



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE QUÍMICA

**“El arte de producir componentes metálicos
funcionales, a partir de polvo de cobre y sus
aleaciones”**

TRABAJO MONOGRÁFICO DE
ACTUALIZACIÓN
QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE
INGENIERA QUÍMICA METALÚRGICA

PRESENTA:

Miriam Zeltzin Gomez Muñoz



CIUDAD UNIVERSITARIA, CDMX

2023



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.

JURADO ASIGNADO

PRESIDENTE: Balbina Ojeda Ramírez

VOCAL: Ignacio Alejandro Figueroa Vargas

SECRETARIO: Diego Enrique González González

1er. SUPLENTE: Juan Carlos Contreras Guzmán

2do. SUPLENTE: Clara Saraid Flores Rosas

SITIO DONDE SE DESARROLLÓ EL TEMA:

Facultad de Química. Dpto de ingeniería química metalúrgica de la Universidad Nacional Autónoma de México

ASESOR DEL TEMA:

M. en C. Balbina Ojeda Ramírez

SUSTENTANTE:

Miriam Zeltzin Gomez Muñoz

AGRADECIMIENTOS

Es un honor y me encuentro agradecida con la Universidad Nacional Autónoma de México, así como de la Facultad de Química, por enriquecer mi formación académica, brindada por docentes en todos estos años, en donde me siento orgullosa de ello.

En especial, me siento agradecida y honrada con la profesora la M.C. Balbina Ojeda Ramirez por contar con el apoyo, supervisión y consejería a lo largo de mi trayectoria académica, personal, profesional y no sólo en el desarrollo de este trabajo.

Quien me ha demostrado que un profesor no sólo imparte clases, también puede dar consejos personales... incluso puede adoptarte como una hija que no es de su sangre, pero que si ocupa un pedacito en su corazón. Me encuentro bendecida con la vida por haberme puesto a una persona tan especial como ella, gracias por su confianza, su apoyo incondicional, sus regaños, correcciones y lecciones. Pues mucho de esto es gracias a que usted formo parte de mi red de apoyo, confiando en mi incluso cuando yo deje de hacerlo, de corazón le digo ¡Gracias!

A todos los maestros, que marcaron una etapa en mi vida, que confiaron en mi y con sus consejos me dieron esos pequeños empujoncitos para seguir avanzando.

A Ariana Ordoñez Hernandez, que no sólo con el tiempo se volvió una buen amiga, si no también un apoyo profesional y personal, pues volteo a verme y confió en mi en aquel momento en el que profesionalmente nadie lo hacía, a lo mejor te toco lo último de este trabajo, pero no menos importante, ya que has estado presente en estos últimos pasos, empujándome, apoyándome , aconsejándome e incluso regañándome... Poniendo el mundo de cabeza si es necesario para que esto se lograra... Gracias por tener ese gran corazón y buenas intenciones, que pocos vemos, pero que valoramos muchísimo.

Por que me demostraste que entre mujeres si podemos apoyarnos y ayudarnos, que la sororidad y empatía.

Son muchas personas que han formado parte d4e mi vida profesional a la que me encantaría agradecerles su amistad, consejo y compañía en los momentos difíciles de mi vida. Algunas aún están aquí conmigo y otras en mis recuerdos y en mi corazón.

Dedicatoria

A MIS PADRES:

RITA MARISOL MUÑOZ HERNANDEZ:

A la mujer que más admiro en el mundo y de quien más estoy orgullosa.

A ella, que supo ser Madre y Padre y que aun que hubo momentos de fatiga, siempre mostró el ejemplo de la fuerza... Hoy una meta más en la vida se hemos cumplido...

Para la mujer más valiente, más chingona, quien mil veces dijo “comételo, ya no tengo hambre” aunque moría por comérselo. Por revisar los números las veces que fueron necesarias, hasta que las cuentas cuadraran, mientras que sus gustos y necesidades esperaban... Ella tan valiente y guerrera, disminuyendo las horas de sueño y aumentando las de desvelo para nunca irme a la escuela con “la panza vacía”, aunque el cansancio te vencía...

Por poner en orden mi mundo, cuando esta de cabeza... por encontrar y darme esa paz, cuando mi mundo está en guerra... por haber fomentado en mí el deseo de superación y el anhelo de triunfo en la vida, por compartir mis penas y mis alegrías, mis pequeñas victorias y dolorosos fracasos, siempre recibiendo de ti la palabra de aliento que me ha dado la fuerza para seguir luchando.

Mil palabras no bastarían para agradecer tu apoyo y tu comprensión en los momentos difíciles... en esos en donde mi mundo se me ha desmoronado y tu me has agarrado fuerte para no caerme y decirme “vamos a salir de esta, como lo hemos hecho de muchas otras...”

Hoy lo lograste con todas esas piedras que se atravesaron en tu camino, construirme unas escaleras para lograr ser una mujer fuerte, con valores, carácter, hambre de triunfo... Con todas tus lagrimas hacerme unas alas muy grandes y fuertes parra volar de tu nido. ¡Lo lograste! Hoy gracias a ti soy una profesionista.

† MARIO MUÑOZ HERNANDEZ

Para mi ángel en el cielo...

Me quede con tantas cosas que no pude decirte... Tantos momentos nos faltaron por vivir juntos, en todos y cada uno de mis planes tu estabas contemplado... sé que desde donde quiera que estés, estas orgulloso de mi... Por que me enseñaste que “los Muñoz somos chingones”. Hoy y todos los días después de tu partida intento seguir todos y cada uno de tus sabios consejos... Para ser una mejor persona, pues esas canas no eran por que estabas viejo... Más bien por que eras muy sabio...

Me ensañaste a ser fuerte y aun me sigues enseñando... pues no hay día que no pueda tenerte en mis pensamientos y pensar... “Qué me aconsejaría Mario Muñoz en esta situación?”

Gracias por buscarte siempre un cachito de tiempo para escucharme, para atenderme, para aconsejarme... por demostrar preocupaciones cuando las cosas no andaban bien...

Por que no te tocaba ese papel, pero por decisión propia tú lo tomaste...

Tú, el hombre más fuerte, inteligente y con las palabras correctas, llenas de experiencia y sabiduría, tu quien me enseñó que jamás estuve, ni estoy sola... Quien hizo lo posible para que yo pudiera estar donde estoy, quisiera devolverte tantito de lo mucho que me diste. Daria lo que fuera por que este día tan especial estuvieras conmigo, me dieras un abrazo fuerte, seguido de la merecida y famosísima “porra Muñoz”. ¡Pero con un grito fuerte hasta el cielo, te digo “lo logramos!”

A MIS HERMANOS

JOSEP Y YESSICA: que me han enseñado que ser la hermana de en medio, puede ser la que le da consejos al más grande... y que también puede recibir consejos de la más pequeña...

Hemos aprendido a ser como las ramas de un mismo árbol, que pueden crecer y alejarse con los años, pero sus raíces son tan fuertes, que pase lo que pase su nuestro amor siempre permanecerá... Pues no importa situación o condición, siempre estaremos unidos

Josep: con uno comparto memorias de infancia y campos de batalla, de quien me siento orgullosa de ver tus ejemplos al ver que te formaste con muchos fundamentos, es gracias mamá que siempre nos conseja, siempre fuimos prioridad en esta vida tan compleja.

Has cargado con el peso de las hermanas pequeñas, has estado a mi lado cuando más te necesito, siempre ha sido así desde que somos pequeñitos... y sigue siendo igual hoy que somos mayores, han pasado tantas cosas, pero no tengo rencores.

Y seguimos igual para ser un ejemplo, para nuestra hermanita que nos mira con respeto, cuando nos miro jugar, recuerdo a esos niños que dejaron la infancia y perdieron la ignorancia. Nos volvimos esos hermanos que hablan con acciones y buscan soluciones.

Yessi: estoy agradecida con Dios y la vida por haberme dado una hermana como tu. La vida ha sido complicada pero tu inyectas esa chispa de alegría y me recuerda que por muy grandes que seamos nunca dejaremos de ser niñas... También con el tiempo entendí lo importante que es tener una hermana pequeña y lo cuidadosos que deben ser mis pasos pues pueden servirte de ejemplo. Gracias por todas esas risas y lágrimas compartidas.

A MIS ABUELOS

✝ Jose Trinidad Muñoz Hernandez y ✝ Carmen Hernández Campechano

Para ustedes que me demostraron que en esta vida podemos tener unos segundos padres, que no sólo son abuelos, pues hubo a alguien que le faltó valor, pero a ustedes les sobró amor para estar en esta tierra el tiempo que tenían prestado, fue poco y me hubiera gustado que hubiera sido más, pero sé que desde donde están están orgullosos de la persona en la que me eh convertido y de todo lo que estoy logrando de poco en poco, esto es por y para ustedes, un abrazo hasta el cielo.

† Francisco Javier Novas Jaimes

Para ti, mi mejor amigo y hermano de vida.

La vida tenía otros planes para nosotros... Fuiste un momento fugas en este plano, pero en mi corazón estarás toda la eternidad, ambos teníamos planes juntos, entre ellos este... Que ahora en adelante me toca hacerlos sin tu presencia, pero se que desde donde estas aun me acompañas y muy a tu manera me harás saber que estás ahí, aconsejándome y regañándome como lo hacías en vida. Podría escribirte mil palabras para decir lo importante que eres y serás para mí, pero es algo que sólo tu sabias... Desde donde estés, sólo te digo ¡Gracias!

Capítulo 1.....	1
1.1 Resumen	2
1.2 Introducción	3
1.3 Objetivos	5
1.4 Justificación	6
Capítulo 2	7
2. Estado del arte	8
Capítulo 3	13
3. Marco teórico	14
3.1. Historia	14
3.2. El cobre en el mundo	15
3.3 El cobre en Mesoamérica	16
3.4 Producción de cobre en México	18
3.5 Cobre	21
3.6 Pulvimetalurgia	24
3.6.1. Ventajas y desventajas de la MP.....	26
3.7 Producción de polvos metálicos	29
3.7.1 Métodos mecánicos de producción	30
3.7.2 Métodos electrolíticos de producción	34
3.8 Caracterización de los polvos metálicos	36
3.9 Manejo de polvos	51
3.10 Métodos de compactación	54
3.11 Sinterización	61
3.11.1 Sinterización en fase líquida	65
3.11.2 Impregnación	65
3.11.3 infiltración.....	65
3.12 Limitaciones de diseño de productos sinterizado.....	67
3.13 Seguridad en metalurgia de polvos	68

Capítulo 4	71
4. Hallazgos.....	72
4.1 La pulvimetalurgia como ruta de procesamiento	74
4.2 Presencia de la metalurgia de polvos	75
4.2.1 Presencia de la metalurgia de polvos en el mercado automotriz .	77
4.2.2 Presencia de la metalurgia en Asia – Pacífico	78
Capítulo 5	80
5. Catálogo de piezas de cobre y sus aleaciones, fabricadas por metalurgia de polvos	81
Capítulo 6	92
6. Conclusiones	93
Capítulo 7	
7. Sugerencias de trabajos posteriores	95
Capítulo 8	96
8. Fuentes de información	97

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 3.1 Piezas de cobre realizadas por antepasados.....	14
Figura 3.2 Pieza mas antigua de cobre de la que se tienen Conocimiento.....	15
Figura 3.3 Máscara de cobre en Sudamérica.....	16
Figura 3.4 Metalurgia y orfebrería inca.....	17
Figura 3.5 Presencia de depósitos de pórfidos de cobre a nivel global.....	18
Figura 3.6 Presencia de cobre en el noroeste de México.....	19
Figura 3.7 Comparación de producción de cobre en los años 2017 y 2018.....	20
Figura 3.8 Lugares del país donde se produce cobre.....	21
Figura 3.9 Cobre metálico.....	22
Figura 3.10 Productos fabricados mediante el proceso de PM	27
Figura 3.11 Proceso de atomización en atmósfera controlada por gas.....	31
Figura 3.12 Geometría esférica de partículas obtenidas por el proceso de atomización por gas.....	31
Figura 3.13 Proceso de automatización por agua.....	33
Figura 3.14 Morfología característica de una partícula obtenida por el proceso de atomización por agua.....	33
Figura 3.15 Proceso de electrólisis.....	34
Figura 3.16 Clasificación de las formas de las partículas de acuerdo al tipo de proceso de obtención.....	38
Figura 3.17 Determinación del ángulo de fricción en una distribución determinada de polvos metálicos	38
Figura 3.18 Determinación del tamaño de partículas irregulares.....	39
Figura 3.19 Equipo de tamizado por agitación mecánica ro-tap.....	44

Figura 3.20 Efecto de la forma de las partículas en la densidad aparente.....	48
Figura 3.21 Gráfica presión de compactación vs % densidad en verde	51
Figura 3.24 Varios dispositivos de mezclado.....	54
Figura 3.25 Curva de compresibilidad.....	55
Figura 3.26 Herramental y matriz característica para compactar un engrane recto.....	55
Figura 3.2 Variación de la densidad al compactar polvos metálicos en diversas matrices. a) Prensa de acción simple; b) y c) Prensa de doble acción, d) Mayor uniformidad de la densidad al prensar con dos punzones y e) Perfiles de presión en polvo de cobre compactado en una prensa de acción simple.....	57
Figura 3.24 Diagrama esquemático del prensado isostático en frío.....	58
Figura 3.25 Esquema de compactado por troquel.....	59
Figura 3.26 Esquema de prensado isostático en caliente.....	60
Figura 3.27 Evolución del sinterizado.....	62
Figura 3.28 Procesos de difusión durante el sinterizado.	62
Figura 3.29 Estados: inicial— final.....	63
Figura 3.30 Cámaras del horno de sinterización.....	64
Figura 3.31 Casquillo de bronce auto lubricado.....	66
Figura 3.32 Silenciador neumático fabricado a partir de bronce en polvo.....	67
Figura 3.33 Limitaciones del sinterizado.....	68
Figura 4.1 Ventajas económicas de la pulvimetalurgia.....	72
Figura 4.2 Esquema del proceso pulvimetalúrgico.....	74
Figura 4.3 Comportamiento de producción de automóviles por zona geográfica (miles) en 2014 y 2020.....	75
Figura 4.4. Fabricación de piezas por PM del área automotriz, a nivel mundial.....	77

Figura 4.5. Proyección de la producción de piezas por MP a nivel global (2020-2025).....	79
Figura 5.1 Cojinetes autolubricables de bronce.....	82
Figura 5.2 Rodamientos autolubricados de bronce.....	83
Figura 5.3 Escobillas de carbono de cobre.....	84
Figura 5.4 Bucha de cobre de ventilador.....	85
Figura 5.5 Filtro de refrigerador de cobre.....	86
Figura 5.6 Zapata de freno de cobre.....	87
Figura 5.7 Guías de válvula de bronce.....	88
Figura 5.8 Bujes de bronce.....	89
Figura 5.9 Silenciador neumático.....	90
Figura 5.10 Manga de cobre.....	91

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 3.1 Propiedades físicas del cobre.....	22
Tabla 3.2 Diferentes procesos para la fabricación de cobre.....	30
Tabla 3.3 Técnicas ópticas para la medición de partículas.....	41
Tabla 3.4 Técnicas para determinar el tamaño de partícula.....	42
Tabla 3.5 Tipos de mallas de pruebas de acuerdo a la norma ASTM.....	44
Tabla 3.6 Serie estándar de tamices.....	45
Tabla 3.7 Diferentes procesos de fabricación de polvos.....	51
Tabla 3.8 Cuadro comparativo de polvos para los diversos procesos y productos.....	52
Tabla 4.1. Principales avances en metalurgia de polvos.....	75
Tabla 4.2 Informe de mercado de metalurgia de polvos.....	76
Tabla 5.1. Catálogo de piezas fabricadas por pulvimetalurgia.....	82

Abreviaturas

Abreviatura	Significado
a.C	Antes de Cristo
°C	Grados centígrados
d. C	Después de Cristo
h	Horas
Kg	Kilogramos
μm	Micrómetros
MP	Metalurgia de polvos
Mpa	Mega pascales

Capítulo

1

1.1 Resumen

En el presente trabajo monográfico se recabó toda la información necesaria para poder mostrar cuáles son los procesos más favorables para el uso y desarrollo del cobre en la pulvimetalurgia, dado que, a lo largo de la historia del ser humano, el uso de diferentes materiales en forma de polvo para realizar diversas tareas, ha sido empleado.

Se aborda el estudio del cobre desde sus antecedentes en la evolución del ser humano, la presencia de éste metal a nivel nacional, el estudio de sus características y propiedades más relevantes, la clasificación de sus aleaciones, sus métodos de producción de polvos, la caracterización de las mismas, los diferentes procesos de compactación, hasta llegar al sinterizado de las piezas, mediante el cual se confieren las propiedades finales de los componentes metálicos producidos por este proceso alterno.

En las últimas décadas de la pulvimetalurgia, debido a la importancia en la industria, se ha promovido la investigación, el crecimiento, el desarrollo y la fabricación de componentes complejos, los cuales se han incrementado drásticamente.

Considerando la innovación en este proceso alterno de fabricación, cabe resaltar una de las significativas ventajas que tiene sobre los métodos tradicionales de manufactura, ésta es, que no necesita de un proceso de maquinado, debido a que las piezas finales quedan con las dimensiones requeridas, tal es el caso del filtro refrigerador de cobre, que se emplea en la industria aeroespacial y las escobillas de cobre en el sector automotriz. Así como también, este método busca poder elaborar productos alternos a las superaleaciones, con el objetivo de producir materiales más ligeros, resistentes (mecánica, a la corrosión, al impacto, al desgaste, etc.) con una dureza determinada, con una temperatura de trabajo superior, por mencionar algunas propiedades.

Así también se incluye un catálogo de piezas que se fabrican por el sector pulvimetalúrgico, con el fin de facilitar información a los estudiantes de esta carrera, como un referente que conjunte algunos datos, debido a que gran parte de estos no son del dominio público.

1.1 Introducción

El cobre juega un papel importante en el desarrollo del hombre, para comprender su progreso y su historia se puede dividir en dos grandes eras: la Edad de Piedra y la Edad de los Metales, si se usa una línea de tiempo, la última se desarrolló entre los años 6000 y 1000 a.C., esta se distingue por la sustitución de la piedra por el cobre como componente clave para crear armas y herramientas de supervivencia, lo que resultó en el nacimiento de nuevas corrientes de habilidades, una de las cuales es la metalurgia, a la cual compete el procesamiento para la obtención del polvo de cobre a través de sus diferentes métodos.

Enfocándose particularmente en la producción de cobre en América, los depósitos más grandes se concentran en una región delimitada por los estados de Arizona y Nuevo México en el suroeste de los Estados Unidos y el noroeste de México, particularmente en Sonora, donde se encuentra el 70% de las áreas mineralizadas, resaltando como principal alternativa la producción de polvo de cobre por electrólisis.

Esencialmente, los metales pueden ser fabricados solo de dos maneras, para darle forma útil, a saber: la fundición o mediante procesos alternos de manufactura, uno de ellos es la metalurgia de polvos.

El atractivo de la pulvimetalurgia (PM) es la habilidad de fabricar piezas de formas complejas con excelentes tolerancias y alta calidad con relativamente bajo costo, toma polvos metálicos como materia prima con ciertas características como: tamaño, forma y empaquetamiento para luego crear un componente cierta dureza y precisión. Los pasos claves incluyen la compactación del polvo y la subsiguiente unión térmica 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 bajos costos capitales. Consecuentemente, este proceso alterno está creciendo y reemplazando métodos tradicionales de formar metales. Además, todo esto crea un nicho único de aplicaciones para la PM, se fabrica una amplia gama de partes y componentes que tienen un gran impacto en la vida cotidiana, como son: dispositivos de alta tecnología, compuestos resistentes al desgaste, pequeños balines para bolígrafos, anillos para pistones, varillas de conexión, placas de frenos, engranes, levas, bujes, escobillas de grafito impregnadas con cobre para motores eléctricos, rodamientos impregnados con aceite con porosidad controlada, filtros, componentes automovilísticos (que en la actualidad constituyen cerca del 70%), aeroespaciales, nucleares, industriales, por mencionar algunos.

En términos energéticos, las piezas que se obtienen de este proceso, compiten con las fabricadas por el proceso de fundición, debido a que la transformación de un componente mediante la tecnología pulvimetalúrgica implica, en algunos casos,

ahorros de hasta un 40%, procesando el 95% de polvo metálico (5% de pérdidas) y requiriendo 29 MJ/Kg de piezas fabricadas, en tanto que la fundición consume 40MJ/Kg empleando el 90% de materia prima y teniendo un 10% de pérdidas.

En el presente trabajo se hace una recopilación de la información más relevante acerca de la metalurgia de polvos aplicada al cobre y sus aleaciones, situando su presencia en un inicio en el marco mundial, en Mesoamérica y en México.

Especialmente explicando cómo es que la metalurgia de polvos es un proceso atractivo, relevante y muchas veces único, en la manufactura de piezas, destacando sus atributos sin dejar de mencionar sus desventajas.

Se describen las etapas desde los métodos de producción más importantes, pasando por la caracterización y el manejo de los polvos, los métodos de compactación y de sinterización, hasta mencionar la seguridad en dicha industria.

Así mismo, se elaboró un catálogo de piezas de cobre y sus aleaciones, donde se incluye la pieza final terminada, sus propiedades físicas y mecánicas.

1.2 Objetivos

Objetivo general

Llevar a cabo una recopilación bibliográfica con el fin de obtener, analizar y clasificar información fundamental, sobre el proceso de la metalurgia de polvos del cobre y sus aleaciones.

Objetivos particulares

- I. Identificar los procesos de producción de polvos de cobre, que se emplean en la industria en México, con el fin de conocer la materia prima particulada que se obtiene de dichos procesos.
- II. Examinar las técnicas de caracterización y manejo de los polvos mediante las cuales se determinan las propiedades de los mismos.
- III. Investigar los métodos de compactación aplicables a los polvos de cobre, para poder comprender las variables y condiciones de operación más relevantes.
- IV. Mostrar los procesos de sinterización que se siguen para conformar piezas con propiedades y características finales, con el propósito de cumplir con las especificaciones requeridas por la industria.
- V. Analizar y valorar los procesos de la pulvimetalurgia, para poder seleccionar técnicas de bajo impacto que coadyuven a las empresas mexicanas a ser una ESR (empresa socialmente responsable).

1.3 Justificación

En el presente trabajo se muestra la oportunidad de impulsar a la industria mexicana hacia el desarrollo de nuevos materiales de múltiples presentaciones, fabricados por la metalurgia de polvos (MP), como una alternativa a los procesos de fabricación convencionales, generando así nuevas necesidades para la industria nacional. Con el objetivo de describir el proceso de fabricación de materiales base cobre.

La conformación por pulvimetalurgia presenta diversas ventajas ya que es un proceso que permite un gran control sobre las características de la pieza como son las dimensiones y la porosidad de la misma, adicionalmente la pieza obtenida rara vez requiere de procesos de mecanizado posteriores, así como también carece de tensiones residuales debido a que en su fabricación no intervienen procesos de deformación que los produzcan. También es un proceso con una gran velocidad de producción, lo que permite un volumen de piezas muy elevado en poco tiempo.

La intención para trabajar en esta investigación radica en el hecho de que la metalurgia de los polvos es un proceso que a pesar de que en México no resulte tan común como otros, a nivel mundial sí representa una alternativa que merece ser estudiada, ya que ofrece productos con características que no pueden ser obtenidas con facilidad mediante otros procesos, adicionalmente en la actualidad existe una gran cantidad de piezas que son elaboradas mediante dicho proceso, por ejemplo en la industria automotriz existen más de 100 piezas por vehículo que son producidas mediante la metalurgia de los polvos.

Capítulo

2

Estado del arte

2. Estado del arte

El cobre y sus aleaciones constituyen uno de los principales grupos de metales comerciales, son ampliamente utilizados debido a sus excelentes propiedades de conductividad eléctrica y térmica, excelente resistencia a la corrosión, facilidad de fabricación, buena resistencia mecánica y a la fatiga, pueden ser soldados fácilmente, se pueden pulir hasta casi cualquier textura y brillo deseado, pueden ser plateados y recubiertos con sustancias orgánicas o químicamente coloreados, para ampliar aún más la variedad de acabados disponibles.

En la investigación de S. Díaz Becerro [1], se muestra el panorama general de la metalurgia de polvos, su funcionamiento y ejemplifica el proceso de la obtención de una pieza de cobre, destacando con gran relevancia que dicho proceso de manufactura se ha consolidado como un método alternativo para hacer diversas piezas de metal y que con él se pueden producir materiales de múltiple formas y de geometrías complejas, principalmente de las áreas: automotriz, armas, aeroespacial, biomédica y militar.

Por su parte E. Herriko en su artículo de tecnologías de fabricación [2], describe los diferentes métodos de producción de polvo de cobre, entre los cuales menciona los más utilizados: atomización por agua y por gas, los métodos químicos de reducción de óxidos y la molienda.

