



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE QUÍMICA

**TRABAJO MONOGRAFICO DE
ACTUALIZACIÓN**

**“FABRICACION DE POLVOS
METALICOS DE ALUMINIO POR
PROCESOS DE FUNDICION”**

**QUE PARA OBTENER EL TITULO DE:
INGENIERO QUIMICO METALURGICO**

**PRESENTA:
SERGIO GUADARRAMA GARCÍA**



MÉXICO, D.F.

2004



**EXAMENES PROFESIONALES
FACULTAD DE QUÍMICA**



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



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: Profr.: **ATLATENCO TLAPANCO EUSEBIO CANDIDO.**

Vocal: Profr.: **HUERTA CERDAN ANTONIO.**

Secretario: Profr.: **GONZÁLES RIVERA CARLOS.**

1er Suplente: Profr.: **ARAMBURO PÉREZ GERARDO.**

2º Suplente Profr.: **AMARO VILLEDA ADRIAN MANUEL.**

Sitio donde se desarrollo el tema:

FACULTAD DE QUÍMICA EN EL DEPARTAMENTO DE METALÚRGIA.

Asesor:

Profr.: **ATLATENCO TLAPANCO EUSEBIO CANDIDO.**



Sustentante:

Sergio Guadarrama García.



AGRADECIMIENTOS:

Doy Gracias a Dios:

Por esta vida que me ha dejado vivir.

Gracias a mi Papá:

Por su amor, su cariño y su apoyo que siempre me brindo desde mi gestación y a través de toda mi vida educativa y social siguiendo su ejemplo y consejos de amigo, Cumpliendo un deseo común.

Gracias a mi Mamá:

Por su amor, su entrega, su apoyo incondicional que siempre me ha brindado desde mi gestación, edad maternal y que han continuado toda mi vida. Por todos sus cuidados y desvelos.

Gracias a mi esposa Ana Ma y a mis hijos: Abraham, Ana Sofía y Oscar Yahú:

Por el amor que hemos compartido, su apoyo constante, por los momentos felices y las dificultades que hemos convivido y por la comprensión que siempre me han brindado.

Gracias a mis Hermanos: Guillermo, Ma Luisa y Arturo:

Por el lazo de hermandad que siempre hemos compartido y que nos han inculcado nuestros padres, por los ratos felices e inolvidables que vivimos juntos y por su apoyo en los momentos difíciles.

**Gracias a todos mis maestros y todas las personas que han colaborado
Para que yo pueda alcanzar esta meta de mi vida.**

INDICE

Descripción:

Índice.	1
Introducción.	2
Antecedentes.	4
Fundamentos Teóricos.	
Forma.	5
Tamaño.	9
Propiedades de las partículas.	13
Métodos de Fabricación de Polvos Metálicos.	
Procesos Químicos.	14
Procesos Mecánicos.	16
Mecanismos de la formación de gotas de metal.	
Atomización con gas.	37
Atomización con agua.	39
Consideraciones Teóricas:	
Dinámica del fluido.	
Atomización con gas.	40
Atomización con agua.	42
Resultados Típicos, Aparatos y procedimientos.	45
Resultados experimentales.	
Atomización con agua.	51
Atomización con gas.	56
Conclusiones.	60
Bibliografía.	61

INTRODUCCION

La metalurgia de polvos es un procedimiento de conformado, como la forja, el troquelado en frío, moldeo de fundición, etc. Su competidor más directo, a nivel mundial, es el moldeo de precisión o moldeo de cera perdida. La metalurgia de polvos se ha desarrollado recientemente debido a factores técnicos (moldeo y forja de metales duros, fabricación de piezas de formas complicadas y ajustar a tolerancias más precisas, la obtención de nuevos materiales metálicos, la combinación de metales de difícil aleación por los métodos convencionales, refina las micro estructuras y favorece las propiedades mecánicas y de resistencia a la corrosión) y respecto a los factores económicos minimiza el maquinado y así mismo reduce los costo de fabricación por que se eliminan etapas de producción, pérdidas de materia prima, mecanizado de los productos y reprocesado de desechos.

La metalurgia de polvos abarca las etapas comprendidas desde la obtención del polvo metálico hasta el terminado de las piezas, es decir, inicia con la generación del polvo y siguiendo por los procesos de la mezcla, la aglomeración, la compactación, el sinterizado y termina en el proceso de acabado.

El objetivo de este trabajo monográfico es el de con juntar la información con que se cuenta en varios textos y otros medios en los que se puede encontrar información actual y que están accesibles a todo el publico sin contar con las reservas de tecnología propia de cada empresa que esta dedicada a la fabricación de polvos metálicos y a demás por que es el primer paso (la obtención del polvo metálico) en la metalurgia de polvos.

Las principales líneas de trabajo de la metalurgia de polvos son las siguientes:

- 1.- En primer lugar es la obtención de los polvos metálicos, que se pueden obtener a partir de dos procesos principalmente son: el químico y el mecánico, dentro de los procesos mecánicos esta la obtención de los polvos a partir del metal fundido con auxilio de una atomización con un fluido a presión; que es el motivo de este trabajo.
- 2.- Fabricación de piezas de aleaciones de base aluminio, hierro, cobre, níquel, etc., que por factores técnicos y económicos aconsejan este método por la supresión del mecanizado posterior de las piezas y el aprovechamiento del metal.

- 3.- Obtención de nuevos productos como los cojinetes auto lubricados, filtros resistentes a los impactos y a las variaciones bruscas de la temperatura, partes metálicas en la que se requiere cierta porosidad controlada, la posibilidad de impregnación de aceite, aleaciones con elementos no metálicos.
- 4.- La producción de carburos duros y cementados, carburos de tungsteno, molibdeno, tantalio en una matriz de cobalto o níquel para herramientas de corte y resistentes al desgaste y para materiales que deben soportar condiciones de trabajo extremas.
- 5.- Fabricación de contactos eléctricos, contruidos por una matriz conductora de la electricidad y del calor, en las que se encuentran incrustadas partículas resistentes al desgaste.
- 6.- También se pueden fabricar imanes de polvos compactados y de naturaleza cerámica, como las llamadas ferritas.
- 7.- En algunos procesos de alta tecnología se utilizan aleaciones de aluminio como lo son las estructuras de las aeronaves y en naves espaciales.

ANTECEDENTES

Es muy apropiado en este momento preguntarnos ¿Qué significa para nosotros polvo?, Aunque en un principio la respuesta pueda ser obvia ‘Seguro, todos saben lo que es un polvo’; pero la respuesta no es tan simple; se pudiera aseverar que una partícula de 5 mm de diámetro es un polvo, seguramente no, entonces, ¿Donde marcaríamos la línea de división para este material?, Una definición arbitraria lo especifica como: Polvo es una partícula con una dimensión máxima de 1 mm (ISO 3252).

Polvo metálico se puede definir como un sólido dividido en partículas muy pequeñas y finas que provienen de un metal ó de una aleación metálica. Estas partículas pueden ser el resultado de un proceso que su fin sea el de obtener este polvo metálico o también como un producto no deseado de un proceso de corte o de desbaste. Las peculiaridades de los distintos tipos de polvos procedentes de un mismo metal pueden ser muy diferentes. Para evaluar las características del polvo se requieren técnicas especiales tales como: definir la forma de la partícula, las dimensiones de las mismas y sus condiciones de procesado para obtener un producto.

Las aleaciones de aluminio tienen un avance técnico muy adelantado que les permite tener un lugar predominante. El aluminio y sus aleaciones tiene baja densidad en comparación de cualquier otra aleación metálica; también tienen buena resistencia inherente a la corrosión por que se forma rápidamente una película continua de óxido cuando entran en contacto con el aire y además su maquinabilidad es fácil y ligeras de manejo.

FUNDAMENTOS TEÓRICOS

La geometría de los polvos, considerando a cada partícula por separado, se pueden definir por tres atributos típicos:

1. - Forma.
2. - Tamaño, distribución de tamaños y promedio de tamaños.
3. - Propiedades de las partículas.

Descripciones:

1. - Forma de las partículas:

La forma de los polvos metálicos esta grandemente influenciada por el método de fabricación usado para producir estas partículas. Las partículas de polvo pueden exhibir una amplia variedad de formas dependiendo del proceso de fabricación. En la Fig. 1 se puede apreciar esquemáticamente las formas de las partículas y en la Figuras 2 y 3 se pueden observar las partículas en fotografías tomadas por medio de un microscopio electrónico de barrido. Podemos observar en las dos figuras una amplia variedad de formas y tamaños en que pueden ser producidos los polvos; por diferentes procesos y también modificando los parámetros del proceso.

El proceso que vamos a tratar en este texto es el proceso de “Atomización de un Metal Líquido” y las partículas que resultan de este proceso son generalmente de formas esféricas y/o ligamentales.

Todas las partículas se pueden catalogar en dos tipos: a) Regulares y b) Irregulares. Existen tantas variaciones en una colección de polvos de la forma de las partículas como en sus tamaños que se pueden observar en la figura 1, 2,3. Una forma simple y útil de definir la forma es haciendo una relación de aspecto, entre la dimensión máxima y la dimensión mínima de una partícula dada. Para una partícula esférica ó cúbica esta relación es de 1 a 1; para una partícula en forma de prisma regular esta relación puede ser de 1 a 2 o de 1 a 4. Se requieren técnicas microscópicas para determinar las dimensiones de forma de la partícula.

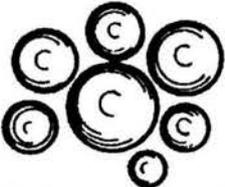
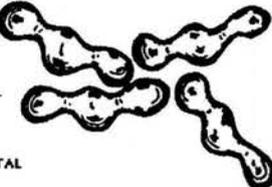
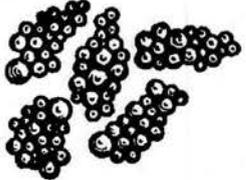
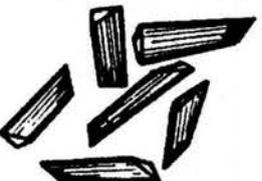
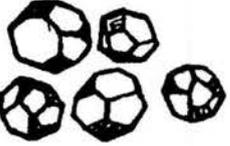
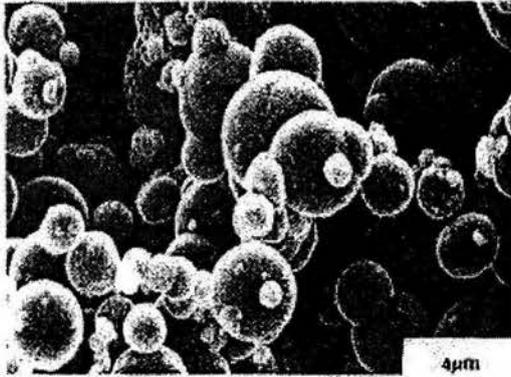
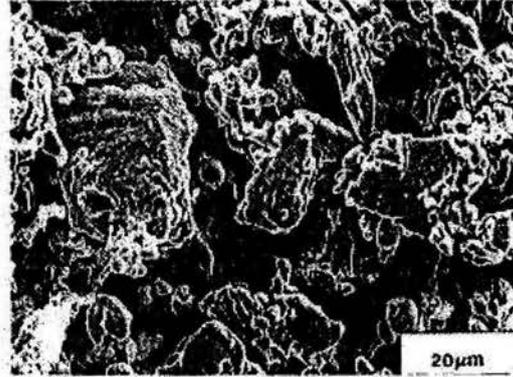
 <p>ESFÉRICA</p>	 <p>LAGRIMA O GOTA</p>
 <p>CILÍNDRICA</p>	 <p>LIGAMENTAL</p>
 <p>IRREGULAR</p>	 <p>ESPONJOSO</p>
 <p>DENDRÍTICA</p>	 <p>AGREGADO</p>
 <p>CÚBICA</p>	 <p>ACICULAR</p>
 <p>ESCAMA</p>	 <p>POLIGONAL</p>
 <p>PUNTIAGUDOS</p>	 <p>ANGULAR</p>

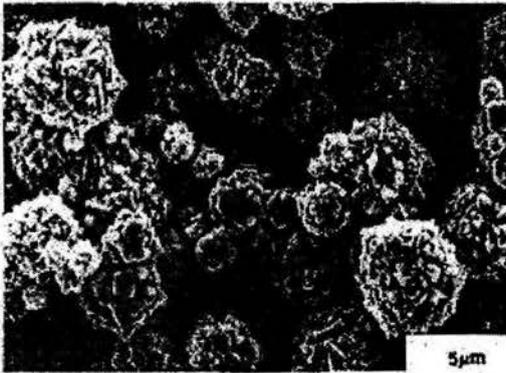
Fig. 1: Esquema de algunas formas posibles de polvos y su nombre descriptivo.



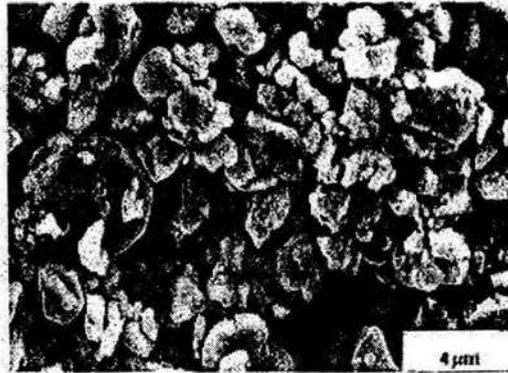
a) polvo esférico



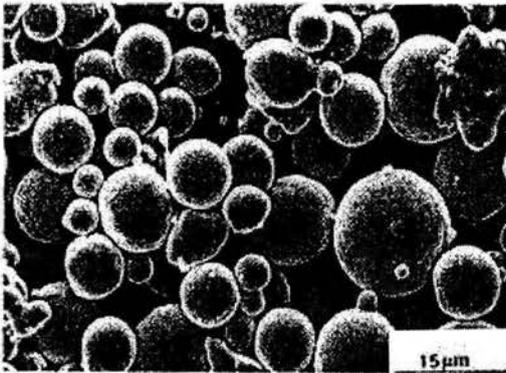
b) polvo esponjoso



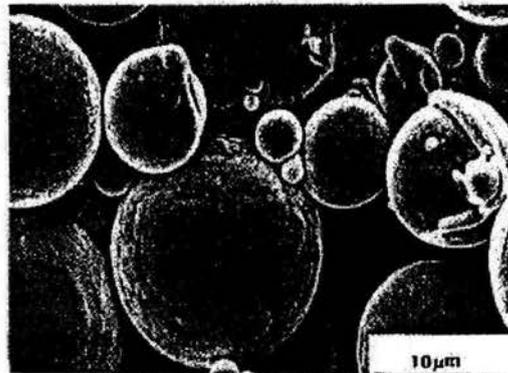
c) polvo puntiagudo



d) polvo angular

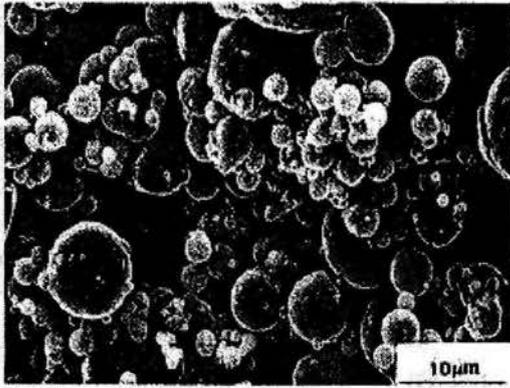


e) polvo esférico

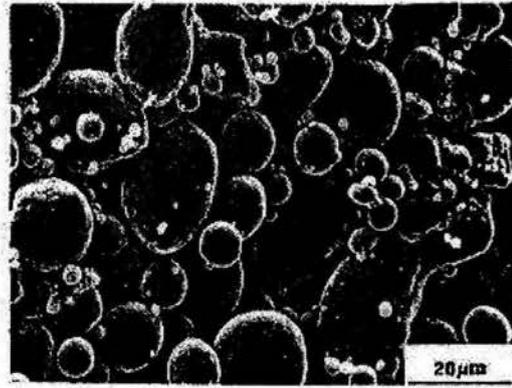


f) polvo esférico

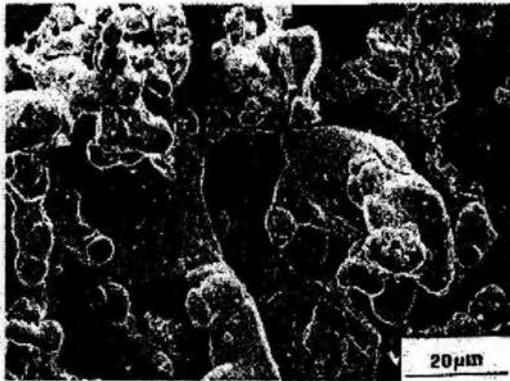
En la figura 2 se ven imágenes obtenidas por medio de un microscopio electrónico de barrido mostrando ejemplos de diferentes formas y tamaños de partículas.



