al endurecimiento por acritud.

La facilidad para la oxidación se traduce en la formación de una pequeña película de trióxido de dicromo transparente, impermeable y adherente, dificultando, por lo tanto, la evolución de la oxidación y dándole carácter inoxidable.

Las propiedades de las piezas de acero inoxidable fabricadas pulvimetalúrgicamente vienen notablemente influidas por la contaminación, que procede por la falta de limpieza de los equipos y lubricantes, por carburación, oxidación y nitruración durante el proceso de sinterización y por la presencia de la porosidad.

La resistencia a la corrosión de las probetas sinterizadas también depende de la atmósfera de hidrógeno o al vacío se vuelven fácilmente activas, mientras que las procedentes de un horno protegido por amoníaco disociado dan mejores resultados en los ensayos a la resistencia a la corrosión.

Los polvos de acero inoxidable se obtienen por corrosión de chapa sensibilizada o por atomización con alta velocidad de fluido refrigerante. Las partículas individuales solidifican casi instantáneamente de modo que su microestructura recuerda la de un molde en miniatura, es decir, textura dendrítica enriquecida en hierro y zonas interdendríticas ricas en aleantes.

Por otra parte, hay que tener en cuenta que cuanto menor es el tamaño de la partícula, mayor es la probabilidad de que aparezca carácter magnético. Raramente se parte de polvos elementales debido a la dificultad de sinterizar cromo, que en una atmósfera de amoníaco se recubre de una capa de óxido impidiendo la difusión.

No obstante, parece que el mejor método empleado para introducir cromo a los aceros consiste en añadir a la mezcla de polvos la proporción adecuada de polvos de ferrocromo.

Sin embargo, en la práctica pulvimetalúrgica de fabricación de piezas de acero inoxidable se suele partir de polvos aleados.

La etapa más problemática del proceso pulvimetalúrgico del acero inoxidable es la sinterización, la cual se suele realizar calentando a 1120 °C durante un período de tiempo superior a 30 minutos, en atmósfera reductora o al vacío. La influencia y características de las atmósferas empleadas en la sinterización de polvo de acero inoxidable se describen brevemente a continuación:

Hidrógeno.- Se obtiene por descomposición electroquímica del agua eliminando el oxígeno por licuación y después pasa por un catalizador de paladio, que hace reaccionar el oxígeno con el hidrógeno. La sinterización en este tipo de atmósfera origina la unión de las partículas de polvo de acero inoxidable y aumenta la ductilidad y la densidad. La resistencia a la tracción, el límite elástico y la contracción aumentan con la densidad de las piezas sinterizadas.

Amoníaco disociado.- La atmósfera más corriente contiene 0.12% de amoníaco sin disociar. El alto contenido de nitrógeno es un riesgo de excesiva nitruración. El polvo de acero, calentado a 1120 °C durante 30 minutos en esta atmósfera, aumenta el contenido de nitrógeno lo que origina un límite elástico superior al del lingote de acero inoxidable.

Vacío.- La sinterización del inoxidable a alto vacío produce piezas de elevada ductilidad, con límite elástico y resistencia relativamente bajos.

Con el proceso pulvimetalúrgico del acero inoxidable se persigue un objetivo doble: conseguir la homogeneización y aumentar la economía. La homogeneización se mejora y aumenta la economía. La homogeneización se mejora considerablemente partiendo de polvos aleados y la economía resulta ser más barata que cuando se utiliza el método convencional.

9.7. Aceros Maraging.

Se denominan aceros maraging a las aleaciones base hierro ricas en níquel y molibdeno y con contenidos de carbono muy bajos. El término acero se aplica aquí en razón a las propiedades mecánicas de los aceros. El término maraging proviene del tratamiento térmico más peculiar de estas aleaciones, un envejecimiento (aging) artificial de la martensita (mar).

9.7.1. Propiedades de los aceros maraging.

Los aceros maraging se caracterizan por su elevado límite elástico, por sus resistencias mecánica y química y por la posibilidad de variar grandemente las propiedades con el tratamiento térmico. En estado hipertemplado son fácilmente deformados y adquieren gran resistencia y conservan la tenacidad por envejecimiento.