El método de reducción de óxidos de cobre ha sido uno de los más utilizados para la obtención de material particulado, en donde varios materiales de baja calidad se utilizan para su producción. Este material es principalmente óxido de cobre obtenido por oxidación química, por precipitación o cobre finamente dividido electrolíticamente. En dicho proceso, los óxidos se muelen y reducen al metal por tratamiento continuo de reducción en rangos de temperatura que van de 400°C a 600°C. La atmósfera reductora es una mezcla de gases que contiene principalmente CO, H₂, N₂ y CO₂, mientras que el oxígeno y el vapor de agua se mantiene en un mínimo, ya que estos impiden un alto grado de pureza en el ciclo de reducción e influyen en el tamaño de partículas de los óxidos metálicos iniciales sobre la temperatura de reducción y la naturaleza del agente reductor, tal como hace mención J. M. Perea en su investigación [3]

En el siguiente trabajo se prepararon materiales compuestos base cobre, reforzados con una dispersión homogénea de 0,5 y 1% (vol.) de partículas muy finas de carburo de niobio, mediante el proceso de molienda mecánica, emplearon tiempos de 8 y 24 h y utilizaron velocidades de rotación de 153 y 300 rpm.

La consolidación de las partículas reforzadas obtenidas, se realizó mediante compactación uniaxial aplicando una presión de 90 MPa en caliente a 650°C durante 2 h, bajo atmósfera protectora de argón. De acuerdo a M. López et Al [4], la adecuada combinación de propiedades obtenidas en esta aleación, como la

conductividad eléctrica y las propiedades mecánicas, frente a otras aleaciones base cobre similares estudiadas, se encontró que se debe a la dureza y suficiente estabilidad térmica del carburo de niobio, que provoca un mayor refinamiento del tamaño de partícula de cobre con un reforzamiento de la aleación.

Se observó una menor fragilización y mayor conductividad eléctrica de esta aleación, como consecuencia de la menor cantidad de impurezas (hierro, cromo, carbono y oxígeno) incorporadas durante la molienda de baja energía. Mediante microscopía electrónica de barrido, de transmisión y difracción de rayos X se demuestra, además, que se produce un reforzamiento microestructural adicional por la precipitación de las impurezas nanométricas.

La producción y caracterización de polvos metálicos obtenidos por atomización y enfriamiento rápido, fue el tema abordado por A. Ozols [5], que consideró como punto importante la atomización del material fundido y luego la solidificación. Empleó como materia prima polvos de metal-vidrio, aplicando una compactación rápida, evitando la recristalización, sin embargo, esta técnica produjo la mayoría de las estructuras con una fase cristalina metaestable y finalmente amorfo.

Las propiedades mecánicas y químicas superaron significativamente las de los compuestos de la metalurgia convencional. Formando estructuras microcristalinas (de 0.2 a 0.3 μm) o con fases internas finamente dispersas (boruros, nitruros y carburos), resultandos favorables para la fabricación de herramientas de corte y resistentes al desgaste.

En el siguiente trabajo de investigación, se utilizó el método de compactación por matrices, empleando una aleación base cobre (80%) enriquecido con zinc (20%), empleando como lubricante estearato de zinc (2%), se consideró de vital importancia evaluar las propiedades mecánicas (dureza y desgaste) de las piezas fabricadas por la vía pulvimetalúrgica.

De acuerdo a J.Huanacuni [6], este proceso fue elegido debido a la precisión que requieren los elementos que se pretendían conformar, básicamente fueron bujes para cojinetes los cuales trabajan en medios de rodamiento, donde la fricción juega un papel importante y como punto principal no requiere de maquinado para establecer las dimensiones exacta de diseño.

Los parámetros de sinterización empleados fueron, en tiempo: 15, 20 y 30min y en temperaturas 800, 850 y 950°C, dando como resultado la declinación de la dureza conforme al incremento del tiempo y el efecto de la temperatura se manifestó en

800 y 950°C, con la misma tendencia de disminución. Por otro lado, el desgaste presentó un comportamiento inversamente proporcional a la dureza.

Continuando con trabajos en donde la fricción juega un papel de suma relevancia en el desgaste, la siguiente investigación describe la fabricación de las piezas de matriz metálica, constituidas por partículas de polvos de cobre, abrasivos que controlan la fricción y se usó grafito como lubricante sólido para minimizar la vibración y el ruido generado durante el frenado. B. Pérez Polo [7] elaboró materiales de fricción orientados a la fabricación de discos de embrague para máquinas de gran tonelaje, empleando dos rutas, por un lado, la ruta pulvimetalúrgica (compactación + sinterización), y por otro lado, la ruta alternativa que consiste en la sinterización de polvo suelto, depositado previamente en moldes y su posterior prensado en frío, para reducir la elevada porosidad obtenida en la etapa anterior (mejor conocido como el proceso industrial Sprinkle).

En este trabajo se estudió la influencia de los constituyentes (abrasivos y grafito), en la microestructura y propiedades del material de fricción, se ensayaron los discos fabricados industrialmente en un dinamómetro de inercia reproduciendo las condiciones reales de frenado/embragado.

En el ámbito de los materiales superconductores a alta temperatura, se encuentra la investigación de M. Pérez [8], en la cual se empleó como materia prima polvo de Cu mezclado con elementos de tierras raras (Sm, Dy, Pr y La). Se fabricaron tabletas por compresión a altas presiones (80 Ton) para inducir el efecto de difusión del dopante (tierra rara) en la matriz de cobre y se realizaron pruebas a las mezclas con los diferentes elementos (cada uno de ellos por separado) para identificar los efectos físicos, los de conducción eléctrica, superconductividad (efecto Meissner) y la susceptibilidad a los campos magnéticos.

Teniendo como resultado, que la conductividad se mejoró con la adición de tierras raras en comparación con la del cobre solo, el praseodimio presentó una mayor resistencia eléctrica a temperatura ambiente mientras que en nitrógeno líquido disminuyó su resistencia, en tanto que el lantano fue el que tuvo la menor resistencia eléctrica. El praseodimio exhibió la mayor difusión, notando su presencia en los límites de grano. Las tabletas de Cu-Pr y Cu-Sm presentaron un comportamiento de superconductores a alta temperatura y el Sm fue el único de todas las tierras raras ensayadas que presentó el efecto Meissner.

M. Malachevsky et Al. [9] se dieron a la tarea de fabricar esponjas de cobre, empleando perlas de urea como formadores de poros que fueron removidas por disolución en agua, antes de sinterizar el compacto. Se determinaron los parámetros de sinterizado: presión de compactado (180 y 250MPa), temperatura (900°C) y atmósfera de argón, para fabricar las espumas.

La meso y microestructura de las muestras, se determinaron empleando técnicas como: microscopía electrónica de barrido (SEM) y difracción de rayos x, permitiendo visualizar en 3D la distribución de las celdas, realizar una caracterización completa de la mesoestructura, además de evaluar la porosidad de las muestras, la dureza y seguir la evolución de la deformación de las celdas en ensayos de compresión.

Obteniéndose como resultado una porosidad abierta del 81%, de celdas interconectadas y aproximadamente esféricas en todas las espumas, debido a que las perlas de urea no lo fueron. De la caracterización mecánica de las muestras en compresión, se determinó que la falla se produce por pandeo plástico y rotura de las paredes de celda, formando bandas de deformación a baja tensión nominal. Estos autores observaron que para bajas densidades las paredes de celda fallan por flexión y pandeo, creándose bandas de deformación, por lo que en diferentes direcciones se produce una distorsión interna del material.

En el artículo que a continuación se cita, emplearon residuos peligrosos de la industria del cobre, para promover una reducción del impacto ambiental, E. Toro [10], a través de la pulvimetalurgia sustituyó parcialmente polvos redondos comerciales por partículas irregulares (escoria de cobre), para usarlo como un producto con auto lubricación. Para conseguir tal objetivo, el residuo fue tratado con un proceso físico (conminución durante 3 horas) y térmico (reducción de óxidos en un horno eléctrico, con atmósfera reductora con gas de hidrógeno de ultra alta pureza a una temperatura de 400 °C).

Se determinó el efecto del tiempo de sinterización, a 20, 40 y 60 minutos, con las propiedades finales del producto. Posteriormente, se mezcló el polvo tratado de geometría irregular (pureza de 99%), con el polvo comercial con geometría redondeada, (pureza del 99.5%), la relación utilizada fue 1:1; el lubricante que se utilizó fue estearato de zinc y la presión de compactación fue de 150MPa.

Las propiedades evaluadas del producto sinterizado fueron: dureza, desgaste, porosidad y absorción del lubricante; además se realizaron estudios metalográficos para observar la estructura y formación de poros.

Los resultados arrojaron el efecto negativo del tiempo de sinterización en las propiedades mecánicas, induciendo a la disminución de la dureza, pero aumentando la ductilidad. Además se determinó, que el tiempo de sinterizado fue inversamente proporcional al tamaño de los poros en el material, favoreciendo la absorción del lubricante en el material a períodos cortos de sinterización. Finalmente se determinó que se pudo usar hasta un 50% de los polvos de escoria de cobre en el producto auto-lubricable, de esta forma se redujo el impacto ambiental de los residuos peligrosos procedentes de la industria del cobre.

Continuando con el tema de la fricción, se tiene un estudio más, enfocado en la fabricación de cojinetes autolubricables, en él se evaluó la sinterización y las propiedades físicas y mecánicas de piezas de una aleación de cobre 92%Cu, 8%Zn, 1%Zn(C₁₀H₃₅O₂)₂ (estearato de zinc, como lubricante).

Se sometieron probetas a prensado por matrices y a un posterior sinterizado con temperaturas de 880 a 910°C y tiempos de 10-20 min, se determinó en ellas, la carga de rotura y las variaciones dimensionales, (diámetros interno y externo y la longitud de los cojinetes).

Teniendo como condiciones óptimas: temperatura de 900°C, tiempo de 20min, porosidad del 14% y una densidad de la aleación de 6.92 g/cm³, las cargas de fractura fueron determinados mediante el software Statgraphics Plus y el SPSS y los valores fueron empleados para formular cuatro modelos matemáticos empíricos (coeficiente de fractura, cambio dimensional en diámetro interno y externo y cambio dimensional en la longitud).

Capítulo

3

Marco teórico

3. Marco teórico

3.1 Historia

El hombre distinguió a los metales, por sus características, tales como: colores plateado, gris, amarillo o rojo, con brillo metálico, alta densidad, ductilidad, maleabilidad, resistencia y dureza; encontró que al llevarse a cabo la manipulación mediante calentado, deformado, perforado, pulido y fundido, sus propiedades y comportamientos eran muy diferentes a los de los demás materiales; sus características hicieron inevitable que se les relacionara con los principales cuerpos celestes (las estrellas), a los cuales se les dio un carácter sagrado en muchos casos. [11]

El cobre juega un papel importante en la naturaleza, debido a su mayor influencia en la vida, historia y desarrollo del hombre. Se localiza en una infinidad de aplicaciones de uso cotidiano hasta en los dispositivos de alta tecnología.

Para adentrarnos más sobre el tema es indispensable recordar, que la era del cobre se desarrolló del año 6000 al 1000 a.C [12], el uso del cobre vio sus inicios en la orfebrería, piezas antropológicas, en los utensilios de cocina, en las armas de caza, etc. Labrando así el nacimiento de nuevas ramas de capacitación, entre ellas la metalurgia [13].

A medida que el tiempo pasaba la civilización humana comprendió su composición y su manejo. La primera fusión de un cobre nativo para ser colado en un molde con la forma del objeto deseado, se hizo alrededor del año 4300 a. C.; para el 3800 a. C. esta práctica estaba generalizada [15].



Figura 3.1 Piezas de cobre realizadas por antepasados [11].

Las técnicas de fundición y forjado del metal, fueron mejorando con el transcurso del tiempo, siendo esto esencial para la experimentación con nuevos metales como el hierro, que requerían un tratamiento más complejo tanto para su extracción como para su procesamiento [12]. Una parte fundamental en el desarrollo, progreso y evolución de las civilizaciones sin duda han sido los metales, gracias a estos ha prevalecido la humanidad desde su existencia.

3.2 El cobre en el mundo.

El uso del cobre se remonta al comienzo de la civilización hace unos 10,000 años, cuando los seres humanos comenzaron a usar un metal natural que era maleable, duradero y tenía niveles de resistencia hasta ahora desconocidos, en lugar de seguir dependiendo de las herramientas de piedra.

La pieza de cobre más antigua descubierta por los arqueólogos apareció en el territorio del actual Irak, es un pendiente que data del año 8.700 a.C. (figura 3.2)



Figura 3.2 Pieza más antigua de cobre, de la que se tiene conocimiento [12].

La historia apunta a que el desarrollo de la industria minera del cobre vió sus inicios entre civilizaciones muy desarrolladas algunos milenios antes del nacimiento de Cristo, como la sumeria y la egipcia, que fueron cunas del saber. Los antiguos egipcios asociaron el cobre metálico con el símbolo Ankh, que también representaba la vida eterna. Más tarde, su uso se extendió al mundo antiguo, incluidas las civilizaciones helenística y romana. Chipre fue un escenario importante en la minería del cobre, ya que fue ahí donde se descubrieron importantes yacimientos de este metal. Esta región era conocida como Cyprium por los romanos, y es de este nombre que deriva la palabra latina cuprum , que da origen al nombre español cobre.[12]

Con el paso del tiempo, el cobre tomó un papel relevante en el desarrollo humano, ya que su uso en conjunto con el estaño permitió la formación de una aleación que fue crucial para la civilización, conocida como la Edad del Bronce.

A lo largo del tiempo el uso del cobre está documentado en numerosos objetos y testimonios; se utilizó para crear uno de los famosos rollos de cobre, del manuscrito

del Mar Muerto, para los sistemas de plomera en las Pirámides Egipcias, para reforzar barcos como los que usó Cristóbal Colón, etc.

Así mismo en América, civilizaciones como los aztecas, los incas emplearon el metal rojizo y quedó documentado en la zona andina, el desarrollo de una metalurgia que incluía el manejo de sus aleaciones. (figura 3.3) [13]



Figura 3.3 Máscara de cobre en Sudamérica [13].

3.3 El cobre en Mesoamérica.

No se tiene evidencia aún si en el continente que hoy conocemos como América, el desarrollo de la metalurgia fue individual o si se transmitió de una civilización a otra desde el exterior. Pero hay quienes opinan lo contrario y sostienen, sin proporcionar todavía elementos sólidos y convincentes, la presencia de una influencia del Viejo al Nuevo Mundo en una época no precisa, o inclusive del continente asiático [17].

Desde luego, grupos de investigadores de muy diversos países y disciplinas, continúan laborando en esta dirección. Lo cierto es que el uso del cobre estuvo limitado, por lo menos en su fase inicial, a los sitios donde el metal podía encontrarse como material de superficie en estado nativo y que por otra parte se inició en muy distintos lugares de la tierra y en diferentes épocas. De acuerdo con George Irving Quimby, los grupos indígenas que habitaron cerca de las orillas del Lago Superior de América del Norte, región rica en cobre nativo, ya lo utilizaban aproximadamente 5 mil años antes de nuestra Era. Otros señalan que el trabajo del cobre nativo data de 4 a 3 mil años a.C. [18].

Estudios recientes coinciden en un cuadro cronológico del desarrollo de la metalurgia prehispánica en América, antes de la llegada de los españoles. La cultura más antigua se remonta al año 800 a.C., y corresponde al área del Alto Perú (zona geográfica: Perú, Bolivia y norte de Argentina); le sigue el Bajo Perú, 700 a.C. (zona geográfica: costa del Perú y Ecuador); en tercer lugar, aparece Colombia, 600 años a.C. (zona geográfica: Colombia y más interior de Ecuador); le sigue Centroamérica: 700-900 d.C. (zona geográfica: Centroamericana); y por último, Mesoamérica: 700-900 d.C. [19].

Existe una corriente muy extendida que señala que, en América, y muy particularmente en el área mesoamericana, el empleo del cobre obtenido por fundición a partir de sus menas, estaba muy poco difundido a la llegada de los españoles. En lo general, se indica que «en América sólo podemos hablar de un bronce incipiente confinado a los dominios inca y (con reservas) azteca y maya, nacido poco antes de la presencia española. No se hace un uso amplio del bronce a principios del siglo XVI, los incas y los aztecas siguieron dependiendo en gran medida de los instrumentos líticos; tampoco aparecieron nuevos elementos instrumentales, limitándose a reproducir en bronce lo que normalmente hacían en piedra pulida o tallado, figura 3.4 [17]



3.4. Metalurgia y orfebrería inca. [15]

3.4 Producción de cobre en México

El hallazgo del cobre en los pueblos de Mesoamérica va más allá de 5 mil años a.C., particularmente en México se tienen registros que indican que este metal se tuvo y se empleó en lo que hoy es el Estado de Michoacán, pero también se tienen datos que había minas prehispánicas en el estado de Guerrero [16].

Los depósitos con reservas más importantes se encuentran aglomerados en una región relativamente delimitada, que se despliega por los estados de Arizona y Nuevo México, en el suroeste de los Estados Unidos, y el noreste de México, particularmente en el noroeste de Sonora, en donde se encuentra el 70% de los centros mineralizados. [20]

Basta mencionar que la operación de las minas asociadas a estos sistemas mineralizados produce el 95% del cobre total del país. Esto representa cerca del 3.3% del cobre pÓrfido a nivel global, considerando que la Cordillera del oeste del Norte de América tiene el 30% de depósitos de cobre, dando un total de 1336 Mt de Cu como se muestra en la figura 3.5 y aproximadamente el 18.01% del potencial estimado para el gran cluster en donde se produce 240 Mt de Cu, se encuentra en la zona noroeste de México, como se puede apreciar en la figura 3.6 [21].

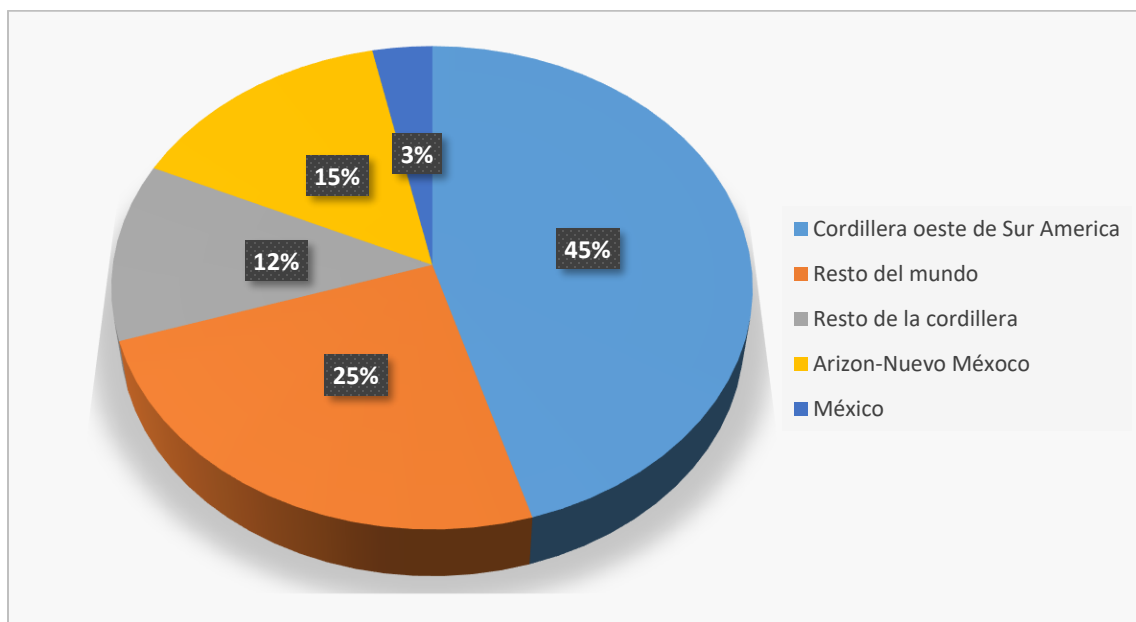


Figura 3.5 Presencia de depósitos de pÓrfidos de cobre a nivel global [22]

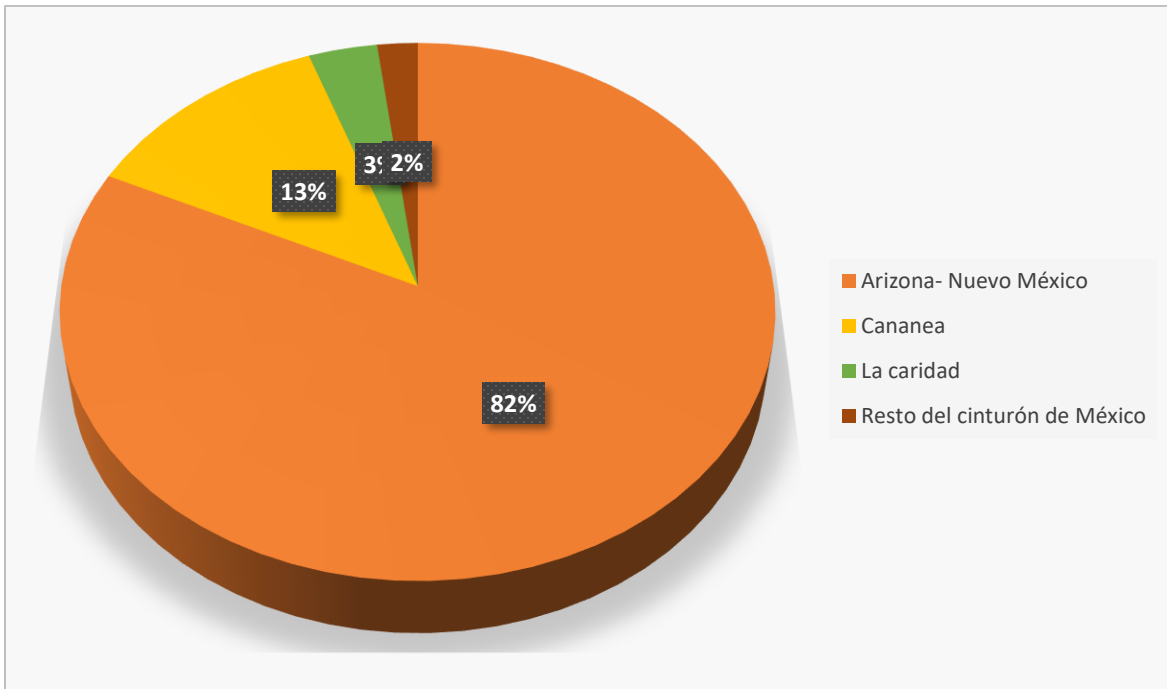


Figura 3.6 Presencia de depósitos de cobre en el noroeste de México [22].

El cobre es el cuarto metal que más se produce en México y Sonora es el estado líder con más del 85% de la producción total, seguido por Zacatecas y San Luis Potosí. Esto ha permitido que nuestro país se encuentre entre los 10 países con mayor producción de cobre [16].

En 2018, a nivel mundial, los principales productores de cobre de acuerdo al Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS por sus siglas en inglés, United States Geological Survey), fueron Chile, Perú y China.

México produjo 696.58 mil toneladas de cobre en el 2018 contra 742.25 mil producidas en 2017, un decremento de 6.5%, esto se puede apreciar en la figura 3., dicha producción lo coloca en el noveno sitio en la producción mundial, por empresa y por entidad federativa. [22]



Figura 3.7 Comparación de producción de cobre en los años 2017 y 2018

De acuerdo a la CAMIMEX, Grupo México mantuvo su posición como el mayor productor de cobre en México sumando un total de 552,864 toneladas en el 2018. Este antecedente indica una reducción del 4.2%, comparado contra las 576 mil 832 toneladas producidas en 2017. Mientras que Buenavista del Cobre, aun sumando la producción de concentrados y cátodos de cobre, produjo 414,142 toneladas en 2018, 4% menos que en 2017.[13]

El mayor estado productor de cobre en México es Sonora con 81.3% de la producción total, el segundo lugar lo ocupó Zacatecas, especialmente con la producción de 16,399 toneladas. Finalmente, San Luis Potosí en el tercer lugar con la producción [23] esto se puede observar en a figura 3.8



Figura 3.8. Lugares del país en donde hay producción de cobre [23].

3.5 Cobre

El cobre es un elemento químico metálico representado por el símbolo Cu (su nombre proviene del latín cuprum, a su vez proveniente del griego kypros), que compone junto con el oro, la plata y el roentgenio a la denominada familia del cobre de la Tabla periódica de los elementos químicos. [24]

El cobre es un metal de transición, caracterizado por ser uno de los mejores conductores conocidos de la electricidad (después de la plata). Si a ello sumamos su ligereza, alta maleabilidad, ductilidad y precio económico, tendremos uno de los elementos más idóneos para la fabricación de herramientas, piezas eléctricas y electrónicas, y muchos otros dispositivos de usos industriales.[24] En la figura 3.9 se puede apreciar una ilustración del cobre como elemento.



Figura 3.9 Cobre metálico. [25]

Tabla 3.1. Propiedades físicas del cobre

Número atómico	29
Valencia	1,2
Estado de oxidación	+2
Electronegatividad	1.9
Radio atómico	1.28
Masa atómica (g/mol)	63.54
Densidad (g/cm ³)	8.96
Punto de ebullición (°C)	2595
Punto de fusión (°C)	1083
Conductividad térmica (W/k*m)	400
Conductividad eléctrica (S/m)	58,108x106
Color	Rojizo brillante
Lustre	Metálico
Transparencia	Opaco
Dureza	2.5-5
Resistencia a la corrosión	Alta
Raya	Rosa
Sistema de cristalización	Cúbico
Tenacidad	Maleable
Fractura	Astillosa

Es económico y puede reciclarse de manera indefinida. Es sumamente dúctil y maleable, por lo que puede mecanizarse con facilidad para hacer láminas o hilos delgados ya que es un metal blando.