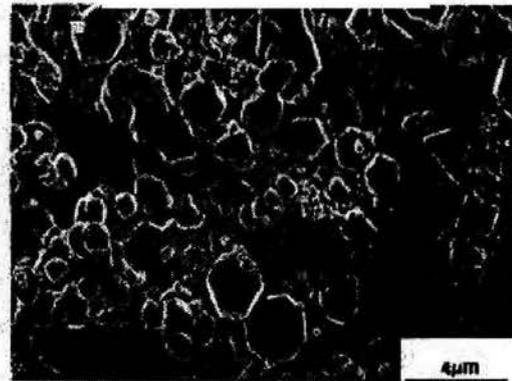
g) polvo esférico



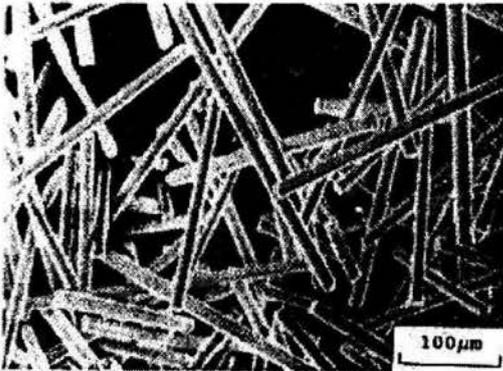
h) polvo esférico



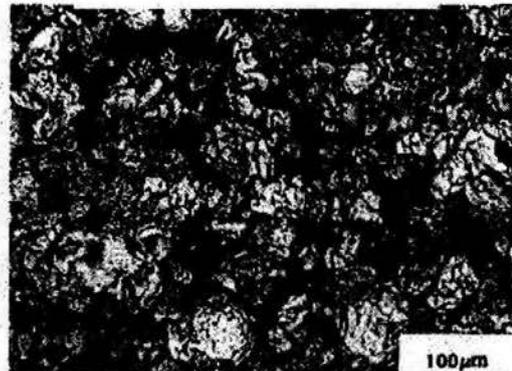
i) polvo angular



j) polvo poligonal



k) fibras cilíndricas



l) polvo irregular

En la figura 3 se ven imágenes obtenidas por medio de un microscopio electrónico de barrido mostrando ejemplos de diferentes formas y tamaños de partículas.

La forma de la partícula y otras características tales como el tamaño, la distribución de los tamaños de las partículas, la composición química del polvo y las condiciones de la superficie juegan un papel crucial en la determinación del proceso de conformado en que serán utilizados y así mismo este papel crucial se extienden a las propiedades finales del producto.

2. - Tamaño de la partícula, distribución de los tamaños y promedio de los tamaños.

a) Tamaño de la partícula.

El dato del tamaño de partícula es esencial para quien quiera tratar con polvos. Expresar el tamaño de una partícula sola no es simple, cuando la partícula no es esférica. El tamaño individual de partícula es usualmente clasificado en términos de las características geométricas de su silueta y un hipotético equivalente de esfera. Este aspecto se refiere a la dimensión de la partícula individual. Las partículas comúnmente usadas en la metalurgia de polvos son relativamente pequeñas en el intervalo de tamaños de 10 μ m a 150 μ m.

Las partículas se clasifican sobre la base de dos dimensiones (la dimensión menor y la dimensión mayor de la misma partícula). Si ésta es esférica su dimensión es el diámetro; si ésta es prisma o de algún otra forma se refieren a sus dimensiones. Se disponen de varios métodos para obtener el tamaño de la partícula, el método más común es el de usar cribas de diferentes tamaños de malla. Se usaba el número de malla para referirse al número de aberturas por pulgada lineal de la criba. Una malla de número 200 significa que tiene doscientas aberturas por pulgada lineal. Como la malla es cuadrada, la cantidad es la misma en las direcciones del eje X y del eje Y, entonces el número total de aberturas por pulgada cuadrada es de 200 por 200 e igual a 40 000 aberturas; en consecuencia, un número alto de malla indica un tamaño menor de partícula.

Las partículas se separan haciéndolas pasar a través de una serie de cribas en número progresivo; el polvo se coloca en la primera criba y haciendo vibrar el conjunto de cribas las partículas van pasando de una criba a otra criba siempre y cuando las partículas pasen por las aberturas de la criba. Este procedimiento para seleccionar los polvos por su tamaño se llama "*Tamizado o cribado*".

Las aberturas en la criba son menores que el recíproco del número de la malla debido al espesor del alambre usado para hacer la criba. Suponiendo que la dimensión límite de la partícula es igual a la abertura tenemos:

$$t_p = \frac{1}{N_m} - D_a \quad (1)$$

t_p = tamaño de partícula.
 N_m = Número de la malla.
 D_a = Diámetro del alambre.

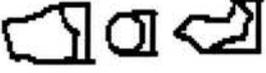
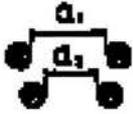
Las variaciones que ocurren en la selección de tamaños de partículas mediante el cribado se deben a las diferencias en la forma de las partículas, al intervalo de números de cribas usado y a las variaciones de tamaños de aberturas dentro de la criba. Además el método de cribado tiene un límite práctico y es de - 400 mallas (indica que las partículas pasaron por la malla 400). Las dificultades principales son: la de hacer mallas finas y uniformes, además de la aglomeración de polvos finos.

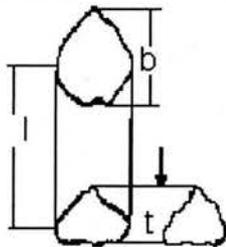
Otros métodos para medir el tamaño de la partícula son por microscopía.

En la tabla I se listan una gran variedad de medidas físicas de unos diámetros característicos definidos.

Cuando la partícula está circunscrita por un prisma rectangular con longitud l , profundidad b y altura t este tamaño está expresado por el diámetro circunscrito, obtenido de las tres dimensiones. Estos pueden ser medidos por un microscopio y usados para obtener varios promedios de diámetros. Diámetro Feret, diámetro Martín y diámetro Sieve son diámetros geométricos obtenidos de la silueta de la partícula. El diámetro equivalente es el diámetro de las esferas teniendo la misma geometría de esas partículas no esféricas.

Tabla I: Expresiones del tamaño de partícula.

Definición del Diámetro característico	Forma	Significado físico y método Correspondiente de medida.
Diámetro Feret		Es un diámetro unidireccional que toma como base la parte más ancha de las partículas al azar, no significa para una sola partícula.
Diámetro Martín		Es un diámetro unidireccional que toma como base la longitud de la dimensión más larga de las partículas.
Diámetro Sieve		Este diámetro toma como base las aberturas de las dos mallas entre las que quedo atrapada la partícula. $(a_1 + a_2)/2$, o $(a_1 a_2)^{1/2}$.



b = grueso
l = longitud
t = espesor

Diámetro	Area	Descripción:
Diámetro equivalente	Proyección Heywood D.	Diámetro del círculo que tiene la misma dimensión que la proyectada por la partícula, correspondiente al diámetro obtenido por la medida de la parte angosta.
Diámetro equivalente a la superficie		Diámetro de la esfera que tiene la misma superficie que la partícula, correspondiente al diámetro obtenido por la medida de la parte angosta.
Diámetro equivalente del volumen		Diámetro de la esfera que tiene el mismo volumen que el de la partícula.

En los reportes de Mondolfo – Zneskal ⁽³⁾ se ha mostrado la gran influencia en el tamaño de la partícula de polvo por la configuración de la boquilla, cuando se fabrican polvos a través de la atomización de un metal líquido,. Unos autores ⁽⁶⁾ han reportado que una configuración de boquilla de flujo en V produce polvos finos tanto como la boquilla usada en configuración de cono en un proceso de una atomizado similar. Una vista esquemática de la configuración de la boquilla se muestra en la siguiente Fig. 4.

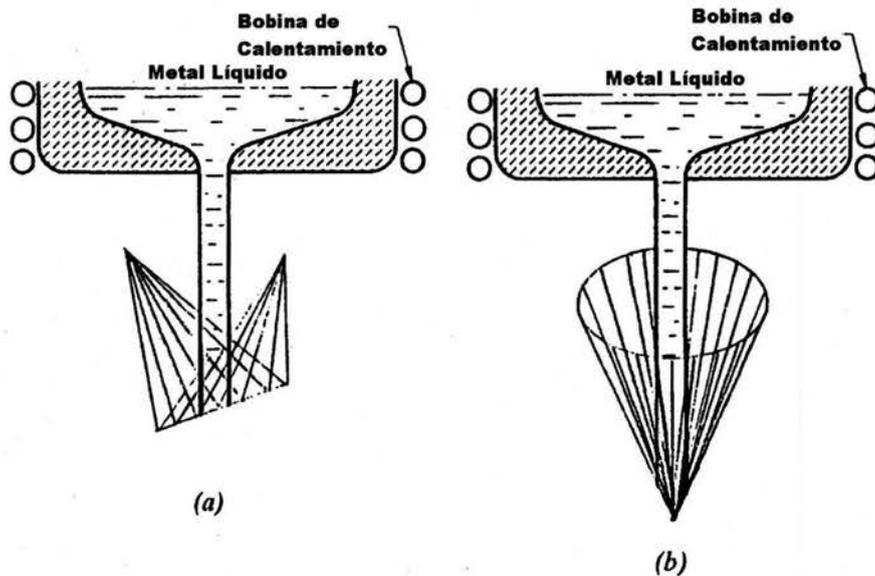


Fig. 4 Esquema de las configuraciones de boquilla de atomización con agua: (a) boquilla de flujo en V y (b) boquilla cónica, usadas comúnmente.

b) Distribución de los tamaños de partículas.

Graficando la distribución de tamaños de partícula contra la fracción acumulada de peso puede resultar una relación logarítmica.

c) Promedio del tamaño de partícula.

En cientos de partículas tenemos una forma similar y una medida sobre la base de uno de los diámetros característicos fueron definidos en la tabla I. Varios ordenamientos del diámetro promedio de partícula pueden ser calculados.

3. - Propiedades de las partículas.

En este aspecto es importante conocer las propiedades del mismo material, dentro de los que se deben de determinar son: a) la densidad, b) la composición química y c) el tamaño de grano metalúrgico de las partículas.

Las propiedades fundamentales (forma, composición, tamaño, distribución de tamaños, porosidad, y micro estructura) definen básicamente el tipo de polvo.

Las propiedades secundarias se derivan de las fundamentales (mencionadas en el párrafo anterior) y su determinación puede ser fácil en el control industrial. Entre las propiedades secundarias cabe citar la densidad distinguiendo entre densidad aparente y densidad del polvo vibrado; la velocidad de derrame, la superficie específica, la compresibilidad, la compactibilidad o consolidación, la plasticidad y la capacidad de endurecimiento por trabajo (acritud). Industrias como la del cemento, los colorantes o la minería se interesan igualmente por esas propiedades.

MÉTODOS DE FABRICACIÓN DE POLVOS METÁLICOS

Prácticamente cualquier metal puede reducirse a forma de polvo. Existen varios procesos para producir comercialmente polvos metálicos, en cada uno de los cuales implica elevado consumo de energía para incrementar el área superficial del metal.

Los procesos básicos para la producción de un polvo metálico se clasifican en:

- 1) Químicos:
- 2) Mecánicos:

Muchas modificaciones se han desarrollado en cada uno de acuerdo a cada necesidad.

Para una correcta selección del proceso de producción de polvos usualmente se hace un análisis entre las consideraciones técnicas y económicas; además teniendo en mente las propiedades finales del producto que se va a fabricar con el polvo.

1. DESCRIPCIÓN DE LOS PROCESOS QUÍMICOS:

- a.- Reducción de compuestos metálicos.
- b.- Disolución de una fase metálica.
- c.- Electrodeposición de sales en soluciones.
- d.- Precipitación de un metal a partir de sus sales.
- e.- Condensación de un vapor de metal.

1.a . – Reducción de compuestos metálicos.

Cuando un compuesto de un metal, generalmente un óxido, es reducido a estado sólido por el uso de un gas reductor, el tamaño de las partículas y la distribución del tamaño de las partículas dependen esencialmente del tamaño original del compuesto. La forma es generalmente dentada e irregular y las partículas son porosas. Los polvos metálicos comúnmente producidos por este método son polvos de: hierro, molibdeno, tungsteno, níquel, cobalto y cobre.

1.b . – Disolución de una fase metálica.

En aleaciones que constan en su estructura de dos fases que tiene un cristal primario y a su alrededor tiene solución del eutéctico en los bordes de grano, estos pueden ser disueltos en una fase de matriz eutéctica.

1.c . – Electrodeposición de sales o soluciones.

Para la electrodeposición de metales en solución, las condiciones pueden ser ajustadas a obtener un polvo quebradizo, esponjoso y con poco adherente para formar un depósito. Una densidad de corriente alta, muy alta, o muy baja acidez, baja agitación y baja concentración del metal son algunas de las condiciones las cuales favorecen la formación de un deposito útil para la metalurgia de polvos. Para algunos metales el depositado ya está en forma de polvo y solo se necesita lavar, secar y tamizar para ser usado. Otros metales, forman un depósito continuo el cual es quebradizo y puede ser pulverizado por molienda. Los polvos producidos por electrodeposición son dendríticos y tienen una gran superficie en comparación con su masa. Algunos de ellos son suaves y esponjados, otros son muy duros y necesitan un tratamiento de recocido para proveerles propiedades específicas de uso. Los polvos metálicos producidos por este método son: hierro, níquel, cobre, cadmio, estaño, zinc, plata, antimonio y plomo.