9.7.2. Elementos aleantes.

El carbono figura, en los aceros maraging, como impureza. El endurecimiento martensítico propio de los aceros al carbono y aleados apenas tiene interés práctico en estas aleaciones.

9.7.3. Fabricación.

Partiendo de polvos elementales en estado recocido, se aglomeran a presiones relativamente bajas y la homogeneidad conseguida es deficiente. Si se parte de una mezcla de polvos elementales de composición global 18% de níquel, 7% de Co y 5% de Mo, sinterizado a 1300 °C durante tres horas, se obtienen variaciones en níquel del $\pm 2\%$ y en cobalto del $\pm 3\%$. Esta dificultad se soluciona partiendo de polvos aleados obtenidos por atomización, aunque son más difíciles de prensar que los polvos elementales. La resistencia a la tracción, al impacto y a la fatiga mejora considerablemente si se parte de polvos aleados.

CONCLUSIONES

La ciencia día con día esta logrando grandes avances, debido a que se han establecido mecanismos que determinan la emergencia de una evolución inmediata en nuestra tecnología.

Una modificación importante en este esquema es el análisis en particular de la metalurgia de polvos como una alternativa para la manufactura de partes metálicas. En nuestro estudio logramos establecer las respuestas que cubren determinadas necesidades.

Sin embargo, mencionamos "determinadas necesidades", debido a que abarca un sin fin de piezas fabricadas y para cada una de ellas varia el tipo de mecanizado y el material componente en específico y con ello la diferencia en cuanto a proceso de manufactura y costo.

También es muy importante recalcar la importancia que tiene este proceso hoy en día, ya que gracias a el se han podido fabricar un sin numero de piezas que por otro método sería muy difícil conseguir y tienen aplicación en algunas cosas que utilizamos a diario.

Un aspecto que se debe mencionar, es que en este proceso el principal problema que desarrolla es la mencionada porosidad que presenta.

Esta se determina en función de la pieza a manufacturar, y a la fecha juega un papel considerable ya que en algunas piezas es necesaria la lubricación, como son lo cojinetes. para otras aplicaciones esta porosidad si no es controlada traerá consecuencias.

Es importante aclarar que en este mismo trabajo, se han propuesto de igual manera métodos que cubren esta necesidad en cuanto al control de porosidad, como es el sellado vía resina, compactación y con el apoyo de elementos aleantes, que además traen consigo un incremento de costo, ya que se emplean dos o mas procesos que nos llevaran al fin deseado.

Por lo tanto, concluimos a partir de las propuestas anteriores, que a pesar del incremento de costos al emplear dos o más métodos, es mas conveniente y económico en comparación con otros procesos de manufactura y que se obtienen mejor calidad en cuanto a propiedades mecánicas por la homogeneidad que en particular presenta este proceso y los elementos aleantes empleados. hasta que este método emergente encuentre la mejora en su perfección.

BIBLIOGRAFIA.

TERIALS SCIENCE TECHNOLOGY
R.W. Cahn, P. Haasen, E.j. Kramer
VCH, 1991

COMPORTAMIENTO Y PROPIEDADES DE LOS METALES REFRACTARIOS
T.E. TIETZ, J. Wilson (traducido por Tomas Reyero Martinez)
Urmo, Bilbao 1971

ACEROS DE LLODIO
Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales y por Aceros Llodio S.A.
Urmo, Bilbao 1975

CERAMICA DE LOS MATERIALES
Skaupy Franz
Reverte 1955

METALURGIA DE POLVOS
Lenel Fritz V
Princeton

ALEACIONES FERROSAS RESISTENTES ALA ABRASION Y EROSION
Cruz Carrillo Cirilo
México

PROCESOS DE MANUFACTURA
Jimenez Caro Francisco

PROCESOS DE FABRICACION
Begeman Myron
Cecsa 1976

METALURGIA DEL COBRE Y DEL NIQUEL
Beregovsk V. , Kiskiarovski B.
Mir 1974

INGENIERIA METALURGICA Tomo 1

**TESIS CON
FALLA DE ORIGEN**

INTRODUCCIÓN A LA PULVIMETALURGIA

Molera Pedro

Ediciones bellaterra, S.A. 1977.

FUNDAMENTOS DE MANUFACTURA MODERNA

Groover Mikell

Prentice Hall 1997

**TESIS CON
FACULTAD DE ORIGEN**