Cuando se lo expone durante mucho tiempo a la humedad, forma una capa impermeable de carbonato cúprico (CuCO_3) de color verdoso, que es sumamente tóxico. También forma una pátina llamada cardenillo o verdín (una mezcla de acetatos de cobre) que usualmente cubre las estatuas y es sumamente venenosa.

A pesar de ser un oligoelemento necesario para la vida, la ingesta excesiva de cobre también puede conducir a daños internos y la muerte.

Usos y aplicaciones del cobre

El cobre es el tercer metal más consumido en el mundo actual, luego del hierro y el aluminio, ya que sus aplicaciones en la industria eléctrica, electrónica y siderúrgica son muy numerosas. [26]

La mayor parte del cobre del mundo se obtiene de los sulfuros minerales como la calcopirita, covelita, calcita, bornita y enargita. Los minerales oxidados son la cuprita, tenorita, malaquita, azurita, crisocola y brocantita. El cobre natural, antes abundante en Estados Unidos, se extrae ahora sólo en Michigan. El grado del mineral empleado en la producción de cobre ha ido disminuyendo regularmente, conforme se han agotado los minerales más ricos y ha crecido la demanda de cobre. Hay grandes cantidades de cobre en la Tierra para uso futuro si se utilizan los minerales de los grados más bajos, y no hay probabilidad de que se agoten durante un largo periodo.

El cobre no es magnético; o más exactamente, es un poco paramagnético. Su conductividad térmica y eléctrica son muy altas. Es uno de los metales que puede tenerse en estado más puro, es moderadamente duro, es tenaz en extremo y resistente al desgaste. La fuerza del cobre está acompañada de una alta ductibilidad. Las propiedades mecánicas y eléctricas de un metal dependen en gran medida de las condiciones físicas, temperatura y tamaño de grano del metal. [27]

Algunos de los usos más comunes son:

Eléctrica, electrónica y telecomunicaciones. El cobre se emplea como conductor eléctrico en la fabricación de cables eléctricos y coaxiales, así como en el interior de generadores, motores y transformadores eléctricos. Además, los circuitos integrados y numerosos componentes de los sistemas informáticos contemporáneos requieren de cobre para su fabricación.

Transporte. Numerosos vehículos automotores requieren de cobre para sus partes y repuestos, tales como radiadores, frenos y cojinetes, además del necesario cableado para los componentes eléctricos. Igualmente se emplea en aleaciones para elaborar partes del casco de los barcos.

Fabricación de monedas. La mayoría de las monedas del mundo están compuestas por cobre en diversas aleaciones con níquel, estaño y otros metales, como el aluminio o el bronce.

Construcción y ornato. Debido a su resistencia a la corrosión, el cobre y el latón se emplean en vez del plomo tradicional en la mayoría de las tuberías de agua, en tanto conjuntos residenciales como industriales o comerciales. Esto se debe a que el plomo es nocivo para la salud y el cobre es un material arquitectónico común. También se usa para los pomos de las puertas, para las estatuas de las plazas, las campanas de las iglesias y para un amplio segmento del sector construcción.

Aleaciones y subproductos. El cobre también sirve de insumo en la obtención de otros metales más específicos, como el latón (Cu + Zn), el bronce (Cu + Sn), la alpaca (Cu + Ni + Zn), o en la producción del alambro, de pilas eléctricas, etc. [26]

3.6 Pulvimetalurgia

El uso de los materiales en polvos se remota a varios centenares de años atrás.

Pero apenas en el siglo pasado que, debido avances tecnológicos de la segunda Segunda Guerra Mundial la industria de la pulvimetalurgia se creó como tal. Desde entonces gracias a sus continuos avances, la calidad y la utilidad de los productos ha crecido más rápidamente que cualquier otro proceso de manufactura de piezas metálicas.

La metalurgia de polvos o pulvimetalurgia (PM) es un proceso de manufactura que comienza con la fabricación de polvos, generalmente de metales puros, principalmente hierro, cobre, estaño, aluminio, níquel y titanio, cromo. También es utilizada en aleaciones como latones, bronce, aceros, aceros inoxidables, silicio. Metales refractarios como el tungsteno, tantalio y molibdeno o polvos pre-aleados. Para obtener las características necesarias, (povos de diversos tamaños y composiciones, aditivos que actúan como lubricantes durante la compactación o aglutinantes que mejoran la resistencia de la compactación en crudo) Posteriormente este se comprime con ayuda de prensas mecánicas o hidráulicas en una matriz, lo que da como resultado una compactación en crudo. A estos objetos o piezas metálicas se le aplica un calentamiento o sinterizado en un horno con atmosfera controlada a una temperatura cercana al 75% de su punto de fusión. [20]

En ciertos casos, los productos de uso tecnológico están hechos de material sinterizado y se denominan indiscriminadamente componentes sintéticos, piezas sintéticas o piezas de MP. [21]

Se ha utilizado durante más de 60 años para fabricar una amplia variedad de componentes estructurales, tales como: bujes auto lubricados, herramientas e corte, engranes, piezas de máquinas de diversas aplicaciones, etc.

Además, los metales en polvo se pueden utilizar directamente como materiales de entrada en un número creciente de desarrollos científicos prometedores y con potencial industrial.

El producto terminado puede ser sometido a un proceso de acabado. Como el Acuñado, Impregnación, Tratamientos térmicos y superficiales y Mecanizado. [20,21]

Las piezas producidas con este método se caracterizan por una alta precisión en su forma (a menudo sin tratamiento adicional, incluso en el caso de formas geométricas complicadas) y la gran diversidad de aleaciones específicas, y por sus diferentes grados de densidad que van desde aleaciones muy porosas a muy densas. [20]

Este proceso se ha ido fortaleciendo en las últimas décadas como un método alternativo para la fabricación de pequeñas piezas metálicas. Ya que con este es posible producir pequeñas y complejas formas de materiales como: metales, cerámicos, compósitos y componentes metálicos.

Han sido numerosas las aplicaciones que se han utilizado en sectores industriales como: aeroespacial, hardware de ordenadores, biomedicina y armamento militar. Ejemplos de esto son: cojinetes sinterizados autolubricantes, filtros sinterizados, materiales de fricción, piezas modeladas por inyección de gran complejidad, metales duros sinterizados para herramientas de corte y piezas de desgaste con capas adicionales de materiales duros, herramientas de diamante de extrema dureza, los materiales refractarios poseen altos puntos de fusión que los hacen imposibles de operar con maquinaria que puede considerarse ordinaria para el procesamiento de otros metales; la mayoría de los metales parecen reaccionar intensamente a la atmósfera cuando llegan a su punto de fusión, por lo que no es posible procesarlos de esa manera.

Estas propiedades traen beneficios importantes tanto en lo económico (costos de piezas y mantenimiento) como en funcionamiento de la máquina que tenga la pieza fabricada por este método, este punto se hablara más adelante.

Un área que progresa con fuerza es el de la fabricación de componentes de cobre de alto rendimiento. También sigue creciendo la fabricación de imanes, lo que ha posibilitado grandes mejoras en el campo de las telecomunicaciones, el de control y regulación, el de medición, diagnóstico médico y el de construcción de vehículos. Este sector de la pulvimetalurgia se encuentra en los últimos tiempos bajo una gran presión debido al fuerte aumento del precio de las materias primas y de la energía. [20]

Durante la década de 1940 y principios de la de 1950, el polvo de cobre y los cojinetes auto lubricantes fueron los principales productos fabricados por MP

En la década de 1970 mediante la apertura de nuevos mercados a través de un rendimiento superior junto con la rentabilidad de conservación de material y vida útil más larga. La comercialización de material de alto rendimiento a base de polvo surgió como un gran avance en el trabajo de los metales.

La metalurgia de polvos es un proceso productivo que combina las características de la tecnología de conformación para la compactación de polvos con la creación del material final y las propiedades de diseño (físicas y mecánicas) durante los procesos posteriores de densificación o consolidación (por ejemplo, la sintonización) [22]

3.6.1 Ventajas y desventajas de la MP

➤ **Ventajas**

Las ventajas que hacen de la MP un proceso importante comparado con otras tecnologías de formado de metales, desde el punto de vista económico y tecnológico son las siguientes:

1. Menor costo de producción por lote de piezas complejas con una baja tolerancia. [20]
2. Menor consumo de energía. [21]
3. Mejor utilización de las materias primas [20]
4. Proceso de producción compatible con la protección del medio ambiente. [22]
5. Durante el proceso de conformado se puede obtener de forma económica la combinan con de metales y no metales para la fabricación de piezas, como en el caso de la industria eléctrica, en la cual las escobillas de los motores y los contactos deben de tener conductividad propia, pero a la vez resistentes al desgaste y al arco eléctrico que se forma al hacer contacto, las escobillas se fabrican de polvo de cobre, grafito y en algunas ocasiones de estaño y plomo. Por otra parte, los contactos requieren combinaciones de materiales como tungsteno con cobre y plata. [22]
6. Un punto importante a considerar en la selección de este proceso de conformado es el poco desperdicio de material que involucran las
7. operaciones. Aproximadamente el 97% del polvo que se emplea inicialmente se convierte en producto, se puede apreciar en la figura 3.10. Esto se compara favorablemente con los procesos de fundición en los cuales las coladas, alimentadores y mazarotas con material de desperdicio en cada ciclo de producción. [20]



Figura 3.10. Productos fabricados por el proceso de PM [23]

8. Debido a la naturaleza del material inicial en la MP, 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 engranajes impregnados con aceite, así como filtros. [20]
9. Los métodos de producción por metalurgia de polvos se pueden automatizar, lo que en un momento permite bajar costo de operación y lograr una alta calidad en el producto. [22]
10. Ciertos metales que son difíciles de fabricar por otros métodos, se pueden fabricar por MP. El tungsteno es un ejemplo, los filamentos de tungsteno que se usan en las lámparas incandescentes se manufacturan con tecnología de MP. [20]
11. Alta capacidad de producción. Los niveles de temperatura son menores que los procesos convencionales por lo tanto las piezas se enfrían más rápido. [20]
12. La precisión dimensional y el acabado superficial del componente son buenos y elimina la operación de maquinado [22]
13. Ciertas combinaciones de aleaciones metálicas y cermets que no se pueden producir por otros métodos se pueden hacer por MP. [20]
14. La MP se comparan favorablemente con la mayoría de los procesos de fundición en lo que se refiere al control dimensional de los productos. [20]
15. Las tolerancias rutinarias que se pueden lograr son de $\pm 0,13$ mm. ($\pm 0,005$ pulg.). [20]
16. 3. Por medio de este método se pueden fabricar artículos de cualquier forma característica, pero de tamaño limitado.
17. 4. Se pueden fabricar componentes de la porosidad deseada mediante el control de la composición de los constituyentes y la presión de compactación (Rodamientos Filtros y Engranajes), y posibilita que puedan absorber vibraciones.
18. Se pueden mezclar dos o más metales en la proporción que se requiera para dar las propiedades deseadas, lo que es difícil de lograr mediante fundición.

19. La operación es más limpia y rápida y la vida útil del componente es más larga.
20. Mediante este proceso también se fabrican puntas muy duras para herramientas de carburo de tungsteno.
21. Se obtiene una estructura relativamente más uniforme, sin defectos.
22. Se pueden mezclar metales y no metales en cualquier proporción y fabricar componentes con ellos.
23. Se pueden producir partes con amplias variaciones en la composición del material.
24. Solo mediante este método es posible la producción de herramientas impregnadas con diamantes.
25. Por medio de este método se producen materiales para contactos eléctricos y magnéticos.
26. Mediante este método se pueden producir aleaciones de metales que tienen puntos de fusión y densidades ampliamente diferentes.
27. No se requiere mano de obra altamente capacitada y calificada.
28. La producción de aleaciones de cobre y plomo (cojinetes) es posible gracias a la técnica de la MP.
29. Se consigue un importante ahorro energético, ya que nunca se alcanzan las condiciones de fusión del material.
30. Permite el conformado de materiales con puntos de fusión muy elevados, no adecuados para fusión y moldeo.
31. También hay que señalar que, de los procesos de fabricación, el proceso de sinterización es el de menor consumo de energía por kg procesado, con alrededor de un 29%. [35]

➤ **Desventajas de la Metalurgia de los Polvos.**

1. Muchas formas complicadas que se pueden producir mediante fundición son imposibles de elaborar por medio de la MP.
2. Los componentes fabricados mediante la MP no poseen tan buenas propiedades físicas como las partes fundidas o forjadas.
3. El procedimiento de fabricación de polvos, al igual que el de compactación y sinterización es costoso, es decir los polvos metálicos son caros.
4. El costo inicial de las matrices es elevado.
5. Mediante esta técnica no se pueden producir componentes de gran tamaño.
6. Los polvos metálicos poseen mayor volumen, son difíciles de almacenar y se oxidan o se deterioran si se almacenan mucho tiempo.
7. Los artículos producidos por este método tienen ductilidad deficiente.
8. El maquinado de los componentes es difícil.
9. Debido a que las matrices se utilizan bajo presiones muy grandes, su desgaste normal es alto.
10. Este proceso no es económico para producir componentes de menos de 35000 piezas.
11. No se puede producir un producto altamente denso.
12. Puede ser difícil obtener polvo de alguna aleación en particular.

13. Existen límites de diseño en el caso de las partes que se producen mediante esta técnica, es difícil comprimir algunos metales.
14. Las partes que se comprimen desde la parte superior tienden a ser menos densas en la parte inferior, la forma de los componentes se limita a geometrías que puedan elaborarse mediante una matriz de compactación, ya que el polvo no fluye lateralmente.
15. Los equipamientos son muy costosos y se requiere inversiones iniciales importantes, que tan solo se amortizan con niveles de producción muy elevados.
16. La obtención y el almacenaje es un proceso costoso, que encarece notablemente los componentes pulvimetalúrgico.
17. Las dimensiones de las piezas obtenidas por esta técnica están limitadas y no suelen superarse secciones de 150 cm³ ni alturas mayores de 80mm.
18. Algunos metales presentan oxidaciones muy rápidas y exotérmicas. Lo cual dificulta en gran manera su almacenaje, por ejemplo Al, Mg.
19. Debido a la porosidad la resistencia mecánica de los componentes pulvimetalúrgicos suele ser inferior a la de los componentes elaborados por fusión y moldeo.
20. Es posible que la compactación no sea igualmente eficaz entre dos regiones con espesores distintos, lo que obliga a realizar operaciones de recalados posteriores. [25]

3.7 Producción de polvos metálicos

Existen diferentes formas de producir polvos metálicos en función de las características físicas y químicas de los metales utilizados. Existe una relación muy clara entre un método específico de producción de polvo y las propiedades que se obtienen en el proceso final. Se utilizan muchos métodos mecánicos y químicos con la intención de producir polvos con aplicaciones específicas, pero los métodos de mayor interés son: la pulverización, reducción de óxidos y deposición electrolítica. [11]

La manufactura del polvo es muy importante y se debe de trabajar bajo ciertas especificaciones, las cuales determinan las características últimas y las propiedades físicas y mecánicas de las partes compactadas. Estas especificaciones incluyen requerimientos sobre tamaño y forma de la partícula, flujo del polvo, compresibilidad, pureza, densidad aparente, entre otras. [12]

Esta sección va a abordar los principales métodos de fabricación de polvos metálicos. Con particular énfasis a los métodos aplicados para la producción comercial más importantes. Para fines académicos, los métodos industriales pueden ser clasificados en los siguientes grupos:

- Procesos físicos o mecánicos
- Procesos químicos
- Procesos electrolíticos

La sección del proceso depende principalmente de la recopilación de propiedades mecánicas, físicas y químicas del material a procesar. Se debe tener en cuenta porque, en función del proceso utilizado, se producirán polvos de la misma sustancia, con propiedades y características variables, con efecto directo sobre las condiciones de fabricación por MP.

3.7.1 Métodos mecánicos de producción

Los procesos de extracción mecánica del polvo se dividen en dos grandes categorías, según la condición física con la que se extraiga el material. El primero es el procesamiento de material en estado sólido que se crea por pulverización mecánica y el segundo es la construcción líquida, donde el metal se puede sustraer por medio de atomización, esta última se estima procedimiento físico comercial más eficaz en la producción de polvos [13]

Las técnicas de pulverización se utilizan particularmente para adquirir polvos de metales quebradizos, pero también se pueden pulverizar metales dúctiles, para lo cual el material se daña tradicionalmente mediante métodos químicos y físicos. [14]

Los diferentes procesos de producción de cobre y la forma del polvo que producen se presenta en la tabla 3.2

Tabla 3.2. Diferentes procesos para la fabricación de cobre [10]

Proceso	Tamaño de partícula	Forma de partícula	Densidad	Moderado Alloying	Costo
Atomización centrifuga	50-100	Esférica	Alto	Si	Variable
Electrolito	5-300	Dendrítico irregular	Bajo	No	Moderado
Atomización por gas	10-300	Esférico	Alto	Si	Alto
Atomización por plasma	5-80	Esférica	Alto	Si	Muy alto
Atomización por agua	5-400	Irregular ligamentoso	Moderado a bajo	Si	Moderado

- *Atomización por gas*

Es el método más común a nivel industrial para producir polvos. La materia prima elemental se funde bajo un costo de viento o gas inerte o bajo vacío. En seguida, la cámara se llena de gas para forzar al metal o aleación fundida por medio de una boquilla donde hay viento, N, He o gas Ar que impactan contra el material fundido en desplazamiento, desintegrándolo y solidificando las partículas finas [13] en la figura 2.11 se puede valorar un esquema de este proceso. Los polvos en su mayoría resultan esféricos, esto se puede observar en la figura 3.12, con presencia de algunas partículas y satélites asimétricos. Hablamos de satélite cuando una partícula más pequeña se pega a otra más grande durante el proceso de solidificación. Los tamaños van de 0 a 500 micrones. La producción en el rango de 20 a 150 micrones varía entre el 10% y el 50% del total.

Se utiliza inicialmente para aleaciones de Ni, Co y Fe, aunque también está disponible para aleaciones de Ti y Al [14].

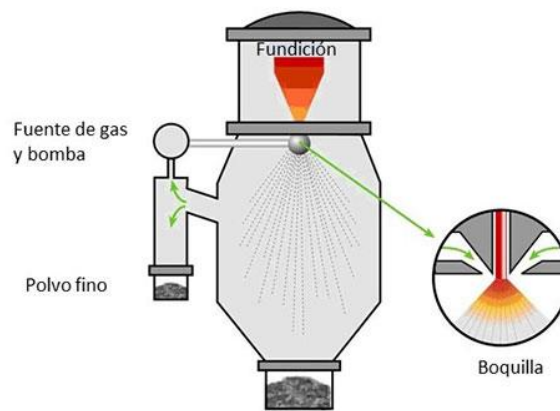


Figura 3.11 Proceso de atomización en atmósfera controlada por gas [12]

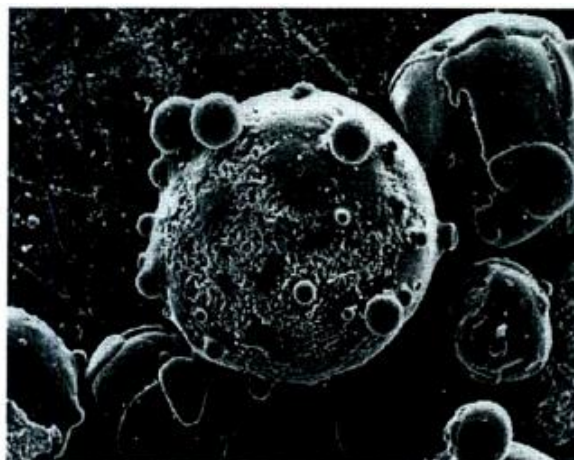


Figura 3.12. Geometría esférica de partículas obtenidas por el proceso de atomización por gas [13]

En general, el método es aplicable a todos los metales que pueden fundir, y es utilizado comercialmente para la fabricación de hierro, cobre, aceros de herramientas, aleaciones de aceros, bronce y metales de bajo punto de fusión (tales como aluminio, estaño, plomo, zinc, cadmio) [ASM84c], etc. [13]

Variables del proceso:

- Presión
- Flujo volumétrico
- Temperatura de vaciado
- Viscosidad
- Tipo de gas a utilizar

- *Atomización por agua*

Es similar a la atomización por gas. El material fundido se almacena en un recipiente refractario, cuya temperatura se preserva bastante por arriba de la de solidificación, una vez que la corriente del metal fundido sale del inyector, se expulsa una corriente de fluido de atomización a alta rapidez, ocasionando una dispersión del fundido metálico en finas gotas que solidifican inmediatamente, anterior a que dichas gotas entren en contacto entre sí o con el área una vez que caen por medio del tanque atomizador [15] Se ha determinado que a mayor velocidad de flujo de agua, se tendrá menor tamaño de partícula.

Las partículas son recocidas en una atmósfera controlada para suavizar y eliminar óxidos residuales [14], este proceso se puede observar en la figura 3.13. El polvo atomizado en agua tiene generalmente una estructura irregular, la ejemplificación de esta geometría se puede apreciar en la figura 3.14. Pero si la presión es adecuada, pueden obtenerse partículas de forma esférica. Algunas de las aplicaciones de esta técnica incluyen la fabricación de hierro para la fabricación de aceros, cobre como aleante de aceros y para infiltración, y estaño para la fabricación de cojinetes de bronce. Cabe mencionar que el costo de esta técnica es menor a la atomización por gas. [13]

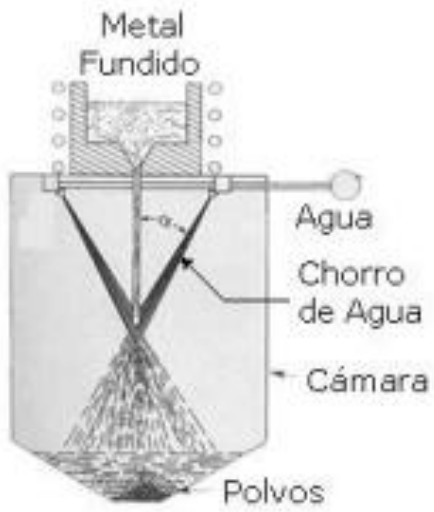


Figura 3.13 Proceso de atomización en atmosfera controlada por agua [15]



Figura 3.14. Morfología característica de una partícula obtenida por el proceso de atomización por agua. [13]

Se utiliza comercialmente para la producción de hierro, cobre, aceros grado herramienta, aceros de aleación, latón, bronce, metales de bajo punto de fusión, tales como aluminio, estaño, zinc y cadmio. Los metales fácilmente oxidables. [15]

La utilidad del proceso de atomización es su flexibilidad ya que puede producir polvos de diversos grados de finura y en el procesamiento de una finura dada, la uniformidad de la distribución del tamaño de partícula puede mantenerse cercana. La reducción de óxido proporciona una forma adecuada, rentable y versátil de producir polvos. La mayor cantidad de polvo metalúrgico se obtiene mediante este proceso. [13,15]

3.7.2 Métodos electrolíticos de producción

- *Electrólisis*

Empleando la electrólisis, muchos metales pueden convertirse en polvo, aplicando las condiciones apropiadas como: la densidad de corriente, distancia entre los electrodos, concentración del electrolito, temperatura, tiempo, etc. Se prepara una celda electrolítica en la que la fuente del metal a pulverizar es el ánodo, este se disuelve gradualmente por la acción del voltaje aplicado, pasa a través del electrolito y se deposita en el cátodo, obteniendo un polvo metálico altamente purificado, esto se ilustra en la figura 3.15.

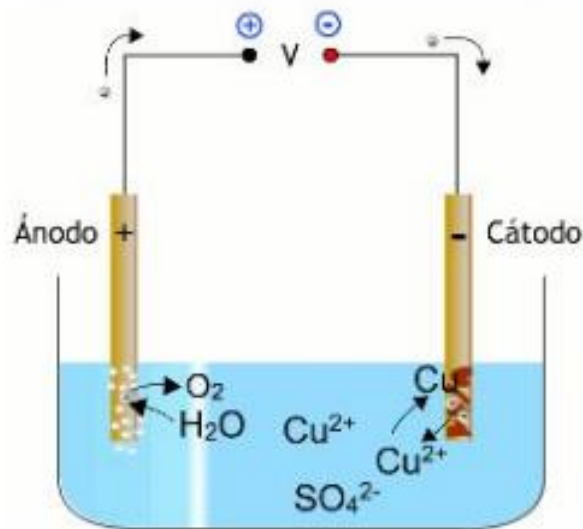


Figura 3.15 Proceso de electrólisis [17]

Este método se utiliza para producir cobre, berilio, hierro, plata, tantalio, titanio, estaño, molibdeno, por mencionar algunos metales. El polvo del metal se puede depositar electrolíticamente en estado de esponja o de polvo. Es posible que el material tenga que triturarse o molerse para que quede fino y/o calentarlo para la recolección y eliminación del hidrógeno, para posteriormente seleccionarlo y mezclarlo. [10,13]

Este método puede llevar otros procesos (secado, aleación, lavado, reducción, recocido, molido, etc.), para lograr las propiedades deseadas. Es típicamente utilizado para fabricar polvo de cobre. Dos de las mayores cualidades de este proceso son la alta pureza y la alta densidad alcanzada por los polvos. [10]

Estos polvos no tienen impurezas y además, los obtenidos por este método tienen una morfología dendrítica, con una densidad aparente alta y se comprimen con facilidad, características distintivas de este proceso. El polvo de cobre producido por este método, se usa comúnmente para fabricar cojinetes porosos.