1.d . – Precipitación de un metal a partir de sus sales.

Es una forma continua de producir polvos por una masa adherente de material la cual tiende a caer al fondo y que puede ser removido constantemente por métodos mecánicos.

1.e . – Condensación de un vapor de un metal.

El metal a ser pulverizado es vaporizado y se hace condensar en pequeñas gotas. La forma de las partículas así condensadas es más o menos esférica; el tamaño y la distribución del tamaño dependen de las condiciones de la condensación. Este método es usado básicamente para metales que tienen un bajo punto de ebullición como él: cinc, plomo, cadmio, etc. En los metales de alto punto de ebullición para su pulverización se

hace a partir de compuestos volátiles los cuales pueden ser fácilmente descompuestos. Un caso típico es el níquel como carbonilo, $(\text{Ni}(\text{CO})_4)$ este hierve a 110 °F y se descompone por un calentamiento posterior que favorece al polvo de níquel.

2. DESCRIPCIÓN DE LOS PROCESOS MECÁNICOS.

a.- Molienda

b.- Esmerilado y Corte.

c.- Procesos a partir de metales fundidos:

1. - Vertiendo el metal sobre agua.

2. - Aerografía del metal.

3. - Atomización con: I.- Centrifugación.

II.- Gas.

III.- Agua.

IV.- Aceite.

2.a. - Molienda.

Para estos procesos existe una gran variedad de métodos que pueden ser usados para producir polvos metálicos por medios mecánicos. Los equipos empleados en la producción de un polvo a partir de la molienda son: molino de bolas, molinos de cono, molinos de rodillos y son aplicados en la reducción de tamaño de partículas para metales quebradizos tales como el bismuto, antimonio, cromo, manganeso, silicio, cobalto o una aleación quebradiza; un ejemplo de la proyección del mineral por un gas a alta presión contra una pared se muestra en la figura (Fig. 5). Por otro lado para los metales dúctiles se requiere de un tratamiento de endurecimiento antes de la molienda, la electrodeposición es una forma de producir una placa frágil y la adición de algunos elementos generan tamaños de grano más grande. La forma de las partículas resultantes es dentada e irregular; el tamaño depende principalmente de la eficiencia de la molienda.

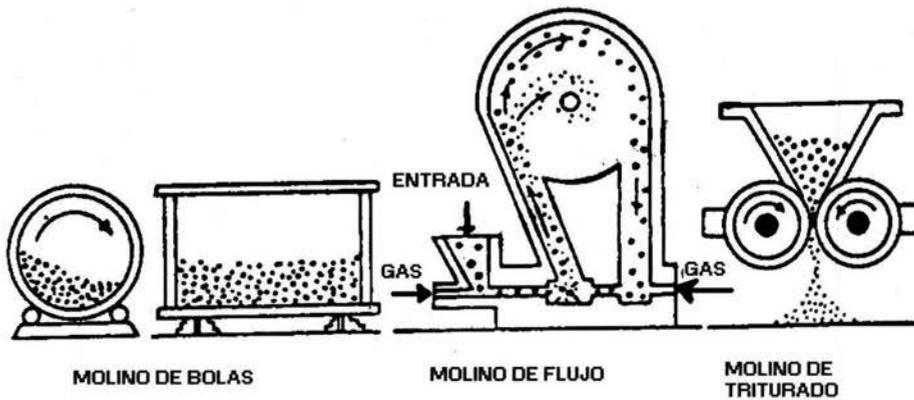


Fig. 5: Representación esquemática de algunos de los procesos de molienda.

Los molinos Hammer son usados para la producción de polvos de materiales dúctiles, el polvo producido por este método, son en forma de hojuelas, por lo tanto, son inapropiados para la metalurgia de polvos.

La molienda utiliza el efecto abrasivo de frotamiento de las partículas sobre ellas mismas. Se usa el molino de flujo para trabajar a alta velocidad y este hace que las partículas sean suspendidas en un haz de aire o de gas inerte. Las partículas producidas por este método son redondeadas o de formas mezcladas. El tamaño y la distribución del tamaño son similares a los otros métodos de molienda.

2.b. - Esmerilado y Corte.

Estos no son precisamente procesos para la fabricación de polvos metálicos; se nombran dado que durante estas operaciones de esmerilado y corte en los metales queda un residuo después de cada operación que es un material fino que puede nombrarse como polvo, pero como no son procesos controlados el resultado no es un producto uniforme.

2.c. – Procesos a partir de metales fundidos.

Para estos procesos es necesario que el metal que se desea pulverizar esté en estado líquido, para que después, por medio de otra operación y al momento en que el metal se vaya a solidificar lograr que este se solidifique ya en forma de un polvo.

A continuación se describen algunos de los procesos de este tipo:

2.c.1. - Vertiendo el metal líquido sobre agua.

Una vez alcanzada la fusión del metal, éste es vaciado sobre agua lograndose la solidificación diferencial que forma del líquido a polvo. Los polvos así preparados no poseen uniformidad en el tamaño de grano, por lo que deben ser clasificados después del proceso por medio de tamices.

2.c.2.- Aerografía del metal.

Este proceso fue diseñado por M. N. Schoop, en el cual se funde un alambre de metal por acción de una llama ó eléctricamente y se vaporiza por medio de una corriente de aire comprimido mediante una pistola de aerografía. La obtención del polvo por la aerografía se realiza en un recipiente de grandes dimensiones en donde el polvo que se va depositando en las paredes ó el piso y después es recolectado (para este fin es muy adecuada una atmósfera inerte) (Fig. 6).

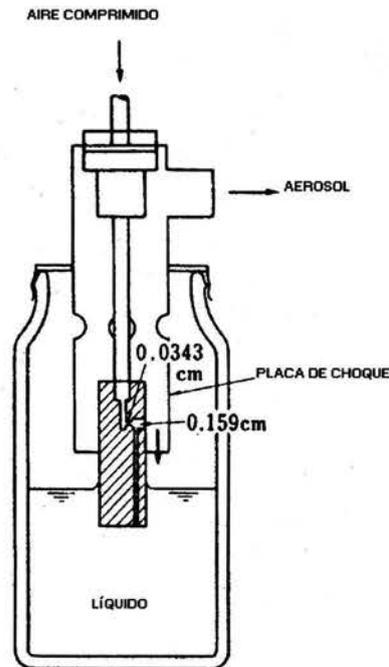


Fig. 6. Nebulizador por choque.

2.c.3. Atomización.

El hombre ha sido testigo en las últimas dos décadas del incremento en el que se ha involucrado la tecnología de las partículas en materiales modernos. La atomización es

líder y vanguardia de la técnica más avanzada y económica para la fabricación de polvos. Los mecanismos comúnmente aplicados para la atomización involucran desde la desintegración de una película o un haz de líquido hasta la producción de una fina lluvia de gotas, por medio de la aplicación de una forma de energía como lo es la inyección de un fluido a muy alta velocidad. La diferencia entre las variadas formas de atomización se debe a las diferentes maneras en que el metal, en forma de líquido es pulverizado. El haz de metal líquido cayendo libremente por la gravedad es roto por un número indefinido de finas gotas del fluido a presión en el punto en que este fluido golpea al haz. La atomización de un haz de metal líquido sigue la transferencia de energía desde un fluido (gas) a otro fluido (metal líquido), el equipo necesario para conducir el metal líquido y el foco del flujo de gas requiere de elaborados y sofisticados cálculos. Numerosas variaciones y refinamientos forman en general un esquema de la formación de polvos que han sido adaptados y acomodados a la práctica necesaria del metal o de sus aleaciones hacia los requerimientos de la industria de la metalurgia de polvos. Algunas combinaciones de dos fluidos han sido usadas recientemente para formar polvos muy finos. Sin embargo, la atomización con gas inerte es referida comúnmente como una simple atomización con gas, esta atomización, esta siendo cada vez más competitiva y su uso se ha incrementado para producir polvos muy finos de alta pureza en grandes cantidades.

Cuando un movimiento rápido de un haz de aire, de gas o de agua golpea un chorro de metal fundido, el metal es dispersado e inmediatamente solidificado en forma de pequeñas gotas. Sin embargo, hay otras formas de atomización en las que se involucra el uso de fuerzas centrífugas, energía de vibración, campos eléctricos o la sobre saturación de un metal fundido con gases que eventualmente desintegra el metal líquido en finas gotas. El tamaño de las partículas es relativamente grande y depende enormemente de la rapidez y tipo del medio de atomización. La forma es irregular y varían desde esféricas hasta gotas alargadas.

Hay otras técnicas de atomización que no están basados en la desintegración por el impacto de un segundo fluido. Esos procesos son cada vez más usados en la producción de polvos (especialmente de metales refractarios o reactivos), para uso de materiales avanzados. Técnicas tales como extracción líquida, electrodo rotatorio

consumible, micro atomización con plasma, saturación y explosión de un líquido y colado con choque centrífugo son algunos de esos procesos.

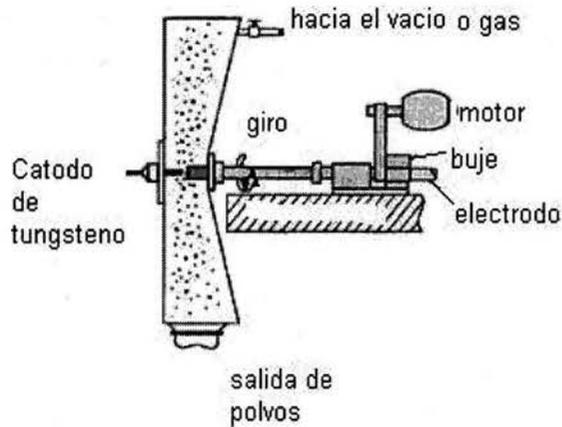


Fig. 7: Esquema del proceso de atomización por el método de electrodo rotatorio.

La primera ventaja del proceso de atomización está dada por su flexibilidad, en términos de producción de la aleación y el tamaño de partícula deseada. El proceso es capaz de producir pequeñas cantidades de polvos de pocos metales para uso experimental, también se puede escalar a producir una gran cantidad de polvos para uso de aplicaciones industriales y comerciales.

El promedio de partículas varía en el intervalo 10 a 250 μ , dependiendo de los parámetros del proceso y del procesamiento. El intervalo de enfriamiento depende generalmente del tamaño de partícula deseado. También el intervalo de enfriamiento puede ser determinado hasta cierto punto, desde el brazo secundario dendrítico en una partícula de polvo individual (el enfriamiento es suficientemente rápido para producir micro estructuras equiaxiales). Del enfriamiento rápido, el que puede ser producido por técnicas especiales, resultan polvos amorfos. Los intervalos de enfriamiento en los procesos de atomización normalmente están dentro del intervalo de 10^2 a 10^4 K/s, con escalas aproximadas de 10^6 K/s en algunos casos especiales.

Contaminación en el polvo:

La contaminación puede ocurrir en dos partes: el crisol en el que se contiene el metal fundido que se va a atomizar (usualmente es un crisol de cerámica). El problema viene a ser de extremo cuidado para altas temperaturas y para materiales de alta calidad. Uno de los caminos para evitar ese problema es producir la fusión dentro de un crisol

delgado “vaso” del mismo metal del que va a ser atomizado. El “vaso” efectivamente se disuelve y aporta metal igual al metal fundido eso reduce grandemente la contaminación. Otra técnica radica en la eliminación el crisol, es decir, no tener crisol sino que todo el material que va a ser atomizado este en forma de un electrodo el cual gradualmente se va derritiendo y atomizando. Otra alternativa es el uso de filtros de cerámica para filtrar partículas grandes de cerámica del metal fundido antes de ser atomizado. Un buen número de procesos actuales de atomización usa alguno de los conceptos anteriormente expuestos para producir polvos limpios. La otra forma es en lo que se refiere a la superficie del polvo que se contamina con óxidos, aceite, agua que se encuentran en los medios de arrastre del polvo; para eliminar estos efectos se usa una atmósfera reductora, una corriente de aire caliente y seco y por último un solvente orgánico respectivamente. Para el aluminio para desgasificar los polvos se usa un proceso de presión elevada y caliente.

El concepto básico en la mejora de un proceso de atomización está en distribuir energía del metal líquido vía por impacto de otro fluido. Las variaciones en el sistema de foco del segundo fluido y el tipo de fluido son usadas para determinar las características finales del polvo.

2.c.3.I. - Atomización con centrifugación.

En este método se pone en contacto el chorro del metal con cuerpos sólidos en movimiento, en parte para su pre trituración. Las piezas móviles, especialmente en rotación (discos de paletas, hélices, elementos batidores, discos redondos con estrías radiales, etc.), son las superficies de choque que producen la trituración del metal, lanzándolo simultáneamente hacia una parte más fría del dispositivo, también pueden lanzar el metal hacia un líquido colector, que puede ser agua ó algún otro líquido adecuado ó también el líquido colector puede ser aplicado directamente en el dispositivo de choque lo que provoca un rápido enfriamiento del metal (Fig. 8).

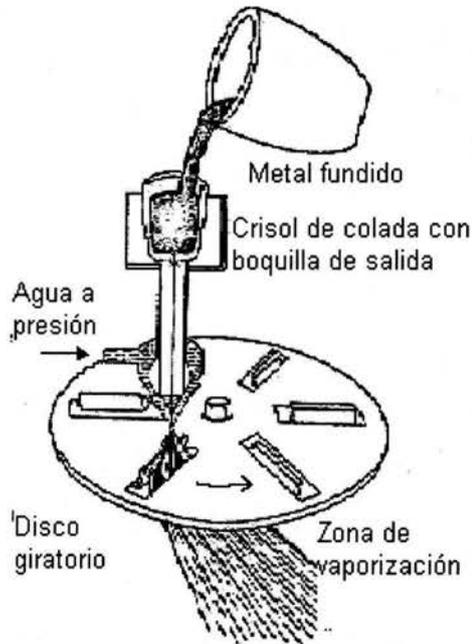


Fig. 8: Método DPG de centrifugación (Diseño inicial de la Deutschen pulvermetallurgischen Gesellschaft m.b.H. Frankfurt a.M.) todo esto dentro de una cámara.

Para atomización existen innumerables variaciones en los detalles de los equipos usados para fabricar polvos, pero básicamente el proceso es como se explica a continuación: un chorro de metal fundido se deja caer verticalmente desde un crisol dentro de una cámara de atomización, donde es desintegrado el chorro por el impacto de un flujo a alta presión.

2.c.3.II. - Atomización con gas.

El proceso más viable para la atomización, que es la formación de pequeñas partículas de metal sólido a partir de un haz de metal fundido, es por el impacto con un flujo a alta velocidad contra el chorro de metal fundido, el principio es similar a los usados en la atomización con agua pero el flujo usado es gas. El flujo del gas puede ser dirigido a través de un número determinado de boquillas o a través de un anillo tubular con aberturas como se muestra en la siguiente figura 9.