Las variables a considerar son:

- Concentración del electrolito
- Tipo de electrodo
- Amperaje
- Agitación
- Densidad aparente
- Temperatura
- Composición
- Circulación del baño
- Tamaño y posición de los electrodos

3.8 Caracterización de los Polvos Metálicos.

Las diferentes características que pueden tener los polvos dependen del método de obtención (grado de subdivisión, finura, tamaño, etc.) y los tratamientos a los que han sido sometidos. Es importante tener en cuenta que todas las características y propiedades están relacionadas, es decir al variar alguna de estas, otras son afectadas. [10]

Las características básicas del polvo influyen significativamente en su comportamiento durante todo el proceso pulvimetalúrgico, así como en las propiedades del producto terminado.

Estas características básicas son:

- Forma
- Tamaño de la partícula
- Distribución por tamaño de las partículas
- Superficie libre específica
- Pureza
- Composición química
- Densidad aparente
- Densidad real
- Velocidad de flujo
- Capacidad de sinterización.
- Porosidad
- Compresibilidad

Las tres últimas que se enlistan (capacidad de sinterización, porosidad y compresibilidad) tienen características comúnmente denominadas propiedades tecnológicas del polvo, puesto que se relacionan con la facilidad de manipular el material particulado e interfieren directamente en el proceso de compactación de piezas. [17]

➤ **Forma de las partículas.**

Es la primera característica a considerar cuando se requiere determinar el óptimo uso de un polvo metálico, debido a que el comportamiento de características como la tasa de flujo, la densidad aparente, compresibilidad, la superficie libre específica y la sinterización, dependen de la forma de las partículas. Considerando que afecta en gran medida las propiedades de procesamiento, se define típicamente en términos de *relación de forma* o *factor forma*. [10]

Considerando el método de producción de los polvos (figura 3.16) y los parámetros utilizados en el proceso, las formas de las partículas se clasifican (bajo la norma

- Esférica
- Nodular o redondeada
- Fibrosas (con aspecto de fibras)
- Acicular (forma de agujas)
- Angular (aproximadamente poliedros)
- Dendrítica (con varias ramificaciones)
- Hojuelas (“Flaky Powders”, con aspecto de láminas”)
- Porosa
- Irregular (ausencia de simetría)

1. Para establecer las diversas maneras de las partículas se usan los conceptos de dimensión (magnitud que, junto con otras, sirve para conceptualizar un fenómeno físico; en especial, intensidad o dimensiones que se piensan en el espacio para establecer la medida de las cosas) y contorno (refiere a los bordes o parámetros de una superficie) para las que son esféricas es preciso una sola magnitud, no obstante, para otras tienen la posibilidad de utilizar 2 o más magnitudes. Una forma fácil que se emplea en la medición de la manera de la partícula es su interacción entre la magnitud máxima y mínima, ejemplificando, para una partícula esférica esta interacción es de 1.0, favoreciendo con ello un sorprendente sinterizado y dando como consecuencia propiedades uniformes en el producto final, en tanto que, para un grano acicular, la interacción podría ser de 2 a 4, trayendo como resultado superiores características para el moldeo [10]

La fricción entre partículas se determina haciendo pasar el polvo a través de una boquilla, de manera que se amontone por gravedad, la medida del ángulo final entre la pendiente del montón y la horizontal es el Angulo de fricción θ , como se muestra en la figura 3.17.

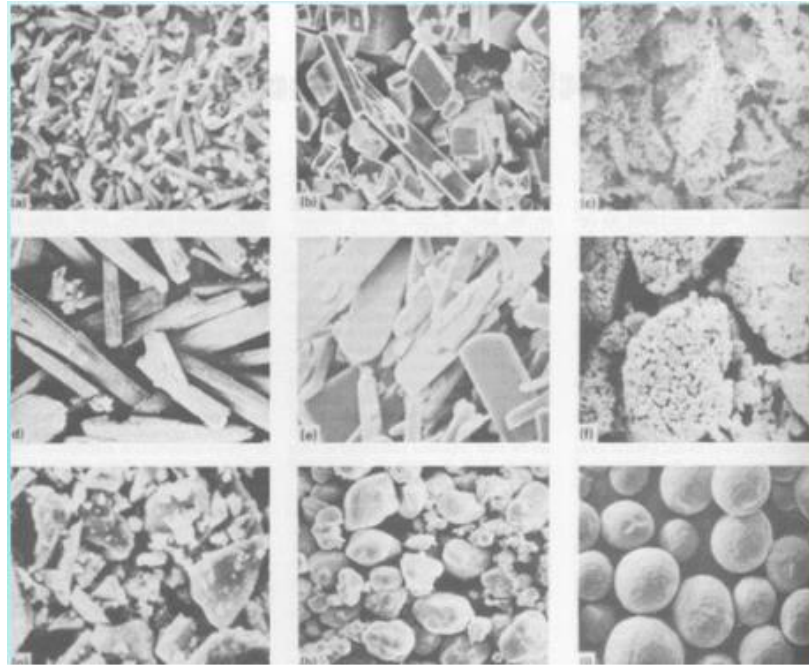


Figura 3.16 Clasificación de formas de una partícula de acuerdo al tipo de proceso de obtención [12].

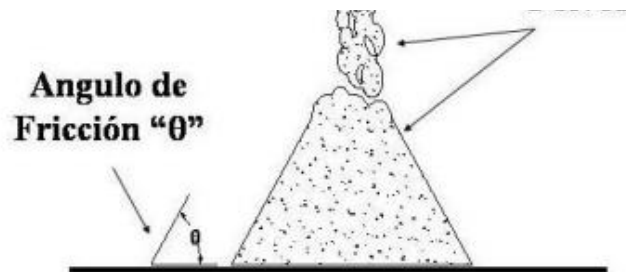


Figura 3.17 Determinación del ángulo de fricción en una distribución determinada de polvos metálicos. [10]

Cuando el valor de θ es menor, más fluido será el polvo y mejor se dispersará en el molde, mientras que los ángulos de fricción más altos sugieren un costoso deslizamiento de partículas entre ellos (alta fricción).

➤ **Tamaño de las partículas.**

Se refiere al tamaño de los polvos individuales. Parte importante de las partículas usadas para aplicaciones industriales no son esféricas, en estas, se determinan características físicas como longitud, volumen, densidad, área, rapidez de sedimentación, etcétera; para decidir la medida de la partícula. Los diámetros de las

partículas se derivan de estas medidas que representan solo maneras iguales, a estas se les conoce como diámetro de partícula equivalente y según una prueba especial, es el diámetro de las esferas con la misma área, área precitada, volumen o rapidez de sedimentación irregular de la partícula. [13]

El tamaño de las partículas depende de las variables del método de obtención de los polvos; tiene un efecto importante sobre otras características del polvo, influyendo en el comportamiento de los mismos durante su procesamiento y en las propiedades finales de las piezas terminadas.

Para formas esféricas la definición del tamaño de la partícula es sencilla, en donde generalmente se utiliza el diámetro para caracterizar el tamaño de estas. No obstante, muchos polvos metálicos tienen formas irregulares para las cuales la determinación del tamaño y la distribución de tamaño de las partículas se obtiene a través de la medida de ciertas propiedades como: longitud, volumen, masa, área superficial proyectada, dispersión perturbación de campos eléctricos, entre otras; con el fin de calcular el equivalente al diámetro de una partícula esférica. [15]

Se debería considerar que las múltiples técnicas de estudio de tamaño de partícula principalmente no concuerdan gracias a las diferencias en los límites medidos. Los límites usualmente medidos son el sector de área, la zona proyectada, la longitud máxima, la zona mínima de parte transversal o el volumen [10]

La forma y el tamaño de la partícula influyen en las propiedades de los polvos, de modo que las mediciones por diferentes métodos conducirán a resultados diferentes. La figura 3.18 muestra ciertas irregularidades de diámetros de partículas obtenidas por varios métodos. [13]

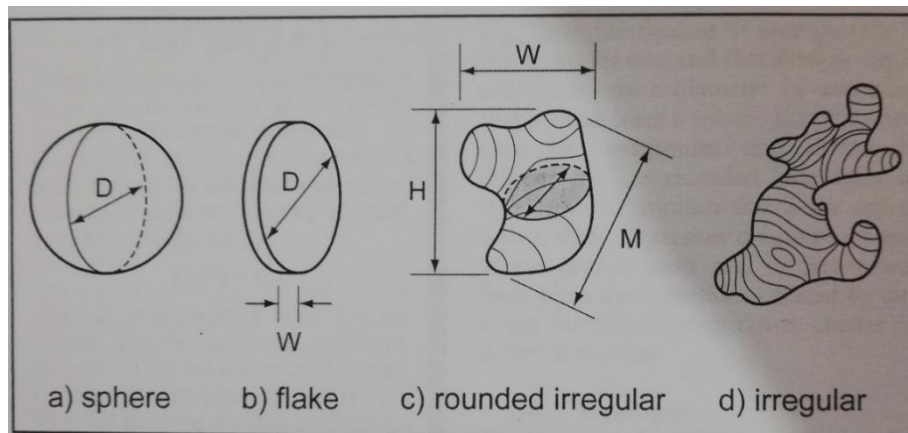


Figura 3.18 Determinación del tamaño de partículas irregulares. [13]

La densidad aparente, la compresibilidad y la superficie libre específica aumentan, a medida que el tamaño de partículas es menor. [15]

La magnitud de las partículas es bastante importante y tiene un enorme efecto en el producto final. Cada una de las partículas tienen la posibilidad de pasar una criba 100, mientras tanto que solo el 70% puede pasar una criba 200 y el 40% de este

porcentaje puede superar una criba 300. De modo que, la medida de las partículas cambia de malla 100 a malla 300. [10]

En el caso de los polvos más finos se utiliza el método de elutriación de aire. En polvos gruesos es necesario considerar la forma de las partículas, pero es menos importante que en los polvos más finos. El tamaño de partícula que se utiliza en la metalurgia de los polvos por lo general varía de 5 a 200 micras. Las dimensiones de las partículas tienen un marcado efecto en el moldeo, resistencia, densidad, porosidad, permeabilidad y estabilidad dimensional del producto. [10]

Además del análisis del tamiz, existen diversos métodos para analizar el tamaño de las partículas

1. *Sedimentación.* Esta técnica puede utilizarse para partículas más pequeñas, las cuales se agitan en un líquido o gas, al alcanzar una velocidad terminal las partículas caen, la velocidad con la que sedimentan depende de su tamaño.
2. *Análisis Microscópico.* Que puede incluir microscopía electrónica de transmisión y de barrido.
3. *Dispersión de la Luz.* De un láser que ilumina una muestra constituida por partículas suspendidas en un medio líquido. Las partículas hacen que la luz se disperse; después un detector digitaliza las señales y calcula la distribución del tamaño de las partículas.
4. *Óptico.* (como el de las partículas que bloquean a un rayo de luz). Que después se detecta a través de una foto celda.
5. *Partículas Suspendidas en un líquido.* Cuyo tamaño y distribución se detecta después mediante sensores eléctricos.
6. *Sensibilidad eléctrica.* Se dispersan las partículas en agua salada, se mide la conductividad del agua salada para después ser bombeada a través de una abertura en un aislante de vidrio, cuando una partícula pasa a través de la abertura hay cambio en la conducción, gracias a esta se contabiliza y miden las partículas

Las diversas características pueden tener dos o más polvos de un mismo metal, las cuales están determinadas por el método de elaboración y tratamientos a los que son sometidos. Hay una vasta pluralidad de técnicas de caracterización para polvos, varias usuales como: tamizado, permeabilidad y fluidez que son complementadas con estudios más sofisticados. Los procedimientos convencionales son directos para su uso en el área industria, subjetivamente fáciles fiables, debido a que necesitan escasa formación por parte del operador, tiene un entorno teórico y cómodo bastante extenso. Algunas técnicas empleadas son o dependen del polvo. [18]

La elección de una u otra técnica dependerá de los datos ya conocidos del polvo o de los alcances del usuario, en la tabla 3.3 siguiente se muestra una comparación entre las distintas técnicas.

Tabla 3.3. Técnicas ópticas para la medición de partículas.

Técnica	Rango (μm)	Radio	Muestra (g)	Velocidad
Microscopio				
<i>Óptico</i>	0.8 en adelante	30	<1	Lento
<i>Electrones</i>	0.001 – 400	30	<1	
Tamiz				
<i>Red</i>	38 en adelante	20	100	Moderada
<i>Eléctrico</i>	5 – 120	20	>5	Lento
Sedimentación				
<i>Gravedad</i>	0.2 – 100	50	5	Moderada
<i>Centrífuga</i>	0.02 – 10	50	1	Lenta
<i>S. eléctrica</i>	0.4 – 1000	30	5	Moderada
Dispersión de luz				
<i>Fraunhofer</i>	1 – 800	<200	<5	Rápida
<i>Mie</i>	0.1 – 3	30	1	Rápida
<i>Velocidad</i>	0.5 – 200	400	1	Rápida
<i>Browniano</i>	0.005 – 5	1000	<1	Moderada

➤ **Distribución de tamaño.**

La distribución del tamaño de partícula es el porcentaje en peso o por cantidad de cada fracción en el que se ha clasificado una muestra de polvo de acuerdo con su tamaño. [19]

Hay diversos métodos para decidir la magnitud de las partículas, el más común es el tamizado.

Generalmente la magnitud de partícula se establece por medio de tamizado, o sea, pasando el polvo metálico por medio de tamices (cribas) con diferentes tamaños de malla. La exploración se hace mediante una pila vertical de tamices, con una escala más fina de la malla mientras el polvo desciende por lo tamices. Cuanto más grande sea la magnitud de la malla, menor va a ser el espacio en el tamiz. Ejemplificando, una malla de tamaño 30 tiene una apertura de 600 μm . Una vez que más grande es el número, menor sería la medida de las partículas abrasivas). [10]

Una vez finalizado el tamizado, el tamaño depende de la ubicación en la que la partícula se mueva a través de la malla del tamiz. Por lo tanto, el diámetro puede estar por debajo o por encima del diámetro de la esfera correspondiente (figura 3.29 superior derecha). [13]

Los métodos de distribución de tamaño de partículas se pueden clasificar en tres grupos:

- métodos de separación
- proceso de sedimentación
- proceso de conteo.

Algunos de los métodos reconocidos se enumeran en la tabla 3.4. La elección del proceso depende del tamaño de la partícula.

Tabla 3.4 Técnicas para determinar el tamaño de partícula. [13]

Técnica	Límites de aplicación (μm)	
<i>Técnicas de separación</i>		
<i>Análisis por tamizado</i>	Mallas para pruebas standard	>20 5-100
<i>Análisis por decantado en aire.</i>	Micro-mallas Clasificación gravitatoria Clasificación centrífuga	5-40 1-60
<i>Técnicas de sedimentación</i>		
<i>Sedimentación gravitatoria</i>	Método de pipeta Foto-sedimetrómetro	1-60 0.5-500
<i>Sedimentación centrífuga</i>	Centrifugado	0.05-10
<i>Técnicas de conteo</i>		
<i>Métodos directos</i>	Conteo por perturbación de campo Método de haz de laser	0.4-1200 0.1-2000
<i>Métodos indirectos</i>	Microscopía Microscopía electrónica	1-100 0.004-1

La distribución del tamaño de las partículas se especifica en términos de análisis de mallas e influye en la compactación del polvo y su comportamiento durante la sinterización y el moldeo. Su análisis se realiza sobre la base del polvo que pasa a través de las diferentes mallas. [13]

Esta característica es fundamental en el empaquetamiento del polvo y perjudicará sus actividades a lo largo del moldeo y la sinterización. Principalmente, se prefiere el polvo más fino sobre el polvo más grueso, debido a que los metales más finos poseen poros más pequeños y zonas de contacto más amplias, lo cual principalmente auxilia a superiores características físicas luego de la sinterización. El reparto del tamaño de partículas se define en términos de un estudio de cribado, o sea, la proporción de polvo que pasa por mallas de números 100, 200, etcétera. En donde la detección de análisis podría conceder relevantes resultados, dado la medida y el reparto de la partícula solo una vez que es esféricas. [11]

La distribución de tamaño de las partículas es un factor que debe considerarse, porque afecta las características del procesamiento del polvo. Se determina en términos de la gráfica de frecuencia y distribución. Al valor máximo se le conoce como tamaño de modo (o de la moda). Otras propiedades de los polvos metálicos que tienen un efecto sobre su comportamiento durante el procesamiento son: (a) las propiedades del flujo, cuando se llenan las matrices o dados, (b) la compresibilidad, cuando se compactan, (c) la densidad, como se define en diversos términos como la densidad teórica, la densidad aparente y la densidad al momento de que el polvo se sacude o se golpea ligeramente dentro de la cavidad de la matriz. [11]

Existe una amplia variedad de técnicas de caracterización para polvos, algunas básicas son: tamizado, permeabilidad y fluidez que son complementadas con estudios más complejos.

Los métodos tradicionales son directos para utilizarse en el ámbito industrial, relativamente simples y confiables, debido a que requieren poco entrenamiento por parte del operar, además de que tiene un fundamento práctico y teórico muy amplio

Se debe tener en cuenta que algunas técnicas empleadas son dependientes del polvo. [20]

Actualmente se utilizan polvos bastante finos con partículas de diámetro atómico de hasta 0.001mm para producir componentes mediante la técnica de MP. Si bien se ha demostrado que los polvos metálicos son más cotosos, también tienen propiedades mecánicas diferentes y son más vulnerables a los ataques químicos y atmosféricos.

Método de separación.

Los métodos más ampliamente usados en la industria son el tamizado y el decantado en aire. El análisis del tamaño de partículas obtenidas con tamizado normal permite la determinación de tamaños superiores a 20 μm . Esto se muestra en la tabla 3.5

Tabla 3.5. Tipo de mallas para pruebas standard de acuerdo a la norma ASTM [13]

N° ASTM	Abertura (μm)
50	297
60	250
70	210
100	149
140	105
200	74
270	53
325	44
400	37

El tamizado

El método más común utilizado para determinar esta característica de los polvos metálicos. Este enfoque involucra desplazar el material por medio de las aberturas de un tamiz. Los tamices son colocados en orden, con la más grande abertura en la parte preeminente anterior a colocar una base en la parte inferior, después se continúan agitando a lo largo de un cierto tiempo, según con los estándares uniformes y al final se pesa el material retenido en todos los tamices. Hay diversos procedimientos para agitar la serie de tamices para afirmar que las partículas pasen por las aberturas de cada tamiz, incluyendo la agitación manual o automática, desplazamiento giratorio con o sin golpes, vibración mecánica (ver figura 3.19) y electromagnética [15]. Los tamices pueden ser agitados verticalmente, tamices movidos horizontalmente (sacudidos o girados) y tamices estacionarios (impulsados por aire o líquido). [13]



Figura 3.19. Equipo de tamizado por agitación mecánica Ro-Tap. [21]

El número de tamiz se refiere al número de aberturas por pulgada lineal de la malla. La tabla 3.6 presenta na descripción del tamaño estándar de la abertura de los tamices de acuerdo con la norma ASTM E11. [15]

Tabla 6.6. Serie estándar de tamices [15]

Tamiz	Tamaño	Abertura
No.	μm	In
30	600	0.0232
40	425	0.0164
50	300	0.0116
60	250	0.0097
80	180	0.0069
100	150	0.0058
140	108	0.0041
200	76	0.0029
230	63	0.00024
325	45	0.0017

Se han estandarizado diferentes normas para la determinación del tamaño y distribución de tamaño de partícula por este método entre los que se encuentran la ASTM B214, la ISO 4497 y la MPIF 05. Tienen similares especificaciones tales como el tamaño de los tamices (de acuerdo con la norma ASTM E11). [15]

Los siguientes factores tienen influencia significativa en la precisión de los procesos de tamizado: la calidad de la malla utilizada, el tiempo de tamizado empleado, alguna imprecisión de las mallas respecto a sus valores nominales, la tendencia de los polvos a aglomerarse, etc.

Además del análisis del tamiz, existen diversos métodos para analizar el tamaño de las partículas.

1. *Sedimentación.* Comprende la distribución de tamaño de las partículas en la sedimentación se determina a partir de la velocidad de sedimentación en un fluido estacionario. La concentración de partículas, que se distribuye por separado en la parte superior de la suspensión en el comienzo de la prueba, varía en función del tiempo y lugar. A partir de un tiempo de sedimentación la concentración se mide gravimétricamente o por absorción de radiación. Esta concentración resulta proporcional al tamaño de las partículas. [13]

➤ ***Superficie libre específica.***

Está definida como la superficie libre total por unidad de masa, expresada en cm^2/g . Cuanto más fino y poroso mayor es su superficie libre específica. Los compuestos en polvo de granulometría finas se sinterizan mucho más rápido que los obtenidos de polvos más gruesos. Este efecto está relacionado directamente con la superficie libre específica del polvo, ya que esta aumenta a medida que se obtienen polvos más finos. [15]

El método más utilizado para evaluar dicha característica es la de adsorción de gas o método BET (Brunauer-Emmet-Teller) [22]

➤ ***Pureza.***

Los elementos indeseables o las impurezas tienen efectos adversos en los productos fabricados mediante la metalurgia de los polvos. Si son puros y no contienen óxidos o impurezas, se pueden obtener mejores propiedades mecánicas por medio de esta técnica.

Los elementos no deseados tienen efectos nocivos sobre los productos producidos mediante la pulvimetalurgia. Si son puros y no contienen óxidos o impurezas, se pueden obtener mejores propiedades mecánicas mediante esta técnica. [10]

➤ ***Composición Química.***

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. En los polvos prealeados, cada partícula es una aleación que contiene la composición química deseada.

La presencia de contaminantes tiene un efecto perjudicial tanto en la compresibilidad como durante el proceso de sinterización del material [20]. La composición química de un polvo es un factor importante en la determinación de las condiciones iniciales de la compactación, específicamente de la habilidad del polvo a densificarse debido a que determina el tipo y la extensión de las reacciones entre el compuesto y la atmosfera de sinterización. Por otro lado, la composición determina a temperatura y el tipo de atmosfera requeridos durante la sinterización. Por consiguiente, las propiedades finales de un material sinterizado generalmente dependen de la composición del material. Uno de los métodos utilizados para determinar la composición química es el microanálisis.

El microanálisis de sonda electrónica (EPM/t) permite combinar el análisis de la microestructura o la distribución de fases con la compactación de una sola operación. Su principio de funcionamiento consiste en enfocar un haz electrónico, de menos de 1cm de diámetro, sobre una muestra causando la emisión de líneas características de rayos x. [15]

Este procedimiento de estudio además se implementa en el microscopio electrónico de barrido que usa detectores de estado sólido de rayos x. La eficaz aplicación de este instrumento es viable mediante computadoras, que tienen la posibilidad de ser usados para derivar información cuantitativa desde los espectros de rayos x de baja resolución con dichos detectores.[13]

➤ ***Densidad aparente.***

La densidad aparente es la densidad de una masa de polvo suelto, es decir, sin haber recibido vibración o compactación. Esta depende de la densidad del material sólido, el tamaño de la partícula, su distribución, la forma de la partícula, del área superficial y rugosidad de cada partícula, se expresa en g/cm^3 [20]

La disminución del tamaño de las partículas reduce la densidad aparente, ya que en partículas pequeñas es mayor la superficie libre específica del polvo, aumenta la fricción entre las partículas y por lo tanto disminuye la densidad aparente. El efecto de la reducción del tamaño de partículas sobre la densidad es importante para tamaños inferiores a 20 μm . [20]

Los polvos esféricos, producidos por atomización, tienen una densidad aparente alta, con hasta el 50% del peso específico del metal. Polvos con formas irregulares tienen densidades aparentes menores, variando en un rango entre el 25 y 35% del peso específico del metal. Finalmente, los polvos con partículas con maneras de hojuelas muestran densidades aparentes menores al 10% del peso específico del material, se puede observar en la figura 3.20 el efecto de la forma de las partículas en la densidad aparente.

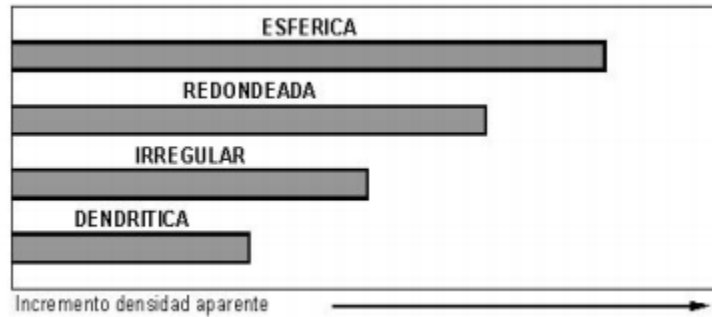


Figura 3.20 Efecto de la forma de las partículas en la densidad aparente. [18]

Como se ha mencionado anteriormente, el empaquetamiento de las partículas de polvo está influido grandemente por el tamaño y la forma de la partícula. La única forma de llenar un espacio es utilizar cubos del mismo tamaño alineados exactamente. Una forma positiva de aumentar la densidad aparente es colmar los espacios en medio de las partículas con tamaños más pequeños, lo que origina un arreglo de llenado, conocido como empaquetamiento intersticial; no obstante, aun las partículas más pequeñas no tienen la posibilidad de colmar enteramente los poros.

Aún es posible que la adición de partículas más pequeñas disminuya la densidad aparente (efecto contrario al deseado) por la formación de cavidades arqueadas. La densidad aparente de un polvo es una propiedad de gran importancia para las operaciones de moldeado y sinterizado. Los polvos con baja densidad aparente requieren un mayor ciclo de compresión y cavidades más profundas para producir un aglomerado de densidad y tamaño dados. [11]

➤ **Densidad real**

Es la masa seca de las partículas por unidad de volumen de las mismas, cuando en dicho volumen no existe espacio vacío. El conocimiento de la densidad real con la densidad aparente nos permite calcular la porosidad total. La densidad real tiene un interés relativo. Su valor varía de acuerdo al material y suele oscilar entre 2.5 – 3 para la mayoría de los metales de origen mineral.

$$\rho_{aparente} = \frac{masa}{Volumen_{real}}$$

➤ **Velocidad de flujo.**

Puede describirse como la capacidad que tiene el polvo de fluir libremente en función de su propio peso. Esta propiedad tiene un efecto directo en la velocidad de producción con prensas automáticas; ya que de la tasa de flujo depende la rapidez y uniformidad con que se llenan los moldes. [26] El flujo de polvo durante la alimentación de la cavidad del molde puede ser incrementado por golpeteo o con vibración. [15]

Características propias de la superficie de las partículas, tales como películas de óxidos y lubricantes, tiende a afectar el flujo libre de polvo. La presencia de una película de óxido sobre la superficie de la partícula aumenta la fricción entre las partículas y por consiguiente tiende a aumentar su tasa de flujo. En términos de lubricantes, desde un punto de vista práctico, cuanto mayor es la cantidad de lubricante menos es la tasa de flujo de polvo metálico. Un pequeño aumento en la tasa de flujo se logra cuando son adicionadas cantidades pequeñas de lubricantes [18]

Las características específicas del metal, como la densidad teórica, fuerzas de interacción electrostática entre las partículas y propiedades superficiales, a menudo afecta el flujo libre del material. Cuanto menor sea el peso específico de un material mayor será su tasa de flujo. [15]

Las otras características de los polvos, especialmente la forma y el tamaño de las partículas, también tienen un impacto considerable sobre el flujo. Con relación a la forma, las partículas esféricas presentan muy buena tasa de flujo. Conforme aumenta la irregularidad de la forma de las partículas disminuye el flujo. Con respecto al tamaño, polvos con granulometrías finas ($<44\mu\text{m}$) no pueden influir por su propio peso por que las fuerzas de atracción electrostáticas inducen la formación de aglomeraciones. [15]

Los procedimientos para la determinación de factor flujo están determinados por las normas ASTM B213, MPIF 03 y la ISO 4490 [15]

➤ **Porosidad**

La porosidad total es la parte vacía del volumen relacionado con el volumen total de cualquier material poroso. La mayoría de los productos fabricados a partir de polvos se caracterizan por su porosidad; mientras que en las piezas estructurales sinterizadas la porosidad residual no tiene ninguna función especial, en los materiales con porosidad controlada (filtros, cojinetes, etc.) es un componente funcional de la microestructura, responsable de las propiedades deseadas [15],

Se puede subdividir en *poros interconectados* (que alcanzan la superficie de la muestra al menos en un lado) y *poros cerrados*. [16]

La porosidad total puede medirse para geometrías simples determinando la masa y las dimensiones. Generalmente se obtiene midiendo la densidad aparente (verde o

sinterizada) [P_s] por el principio de Arquímedes aplicable en cualquier geometría de la pieza:

$$\rho_s = \frac{m}{V} = \frac{m}{m_a - m_w} \cdot \rho_w$$

Dónde: m =masa, V =volumen, m_a y m_w = masa pesada en aire y en agua respectivamente con poros completamente sellados en la superficie, ρ_w = densidad del agua a su temperatura.[15]

Los datos de resistencia estática y dinámica de los materiales dúctiles sinterizados se miden en ensayos convencionales de tracción, impacto y fatiga, mientras que para los productos semifrágiles como los metales duros y los cerámicos frágiles, el ensayo de flexión de 3 o 4 puntos (ensayo de rotura transversal) es más conveniente. [15]

Se han desarrollado métodos de ensayo especiales para materiales cuya porosidad interconectada tiene una función decisiva, como filtros, cojinetes, electrodos porosos, etc. que implican las características del tamaño de los poros y la permeabilidad de gases o líquidos. [16]

➤ **Compresibilidad**

La compresibilidad o compactabilidad son términos utilizados para describir hasta qué punto cualquier polvo puede densificarse por la aplicación de presión o por medio de vibración. Esta propiedad es principalmente expresada como densidad verde obtenida en una pieza compactada, para una presión de compactación dada.

Las características de compactado dependen de dos medidas de densidad, la real y la aparente. El método convencional de compactación es el prensado, en el cual los punzones opuestos aprietan el polvo contenido en un dado. [23]

Partes compactadas con polvos metálicos dúctiles muestran más grandes densidades y resistencias verdes, o sea alta compresibilidad, que las logradas con polvos metálicos más duros, ya que las partículas de polvos dúctiles se deforman más, produciendo grandes superficies de contacto entre sí.

Los procedimientos para determinar la compresibilidad de polvos metálicos están descritos por las normas ASTM B 331, MPIF 5, y la ISO 3927. Estos estándares determinan la compresibilidad con compresión uniaxial (como se ve en la figura 3.19)

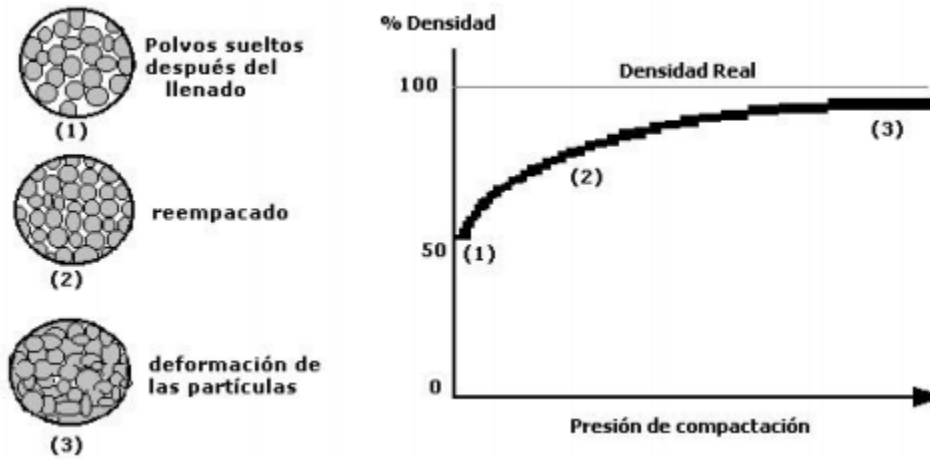


Figura 3.19. Gráfica Presión de compactación vs % densidad en verde [24]

La presión requerida para conseguir una densidad específica es la medida de la compresibilidad, también puede ser medida como la densidad obtenida para una presión dada. [28]

3.9 Manejo de polvos

Una vez que el polvo se perfila hacia el proceso de fabricación del componente deseado, se deben de tomar en cuenta, las propiedades y características específicas de los distintos tipos de polvos para su posterior manejo.

En esta etapa los conceptos básicos se centran en determinar los procedimientos necesarios para la caracterización, a la que debe someterse el polvo. Los diferentes procesos de producción de polvo y que formas del polvo produce, se presenta en la tabla 3.7 [10]

Tabla 3.7. Diferentes procesos para la fabricación de polvos [10]

Proceso	Tamaño de partícula	Forma de partícula	Densidad	Moderado Alloying	Costo
Atomización centrifuga	50-100	Esférica	Alto	Si	Variable
Electrolito	5-300	Dendrítico irregular	Bajo	No	Moderado
Atomización por gas	10-300	Esférico	Alto	Si	Alto
Atomización por plasma	5-80	Esférica	Alto	Si	Muy alto
Atomización por agua	5-400	Irregular ligamentoso	Moderado a bajo	Si	Moderado

Por otro lado, se muestra la forma del polvo necesario que se requiere para un determinado proceso, esto se ilustra de mejor forma en la tabla 3.8 Para determinar las características geométricas de las partículas la microscopía es la técnica más

Tabla 3.8 Cuadro comparativo de polvos necesarios para los diversos procesos y productos. [24]

Polvos metálicos para varias aplicaciones

<i>Aplicación</i>	Tamaño de partícula, rango (μm)	Forma de la partícula	Consideraciones importantes
<i>Reacción Química</i>	20-100	Redondeada	Compresibilidad
<i>Presión Isostática Fría</i>	45-300	Redondeada Irregular	Resistencia verde
<i>Compactación en matriz</i>	20-200	Irregular	Compresibilidad
<i>Flame Cutting</i>	40-200	Redondeada, ligamentoso	Flujo bueno, bajo nivel de pureza
<i>Forja</i>	20-150	Irregular	Pureza, compresibilidad y resistencia
<i>Fricción de materiales</i>	20-200	Irregular	Forma irregular esponjada
<i>Presión Isostática Caliente</i>	75-300	Esférica	Alta pureza, alta densidad de empaquetamiento
<i>Moldeado por inyección</i>	1-10	Esférica	Alta densidad de empaquetamiento y sinterizado
<i>Absorción Radar</i>	1-10	Esférico	Tamaño pequeño de grano
<i>Rolling</i>	1-10	Irregular	Oxígeno bajo
<i>Granalla</i>	100-3000	Redondeado	Dureza alta
<i>Piedra de corte</i>	500-1400	Angular	Alta dureza para cortes abrasivos
<i>Rociado térmico</i>	45-200	Redondeado Esférica	Flujo uniforme, alta pureza
<i>Electrodo revestido</i>	60-400	Irregular	Bajo oxígeno

definitiva para el análisis, debido a que en esta técnica se pueden observar y medir las partículas individualmente [18]

➤ Mezclado de polvos

En la consolidación (compactación y sinterizado) de los polvos, para lograr buenos resultados los polvos metálicos necesitan homogeneizarse perfectamente antes del proceso. Por lo anterior, es que existen los procesos previos de mezclado y combinación utilizados en este contexto. El mezclado se refiere a la mezcla de polvos de la misma composición química, pero posiblemente con diferentes tamaños de partícula. La combinación (aleado) se refiere a la mezcla de polvos de diferente composición química y diferente tamaño, una ventaja de esta tecnología es la oportunidad de combinar varios metales en aleaciones que sería difícil o imposible producir por otros medios.[20]

El mezclado de polvos tiene por objetivo:

- Obtener uniformidad, ya que los polvos fabricados por los distintos procesos tienen diferentes tamaños y formas.
- Poder introducir polvos de distintos materiales, para impartir propiedades y características mecánicas especiales al producto.

Además, para el mezclado también se agregan aditivos, tales como los aglutinantes, los lubricantes y los defloculantes. En la etapa del mezclado se debe alcanzar una mezcla homogénea de los materiales con los aditivos.[22]

Para que se pueda fabricar una pieza en bruto que mantenga la forma a partir de una mezcla de polvos es necesario el uso de los aglutinantes los cuales tienen como objetivo lograr una resistencia adecuada en las partes prensadas, pero no sinterizadas.

Después de fabricar una pieza con la materia prima, se deben retirar los aglutinantes utilizados. Esto puede ocurrir, por ejemplo, de forma térmica antes de la etapa de sinterización, mientras que puede estar previsto para una eliminación catalítica o el uso de disolventes, que permiten descomponer los aglutinantes y eliminarlos de la pieza en estado bruto.

La principal función del lubricante es reducir la fricción entre el polvo metálico y las superficies de las herramientas utilizadas en el proceso, mejorando el flujo de los metales en polvo hacia los moldes y proporcionando una mayor vida útil de las matrices. Los que se usan con frecuencia son ácido esteárico o estearato de zinc, en la proporción de 0.25 a 5% en peso y también para reducir la fricción se agrega aluminio en pequeñas cantidades.[19]

Además, el lubricante debe deslizarse durante la compactación y con ello ayudar a conseguir una densidad uniforme en todo el compactado. De igual importancia resulta el hecho de que la reducción de fricción también ayuda a la eyección del compactado, minimizando la posibilidad de formación de grietas. Se debe tener gran cuidado en la selección del lubricante, debido a que una mala elección puede resultar en efectos adversos en las durezas del compactado antes y después de sinterizar. Otra precaución que se debe tener en esta etapa del proceso es la de no

sobre mezclar, porque de ocurrir, la densidad aparente de la mezcla disminuye y reduce la dureza de la pieza antes del sinterizado. [22]

Por otro lado, los defloculantes son sustancias que evitan la aglomeración de partículas, para mejorar las características de flujo durante la alimentación. [25]

El mezclado y la combinación se realizan por medios mecánicos, utilizando tambores rotatorios, o fijos, pero con paletas mezcladoras, como se ilustra en la figura 3.20, se debe hacer bajo condiciones controladas, para evitar contaminaciones o deterioro, este se debe al mezclado excesivo, que puede modificar la forma de las partículas y endurecerlas por trabajo, dificultando así la siguiente operación de compactación.

Los polvos se pueden mezclar en aire, en atmósferas inertes (para evitar la oxidación) o en líquidos (lubricantes). [1]

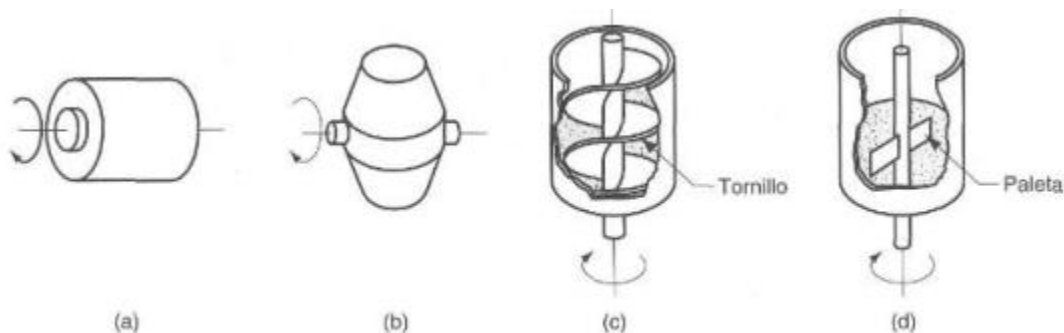


Figura 3.20. Varios dispositivos de mezclado y combinado: (a) Tambor rotatorio, (b) Doble cono rotatorio, (c) Mezclador de tornillo y (d) Mezclador de paletas. [1]

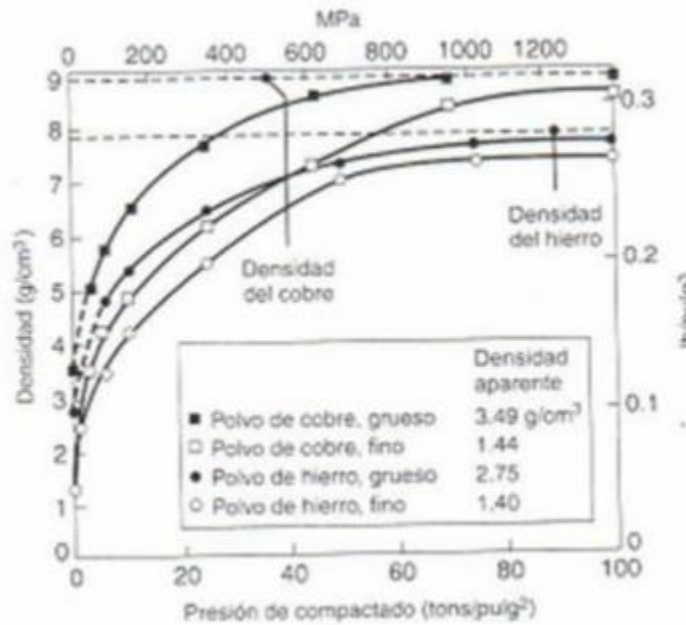
3.10 Métodos de compactación.

La compactación de polvos se lleva a cabo en una matriz o dado de acero o carburo de tungsteno, que se fabrica para la aplicación de presión mediante punzones, la forma final de la pieza es la contenida dentro de dicha matriz. Los términos “uniaxial”, “biaxial” e “isostática” son las direcciones en las que se produce la compactación o densificación debido al movimiento relativo entre las partículas (acercamiento entre ellas). La mezcla debe ser presionada lo suficiente para que soporte la fuerza de la eyección del molde y que pueda ser movida antes del sinterizado.

El propósito de la compactación es obtener el contacto de partícula con partícula, la densificación y por último obtener la forma elemental, para garantizar que la pieza tenga suficiente resistencia para su siguiente proceso. [25]

El prensado es una etapa muy importante ya que la forma y las propiedades mecánicas finales de la pieza están fuertemente relacionadas con la densidad al presionar.

Para conocer el comportamiento de los polvos se tiene la curva de compresibilidad, en la cual se gráfica la densidad en verde vs la carga requerida para su compactación (ver figura 3.21), en esta relación se debe buscar la presión a la que la densidad es óptima, ya que una mayor presión presentaría un efecto negativo en la densidad.



3.21 Cuerva de compresibilidad. [10]

La pieza compactada se conoce como comprimido crudo o compactado en verde, dado que tiene una resistencia baja. [10] esto se puede apreciar en la figura 3.22

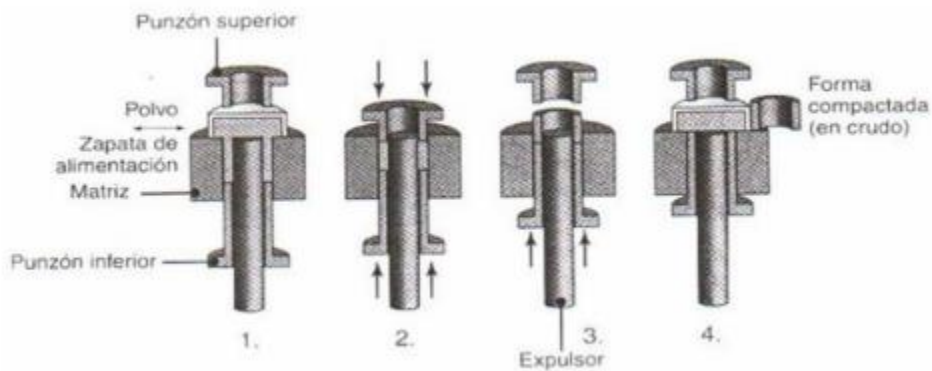


Figura 3.22. Compactación en verde para formar un Buje [1]

Existen 2 métodos de compactación, a saber:

- i) En frío
- ii) En caliente

Los principales métodos de compactación en frío aplicados a cobre, son los siguientes:

❖ Prensado en matrices o dados

La compactación en matrices es el proceso más básico y antiguo que existe para prensar los polvos mezclados para darles la forma deseada, con el propósito de obtener forma, densidad y contacto de partícula con partícula necesarios y hacer que la pieza tenga suficiente resistencia para su proceso posterior.

El polvo es introducido en la matriz mediante una zapata de alimentación y el punzón superior desciende al interior de la matriz. Las prensas utilizadas son las accionadas por mandos hidráulicos o mecánicos, y por lo general este proceso se realiza a temperatura ambiente, aunque puede efectuarse a temperaturas elevadas.

A la pieza compactada se le conoce como comprimido crudo o compactado en verde, ya que tiene una resistencia baja.

El compactado es una etapa muy importante ya que la forma y las propiedades mecánicas finales de la pieza están fuertemente relacionadas con la densidad al presionar.

El metal en polvo comúnmente se comprime en una cavidad de la matriz o dado para tomar la geometría deseada mediante uno o más punzones. La calidad de la pieza en verde depende del empaquetado uniforme del material.

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 entre los poros e incrementa el número de puntos de contactos entre las partículas

Al incrementar la presión, las partículas se deforman plásticamente, ocasionando que el área de contacto interparticular aumente y entren en contacto partículas adicionales. Esto viene acompañado de una reducción posterior del volumen de poros.

El compactado del polvo a temperaturas normales y sin un ambiente controlado es muy útil, por su bajo costo, para la fabricación de muchas piezas; sin embargo tiene grandes limitantes en materia de la densidad del compactado.

La variación en las densidades puede ser deseable en componentes como engranajes, levas, bujes y partes estructurales. Por lo cual, es posible aumentar la densidad en lugares críticos en los que son importantes la resistencia elevada y la resistencia al desgaste, y reducirla en donde no lo son. Figura 3.23. [27]

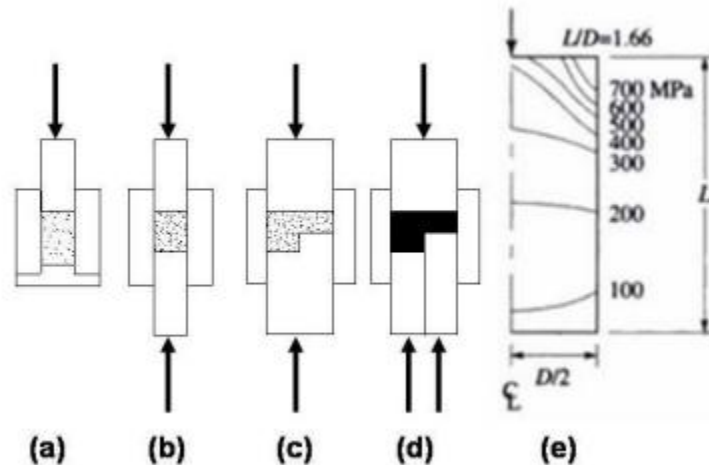


Figura 3.23. Variación de la densidad al compactar polvos metálicos en diversas matrices.

- a) Prensa de acción simple; b) y c) Prensa de doble acción, d) Mayor uniformidad de la densidad al prensar con dos punzones y e) Perfiles de presión en polvo de cobre compactado en una prensa de acción simple.[27]

El material particulado debe ser presionado lo suficiente para que soporte la fuerza de la eyección del molde y que pueda ser movida antes del sinterizado.

❖ Compactación isostática en frío (CIP)

En el prensado isostático en frío, el polvo metálico se coloca en un molde flexible, comúnmente fabricado con hule, neopreno, uretano, cloruro de polivinilo u otros elastómeros, después se presuriza el ensamble hidrostáticamente en una cámara, por lo general utilizando agua.

Los comprimidos crudos logran una compactación más uniforme y, por lo tanto, mayor densidad. El CIP se usa para consolidar los polvos metálicos y cerámicos que luego puedan tratarse por medio de laminado, mecanizado o sinterizado.

La presión más común es de 400 MPa, aunque se pueden usar presiones de hasta 1000 [MPa] y temperaturas desde la ambiente hasta 93 °C, puede alcanzar una densidad teórica mayor al 95 %. En la figura 3.24 se muestra su aplicación en revestimientos de cilindros automovilísticos.

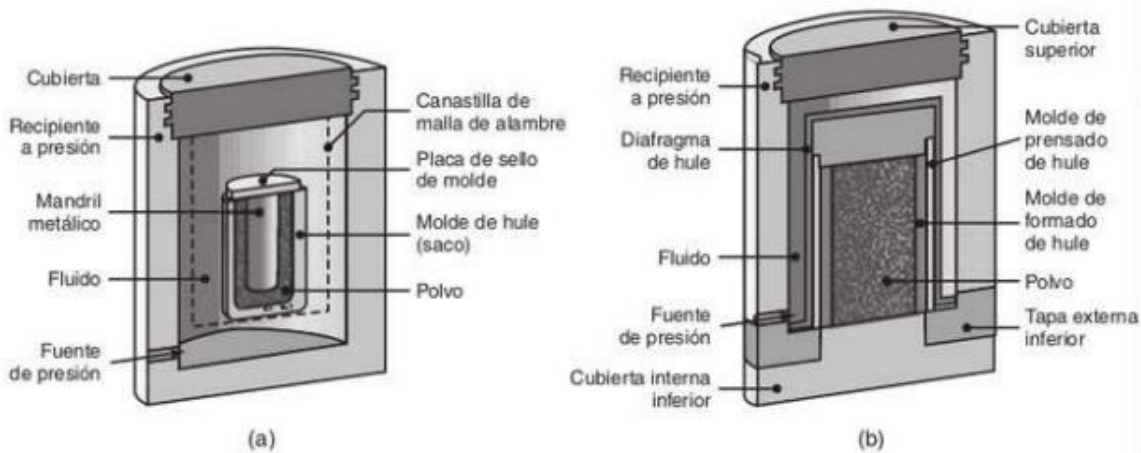


Figura 3.24. Diagrama esquemático del prensado isostático en frío, aplicado para el formado de un tubo [27]

Es un proceso probado para piezas de alto rendimiento. Las aplicaciones comunes para el prensado isostático en frío incluyen consolidación de piezas de polvo de cobre como las escobillas de cobre-grafito y componentes eléctricos.