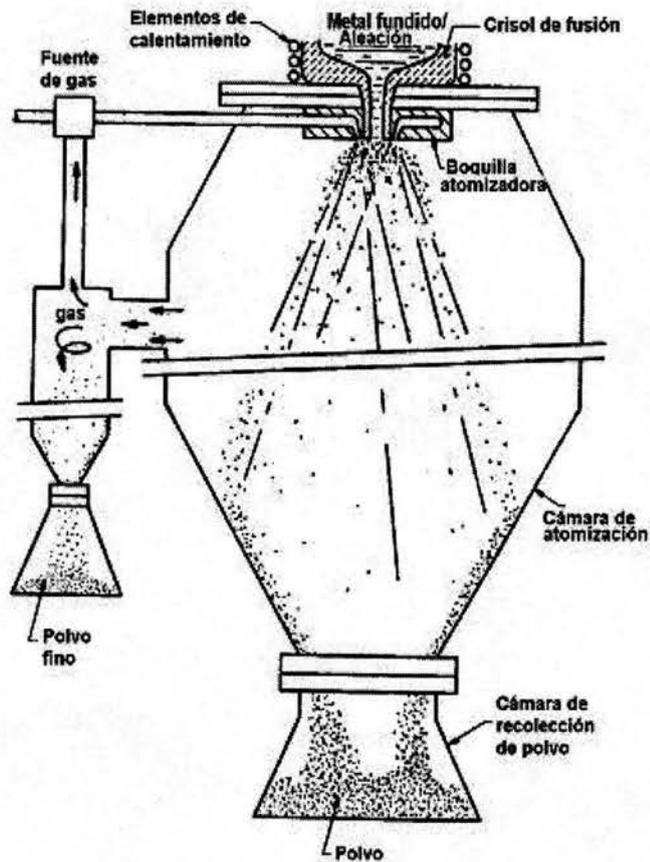


Fig. 9: Esquema de un atomizador de gas en forma vertical.

Las variaciones básicas, en los procesos de atomización con gas, es la dirección del haz del metal líquido a ser atomizado; que sí el haz del metal líquido a ser desintegrado está en dirección horizontal o vertical. En la mayoría de los procesos de atomización con gas, el flujo del metal líquido se alimenta en dirección vertical. En la atomización con gas horizontal es normalmente usada para metales y aleaciones de baja temperatura. La atomización con gas vertical es normalmente usada para metales de alta temperatura, se ha empezado a usar gases inertes como fluido en la atomización.

Atomización horizontal – vertical:

Otra forma de técnica de atomización, se refiere a una combinación entre la atomización horizontal y vertical (atomización HV), este modelo fue introducido por Anval Nyby Powder AB (ANPAB) que es una subsidiaria de Valinox SA, Paris, Francia. Este proceso se lleva a cabo con un bajo consumo de gas, también requiere una presión baja de

gas y es posible producir finos polvos. En el proceso de atomización se usan tres controles independientes de gas. Ellos están en un horno de gas a presión, una espuma de gas a presión en el tubo vertical de cerámica y una presión de atomización de gas. Un dibujo esquemático de la atomización con gas horizontal – vertical se muestran en la siguiente figura 10.

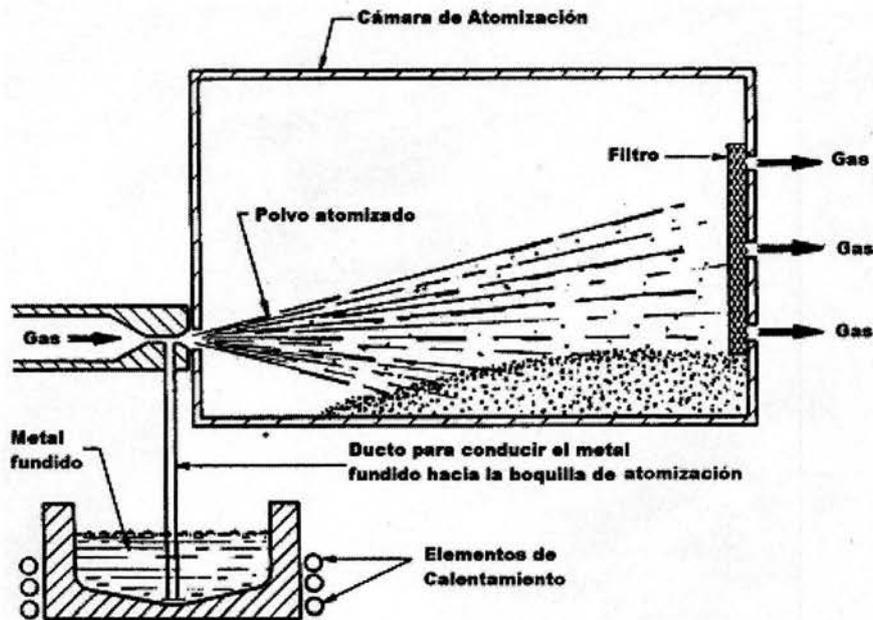


Fig. 10: Esquema de un atomizador de gas vertical y horizontal.

En este proceso, una plataforma dentro de un horno es elevada hacia un tubo de cerámica a través del cual es añadido un burbujeo de gas. Esto crea una nube de gas y de acero, la cual entra dentro de la parte horizontal de la boquilla. Cuando la nube entra dentro del área de atomización horizontal, el tanque del tercer gas aplica la presión de atomización con gas, la cual desintegra la nube aleada en fino polvo. Las partículas de metal no tienen el mismo grado de aceleración como el gas, causando una “fuerza de arrastre” que es la futura causa de desintegración. La eficiencia del proceso la determinan: la presión de gas en el horno, la presión de gas nebulizado en el tubo cerámico vertical y la presión de gas de la atomización.

Algunos polvos de acero y aleaciones de base níquel han sido producidos por este proceso. Un ejemplo típico de los parámetros del proceso para la atomización de súper aleaciones en base al níquel, Ninomic 80^a por la Aslund and Tingskog es como sigue: 1 500 Kg de níquel fueron atomizados usando una presión máxima de gas de 0.7 M Pa (7 bar); el

rango del flujo del metal fue de 1.5 Kg/s (200 lbs/min) y el consumo de gas fue de 0.07 Nm³/s (250 Nm³/h). El polvo fue juntado en argón el que tenía un contenido de oxígeno de 95 ppm. El promedio del tamaño de grano de polvo fue de 54 μm y la forma fue esférica.

La función principal de la alta velocidad del gas es de incrementar la velocidad de la caída libre del metal líquido en un arreglo llamado precisamente “Caída libre” y otro arreglo es cuando el punto de contacto es justamente entre la boquilla del metal líquido y la salida del flujo de gas, llamado “Confinado”, como se muestra en la siguiente figura 11.

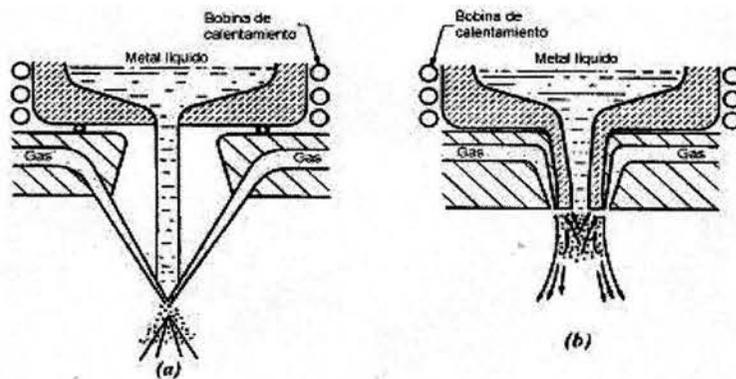


Fig. 11: El esquema muestra el diseño de dos tipo de boquillas para la atomización con gas: (a) configuración de doble flujo (caída libre) y (b) configuración de anillo perforado (confinado).

El modelo comúnmente aceptado para la atomización con gas convencional involucra la formación de una lámina estable y delgada la que ondula por la presión del gas; esta lámina después se torna en pequeñas barras cilíndricas mismas que luego se rompen en un pequeño número de gotas alargadas denominadas “ligaduras”, que enseguida se rompen en pequeñas gotas que van a tomar la forma esférica. Una vista esquemática se muestra en la siguiente figura 12.

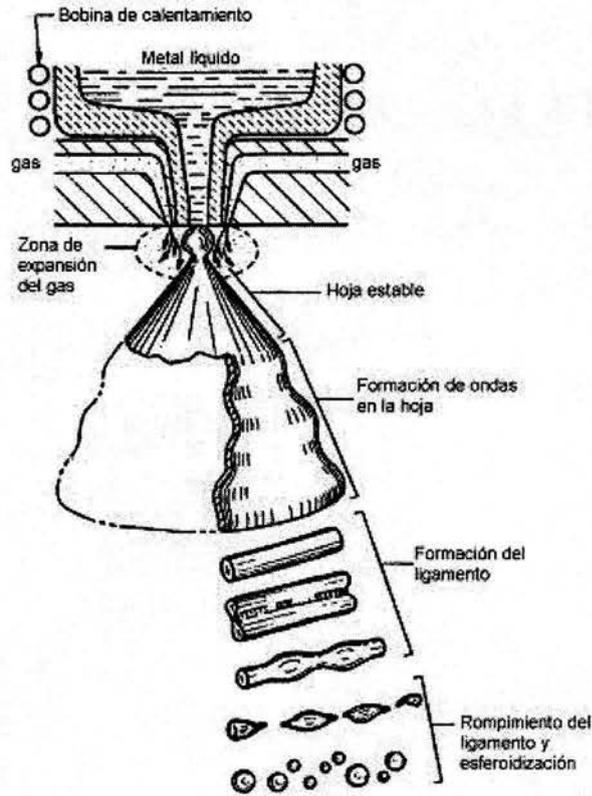


Fig. 12: Esquema de las etapas por las que pasa el haz del metal fundido para ser desintegrado en partículas de polvo esférico durante la atomización con gas.

El tamaño de la cámara debe ser lo suficientemente grande para que las partículas producidas tengan un vuelo libre a través de la cámara y solidificar primero antes de chocar con la pared de la cámara.

La función principal del gas es: romper el haz de metal líquido en pequeñas partículas. Pueden surgir problemas en la estabilidad del haz de metal cuando se aplica una alta velocidad de gas o un ángulo agudo para tratar de producir partículas finas. Estas partículas finas pueden ser generadas por un alto flujo de gas, una alta temperatura de fusión del metal y los diferentes tipos de flujo del gas y por último solidificar esas partículas por enfriamiento rápido. Los intervalos de enfriamiento obtenidos son bajos y las gotas tienen más tiempo para asumir, más o menos, una forma esférica. Para un largo período de enfriamiento se necesita utilizar una cámara de atomización grande. El proceso es usualmente llevado en forma vertical, pero también puede ser en forma horizontal o en

forma vertical hacia arriba, el método horizontal es normalmente usado para el aluminio. El enfriamiento lento da como resultado una forma de partícula más regular, pero la forma depende de la tensión superficial del metal.

En teoría cualquier gas puede ser usado; el aire es usado para el aluminio y se usa nitrógeno cuando existen problemas de oxidación. Un requerimiento esencial es que este libre de nitruros como es el caso de las aleaciones del níquel y en súper aleaciones en base de cobalto con aplicaciones aeroespaciales para este caso se usa el gas argón. El helio regularmente es caro, tiene uso por que es el medio que provee un enfriamiento más rápido.

Parámetros de la atomización con gas:

Es de importancia particular, en el proceso de fabricación de polvo metálico, la relación que existe entre las propiedades del polvo y los parámetros de la atomización. Esta atomización se puede llevar a cabo por medio de un flujo de: aire, vapor, gas inerte, ó gas reductor como él hidrogeno a presión.

Se han realizado estudios teóricos y experimentales, basados en la mecánica de fluidos y la transferencia de calor, con el objeto de conocer los mecanismos de formación de gotas, su respectiva solidificación y además de las relaciones de parámetros entre en los proceso y el polvo obtenido.

Este proceso puede emplearse para metales y aleaciones cuyo punto de fusión sea entre 600 y 800 °C como es en el caso del aluminio que funde a 660 °C. En estudios recientes se ha hablado mucho de un procedimiento que permite la preparación de polvos metálicos y de aleaciones de cualquier finura y en particular de aquellas aleaciones en cuyos componentes en estado sólido no forman compuestos ni cristales mixtos.

Variables de proceso de la atomización:

a.- Propiedades del metal fundido:

1. - Viscosidad.
2. - Tensión superficial.
3. - Composición química.
4. - Temperatura de fusión. Es de máxima importancia la exacta temperatura de fusión del metal.

5. - Producto. El aluminio vaporizado se emplea en la pirotecnia y para el recubrimiento de acero con una capa protectora.

b.- Flujo del metal fundido.

- 1.- presión ferrostática del metal. Para mantener un flujo de metal constante también es importante mantener constante el nivel del metal fundido en el crisol y la posible agitación para evitar taponaduras.
- 2.- Altura del chorro. Es de suma importancia mantener el chorro del metal en condiciones constantes.
- 3.- Impacto del flujo.
- 4.- Geometría de la boquilla.

c.- Geometría del flujo.

1. - Ángulo de apertura.
2. - Número de flujos.
3. - Localización del flujo.

d.- Características del flujo.

1. - Presión.
2. - Temperatura. La temperatura del flujo de impacto también es importante. El gas para este uso debe ser previamente calentado hasta la temperatura de fusión del metal y el gas es inyectado por medio de una tobera.

Se puede suponer que el vapor ó el gas a presión ejercen sobre el metal una acción oxidante extremadamente intensa; sin embargo esto no se produce debido a que los gases que salen de la tobera al dilatarse producen un rápido enfriamiento. En el caso del aluminio solo puede ser oxidado muy ligeramente.

El enfriamiento de la atomización es provocado por uno ó dos flujos controlados, como es definido en los trabajos de análisis de los procesos estudiados; en este enfriamiento

3. - Rango de masa del flujo.

4. - Viscosidad.

5. - Densidad.

Cuidados.

Cuando el flujo a presión no es un gas inerte debe tenerse mucho cuidado de una combustión espontánea, por la oxidación del metal, cuando el metal se ponga en contacto con el aire.

2.c.3.III. - Atomización con agua.

Este es el proceso mayormente usado para la fabricación de polvos, por que este proceso es más económico, se producen polvos altamente irregulares ya que las partículas tienen poco tiempo para tomar la forma de esfera debido a la rápida solidificación por extracción del calor por el agua, en comparación a la atomización normal con gas, los polvos tienen forma cercana a la esfera y son requeridos para la compactación en frío de dados rígidos, por que tienen su excelente compresibilidad, pero su densidad aparente es baja, por este proceso hay un alto volumen de piezas fabricadas con polvo metálico obtenido. Esta es una de las técnicas más populares para producir polvos de metales y aleaciones no reactivos. El intervalo de calor extraído por este proceso es bastante alto.