Esta tecnología se está expandiendo a nuevas aplicaciones, como el prensado de blancos de pulverización, el revestimiento de piezas de válvulas en motores para minimizar el desgaste de las cabezas de cilindros, así como también en el sector aeroespacial, automotriz, de telecomunicaciones y en la electrónica. [27]

Los principales métodos de compactación en caliente son los siguientes:

- ❖ Compactación por troquel en caliente.

El proceso de compactación en caliente es una técnica alternativa en la cual las piezas logran alcanzar densidades y propiedades mecánicas similares a las obtenidas en el proceso de doble compresión/ doble sinterización utilizando un proceso de compresión uniaxial.

Consiste en aplicar presión y temperatura simultáneamente. A temperaturas elevadas los metales son generalmente más blandos, haciendo posible generalmente que sean compactados a una densidad mucho mayor, sin necesidad de elevar la presión. Después de esta operación también es requerido el sinterizado normal debido a que este, en la mayoría de los casos mejora las propiedades de la pieza.

Tradicionalmente los métodos empleados para alcanzar altas densidades incluyen el uso de infiltraciones de cobre, doble compresión y doble sinterización y polvo forjado. Lo cual involucra el uso de procesos secundarios, lo que resulta en costos significativamente elevados y por lo tanto ofrecen, malos ahorros en costos de producción.

El uso de este método se ve reducido en comparación con el sobre costo que demanda la doble compresión/ doble sinterización. Requiere moldes especiales resistentes al calor, una atmósfera controlada y las velocidades de producción se ven disminuidas significativamente. [27,28]

Aunado a esto, el compactado y sinterizado tienen lugar al mismo tiempo, para tal efecto el proceso incorpora el uso de polvo y herramental calientes en prensas de compactado uniaxial, lo que ocasiona densidades mayores en las piezas compactadas. La figura 3.25 muestra esquemáticamente el proceso de compactación en caliente.[27]

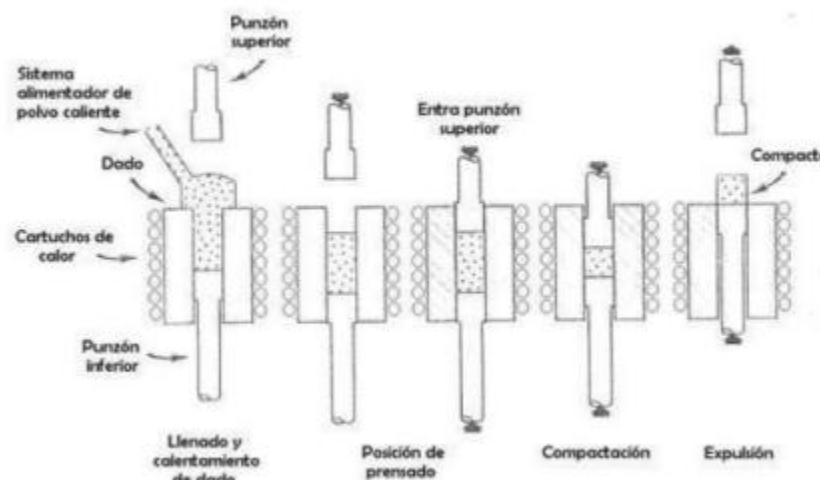


Figura 3.25. Esquema de compactado en caliente por troquel.[27]

El calentamiento del herramental es llevado a cabo usando cartuchos de calor empotrados en el dado. Las temperaturas de polvo y dados usadas varían, de acuerdo a las propiedades finales que se deseen obtener teniendo en cuenta que por cada incremento en la temperatura de compactación se verá incrementada la densidad en verde. [27]

❖ Prensado isostático en caliente (HIP).

El contenedor se fabrica de una hoja de metal de alto punto de fusión y el medio de presurización es gas inerte de alta temperatura u otros fluidos. Las condiciones comunes para el HIP son presiones elevadas de 100 hasta 300 MPa y temperatura de hasta 1200°C (figura 3.26). [27]

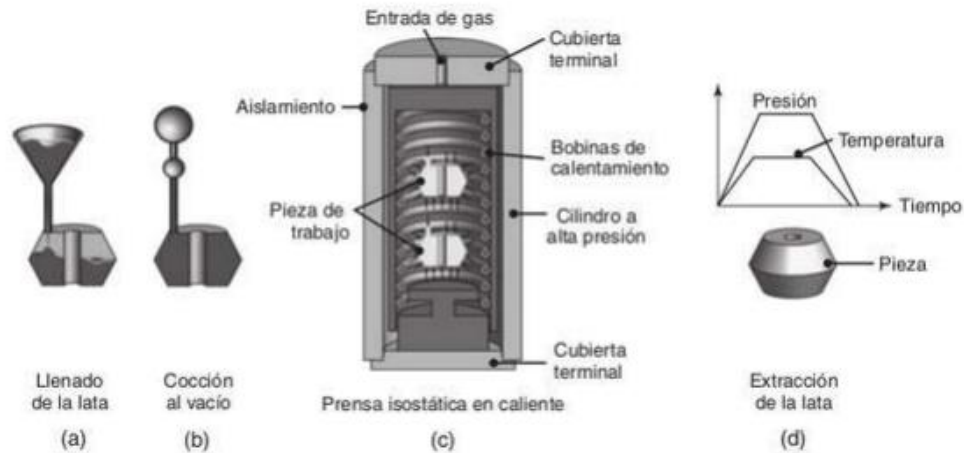


Figura 3.26. Esquema de prensado isostático en caliente [27]

Las principales ventajas del HIP son:

- Capacidad para producir compactos de casi el 100% de la densidad, con buen enlace metalúrgico de las partículas.
- Buenas propiedades mecánicas, por lo que ha ganado una amplia aceptación en la fabricación de piezas de alta calidad, debido a la uniformidad de la presión en todas direcciones y la ausencia de fricción en las paredes de la matriz.
- Produce compactos totalmente densos con una estructura y densidad de granos uniformes, sin considerar la forma de la pieza.
- Tiene la capacidad de manejar partes muchos más grandes que los otros procesos de compactado.

Entre las limitaciones se encuentran:

- Tolerancias dimensionales más amplias que las obtenidas por otros procesos de compactado.
- El costo del equipo y tiempo de producción son superiores a los requeridos en otros procesos.
- Sólo se aplica a cantidades relativamente pequeñas de producción; por lo general menos de 10000 partes o piezas por año.[23]

Después de la compactación, se requiere eyectar la pieza de la cavidad del contenedor en la que se está situado. Como resultado, las piezas con geometrías complicadas y contornos con secciones con poco espesor pueden fracturarse. [29]

3.11 Sinterización.

Esta operación, es clave para el proceso de la metalurgia de polvos. Es aquí en donde la pieza adquiere la resistencia y fuerza para realizar su función ingenieril para la cual se ha fabricado. Tiene el propósito de incrementar la 'fuerza' y la resistencia de la pieza creando enlaces fuertes entre las partículas.

Para describir este proceso, basta con decir que ocurre una difusión atómica y las partes unidas durante el proceso de compactación se fortalecen y crecen hasta formar una pieza uniforme. Esto puede inducir a un proceso de recristalización y a un incremento en el tamaño de los granos. Los poros tienden a volverse redondos y la porosidad en general como porcentaje del volumen total tiende a decrecer [27].

El compacto contiene partículas de material muy cercanas entre sí. Para iniciar, los enlaces interatómicos se establecen entre zonas adyacentes, los cuellos crecen por el desplazamiento de átomos del área y de la masa de las partículas hasta ellos, como se aprecia en la figura 3.27. [30]

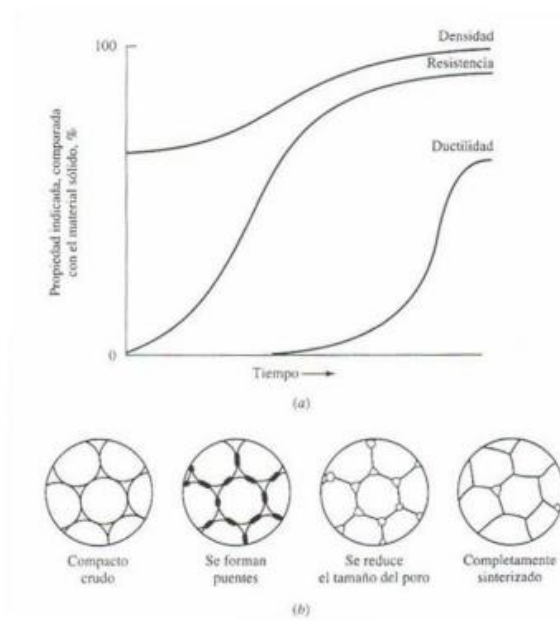


Figura 3.27. Evolución del sinterizado (a) el compactado adquiere una resistencia permanente, mientras que el volumen se contrae (se incrementa la densidad) como resultado de, (b) la eliminación de la mayoría de los poros entre las partículas.[30]

En el sinterizado la resistencia aumenta marcadamente. Los átomos se difunden hacia los puntos de contacto, formando puentes y reduciendo el tamaño del poro (figuras 3.28 y 3.29).

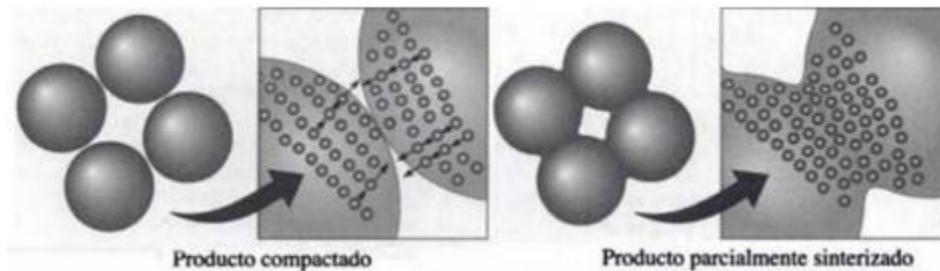


Figura 3.28. Procesos de difusión durante el sinterizado en la metalurgia de polvos. [31]

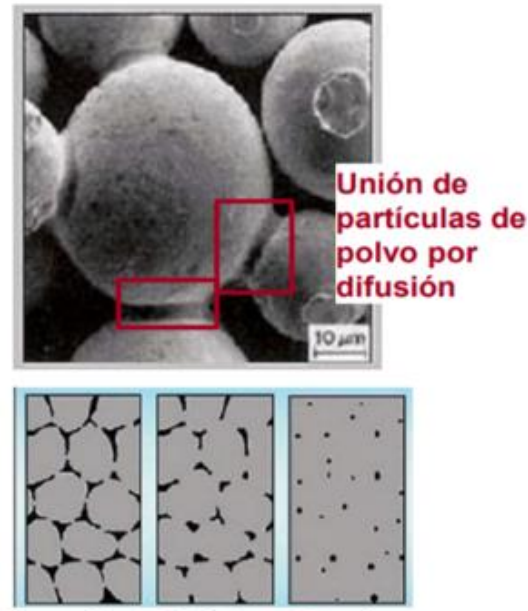


Figura 3.29 Estados: inicial → final. [29]

Las atmósferas controladas son una parte esencial en casi cualquier proceso de sinterización ya que previenen la oxidación y otras reacciones que no conviene al proceso. Algunas de las atmósferas más usadas son las compuestas con hidrógeno seco o con hidrocarburos sometidos parcialmente a la combustión, habitualmente reductora (hidrógeno, monóxido de carbono o amoníaco), ya si se requieren usos más especiales y que puedan soportar el incremento en el costo de la atmósfera se pueden utilizar las atmósferas sintéticas, llamadas de esta manera, debido a que son producidas mezclando cuidadosamente nitrógeno con hidrógeno y gas de hidrocarburos. Estos tipos de atmósferas tienen las ventajas de ser mucho más limpias, tener mayor adherencia al material sinterizado y un nivel muy bajo de vapor de agua. [27]

El sinterizado convencional se realiza a temperaturas entre el 70 y 90% de la temperatura de fusión del constituyente en mayor proporción (cobre 760 – 980°C, latón 640 – 820°C, bronce 670 – 860 °C), en hornos alimentados por bandas, en las cuales se cargan las piezas en verde, los cuales se dividen en varias cámaras:

- De carga: se depositan las piezas en verde.
- De limpieza (opcional): se incluye solamente si hay que eliminar aglutinante y/o lubricante.
- De alta temperatura: donde se da el sinterizado.
- De enfriamiento: se enfrían las piezas hasta temperatura ambiente.

- De oxidación controlada (opcional): Se incrementa gradualmente la cantidad de oxígeno para evitar la oxidación. Las cámaras del horno de sinterizado se pueden apreciar en la figura 3.30

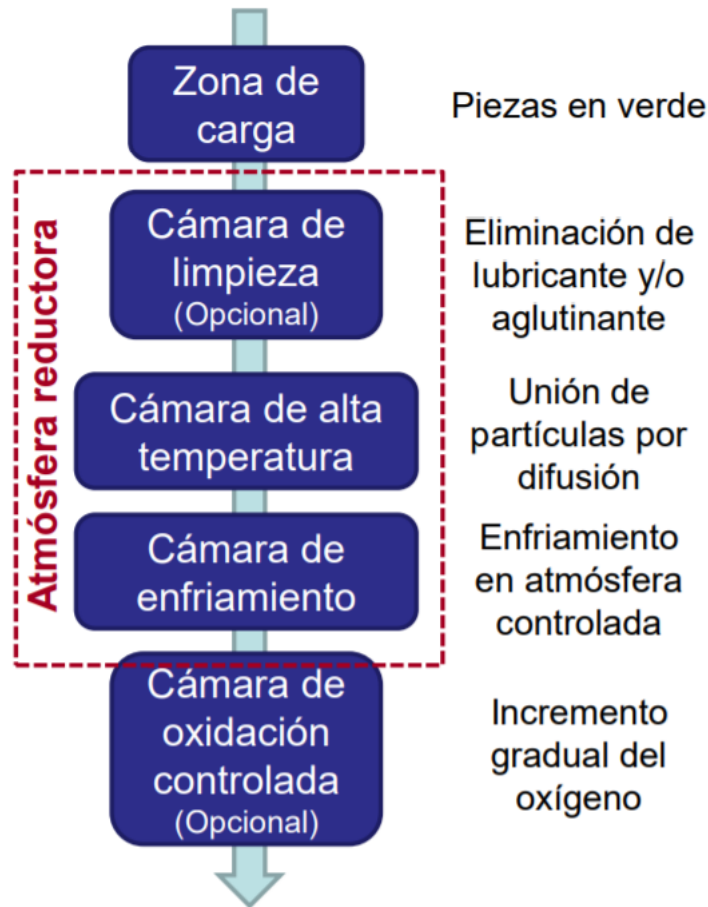


Figura 3.30 Cámaras del horno de sinterización [31]

El grado y velocidad del sinterizado depende de:

- La densidad de los comprimidos.
- La temperatura.
- El tiempo.
- El mecanismo de sinterización.
- El tamaño promedio de la(s) partícula (s).
- La distribución de los tamaños de las partículas de polvo.

3.11.1 Sinterización en fase líquida

El proceso en el que una pequeña cantidad de líquido ayuda a la densificación se llama sinterizado en fase líquida cuando la sinterización se efectúa a una temperatura mayor a la de fusión de uno de los constituyentes secundarios (como en piezas estructurales de hierro/cobre, carburo de tungsteno/cobalto, etc), en algunos casos se forman en puntos localizados del material, regiones líquidas, debido a que uno de los constituyentes se funde y envuelve al constituyente con temperatura de fusión más alta, repartiéndose y «mojando» las partículas del otro constituyente, , es esencial controlar la cantidad de dicha fase que se presenta durante el proceso, para poder asegurar paridad en la forma de la pieza y así obtener productos no porosos.[28]

Además de los tratamientos pos-sinterizado, tales como la infiltración y la impregnación, se le pueden hacer a las piezas tratamientos térmicos, tratamientos con vapor, tratamientos mecánicos, endurecimientos superficiales, etc. Esta versatilidad para aplicar diferentes tratamientos a las piezas que salen del proceso de pulvimetalurgia le da una gran ventaja a este método de fabricación, aunque su empleo tiene su mayor uso con metales comunes, también tiene aplicaciones con otros tipos de materiales. [27]

Algunos de los tratamientos pos-sinterizado se describen a continuación:

3.11.1 Infiltración

Este es un método para mejorar la resistencia de materiales porosos que consiste en llenar los poros superficiales con un metal líquido que tenga menor punto de fusión. No necesita presión y se usan bastante con piezas ferrosas y utilizando cobre como infiltrante. Este método también es utilizado para producir materiales compuestos con propiedades eléctricas especiales como tungsteno/cobre y molibdeno/ plata.

3.11.2 Impregnación

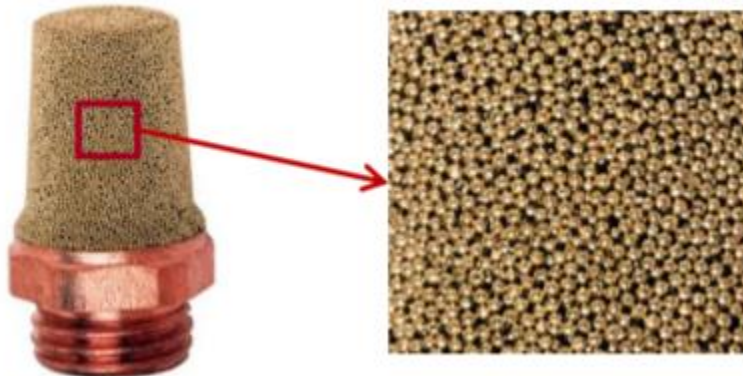
Este término es análogo al de infiltración, pero en vez de llenar los poros con materiales metálicos se utilizan materiales orgánicos. Como ejemplo de este procedimiento se tienen los cojinetes impregnados con aceite, los casquillos de bronce autolubricados, etc. (figura 3.31).



Figura 3.31. Casquillos de bronce autolubricados: Se sinterizan con una porosidad controlada y posteriormente se impregnan con lubricante [31]

Los materiales compuestos también pueden ser fabricados y conformados por el método de la metalurgia de polvos, ejemplo de ellos son: materiales para contacto eléctrico tales como cobre / tungsteno, plata / óxido de cadmio, etc.

Los materiales porosos son un gran ejemplo del para qué se debe usar la pulvimetalurgia, la porosidad puede ser regulada y calculada según el uso que tenga la pieza, figura 3.32. Los mayores productos de este grupo de materiales son los filtros, silenciadores neumáticos, bujes autolubricados, etc., este último producto no sólo es difícilmente, sino imposible, fabricarlo por cualquier otro método de producción.



3.32. Silenciador neumático fabricado a partir de bronce en polvo [32]

Las partes estructurales (o mecánicas) son por mucho el grupo más grande de materiales fabricados por este método. Estas piezas están mayormente constituidas por hierro, pero tienen además aleaciones con cobre, latón, bronce y aluminio.[33]

3.12 Limitaciones de diseño de productos sinterizados.

En general se busca un diseño que permita compactar el polvo de manera uniforme, algunas de las consideraciones que se toman en cuenta son:

- Imposible compactar paredes muy delgadas.
- Dificultad para llenar orificios de diámetro pequeño.
- Necesidad de mantener los radios de acuerdo a la geometría de la pieza, para mejorar el flujo del polvo.
- Se hacen indispensables los ángulos de salida en los extremos de las piezas (figura 3.32).
- Limitaciones del tamaño de las piezas (figura 3.33 y 3.34)

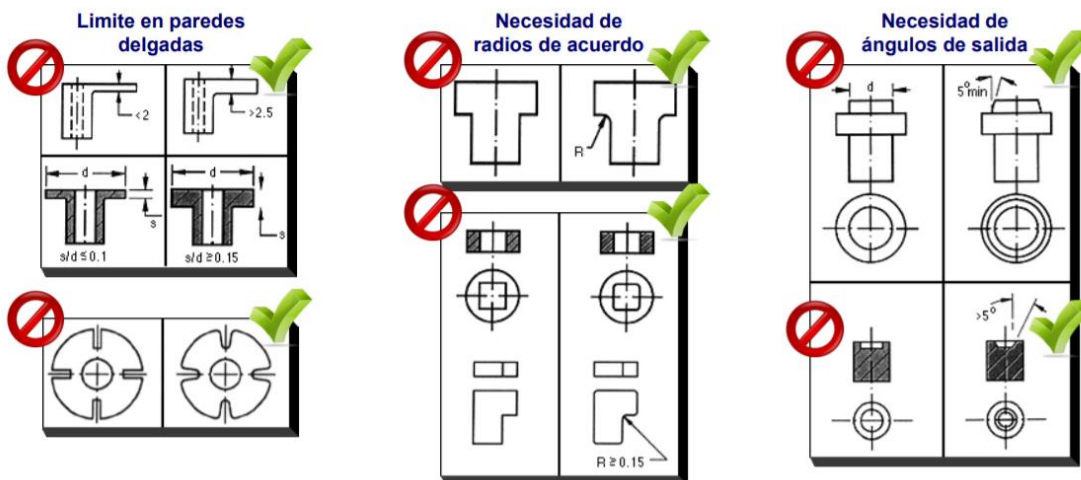


Figura 3.32. Esquematización de las limitaciones en el sinterizado. [32]

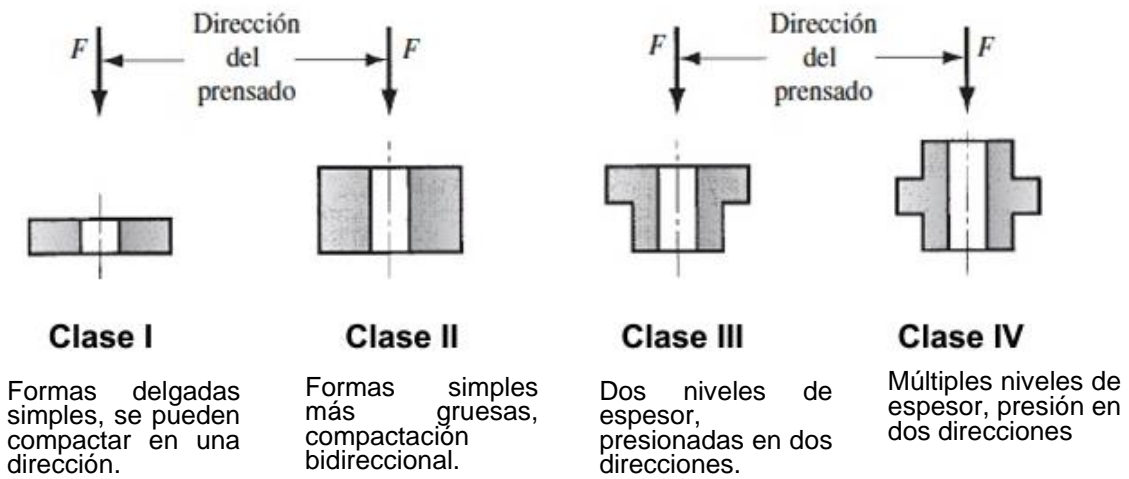


Figura 3.33 Limitaciones en el diseño de piezas [33]

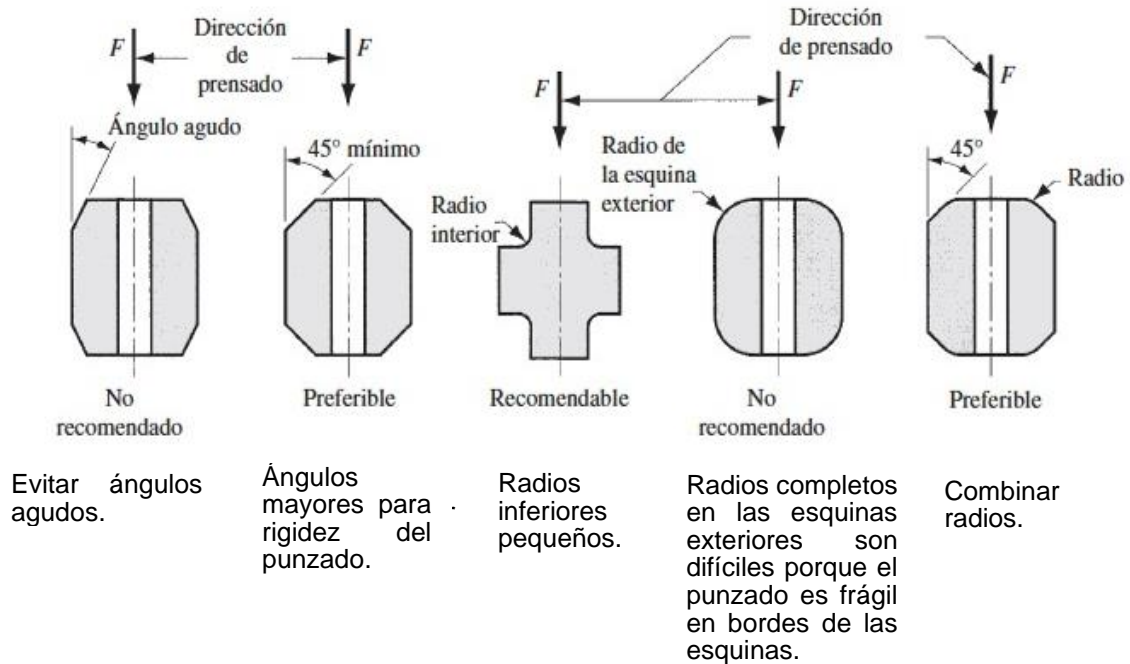


Figura 3.34 Consideraciones de diseño [33]

3.13 Seguridad en metalurgia de polvos.

La seguridad industrial es requerida en todos los procesos productivos de la empresa moderna, el avance que ha tenido esta rama industrial en los últimos años ha sido determinante, no se concibe una actividad productiva sin el análisis de los especialistas en seguridad industrial. Sin embargo, las estadísticas presentan resultados, que a veces no reflejan el esfuerzo de los equipos de seguridad en la disminución de los riesgos y prevención de los accidentes.

Por razones culturales, sociales y económicas, el trabajador no ve la seguridad industrial como un aporte a su integridad personal, además, en ocasiones antepone la producción ante la seguridad, omitiendo las normas básicas y por consiguiente aumenta el riesgo del operador a sufrir accidentes.

Antes de utilizar cualquier maquinaria (matricería, prensas, hornos, etc.), el operario debe conocer los riesgos potenciales que existen, debe saber usar correctamente los equipos y sus controles, para lo que son y cómo funcionan.

Considerando que en la manipulación del material particulado se tienen polvos con distintas características, hay los que de entrada son tóxicos (plomo, cadmio, arsénico y cromo), con los cuales se deben de incrementar los cuidados durante su manipulación, empleando mascarillas o respiradores para evitar su inhalación (hacia garganta, tráquea y alveolos pulmonares) o su ingesta, algunos son explosivos (aluminio, magnesio, titanio, zirconio y torio), otros más, por su tamaño tan pequeño y al estar en contacto con el aire (pirofóricos) se incendian y adicional a los anteriores, existen los que tienen afinidad al oxígeno y al estar expuestos a altas temperaturas, pueden generar una reacción.

Para evitar riesgos y accidentes, durante el manejo de los polvos, se deben tomar algunas precauciones, entre ellas se incluyen: conexión del equipo a tierra, evitar las chispas (utilizando herramientas que no las produzcan) y la fricción como fuente de calor, las nubes de polvo y las reacciones químicas (termita). [10]

Riesgos

Tomando en cuenta que en la industria pulvimetalúrgica se tiene la probabilidad de que se produzca un evento, cuyos factores que lo componen son la amenaza (condición peligrosa que puede ocasionar impactos a la salud, lesiones e inclusive la muerte) y la vulnerabilidad (características y circunstancias de las personas, que

las hacen susceptibles a los efectos dañinos) y sus consecuencias negativas. Los riesgos pueden ser los siguientes:

- Intoxicación por inhalación e ingesta de polvos, lubricantes, sustancias químicas y gases (nubes tóxicas) durante el proceso.
- Proyección de partículas durante las operaciones de prensado tanto manual como automática.
- Golpes y sobreesfuerzos debidos principalmente a la manipulación de las piezas.
- Atrapamiento en prensas.
- Quemaduras a consecuencia de la manipulación de piezas, matrices y equipos en hornos de sinterización.
- Estrés térmico por radiación (golpe de calor).
- Mutilaciones de extremidades
- Incendios provocados por los polvos pirofóricos y explosivos

Medidas preventivas

Son todas aquellas destinadas a prevenir que un riesgo se materialice y con ellas proteger eficazmente la vida y la salud de los trabajadores, mediante un análisis de riesgo o de una no conformidad con una disposición o reglamentación, por mencionar algunas:

- Capacitar al personal para prevenir accidentes y enfermedades, proporcionándoles protocolos mediante el suministro de equipo de protección personal (NOM 004, 017 STPS), que sea necesaria para mitigar los riesgos y así garantizar la disminución de accidentes posibles.
- Encerrar o apantallar las operaciones en las que están expuestas múltiples partes del cuerpo (NOM 006, 010) y si no es posible, entonces se debe mantener una distancia de seguridad y usar las protecciones personales.
- Automatizar las operaciones siempre que sea posible para minimizar los accidentes laborales, haciendo uso de herramientas tecnológicas que puedan realizar tareas a gran velocidad, pero siempre salvaguardando la integridad del operador.

- Utilizar mandos bimanuales o similares para evitar atrapamiento y/o mutilación de alguna extremidad durante el ciclo de funcionamiento de las máquinas, obligando al trabajador a tener sus manos en una zona segura, para disminuir posibles accidentes.
- Realizar revisiones periódicas (NOM 029) e instalar en las máquinas un sistema de paro de emergencia (Norma ISO 13852), dicho sistema sirve para prevenir situaciones que pueden poner en peligro a las personas, minimizando los riesgos existentes.
- Es necesario que exista un orden, una limpieza y una suficiente iluminación (NOM 025) en las zonas de manejo, almacenamiento y transporte, así como una adecuada manipulación de las cargas y un buen estado de las herramientas manuales, para evitar golpes y sobreesfuerzos.
- Llevar a cabo una correcta manipulación y mantenimiento de los hornos de sinterizado (NOM 015), al mismo tiempo que se trabaje con las herramientas y los equipos de protección personal adecuados (guantes, etc.), para minimizar en lo posible el riesgo de quemaduras causadas por dichos hornos.
- Instalar un sistema de ventilación forzada y de apantallamiento del área, impidiendo en lo posible, la propagación del calor radiante [34], para evitar el estrés térmico (NOM 016).

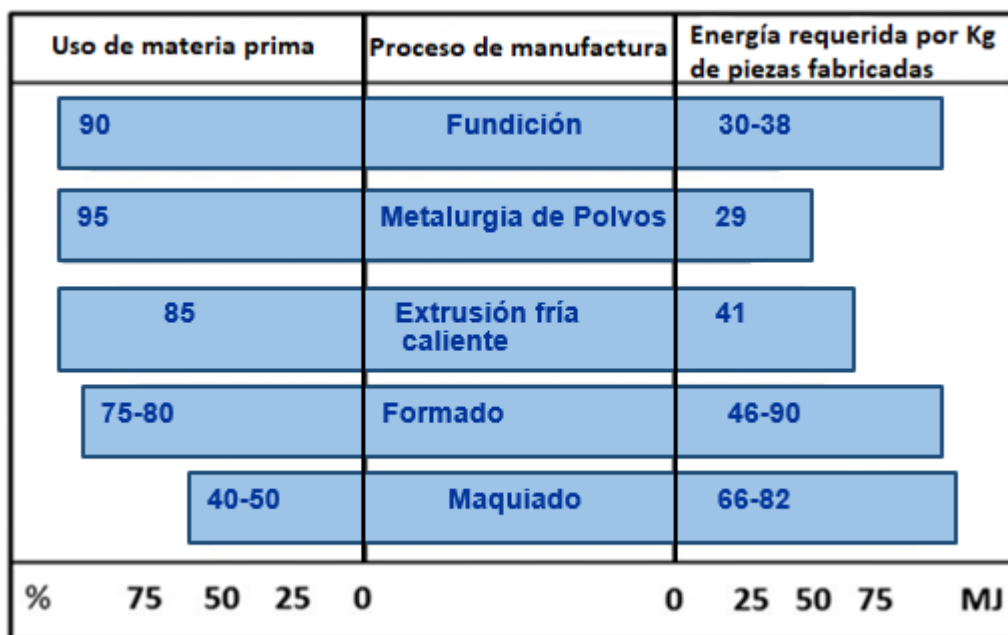
Capítulo

4

Hallazgos

4. Hallazgos.

La importancia de la industria pulvimetalúrgica en las últimas décadas es atribuible al ahorro de costos asociados a la eliminación de procesos de acabado, a diferencia de otros métodos de procesamiento como la fundición o la forja, como se puede observar en la figura 4.1, en donde la transformación de un componente a través de la tecnología pulvimetalúrgica representa, en algunos casos, ahorros de hasta un 40%. [35]



Así mismo, cabe destacar que el desarrollo de nuevos materiales y tecnologías de fabricación, han permitido incrementar el número de aplicaciones para estos materiales obtenidos mediante un proceso pulvimetalúrgico.

Los campos de aplicación de las piezas obtenidas por metalurgia de polvos son diversos, teniendo presencia en sectores como el de la automotriz, aeroespacial, naval, electrodomésticos, joyería, etc., siendo su principal mercado los materiales de carácter estructural. Dentro de esta área industrial, los aceros representan el 80% de la producción de materiales pulvimetalúrgicos y las aleaciones de aluminio y cobre ocupan el segundo lugar de importancia, con alrededor de un 15% de participación en el mercado [35].

El desarrollo tecnológico de este tipo de materiales para aplicaciones estructurales ha sido abordado en dos diferentes ámbitos.

Dentro de un primer ámbito, se ha buscado la mejora de las propiedades mecánicas a través de la optimización de las aleaciones y de los procesos de producción y en un segundo, el desarrollo de una nueva ingeniería de aleaciones, para crear materiales con propiedades específicas, como se puede apreciar en la tabla 4.1

Tabla 4.1. Principales avances en metalurgia de polvos [35]

Fecha	Descripción	Localización
3000 AC	"Hierro esponja" para la fabricación de herramientas	Egipto, Africa, India
1781	Aleación platino-arsénico	Francia, Alemania
1790	Producción comercial aleación platino-arsénico	Francia
1822	Fabricación de polvos de platino.	Francia
1826	Proceso comercial de sinterizado a alta temperatura de compactos de platino en polvo.	Rusia
1829	Método Wollaston para la producción de compactos de platino a partir de esponja de platino (base de la pulvimetalurgia tradicional)	Inglaterra
1830	Sinterización de compactos de diversos metales.	Europa
1870	Patente de materiales para cojinetes fabricados a partir de polvos metálicos (precursores de los cojinetes autolubricados)	Estados Unidos
1878-1900	Filamentos incandescentes para lámparas.	Estados Unidos
1915-1930	Carburos cementados.	Alemania
Inicios 1900	Producción de filtros metálicos.	Estados Unidos
1920s	Cojinetes autolubricados (uso comercial)	Estados Unidos
1940s	Desarrollo de la tecnología del polvo de hierro y primeros componentes de hierro/acero sinterizados.	Europa
1950s 1960s	Desarrollo de procesos de forja de materiales pulvimetalúrgicos. Fabricación serie de productos estructurales.	Estados Unidos
1970s	HIP, aceros pulvimetalúrgicos para herramientas y aleaciones superplásticas.	Estados Unidos
1980s	Desarrollo de la solidificación rápida. PIM/MIM.	Estados Unidos
1990s	Procesos pulvimetalúrgicos aplicados a compuestos intermetálicos, composites de matriz metálica, "spray forming", polvos nanométricos y compactación en caliente.	Estados Unidos, Inglaterra

4.1 La pulvimetalurgia como ruta de procesamiento

Como se mencionó anteriormente la metalurgia de polvos es el conjunto de técnicas que permite, por medio de la compactación de polvos (prensado) y su posterior calentamiento (sinterización) a temperaturas por debajo del punto de fusión del material(es), obtener piezas con formas y propiedades específicas, en la figura 4.2 se ilustra cada una de sus etapas [35].

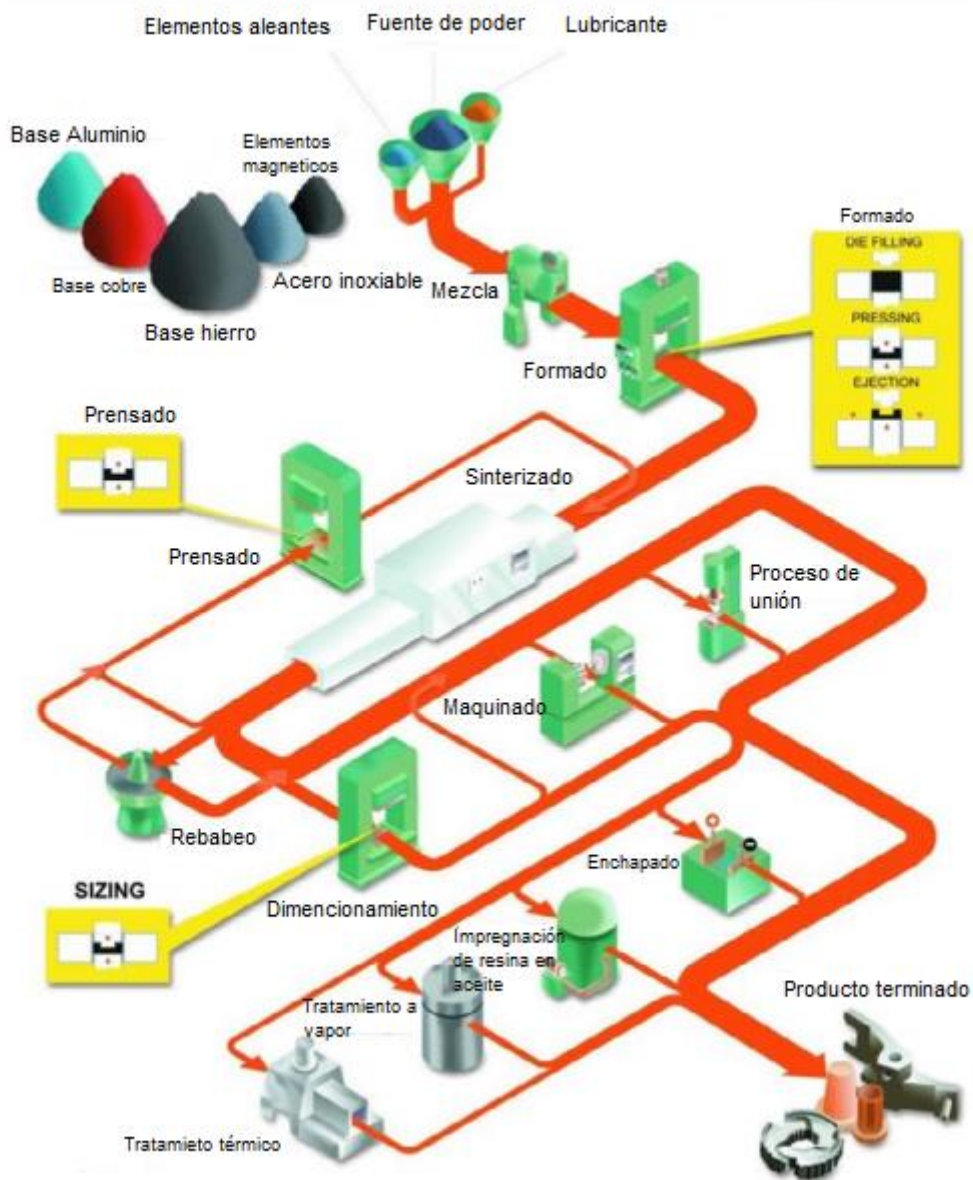


Figura 4.2 Esquema del proceso pulvimetalúrgico [36]

La tendencia actual de la pulvimetalurgia pasa por intentar ofrecer productos con presentaciones similares a la forja y a la fundición, para ello se centran los esfuerzos en el desarrollo de nuevos materiales pulverizados a menos costo, con mayor compresibilidad y con tecnologías más limpias, se intenta desarrollar prensas con capacidad de hasta 1600 toneladas para satisfacer el mercado de componentes de mayor tamaño. A la vez que el sinterizado a alta temperatura crece como tecnología.

El futuro de la pulvimetalurgia no solo se fundamenta en el incremento de producción en las aplicaciones actuales, sino también en la conquista de nuevos mercados, principalmente en el sector aeronáutico y aeroespacial, sin olvidar el naval y el de otros transportes terrestres, la industria de los electrodomésticos, materiales de fricción, etc.

En el sector automotriz se estimó un crecimiento de volumen de negocio de hasta 15 billones de dólares en el 2020 con un crecimiento anual de 5.7% aproximadamente, en el mercado asiático. La grafica de crecimiento se puede apreciar en la figura 4.3 [37]

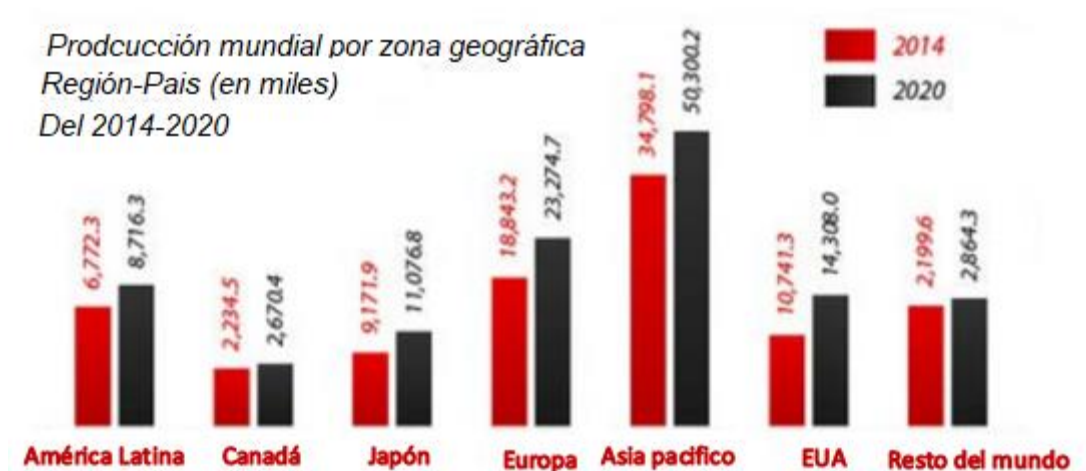


Figura 4.3. Comportamiento de la producción de automóviles por zona geográfica (miles) en 2014 y 2020 [37]

4.2 Presencia de la metalurgia de polvos

Uno de los principales factores que impulsan el mercado de la pulvimetalurgia es la creciente preferencia por la fabricación de componentes autolubricables para los equipos originales de automóviles. Se espera que el mercado de la pulvimetalurgia registre una tasa de crecimiento anual de venta, (CAGR, Compound Annual Growth the Rate) de más del 4% durante el período (2019-2025) de pronóstico.

Por otro lado, es probable que la disminución de la producción automotriz y el impacto de la pandemia de COVID-19 obstaculicen el crecimiento del mercado [38]

En los años más recientes Asia-Pacífico dominó el mercado de la pulvimetalurgia en todo el mundo como puede verse en la tabla 4.2 y se espera que experimente la mayor tasa de crecimiento, en los años venideros. [39]

Tabla 4.2 Informe de mercado de la metalurgia de polvos. [39]

Tipo de producto	Ferroso	
	No ferroso	
Aplicaciones	Automotriz	
	Maquinaria industrial	
	Eléctrica y electrónicos	
	Aeroespacial	
	Otras aplicaciones	
Geografía	Asia-Pacífico	China
		India
		Japón
		Corea del sur
		Resto de Asia-Pacífico
	América del Norte	Estados Unidos
		Canadá
		México
	Europa	Alemania
		Inglaterra
		Italia
		Francia
		Resto de Europa
	América del Sur	Brasil
		Argentina
		Resto de América del Sur
	Medio Oriente-África	Arabia Saudita
Sur África		
Resto de Medio Oriente y Africa		

4.2.1. Presencia de la metalurgia de polvos en el mercado automotriz.

Las piezas fabricadas a partir de polvos muestran una excelente porosidad controlada y propiedades auto lubricantes que les permiten filtrar gases y líquidos (como es el caso de las escobillas de carbono de cobre). Por esta razón, la pulvimetalurgia es un proceso altamente recomendado en la fabricación de piezas que requieren curvas, depresiones y proyecciones complejas.[32]

La flexibilidad para desarrollar piezas mecánicas con una composición diversa, como metales-no metales y la combinación de metal-metal, permite la producción de piezas automotrices con alta precisión dimensional (bujías). [34]

Los cojinetes y engranajes son las partes más comunes de los vehículos, que se fabrican mediante un proceso de pulvimetalurgia. Además, se utiliza en una gran cantidad de piezas de un vehículo, incluido el chasis, la dirección, el escape, la transmisión, las piezas del amortiguador, el motor, la batería, los asientos, los filtros de aire, el disco de freno, etc.

Una variedad de metales, incluidos los ferrosos (hierro, acero, acero aleado y acero inoxidable) y no ferrosos (aleaciones de cobre, bronce, aluminio y titanio), se utilizan en componentes automotrices, a la vez de que también se utiliza un tratamiento térmico y/o un tratamiento superficial especial para mejorar la precisión.[35]

La presencia de la fabricación de piezas para el sector automotriz a nivel mundial, resalta dentro del resto de las áreas que emplean la metalurgia de polvos, como se puede ver en la figura 4.4 [35]

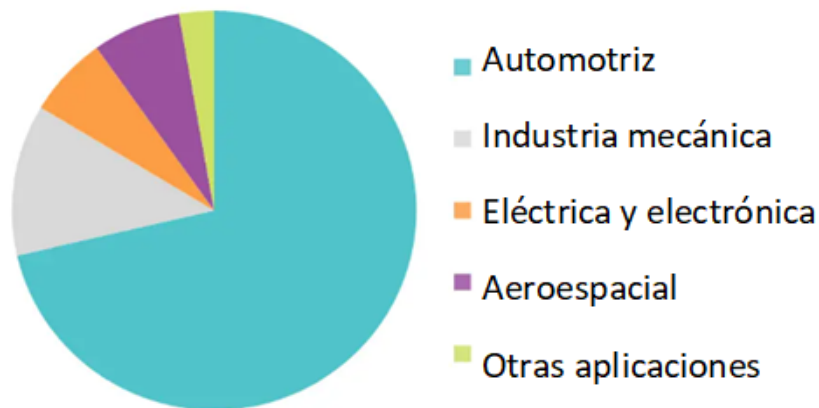


Figura 4.4. Fabricación de piezas por PM del área automotriz a nivel mundial. [35]

Las aplicaciones automotrices forman aproximadamente el 70% de la pulvimetalurgia norteamericana de las piezas que se comercializan. En 1999 un vehículo familiar utilizaba 15Kg de piezas pulvimetalúrgicas, y para el 2002 ya se utilizaban 17Kg en cada vehículo vendido. [35]

La ingeniería de transmisiones en automóviles está considerando seriamente el uso de metales en polvo para piñones y marcos de transportador del piñón en cajas automáticas para mejorar la exactitud dimensional y reducir gastos de producción. Se estima que este nuevo mercado se abrirá en los siguientes años pudiendo ser esta aplicación más importante en las siguientes décadas. [41]

4.2.2 Presencia de la pulvimetalurgia en Asia-Pacífico.

Asia-Pacífico se ha convertido en uno de los mercados clave de la pulvimetalurgia y un destino atractivo para los empresarios, debido a su desarrollo económico.

Las tendencias positivas de crecimiento económico en países como China, India y Japón han impulsado la demanda de productos y aplicaciones de pulvimetalurgia en los últimos años. [40]

La cantidad de plantas de fabricación en China, está aumentando con inversiones de fabricantes de todo el mundo. Se espera que esto aumente la demanda de pulvimetalurgia para la producción de maquinaria y herramientas.

La industria aeroespacial japonesa fabrica componentes para aviones, principalmente comerciales y de defensa. Debido a la creciente demanda de carga, la producción de aviones comerciales ha aumentado en los últimos años. Japón está fabricando el avión de combate de próxima generación F-35A y otros aviones militares, fortaleciendo la base de la fabricación aeroespacial en el país.[39]

Con la creciente demanda de las industrias de usuarios finales y debido al fuerte crecimiento económico, se espera que China sea uno de los mercados de más rápido crecimiento para la pulvimetalurgia, seguida por Japón y Corea (figura 4.5). [40]

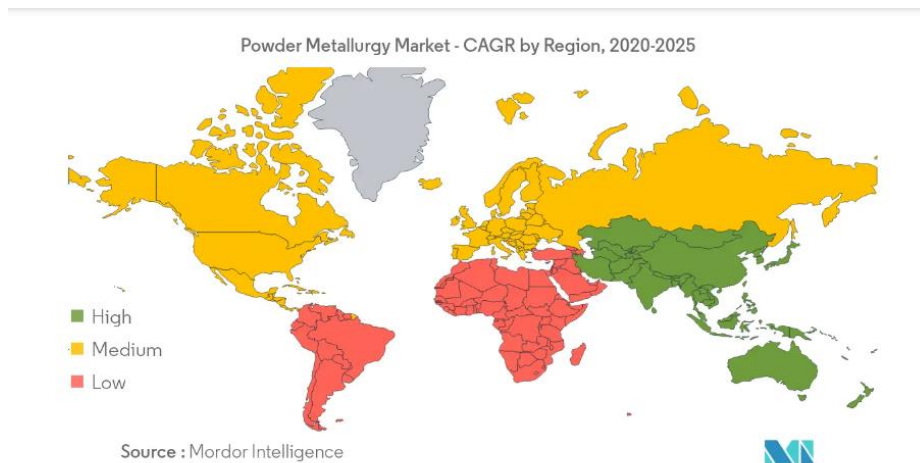


Figura 4.5. Proyección a nivel global de la producción de piezas por MP (2020-2025) [40]

El mercado de la pulvimetalurgia está consolidado con unos pocos jugadores importantes, que representan una parte sobresaliente del mercado global, algunos de los principales actores de dicho mercado incluyen a Melrose Industries PLC, Sumitomo Electric Industries, Ltd., Höganäs AB, Hitachi Chemical Co., Ltd. y ATI, entre otros.[40]

4.2.3 El futuro de la pulvimetalurgia

Las aplicaciones para cobre incluyen pinturas y recubrimientos, productos químicos, como elementos de aleación, piezas pulvimetalúrgicas y composites. Las aplicaciones incluyen cojinetes de leva, corchetes del espejo, piezas del amortiguador, bombas y barras de conexión. Expertos de Ford estiman que algunos vehículos serán los primeros en cumplir con 25Kg de piezas pulvimetalúrgicas en unos pocos años. El mercado de moldeo en caliente continúa aumentando, lo cual da a fabricantes de piezas la posibilidad de producir productos de polvos con características altas de desempeño en una sola operación de compactación.