En la atomización con gas involucra un flujo de gas homogéneo, en la atomización con agua involucra un pequeño chorro, gotas de líquido a alta velocidad que estarán impactando el metal fundido (Fig. 13).

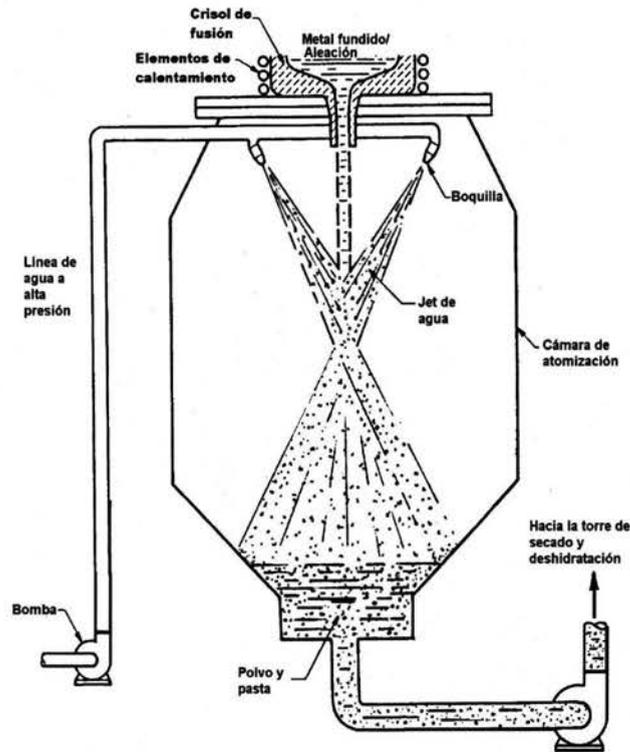


Fig. 13: Vista esquemática del proceso de atomización con agua.

Se ha reportado que para la atomización con agua de polvos de acero se use una presión de agua de 1.7 M Pa para que resulte un polvo con una media de tamaño de partícula de 117 μm comparado con la media de tamaño de partícula de 42 μm cuando fue usada una presión de agua de 13.8 M Pa. Cuando un intervalo de presiones que van desde 5 hasta 20 M Pa es usado esto producen un polvo fino. “Pacific Metals” de Japón recientemente ha iniciado una producción de polvos muy finos por atomización con agua usando presiones arriba de 70 M Pa. El promedio del tamaño de esas partículas es de 10 μm . Esos polvos son ideales para la inyección de moldes. Muchos polvos son producidos y cada uno tiene sus propiedades de diseño. En la actualidad se usan dos haces de flujo de agua y el ángulo de los flujos es opuesto entre ellos; el volumen, la presión del agua, el espesor del haz del metal y el grado de sobre calentamiento todo esto afecta el resultado final y puede ser optimizado para cada diseño. En el caso del aluminio los parámetros del

proceso son relativamente menores ya que las propiedades del aluminio son menores que las del acero y así mismo con menor presión se pueden obtener polvos muy finos.

La atomización con agua tiene dos ventajas con relación a la atomización con gas. Primero, las gotas de agua impactan a alta velocidad por la presión con que se inyecta este fluido a través de la salida de la boquilla y tiene una orientación desordenada. Segundo, el agua tiene una alta capacidad de enfriamiento lograda por dos aspectos; su densidad y calor específico son mayores que el gas.

El aparato mostrado en la figura 13 consiste en flujos de agua que usualmente vienen a través de salidas múltiples de flujo o un anillo, directos hacia el haz del metal fundido de la aleación. Las variables clave en la influencia del proceso son: a) el sobre calentamiento del metal y la presión del agua (son controles de la velocidad del agua). Una presión alta de agua resulta en un polvo con un tamaño de partícula muy fino, b) otro parámetro importante es el diámetro de salida del crisol que contiene el metal fundido, c) el flujo del metal y d) el ángulo de aplicación del flujo de agua. La distancia entre la boquilla del fluido atomizador y el metal no es crítica sí no que no se vea disminuida su energía tan rápidamente. Sin embargo, esta distancia debe ser minimizada para mantener el sobre calentamiento del metal. A continuación se presenta un esquema de cómo se vería una fabrica de polvos metálicos:

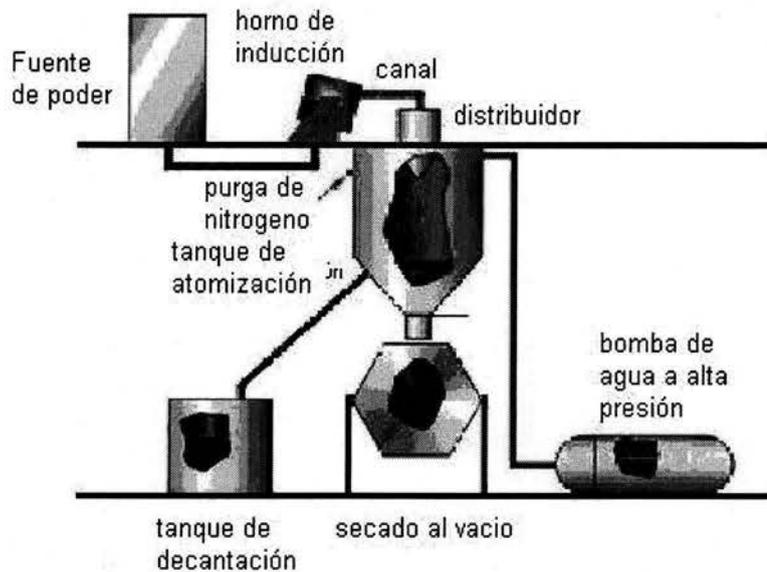


Fig. 14: Diagrama esquemático de la fabricación de polvos por atomización.

Algunas de las alternativas conocidas son usadas o propuestas en la literatura de patente y son de cuatro flujos en V o sea dos pares opuestos de flujo en el ángulo correcto, un número largo de arreglos de flujos en círculo y una boquilla de flujo circular dan un cono completo de agua. Una patente reciente describe un arreglo primario de atomización formado por una cortina de agua lo que incrementa el intervalo de enfriamiento. De acuerdo con los autores, la relación entre el diámetro medio de partícula y la presión de atomización para las dos configuraciones de boquilla esta dada por las siguientes ecuaciones:

$$D_{mp} = 114 P^{-0.58} \quad \text{para la figura de cono.} \quad (2)$$

$$D_{mp} = 68 P^{-0.56} \quad \text{para la figura en V.} \quad (3)$$

Donde D_{mp} es la media del diámetro de partícula y P es la presión de atomización. Las dos ecuaciones están basadas en los resultados de la atomización de una aleación de Fe – Ni, Acero al carbono, acero de herramienta de alta rapidez y níquel puro.

Los procesos de atomización con agua a alta presión son un importante desarrollo encaminado a producir polvos en un intervalo 10 μ m. La demanda de esos polvos finos sé a incrementado, especialmente por la urgencia de polvos para moldeo por inyección como un camino importante para la fabricación de diferentes piezas. La expectativa de atomización con agua a alta presión puede llenar el hueco entre la demanda y la oferta de polvos baratos para tamaños de partícula de 10 μ m.

La atomización con agua provee polvos muy finos. El proceso también se puede habilitar para producir un amplio intervalo de tamaños de partículas, distribución de tamaños y densidad aparente del polvo.

La gota de agua después de chocar con la película del metal líquido inmediatamente se evapora. A este término se la llama “mecanismo de raspar” lo cual ocurre durante los eventos de la atomización, ver ilustración esquematizada en la figura 15.



Fig. 15: esquema de los pasos involucrados en el mecanismo de raspado del metal en la atomización con agua.

Grandzol⁽¹²⁾ determinó una simple relación entre el promedio de tamaño de partícula D ($m\mu$) y la velocidad de agua u_a (m/s), ésta fue modificada después por Grandzol y Tallmadge⁽¹³⁾ a la ecuación:

$$D = \frac{S}{u_a \text{ sen } \alpha} \quad (4)$$

Donde α es el ángulo entre el eje del flujo de agua y el eje del haz del metal fundido en grados y S es la componente normal de la velocidad. Esta ecuación determina tamaño promedio final de las partículas.

La atomización es extensamente usada para producir polvos para herramientas de alta velocidad. Sin embargo, la contaminación de materiales cerámicos en el metal es lo más inconveniente en esos metales. La filtración de esas formas cerámicas se ha investigado recientemente utilizando una malla de zirconia sintética como un filtro el cual debe soportar el metal fundido a una temperatura de 1680°C (1953°K). Ese filtro debe ser posicionado antes del distribuidor del atomizador. El distribuidor debe ser precalentado a 1000°C (1273°K) para prevenir choques térmicos. El uso de esos filtros cerámicos provee la oportunidad de producir polvos limpios en la atomización con agua.

La atomización con agua ha sido usada para producir polvos de acero en aleaciones tratables térmicamente para la producción de partes con mayor precisión dimensional. Los nuevos desarrollos de aceros se conocen como Acero Mannesman, que consiste en una aleación de polvos de Fe – Ni – Mo con una adición elemental de grafito y cobre. El uso de níquel, que no tiene una gran afinidad por el oxígeno, da como resultado polvos que no requieren una sub secuencia reducción al vacío, ya que no es necesaria y es un gran factor económico.

Sin embargo, desarrollos recientes de atomización con agua a alta presión tienen un éxito al producir polvos muy finos.

El polvo es separado del agua usando un filtro o alguna otra separación que usualmente involucra vacío. El secado siguiente también se trata forzando el polvo a través

de un horno o a través de un secador termo – venturi. Los polvos producidos por este método inevitablemente adquieren una película de óxido en la superficie de las partículas y en algunos casos el polvo debe de llevar un tratamiento previo de reducción.

Atomización con gas y agua

La necesidad de producir tamaños de partículas finas ha provocado el desarrollo de la atomización en dos etapas. El proceso realiza la atomización en el flujo del metal. La atomización con gas generalmente produce partículas esféricas. Mientras que la atomización con agua produce partículas con formas irregulares pero tiene un alto rendimiento de producción, el inconveniente es que el polvo resulta con alta contaminación de óxidos en su superficie. Como la proporción de partículas esféricas se incrementa, la compresibilidad del polvo decrece. Este proceso produce polvos los cuales tienen la forma deseada. También, el contenido de oxígeno en los polvos obtenidos por este proceso es mucho menor que en los polvos de la atomización con agua.

El proceso de atomización en dos etapas ha tenido un potencial de proveer polvos finos y limpios donde la forma del polvo puede ser controlada por algún grado de proximidad de los dos flujos de fluidos. El control del tamaño y la forma de la partícula provee una oportunidad de producir polvos los cuales sean ideales para el moldeo de inyección de polvos.

2.c.3.IV. - Atomización con aceite.

Este proceso vence la oxidación superficial en las aleaciones de aceros, y ha sido desarrollado recientemente en Japón, para el proceso es usando un aceite parafínico (kerosén) en sustitución del agua, recientemente se han tenido que usar aceites sintéticos como el fluido de choque en vez del agua para combatir los problemas de altos contenidos de oxígeno como en los procesos de atomización con agua. La atomización con aceite fue usada como un medio de atomización para aceros grado herramienta y de medio y alto carbono. Dicho proceso combina las ventajas de un alto intervalo de enfriamiento (más rápido que la atomización con gas) y un bajo contenido de oxígeno (más bajo que los contenidos de oxígeno en los polvos obtenidos de atomización con agua). Sin embargo en

aceros de bajo contenido de carbono es necesario remover el carbono por un tratamiento de hidrógenos húmedo a alta temperatura. El proceso de atomización con aceite, sin embargo, es útil para producir polvos de acero de medio y alto carbono. En esos casos la tolerancia del carbono es alta y esos polvos pueden ser usados con un contenido de oxígeno de 300 ppm. Cualquier cambio en el contenido de carbono en la atomización puede ser tomado dentro de las cantidades del acero de medio y alto carbono, pero es extremadamente difícil con aceros de bajo contenido de carbono sin una aceptación cercana de un mayor contenido de oxígeno en el polvo.

El flujo de metal fundido es atomizado por cuatro flujos de aceite a alta presión. Después de la atomización la mezcla de polvo y oxígeno formada es seguida por un asentamiento de pocas horas, después de lo cual el aceite es drenado y el polvo es removido del aceite por una sedimentación secundaria. El exceso de aceite puede ser removido en un tanque usando aire comprimido. Las alternativas que son viables e incluyen el uso de extracción del aceite con solventes o con aire caliente, gas inerte o atmósferas de gas reductor. Entre esas alternativas, se ha encontrado que un tratamiento de calentamiento a baja temperatura en una atmósfera protectora remueve el aceite en forma más eficiente sin afectar la micro estructura. En el calentamiento del polvo la temperatura es suficientemente alta y remueve el aceite sin que ocurran los fenómenos de difusión, siendo este el mejor camino para separar el aceite.

Los procesos de atomización con aceite pueden ser aplicados en el caso de aceros de alto carbono, aceros de alta velocidad, acero para cojinetes, etc. La consolidación de este material exhibe una distribución fina y homogénea de carburos, la que resulta en muy buenas propiedades mecánicas.

En este punto las propiedades del aceite a ser usado en la atomización deben ser mencionadas y estas deben ser comparables con las del agua. La viscosidad del aceite debe ser baja a temperatura ambiente, el punto de ebullición debe ser alto, el aceite debe ser mineral y no tóxico, tendrá bajo contenido de azufre y debe ser reciclable.

En efecto, este es un proceso viable, económico e interesante para producir polvos de materiales ferrosos con un alto contenido de carbono con la presencia de elementos formadores de carburos. El rango de enfriamiento es alto y es equivalente al rango de enfriamiento en el proceso de atomización con agua. La necesidad de tener un

bajo el contenido de oxígeno lo hace un proceso muy atractivo. Algunos de estos polvos ya se encuentran en el mercado.

Por lo general los procesos de atomización y reducción son los más comúnmente usados en producción de alto tonelaje, mientras que los procesos de molienda y electrólisis son procesos primarios de atomización dado que provee capacidad de producir polvos de aleaciones y permite un gran control sobre las propiedades del polvo.

Mecanismos en la formación de gotas de metal

En el proceso de atomización se ven involucrados al mismo tiempo muchos fenómenos y principios como: los fenómenos de transporte, cinética y termodinámica. Las preguntas más importantes se refieren, a lo relativo con la dinámica de fluidos. Para el desarrollo de la formación de gotas se ha agregado una evidencia directa, que es el tomar fotografías durante el proceso, esto evidencia indirectamente las características físicas del polvo después del enfriamiento.

A.- Atomización con gas.

Por medio del uso de fotografías, es posible detener la acción de una atomización con gas. Las fotografías fueron tomadas con una cámara de 35 mm, un lente de 55 mm y un foco de 5.6 mm con un tiempo de exposición de 10^{-3} seg. En ellas se pueden observar tres zonas (como se muestran en una imagen similar a la de la figura 11):

- 1ª zona. Superior.- En el que se ve el chorro de metal fundido y que por acción del gas este empieza a ondearse.
- 2ª zona. Central.- Donde se observa el choque entre los dos flujos (de gas y de metal fundido).
- 3ª zona. Inferior.- Donde se evidencia la trayectoria de pequeñas partículas individuales.

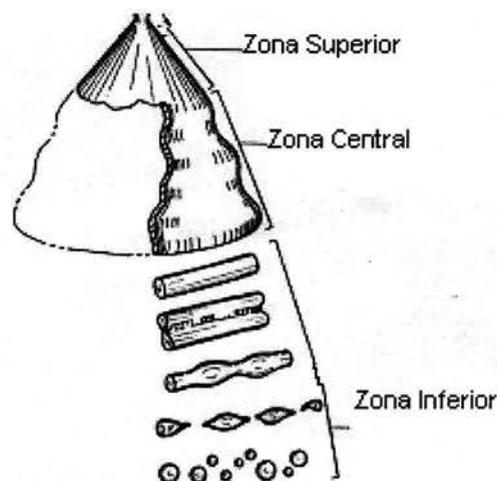


Fig. 16: esquema de las zonas en una atomización con gas.

El uso de fotografías ha permitido estudiar los cambios de oscilación entre la zona de chorro del metal y las velocidades en la zona inferior.

La velocidad de las gotas de metal en la zona inferior parece ser una función de la distancia desde el impacto, en el intervalo de distancia entre 0.1 y 0.4 m.

También se puede observar en el impacto, la presión del gas y la naturaleza del flujo. Cuando se incrementa la presión del flujo se incrementa la turbulencia de las gotas resultando en una partícula más fina.

Entonces para observar la zona superior y la zona inferior son convenientes las fotografías, pero aún el uso de las cámaras fotográficas no es satisfactorio para detener la acción en la zona central ó de impacto, donde el haz de metal se rompe y ocurre la aceleración. Para detener la acción en la zona de impacto se utiliza una cámara de vídeo de alta velocidad con 1000 a 4000 exposiciones por segundo.

Usando un lente especial que provee un amplio campo de observación y una película de alta velocidad se puede mostrar la descomposición en el punto de impacto. Con un lente mayor se ve un acercamiento del campo; la película de alta velocidad muestra desde una simple partícula hasta múltiples partículas agregadas que fueron formadas en el rompimiento de gotas individuales.

Estudios de fotografías de una atomización con gas fueron reportados en 1973. Usando una cámara de alta velocidad y una luz parpadeante ó iluminación estroboscópica, donde fue estudiada la atomización de plomo líquido a una temperatura de 413 °C. El cono formado que se observa en el punto de fractura se hace inestable y hace oscilar en forma cíclica al chorro de metal fundido.

El último mecanismo involucra cinco pasos en secuencia:

1. - Crecimiento de las ondas y la formación de las hojas.
2. - El rompimiento de la hoja en fragmentos.
3. - Crecimiento de las variaciones a lo largo del espesor.
4. - Rompimiento de los fragmentos en gotas. y
5. - Esferoidización de las gotas.

B.- Atomización con agua.

Durante la atomización con agua, se observan tres zonas (Haz del metal, rompimiento y zona baja) similares a la atomización con gas, mientras que la solidificación en la atomización con gas es deseable que ocurra en la zona baja, en cambio, en la atomización con agua la solidificación ocurre probablemente en la zona de rompimiento debido a la alta capacidad de enfriamiento del agua. Esta precipitación tiene gran ocurrencia de partículas irregulares durante la atomización con agua. Esas fotografías de la zona de rompimiento son más interesantes en la atomización con agua.

Grandzol⁽¹²⁾ intentó tomar las fotografías de la atomización con agua pero se dificulta su obtención con películas ordinarias, por la formación de la niebla originada por el vapor de agua en la cámara de enfriamiento. Una película infrarroja proporciona evidencias claras de la forma de oscilación mostrada por el haz del metal líquido arriba del rompimiento. La zona de rompimiento no es clara. Para mejorar la claridad se usó un obturador rotatorio el cual reduce el tiempo de exposición a 10^{-4} seg. Eso no mejoró en mucho la claridad.

En un ensayo realizado a partir de películas infrarrojas, bajo la adición de agua a 50 m/s, la velocidad medida de las partículas del metal fue de 15.3 m/s.

Basados en las pruebas visuales como las fotografías y las características del polvo observadas en este estudio, es claro que los dos pasos básicos involucrados en la atomización son el rompimiento y el enfriamiento. Como se resume en las tablas II y III siguientes, en la tabla II se relaciona desde el rompimiento del haz a la formación de gotas, mientras que en la tabla III se relaciona desde el enfriamiento a la formación de una partícula sólida.

Tabla II. Dos pasos básicos observados:

Haz del metal líquido.	1. - Formación del Tamaño de partícula.	Formación Del Sólido.
Resultados:	a) Tamaño de partícula. b) Forma inicial.	a) Mismo tamaño. b) Forma final.
Mecanismos:	a) Punto de ruptura (inicial). b) Punto de ruptura (secundario)	a) Enfriamiento. b) Superficie lisa c) Oscilaciones

Tabla III. Mecanismos especiales observados:
Pasos básicos

Tipos de Atomización:	1. - Formación del tamaño de partícula	2. - Formación del sólido
Mecanismos de la atomización con agua	a) Punto de ruptura inicial al impacto de las gotas b) Forma inicial influenciada por la evaporación de agua.	a) Superficies rugosas por un tiempo corto de solidificación b) Superficie lisa ocurrida por un largo tiempo de solidificación.

Los fenómenos de transferencia de calor también son importantes pero no serán tratados en este estudio. El tercer tipo de fenómenos referidos anteriormente, la reacción química y termodinámica merecen atención por la importancia del contenido de oxígeno y otras propiedades; este estudio no está dirigido a las reacciones químicas.

Consideraciones teóricas

Como se ilustró en los cuadros anteriores, el punto de rompimiento del haz de metal fundido en gotas involucra la dinámica del fluido mientras que la solidificación de las gotas en partículas de polvo involucra una transferencia de calor. El primero controla el tamaño de la partícula y el último controla la forma de la partícula. En esta sección la dinámica del fluido y la transferencia de calor son analizadas en los dos tipos de atomización (con gas y agua).

Dinámica del fluido.

A.- atomización con gas:

El proceso de rompimiento del haz de metal líquido involucra la formación de laminillas con una subsecuente separación de estas en pequeños cilindros. El rompimiento de estos delgados cilindros en gotas fue descrito en primera instancia por Rayleigh⁽¹⁴⁾ involucrando el flujo y encontró la siguiente relación:

$$d = 1.88 d_L \quad (5)$$

Donde: d es el diámetro de la gota y d_L es el diámetro de la ligadura.

En 1973 se presentó una corrección a la ecuación:

$$d = 1.88 d_L (+3 \varphi)^{1/6} \quad (6)$$

Donde φ es una función de $d_L^{-1/2}$ además de: la viscosidad del líquido, la densidad y la tensión superficial. Por que d_L aparece como $d_L^{1/12}$ en la corrección del factor de la ecuación, mientras tanto en la relación entre d y d_L esta dada adecuadamente por la ecuación anterior.

También es presentada, en 1973, una ecuación para el diámetro de la ligadura formada desde una lamina obtenida a partir de metal líquido.

$$d_L = 0.961 (h^2 x^2 \phi_1 / u^4)^{1/6} [1 + 2.6(h x u^7 \phi_2)^{1/2}]^{1/5} \quad (7)$$

Donde h es el espesor de la lamina, u es la velocidad relativa entre el gas y el líquido, x es la distancia a lo largo de la lamina, y ϕ_1 y ϕ_2 están en función de $d_L^{-1/2}$ del gas y del líquido. Datos experimentales muestran que el incremento de la velocidad disminuye el tamaño de la partícula. Así el segundo término involucrando la velocidad u tiene una ligera comparación con la unidad, y, convenientemente este término se reduce a:

$$d_L = \frac{0.961 [h^2 x^2 \gamma^2 / \rho_g \rho_l]^{1/6}}{u^{2/3}} \quad (8)$$

Donde γ es la tensión superficial entre el gas y el líquido, ρ_g es la densidad del gas y ρ_l es la densidad del metal líquido.

Combinando las ecuaciones 5 y 8, el tamaño de partícula es predecible:

$$d = \frac{1.81[h^2 x^2 \gamma^2 / \rho_g \rho_l]^{1/3}}{u^{2/3}} \quad (9)$$

En experimentos de la atomización del plomo con nitrógeno los tamaños de partícula abarcaron medidas desde 305 μm a 180 μm cuando se incrementa la velocidad desde 10.1 a 15.6 m/s. Estos datos están conformes con el factor de velocidad en el rango de $u^{-1.2}$ hasta $u^{-0.67}$, como se predijo en la ecuación 9. Al parecer el uso de esta contribución cualitativa es valiosa para estudios futuros.

Otros modelos reportados vienen con una ecuación para el diámetro de las ligaduras dada por dos investigadores Dromboski y Hooper en 1962.

$$d_L = 3(\lambda h)^{1/2} \quad (10)$$

Donde h es el espesor de las laminillas y λ es la longitud de onda en el rompimiento de la laminilla y λ se determina de la siguiente forma:

$$\lambda = 3\pi\gamma / \rho_g u \quad (11)$$

Combinando estas relaciones con la relación dada por la ecuación 5, nos da:

$$d = 17.3 (\gamma h / \rho_g u)^{1/2} \quad (12)$$

Esta formula predice el efecto de la velocidad como $u^{-0.5}$. Se requieren futuros trabajos para establecer el exponente de la velocidad y la influencia cuantitativa en las características del tamaño medio de las partículas.

B.- Atomización con agua.

El punto de rompimiento en el haz del metal líquido por impacto de gotas de un líquido a alta velocidad es más difícil de describir que la atomización con gas, por que existe una fase gaseosa en adición con el metal líquido y el haz del líquido atomizador. La

existencia de evidencia está limitada a fotografías a alta velocidad, la zona del cono del metal líquido se forma periódicamente, mientras que las láminas del líquido cambian y se descomponen a gotas. Sí este es un resultado generalizado, entonces el rompimiento durante la atomización con agua es básicamente un proceso acelerado de la atomización con gas.

Existen dos modelos potenciales del rompimiento del metal en atomización con agua. El primero involucra un mecanismo del haz del metal ó del cono, basado en el mismo modelo de Rayleigh⁽¹⁴⁾. Este modelo no ha sido desarrollado, pero puede ser expresado para predecir una relación para tamaños de partículas similares en atomización con gas (ecuación 9).

Un segundo modelo desarrollado por dos investigadores Grandzol y Tallmadge⁽¹³⁾ en 1973 está basado en la observación de gotas de agua hechas de un haz de agua impactando al chorro de metal. Los principios de conservación de la energía y de momentum son usados a lo largo de la evidencia experimental obtenida de fotografías. Considerando que las gotas de agua que están impactando la superficie del haz del metal son causantes de un número “n” de gotas de metal formadas. Como una primera aproximación, se asume que las gotas de agua transfieren todo su momento a las nuevas gotas de metal formado, *ejemplo* $M_a = M_m$, donde M es el momento y los subíndices a y m se refieren a las gotas del agua y del metal respectivamente. Expresando el momento en términos del diámetro de la partícula d, la velocidad u y la densidad ρ llegamos a:

$$d_m = d_a (u_a \rho_a / n u_m \rho_m)^{1/3} \quad (13)$$

Esta ecuación predice el tamaño de las partículas como una función del tamaño de las gotas de agua y la velocidad de las partículas de metal. La determinación del tamaño de las gotas de agua involucra una ecuación de un fluido a presión de atomización, para cualquier correlación en general empírica de la forma $d_a = B / u_a$ es viable, el valor de B fue determinado por Merrington y Richardson⁽¹⁶⁾ (1974). La velocidad de las partículas de metal es determinada fotográficamente para un experimento específico y una velocidad de agua. Un balance de energía cinética sugiere esto; la relación de la velocidad de las gotas de agua a la velocidad de las partículas de metal es constante para todas las velocidades. Esta

relación fue determinada por las fotografías dando un dato de: $u_a / u_m = 3.37$. Sustituyendo esta ecuación en la ecuación anterior nos da:

$$d_m = (B n^{-1/3} / u_a) (3.37 \rho_a / \rho_m)^{1/3} \quad (14)$$

Incluyendo las densidades del agua y del metal el valor de B fue determinado por Merrington y Richardson⁽¹⁶⁾ (1974), la ecuación anterior viene a dar:

$$d_m = 14,900 n^{-1/3} / u_a \quad (15)$$

Sustituyendo con la ecuación:

$$(u = C_n P^{1/2} = 1.3 P^{1/2}) \quad (16)$$

Donde: u = velocidad del flujo (m/s)

P = presión en la boquilla (N/m^2)

C_n = Coeficiente con valor teórico menor a $2^{1/2}$

Que relaciona la velocidad del fluido de agua desde la boquilla, la expresión para el tamaño de partícula viene a dar:

$$d_m = 11,461 n^{-1/3} P^{-1/2} \quad (17)$$

En esta sección, la dinámica del modelo de rompimiento para predecir el tamaño de partícula se desarrollo para la atomización con gas y con agua. Un modelo entre la dinámica del fluido y la transferencia de calor obtenida en la atomización con gas ha sido presentada. El modelo de la transferencia de calor para el enfriamiento en la atomización con agua es mucho más complejo por que el enfriamiento ocurre simultáneamente entre el metal fundido y la solidificación de partículas en la zona alta, y no es similar a como ocurre en la atomización con gas.

RESULTADOS TÍPICOS EN LA ATOMIZACIÓN:

Las consideraciones en los mecanismos de la atomización, se usan bajo el conocimiento de la importancia relativa de cada una de las muchas variables en la atomización. Esto es acompañado de algunas observaciones preliminares de ensayos experimentales.

Aparatos y procedimientos experimentales:

Una unidad piloto de atomización fue construida para este estudio y es mostrada en la siguiente figura 14 con un depósito de agua en el fondo. El sistema entero fue diseñado para operar a temperaturas arriba de 1760 °C, de acuerdo a las aleaciones base hierro. La cámara de enfriamiento fue adaptada con un soporte para permitir el proceso de fotografía. La boquilla que controla el flujo del metal líquido tiene 26 mm de largo con un diámetro interior de 6.4 mm. La boquilla del flujo de gas o de agua se soldó a cada uno de varios hilos y se derivó a un tubo múltiple. Cada una de las boquillas de salida provee una diferente apertura de ángulo α .