Las ventas mundiales de piezas pulvimetalúrgicas fueron estimadas en más de 5 billones de dólares en 1998, en años recientes esta cifra seguramente ha sido superada debido a la demanda de piezas que cada día son requeridas.

Tan solo en el año 2002 la industria Norte Americana produjo aproximadamente 400,00 toneladas de aluminio, acero, hierro acero inoxidable y cobre wen piezas pulvimetalurgicas para el mercado automotriz. [35]

El reconocimiento de la pulvimetalurgia como una tecnología estratégica está fuera de toda duda debido a el lado convencional del negocio sino que también como materiales avanzados particularmente. El uso de compactación isostática en caliente aumenta para el cobre y sus aleaciones, y otros procesos avanzados como prototyping rápido, spray forming, conformado en frío y en el procesamiento de tamaño de polvos submicrónicos. El mercado anual para polvo de superaleaciones y barras pulvimetalúrgicas extruidas está en el rango de 35 a 45 millones de dólares.[40]

Los destinos finales de los polvos superaleados y los billets son las partes de turbinas de avión, la reparación de turbinas de aeronaves y yacimientos petrolíferos y la petroquímica. Todas estas aplicaciones requieren productos por compactación isostática en caliente. [41]

Los mercados de moldeo por inyección en caliente (PIM) se estima aumentará en un 20 a un 25% debido a la mejora en tecnología, materiales y sistemas de molde. Más diseños innovadores del producto están siendo creados de este sector de la industria. El mercado norteamericano es estimado en 100 millones de dólares, dividido en 75 millones para proyección de metales y 25 millones para cerámicos.

Los fabricantes de equipo pulvimetalúrgico (herramental, prensas de compactación, hornos y atmósferas) también han experimentado crecimiento favorable. Las ventas de equipo y atmósferas representan un mercado anual muy por encima de los 100 de dólares. La tendencia es para prensas mayores con más controles sofisticados, los hornos de temperatura alta, todo para proveer piezas con mejores resistencias mecánicas y mayor calidad. [35]

Capítulo


5

Catálogo de piezas de cobre y sus aleaciones

5. Catálogo de piezas de cobre y sus aleaciones fabricadas por metalúrgia de polvos.

A continuación, se concentra la información recabada en la presente investigación, ilustrando algunas de las piezas fabricadas vía pulvimetalúrgica (tabla 5.1).

Tabla 5.1. Catálogo de piezas fabricadas por pulvimetalúrgica.

Descripción	Piezas de cobre
<p>Cojinetes autolubricables.</p> <p>Los cojinetes porosos sinterizados comprenden una matriz anular metálica que comúnmente tiene un espesor que puede variar entre 0.5 y varios milímetros.</p> <p>Propiedades: Resistencia al desgaste y al rayado Resistencia a la corrosión Buena capacidad para absorber y eliminar partículas contaminantes.</p> <p>Datos técnicos: Geometría: cilíndrica Carga estática: máx. 70 N/mm² Carga dinámica: máx. 20 N/mm² Coeficiente de fricción en seco: 0,05 - 0,10 Velocidad de deslizamiento: máx. 6 m/s Rango de temperatura: de -20 - 100 °C Dureza mín: de 25 HB [43]</p>	 <p>Figura 5.1. Cojinetes autolubricables de broce [44]</p>

Piezas de cobre fabricadas por MP	Imágenes ilustrativas
<p>Rodamientos autolubricados de latón.</p> <p>El cojinete de latón lubricado sólido de 500 HP se fabrica en una aleación de cobre de alta dureza, perforado en la superficie con una cierta proporción de agujeros resistentes al desgaste.</p> <p>Datos técnicos:</p> <p>Resistencia al desgaste y a la fatiga Dureza (HB) > 245 Resistencia a la tracción (N / mm²) > 785 Temperatura limitada (°C) 300 ~ 400 Carga máxima (N / mm²) 118 Velocidad máxima (M / min) 15 PV máxima (N / mm² * m / s) 1.65 Cantidad de ajuste de compresión (400 N / mm²) [45]</p>	 <p>Figura 5.2. Rodamientos autolubricados de broce [46]</p>

Piezas de cobre fabricadas por MP	Imágenes ilustrativas
<p>Escobilla de cobre</p> <p>Las escobillas son una de las partes fundamentales en el funcionamiento de un motor eléctrico, es el elemento que ejerce de conexión eléctrica entre la parte fija y la giratoria dentro de un motor eléctrico (rotor).</p> <p>Datos técnicos:</p> <p>Material: 92% de cobre, 7,5% de estaño, 0,5% de hierro. Dureza Rockwell:10/40, 5/40 Espesor: 0.125"- 1.250" Ancho:0.125-0.500" Largo :0.375-1" Diámetro: 0.125 RPM: 16,000-20,000 Potencia eléctrica 25Kw Temperatura de trabajo: 70-120°C [48]</p>	 <p>Figura 5.3. Escobilla de cobre [49]</p>

Piezas de cobre fabricadas por MP	Imágenes ilustrativas
<p>Bucha de cobre de ventildor</p> <p>Es una pieza que se encuentra presente en las áreas eléctrica y electrónica, en la parte interna de las máquinas textiles, eléctricas, de ingeniería química, automóviles, etc.</p> <p>Datos técnicos del producto:</p> <p>Geometría: esférica ahuecada Resistencia al desgaste y a la fatiga Densidad: 6.4-6.8 g/cm³ Dureza (HB): 25 Resistencia a la tracción (N / mm²): 10-20785 Temperatura limitada -20 - 120°C Carga máxima (N / mm²): 118 Velocidad máxima (m/s): 7 Carga dinámica (N/mm²): 18 Carga estática (N/mm²): 200 Resistencia a la corrosión Buena capacidad para absorber y eliminar partículas contaminantes. [50]</p>	 <p>Figura 5.4 Bucha de cobre de ventildor. [51]</p>

Piezas de cobre fabricadas por MP	Imágenes ilustrativas
<p>Filtro refrigerador de cobre</p> <p>Es un accesorio de limpieza que ayuda a que los refrigeradores o cuartos fríos no tengan humedad o impureza. Se instala como componente en neveras, congeladores y otros equipos de refrigeración domésticos y comerciales.</p> <p>Datos técnicos del producto:</p> <p>Resistencia al desgaste y a la fatiga Diámetro: 1.6 cm Largo: 19 cm Densidad: 6.4-6.8 g/cm³ Dureza (HB) 25 Resistencia a la tracción (N / mm²) : 10-20785 Temperatura limitada: -20 - 120°C Carga máxima (N / mm²) 118 Velocidad máxima (m/s) 7 Carga dinámica (N/mm²) 18 Carga estática (N/mm²) 200 Resistencia al desgaste y al rayado Resistencia a la corrosión Buena capacidad para absorber y eliminar partículas contaminantes</p> <p>[52]</p>	 <p>Figura 5.5 Filtro refrigerador de cobre [53]</p>

Piezas de cobre fabricadas por MP	Imágenes ilustrativas
<p>Zapata de freno de cobre</p> <p>Las pastillas de freno cumplen con sus estrictos requisitos de frenado en el curso de la conducción en la pista, carretera forestal, acrobacias, etc..</p> <p>Datos técnicos: Dimensiones: 75*55*8,7 mm Carga estática: máx. 70 N/mm² Carga dinámica: máx. 20 N/mm² Coeficiente de fricción en seco: 0.05 – 0.6 Velocidad de deslizamiento: máx. 6 m/s Rango de temperatura: 500°C Dureza mín. de 25 HB Fuerza de cizalla: 9 Mpa Resistencia al desgaste y al rayado Resistencia a la corrosión. Buena capacidad para absorber y eliminar partículas contaminantes. [54]</p>	 <p>Figura 5.6 Zapata de freno de cobre [55]</p>

Piezas de cobre fabricadas por MP	Imágenes ilustrativas
<p>Guía de válvula de bronce</p> <p>Este componente es responsable de servir de alineación para el movimiento axial de las válvulas, que controlan la entrada y la salida de combustibles en la cámara de combustión.</p> <p>Datos técnicos: Composición química: 83% Cu Geometría: cilíndrica Carga estática: 13 N/mm² Coeficiente de expansión térmica: 68 - 572 °F Velocidad de deslizamiento: m/s Punto de fusión: 1060 °C Dureza: 10 HB Módulo de elasticidad a la tensión: 17,500 ksi Buenas propiedades de deslizamiento y de conductividad térmica. [56]</p>	 <p>Figura 5.7 Guía de válvula de bronce [57]</p>

Piezas de cobre fabricadas por MP	Imágenes ilustrativas
<p>Bujes de bronce</p> <p>Son principalmente una parte cilíndrica hueca similar a los tubos delgados, que actúan como un soporte del eje. Los bujes de bronce se utilizan para reducir la fricción entre dos superficies deslizándose entre sí. Requieren lubricación externa, por ejemplo, grasa o aceite, durante su instalación y funcionamiento para reducir la fricción y el desgaste.</p> <p>Los diseños más populares incluyen bujes de aleación de bronce con grafito sin aceite, bujes de bronce con bridas y bujes de bronce sinterizado.</p> <p>Datos técnicos: Composición química: 86-89% Geometría: cilíndrica Resistencia a la tracción: 2019MPa Resistencia a la tensión: 1760 kg/cm² Dureza: 50-85 HB</p> <p>Son resistentes a los golpes e impactos, al desgaste y a la corrosión.</p> <p>[58]</p>	 <p>Figura 5.8 Bujes de bronce para moldes [59]</p>

Piezas de cobre fabricadas por MP	Imágenes ilustrativas
<p>Silenciador neumático</p> <p>Es el accesorio diseñado para reducir los niveles de ruido, que se generan en los circuitos neumáticos durante su funcionamiento, lo que permite mantener el ruido del escape por debajo de 90 decibeles.</p> <p>Resistencia al desgaste y al rayado. Resistencia a la corrosión. Buena capacidad para absorber y eliminar partículas contaminantes.</p> <p>Datos técnicos:</p> <p>Geometría: cilíndrica Fluido admitido: aire, vacío. Material del cuerpo: bronce sinterizado Presión de trabajo: 0 - 150Psi Máxima presión 250Psi Temperatura de trabajo -10 - 80 °C Nivel de ruido a 6 bar: 85db [60]</p>	 <p>Figura 5.9 Silenciador neumático [61]</p>

Piezas de cobre fabricadas por MP	Imágenes ilustrativas
<p>Manga de cobre</p> <p>Los cojinetes porosos sinterizados comprenden una matriz anular metálica que comúnmente tiene un espesor que puede variar entre 0.5 y varios milímetros.</p> <p>Datos técnicos:</p> <p>Geometría: cilíndrica Composición química: 81-85% Cu Límite de fluencia: 138 temperatura: de -20 - 100 °C Resistencia a la rotura: 150MPa Resistencia a la fluencia: 72MPa Dureza mín: 10-65 HB[60] [62] Resistencia al desgaste y al rayado Resistencia a la corrosión Buena capacidad para absorber y eliminar partículas contaminantes</p>	 <p>Figura 5.10 Manga de cobre [63]</p>

Capítulo

6

Conclusiones

6. Conclusiones

- ❖ Los principales procesos de producción de polvo de cobre en México son: la electrólisis, la molienda y la atomización (parte norte del país), dando como producto un material particulado, con formas dendríticas, regulares e irregulares y esféricas.
- ❖ Entre las técnicas de caracterización de polvos metálicos más empleadas en la industria pulvimetalúrgica mexicana se encuentran: la microscopía electrónica de barrido (MEB), la difracción laser y la dispersión de luz (equipos como Mastersizer y el Zetasizer, para determinar forma, tamaño y distribución), el tamizado (para distribución), la fluorescencia de rayos X (XRF, para análisis químico elemental) y el aparato de Hall (para la densidad aparente y la velocidad de derrame).
- ❖ La compactación en frío (de matrices o dados) y en caliente, específicamente el método de compactación isostática, son los métodos de mayor uso.
- ❖ Para el sinterizado de piezas de cobre y sus aleaciones, por las temperaturas que se emplean (en el rango de 760-980 °C), los tiempos (de minutos a horas) y la afinidad del cobre con el oxígeno, se usan atmósferas controladas, regularmente de CO, Argón, Hidrógeno y mezcla de ellos.
- ❖ La Metalurgia de Polvos es un método de producción de piezas que ha ido evolucionando y reemplazando métodos tradicionales, capaz de cubrir la actual y creciente demanda de nuevos materiales con microestructuras y propiedades requeridas para su uso.
- ❖ En comparación con la fundición (método más antiguo y más empleado en México), el proceso alterno pulvimetalúrgico de manufactura ha logrado un ahorro energético en la producción, de hasta un 40%.

Capítulo

7

Trabajos posteriores

7. Trabajos posteriores

De lo anterior, se puede observar que la pulvimetalurgia está creciendo día a día. El uso de polvos metálicos continúa exponiéndose y el rubro está creciendo exponencialmente a diferencia de cualquier otro método para trabajar metales. Además, la demanda de personal calificado se ha acrecentado dada la diversidad y dificultad de las aplicaciones que están siendo desarrolladas por la PM.

Con el transcurso del tiempo, aparecerán muchas más aplicaciones para esta tecnología. La mayoría de los usos actuales se basan en la economía de los procesos. El futuro promete más desafíos con la combinación de ahorrar costo y ciertos factores como la confiabilidad, calidad, dureza, control de dimensión y la capacidad de formar piezas exclusivas. La aparición abierta de estas ventajas proveerá oportunidades de crecimiento económico y tecnológico.

Para lograr lo antes mencionado, se sugiere realizar investigaciones del uso de polvos metálicos, que ofrezcan aplicaciones aún más diversas para las industrias aeronáutica, aeroespacial, automotriz, etc., con estructuras de alta pureza involucrando micro-estructura a escalas muy pequeñas.

Para otros sectores de crecimiento del mercado pulvimetalúrgico, se propone el estudio más amplio de los métodos, tales como: prototyping rápido, spray forming, compósitos de matriz metálica, espumas de metal, polvos nanométricos, entre otros tópicos, para estar a la vanguardia y desarrollo de los requerimientos de la industria actual.

Es de esperarse que la demanda cada vez mayor de materiales con altas especificaciones, así como de nuevas aleaciones, abran paso a que la pulvimetalurgia se convierta en una de las tecnologías de procesamiento de materiales, de mayor crecimiento en la industria.

Otros de los puntos importantes a considerar es la investigación y experimentación académica, de nuevos elementos metálicos y materiales, así como el desarrollo de tesis, revistas, artículos de investigación, etc, que implementen el uso, aplicación y desarrollo de metales como: estaño, aluminio, níquel y titanio, aleaciones como latones, bronces, aceros y aceros inoxidable o polvos pre-aleados.

Capítulo 8

Fuentes de información

8. Fuentes de información

1. Becerro, S. D. (2009). *“Diferentes aspectos de la metalurgia de los polvos. revista digital para profesores de la enseñanza”*, Andalucía (3).
2. Euskal Herriko (2015), *“Tecnologías de fabricación”*, Bilbao.
3. Solórzano, J., Perea et Al. (2014). *“Reducción del impacto ambiental de un residuo peligroso de la industria del cobre”*. Revista Colombiana de Materiales, (5), 277-282.
4. Manuel López et Al. (2015). *Efectos de las variables de molienda en las propiedades de las aleaciones Cu-NbC obtenidas por pulvimetalurgia* (Master's thesis), Concepción, Chile, N°42, 2006.
5. Ozols, A. (1998). *“Producción y caracterización de polvos metálicos obtenidos por atomización y enfriado rápido”* (Doctoral dissertation, Universidad de Buenos Aires. Facultad de Ciencias Exactas y Naturales).
6. Quelcahuanca, H., & Junior, A. (2015). *“Estudio de las propiedades mecánicas de un compuesto de matriz metálica rico en 80% de cobre, aleado con zinc y estearato de zinc para evaluar la dureza y el desgaste vía la pulvimetalúrgica”*. Arequipa, Perú.
7. Polo, B. P. (2019). *“Materiales de fricción de metal sinterizado base cobre: Influencia de sus constituyentes en el procesamiento y propiedades tribológicas”* (Doctoral dissertation, Universidad de Navarra), España.
8. Pérez, M, Arco, (2019) *“Preparación de superconductores en matriz de cu-tierras raras”*, CDMX, México,
9. Malachevsky, M. T et Al. (2018). *“Fabricación de espumas de cobre por pulvimetalurgia”*. Matéria (Rio de Janeiro), 23.
10. Perea, E. F. T et Al, *“Reducción de impacto ambiental de un residuo peligroso de la industria del cobre”*, Cali, Colombia, 2015.
11. Alejo Molina (2019), *“Edad del cobre”*
12. Mundo antiguo (2019), repasando juntos la historia de nuestra civilización.

13. Salas-Banuet, Guillermo et Al, “*La importancia de llamarse afinidad química. parte I: la semilla*” 2019 Dyna, vol. 79, núm. 173, junio, 2012, pp. 135-144 Universidad Nacional de Colombia Medellín, Colombia.
14. Charles, A. (1980) “*The coming of copper and copper base alloys and iron*”. En Wertime, T. y Muhly, J. (eds.) op. cit. pp. 151- 168.
15. Aitchinson, (2019), “*L. A History of Metals. London*” Macdonald, pp. 40-41. Cobre.
16. Cobre. (2021, enero 24). México Minero. <https://mexicominero.org/tipos-de-minerales/cobre/>
17. George Irving Quimby et Al (1966), “*Early Metallurgy in the New World*”, Scientific American, pág. 6-8,73.
18. CHAN, (196), “*Una visión del México Prehispánico*”, Instituto de Investigaciones Históricas, Universidad Nacional Autónoma de México, México, págs. 26-29.
19. Eduardo González et Al, (2019) “*Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*”.
20. Singer, D. A., Berger, V.I., Moring, B.C. (2005), “*Porphyry copper deposits of the world: database, map, and grade and tonnage models*”. Geological Survey, U.S Open-File Report, pp 1060.
21. Eduardo González-Partida, Antoni Camprubí (2019) “*Boletín de la sociedad de geología mexicana*”.
22. Dianelys Ondarse Álvarez (2021), “*Cobre*”. Universidad Nacional de Quilmes, Argentina, última edición.
23. Cobre (Cu) (2020), “*Propiedades químicas y efectos sobre la salud y el medio ambiente*”, (s. f.).
24. Elida Yazmin Gómez Rodríguez (2017), “*Tipificación por métodos moleculares de microorganismos acidófilos presentes en los terreros de lixiviación de, instituto potosino de investigación científica y tecnológica*”, A.C. Mexicana De Cananea, San Luis Potosí, S.L.P.
25. Wimbert, Lars et Al (2017), “*Técnicas industriales diversas; transportes y fundición en la metalurgia de polvos metálicos*”, Alemania.

26. ASM metals handbook/American Society for Metals (1990), American Society for Metals. V.7. Powder Metallurgy. 10th ed.
27. Juan Pablo Acero García (2013), “*Caracterización de los polvos metálicos*”, Universidad de los Andes, Bogotá, Colombia.
28. F.R. Morral et al (2004) “*Metalurgia general*”, Vol 2, Edit Reverte, España, Pp980-988.
29. <https://fisquiweb.es/Apuntes/Apuntes2Qui/Electroquimica3.pdf>
30. Klein, Aloisio (1994), “*Notas de Aula Metalurgia do Pó*”
31. Serop Kalpakjian, Steve R Schmid (2019), “*Manufacturing Engineering and Technology*”, 5th ed, Pearson Education. México Pp 443,444,445
32. Francisco José Quiroga Fernández (2018), “*Anuario estadístico de la minería mexicana*” (2018), edición 2019, CDMX, México.
33. P. Ramakrishnan (1983),” *History of powder metallurgy*”, Indian Journal of History of science, 18(1): pp 109-114
34. Exner, H.E(1984) “*Steorological Characterization of shape*”, Metal Handbook, 9na ed, V7. Power Metallurgyc, ASM pp 237,24
35. ASM metals handbook/American Society Metal Power Industries Federation (1998), “*Standard Test Methods for Metal Power & Power Metallurgyc Products.*” 10th edición, Vol 9.
36. Klein, Aloísio (1994). “*Notas de Aula Metalurgia do Pó*”.
37. <http://scielo.sld.cu/pdf/caz/v44n3/caz09317.pdf>
38. Metals Handbook (2014).” *Producción de components sinterizados*”, 12va ed, pp 84-89.
39. Powder Metallurg (1984) 9th edición, Vol 7, American Society for Metals, Metals Park, Metals Handbook.
40. Pedro F. Rojas U. Pedro F. Rojas U, (2011)” *Elaboración de una práctica de metalurgia de polvos en el departamento de materiales y procesos de fabricación*”, Universidad de Carabobo, Facultad de Ingeniería, Naguanagua
41. Chiaverini, V (2001)., Metalurgia do pó. 4ed. ed. São Paulo, pp. 30-65.

42. Ferrante, M. (1996), "Seleção de Materiais". 1. ed. São Carlos: EDUFSCar, Cap. V, pp. 201-204
43. NicVelloff, et Al. (2006), "Better performance for self-lubricating bronze bearings"; Metal Powder Report Volume 61, Issue 8, Pages 31-41.
44. <https://www.norelem.mx/mx/es/Productos/Vista-general-de-productos/Sistemas-y-componentes-para-la-construccion-de-plantas-y-maquinas/Acoplamientos-Acoplamientos-rigidos-Anillos-de-sujecion-cnicos-Articulaciones-del-arbol-Acoplamientos-de-conexion-instantanea-Rodamientos-Juntas/Cojinete-de-deslizamiento/Cojinetes-de-deslizamiento-de-bronce-sinterizado-con-collar.html>
45. Surapol Raadnui, et AL (2008), "Tribological behaviour of sintered 316L stainless steel impregnated with MoS₂ plain bearing". Wear Volume 265, Issues 3-4, Pages 546-553.
46. HAKAMADA, M, et Al (2007), "Density dependence of the compressive properties of porous copper over a wide density range", Acta Materialia, v. 55, pp. 2291-2299.
47. *TCB500F fábrica de rodamientos de lubricación sólidos aleación de cobre de latón con grafito sinterizado para mejorar el lubricante de la máquina de fundición casquillo.* (s. f.). [Vídeo]. Made-in-China.com. (2023)
48. Barta, C. (2023). Escobillas para motores eléctricos. *CarboSystem*.
49. *Bucha de cobre de ventilador buje.* (s. f.). [Vídeo]. Made-in-China.com. (2023)
50. *Soldadura de tres vías Filtro de cobre de pelo con válvula de acceso.* (s. f.). Made-in-China.com. (2023)
51. *Filtro Molecular de Cobre 10 gr con chicote.* (s. f.). Tecneclima. (2023)
52. *Pastillas de zapata de frenos delanteros y traseros para motocicleta, Sintering de disco de frenado con Base de cobre, F03 R03, pieza de motocicleta, para KAYO T4 T6 K6 X2 K16 K18|Discos de freno| - AliExpress.* (s. f.). aliexpress.com, (2023)
53. *Zapatas de Freno.* (s. f.-b), (2023)
54. *Zapata de freno frontal de Base de cobre sinterizado para motocicleta para BMW F 800 R/DUCATI 1200 S|Zapatas y pastillas de freno de coche| - AliExpress.* (s. f.). aliexpress.com, (2023)
55. Aberaldo Pongolini S.R.L. (2023, 18 febrero). *De bronce - Aberaldo Pongolini S.R.L. Aberaldo Pongolini S.R.L - Guías y asientos de válvulas 300 INDY*

56. PRIVARSA. (2023, 19 febrero). *Buje Recto – Chapeado en Bronce - PRIVARSA.*
57. *Rodamiento de cobre con lubricante sólido #50HP.* (s. f.). (2023)
58. *Silenciador Neumatico De Bronce, Filtro Saliente, Rosca 3/4 Pulg Npt.* (s. f.). MAZ EN LINEA. (2023)
59. ADAJUSA. (s. f.). *Silenciador neumático 3/8 SBP bronce | ADAJUSA | precio.* (2023)
60. RIVARSA. (2023 febrero 19). *Buje Recto – Chapeado en Bronce - PRIVARSA.*
61. *De tamaño personalizado de fundición centrífuga C93200 (SAE 660RG7) La Manga el casquillo de bronce de Rodamiento deslizante.* (s. f.). [Vídeo]. Made-in-China.com. (2023)