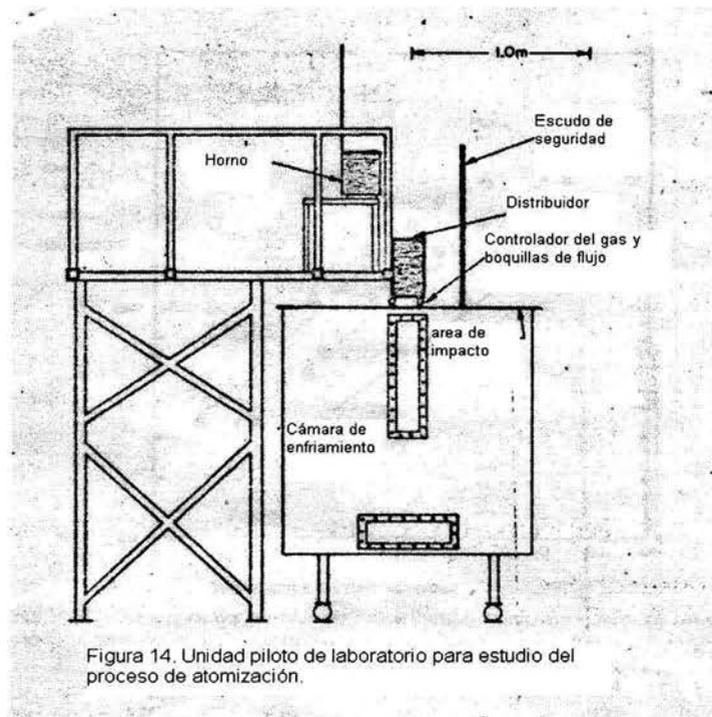


Fig. 17: Unidad piloto de laboratorio para el estudio de proceso de atomización.

Dos flujos de atomización fueron usados, en la cámara de enfriamiento fue acondicionada para permitir y facilitar el registro fotográfico además de favorecer la toma de datos para el modelo matemático. Los detalles de la construcción de la planta piloto y los resultados fueron dados a conocer en 1973 (en atomización con gas y con agua).

El metal es fundido en un crisol en cargas de 5 a 20 Kg puesto dentro de un crisol donde la temperatura fue controlada. El flujo de metal fue inducido a través de la boquilla que se encuentra en el fondo del crisol, fue atomizado por un flujo a alta presión desde un tubo múltiple, el polvo es enfriado con agua y colectado en un recipiente en el fondo de la cámara de atomización. Después de cada corrida, el polvo húmedo fue secado con acetona y medido con una malla de -40 para determinar el rendimiento. El sistema es operado con resultados repetitivos.

Resultados:

Los resultados preliminares de la atomización fueron presentados como datos en una gráfica del tamaño de partícula contra el por ciento del peso acumulado. La distribución es de logaritmo normal. El comportamiento fue encontrado en una abertura de rango entre las atomizaciones con gas ó con agua, y han sido reportados por Klar y Shafer⁽¹⁷⁾ en 1972 que fueron investigadores de este proceso.

a) Flujo de gas:

El nitrógeno fue usado como flujo de atomización por que es relativamente inerte y de bajo costo. Las boquillas en su forma de salida son estándar y son usadas teniendo las dimensiones de 1.16 por 7.8 mm. El efecto del gas a presión y la distancia de flujo (distancia desde la boquilla a la sima) dan algunas de las características del polvo al punto de contacto con el chorro del metal fundido.

En la atomización con gas, el incipiente fluido sale de la boquilla a una velocidad alta pero disminuye lentamente durante su viaje hasta el punto de contacto con el metal. La atenuación de esta velocidad se incrementa con la distancia al flujo de metal líquido. Por ejemplo basados en la salida de la boquilla la velocidad del flujo es de 308 m/s y a una distancia de 73 mm, la velocidad del gas al punto de contacto fue calculada y resultó de 62

m/s. Esta atenuación disminuye el momento del flujo para el punto del rompimiento del haz de metal fundido. El incremento en la presión del gas (incremento de la velocidad de salida de la boquilla y, por tanto, la velocidad del fluido al punto de contacto) disminuye el tamaño de la partícula. Así mismo, disminuyendo la distancia del flujo (desciende la atenuación y, por tanto, se incrementa la velocidad del flujo al punto de contacto) disminuye el tamaño de partícula.

En la atomización con gas, las partículas esféricas son producidas en muchos metales, en el caso del metal fundido el estudio presentado produce partículas cilíndricas teniendo grandes intervalos en una relación longitud / diámetro (L/D). Medidas a partir de fotografías de muestras de polvo en una fracción entre 100 y 140 mallas. De 50 a 80 partículas fueron medidas en cada muestra y el resultado fue promediado y de valores típicos de L/D entre 2 y 3, en la tabla siguiente se muestra ese incremento de L/D así como el incremento en la distancia del flujo.

TABLA IV: Efecto de la distancia en la atomización con gas y las propiedades de un polvo de acero:

Ensayo aceros:	1050	1060	1050
Distancia del flujo (mm):	53	73	99
Características de tamaño (malla -140)			
Tamaño medio (μm)	82	135	195
Diámetro (σ)	1.91	2.05	2.03
Producto (wt %)	92	90	67
Forma:			
Media L/D (fracción 100/140)	1.4	1.7	2.7
Propiedades de la muestra en volumen (malla -140)			
Densidad aparente (g/cm^3)	4.44	4.14	3.67
Tiempo de flujo (seg.)	16.0	20.6	31.6

Todos los ensayos fueron a una presión de 4140 MPa, 60° de ángulo de contacto y 7.7 Kg de muestra.

Las propiedades en volumen de las características del polvo también son dadas en la tabla anterior (IV). Incrementando la desviación desde la Esferoidización (por ejemplo $L/D = 1$) se disminuye la densidad aparente. Esto como es esperado desde el incremento de las irregularidades en las partículas de polvo incrementa la fracción ínter partículas e interfiere durante el movimiento de cada partícula con otra.

b) Flujo con agua.

Considerando que la atomización con gas es una difusión; atenuando el flujo de gas en una fase homogénea, la atomización con agua involucra pequeñas gotas de agua a alta velocidad impactando un chorro de metal fundido. Entonces esas gotas de agua tienen dos ventajas mayores comparadas con la atomización con gas: Primero, ellas impactan a alta velocidad por que la velocidad del fluido es alta a la salida de la boquilla y da una ligera atenuación. La atenuación del flujo de gotas de agua es dispersa y su alto momento viene a arrastrar lo fraccionado. Segundo, El agua tiene una alta capacidad de enfriamiento combinada con su gran densidad y su alto calor específico lo que solidifica rápidamente al metal fundido.

La presión de atomización de agua en la boquilla es usada para formar un flujo de gotas. Un ejemplo es el abanico plano de una boquilla de pulverización, la cual tiene una salida rectangular de 4 X 17 mm con un orificio de entrada elíptica de 4 X 6.5 mm. Con esa boquilla fue determinada la velocidad del flujo de agua como constante y es relacionada a la boquilla de presión por:

$$u = C_n P^{1/2} = 1.3 P^{1/2} \quad (18)$$

Donde u es la velocidad del flujo (m/s), P es la presión de la boquilla (Kg/m^2) y el coeficiente actual C_n es, como se espera, es justo abajo del valor teórico de $2^{1/2}$ para perdidas de fracciones de flujo a través de la boquilla. Una observación visual de las boquillas formadoras de gotas de agua con entrada de 5 mm de la punta de la boquilla

difiere el flujo de agua y el flujo de gas en términos de la dinámica del fluido.

El efecto de la presión de agua en el tamaño de la partícula de polvo es mostrado en la siguiente tabla V. El tamaño medio de la partícula decrece rápidamente con el incremento de la presión de agua, esto es, incrementando la velocidad del flujo de agua. En la misma tabla también se puede ver el despliegue, como se indica por la relación del diámetro dado por la ecuación:

$$\sigma = d(0.841)/d(0.5) = d(0.5)/d(0.159) \quad (19)$$

Donde $d(x)$ es el tamaño d para una fracción x del peso acumulativo.

La constante es muy cercana para cada nivel de presión. Los valores de σ (desviación estándar) están en el rango de 2.1 a 2.24.

TABLA V. Efecto de la presión de agua en las características del polvo de un acero 4620.

Presión MPa	1.72	3.45	13.8
Distribución del tamaño (wt %)			
Malla 60/100	35.9	18.7	5.1
Malla 100/140	22.4	15.9	7.3
Malla 140/200	15.7	15.2	11.1
Malla 200/325	16.2	22.2	20.5
Malla - 325	9.8	27.0	56.0
Características del tamaño (malla -60)			
Tamaño medio (μm)	117	74	42
Diámetro medio, σ	2.1	2.24	2.15
Rendimiento (wt %)	73.0	92.0	96.0

Todos los ensayos se hicieron con dos flujos, un ángulo del flujo 60° , distancia del flujo 60 mm, abertura del abanico de pulverizado con un ángulo de 32° , rango del flujo de agua de 1.8 Kg/s, y una muestra del tamaño de 8 Kg.

Las partículas típicas formadas durante la atomización con agua se observaron con mayor grado de esferoidización con una velocidad de flujo de 50 m/s que las formadas con una velocidad de flujo de 149 m/s. Por lo que se ve que incrementando la velocidad (ó presión en la boquilla) se aumenta el fraccionamiento irregular en la forma de las partículas.

RESULTADOS EXPERIMENTALES:

Las secciones anteriores proveen una vista superficial de la atomización, mostrando los paramentos de mayor importancia y sugiriendo algún mecanismo viable, la otra sección da una introducción a través de la dinámica del fluido y el análisis de transferencia de calor. En esta parte, los resultados experimentales se mostraron como una evaluación de los modelos analíticos del tamaño y forma de la partícula.

A.- Atomización con agua:

1. - Tamaño:

Un total de 22 experimentos fueron realizados con atomización con agua de un acero 4620. Una configuración de dos flujos fue usada, un flujo en abanico plano teniendo un ángulo de pulverizado entre 25° y 32°.

La temperatura de fusión del metal, que fue medida por un termopar de platino - rodio dentro del crisol, para el acero 4620 se mantuvo aproximadamente constante a un valor de 1710°C con un rango de +/- 20°C y un rango de variación del flujo de metal que nos puede suministrar por el diámetro de la boquilla de +/- 10%.

Condiciones fueron medidas directamente en el rango del flujo de agua, presión del agua, temperatura del metal, volumen del metal, y tiempo del flujo del metal. Desde estas cantidades experimentales, el rango del flujo de metal, velocidad del flujo de agua, momento del flujo de agua y energía cinética del flujo de agua se calcularon.

Se encontró que la distribución del tamaño no varió apreciablemente con la velocidad del agua o rango del flujo del agua ó el rango del flujo de metal arriba de los rangos estudiados. En lo futuro, puede aparecer que se extienda para todos los ensayos como fue aproximadamente constante a la razón diámetro de 2.25 +/- 10%, el cual tiene un error experimental. Esto se concluye, por lo tanto la amplitud en la distribución del tamaño puede ser considerada como una constante para las condiciones estudiadas. Esto es una importante simplificación, la que permite describir que el dato del tamaño usando es un simple parámetro del tamaño medio.

El efecto de la presión en el tamaño fue estudiado primero, por que la presión es un parámetro de control primario en la práctica comercial. El tamaño de la partícula decrece con el incremento de la presión, como se esperaba.

El problema con esta prueba, sin embargo, es que en ambas la velocidad y el rango de flujo cambian con la presión. Desde un punto fundamental, el estudio describe el efecto del intervalo de flujo y la velocidad independientemente. Entonces, al usar varias boquillas se estudia la velocidad como constante dentro de un rango de flujo y viceversa.

La influencia de la velocidad del flujo de agua a diferencia del intervalo de flujo en un rango especificado se ve que es razonable, la velocidad de las gotas de agua y la presión del agua están relacionados directamente, como lo define la ecuación 17.

Esto se adhiere favorablemente con el modelo de la ecuación 15. El efecto de la distancia del flujo fue estudiado a una velocidad constante de 79 m/s y una razón de flujo de agua de 0.91 Kg/s. No obstante la distancia se fue reduciendo desde la longitud normal de 120 a 60 mm el tamaño medio fue muy cercano casi idéntico (64 y 67 μm , respectivamente) y la diferencia de tamaño en el polvo fue virtualmente indistinguible. Basados en la constancia de la velocidad con la longitud del flujo de agua, estos datos también confirman la importancia de la velocidad del flujo (ó presión) como una variable fundamental.

La dependencia fundamental entre el tamaño de una partícula y la velocidad es un importante concepto de por que el parámetro de la presión esta reportado en todos los trabajos previos. La presión no aparece como un parámetro fundamental, particularmente por que esto esta descrito en las condiciones de la corriente de agua en el rango de la boquilla como en el punto de choque con el metal.

Los ensayos pilotos con un ángulo de contacto de 30°, 45°, y 60°, manteniendo otras condiciones constantes, el resultado es un decremento en el tamaño medio de 91, 80 y 64 μm , respectivamente. Esta tendencia es consistente con lo reportado por Gummeson⁽¹⁸⁾ (1972). La influencia en el ángulo de contacto α entre los dos flujos fue estudiada vectorialmente considerando la influencia de $\cos(\alpha/2)$ y $\sin(\alpha/2)$ gráficamente. Esto se encontró con la componente de la velocidad del termino seno ideal de los datos es mucho mejor que la componente tangencial de la velocidad o componente del termino coseno. La correlación del tamaño fue entonces modificada a:

$$d_m = \frac{2750}{u_a \text{ sen } (\alpha/2)} \quad (20)$$

Otros parámetros pueden variar pero, sin un rango estudiado, no se aprecia la influencia en el tamaño medio como fue observado. Esos parámetros son: razón del flujo de metal, la relación entre los flujos de agua y de metal, y un ángulo de rocío plano.

Tres o cuatro experimentos fueron hechos con cada uno de los otros metales usando un ángulo de contacto de 60°. En cada caso el promedio del tamaño medio fue satisfactoriamente descrito por:

$$d_m = A / u_a \quad (21)$$

Los valores del parámetro A (tamaño medio de partícula) para algunos metales está dado en la tabla siguiente junto con algunas otras propiedades. El tamaño medio es muy similar (+/- 20%) para metales altos puntos de fusión. La forma también fue estudiada fotográficamente y se encontró una variación aparente de la tensión superficial.

Tabla VI: Tamaño promedio de partícula para atomización con agua:

Metal	Acero 4620	Acero inoxidable 304	Fundición de acero	Cobre
Condiciones de atomización:				
Temp del crisol	1710	4650	1380	1240
Punto de fusión	1516	1413	1177	1082
Sobre calentamiento	190	240	200	160
Propiedades:				
Tensión superficial	1.8	1.8	1.0	1.4
Viscosidad	2.5	2.5	1.4	3.9
Tamaño medio:				
Parámetro A	5500	5000	3700	3800

Un estudio exploratorio de la influencia de las propiedades del fluido en el tamaño de la partícula basado en los metales de la tabla anterior, indica que el tamaño medio se puede incrementar con la viscosidad pero es insensible a la tensión superficial. Esto requiere un área de futuros estudios.

Kishidaka⁽¹⁹⁾ en 1972 presenta una correlación del tamaño, generalizada y empírica para dos flujos de atomización con agua del hierro:

$$d_m / D = Re_a^b We^c (W_a/W_l)^d \quad (22)$$

Donde D es el diámetro de la boquilla del crisol (ó del haz del metal), Re_a es el Número de Reynolds para el agua $\equiv D\rho_l u_a / \mu_l$ We es el Número de Weber $\equiv D\rho_l u_a^2 / \gamma_l$, W es la masa del flujo, u_a es la velocidad de las gotas de agua, μ es la viscosidad, ρ es la densidad, el sub índice "l" se refiere al metal líquido, el sub índice "a" se refiere al agua y b, c, d son constantes.

Los valores reportados Kishidaka⁽¹⁹⁾ en 1972 para las constantes son: $b = -0.57$, $c = -0.22$ y $d = -0.43$. Por los exponentes pequeños de W_a , la influencia del flujo de agua es casi inapreciable. Grandzol⁽¹²⁾ muestra que la ecuación anterior que puede ser simplificada por eliminación del diámetro del haz y la masa del flujo para obtener:

$$d_m = (a/u_a^{1.01})(\gamma^{0.22} \mu_l^{0.57} / \rho_l^{0.79}) \quad (23)$$

Para la atomización de hierro puro, esto se reduce a:

$$d_m = 9,000 / u_a \quad (24)$$

Las ecuaciones anteriores muestran un término agregado del efecto de la velocidad del agua en un modelo de la ecuación 15.

2. - Forma:

Muy pocos estudios sistemáticos y cuantitativos del efecto de los parámetros del flujo de agua en la forma del polvo han sido publicados. Uno de los pocos estudios fue hecho por Grandzol⁽¹²⁾ (1973) quien hizo un trabajo de exploración sobre los factores involucrados en la forma. La primer tarea fue la de definir cuantitativamente la forma del polvo la cual fue mostrada en la figura respectiva, Aquí es notorio que existen dos diferentes tipos de formas (lisa y esférica, rugosa e irregular) que aparecieron en esta y otras muestras, También estas formas no se prestaron para caracterizar los parámetros de la forma usados previamente, muchas con una forma esférica ó con una relación no igual a la unidad entre la longitud y el diámetro, Gandzol definió la forma como una fracción (Fi) de partículas las que son rugosas e irregulares como oposición a las que eran lisas y esféricas. La superficie rugosa es indicativa de un enfriamiento rápido, con algunos casos irregulares en partículas similares a las de carbono.

Cuando la fracción de partículas rugosas e irregulares es graficada contra la presión del flujo la dispersión es mayor, incrementando la presión resulta una fracción alta, como se esperaba. Cambios en el intervalo del flujo de agua y presión constante, por otro lado, no aparecen en el cambio de ésta fracción.

Gummeson⁽¹⁸⁾ reporto partículas esféricas que fueron favorecidas por el gran ángulo de apertura. Un estudio similar por Grandzol⁽¹²⁾ fue inclusive, tal vez de doble dispersión. Por ejemplo para ángulos de 30°, 45° y 60°, la fracción gruesa fue: 54, 77 y 57 % respectivamente. Mientras tanto, si el efecto de la velocidad y el ángulo de apertura son considerados juntos, entonces la fracción de partículas rugosas e irregulares resulta ser consistente al reporte de Gummeson⁽¹⁸⁾.

Resumiendo los resultados de esta sección, los datos obtenidos usando un acero 4620 y cuatro de los otros metales mostrados, la media del tamaño de partícula depende primeramente de la velocidad del agua y el ángulo del flujo pero esto no es de notable influencia por los cambios en el intervalo del flujo de agua u otras variables. Se observo que la proporción inversa entre el tamaño de partícula y la velocidad del flujo es consistente con las predicciones hechas por el modelo teórico de la atomización con agua.

B.- Atomización con gas:

En una sección anterior, un único modelo de dinámica de flujo- transferencia de calor fue dado para la predicción de la forma de la partícula en atomización con gas. La relación entre la longitud y el diámetro L/D fue usada para caracterizar la forma. Estos resultados fueron comparados con los resultados experimentales de 32 ensayos pilotos en acero. Esta aleación fue elegida por que resulta una partícula de polvo con valores altos de L/D .

En una serie de medidas hechas con regla de 75 partículas fotografiadas para una fracción de malla de 100/140, la relación L/D varió desde 1.06 a 5.44 para partículas individuales. La media aritmética y la desviación estándar (σ) desde la media normal fueron:

$$L/D = 2.60 \pm 1.08$$

En dos pruebas repetidas del mismo polvo, los valores medios encontrados son:

$$L/D = 2.61 \pm 1.10,$$

$$L/D = 2.69 \pm 0.98$$

Puesto que el promedio de error de las medidas hechas con regla es de aproximadamente 8 % en L/D , la técnica de L/D fue considerada repetible y realizable.

Para propósitos de correlación, los valores de L/D son comparados con un cúmulo de propiedades, densidad aparente y tiempo de flujo determinado usando pruebas de A.S.T.M. Donde la fracción de polvo esta dentro de la fracción de 60/80, 100/140 y 140/200 mallas. Graficando el tiempo de flujo contra la relación L/D muestra una relación lineal y con pendiente positiva para cada tamaño, dada por:

$$t = a(L/D) + b \quad (25)$$

Donde t es el tiempo de flujo en segundos, a es la pendiente y b es la intersección extrapolada. La pendiente a fue la misma (6.5) para los tres tamaños y la intersección b

varió desde 16 (para la malla 60/80) a 10.5 y 6.5 para la fracción de las mallas 100/140 y 140/200 respectivamente.

El efecto del tamaño en la forma del polvo atomizado con gas fue también estudiado con fotografías de fracciones de tamaños pequeños en los intervalos entre 230 mallas a 80 mallas, pocas partículas son esféricas mientras que partículas grandes tienen una relación L/D mayor. Partículas muy grandes en el rango de la malla 40/80 que también fueron tomadas. La variación de la densidad aparente y el tiempo de flujo con el tamaño de la partícula, también se muestran con el efecto esperado en el tamaño.

Habiendo establecido la relación L/D como una caracterización propia de la forma y mostrando su relación con una serie de propiedades, como una conducta de un estudio sistemático de los parámetros de la atomización. Los parámetros para caracterizar la forma donde la relación L/D para la fracción del tamaño 100/140 son: la densidad aparente y el tiempo de flujo para la muestra tomada de -40 mallas.

El efecto de la presión en la boquilla es sustancial en la forma, con un promedio de la relación L/D decreciendo; La magnitud de las propiedades muestra una similitud consistente con una tendencia hacia lo esférico (bajo tiempo de flujo, alta densidad aparente) y alta presión. Se espera que el efecto alto e inverso de la presión origine una forma irregular.

Como fue mostrado en la sección anterior la distancia del chorro tiene un efecto sustancial en la forma del polvo.

Se varió el intervalo del flujo de gas con el uso de una boquilla grande, con un orificio de 2.3 por 7.8 mm. Este flujo de gas fue de 0.36 Kg/seg a la misma presión; la influencia del rango de flujo de gas fue mínima, pero apreciable para los estudios. Incrementando el intervalo del flujo de gas, resulta que es consistente con el efecto de la presión descrito previamente.

Los datos sugieren que los parámetros de la forma L/D esta en el rango de 2.2 a 3.2. El modelo propiamente predice la influencia del tamaño de la partícula sobre la forma, comparando entre los datos del modelo y los resultados experimentales para otras condiciones, sin embargo, aparecen algunas discrepancias.

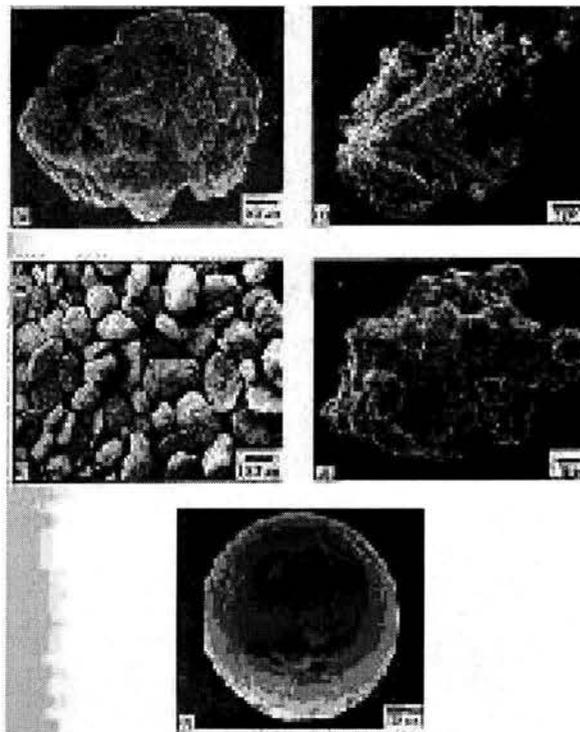
La atomización con gas de la aleación de acero de bajo contenido de carbono 4620, un acero al carbono 1020, un acero inoxidable 304, una aleación inconel 718 y cobre dan

partículas de forma muy cercana a la esférica. Por ejemplo, la media de los valores de L/D de 1.2 y 1.4 que fueron medidos en dos ensayos de aceros inoxidable y valores de 1.2 y 1.3 en ensayos de cobre. Las razones por la falta de evidencias de los ligamentos en esos polvos no están claras, pero son creíbles por las propiedades del flujo y el metal fundido que son substanciales.

Este capítulo ha considerado bastantes variables del flujo y otras variables las que influyen en las características del polvo. Se atendió directamente al parámetro más importante involucrado en los mecanismos de atomización, pero son extremadamente importante los aspectos que no se han discutido aquí es la influencia de mayores cambios en la geometría del flujo (diseño e implementación). La selección de la geometría del flujo es muy importante para la producción comercial y esta sujeto por la literatura patentada en este campo. Dos referencias excelentes en el diseño del flujo son Gummeson⁽¹⁸⁾ (1972) para el flujo de agua y Klar and Shafer⁽¹⁷⁾ (1972) para flujo de gas.

Como se notó previamente, una pequeña atención fue dada a los problemas de la estructura, incluyen el contenido de oxígeno, transferencia de masa, difusión, cinética química y el grano estructural. Esto es por falta de trabajos en esta área.

La Fig. 18: Muestra la comparación entre los polvos obtenidos por diferentes procesos:



La Fig. 18: Son fotografías de polvos obtenidos de diferentes metales y por diferentes procesos: a) Polvo de Fe esponjoso (Q. Red. decompuestos), b) Polvo de Cu dendrítico (Q. Electrodeposición), c) Polvo de Al en hojuelas (M. Molino de bolas), d) Polvo de Fe esponjoso (M. Atom. Con agua), e) Polvo Ni esférico (M. Atom. Con gas). (Fuente Atomization "The Production of the Metals Powder" A. Lawley, MPIF).

Algunos de los productos elaborados con polvos de aluminio son: estructuras de naves aéreas, aéreo espaciales, chumaceras de flechas, sellos metálicos o de materiales compuestos, bielas, engranes, etc. Un ejemplo de estos se muestran en la siguiente figura:



Fig. 19: Piezas obtenidas a partir de polvos metálicos. Ejemplos un engrane y una biela.

ESTA TESIS NO SALE
DE LA BIBLIOTECA

Conclusiones

En la atomización con agua de metales ferrosos y no ferrosos, se encontró que el tamaño medio de partícula depende primeramente de la velocidad del agua y el ángulo de flujo, pero el efecto del flujo de agua no es significativo. Esta respuesta fue predicha teóricamente usando un modelo de impacto de gotas.

Para estudios experimentales de la atomización con gas de acero, la forma de la partícula está controlada, primeramente el tamaño de la partícula y la distancia del flujo no está influenciado por cualquier extensión de sobre calentamiento u otras variables del proceso. Un modelo de forma se basa en el tiempo de enfriamiento y los modelos de formas resultantes fueron predichos de esta forma. son herramientas muy usadas, para estudiar los mecanismos de ruptura, la detención de la acción por medio de fotografías de alta velocidad.

Esos estudios son creíbles para la atomización con dos flujos, las variables fundamentales son de importancia primaria y algunas de importancia secundaria en las atomizaciones con agua y gas. Desde la observación de la formación y los mecanismos de enfriamiento de la partícula, fue posible desarrollar modelos para la predicción del tamaño y la forma en términos de los parámetros de la atomización.

Mientras tanto en futuros trabajos es necesario, si fuera posible desarrollar modelos que describan el trabajo de los muchos avances, importantes y fundamentales, para los estudios de la pasada década.

En base lo descrito anterior la conclusión a la que yo llego es que el método más apropiado para obtener polvos metálicos es el proceso de atomización; según el polvo que se requiera, para la fabricación de algún producto, se debe tomar la decisión de que tipo de atomización utilizar; considerando los aspectos productivo y económico se puede decidir rápidamente por el siguiente criterio: para partículas de forma regular y una distribución de tamaños cerrada usar la atomización con gas y para partículas de forma irregular y con una alta distribución de tamaños usar la atomización con agua.

BIBLIOGRAFÍA

- 1) Pere Molera Sola, "Conformación Metálica", 1991, MARCOMBO, S.A.
- 2) John A. Tallmadge. "Powder Metallurgy Process", 1982, Universidad de Drexel.
- 3) Mondolfo – Zneskal. "Engineering Metallurgy", 1955, Mc Graw Hill.
- 4) Gordon Dowson. "Powder Metallurgy. The Process and its Products", 1990, John Wood.
- 5) Howard A. Khun. "Powder Metallurgy Processing. New Tecnicas and Analyss", 1978, Academic Press, Inc.
- 6) Iinoya, Gotoh, Higashitani. "Powder Tecnology Handbook", 1991, Marcel Dekker, Inc.
- 7) Animesh Bose. "Advance in Particulate Materials", 1995, Butterworth – Heinemenn.
- 8) F. Skaupy. "Cerámica de los Metales", 1960, REVERTE, S.A.
- 9) Lenel, Fritz, V. "Powder Metallurgy", 1979, Hoeganaes Corporation, Riverton.
- 10) Yule, Dunkley. "Atomization of melts", 1994, Oxford University Press.
- 11) Alan Lawley. "Powder Metallurgy Processing", 1978, Academic Press Inc.
- 12) Grandzol, R.J. "Water Atomization of 4620 Steel and other metals", 1973, Ph. D. Dissertation Drexel. Ph. Pennsylvania.
- 13) Grandzol, R.J. and Tallmadge, J. A. Int. J. Powder Met. Powder Tech., 1975, Syracuse, New York.
- 14) Rayleig, Lord. Proc. London Math. Soc. 1898.
- 15) Dombrowski, N. And Hooper, P.D. Chem. Eng. Sci. 1962
- 16) Merrington, A.C. and Richardson, E.G. Proc. Phys. Soc. London. 1947.
- 17) Klar, E. And Shafer, W.M. In "Powder Metallurgy for High Performance Aplications"(Burke & Weiss, Eds.). 1972. Syracuse Unv. Press. Syracuse. New York.
- 18) Gummeson, P.V. In "Powder Metallurgy for High Performance Aplications"(Burke & Weiss, Eds.). 1972. Syracuse Unv. Press. Syracuse. New York.
- 19) Kishidaka, H J. Soc. Powder Met. 1972. Tokio, Japan.